

Effektstärken in den Zukunftspfaden des Kohlenstoffmanagements in der Steiermark: Eine Bayesian Belief Analysis auf Grundlage des Participatory Systems Mapping

Bericht aus dem Forschungsprojekt Z-T-G 003

Projekt:	Z-T-G 003 (Kohlenstoffmanagement)
Datum:	30. Jänner 2026
Ansprechperson:	Christian Dayé, christian.daye@tugraz.at
Mitwirkende:	Forscher:innenteam des Z-T-G (in alphabetischer Reihenfolge): Christian Dayé ¹ , Michael Kriechbaum ^{1, 3} , Raphaela Maier ² , Peter Obersteiner ^{1, 3} ¹ Technische Universität Graz, STS – Science, Technology and Society Unit ² Universität Graz, Wegener Center für Klima und globalen Wandel ³ Universität Graz, Institut f. Umweltsystemwissenschaften

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Einleitung	4
Problemstellung	4
Methodischer Zugang und Verfahren	6
Bayesian Belief Networks	6
Vorgehensweise und Verfahren	7
Ergebnisse.....	13
Zukunftspfad 1 - Balance aus natürlichen und technischen Senken	13
Zukunftspfad 2 - Schwerpunkt technische Senken	15
Zukunftspfad 3 - Natürliche Senken & Action Now!.....	17
Diskussion und Schluss.....	20
Literatur	22

Zusammenfassung

Um Klimaneutralität zu erreichen, ist es unerlässlich, unvermeidbare CO-Restemissionen langfristig zu binden. Das Ziel des Projekts Z-T-G 003 „Kohlenstoffmanagement in einer Kreislaufwirtschaft: Potenziale und Zukunftspfade für die Steiermark“ war es, in einem wissenschaftlich-systematischen Zugang Zukunftsbilder darüber, wie das in der Steiermark gelingen kann, zu kreieren und zu evaluieren.

Aufbauend auf dem Participatory Systems Mapping, das in früheren Arbeitspaketen des Forschungsprojekts Z-T-G 003 gemeinsam mit steirischen Stakeholder:innen und Expert:innen erarbeitet wurde, wurden drei Bayesian Belief Networks erstellt. Diese bündeln subjektive Wahrscheinlichkeiten von Expert:innen und ermöglichen es somit, über Ausschnitte der Netzwerkkarte Aussagen hinsichtlich der Effektstärken zu treffen und die dort abgebildeten Kausalbeziehungen dahingehend zu ergänzen.

Die drei Ausschnitte, die im Rahmen von Bayesian Belief Networks in enger Interaktion mit den Expert:innen vertieft wurden, entsprechen inhaltlich den drei im Zuge von Workshops von eben jenen Expert:innen erstellten Zukunftspfaden. Diese waren:

- Zukunftspfad 1 – Balance aus natürlichen und technischen Senken
- Zukunftspfad 2 – Schwerpunkt technische Senken
- Zukunftspfad 3 – Natürliche Senken & Action Now!

Die Methode erforderte eine Einschränkung der Teilnehmer:innen auf Expert:innen, die bereits an Participatory Systems Mapping Workshops teilgenommen hatten. Aufgrund dessen ist die Anzahl der Teilnehmer:innen nicht hoch, weshalb die vorliegenden BBNs als explorative Methode zu behandeln sind und die resultierenden Effektstärken mit Vorsicht interpretiert werden müssen. Dessen eingedenk sollen dennoch die folgenden Highlights aus den Ergebnissen erwähnt werden:

- Der Export von CO₂ für die Verwendung in CCU/CCS-Prozessen aus der Steiermark in umliegende Bundesländer oder auch Länder (Faktor 33 Exportrate CO₂ für CCU/CCS) wird als sehr hoch eingeschätzt, und zwar relativ unbeeinflusst davon, wie intensiv nach geologischen Senken in der Steiermark gesucht wird.
- Die Vermarktung von Ökosystemdienstleistungen in der Landwirtschaft (Faktor 90) bzw. im Wald (Faktor 94) hängt in hohem Maße davon ab, ob und in welchem Ausmaß Carbon Removal Zertifikate in der EU verfügbar sind (Faktor 63).
- Die Renaturierung von Moorlandschaften (Faktor 98) hat bis 2040 keine signifikanten Effekte auf die natürliche Senkenkapazität in der Steiermark (Faktor 73), da diese erst nach dreißig Jahren auftreten.

Einleitung

Problemstellung

Dieses Dokument berichtet von der Vorgangsweise und den Ergebnissen von drei Bayesian Belief Networks (BBNs), die ausgehend von einer in Zusammenarbeit mit steirischen Expert:innen erstellten Systemkarte für Ausschnitte dieser Karte Einschätzungen für Effektstärken liefert.

Schwerpunkt des Projekts „Kohlenstoffmanagement in einer Kreislaufwirtschaft: Potenziale und Zukunftspfade für die Steiermark“ (Z-T-G 003), das von der interuniversitären Forschungsplattform Zukunft – Technik – Gesellschaft (Z-T-G) im Zeitraum Oktober 2023 bis Dezember 2025 durchgeführt wurde, lag in der Erarbeitung einer Kartierung jener Systemfaktoren, die relevant für ein effizientes Kohlenstoffmanagement in der Steiermark im Jahr 2040 sein werden. Die Methode, in der diese Systemkarte erarbeitet wurde, war das Participatory Systems Mapping (PSM). Die Systemkarte, eine Beschreibung der methodischen und organisatorischen Vorgehensweise sowie eine tiefgreifende Analyse des so erarbeiteten Zukunftsbilds für das Kohlenstoffmanagement in der Steiermark im Jahr 2040 finden sich im Bericht Zukunftsvisionen, Transformationspfade und Handlungsempfehlungen für das Carbon Management in der Steiermark (Maier et al., 2026a)

Ein entscheidender Vorteil des PSM (unter vielen) ist, dass es einen konsentierten Blick auf die Gegenwart – oder die Zukunft – eines komplexen Systems erlaubt, für das zuvor noch keine klare Kartierung existiert. Ein PSM besteht aus Faktoren, die einander kausal beeinflussen. Diese Kausalbeziehungen sind gerichtet (je höher, desto höher bzw. je höher, desto niedriger), und zirkuläre Beziehungen ($A \rightarrow B \rightarrow A$) sind erlaubt. Konsentiert ist dieser Blick deshalb, weil die Systemkarte in partizipativen Workshops gemeinsam mit Expert:innen und Stakeholder:innen mit unterschiedlichen Wissensbeständen erarbeitet und abgestimmt werden.

