

DIPLOMARBEIT ZELLULOSE AUS ABFALLSTRÖMEN

Potenziale für die Kreislaufwirtschaft
und Kohlenstoffbindung



Student: Dominique Maritz

E-mail: dominique.maritz@edu.teko.ch

Lehrgang: Dipl. Energie- und Umwelttechniker HF

Fach Dozent: Julian Dilmi

Fach Experte: Dr. Illias Hischier

Schulleitung: Terry Tschumi

Auftraggeber: NET Carbon Vault Engineering

Abstrakt

Die vorliegende Variante mit dem Fokus auf die inhaltliche Ausrichtung der Diplomarbeit untersucht die Potenziale von Zellulose aus Abfallströmen für die Kreislaufwirtschaft und die Kohlenstoffbindung. Im Zentrum stehen die beiden grössten Sekundärquellen in der Schweiz und Europa: Altpapier und Abbruchholz. Beide Stoffströme enthalten erhebliche Mengen an biogenem Kohlenstoff, der durch geeignete Strategien längerfristig gebunden und in nachhaltige Wertschöpfungsketten integriert werden kann.

Die Ausgangslage zeigt, dass sowohl Altpapier als auch Abbruchholz und Holzabfälle bereits heute in etablierten Systemen verwertet werden, jedoch mit deutlichen Unterschieden in der Nutzung. Altpapier wird überwiegend stofflich in Papierkreisläufen eingesetzt, während Holzabfälle im Allgemeinen energetisch verwertet werden. Gleichzeitig steigen die Anforderungen von Politik und Gesellschaft, biogene Rohstoffe effizienter und klimawirksamer zu nutzen. Dies wird verstärkt durch europäische Vorgaben, wie die Kreislaufwirtschaftsstrategie der EU und die Recyclingziele für Verpackungen, sowie durch nationale Rahmenbedingungen in der Schweiz (Bundesrat der Schweiz 2016), (IEA 2021).

Auf Basis umfangreicher Datenanalysen (2013–2023) zu Mengen, Flüssen und Quoten wird in der Arbeit das stoffliche Potenzial quantifiziert. Für Altpapier ergibt sich in der Schweiz ein jährliches Sammelvolumen von über einer Million Tonnen, mit einer Sammelquote von rund 80 %. Dennoch bestehen Limitierungen durch Exporte, Qualitätsunterschiede und die sinkende Faserlänge nach mehreren Recyclingzyklen. Beim Abbruchholz liegt das Potenzial noch weitgehend ungenutzt, da ein Grossteil energetisch verbrannt wird, hier eröffnet die stoffliche Nutzung (z. B. Holzwerkstoffe, Biokohle) erhebliches Zusatzpotenzial.

Zur Abschätzung der Klimawirkung wurde ein vereinfachtes Carbon Accounting („LCA light“) durchgeführt. Dieses zeigt, dass durch verstärkte Kaskadennutzung und innovative Verfahren ein signifikantes zusätzliches CO₂-Bindungspotenzial erschlossen werden könnte. Besonders die Produktion von Biokohle bietet eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung, während langlebige Zelluloseprodukte die temporäre Bindung in der Nutzung verlängern.

Durch die eigens erstellten Daten für die Szenarienanalyse kann verdeutlicht werden, wie die Spannbreite möglicher Entwicklungen aussieht. Es werden folgende Szenarien betrachtet: Im „Business as Usual“-Szenario bleibt die CO₂-Bindung gering, während ambitionierte Strategien („Green Economy“ oder „High-Tech“) die Potenziale von Altpapier und Abbruchholz deutlich steigern können und mit dem Krisenszenario kann man verstehen, welche Schwierigkeiten aufkommen bei allgemeinen Hürden. Die entscheidenden Faktoren werden sich hierfür aufzeichnen, wie politische Lenkung, Investitionen in Aufbereitungstechnologien sowie die Schaffung von Märkten für kohlenstoffspeichernde Produkte.

Die Arbeit schliesst mit konkreten Handlungsempfehlungen für Politik, Industrie und Forschung. Im Vordergrund stehen eine konsequente Förderung der stofflichen Nutzung, die Diversifikation der Verwertungspfade sowie die Stärkung von Kooperationen zwischen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette. Nur durch einen integrierten Ansatz lassen sich die Potenziale von Sekundärzellulose voll ausschöpfen, mit unmittelbarem Nutzen für Klimaschutz, Ressourceneffizienz und eine resiliente Kreislaufwirtschaft in der Schweiz und Europa.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretischer Hintergrund	4
2	Analyse des stofflichen Potenzials	4
2.1	Definierung der Cases	5
3	Kohlenstoffbindung und LCA	10
4	Szenarienanalyse	12
4.1	Methodischer Ansatz	12
4.2	Szenariobeschreibungen	12
4.3	Business as Usual-Szenario	15
4.4	Green Economy-Szenario	16
4.5	Technological Push-Szenario	17
4.6	Krisenszenario	19
4.7	Vergleich der Szenarien	20
4.8	Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation)	24
4.9	Implikationen für die Strategieentwicklung	26
5	Strategieentwicklung	29
5.1	Leitprinzipien für eine nachhaltige Strategie	29
5.2	Stakeholder-Analyse	29
5.3	Handlungsempfehlungen für die stoffliche Nutzung	31
5.4	Handlungsempfehlungen zur Kohlenstoffbindung	32
5.5	Robuste Strategien	33
5.6	Schlussfolgerung	33
6	Anhang	34
6.1	Quellenangaben	34
6.2	Tabellenverzeichnis	36
6.3	Abbildungsverzeichnis	37
6.4	Appendix	38
6.5	Hintergrunddaten (selbsterstellt)	38
6.6	Stakeholder Analyse	45

1 Theoretischer Hintergrund

Zellulose ist das am häufigsten vorkommende biogene Polymer und bildet den Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Als nachwachsender Rohstoff ist sie biologisch abbaubar, vielseitig einsetzbar und spielt eine Schlüsselrolle in der Bioökonomie (Arvidsson und Tillman 2018; Haberl u. a. 2019). Neben der traditionellen Nutzung in der Papier- und Textilindustrie eröffnen innovative Anwendungen wie Biokomposite, Nanocellulose oder Biokraftstoffe neue Perspektiven (Empa 2021; ETH Zürich 2022).

Sekundärzellulose entsteht aus Abfallströmen, insbesondere Altpapier und Abbruchholz. Altpapier ist der weltweit bedeutendste Recyclingstrom auf Zellulosebasis (EPRC 2022), während Holzabfälle in der Schweiz überwiegend energetisch genutzt werden (FOEN 2021; BFH Think Earth 2020). Eine verstärkte stoffliche Verwertung kann Ressourcen schonen und Emissionen mindern.

Im Rahmen der Kreislaufwirtschaft gilt Sekundärzellulose als Brücke zwischen Abfallvermeidung und biobasierten Wertschöpfungsketten. Politische Strategien wie der EU Green Deal oder die Schweizer Kreislaufwirtschaftsstrategie betonen ihren Beitrag zur Klimaneutralität (European Commission 2019a; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b). Gleichzeitig ist die Kohlenstoffbindung zentral: Langlebige Produkte fixieren Kohlenstoff über Jahrzehnte, thermochemische Verfahren wie die Pyrolyse ermöglichen durch Biokohle sogar eine nahezu permanente Speicherung (Lehmann und Joseph 2015; Schmidt und Shackley 2021). Dagegen setzt die direkte Verbrennung den gespeicherten Kohlenstoff sofort frei.

Die Wiederverwertung von Altpapier ist durch den Qualitätsverlust der Fasern begrenzt. Massnahmen wie Frischfaserzugabe, mechanische oder enzymatische Fibrillierung sowie der Einsatz von Nanocellulose können die Faserqualität verlängern (EPRC 2022; Empa 2021). Jenseits des Papierkreislaufs bieten sich technologische Alternativen wie Biokomposite, Plattformchemikalien oder Biokohleproduktion an, die fossile Rohstoffe substituieren können, jedoch mit Herausforderungen wie Energieaufwand, Kosten oder Recyclingfähigkeit verbunden sind (Hischier 2010; Arvidsson und Tillman 2018).

Internationale Beispiele zeigen, dass politische Rahmenbedingungen entscheidend sind: Japan erreicht durch strikte Sammelsysteme Recyclingquoten von über 80 %, skandinavische Länder setzen stark auf Kaskadennutzung (Japan Paper Association 2019; Nordic Council 2020). Damit wird deutlich, dass Sekundärzellulose nicht nur technologisch, sondern auch politisch ein strategisches Element der Transformation in eine klimafreundliche Kreislaufwirtschaft darstellt.

2 Analyse des stofflichen Potenzials

Sekundärzellulose aus Abfallströmen kann einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung leisten. Die Analyse betrachtet die Stoffströme von Altpapier und Abbruchholz in der Schweiz und Europa.

Altpapier

Altpapier ist der etablierteste Sekundärrohstoff: In der Schweiz werden jährlich über 1 Mio. t gesammelt (Sammelquote ~80 %), in Europa rund 52 Mio. t (2023: 79 % Recyclingquote) (CEPI 2023; Bundesamt für Statistik (BFS) 2023). Fasern lassen sich 4–6 Mal recyceln, verlieren dabei jedoch an Qualität (EPRC 2022). Ein Teil der Mengen wird exportiert, da die inländischen Kapazitäten nicht alle Qualitäten aufnehmen können (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b). Innovative Ansätze wie Nanocellulose oder Biokomposite eröffnen zusätzliche Potenziale (Empa 2021; ETH Zürich 2022).

Abbruch- und Holzabfälle

Die Schweiz weist ein jährliches Aufkommen von etwa 0.9 Mio. t Holzabfällen auf, in der EU sind es rund 50 Mio. t (Eurostat 2022). Während in Europa etwa 46 % stofflich genutzt werden (v. a. in der Plattenindustrie), werden in der Schweiz 80–90 % energetisch verwertet (FOEN 2021; Empa 2020). Das zusätzliche stoffliche Potenzial liegt bei 0.25–0.34 Mio. t/Jahr (≈ 2 Mio. t CO₂eq) (BFH Think Earth 2020), insbesondere durch den Ausbau von Recyclingtechnologien und innovativen Verfahren wie Pyrolyse zu Biokohle (Lehmann und Joseph 2015; Schmidt und Shackley 2021).

Technologien

Die Technologien reichen von etabliertem Papierrecycling über mechanische/chemische Verfahren bis zu innovativen Ansätzen wie Plattformchemikalien oder Biochar. Während diese ein hohes Substitutionspotenzial fossiler Rohstoffe besitzen, bestehen Herausforderungen in Kosten, Energieaufwand und Recyclingfähigkeit (Hischier 2010; Arvidsson und Tillman 2018).

Herausforderungen und Rahmenbedingungen

Die Ausschöpfung hängt von technischen (Qualität, Schadstoffe), ökologischen (Aufbereitungsenergie), ökonomischen (Marktpreise) und regulatorischen Faktoren ab (European Commission 2022; Bundesrat der Schweiz 2016). Handel spielt eine wichtige Rolle, da die Schweiz Altpapier exportiert und Holzwerkstoffe importiert.

Case-Definition bis 2050

Zur Bewertung wurden drei Cases entwickelt:

- **Low Case:** sinkende Sammelmengen, stagnierende Quoten, Fokus auf energetische Verwertung.
- **Base Case:** Fortschreibung heutiger Trends, stabile Quoten und Mengen.
- **High Case:** ambitionierte Politik, höhere Sammel- und Recyclingraten, Ausbau innovativer Technologien.

Zusammenfassend zeigt sich, während Altpapier ein weitgehend ausgeschöpftes und etabliertes System darstellt, bietet Abbruchholz in der Schweiz das grösste ungenutzte stoffliche Potenzial und entscheidende Hebel für eine klimafreundliche Kreislaufwirtschaft.

2.1 Definierung der Cases

Um die Grundlage zu schaffen, der Analyse einen Ausblick zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel drei Cases definiert mit der selbst erstellten Datenextrapolation bis 2050. Diese drei selbst erhobenen Cases repräsentieren jeweils ein Low-, Base- und High-Szenario, wo sich anhand festgelegter Regeln entwickeln, diese sind im Anhang der selbsterhobenen Daten ersichtlich. Diese bieten die Basis der Szenarienentwicklung und die Ausgangslage der Strategien.

Altpapier Schweiz bis 2050

Die Entwicklung der Altpapiermengen und -quoten bis 2050 hängt massgeblich von politischen, technologischen und gesellschaftlichen Faktoren ab. Im Low Case dominieren Rückgänge im Papierverbrauch durch fortschreitende Digitalisierung, Substitution von

2 ANALYSE DES STOFFLICHEN POTENZIALS

Verpackungsmaterialien sowie eine stagnierende Investition in Recyclinginfrastrukturen, wodurch sowohl Sammelmengen als auch Quoten leicht sinken. Der Base Case geht von einer Fortschreibung heutiger Trends aus, stabile Sammelsysteme, weitgehend konstante Sammelmengen und eine hohe, aber nicht weiter steigende Recyclingquote. Im High Case wirken regulatorische Vorgaben (z. B. EU-PPWR, Schweizer Kreislaufwirtschaftsziele), technologische Innovationen in Sortierung und Faseraufbereitung sowie eine verstärkte Kaskadennutzung als Treiber. Dadurch können Sammelmengen stabilisiert oder leicht gesteigert und Recyclingquoten weiter erhöht werden.

Szenario	2030	2040	2050
Low Case	1.00 Mt (80%)	0.90 Mt (78%)	0.80 Mt (75%)
Base Case	1.10 Mt (85%)	1.05 Mt (83%)	1.00 Mt (82%)
High Case	1.20 Mt (90%)	1.25 Mt (92%)	1.30 Mt (93%)

Tabelle 1: Extrapolation Altpapier-Szenarien Schweiz bis 2050. Mengen in Mio. Tonnen (Mt), Recyclingquote in Klammern. Quellen: CEPI 2022; OECD 2022; EU 2022 (PPWR); BAFU 2022.

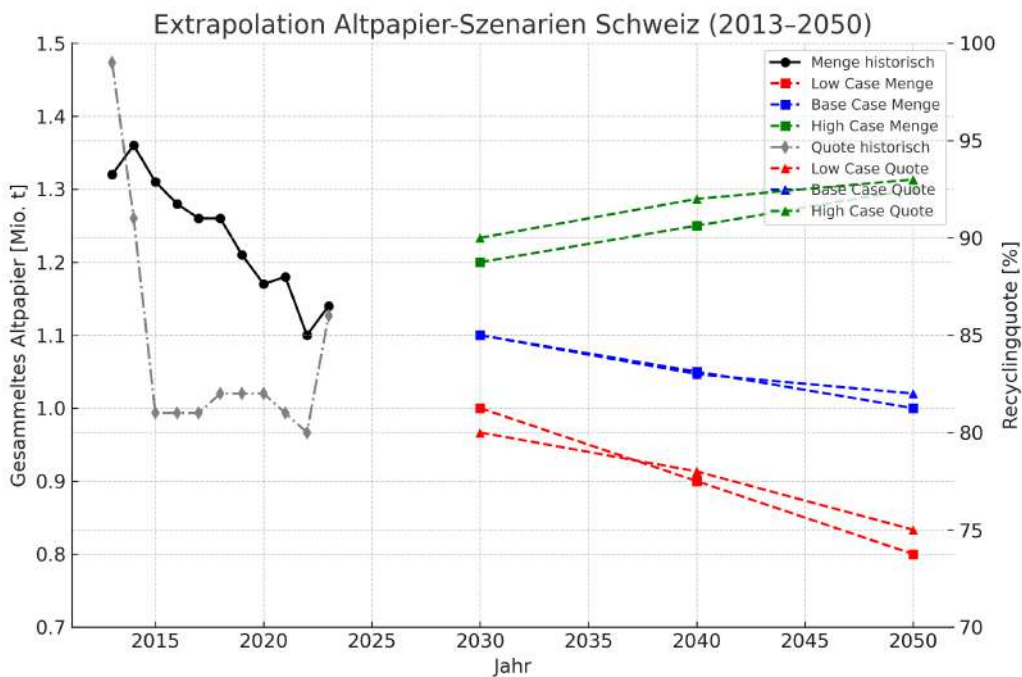


Abbildung 1: Extrapolations Altpapier Schweiz 2050

Holzabfall Schweiz bis 2050

Kurzbegründung: Low stützt sich auf EEA (C&D-Abfall stabil, aber oft niederwertige Verwertung) und BAFU-Leitfäden (Qualitätsanforderungen → potenziell restriktivere Pfade); High basiert auf EU-Renovation-Wave (steigende Sanierungsraten) und PPWR-Impulsen (höhere Kreislaufstandards), die mittelbar die Aufbereitung/Lenkung von Holzabfällen beeinflussen; Base ist die Fortschreibung aktueller Trends in den BAFU-Zeitreihen.

2 ANALYSE DES STOFFLICHEN POTENZIALS

Szenario	2030	2040	2050
Low Case (-0.8%/a)	811'400	748'800	691'000
Base Case (-0.1%/a)	852'300	843'800	835'400
High Case (+0.4%/a)	882'600	918'600	956'000

Tabelle 2: Holzabfälle Schweiz – Projektion der Gesamtmengen (t) für 2030, 2040, 2050 ausgehend von 2023 (858'300 t).