BBNs können nun genutzt werden, um derartige Systemkarten (oder Ausschnitte daraus) durch Schätzwerte hinsichtlich der Effektstärken der Kausalitäten anzureichern. Expert:innen werden gebeten, ihre subjektiven Wahrscheinlichkeiten zu einer Reihe von Faktorendyaden abzugeben. Aus diesen subjektiven Wahrscheinlichkeiten werden dann Effektstärken abgeleitet.

Im vorliegenden Projekt erfolgte die Einschätzung der Effektstärken nicht für das gesamte System, sondern für Ausschnitte. Diese wurden so gewählt, dass sie den drei Zukunftspfaden entsprachen, die im Rahmen der PSM Workshops von den Teilnehmer:innen erarbeitet worden waren. Diese drei Pfade sind: 1 – Balance aus natürlichen und technischen Senken; 2 – Schwerpunkt technische Senken; und 3 –

Natürliche Senken und Action Now! Zudem wurde darauf geachtet, dass die Ausschnitte keine zirkulären Kausalitäten mehr enthielten.

Der folgende Abschnitt erläutert zunächst den methodischen Zugang und das Verfahren, bevor anschließend dann die Ergebnisse kurz geschildert und interpretiert werden. Betont soll hier schon werden, dass es sich beim BBN um ein exploratives Verfahren handelt.

Unser Dank gilt den Expert:innen, die uns durch ihre Teilnahme an den Workshops sowie durch die Übermittlung ihrer subjektiven Wahrscheinlichkeiten unterstützt haben!

Methodischer Zugang und Verfahren

Bayesian Belief Networks

Bayesian Belief Networks (BBNs) sind eine Methode zur Modellierung und Analyse probabilistischer kausaler Zusammenhänge in komplexen Systemen. In den letzten Jahrzehnten haben sie zunehmend an Bedeutung gewonnen und finden heute Anwendung in einer Vielzahl von Disziplinen, darunter Informatik, Statistik, Ökonomie, Sozialwissenschaften, Medizin sowie Politik- und Entscheidungsforschung. Ihr besonderer Wert liegt in der Fähigkeit, zugleich kausale Annahmen transparent darzustellen, ohne die dahinterliegenden Unsicherheiten zu verschleiern.

Obwohl die theoretischen Grundlagen der Methode bereits vor rund dreißig Jahren gelegt wurden, ist das Interesse an BBNs in jüngerer Zeit stark gewachsen (vgl. Barbrook-Johnson und Penn, 2022). Dies hängt nicht zuletzt mit der zunehmenden Verfügbarkeit leistungsfähiger Softwarewerkzeuge zusammen.

Die strukturelle Grundlage von BBNs bilden sogenannte gerichtete azyklische Graphen (Directed Acyclic Graphs, DAGs) – Graphen, deren Kanten eine eindeutige Richtung besitzen und die keine geschlossenen Zyklen enthalten, sodass keine Variable direkt oder indirekt auf sich selbst zurückwirken kann. Die Darstellung von Kausalbeziehungen in BBNs erfolgt in DAGs, wodurch sichergestellt ist, dass Ursachen zeitlich und logisch vor ihren Wirkungen liegen.

Ursprünglich stark in der Informatik und Statistik verankert, wurden BBNs zunächst vor allem datengetrieben eingesetzt, etwa durch Lernalgorithmen, die Netzwerkstrukturen direkt aus empirischen Daten ableiten (vgl. Krieg, 2001). Parallel dazu entwickelte sich jedoch eine zweite Tradition, in der Bayesian Belief Networks auf der Basis von Experten- und Stakeholderwissen konstruiert werden (vgl. Giordano, Preziosi und Romano 2010; Daniel et al. 2020). Dieser partizipative Ansatz ist insbesondere dort von Bedeutung, wo Daten lückenhaft, unsicher oder schwer zugänglich sind – etwa bei gesellschaftlichen, politischen oder ökologischen Fragestellungen. Die BBNs im Rahmen des Z-T-G 003 Projekts wurden entlang dieses Zugangs erarbeitet.

Gemäß den oben beschriebenen Prinzipien der gerichteten, azyklischen Graphen besteht ein BBN aus Knoten und gerichteten Kanten. Die Knoten repräsentieren Variablen, Faktoren oder Ergebnisse eines Systems, während die Kanten kausale Beziehungen zwischen diesen Variablen ausdrücken. Die Richtung einer Kante zeigt an, welche Variable einen Einfluss auf eine andere ausübt.

Das entscheidende Merkmal, das BBNs von vielen anderen Netzwerkmethoden unterscheidet, ist die probabilistische Beschreibung der Knoten. Jeder Knoten besitzt eine endliche Anzahl möglicher Zustände, beispielsweise „hoch“ oder „niedrig“, „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“. Für jeden dieser Zustände wird eine Wahrscheinlichkeit

angegeben. Diese Wahrscheinlichkeiten sind jedoch nicht isoliert, sondern hängen von den Zuständen derjenigen Knoten ab, die kausal auf den jeweiligen Knoten einwirken. Im oben beschriebenen, auf Expert:innen oder Stakeholder:innen zurückgreifenden Zugang werden diese Wahrscheinlichkeiten aus den Überzeugungen bzw. Einschätzungen der Teilnehmer:innen ermittelt und somit aus deren subjektiven Wahrscheinlichkeiten – daher der Verweis auf Thomas Bayes.