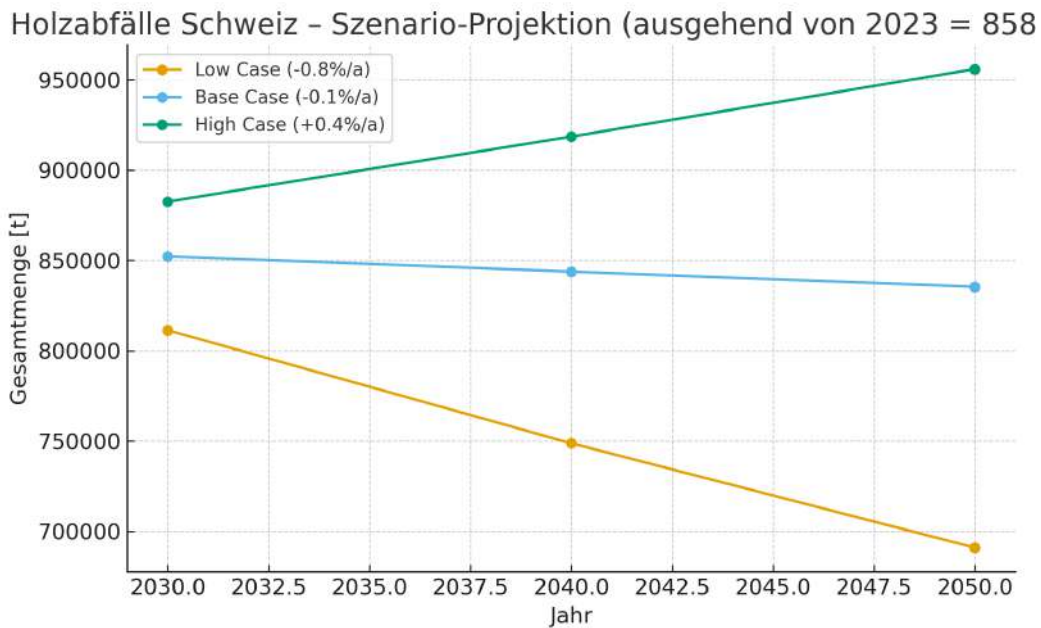


Abbildung 2: Extrapolations Holzabfälle Schweiz 2050

Altpapier Europa bis 2050

Die Entwicklung des europäischen Altpapierkreislaufs bis 2050 wird von unterschiedlichen Einflussfaktoren geprägt. Im Low Case wirken die fortgesetzte Digitalisierung, sinkender Konsum grafischer Papiere sowie verstärkte Materialsubstitution im Verpackungsbereich dämpfend auf die Sammelmengen, die Recyclingquote stagniert oder sinkt leicht aufgrund ungenutzter Potenziale in einzelnen Mitgliedstaaten. Der Base Case beschreibt eine Konsolidierung des heutigen Systems. Stabile Sammelmengen mit moderaten Rückgängen, unterstützt durch bestehende Sammel- und Recyclinginfrastrukturen, während die Recyclingquote im europäischen Durchschnitt hoch bleibt. Im High Case führen ambitionierte EU-Vorgaben (z. B. Packaging and Packaging Waste Regulation mit 85 % Ziel bis 2030), technologische Innovationen bei Sortierung und Faseraufbereitung sowie die stärkere Harmonisierung von Sammelsystemen zu steigenden Quoten und einer leichten Stabilisierung der Mengen. Damit wird Europa zum globalen Treiber für hochwertige Sekundärzellulose im Sinne einer Kreislaufwirtschaft.

Szenario	2030	2040	2050
Low Case	50 Mt (74%)	47 Mt (73%)	44 Mt (72%)
Base Case	52 Mt (80%)	51 Mt (82%)	50 Mt (83%)
High Case	55 Mt (85%)	57 Mt (88%)	58 Mt (90%)

Tabelle 3: Extrapolation Altpapier-Szenarien Europa bis 2050. Mengen in Mio. Tonnen (Mt), Recyclingquote in Klammern. Quellen: CEPI 2022; OECD 2022; EU 2022 (PPWR).

2 ANALYSE DES STOFFLICHEN POTENZIALS

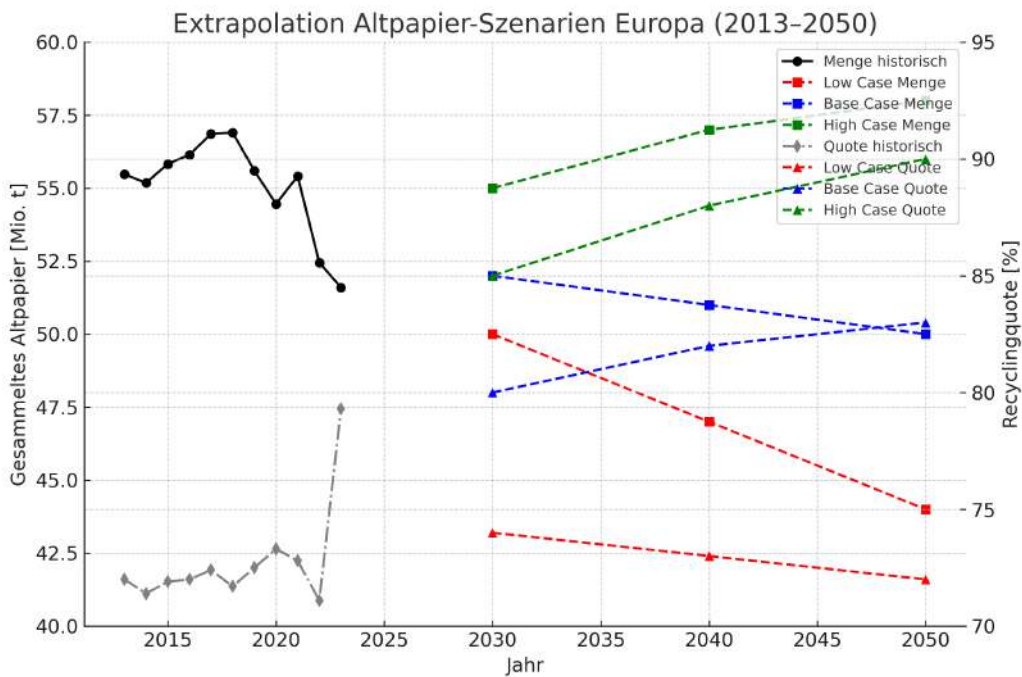


Abbildung 3: Extrapolations Altpapier Europa 2050

Holzabfall Europa bis 2050

Die Entwicklung der Holzabfälle in der EU-27 bis 2050 wird von mehreren strukturellen Faktoren bestimmt. Im Low Case setzt sich der in den letzten Jahren beobachtete Rückgang fort. Sinkende Neubauaktivitäten, verstärkte Ressourceneffizienz und strengere Anforderungen an selektiven Rückbau führen zu einer Verringerung der Abfallmengen, während die Recyclingquote bei rund 50 % stagniert. Der Base Case geht von einer leichten Abnahme der Gesamtabfallmengen aus, die auf eine Stabilisierung der Bauaktivitäten und Sanierungsraten zurückzuführen ist. Gleichzeitig steigen die Recyclingquoten moderat, da die Abfallwirtschaft weiter professionalisiert und die EU-Mitgliedstaaten ihre Sammelsysteme harmonisieren. Im High Case resultieren zusätzliche Abfallmengen aus einer Zunahme von Renovations- und Umbaumaßnahmen im Zuge der europäischen „Renovation Wave“ sowie einer verstärkten Substitution fossiler Materialien durch Holz. Hierbei wird ein signifikanter Anstieg der Recyclingquote bis auf 70 % angenommen, unterstützt durch regulatorische Massnahmen wie die EU-Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) und den Circular-Economy-Aktionsplan.

Szenario	2030	2040	2050
Low Case (-0.6%/a, Quote ≈50%)	45.4 Mt (50%)	42.8 Mt (50%)	40.3 Mt (50%)
Base Case (-0.2%/a, Quote ≈60%)	47.2 Mt (55%)	46.3 Mt (58%)	45.4 Mt (60%)
High Case (+0.3%/a, Quote ≈70%)	49.6 Mt (60%)	51.1 Mt (65%)	52.6 Mt (70%)

Tabelle 4: EU-27 Holzabfälle – Projektion der Mengen (Mt) und Recyclingquoten (%) für 2030, 2040, 2050. Basisjahr: 2020 (48.2 Mt, 46 %).

2 ANALYSE DES STOFFLICHEN POTENZIALS

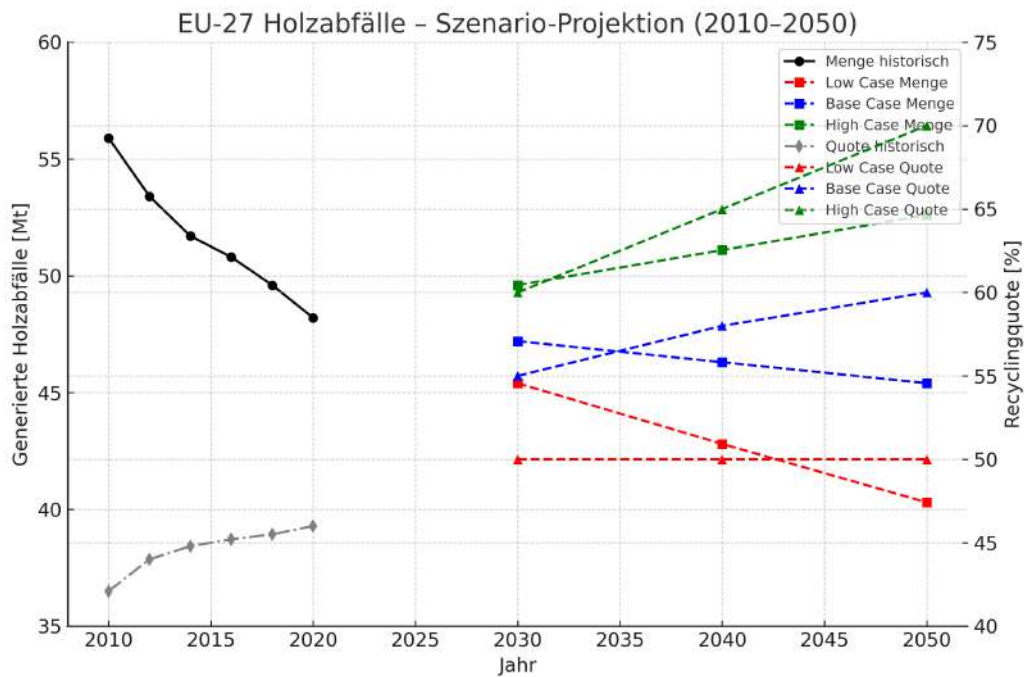


Abbildung 4: Extrapolations Holzabfall Europa 2050

Die Relevanz der Extrapolierung auf 2050

Die Extrapolation bis zum Jahr 2050 ist von zentraler Bedeutung, da sie den zeitlichen Horizont aktueller klima- und ressourcenpolitischer Strategien widerspiegelt. Sowohl die Europäische Union als auch die Schweiz haben sich im Rahmen ihrer Klimaziele zur Klimaneutralität bis 2050 verpflichtet. Damit verknüpft ist die Notwendigkeit, Abfallströme und insbesondere biogene Rohstoffe wie Altpapier und Holzabfälle langfristig in Szenarien zu bewerten. Nur durch eine vorausschauende Projektion lassen sich die potenziellen Mengenentwicklungen, Verwertungswege und Kohlenstoffbindungspotenziale in die strategische Planung der Kreislaufwirtschaft einbeziehen. Eine für diese Arbeit zweckerstellte Extrapolation ermöglicht es zudem, Unsicherheiten in Form von Low-, Base- und High-Case-Szenarien abzubilden und die Bandbreite möglicher Entwicklungen transparent darzustellen. Sie schafft damit eine Grundlage, um politische Lenkungsmaßnahmen, technologische Innovationen und gesellschaftliche Trends frühzeitig in ihrer Wirkung auf Stoffströme und Klimabilanz einzuschätzen.

3 Kohlenstoffbindung und LCA

Zelluloseprodukte sind nicht nur Rohstoffe, sondern auch Kohlenstoffspeicher. Während Pflanzen während des Wachstums CO₂ binden, entscheidet der Verwertungspfad, ob dieser Kohlenstoff rasch freigesetzt oder langfristig fixiert wird (IPCC 2019). Kurzlebige Produkte (Verpackungen, Hygienepapiere) speichern Kohlenstoff nur wenige Monate, während langlebige Anwendungen im Bau oder in Möbeln eine Bindung über Jahrzehnte erlauben. Dauerhafte Speicherung kann durch thermochemische Verfahren (z. B. Pyrolyse zu Biokohle) erreicht werden (Lehmann und Joseph 2015; Schmidt und Shackley 2021). Biokohle gilt als nahezu permanente CO₂-Senke, während die stoffliche Nutzung in langlebigen Produkten eine zeitliche Verschiebung der Emissionen bewirkt.

Potenziale und Pfade

Für Altpapier ist die Klimawirkung durch mehrfaches Recycling begrenzt, lässt sich jedoch durch Kaskadennutzung steigern (z. B. Weiterverwendung von Restfraktionen zur Biokohleproduktion) (EPRC 2022). Beim Abbruchholz ergeben sich deutlich höhere Potenziale, würde ein Teil der energetischen Nutzung durch ersetzt, könnten jährlich mehrere Millionen Tonnen CO₂eq zusätzlich gebunden werden (FOEN 2021).

Carbon Accounting / LCA light

Zur Quantifizierung wurde ein vereinfachtes Carbon Accounting („LCA light“) angewandt, basierend auf ISO 14040/44 und IPCC-Guidelines (International Organization for Standardization 2006; IPCC 2019). Die funktionelle Einheit ist 1 t Material (Papier oder Holz, trocken). Betrachtet werden die Stufen Sammlung, Aufbereitung, stoffliche/energetische Nutzung sowie End-of-Life. Substitutionseffekte (z. B. Ersatz von Primärzellstoff, Beton oder fossiler Wärme) werden berücksichtigt (Hischier 2010; Arvidsson und Tillman 2018).

Tabelle 5: Kernaussagen & Default-Annahmen für die Projektion bis 2050 (CH/EU)

Stoffstrom	Region	2030	2040	2050	Hinweise
Altpapier (Recyclingrate)	EU	80–83%	82–85%	83–87%	CEPI/EPRC Basis (CEPI 2023)
Altpapier (Recyclingrate)	CH	82–88%	83–89%	85–90%	Etablierte Sammlung (BAFU/Bundesamt für Umwelt)
Holzabfall (stoffliche Nutzung)	EU	35–50%	40–60%	45–65%	Höhere Trenn-/Qualitätsst. (<i>Waste Wood</i>)
Holzabfall (stoffliche Nutzung)	CH	35–55%	40–60%	45–65%	KVA relevant; pos. Kaskaden (Bundesamt für Umwelt)
Strommix EF (kg CO ₂ /kWh)	EU	0.05–0.20	0.02–0.10	<0.05	EU Klimagesetz/2040-Pfad (International Energy Agency)
Strommix EF (kg CO ₂ /kWh)	CH	0.01–0.05	<0.03	<0.02	CH Klimagesetz (Schweizerische Eidgenossenschaft)
Papier-Recycling-Yield	EU/CH	80–90%	82–92%	85–93%	EN 643/PPWR-Effekte (European Commission)
Holz: Kaskaden/Biochar Anteil	EU/CH	0–10%	5–20%	10–30%	High-Case: Biochar skaliert

Die Systemgrenzen umfassen sowohl *cradle-to-gate* für Zwischenprodukte als auch *cradle-to-grave* für Endprodukte. Für Biokohle wird ein Permanenzfaktor von 0.8–0.95 angesetzt (Lehmann und Joseph 2015). Strom- und Energiemixe werden dynamisch mit den Klimazielpfaden der EU und Schweiz bis 2050 verknüpft (IEA 2021; European Commission 2022).

Szenarien bis 2050

Drei Cases verdeutlichen die Spannweite möglicher Entwicklungen:

- **Low Case:** geringe Sammelquote, dominante energetische Nutzung, langsame Dekarbonisierung.

3 KOHLENSTOFFBINDUNG UND LCA

- **Base Case:** Fortschreibung heutiger Trends, moderate Kaskadennutzung, Erfüllung gesetzlicher Vorgaben.
- **High Case:** ambitionierte Politiken, hohe Sammel- und Recyclingquoten, breite Biokohle-Anwendung, nahezu klimaneutrale Energiesysteme.

Tabelle 6: Altpapier – Zusatzpotenziale bis 2050 ggü. 2023 (konstante Verbrauchsbasis)

Region	Szenario	Zielrate	R_{2050}^* [Mt]	ΔR [Mt]	Δ Frischfaser [Mt]	Δ THG
EU	Low	83%	56.191	+2.491	2.242	1.743 Mt CO ₂ e
EU	Base	85%	57.545	+3.845	3.460	2.691 Mt CO ₂ e
EU	High	87%	58.899	+5.199	4.679	3.639 Mt CO ₂ e
CH	Low	85%	1.1278	-0.0133	-0.0119	-9.3 kt CO ₂ e
CH	Base	88%	1.1676	+0.0265	0.0239	18.6 kt CO ₂ e
CH	High	90%	1.1942	+0.0531	0.0478	37.2 kt CO ₂ e

Legende:

- **Region:** Betrachtetes Gebiet (EU = EU-27, CH = Schweiz).
- **Szenario:** Annahmepfad 2050 (Low = konservativ, Base = Status quo verlängert, High = ambitioniert).
- **Zielrate:** Recyclingzielquote bis 2050 in % des Verbrauchs.
- R_{2050}^* [Mt]: theoretisch zu recycelnde Menge im Jahr 2050, basierend auf der Zielrate und konstantem Verbrauch 2023.
- ΔR [Mt]: Differenz zur recycelten Menge 2023 (+ = Mehr, - = Weniger).
- Δ Frischfaser [Mt]: vermiedene Primärzellstoffproduktion durch zusätzlich recycelte Fasern (Substitutionsfaktor: 0.9).
- Δ THG: vermiedene Treibhausgasemissionen durch Substitution, in Megatonnen (EU) bzw. Kilotonnen (CH) CO₂-Äquivalent pro Jahr.
- Annahme Emissionsfaktor: $\alpha = 0.7$ tCO₂e pro Tonne recyceltem Papier gegenüber Frischfaser.

Tabelle 7: Holzabfälle CH/EU – stoffliche Nutzung und Kohlenstoffspeicher (Low/Base/High)

Region	Mat. share %	Tot. wood waste [Mt/a]	Mat. Used [Mt/a]	CO2 factor	CO2 storage [Mt/a]
EU-27 Low	0.40	37.68	15.07	20% moisture (1.46)	22.01
EU-27 Base	0.46	37.68	17.33	odt (1.83)	31.72
EU-27 High	0.55	37.68	20.72	10% moisture (1.65)	34.19
CH Low	0.05	1.00	0.05	20% moisture (1.46)	0.07
CH Base	0.08	1.00	0.08	odt (1.83)	0.15
CH High	0.15	1.00	0.15	10% moisture (1.65)	0.25

Legende:

- **Scenario:** Low = konservatives Szenario, Base = heutiger Status quo verlängert, High = ambitioniertes Ziel.
- **Target rate:** angenommene Recyclingquote bis 2050 (Anteil des Verbrauchs).
- R_{2050}^* [Mt]: theoretisch recycelte Menge im Jahr 2050.
- ΔR [Mt]: Differenz zur recycelten Menge 2023 (+ = Mehr, - = Weniger).
- **Displaced virgin pulp [Mt]:** vermiedene Produktion von Primärzellstoff (Substitutionsfaktor Papier: 0.9).
- **GHG benefit [Mt CO₂e/a]:** vermiedene fossile Emissionen durch Substitution von Primärfasern (Emissionsfaktor: 0.7 tCO₂e pro Tonne Recyclingfaser).
- **Material share:** Anteil der Holzabfälle, die stofflich genutzt werden (Rest: energetisch).
- **CO₂ factor:** biogener Kohlenstoffspeicher je Tonne Holz (abhängig vom Feuchtegehalt).
- **CO₂ storage [Mt/a]:** jährlich gebundene Menge CO₂ durch stoffliche Nutzung von Holzabfällen.