In der Sprache der Wahrscheinlichkeitstheorie spricht man davon, dass ein Knoten bedingt abhängig von seinen Elternknoten ist. Das bedeutet, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustands ändert, sobald sich der Zustand einer verursachenden Variable verändert. Diese bedingten Wahrscheinlichkeiten bilden das Herzstück eines Bayesian Belief Networks und werden häufig in Form sogenannter bedingter Wahrscheinlichkeitstabellen dargestellt.

Ein wesentlicher Vorteil von Bayesian Belief Networks besteht darin, dass sie Unsicherheit nicht als Störfaktor, sondern als integralen Bestandteil der Modellierung behandeln. Anstatt eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu postulieren, erlauben BBNs Aussagen darüber, wie wahrscheinlich bestimmte Effekte unter gegebenen Bedingungen auftreten. Dadurch eignen sie sich besonders gut für Systeme, in denen Prozesse nicht deterministisch verlaufen oder nur unvollständig verstanden sind – Eigenschaften, die auf das im Zuge des Participatory Systems Mapping erarbeitete System des Kohlenstoffmanagements in der Steiermark zutreffen.

Vorgehensweise und Verfahren

Wenig überraschend war es aufgrund ihrer Größe ausgeschlossen, die gesamte Systemkarte (s. Abbildung 1) als Grundlage des BBNs heranzuziehen.

Auf der Suche nach möglichen, wissenschaftlich begründbaren und zugleich auch ertragreichen Ausschnitten wurde schließlich innerhalb des Forschungsteams beschlossen, nicht nur ein Netzwerk zu machen, sondern drei Netzwerke entsprechend der im Rahmen des zweiten Stakeholderworkshops erarbeiteten Zukunftspfade:

- Zukunftspfad 1 – Balance aus natürlichen und technischen Senken
- Zukunftspfad 2 – Schwerpunkt technische Senken
- Zukunftspfad 3 – Natürliche Senken & Action Now!

[illegible]

So sinnvoll und wohl begründet diese Entscheidung auch immer war, so brachte sie auch mit sich, dass die Anzahl derer, die wir um subjektive Wahrscheinlichkeiten bitten konnten, entsprechend sank. Die Rolle des BBN im Rahmen des vorliegenden Projekts war jedoch im Vorhinein explorativ angelegt, und die dabei erarbeiteten Werte dürften in keinsten Weise als wissenschaftlich stabile Daten, sondern eben als das genommen werden, was sie sind: Einschätzungen von Expert:innen. Daher ist diese Einschränkung verkraftbar.

Innerhalb der drei Zukunftspfade wurden vorrangig jene Faktoren in das BBN aufgenommen, die im Zuge des Stakeholderworkshops oder der ergänzend durchgeführten Expert:inneninterviews als besonders relevant hervorgehoben wurden. Zudem musste - entsprechend der Vorgabe der Azyklizität - darauf geachtet werden, dass es keine geschlossenen kausale Wirkungskreisläufe gab.

Abbildungen 2 bis 4 stellen die BBNs zu den drei Zukunftspfaden dar.

Abbildung 2: BBN für Zukunftspfad 1 - Balance aus natürlichen und technischen Senken