Bewertung

Die Analyse zeigt, dass Altpapier bereits weitgehend ausgeschöpft ist, aber zusätzliche Klimawirkungen über Kaskaden erzielt werden können. Abbruchholz bietet hingegen das grösste ungenutzte Potenzial, insbesondere durch stoffliche Nutzung und Pyrolyse. Technische und ökonomische Herausforderungen bestehen in der Effizienz von Verfahren,

4 SZENARIENANALYSE

Marktintegration von Biokohle sowie regulatorischen Fragen zur Anrechenbarkeit von Kohlenstoffspeichern (European Commission 2019a; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b). Insgesamt wird deutlich, dass Sekundärzellulose in Verbindung mit robusten Politiken und Innovationen ein relevanter Hebel für die Transformation zur klimaneutralen Kreislaufwirtschaft ist.

4 Szenarienanalyse

Da die zukünftige Entwicklung der Bioökonomie von einer Vielzahl unsicherer Faktoren beeinflusst wird, darunter politische Rahmenbedingungen, technologische Innovationen, wirtschaftliche Dynamiken und ökologische Grenzen, ist eine reine Status-quo-Betrachtung unzureichend. Um robuste Strategien für den Einsatz von Sekundärzellulose zu entwickeln, wird daher eine szenariobasierte Analyse angewendet. Diese erlaubt es, unterschiedliche Zukunftspfade systematisch zu beleuchten und die Rolle von Altpapier- und Holzabfallströmen in einer klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft zu bewerten.

4.1 Methodischer Ansatz

Die Szenarienanalyse kombiniert eine qualitative Rahmensetzung mit quantitativen Indikatoren. In der Datenbasis wird bestimmt, wie dies eingegrenzt ist:

Datenbasis

- Regionen: Schweiz und Europa; die Szenarien/Strategien sind ausdrücklich für CH/EU angelegt (Definition Europa, Zielsetzung CH+EU).
- Zeithorizont: Projektionen bis 2050; in der Bilanzierung wird u. a. eine 30-Jahre-Speicherperiode verwendet (GWP100; Ausweisung temporärer Speicherung).
- Energiemix/Methodik: CH/EU-spezifische Strom-/Energie-EF (zeitvariabel, dekarbonisierend), Systemerweiterung für Substitutionen.

Systemgrenzen

Als Dimensionen werden vier zentrale Einflussbereiche betrachtet:

- Politisch-regulatorisch: Klimagesetze, Kreislaufwirtschaftsstrategien, Förderinstrumente.
- Technologisch: Innovationsrate bei Recycling- und Aufbereitungsverfahren.
- Ökonomisch: Marktentwicklung für biobasierte Materialien und Kohlenstoffspeicherprodukte.
- Ökologisch: Verfügbarkeit von Biomasse, Belastung durch Schadstoffe, Klimarisiken.

Auf dieser Grundlage werden vier Szenarien entwickelt, die unterschiedliche Zukunftspfade abbilden, welche in der Szenariobeschreibung dargelegt werden.

4.2 Szenariobeschreibungen

Es wird im folgenden Abschnitt der Szenarien beschrieben, wie diese selbstdefinierten und erstellten Szenarien wirken und welche Förderungen und Grenzen sie aufzeigen sollen.

4 SZENARIENANALYSE

Szenario 1: Business as Usual

Dieses Szenario geht von einer Fortschreibung heutiger Trends aus. Altpapier wird weiterhin überwiegend in klassischen Papierkreisläufen verwertet, Holzabfälle grösstenteils energetisch genutzt. Die CO₂-Bindung bleibt auf niedrigem Niveau, da nur begrenzt neue stoffliche Pfade etabliert werden. Politische Rahmenbedingungen fördern zwar Recycling, jedoch ohne gezielte Lenkung hin zu langfristiger Kohlenstoffspeicherung.

Szenario 2: Green Economy

In diesem Szenario setzen Politik und Gesellschaft konsequent auf Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz. Regulatorische Anreize schaffen Märkte für langlebige Zelluloseprodukte und Biokohle. Altpapier wird in einer Kaskadennutzung eingesetzt, während ein wachsender Anteil von Holzabfällen stofflich verwertet oder pyrolysiert wird. Die CO₂-Bindung erreicht ein hohes Niveau, da Sekundärzellulose systematisch als Kohlenstoffspeicher etabliert wird.

Szenario 3: High-Tech Transformation

Hier steht technologische Innovation im Vordergrund. Fortschritte in der chemischen Fraktionierung, Nanocellulose und Pyrolyseverfahren ermöglichen eine hocheffiziente Nutzung von Abfallströmen. Märkte reagieren positiv auf neue biobasierte Materialien, jedoch bleiben politische Anreize begrenzt. Die Klimawirkung hängt stark von der Geschwindigkeit der Marktanpassung ab, ist aber potenziell sehr hoch.

Szenario 4: Krisenszenario

Globale Ressourcenknappheit, geopolitische Unsicherheiten und ökonomische Instabilität führen dazu, dass kurzfristige Energiebedarfe Vorrang erhalten. Holzabfall wird überwiegend verbrannt, um Versorgungslücken zu schliessen. Innovative Technologien stagnieren mangels Investitionen. Die stoffliche Nutzung und CO₂-Bindung von Sekundärzellulose bleiben marginal, wodurch Klimaziele kaum erreicht werden.

Kurzvergleich der Szenarien

Ein Vergleich der Szenarien zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich des stofflichen Potenzials und der Klimawirkung:

Höchstes stoffliches Potenzial: „High-Tech Transformation“ (technologische Effizienz) und „Green Economy“ (politische Steuerung).

Höchstes CO₂-Bindungspotenzial: „Green Economy“ (systematische Kaskadennutzung, Biokohle).

Geringstes Potenzial: „Krisenszenario“ (Rückfall in energetische Verwertung).

Robuste Optionen: In allen Szenarien bleibt die Nutzung von Altpapier für Recycling stabil, während Holzabfall das grösste, aber unsicherste Zusatzpotenzial bietet.

4 SZENARIENANALYSE

Tabelle 8: Case-Faktoren (global) – gelten als Baseline und werden je Szenario angepasst

Faktor	Definition	Low	Base	High
AP Sammelquote $q_{coll,AP}$	Anteil ges. Papier, das separat erfasst wird	0.78	0.83	0.90
AP Recyclingausbeute y_{AP}	Output/Separatsammlung (stofflich)	0.88	0.90	0.93
AP Kaskade/LLP-Anteil	Anteil Sek.- Fasern in langlebigen Pfaden	0.00	0.08	0.18
Holz stoffliche Quote	Anteil Abbruchholz stofflich (nach Sortierung)	0.25	0.35	0.45
Holz Biochar-Quote	Anteil Fein-/Restfraktionen → Biochar	0.05	0.15	0.30
Sortier-/Prozessverluste	Verluste in Aufbereitung/Sortierung	0.12	0.10	0.07
Permanenz Biochar	Verbleib als stabile Senke	0.85	0.90	0.95
Lebensdauer LLP [a]	Langlebige Holz-/Faserprodukte (mittl.)	25	40	60
Subst.-EF Pulp (rel.)	Gutschrift ggü. Virgin-Pulp (Index)	0.95	1.00	1.10
Subst.-EF Holzwerkstoff (rel.)	Gutschrift ggü. Virgin-Panel (Index)	0.90	1.00	1.10
Energie-EF (rel. Roadmap)	Strom/Wärme ggü. Roadmap EF	1.10	1.00	0.85

Tabelle 9: Szenario-spezifische Einstellungen (Low / Base / High je Szenario)

Faktor	BAU	Green Economy	High-Tech	Krise
AP Sammelquote	0.78/0.83/0.88	0.85/0.90/0.93	0.87/0.92/0.95	0.72/0.76/0.80
AP Recyclingausbeute	0.88/0.90/0.92	0.90/0.92/0.94	0.92/0.94/0.96	0.85/0.88/0.90
AP Kaskade/LLP	0.00/0.08/0.18	0.10/0.20/0.30	0.12/0.25/0.35	0.00/0.03/0.05
Holz stoffliche Quote	0.20/0.30/0.35	0.35/0.45/0.55	0.40/0.55/0.65	0.10/0.15/0.20
Holz Biochar-Quote	0.00/0.00/0.10	0.10/0.20/0.30	0.15/0.30/0.40	0.00/0.00/0.05
Sortier-/Prozessverl.	0.12/0.10/0.09	0.10/0.09/0.08	0.10/0.07/0.05	0.15/0.13/0.10
Permanenz Biochar	0.85/0.90/0.95	0.85/0.90/0.95	0.85/0.90/0.95	0.85/0.85/0.90
Lebensdauer LLP [a]	25/40/55	30/50/70	35/55/75	20/30/45

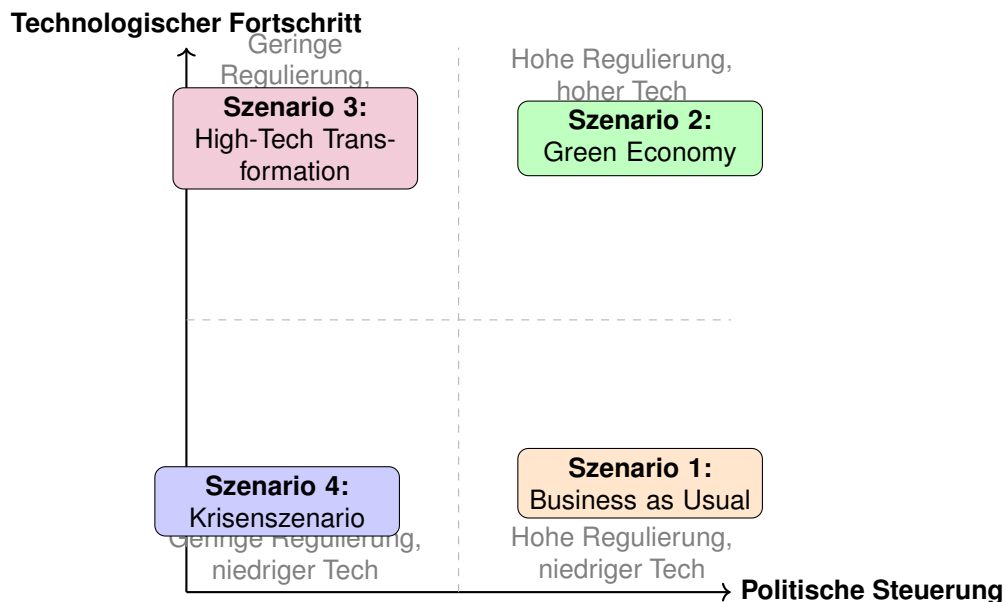


Abbildung 5: Übersicht der Szenarien im Spannungsfeld von politischer Steuerung und technologischem Fortschritt.

4 SZENARIENANALYSE

4.3 Business as Usual-Szenario

Im Business as Usual-Szenario wird davon ausgegangen, dass die heutigen Trends unverändert fortgeführt werden.

Altpapier: Die Sammel- und Recyclingquoten bleiben auf heutigem Niveau stabil (CH: 80–85 %, EU: rund 80 %). Der Kreislauf ist etabliert, bietet aber nur begrenzte zusätzliche Potenziale. Die Kaskadennutzung (z. B. Weiterverwertung in Bioverbundstoffen oder Biokohle) wird kaum entwickelt.

Holzabfälle: In der Schweiz gehen weiterhin über 80 % in die energetische Verwertung, in der EU rund 50 %. Nur ein kleiner Teil wird stofflich genutzt, vor allem für Span- und Faserplatten. Dadurch bleibt der grösste Teil des stofflichen Potenzials unerschlossen.

CO₂-Bindung: Die Kohlenstoffspeicherung durch langlebige Holzprodukte ist im internationalen Vergleich gering, da der Fokus auf der Verbrennung liegt. Biokohle kommt nicht zum Einsatz. Die Bindungswirkung bleibt deshalb klar limitiert.

Politik & Ökonomie: Politische Rahmenbedingungen unterstützen zwar das Recycling im Allgemeinen, setzen jedoch keine spezifischen Anreize für CO₂-Speicherprodukte. Technologische Innovationen verharren im Pilotmassstab, ökonomische Investitionen sind gering.

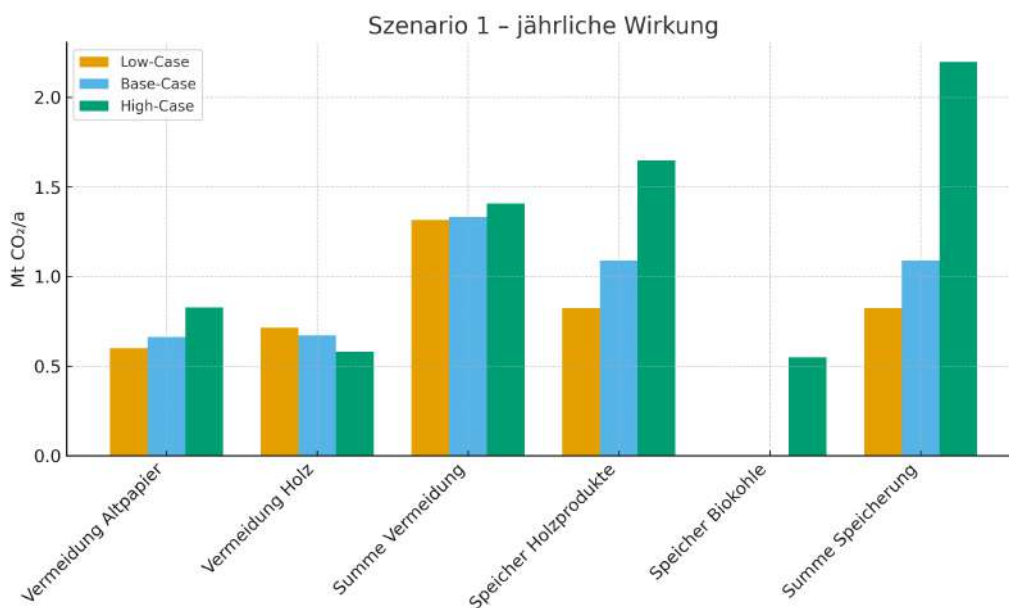


Abbildung 6: Szenario 1, Business as Usual: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)³⁰

4 SZENARIENANALYSE

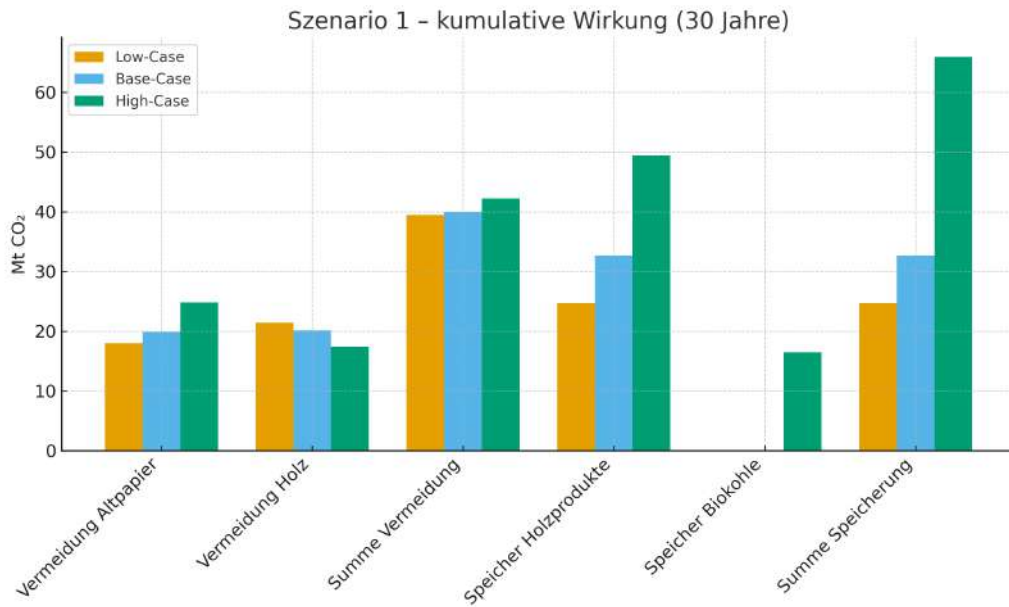


Abbildung 7: Szenario 1, Business as Usual: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)³¹

4.4 Green Economy-Szenario

Das Green Economy-Szenario beschreibt eine konsequente Ausrichtung von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft auf Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz.

Altpapier: Die Sammelquote steigt kontinuierlich an (Schweiz >90 %, EU auf >85 %). Kaskadennutzungen werden etabliert, sodass ein Teil der Fasern in langlebigen Verbundmaterialien oder chemischen Anwendungen landet, bevor sie energetisch verwertet werden. Dadurch erhöht sich sowohl das stoffliche als auch das klimarelevante Potenzial deutlich.

Holzabfälle: Der stoffliche Anteil steigt stark an. Ein grösserer Teil des Abbruchholzes wird nach Aufbereitung in Bauprodukten, Möbeln und Plattenwerkstoffen genutzt. Zudem werden erste grossskalige Anlagen zur Karbonisierung etabliert, sodass Biokohle als stabiler Kohlenstoffspeicher in der Landwirtschaft oder Baustoffindustrie eingesetzt wird.

CO₂-Bindung: Die CO₂-Vermeidung durch Recycling und Substitution fossiler Materialien nimmt zu. Gleichzeitig steigt die direkte Kohlenstoffbindung durch langlebige Produkte und die Einführung von Biokohle deutlich an.

Politik & Ökonomie: Politische Lenkungsmaßnahmen (z. B. erweiterte Produzentenverantwortung, CO₂-Bepreisung, Förderprogramme für Kreislauftechnologien) unterstützen die Markteinführung neuer Technologien. Investitionen in Infrastruktur und Forschung beschleunigen die Umsetzung.

4 SZENARIENANALYSE

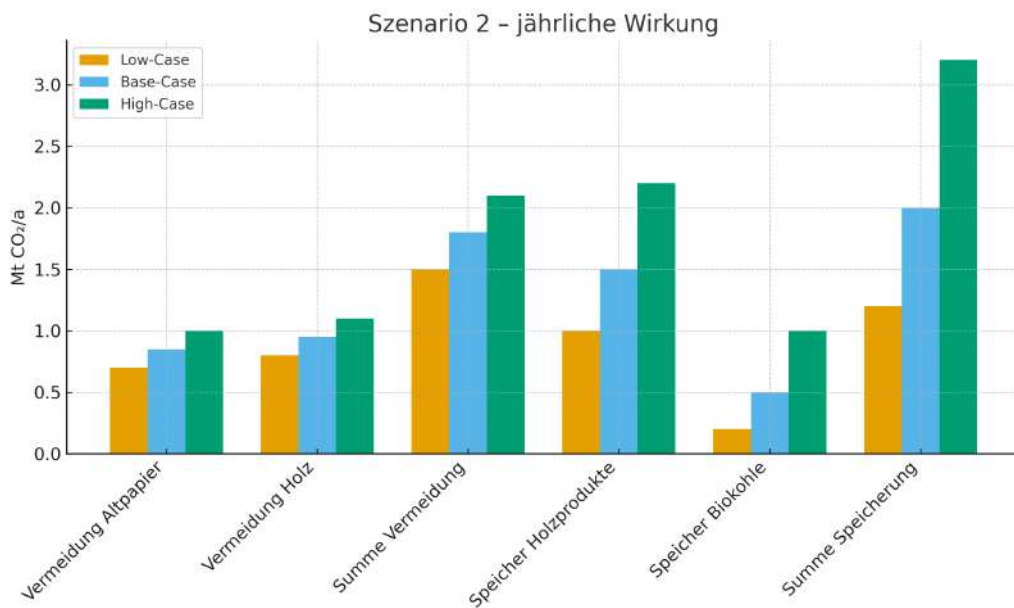


Abbildung 8: Szenario 2, Green Economy: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)³²

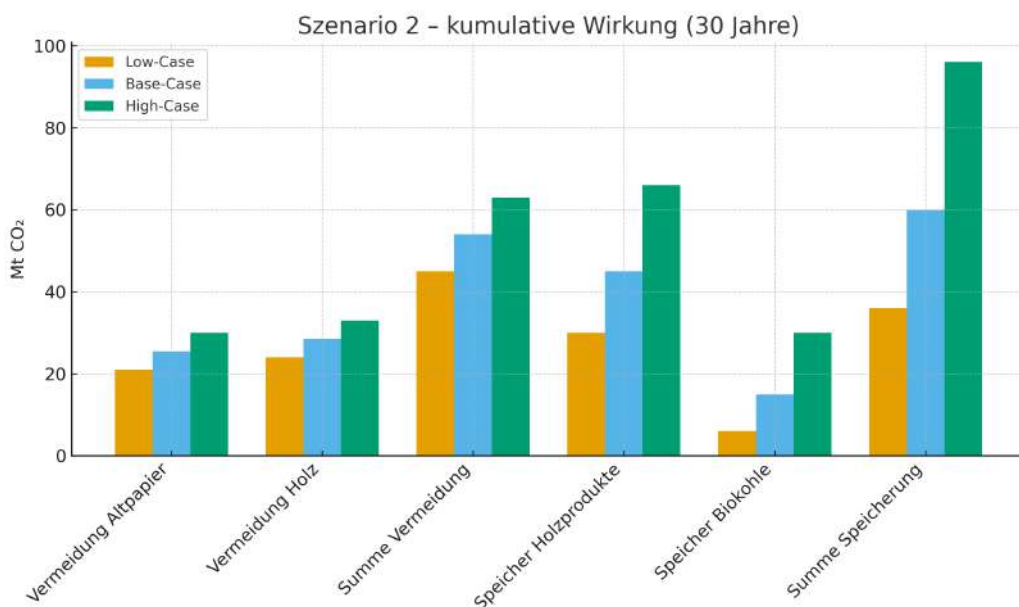


Abbildung 9: Szenario 2, Green Economy: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)³³

4.5 Technological Push-Szenario

Das Technological Push-Szenario beschreibt eine Entwicklung, in der technologische Innovationen die zentrale Triebkraft für Transformation und Klimaschutz darstellen.

Altpapier: Neue Technologien in Sortierung, Faseraufbereitung und chemischem Recycling ermöglichen eine fast vollständige Nutzung der gesammelten Mengen. Auch Fasern niedriger Qualität können durch verbesserte Aufbereitung wieder in hochwertige Produkte überführt werden. Zudem eröffnen sich neue stoffliche Wege, z. B. Nanocellulose oder biobasierte Chemikalien.

4 SZENARIENANALYSE

Holzabfälle: Durch Fortschritte in Aufbereitung und Sortiertechnik können auch bisher problematische Fraktionen (z. B. beschichtetes oder kontaminiertes Holz) stofflich genutzt werden. Innovative Verfahren wie grossskalige Pyrolyse- und Karbonisierungsanlagen ermöglichen, erhebliche Mengen in Biokohle zu überführen.

CO₂-Bindung: Der technologische Fortschritt führt zu einer starken Ausweitung sowohl der Vermeidungseffekte (durch Substitution fossiler Materialien) als auch der dauerhaften Bindung (durch Biokohle und langlebige High-Tech-Produkte).

Politik & Ökonomie: Politische Rahmenbedingungen spielen eine unterstützende Rolle, sind aber nicht der Haupttreiber. Vielmehr entstehen Märkte durch technologische Disruption, sinkende Kosten neuer Verfahren und Skaleneffekte.

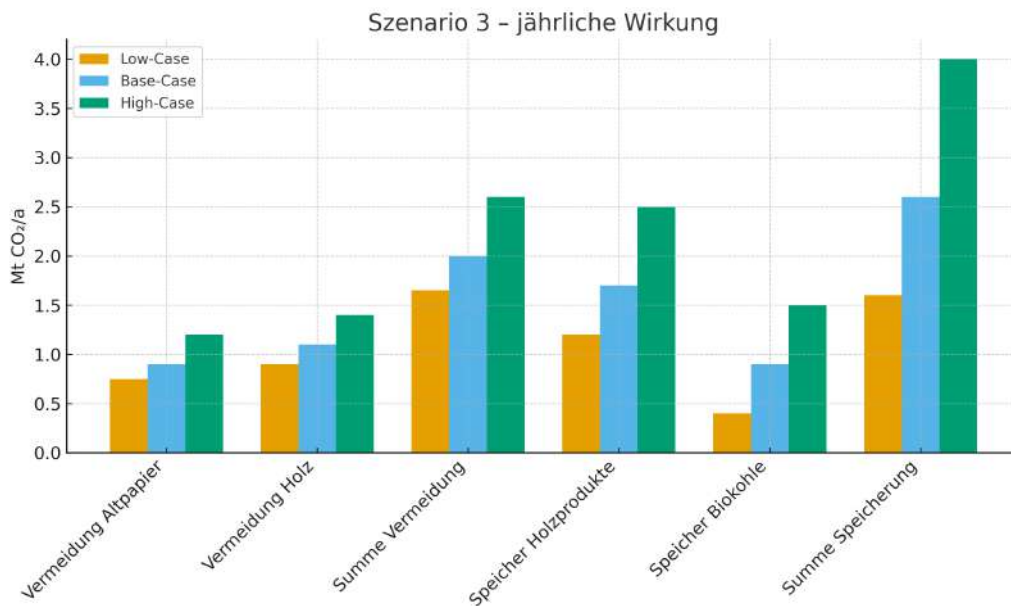


Abbildung 10: Szenario 3, Technological Push: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)³⁴

4 SZENARIENANALYSE

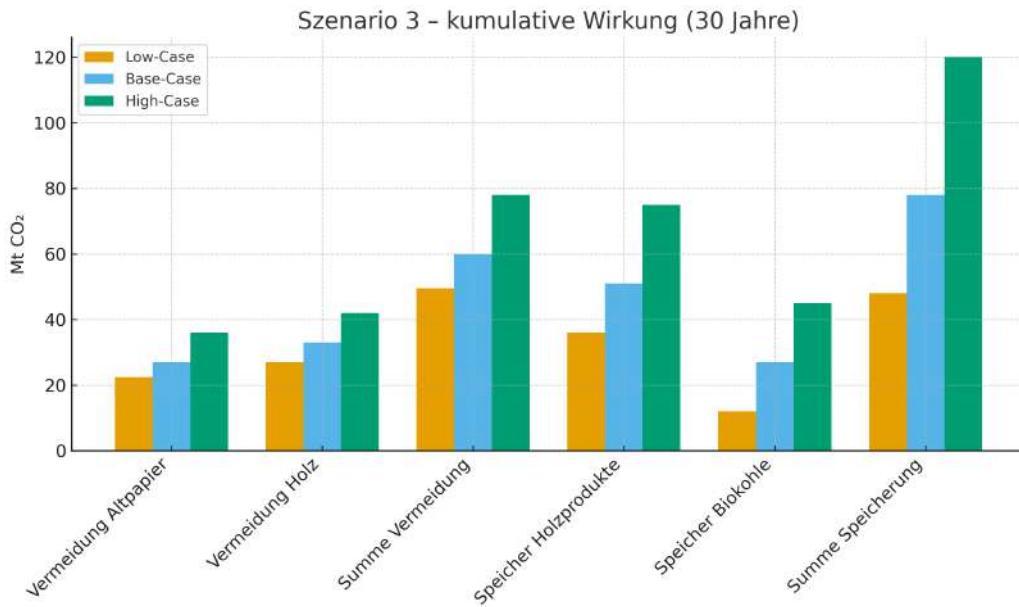


Abbildung 11: Szenario 3, Technological Push: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)³⁵

4.6 Krisenszenario

Im Krisenszenario dominieren Ressourcenknappheit, geopolitische Unsicherheiten und wirtschaftliche Turbulenzen. Kurzfristige Energiebedarfe haben Vorrang; Holzabfälle werden überwiegend energetisch verwertet, die stoffliche Nutzung bricht ein, und Innovationen (z. B. Biokohle, chemische Fraktionierung) stagnieren mangels Investitionen. Sammel- und Recyclingquoten sinken (Logistik-/Finanzierungsengpässe, Qualitätsprobleme), wodurch Vermeidungseffekte und Kohlenstoffspeicherung deutlich geringer ausfallen als in BAU/Green/High-Tech. Netto-CO₂-Wirkung: niedrig, Klimaziele werden deutlich verfehlt. (vgl. Kap. 7.2–7.3)

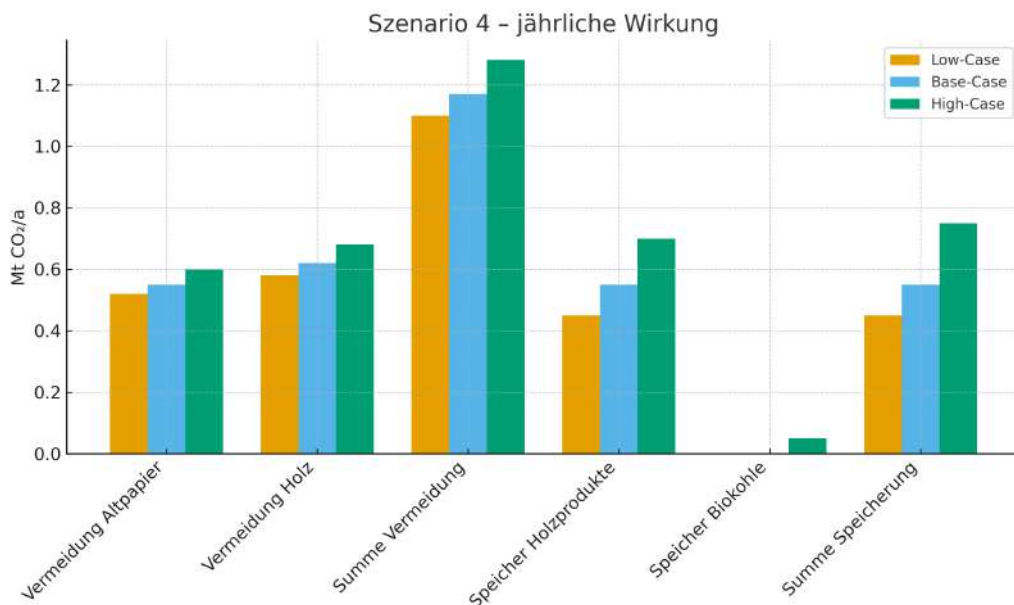


Abbildung 12: Szenario 4, Krisenszenario: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)³⁶

4 SZENARIENANALYSE

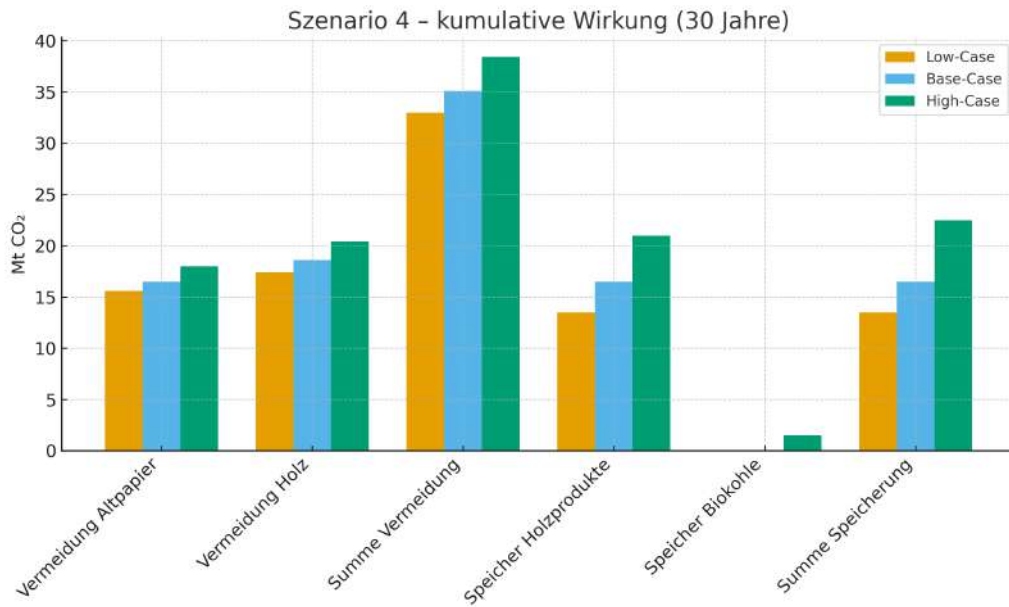


Abbildung 13: Szenario 4, Krisenszenario: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)³⁷

4.7 Vergleich der Szenarien

Die grafische Auswertung der Szenarien zeigt deutlich, wie Einflussfaktoren über die längere Betrachtung (30 Jahre) Folgen aufzeichnen.

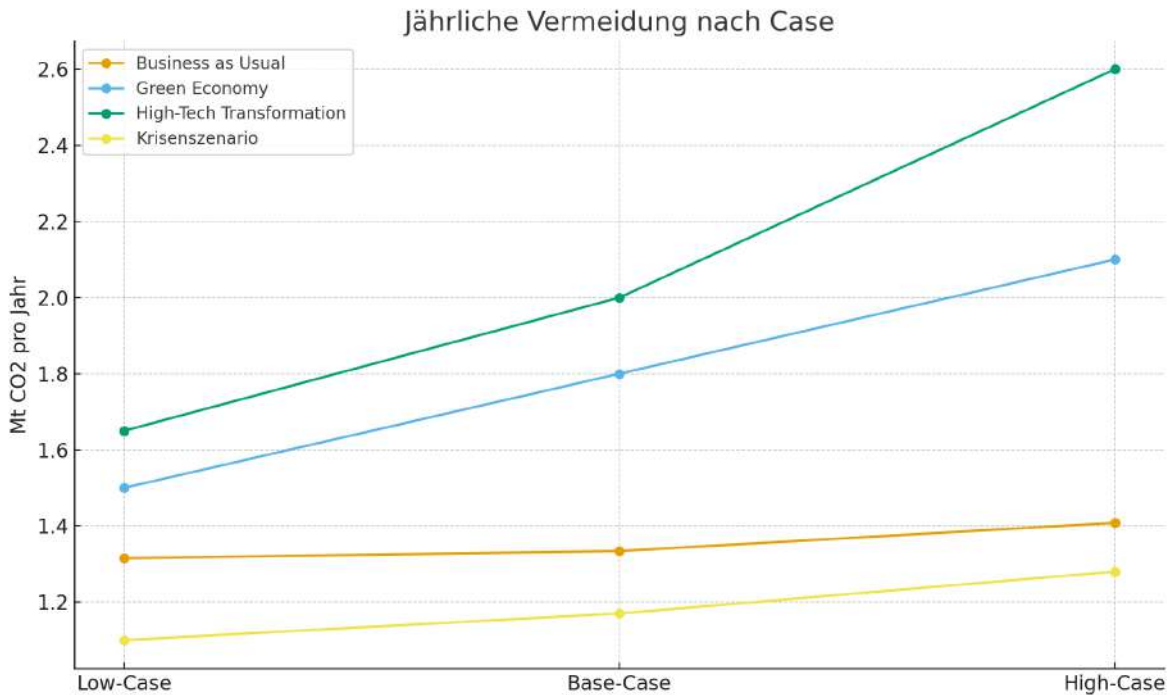


Abbildung 14: Jährliche Vermeidung nach Case (Mt CO₂/a)

4 SZENARIENANALYSE

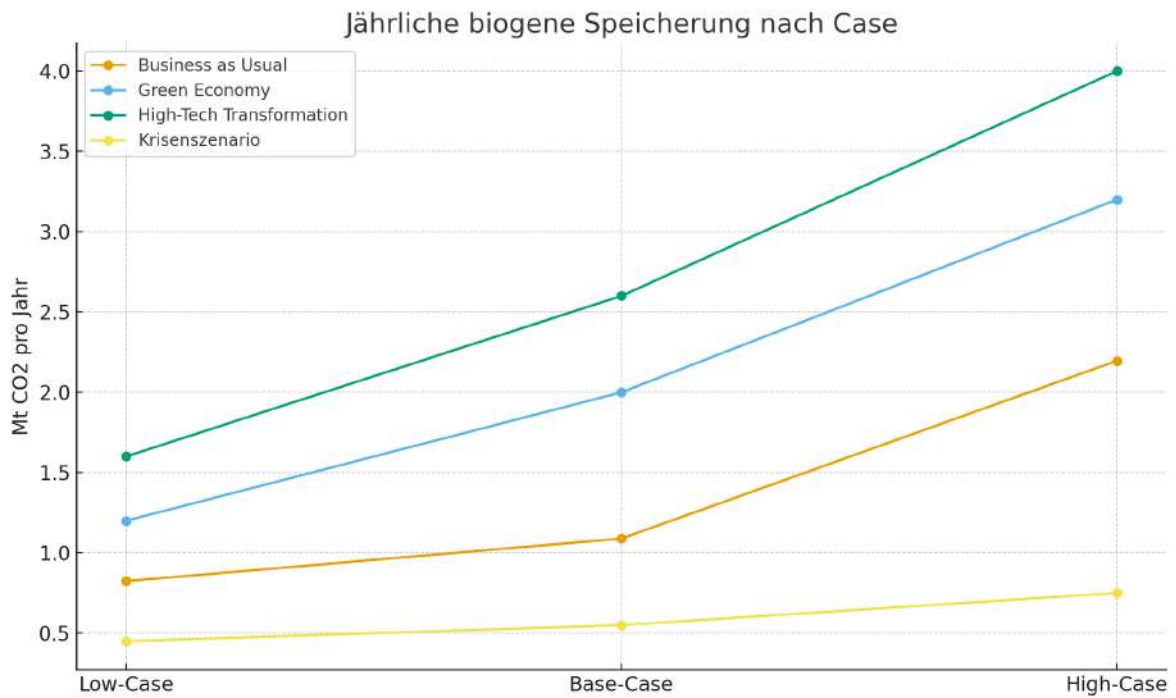


Abbildung 15: Jährliche biogene Speicherung nach Case (Mt CO₂/a)