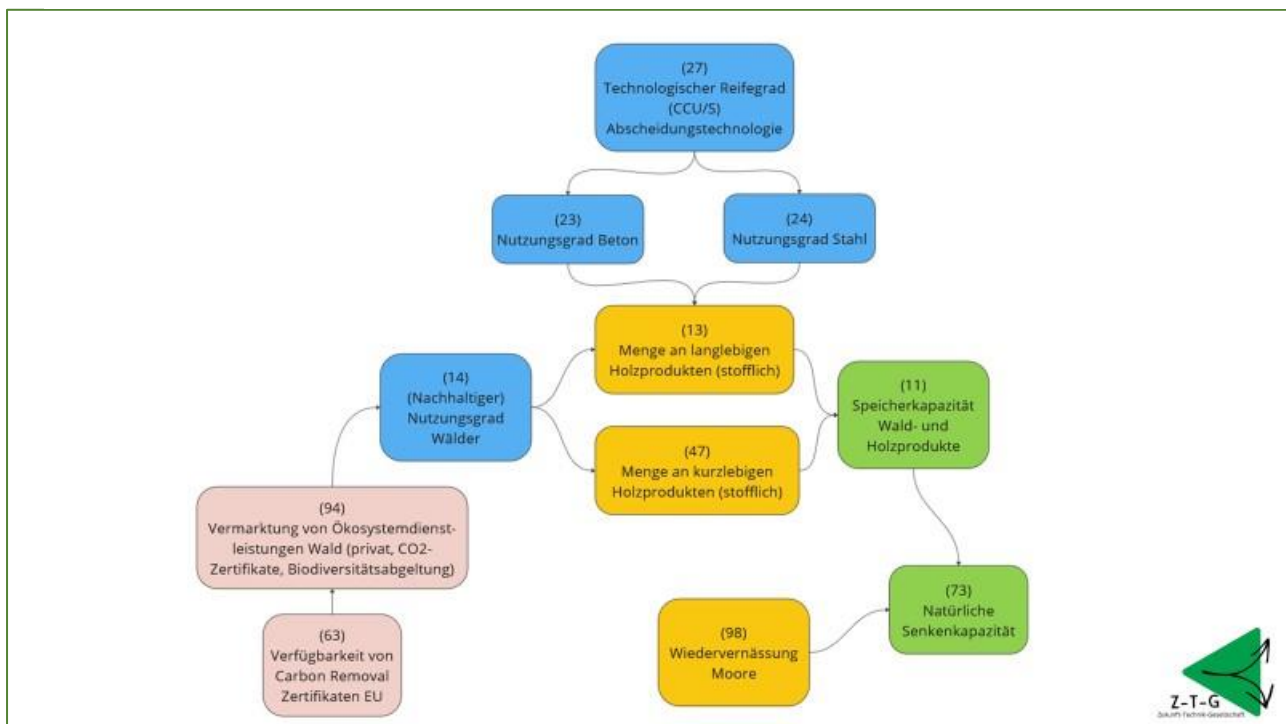


Abbildung 4: BBN für Zukunftspfad 2 - Schwerpunkt technische Senken

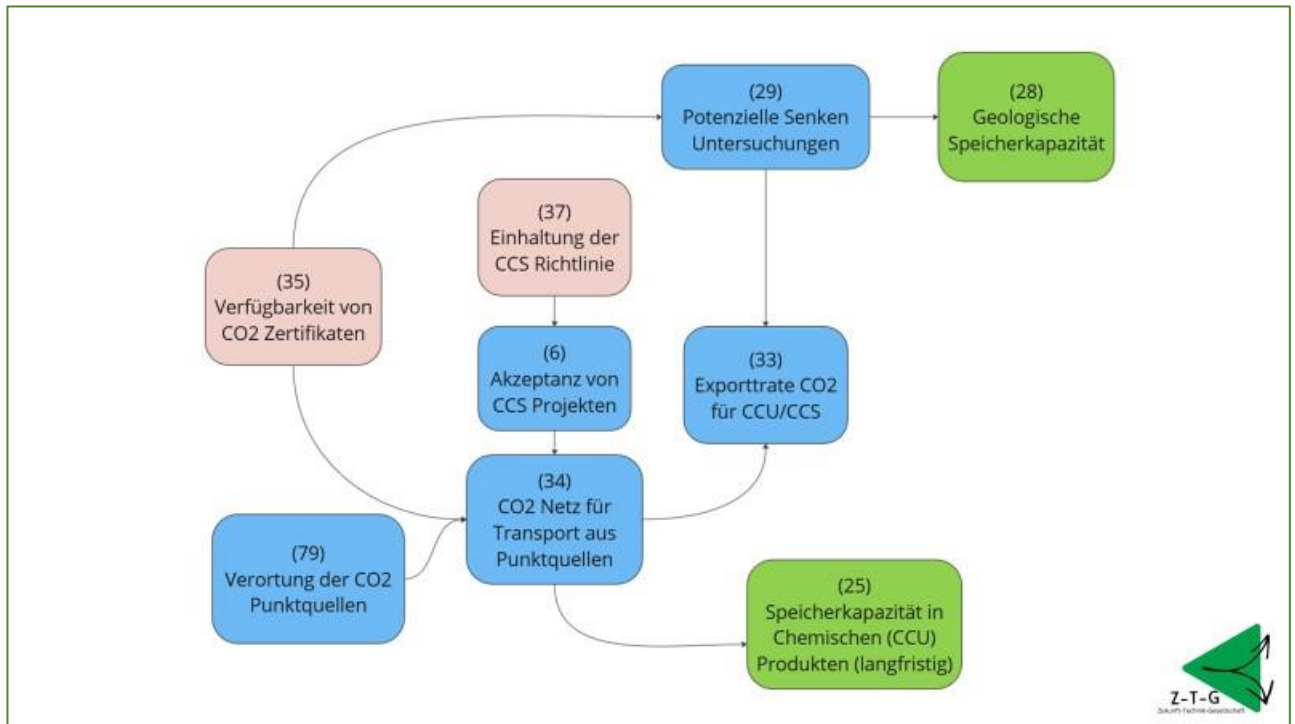
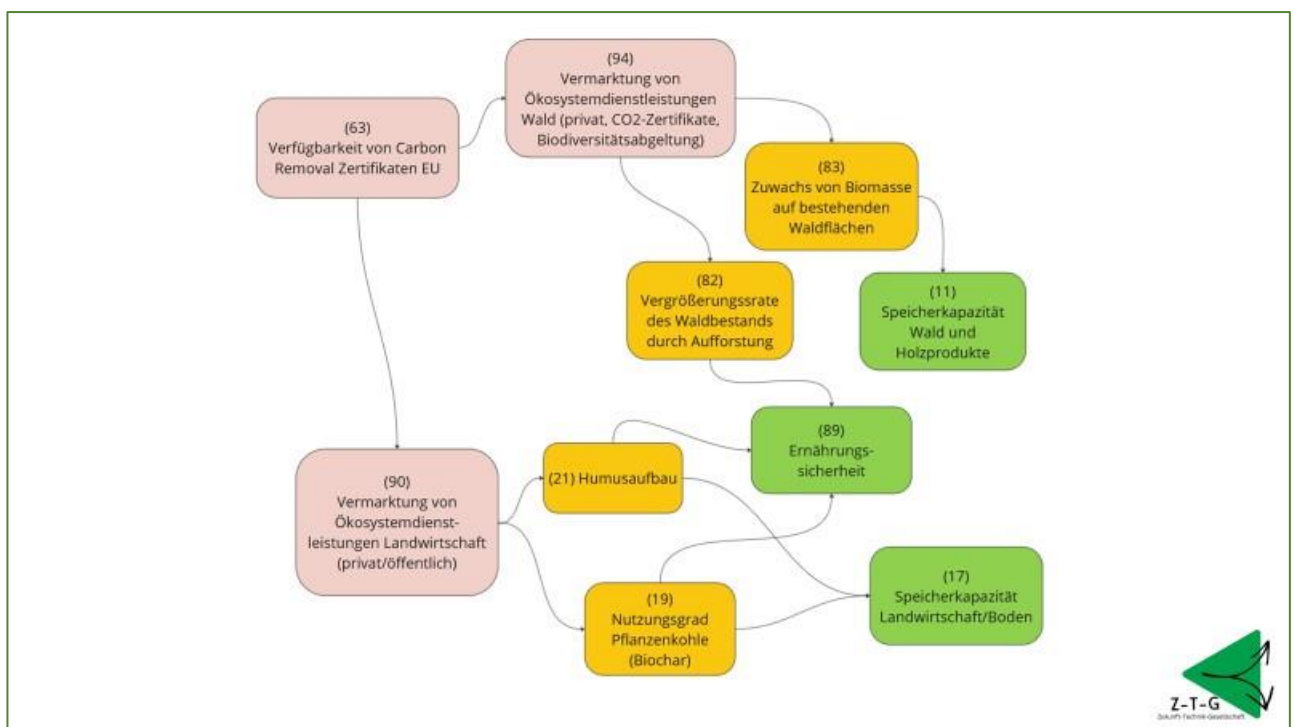


Abbildung 3: BBN zu Zukunftspfad 3 - Natürliche Senken und Action Now!



Für diese drei BBNs wurden Expert:innen kontaktiert, die bereits an der Erstellung der drei Zukunftspfade im Rahmen eines Stakeholderworkshops mitgewirkt hatten. Diesen Personen wurde eine Powerpoint-Datei geschickt, die die Methode des BBN kurz vorstellte, erklärte, wie wir das betreffende BBN aus dem jeweiligen Zukunftspfad abgeleitet hatten, und schließlich erläuterte, worum genau die Teilnehmer:innen gebeten wurden. Für jede der Kanten, das heißt für jede Verbindung zwischen zwei Faktoren, galt es konditionale Wahrscheinlichkeiten anzugeben. Die Faktoren waren dabei als zweiwertig vorgesehen – hoch und niedrig. Konkret mussten die Teilnehmer:innen angeben, wie hoch sie die Wahrscheinlichkeit schätzten, dass wenn Faktor 1 hoch (oder niedrig) ist, dann auch Faktor 2 hoch (bzw. niedrig) ist (s. Abbildung 5).

Abbildung 5: Screenshot aus der Powerpoint-Datei zum Einholen der subjektiven Wahrscheinlichkeiten

Verfahren

BEISPIEL

		Faktor 2		
		Hoch	Niedrig	
Faktor 1	Hoch	35%	65%	100%
	Niedrig	...	...	100%

Diese Tabelle ist wie folgt zu lesen:
 Wenn **Faktor 1** hoch ist, wie hoch schätze ich dann die Wahrscheinlichkeit ein, dass **Faktor 2** hoch (im Beispiel 35%) bzw. niedrig (im Beispiel 65%) ist?

Bitte beachten Sie, dass sich die Wahrscheinlichkeiten in der Zeile auf 100% summieren lassen sollen.



Z-T-G
Zukunft-Technik-Gesellschaft

Entscheidend ist hierbei, dass sich die Prozentwerte nur in der Zeile auf 100% summieren. Wenn im obigen Beispiel Faktor 1 hoch ist und Faktor 2 dadurch mit 65%iger Wahrscheinlichkeit niedrig, impliziert das nicht, dass diese Wahrscheinlichkeit auf 35% sinkt, wenn Faktor 1 niedrig ist. Genauso gut könnte es sein, dass die subjektive Einschätzung der: Expert:in ist, dass diese Wahrscheinlichkeit nur unmerklich sinkt, etwa auf 60%. Aus dem Umstand, dass die beiden Zeilen getrennt voneinander eingeschätzt werden, ergibt sich in weiterer Folge die Möglichkeit, aus den konditionalen Wahrscheinlichkeiten die kausalen Effektstärken abzuleiten. (In unserem Beispiel wäre die

Effektstärke von Faktor 1 auf Faktor 2 sehr gering, eben weil die Wahrscheinlichkeiten sich nicht großartig ändern.)

Aus der kontaktierten Gruppe haben nicht alle Expert:innen auf unsere Einladung reagiert. Insgesamt erhielten wir sieben Rückmeldungen, die sich wie folgt verteilen (s. Tabelle 1)

Tabelle 1: Anzahl Rückmeldungen

Zukunftspfad	Anzahl Rückmeldungen
1 - Balance aus natürlichen und technischen Senken	2+
2 - Schwerpunkt technische Senken	2
3 - Natürliche Senken und Action Now!	3

Bei Pfad 1 - Balance aus natürlichen und technischen Senken haben wir die Situation, dass wir zwei Rückmeldungen erhalten haben, von denen eine allerdings eine organisationsintern abgestimmte Einschätzung ist. Die Schätzwerte wurden von zwei Kolleg:innen gemeinsam diskutiert und sind insofern mehr als eine Einzelmeinung. In Tabelle 1 ist das durch die Bezeichnung „2+“ ausgedrückt.