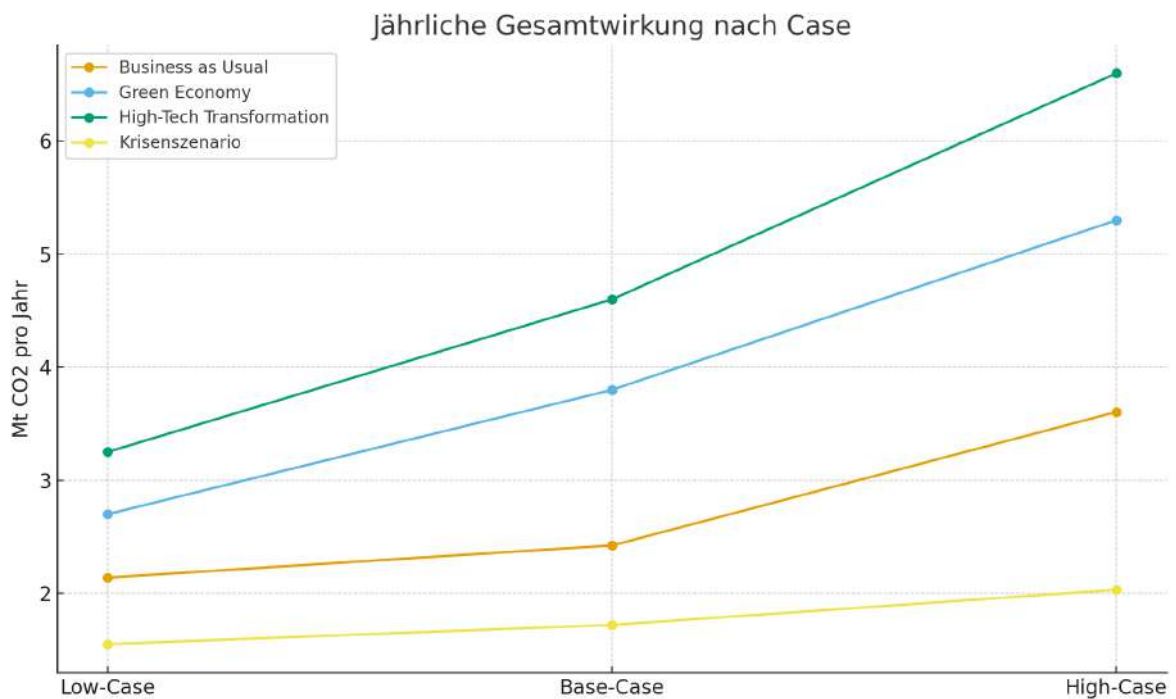


Abbildung 16: Jährliche Gesamtwirkung nach Case (Mt CO₂/a)

4 SZENARIENANALYSE

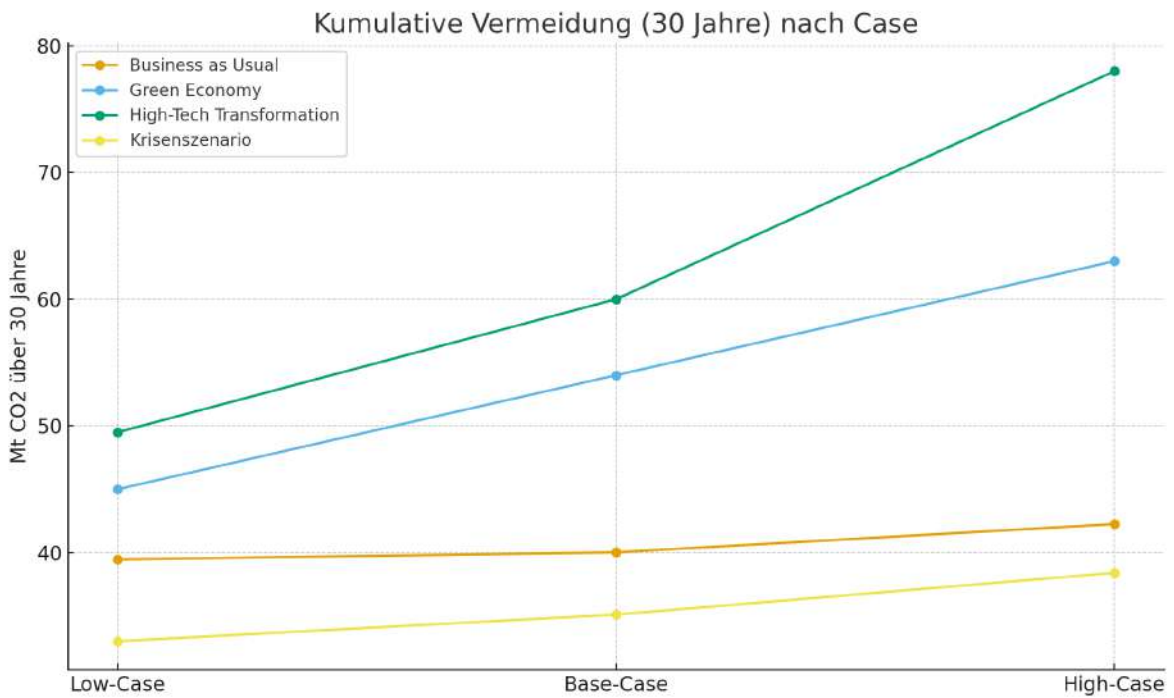


Abbildung 17: Kumulative Vermeidung nach Case (Mt CO₂/a30)

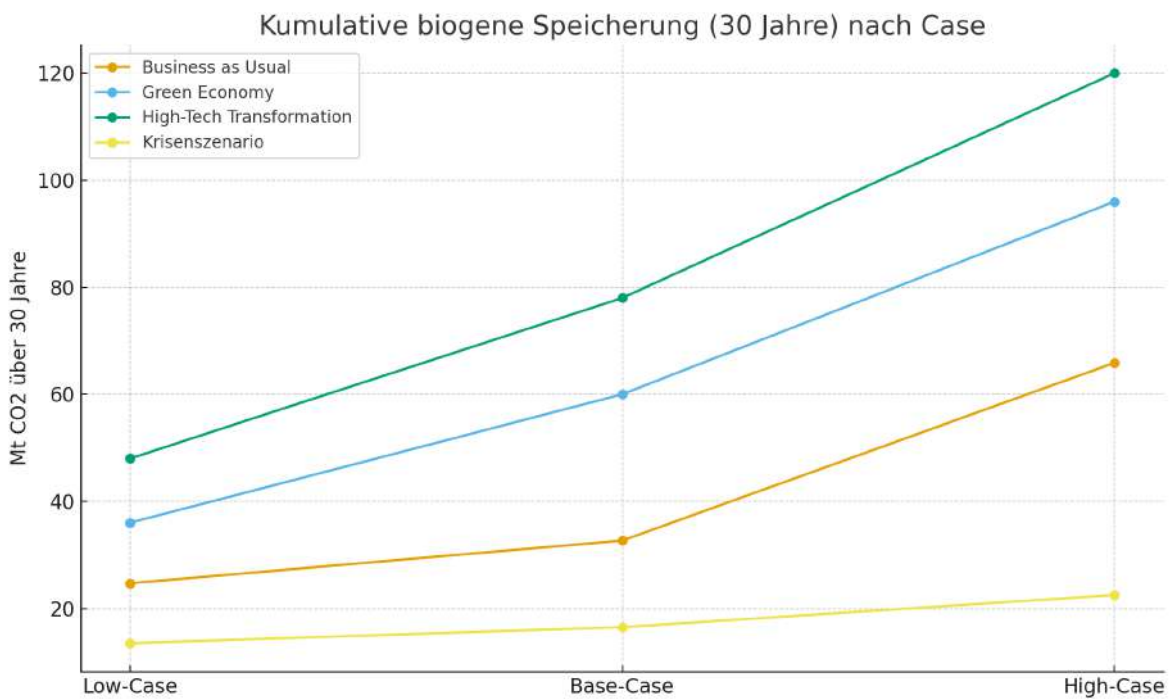


Abbildung 18: Kumulative biogene Speicherung nach Case (Mt CO₂/a30)

4 SZENARIENANALYSE

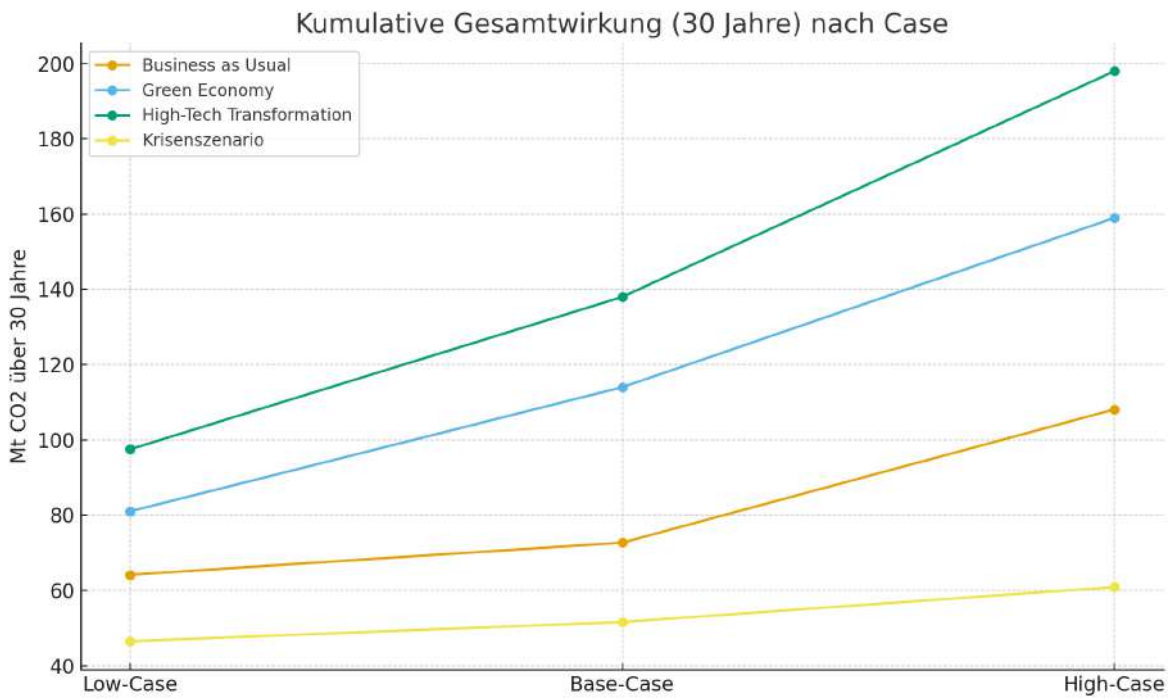


Abbildung 19: Kumulative Gesamtwirkung nach Case (Mt CO₂/a30)

Die Ergebnisse werden in einer Szenario-Matrix 20 visualisiert, die Unterschiede in Potenzial, ökonomischer Tragfähigkeit und politischer Umsetzbarkeit übersichtlich darstellen.

4 SZENARIENANALYSE

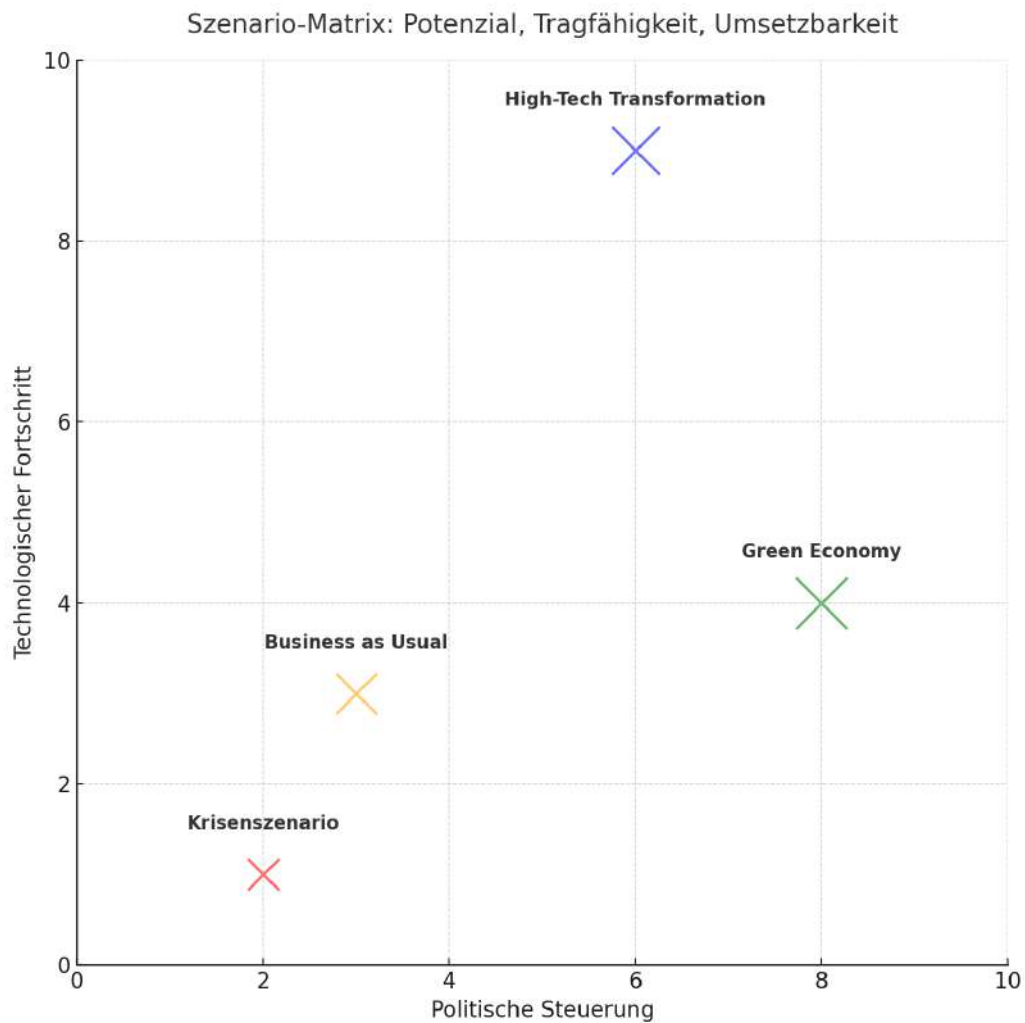


Abbildung 20: Szenario-Matrix: Unterschiede in Potenzial, ökonomischer Tragfähigkeit und politischer Umsetzbarkeit

4.8 Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation)

4.8.1 Was die robuste Lösung ausmacht

Das robuste Szenario ist kein zusätzliches "5. Szenario", sondern eine strategiegeleitete Zielarchitektur, die folgenden als robuste Strategien beschrieben ist: Diversifikation der Verwertungswege, Kombination aus stofflicher Nutzung und Endlagerungspfaden (Hybridstrategie), Monitoring/Reporting der CO₂-Bindung sowie enge Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfung (Abfallwirtschaft–Bau–Biobasische Industrie). Diese Prinzipien sorgen dafür, dass die Klimawirkung unter sehr unterschiedlichen Zukunftsbedingungen tragfähig bleibt, also sowohl bei politisch/technologisch günstiger Lage als auch unter Stress (krisenhafte Phasen).

Konkret bedeutet das:

Kaskadennutzung als Standard (Papier → langlebige Verbund-/Bauprodukte → Restfraktionen in Biokohle), um Speicherzeiten zu verlängern und den Netto-Bindungseffekt zu maximieren.

Diversifizierte Pfade für Holzabfälle (höherer stofflicher Anteil, gesicherte Mindestquote auch

4 SZENARIENANALYSE

in Krisen; Biochar-Pfad als endlagerfähige Senke), weil Holz das grösste, aber volatilste Zusatzpotenzial bietet.

Operative Resilienz: Qualitäts-/Sortierstandards, flexible Zuteilung zwischen Pfaden, Reporting der gebundenen tCO₂ und klare Governance/Anreize (EPR/Anrechnung in Klimabilanzen).

Die unten stehende Quantifizierung wurde an deinen Szenario-Tabellen (Kap. 7) kalibriert. Ziel:

Low-Case bleibt über BAU-Niveau, selbst unter Stress.

Base-Case liegt zwischen Green Economy und High-Tech Transformation.

High-Case nähert sich High-Tech, ohne es zu übertreffen.