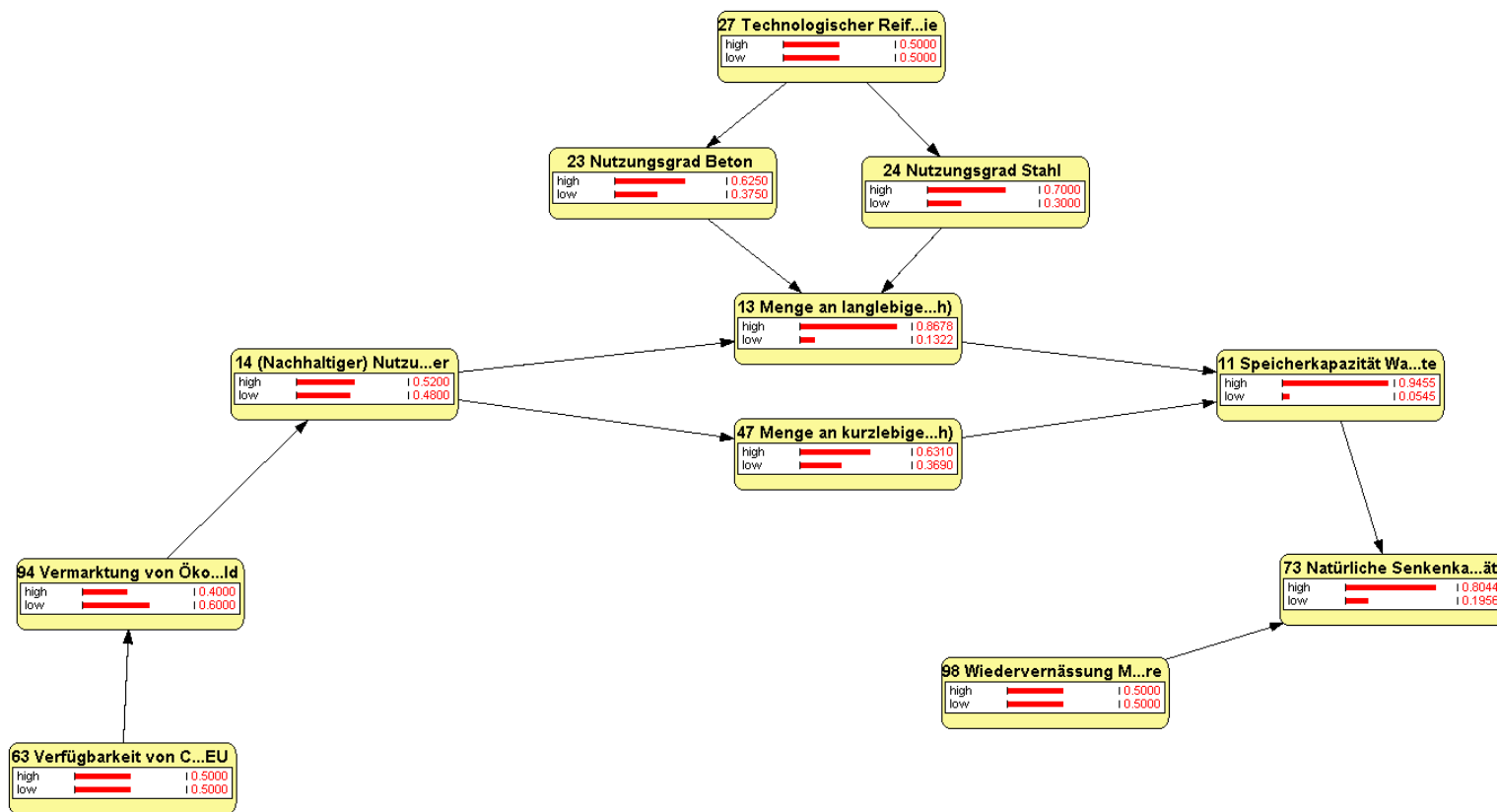
Ergebnisse

Für die Auswertung wurde die offen zugängliche Software OpenMarkov verwendet (<https://www.openmarkov.org/>, letzter Zugriff am 28. Jänner 2026). Die Netzwerke wurden dort nachgebaut, und die Mittelwerte der von den Expert:innen erhaltenen subjektiven Wahrscheinlichkeiten wurden in die konditionalen Wahrscheinlichkeitstabellen eingetragen. Von diesen leitet OpenMarkov die Effektstärken ab. Den Elternfaktoren allerdings werden ausgeglichene Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet. Dies ermöglicht es im weiteren Verlauf abzuschätzen, wie sich eine gezielte Modifikation der Elternfaktoren – etwa durch politische Maßnahmen oder wirtschaftliche Strategien – auf die weiteren Faktoren im Netzwerk auswirken würde.

Zukunftspfad 1 – Balance aus natürlichen und technischen Senken

Abbildung 6 informiert über die Effektstärken für das BBN des Zukunftspfads 1 – Balance aus natürlichen und technischen Senken.

Abbildung 6: Effektstärken im BBN des Zukunftspfads 1



Die Kapazität von Wald und Holzprodukten, CO₂ zu speichern (Faktor 11), wird insgesamt als hoch angesehen und ihre Relevanz für das Jahr 2040 deutlich höher eingeschätzt als die Speicherung in wiedervernässten Mooren (Faktor 98).