Tabelle 10: Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation): jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	0.70	0.85	1.05
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	0.85	1.05	1.15
Summe Vermeidung	1.55	1.90	2.20
Biogene Speicher: Holzprodukte	1.10	1.60	2.30
Biogene Speicher: Biokohle	0.50	0.80	1.10
Summe biogene Speicherung	1.60	2.40	3.40

Tabelle 11: Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation): kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	21.0	25.5	31.5
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	25.5	31.5	34.5
Summe Vermeidung	46.5	57.0	66.0
Biogene Speicher: Holzprodukte	33.0	48.0	69.0
Biogene Speicher: Biokohle	15.0	24.0	33.0
Summe biogene Speicherung	48.0	72.0	102.0

Tabelle 12: Gesamtauswertung (Base-Case): jährliche und kumulative Klimawirkung je Szenario

Szenario	jährl. Vermeidung [Mt/a]	jährl. Speicherung [Mt/a]	jährl. Gesamt [Mt/a]	30J Vermeidung [Mt]	30J Speicherung [Mt]	30J Gesamt [Mt]
Business as Usual	1.334	1.089	2.423	40.017	32.666	72.683
Green Economy	1.800	2.000	3.800	54.000	60.000	114.000
High-Tech Transformation	2.000	2.600	4.600	60.000	78.000	138.000
Robustes Szenario	1.900	2.400	4.300	57.000	72.000	129.000
Krisenszenario	1.170	0.550	1.720	35.100	16.500	51.600

4 SZENARIENANALYSE

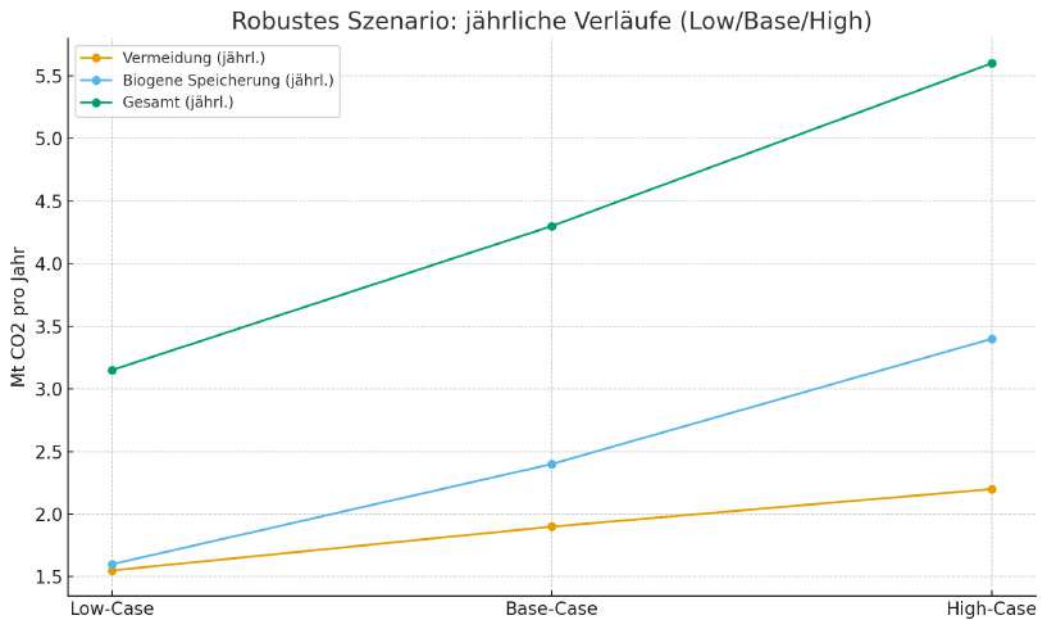


Abbildung 21: Robustes Szenario, jährliche Verläufe

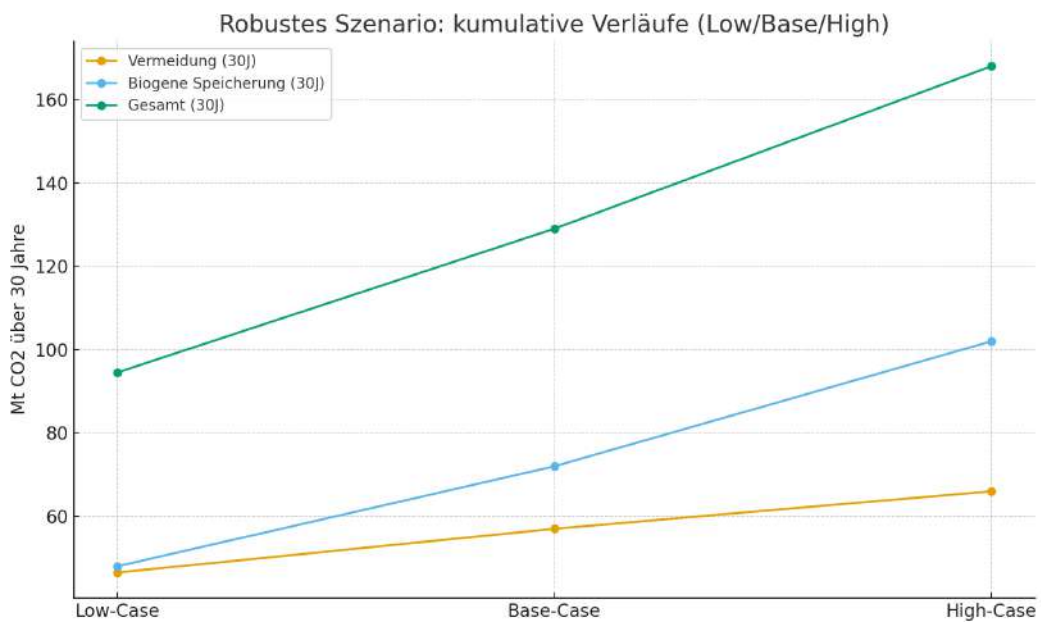


Abbildung 22: Robustes Szenario, kumulative Verläufe

4.9 Implikationen für die Strategieentwicklung

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass die Transformation hin zu einer klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft nicht durch einzelne Massnahmen erreicht werden kann, sondern das Zusammenspiel mehrerer Faktoren erfordert.

Ein zentraler Hebel ist die politische Lenkung. Nur wenn regulatorische Rahmenbedingungen und ökonomische Anreize gesetzt werden, können kohlenstoffspeichernde Produkte langfristig am Markt etabliert und ihre Vorteile gegenüber

4 SZENARIENANALYSE

konventionellen Alternativen sichtbar gemacht werden (European Commission 2019b; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022a).

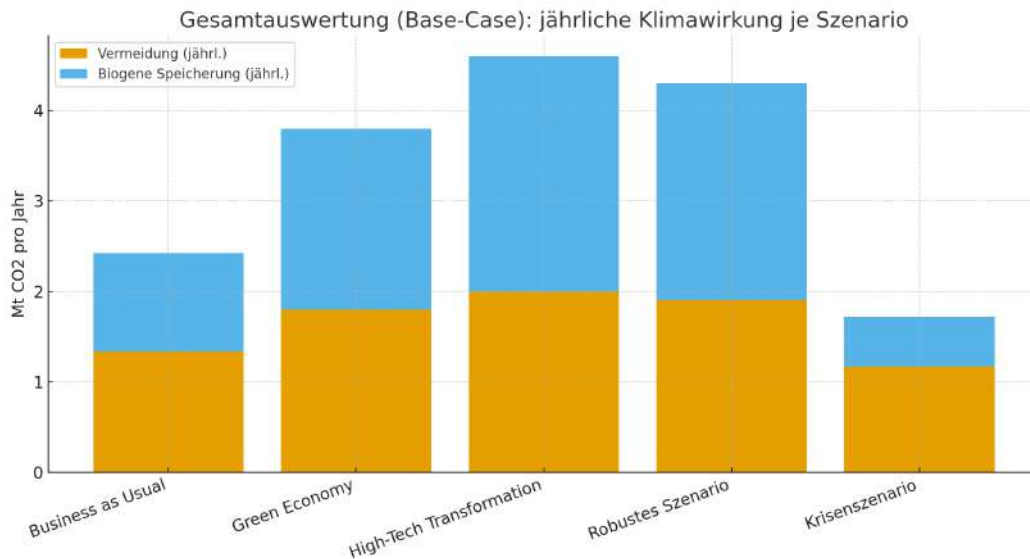


Abbildung 23: Gesamtauswertung (Base-Case): jährliche Klimawirkung je Szenario

Ebenso sind technologische Innovationen von grosser Bedeutung. Verfahren zur stofflichen Aufbereitung von Holzabfall oder zur Entwicklung neuer Zelluloseprodukte eröffnen zusätzliche Optionen der Kohlenstoffbindung. Diese Ansätze erfordern jedoch gezielte Investitionen in Forschung, Infrastruktur und industrielle Umsetzung, um ihre Wirkung zu entfalten (Moon u. a. 2011; Xu, Arpin, Arvidsson u. a. 2018; IEA Bioenergy 2021).

Besonders hervorzuheben ist das Potenzial von Holzabfall. Dieser Stoffstrom weist das grösste unausgeschöpfte Reservoir für die Kreislaufwirtschaft auf, stellt jedoch hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung und Aufbereitung. Eine erfolgreiche Nutzung setzt daher sowohl technologische Lösungen als auch ein verbessertes Sammel- und Sortiersystem voraus (European Environment Agency (EEA) 2020; Bundesamt für Statistik (BFS) 2023).

4 SZENARIENANALYSE

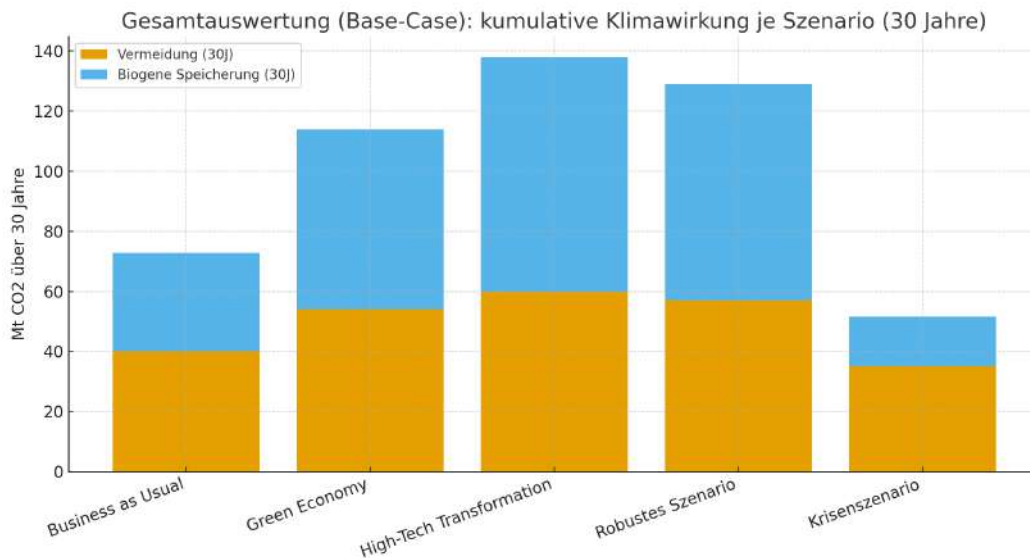


Abbildung 24: Gesamtauswertung (Base-Case): kumulative Klimawirkung je Szenario (30 Jahre)

Schliesslich gilt es, robuste Strategien zu entwickeln, die sowohl in stabilen Markt- und Politikphasen als auch unter krisenhaften Bedingungen tragfähig sind. Diversifikation in den Nutzungspfaden – also die parallele Förderung von energetischen, stofflichen und innovativen Verwertungswegen – erhöht die Resilienz des Systems und mindert Abhängigkeiten von einzelnen Märkten oder Technologien (Kirchherr, Reike und Hekkert 2017; Geissdoerfer u. a. 2017).

Insgesamt verdeutlichen die Szenarien, dass eine konsequente Kombination aus politischer Steuerung, technologischer Weiterentwicklung und einer breiten Nutzung vorhandener Abfallströme notwendig ist, um die Rolle von Sekundärzellulose als strategischen Hebel für Klimaschutz und Ressourcenschonung voll auszuschöpfen.

5 Strategieentwicklung

Auf Grundlage der Analyse des stofflichen Potenzials, des CO₂-Bindungspotenzials sowie der Szenarienanalyse werden in diesem Kapitel Strategien entwickelt, die eine nachhaltige Nutzung von Sekundärzellulose ermöglichen. Ziel ist es, sowohl kurzfristig wirksame Massnahmen als auch langfristig robuste Ansätze zu identifizieren, die unter unterschiedlichen Zukunftsbedingungen tragfähig bleiben.

5.1 Leitprinzipien für eine nachhaltige Strategie

Die Entwicklung einer zukunftsfähigen Strategie orientiert sich an folgenden Leitprinzipien:

Kaskadennutzung: Vorrang der stofflichen vor der energetischen Nutzung.

Klimawirksamkeit: Maximierung der Netto-CO₂-Bindung durch langlebige Produkte und Endlagerungspfade.

Ressourceneffizienz: Minimierung von Energie- und Chemikalienaufwand bei der Aufbereitung.

Resilienz: Anpassungsfähigkeit gegenüber ökonomischen, technologischen und politischen Unsicherheiten.

5.2 Stakeholder-Analyse

Eine Stakeholder-Analyse schafft die belastbare Grundlage für die Strategienentwicklung. Sie identifiziert systematisch die relevanten Akteure (z. B. Politik, Industrie, Entsorgung, Bau, Landwirtschaft, NGOs, Verbraucher, Finanzierung)(Kirchherr, Reike und Hekkert 2017; Geissdoerfer u. a. 2017), legt deren Interessen, Erwartungen und Anforderungen offen und macht Zielkonflikte wie auch gemeinsame Schnittmengen sichtbar. Auf dieser Basis lassen sich zielgruppenspezifische, priorisierte und realistisch umsetzbare Massnahmen ableiten: Strategien werden in Sprache, Nutzenargumenten, Instrumenten (z. B. Anreize, Normen, Beschaffungskriterien) und Zeitplan so personalisiert, dass sie die jeweiligen Stakeholder direkt ansprechen und ihre Bedürfnisse adressieren, von verlässlichen Rahmenbedingungen über Qualitäts- und Kostenanforderungen bis hin zu Transparenz, MRV und gesellschaftlicher Akzeptanz.(Brugha und Varvasovszky 2000),(Reed u. a. 2009)
Die Stakeholder-Analyse übersetzt ein heterogenes Umfeld in handlungsleitende, passfähige Strategien, erhöht damit die Aussicht auf Kooperation und Umsetzungserfolg und reduziert Reibungsverluste durch frühzeitige Berücksichtigung legitimer Interessen.(Freeman 1984),(Mitchell, Agle und Wood 1997)

5 STRATEGIEENTWICKLUNG

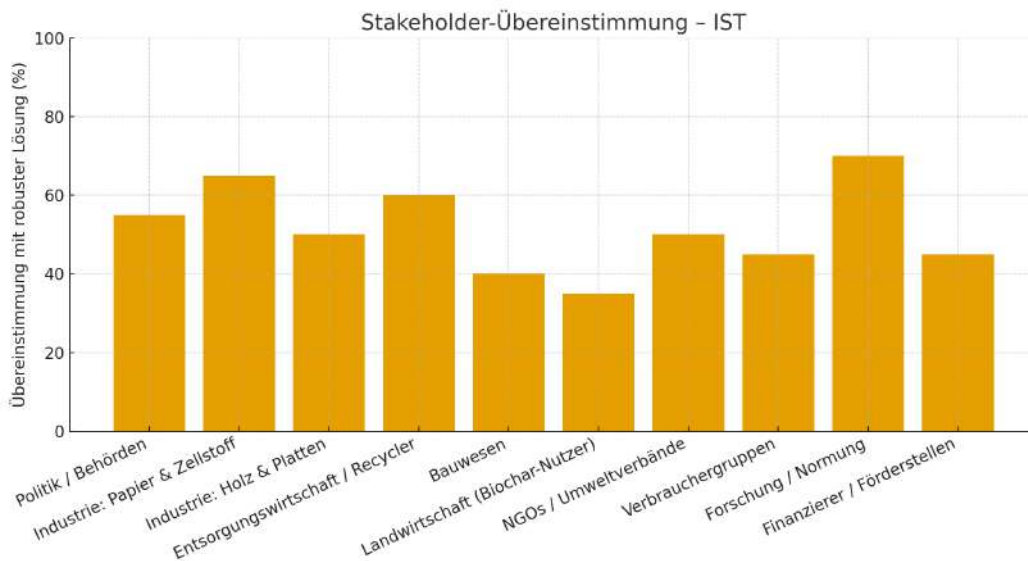


Abbildung 25: Stakeholder -ISTbild-

Tabelle 13: Übereinstimmung mit robuster Lösung – IST, Ziel und Delta

Stakeholder	IST [%]	Ziel [%]	Δ [pp]
Politik / Behörden	55	85	30
Industrie: Papier & Zellstoff	65	85	20
Industrie: Holz & Platten	50	80	30
Entsorgungswirtschaft / Recycler	60	85	25
Bauwesen	40	75	35
Landwirtschaft (Biochar-Nutzer)	35	80	45
NGOs / Umweltverbände	50	80	30
Verbrauchergruppen	45	70	25
Forschung / Normung	70	90	20
Finanzierer / Förderstellen	45	80	35

Die tabellarische Auswertung der Übereinstimmung mit der robusten Lösung („Kaskadennutzung + Biochar-Senke + MRV“) quantifiziert die qualitative Analyse des Stakeholder IST-Zustands 25 und leitet zum angestrebten Zielbild 26 über.

Die IST-Werte zeigen, dass die Übereinstimmung mit der robusten Strategie derzeit bei der Forschung/Normung (70 %) und der Papierindustrie (65 %) am höchsten ist, was die Etablierung dieser Sektoren widerspiegelt.

Die grössten Diskrepanzen und damit die grössten Hebel für die Transformation bestehen jedoch bei der Landwirtschaft (Δ 45 pp), dem Bauwesen (Δ 35 pp) und den Finanzierern (Δ 35 pp).

Diese Gruppen müssen durch gezielte politische Lenkung, verfügbare Normen und attraktive Geschäftsmodelle (z.B. durch CO₂-Gutschriften) mobilisiert werden, um die Lücke zwischen dem heutigen Stand und dem angestrebten Zielwert von 70 % bis 90 % vollständig zu schliessen. Die notwendigen Handlungen, die sich aus diesen Deltas ableiten, bilden die Basis für die folgenden strategischen Empfehlungen.

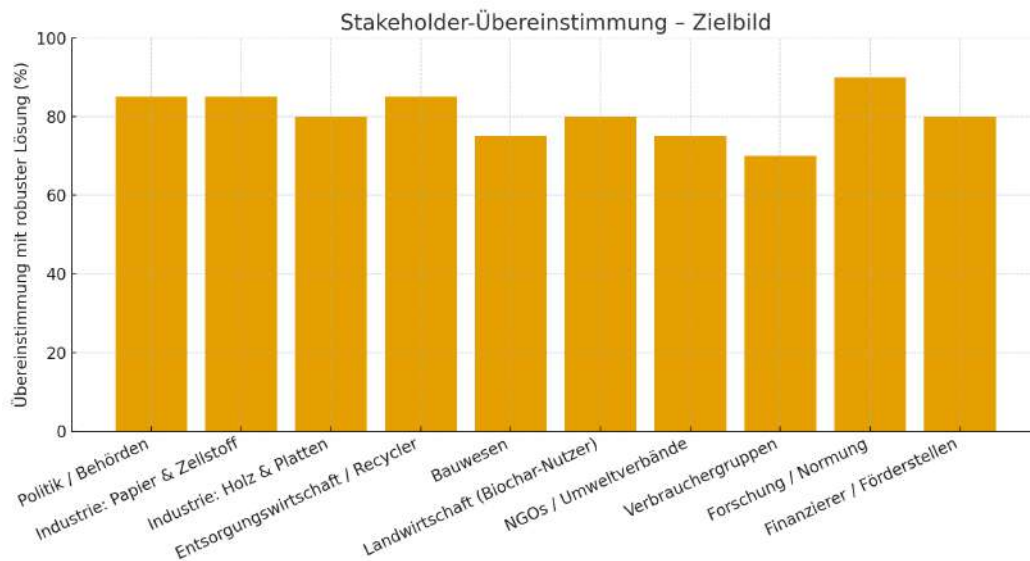


Abbildung 26: Stakeholder -Zielbild-

Die Analyse zeigt eine heterogene Ausgangslage: hohe Nähe bei Forschung/Normung und Papierindustrie, mittlere bei Politik/Recycler, niedrige bei Bau, Landwirtschaft, Finanzen. Für die robuste Lösung (Diversifikation + Kaskade + verlässliche Senken/“Biochar-Kanal” + MRV) braucht es:

Politik: gezielte Anreize (z. B. CfD/CapEx-Förderung, CO₂-Leitplanken in Ausschreibungen), verbindliches Monitoring (MRV) und Normen für LLP/Biochar.