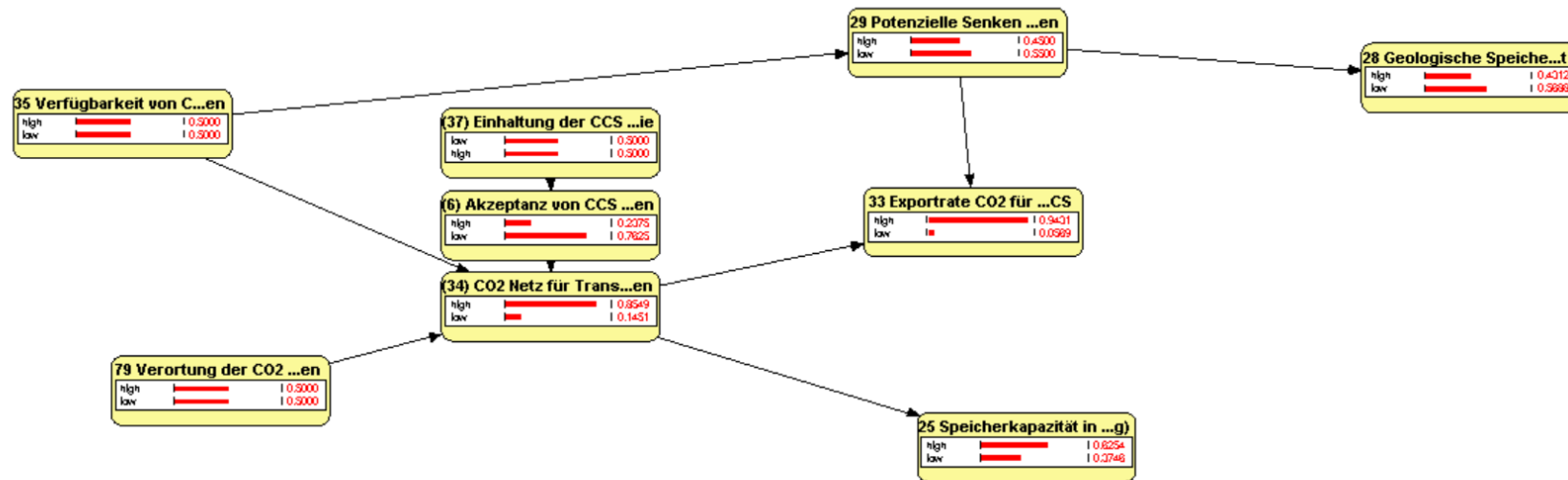
Interessante Ergebnisse resultieren aus der bewussten Manipulierung der Elternfaktoren.¹ So hat zum Beispiel – entgegen der Überlegungen während des Participatory Systems Mapping Prozesses – die Verfügbarkeit von Carbon Removal Zertifikaten in der EU keine Auswirkung auf die Höhe der Subventionen von Ökosystemdienstleistungen Wald (Faktor 94). Auch die Wiedervernässung der Moore hat nur vernachlässigbaren Einfluss auf die insgesamt natürliche Senkenkapazität in der Steiermark (Faktor 73), da hier – so eine ergänzend zum Schätzwert übermittelte Begründung – signifikante Ergebnisse frühestens dreißig Jahre nach der erfolgten Wiedervernässung erwartet werden dürfen.

Zukunftspfad 2 – Schwerpunkt technische Senken

Die nachfolgende Abbildung 7 gibt die Effektstärken für das BBN des Zukunftspfads 2 – Schwerpunkt technische Senken wieder.

¹ Die Folgen der gezielten Manipulation von Elternfaktoren sind aus den hier inkludierten Grafiken nicht ersichtlich, die – wie in der BBN üblich – hier zunächst im ausgeglichenen Zustand dargestellt werden. Bei Interesse an den BBNs stellt das Projektteam die entsprechenden OpenMarkov-Dateien gerne zur Verfügung (Emails bitte an eingangs genannte Ansprechperson).

Abbildung 7: Effektstärken im BBN des Zukunftspfad 2



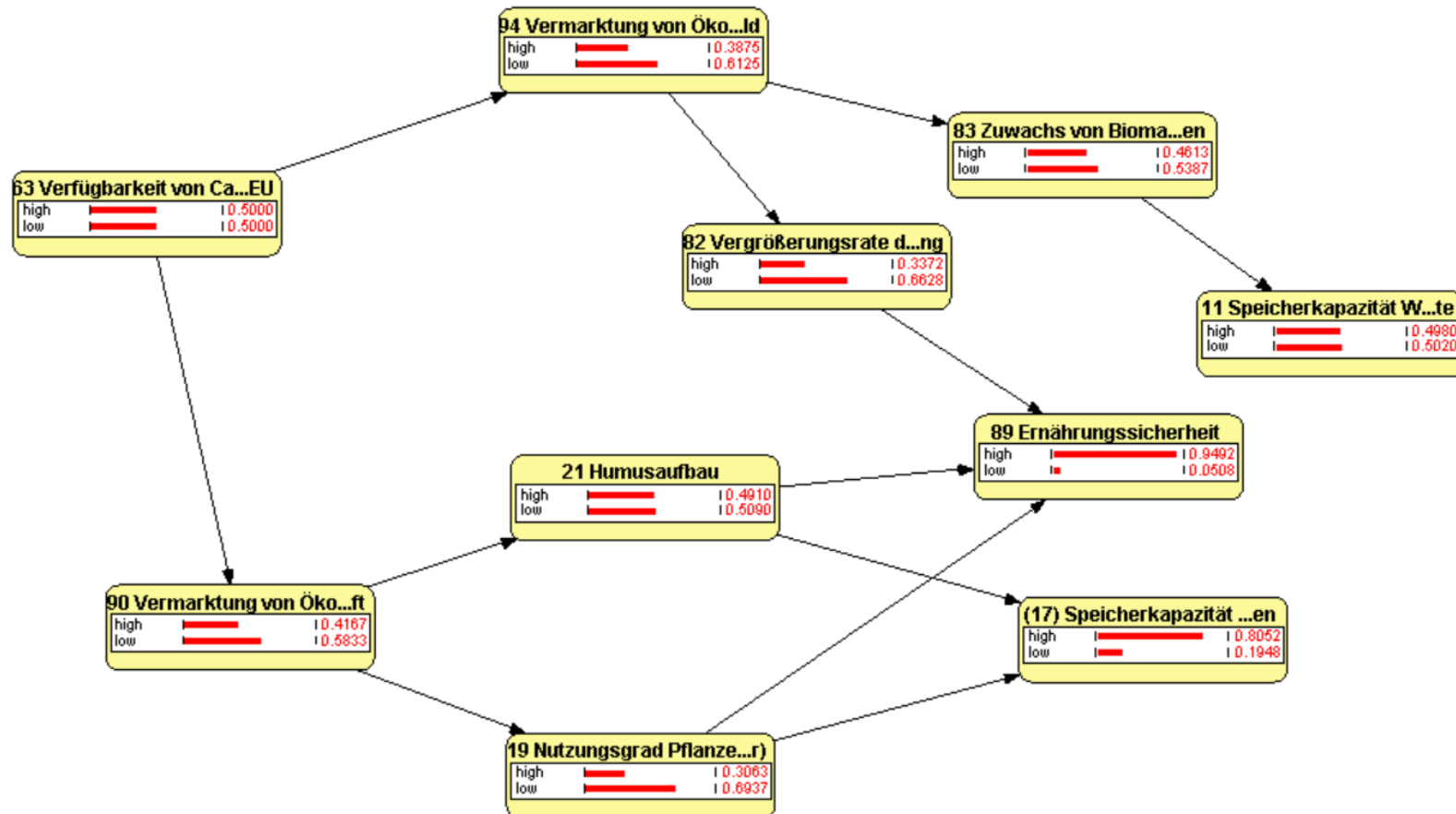
Hervorzuheben ist, dass ungeachtet aller sonstigen Verteilungen die Wahrscheinlichkeit eines beträchtlichen Exports von CO₂ für die Verwendung in CCU/CCS-Prozessen aus der Steiermark in umliegende Länder oder auch Bundesländer (Faktor 33 Exportrate CO₂ für CCU/CCS) als sehr hoch eingeschätzt wird. Das hat zunächst damit zu tun, dass es aktuell wenig gesichertes Wissen über geologische Speicherstätten in der Steiermark gibt; zudem äußerten etliche der teilnehmenden Expert:innen die Vermutung, dass die geologische Speicherkapazität in der Steiermark grundsätzlich nicht als hoch einzuschätzen ist.