Industrie (Papier/Holz): Qualität/Sortierung nach EN-Standards, Abnahmegarantien und Premiums für Sekundärfasern/Platten mit Rezyklat; Zulassung neuer Anwendungen (chemische Pfade, Bioverbunde).

Entsorger: Flex-Dispatch zwischen Pfaden (stofflich ↔ Biochar ↔ energetisch) je Qualität/Markt; Qualitätsboni statt reinem Tonnage-Fokus.

Bauwesen: Normative Öffnung (EPD/CO₂-Grenzwerte), Planungs-/Vergabekriterien mit Rezyklatanteil; Musterleistungsverzeichnisse.

Landwirtschaft: Biochar-Zertifikate & Qualität (C-Gehalt, Schadstoffgrenzen), Praxisprogramme (Feldversuche, Beratung).

NGOs/Verbraucher: Transparenz & Label, No-regret-Kaskaden (Umwelt-Leitplanken, Biodiversität).

Finanzierer: Bankability durch gesicherte Erlösströme (CO₂-Gutschriften/Prämien), Kreditgarantien, Projektbündelung.

Damit steigt die Ziel-Übereinstimmung in Richtung 75–90 % über alle Gruppen ausreichend, um die robuste Lösung (Kaskade + Biochar-Senke + MRV) skaliert umsetzbar zu machen 38.

5.3 Handlungsempfehlungen für die stoffliche Nutzung

Die stoffliche Nutzung von Sekundärcellulose eröffnet vielfältige Potenziale, die gezielt weiterentwickelt werden sollten. Ein zentrales Handlungsfeld liegt im Bereich des Altpapiers. Für Fasern niedriger Qualität, die nach mehrmaligem Recycling ihre physikalischen Grenzen erreicht haben, ist die konsequente Verlängerung der Kaskadennutzung entscheidend. Hier bietet die chemische oder enzymatische Hydrolyse die Möglichkeit, biobasierte

Plattformchemikalien wie Glukose oder Laktate zu gewinnen, die als Vorprodukte für die Herstellung von Biokunststoffen dienen. Parallel eröffnet die Produktion von Nanocellulose (MFC/CNC) neue Anwendungsfelder, etwa als hochfestes Additiv oder funktionales Beschichtungsmaterial. Auf diese Weise kann der Übergang von einer klassischen Papierrecycling-Ökonomie hin zu einer bioökonomischen Rohstoffbasis unterstützt werden (Kirchherr, Reike und Hekkert 2017; Geissdoerfer u. a. 2017; United Nations Environment Programme (UNEP) 2011).

Auch im Bereich des Abbruchholzes bestehen erhebliche Potenziale, die bislang nur unzureichend genutzt werden. Die Weiterentwicklung hocheffizienter Aufbereitungsverfahren – insbesondere automatisierte und sensorgestützte Sortierprozesse – ist dabei zentral, um sortenreine Rohstoffe für eine hochwertige stoffliche Nutzung zu erschließen. Ein besonderer Fokus sollte auf der thermomechanischen Fraktionierung liegen, die die Grundlage für die Herstellung von Zellulose-Dämmstoffen wie Holzfaserplatten oder Einblasdämmungen sowie für leichte Bauplatten bildet. Solche Anwendungen ermöglichen eine langfristige Kohlenstoffbindung im Gebäudesektor und leisten somit einen wesentlichen Beitrag zur Klimastrategie im Bauwesen (Bundesamt für Statistik (BFS) 2023; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b).

Darüber hinaus sollte die Entwicklung innovativer Bauprodukte, die Zellulose als tragenden und gleichzeitig isolierenden Werkstoff integrieren, verstärkt gefördert werden. Perspektiven ergeben sich vor allem in zwei Bereichen: Zum einen eröffnet die Kombination von Zellulose mit Lignin oder biobasierten Harzen die Möglichkeit, langlebige Verbundmaterialien für Fassaden- und Innenverkleidungen zu schaffen. Zum anderen kann die Integration aufbereiteter Holz- und Papierfasern in zement- oder gipsgebundene Systeme zur Herstellung von Zellulose-Zement-Kompositen beitragen. Diese Ansätze besitzen das Potenzial, energieintensive Baustoffe wie Beton oder mineralische Dämmstoffe partiell zu substituieren und so sowohl die Materialeffizienz als auch die Klimabilanz im Bauwesen zu verbessern (European Commission 2019c; CEPI 2023).

5.4 Handlungsempfehlungen zur Kohlenstoffbindung

Eine zentrale Stellschraube für die Transformation hin zu einer kohlenstoffbindenden Kreislaufwirtschaft liegt in der regulatorischen Förderung langlebiger Produkte (LLP). Politische und wirtschaftliche Anreize sind erforderlich, um die Substitution kurzlebiger Anwendungen durch langlebige Zelluloseprodukte, etwa in Form von Isolations- oder Bauplatten, gezielt voranzutreiben. Auf diese Weise lässt sich die durchschnittliche Speicherdauer biogenen Kohlenstoffs signifikant erhöhen und ein wesentlicher Beitrag zur langfristigen Emissionsminderung leisten (European Commission 2019c; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b; Xu, Arpin, Arvidsson u. a. 2018).

Darüber hinaus eröffnet die Integration von Biokohle (Biochar) als permanente Kohlenstoffsенke substanzielle Potenziale. Hierfür bedarf es des systematischen Ausbaus von Wertschöpfungsketten, die Restfraktionen aus der Altpapieraufbereitung (z. B. Schlämme und Feinstoffe) sowie nicht stofflich verwertbare Holzanteile einer Pyrolyse zuführen. Das entstehende Biochar muss strategisch in langlebige Anwendungen eingebunden werden, etwa als Additiv in Zement oder zur Bodenverbesserung, um eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung zu gewährleisten (European Environment Agency (EEA) 2020; United Nations Environment Programme (UNEP) 2011).

Schließlich ist die Anrechenbarkeit und das Monitoring der Kohlenstoffspeicherung ein entscheidender Faktor für die Implementierung. Die Anerkennung der Speicherdauer langlebiger Zelluloseprodukte und von Biokohle in nationalen wie internationalen Klimabilanzen, beispielsweise im Rahmen des Carbon Removal Certification Framework (CRCF), schafft die Grundlage für eine konsistente CO₂-Buchhaltung. Gleichzeitig gewährleisten klare Vorgaben zu Monitoring-, Reporting- und Verification-Prozessen (MRV)

5 STRATEGIEENTWICKLUNG

Investitionssicherheit und fördern die notwendige Skalierung dieser Technologien im industriellen Maßstab (European Commission 2024; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022).

5.5 Robuste Strategien

Unabhängig von der spezifischen Ausgestaltung einzelner Szenarien lassen sich übergreifende Strategien identifizieren, die in sämtlichen Zukunftspfaden eine hohe Relevanz behalten. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Diversifikation der Verwertungswege, um strukturelle Abhängigkeiten von einzelnen Technologien oder Märkten zu vermeiden und die Resilienz des Gesamtsystems zu erhöhen. Ergänzend erweist sich eine Kombination aus stofflicher Nutzung und Endlagerungspfaden im Sinne einer „Hybridstrategie“ als zielführend, da sie sowohl kurzfristige Substitutionseffekte als auch eine langfristige Kohlenstoffbindung gewährleistet.

Darüber hinaus ist der Aufbau robuster Monitoring- und Berichtssysteme für die CO₂-Bindung durch Sekundärzellulose unerlässlich. Nur durch transparente und überprüfbare Daten kann eine glaubwürdige Anrechnung in nationalen wie internationalen Klimabilanzen erfolgen, was wiederum die Voraussetzung für regulatorische Anerkennung und wirtschaftliche Tragfähigkeit bildet. Schließlich ist eine verstärkte Kooperation zwischen Abfallwirtschaft, Bauwirtschaft und der biobasierten Industrie erforderlich, um Synergien entlang der Wertschöpfungsketten zu erschließen und Innovationen in die Praxis zu überführen.

5.6 Schlussfolgerung

Die strategische Nutzung von Sekundärzellulose erfordert ein Zusammenspiel von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Während Altpapier in etablierten Recyclingkreisläufen bereits genutzt wird, liegt das grösste unerschlossene Potenzial in der stofflichen Verwertung von Abbruchholz. Durch die Integration langlebiger Zelluloseprodukte und die Etablierung von Endlagerungspfaden wie Biokohle kann Sekundärzellulose zu einem wesentlichen Baustein einer klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft werden.

6 Anhang

6.1 Quellenangaben

Literatur

- Arvidsson, R. und A.-M. Tillman (2018). „Life Cycle Assessment of Wood and Cellulose Products: A Review“. In: *Environmental Science & Technology*. DOI: 10.1021/acs.est.8b01142 (siehe S. 4, 5, 10).
- BFH Think Earth (2020). *Holzabfall in der Schweiz – Potenziale für Recycling und Kaskadennutzung*. Berner Fachhochschule. URL: <https://www.bfh.ch> (siehe S. 4, 5).
- Brugha, R. und Z. Varvasovszky (2000). „Stakeholder analysis: a review“. In: *Health Policy and Planning*. DOI: 10.1093/heapol/15.3.239 (siehe S. 29).
- Bundesamt für Statistik (BFS) (2023). *Bauabfälle und Abbruchholz – Statistikdaten*. Zugriff: 2025-09-17. URL: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauen-wohnen.html> (siehe S. 4, 10, 27, 32, 45).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2022a). *Kreislaufwirtschaft in der Schweiz – Strategien und Fakten*. Zugriff: 2025-09-17. URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/kreislaufwirtschaft.html> (siehe S. 27).
- (2022b). *Papier und Karton – Faktenblatt*. Zugriff: 2025-09-17. URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallstatistik/papier-und-karton.html> (siehe S. 4, 10, 12, 32, 45).
- Bundesrat der Schweiz (2016). *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)*. SR 814.600. URL: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/891/de> (siehe S. 2, 5).
- CEPI (2023). *Key Statistics 2022*. Zugriff: 2025-09-17. Confederation of European Paper Industries. URL: <https://www.cepi.org/key-statistics-2022> (siehe S. 4, 10, 32, 45).
- Ellen MacArthur Foundation (2020). *The Circular Economy in Detail*. Accessed: 2025-09-30. URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org> (siehe S. 45).
- Empa (2020). *Holzabfälle als Ressource: Potenziale für Biokohle und Kreislaufwirtschaft*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). URL: <https://www.empa.ch> (siehe S. 5).
- (2021). *Nanocellulose und biobasierte Materialien*. URL: <https://www.empa.ch> (siehe S. 4).
- EPRC (2022). *Monitoring Report 2022 – European Paper Recycling*. European Paper Recycling Council. URL: <https://www.paperrecovery.org> (siehe S. 4, 10).
- ETH Zürich (2022). *Zellulose als Werkstoff der Zukunft – Forschungsprojekte*. URL: <https://ethz.ch> (siehe S. 4).
- European Commission (2019a). *The European Green Deal*. European Union. URL: <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal> (siehe S. 4, 12).
- (2019b). *The European Green Deal*. Mitteilung der Europäischen Kommission COM(2019) 640 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (siehe S. 27).
- (2019c). *The European Green Deal*. Accessed: 2025-09-30. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (siehe S. 32, 45).
- (2020). *Special Eurobarometer 501: Attitudes towards the environment*. Accessed: 2025-09-30. URL: <https://europa.eu/eurobarometer> (siehe S. 45).
- (2022). *Proposal for a Regulation on Packaging and Packaging Waste*. European Union. URL: https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-packaging-and-packaging-waste-regulation_en (siehe S. 5, 10).
- (2024). *Carbon Removal Certification Framework (CRCF)*. Accessed: 2025-10-01. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals/carbon-removal-certification_en (siehe S. 33).
- European Committee for Standardization (CEN) (2014). *EN 643: European List of Standard Grades of Recovered Paper and Board*. Basisnorm für Altpapiersorten und Ausbeuten. URL: <https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CENWEB:105::RESET:::::> (siehe S. 10).
- European Environment Agency (EEA) (2020). *Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy*. Zugriff: 2025-09-17. EEA. URL:

LITERATUR

- <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste> (siehe S. 27, 32).
- Eurostat (2022). *Waste Statistics – Wood Waste EU-27*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (siehe S. 5).
- FOEN (2021). *Holzabfälle und Abbruchholz in der Schweiz – Statistischer Überblick*. Bundesamt für Umwelt (BAFU/FOEN). URL: <https://www.bafu.admin.ch> (siehe S. 4, 5, 10).
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Pitman (reissued by Cambridge University Press, 2010). URL: <https://www.cambridge.org/core/books/strategic-management/E3CC2E2CE01497062D7603B7A8B9337F> (siehe S. 29).
- Geissdoerfer, M. u. a. (2017). „The Circular Economy – A new sustainability paradigm?“ In: *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048 (siehe S. 28, 29, 32).
- Haberl, H. u. a. (2019). „A systematic review of the bioeconomy: Global and regional dimensions“. In: *Sustainability*. DOI: 10.3390/su11040997 (siehe S. 4).
- Hischier, R. (2010). „Life Cycle Assessment of Cellulose-based Products“. In: *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.002 (siehe S. 4, 5, 10).
- IEA (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (siehe S. 2, 10).
- IEA Bioenergy (2021). *The cascading use of woody biomass: definitions, policies and effects*. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/04/Cascading-Use-Report.pdf> (siehe S. 27).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*. Accessed: 2025-10-01. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (siehe S. 33).
- International Energy Agency (IEA) (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach (2023 Update)*. Dekarbonisierung des Strommix EU und global bis 2050. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-2023> (siehe S. 10).
- International Organization for Standardization (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (siehe S. 10).
- IPCC (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Standardquelle für Emissionsfaktoren und Kohlenstoffgehalte. Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (siehe S. 10).
- Japan Paper Association (2019). *Paper Recycling Promotion in Japan*. URL: <https://www.jpap.gr.jp> (siehe S. 4).
- Kirchherr, J., D. Reike und M. Hekkert (2017). „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“. In: *Resources, Conservation and Recycling*. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005 (siehe S. 28, 29, 32).
- Lehmann, J. und S. Joseph (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd. Routledge (siehe S. 4, 5, 10).
- Mitchell, R. K., B. R. Agle und D. J. Wood (1997). „Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience“. In: *Academy of Management Review* 22.4, S. 853–886. DOI: 10.5465/AMR.1997.9711022105. URL: <https://www.jstor.org/stable/259247> (siehe S. 29).
- Moon, R. J. u. a. (2011). „Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites“. In: *Chemical Society Reviews*. DOI: 10.1039/C0CS00108B (siehe S. 27).
- Nordic Council (2020). *Circular Use of Wood in Scandinavia*. URL: <https://www.norden.org> (siehe S. 4).
- Reed, M. S. u. a. (2009). „Who’s in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management“. In: *Journal of Environmental Management* 90.5, S. 1933–1949. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.01.001. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479709000024> (siehe S. 29).
- Schmidt, H.-P. und S. Shackley (2021). „Carbon Sequestration through Biochar: Potentials and Limits“. In: *Frontiers in Environmental Science* 9, S. 1–12. DOI: 10.3389/fenvs.2021.671 (siehe S. 4, 5, 10).
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2023). *Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (Klimaschutz-Gesetz)*. Reduktion des CO₂-Faktors im Schweizer Strommix bis 2050. URL: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2023/437/de> (siehe S. 10).
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. Accessed: 2025-09-30. URL:

TABELLENVERZEICHNIS

https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/126GER_synthesis_en.pdf
(siehe S. 32).

Waste Wood—Untapped Potential (context in CH/EU) (2020). Techn. Ber. Cited in thesis. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu> (siehe S. 10).

WWF International (2021). *Forests and the Circular Economy*. Accessed: 2025-09-30. URL: <https://www.wwf.org> (siehe S. 45).

Xu, C., M. Arpin, R. Arvidsson u. a. (2018). „Sustainable carbon storage using wood-based materials“. In: *Nature Sustainability*. DOI: 10.1038/s41893-018-0085-1 (siehe S. 27, 32).

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Extrapolation Altpapier-Szenarien Schweiz bis 2050. Mengen in Mio. Tonnen (Mt), Recyclingquote in Klammern. Quellen: CEPI 2022; OECD 2022; EU 2022 (PPWR); BAFU 2022.	6
2	Holzabfälle Schweiz – Projektion der Gesamtmengen (t) für 2030, 2040, 2050 ausgehend von 2023 (858'300 t).	7
3	Extrapolation Altpapier-Szenarien Europa bis 2050. Mengen in Mio. Tonnen (Mt), Recyclingquote in Klammern. Quellen: CEPI 2022; OECD 2022; EU 2022 (PPWR).	7
4	EU-27 Holzabfälle – Projektion der Mengen (Mt) und Recyclingquoten (%) für 2030, 2040, 2050. Basisjahr: 2020 (48.2 Mt, 46 %).	8
5	Kernaussagen & Default-Annahmen für die Projektion bis 2050 (CH/EU)	10
6	Altpapier – Zusatzpotenziale bis 2050 ggü. 2023 (konstante Verbrauchsbasis)	11
7	Holzabfälle CH/EU – stoffliche Nutzung und Kohlenstoffspeicher (Low/Base/High)	11
8	Case-Faktoren (global) – gelten als Baseline und werden je Szenario angepasst	14
9	Szenario-spezifische Einstellungen (Low / Base / High je Szenario)	14
10	Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation): jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	25
11	Robustes Szenario (Resilienz & Diversifikation): kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	25
12	Gesamtauswertung (Base-Case): jährliche und kumulative Klimawirkung je Szenario	25
13	Übereinstimmung mit robuster Lösung – IST, Ziel und Delta	30
14	Rechenbeispiel: Papier EU – Base-Case 2050 (Substitution)	38
15	Rechenbeispiel: Holz CH – Base-Case (CO ₂ -Speicher)	38
16	Beispiel: Referenzwerte Recyclingquoten Papier (Europa)	38
17	Projektionsannahmen: Materialintensität und Wachstum	38
18	Szenarien × Cases: jährliche Ergebnisse (Mt CO ₂ /a)	39
19	Szenarien × Cases: kumulative Ergebnisse (30 Jahre, Mt CO ₂)	39
20	Base-Case Vergleich aller Szenarien – jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	40
21	Base-Case Vergleich aller Szenarien – kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	40
22	Case-Faktoren (global): Energie-, Substitutions- und Permanenzannahmen	40
23	Case-Faktoren Altpapier (AP)	40
24	Case-Faktoren Holzabfall (AH)	40
25	Szenarioeinstellungen – Business as Usual (Low/Base/High)	41
26	Szenarioeinstellungen – Green Economy (Low/Base/High)	41
27	Szenarioeinstellungen – Technological Push (Low/Base/High)	41
28	Szenarioeinstellungen – Krisenszenario (Low/Base/High)	42
29	Robustes Szenario: Low/Base/High-Faktoren	42
30	Szenario 1 – Business as Usual: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	42
31	Szenario 1 – Business as Usual: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	43
32	Szenario 2 – Green Economy: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	43
33	Szenario 2 – Green Economy: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	43

34	Szenario 3 – Technological Push: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	43
35	Szenario 3 – Technological Push: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	44
36	Szenario 4 – Krisenszenario: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a)	44
37	Szenario 4 – Krisenszenario: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂)	44
38	Auswertung der zentralen Stakeholder im Kontext der Kreislaufwirtschaft (CH/EU)	45

6.3 Abbildungsverzeichnis

Sämtliche Abbildungen wurden eigenständig erstellt. Die darin verwendeten Daten sind in den Tabellen ausgewiesen und durch entsprechende Quellenangaben weiterführend referenziert.

Abbildungsverzeichnis

1	Extrapolations Altpapier Schweiz 2050	6
2	Extrapolations Holzabfälle Schweiz 2050	7
3	Extrapolations Altpapier Europa 2050	8
4	Extrapolations Holzabfall Europa 2050	9
5	Übersicht der Szenarien im Spannungsfeld von politischer Steuerung und technologischem Fortschritt.	14
6	Szenario 1, Business as Usual: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a) ³⁰	15
7	Szenario 1, Business as Usual: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂) ³¹	16
8	Szenario 2, Green Economy: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a) ³²	17
9	Szenario 2, Green Economy: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂) ³³	17
10	Szenario 3, Technological Push: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a) ³⁴	18
11	Szenario 3, Technological Push: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂) ³⁵	19
12	Szenario 4, Krisenszenario: jährliche Wirkung (Mt CO ₂ /a) ³⁶	19
13	Szenario 4, Krisenszenario: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO ₂) ³⁷	20
14	Jährliche Vermeidung nach Case (Mt CO ₂ /a)	20
15	Jährliche biogene Speicherung nach Case (Mt CO ₂ /a)	21
16	Jährliche Gesamtwirkung nach Case (Mt CO ₂ /a)	21
17	Kumulative Vermeidung nach Case (Mt CO ₂ /a ³⁰)	22
18	Kumulative biogene Speicherung nach Case (Mt CO ₂ /a ³⁰)	22
19	Kumulative Gesamtwirkung nach Case (Mt CO ₂ /a ³⁰)	23
20	Szenario-Matrix: Unterschiede in Potenzial, ökonomischer Tragfähigkeit und politischer Umsetzbarkeit	24
21	Robustes Szenario, jährliche Verläufe	26
22	Robustes Szenario, kumulative Verläufe	26
23	Gesamtauswertung (Base-Case): jährliche Klimawirkung je Szenario	27
24	Gesamtauswertung (Base-Case): kumulative Klimawirkung je Szenario (30 Jahre)	28
25	Stakeholder -ISTbild-	30
26	Stakeholder -Zielbild-	31

6.4 Appendix

6.5 Hintergrunddaten (selbsterstellt)

6.5.1 Case Grunddaten

$$GHG_{\text{benefit}} = (R_{2050}^* - R_{2023}) \cdot SF_{\text{pulp}} \cdot EF_{\text{pulp}}$$

$$CO_2\text{-Speicher} = m_{\text{stofflich}} \cdot w_C \cdot \frac{44}{12}$$

$$\text{Kumulativ}_{30} = \text{Jhrlich} \times 30$$

Tabelle 14: Rechenbeispiel: Papier EU – Base-Case 2050 (Substitution)

Größe	Wert	Einheit
Zusatz-Recyclingmenge ΔR	3.84	Mt/a
Substitutionsfaktor SF_{pulp}	0.90	–
Verdrängter Frischzellstoff	$3.84 \cdot 0.90 = 3.46$	Mt/a
Emissionsfaktor EF_{pulp}	0.78	tCO ₂ e/t
THG-Gutschrift jährlich	$3.46 \cdot 0.78 = 2.70$	MtCO ₂ e/a
Kumulativ 30 a	$2.70 \cdot 30 = 81.0$	MtCO ₂ e

Tabelle 15: Rechenbeispiel: Holz CH – Base-Case (CO₂-Speicher)

Größe	Wert	Einheit
Gesamt Holzabfälle	1.00	Mt/a
Stofflicher Anteil	8	%
Stoffliche Menge $m_{\text{stofflich}}$	$1.00 \cdot 0.08 = 0.08$	Mt/a
C-Anteil w_C (odt)	0.50	–
Faktor 44/12	3.667	–
CO ₂ -Speicher jährlich	$0.08 \cdot 0.50 \cdot 3.667 = 0.147$	Mt/a
Kumulativ 30 a	$0.147 \cdot 30 = 4.41$	Mt

Tabelle 16: Beispiel: Referenzwerte Recyclingquoten Papier (Europa)

Quelle / Jahr	Recyclingquote Papier	Bemerkung
CEPI / EPRC 2022	70,5 %	Gesamtpapierwertkette in Europa index=8
CEPI / Monitoring 2023	79,3 %	Wert für gesamte Papier- & Kartonproduktionsindex=9
CEPI (Verpackung)	83,2 %	spezifisch auf Papierverpackung gerichtet index=10
CEPI historisch 2015	71,5 %	Basiswert vergangener Jahre index=11

Tabelle 17: Projektionsannahmen: Materialintensität und Wachstum

Quelle / Studie	Wert / Rate	Anmerkung
OECD „Global Material Resources Outlook“	+1,3 %/Jahr Rückgang Materialintensität	Anmerkung: Annahme der Dekopplung von Wirtschaftswachstum und Materialnutzung index=12, Verdopplung im Zeitraum index=13
OECD Projektion Gesamtmaterialnutzung 2060	89 Gt → 167 Gt	

6.5.2 Szenarien Grunddaten

Die folgenden Tabellen bündeln alle im Rahmen der Szenario-Erarbeitung erzeugten Hintergrunddaten (Cases, Faktoren, Ergebnisse).

 Tabelle 18: Szenarien × Cases: jährliche Ergebnisse (Mt CO₂/a)

Szenario	Case	Vermeidung (Mt/a)	Speicherung (Mt/a)	Gesamt (Mt/a)
Business as Usual	Low-Case	1.315	0.824	2.139
Business as Usual	Base-Case	1.334	1.089	2.423
Business as Usual	High-Case	1.408	2.196	3.604
Green Economy	Low-Case	1.500	1.200	2.700
Green Economy	Base-Case	1.800	2.000	3.800
Green Economy	High-Case	2.100	3.200	5.300
Technological Push	Low-Case	1.650	1.600	3.250
Technological Push	Base-Case	2.000	2.600	4.600
Technological Push	High-Case	2.600	4.000	6.600
Robustes Szenario	Low-Case	1.550	1.600	3.150
Robustes Szenario	Base-Case	1.900	2.400	4.300
Robustes Szenario	High-Case	2.200	3.400	5.600
Krisenszenario	Low-Case	1.100	0.450	1.550
Krisenszenario	Base-Case	1.170	0.550	1.720
Krisenszenario	High-Case	1.280	0.750	2.030

 Tabelle 19: Szenarien × Cases: kumulative Ergebnisse (30 Jahre, Mt CO₂)

Szenario	Case	Vermeidung (Mt)	Speicherung (Mt)	Gesamt (Mt)
Business as Usual	Low-Case	39.45	24.71	64.16
Business as Usual	Base-Case	40.02	32.67	72.68
Business as Usual	High-Case	42.24	65.88	108.12
Green Economy	Low-Case	45.00	36.00	81.00
Green Economy	Base-Case	54.00	60.00	114.00
Green Economy	High-Case	63.00	96.00	159.00
Technological Push	Low-Case	49.50	48.00	97.50
Technological Push	Base-Case	60.00	78.00	138.00
Technological Push	High-Case	78.00	120.00	198.00
Robustes Szenario	Low-Case	46.50	48.00	94.50
Robustes Szenario	Base-Case	57.00	72.00	129.00
Robustes Szenario	High-Case	66.00	102.00	168.00
Krisenszenario	Low-Case	33.00	13.50	46.50
Krisenszenario	Base-Case	35.10	16.50	51.60
Krisenszenario	High-Case	38.40	22.50	60.90

Tabelle 20: Base-Case Vergleich aller Szenarien – jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Szenario	Vermeidung (Mt/a)	Speicherung (Mt/a)	Gesamt (Mt/a)
Business as Usual	1.334	1.089	2.423
Green Economy	1.800	2.000	3.800
Technological Push	2.000	2.600	4.600
Robustes Szenario	1.900	2.400	4.300
Krisenszenario	1.170	0.550	1.720

Tabelle 21: Base-Case Vergleich aller Szenarien – kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Szenario	Vermeidung (Mt)	Speicherung (Mt)	Gesamt (Mt)
Business as Usual	40.017	32.666	72.683
Green Economy	54.000	60.000	114.000
Technological Push	60.000	78.000	138.000
Robustes Szenario	57.000	72.000	129.000
Krisenszenario	35.100	16.500	51.600

Tabelle 22: Case-Faktoren (global): Energie-, Substitutions- und Permanenzannahmen

Factor	Low	Base	High	Notes
Energie-EF (rel.)	1.1	1.0	0.85	Roadmap ungü./neutral/günstig
Substitution-EF Zellstoff (rel.)	0.95	1.0	1.1	Gutschrift ggü. Virgin-Pulp
Substitution-EF Holzwerkstoff (rel.)	0.9	1.0	1.1	Gutschrift ggü. Virgin-Panel
Sortier-/Prozessverluste	0.12	0.1	0.07	Reject/Schlamm/Handling
Permanenz Biochar [-]	0.85	0.9	0.95	Prozess-/Anwendungsabhängig
Lebensdauer LLP [a]	25.0	40.0	60.0	Mittelwerte je Case

Tabelle 23: Case-Faktoren Altpapier (AP)

Factor	Low	Base	High
Sammelquote q_coll,AP	0.78	0.83	0.9
Recycling-Yield y_AP	0.88	0.9	0.93
Kaskade/LLP-Anteil	0	0.08	0.18
Temp. Speicherung [a]	0–5	0–10	10–30
C-Gehalt Papier [-]	0.44	0.44	0.44

Tabelle 24: Case-Faktoren Holzabfall (AH)

Factor	Low	Base	High
Stoffliche Quote	0.25	0.35	0.45
Biochar-Anteil	0.05	0.15	0.3
Materialausbeute Chips	0.7	0.75	0.8

Factor	Low	Base	High
C-Gehalt Holz [-]	0.5	0.5	0.5
Speicherdauer LLP [a]	10–35	20–50	30–80

Tabelle 25: Szenarioeinstellungen – Business as Usual (Low/Base/High)

Faktor	BAU (Low/Base/High)
AP Sammelquote	0.78 / 0.83 / 0.88
AP Recyclingausbeute	0.88 / 0.90 / 0.92
AP Kaskade / LLP	0.00 / 0.08 / 0.18
Holz stoffliche Quote	0.20 / 0.30 / 0.35
Holz Biochar-Quote	0.00 / 0.00 / 0.10
Sortier-/Prozessverluste	0.12 / 0.10 / 0.09
Permanenz Biochar	0.85 / 0.90 / 0.95
Lebensdauer LLP [a]	25 / 40 / 55

Tabelle 26: Szenarioeinstellungen – Green Economy (Low/Base/High)

Faktor	Green (Low/Base/High)
AP Sammelquote	0.85 / 0.90 / 0.93
AP Recyclingausbeute	0.90 / 0.92 / 0.94
AP Kaskade / LLP	0.10 / 0.20 / 0.30
Holz stoffliche Quote	0.35 / 0.45 / 0.55
Holz Biochar-Quote	0.10 / 0.20 / 0.30
Sortier-/Prozessverluste	0.10 / 0.09 / 0.08
Permanenz Biochar	0.85 / 0.90 / 0.95
Lebensdauer LLP [a]	30 / 50 / 70

Tabelle 27: Szenarioeinstellungen – Technological Push (Low/Base/High)

Faktor	HighTech (Low/Base/High)
AP Sammelquote	0.87 / 0.92 / 0.95
AP Recyclingausbeute	0.92 / 0.94 / 0.96
AP Kaskade / LLP	0.12 / 0.25 / 0.35
Holz stoffliche Quote	0.40 / 0.55 / 0.65
Holz Biochar-Quote	0.15 / 0.30 / 0.40
Sortier-/Prozessverluste	0.10 / 0.07 / 0.05
Permanenz Biochar	0.85 / 0.90 / 0.95
Lebensdauer LLP [a]	35 / 55 / 75

Tabelle 28: Szenarioeinstellungen – Krisenszenario (Low/Base/High)

Faktor	Krise (Low/Base/High)
AP Sammelquote	0.72 / 0.76 / 0.80
AP Recyclingausbeute	0.85 / 0.88 / 0.90
AP Kaskade / LLP	0.00 / 0.03 / 0.05
Holz stoffliche Quote	0.10 / 0.15 / 0.20
Holz Biochar-Quote	0.00 / 0.00 / 0.05
Sortier-/Prozessverluste	0.15 / 0.13 / 0.10
Permanenz Biochar	0.85 / 0.85 / 0.90
Lebensdauer LLP [a]	20 / 30 / 45

Tabelle 29: Robustes Szenario: Low/Base/High-Faktoren

Faktor	Low	Base	High
AP Sammelquote	0.83	0.88	0.92
AP Recyclingausbeute	0.9	0.92	0.94
AP Kaskade/LLP	0.12	0.2	0.3
Holz stoffliche Quote	0.4	0.5	0.55
Holz Biochar-Quote	0.15	0.25	0.35
Sortier-/Prozessverluste	0.1	0.08	0.07
Permanenz Biochar	0.85	0.9	0.95
Lebensdauer LLP [a]	30.0	50.0	70.0

6.5.3 Szenariodaten (selbsterstellt)

Die folgenden Tabellen zeigen die Daten der einzelnen Szenarien auf und sind mit Grafiken im Text dargestellt.

Szenariodaten 1

Tabelle 30: Szenario 1 – Business as Usual: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	0.600	0.662	0.828
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	0.715	0.672	0.580
Summe Vermeidung	1.315	1.334	1.408
Biogene Speicher: Holzprodukte	0.824	1.089	1.647
Biogene Speicher: Biokohle	0.000	0.000	0.549
Summe biogene Speicherung	0.824	1.089	2.196

Tabelle 31: Szenario 1 – Business as Usual: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	18.000	19.872	24.840
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	21.450	20.145	17.400
Summe Vermeidung	39.450	40.017	42.240
Biogene Speicher: Holzprodukte	24.705	32.666	49.410
Biogene Speicher: Biokohle	0.000	0.000	16.470
Summe biogene Speicherung	24.705	32.666	65.880

Szenariodaten 2

Tabelle 32: Szenario 2 – Green Economy: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	0.700	0.850	1.000
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	0.800	0.950	1.100
Summe Vermeidung	1.500	1.800	2.100
Biogene Speicher: Holzprodukte	1.000	1.500	2.200
Biogene Speicher: Biokohle	0.200	0.500	1.000
Summe biogene Speicherung	1.200	2.000	3.200

Tabelle 33: Szenario 2 – Green Economy: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	21.000	25.500	30.000
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	24.000	28.500	33.000
Summe Vermeidung	45.000	54.000	63.000
Biogene Speicher: Holzprodukte	30.000	45.000	66.000
Biogene Speicher: Biokohle	6.000	15.000	30.000
Summe biogene Speicherung	36.000	60.000	96.000

Szenariodaten 3

Tabelle 34: Szenario 3 – Technological Push: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	0.750	0.900	1.200
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	0.900	1.100	1.400
Summe Vermeidung	1.650	2.000	2.600
Biogene Speicher: Holzprodukte	1.200	1.700	2.500
Biogene Speicher: Biokohle	0.400	0.900	1.500
Summe biogene Speicherung	1.600	2.600	4.000

Tabelle 35: Szenario 3 – Technological Push: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	22.500	27.000	36.000
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	27.000	33.000	42.000
Summe Vermeidung	49.500	60.000	78.000
Biogene Speicher: Holzprodukte	36.000	51.000	75.000
Biogene Speicher: Biokohle	12.000	27.000	45.000
Summe biogene Speicherung	48.000	78.000	120.000

Szenariodaten 4

Tabelle 36: Szenario 4 – Krisenszenario: jährliche Wirkung (Mt CO₂/a)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	0.520	0.550	0.600
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	0.580	0.620	0.680
Summe Vermeidung	1.100	1.170	1.280
Biogene Speicher: Holzprodukte	0.450	0.550	0.700
Biogene Speicher: Biokohle	0.000	0.000	0.050
Summe biogene Speicherung	0.450	0.550	0.750

Tabelle 37: Szenario 4 – Krisenszenario: kumulative Wirkung über 30 Jahre (Mt CO₂)

Kategorie	Low-Case	Base-Case	High-Case
Vermeidung durch Altpapier-Recycling	15.600	16.500	18.000
Vermeidung durch Holz (energet.+stoffl.)	17.400	18.600	20.400
Summe Vermeidung	33.000	35.100	38.400
Biogene Speicher: Holzprodukte	13.500	16.500	21.000
Biogene Speicher: Biokohle	0.000	0.000	1.500
Summe biogene Speicherung	13.500	16.500	22.500

6.6 Stakeholder Analyse

Tabelle 38: Auswertung der zentralen Stakeholder im Kontext der Kreislaufwirtschaft (CH/EU)

Stakeholder-Gruppe	Einfluss	Betroffenheit	Relevante Daten	Quelle
Politik (CH/EU)	hoch	hoch	EU (2019), Green Deal (2022), CH BAFU-Kreislaufwirtschaftsstrategie	(European Commission 2019c; Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022b)
Papierindustrie (CEPI)	hoch	mittel	Recyclingrate EU: 72,1% (2023)	(CEPI 2023)
Holzindustrie Schweiz	mittel	hoch	Abbruchholzaufkommen ~1,7 Mio. t/a (2022)	CH: (Bundesamt für Statistik (BFS) 2023)
NGOs (WWF, EMF)	mittel	hoch	Positionspapiere zu Kreislaufwirtschaft und Biodiversität	(WWF International 2021; Ellen MacArthur Foundation 2020)
Konsumenten (CH/EU)	mittel	hoch	84% der EU-Bürger befürworten Kreislaufwirtschaft (Eurobarometer 2020)	(European Commission 2020)