Was bei entsprechender Modifikation des Elternfaktors 37 Einhaltung der CCS-Richtlinie ebenfalls beobachtet werden kann, ist, dass die kausale Wirkung auf den nachfolgenden Faktor 6 Akzeptanz von CCS Projekten sehr hoch ist. Die Akzeptanz steht und fällt mit der Einhaltung der Richtlinie. Dennoch hat dieser sehr starke Zusammenhang nur vergleichsweise minimale Auswirkungen auf den Rest des Netzwerks – vermutlich, weil die Expert:innen den Export als die wahrscheinlichere Lösung für die Steiermark erachten und auch der Speicherung in chemischen Produkten CCU (Faktor 25) mehr Gewicht einräumen als der geologischen Speicherung in der Steiermark (Faktor 28).

Zukunftspfad 3 – Natürliche Senken & Action Now!

Die nachfolgende Abbildung 8 gibt die Effektstärken für das BBN des Zukunftspfads 3 – Natürliche Senken & Action Now! wieder.

Abbildung 8: Effektstärken im BBN des Zukunftspaths 3



Dieses Netzwerk weist nur einen Elternfaktor auf (63 Verfügbarkeit von Carbon Removal Zertifikaten EU), der allerdings gewichtigen Einfluss auf die Vermarktung von Ökosystemdienstleistungen in der Landwirtschaft (Faktor 90) bzw. im Wald (Faktor 94) hat. Damit sind finanzielle Unterstützungsmaßnahmen gemeint, die von privaten oder öffentlichen Akteuren bereitgestellt werden, um Landwirt:innen bzw. Waldbesitzer:innen oder Forstwirt:innen für die Erbringung von Ökosystemdienstleistungen zu belohnen. Liegen bei einer ausgeglichenen Wahrscheinlichkeit des Elternfaktors – wie in Abbildung 8 ersichtlich – die Wahrscheinlichkeiten für eine hohe Vermarktung von Ökosystemdienstleistungen bei ca. 40% (Landwirtschaft 42%, Wald 39%), steigt diese Wahrscheinlichkeit auf 63% (Landwirtschaft) bzw. 60% (Wald), wenn man hypothetisch die Verfügbarkeit von Carbon Removal Zertifikaten in der EU als sehr hoch ansetzt. Analog sinkt die Wahrscheinlichkeit einer hohen Vermarktung auf 20% (Landwirtschaft) bzw. 18% (Wald), wenn man die Verfügbarkeit der Zertifikate als sehr gering annimmt. Auf die weiteren Faktoren im Netzwerk – und insbesondere auf die abschließenden Speicherkapazitäten – hat dies aber nur vernachlässigbare Auswirkungen.

Diskussion und Schluss

Bayesian Belief Networks (BBNs) dienen der Modellierung probabilistischer kausaler Zusammenhänge in komplexen Systemen und finden zunehmend Anwendung in unterschiedlichen Disziplinen. Ihre Stärke liegt darin, kausale Annahmen transparent darzustellen und Unsicherheit explizit zu berücksichtigen. Im vorliegenden Projekt wurden die BBNs nicht datengetrieben, sondern auf Basis von Expert:innen- und Stakeholderwissen entwickelt, um auch in datenarmen Kontexten belastbare Einschätzungen zu ermöglichen.

Aufgrund der Komplexität der ursprünglichen Systemkarte wurde entschieden, drei separate BBNs entlang der im Stakeholderprozess entwickelten Zukunftspfade zu erstellen: eine Balance aus natürlichen und technischen Senken, ein Fokus auf technische Senken sowie ein Pfad mit Schwerpunkt auf natürlichen Senken und sofortigem Handeln. Für jeden Zukunftspfad wurden jene Faktoren ausgewählt, die von Stakeholdern und Expert:innen als besonders relevant eingeschätzt wurden, wobei die Vorgabe der Azyklizität strikt eingehalten wurde. Die Expert:innen wurden gebeten, für jede kausale Verbindung konditionale Wahrscheinlichkeiten anzugeben, wobei die Faktoren jeweils binär (hoch/niedrig) operationalisiert waren. Die erhobenen Werte sind als explorative, subjektive Einschätzungen zu verstehen und nicht als statistisch robuste Daten.²

Die Auswertung der BBNs erfolgte mit der Software OpenMarkov, indem die Netzwerke nachgebaut und die gemittelten subjektiven Wahrscheinlichkeiten in die Modelle integriert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass im Zukunftspfad mit Schwerpunkt auf technischen Senken insbesondere der CO₂-Export für CCU/CCS als sehr wahrscheinlich eingeschätzt wird, während die Einhaltung von CCS-Richtlinien zwar stark die Akzeptanz beeinflusst, jedoch nur begrenzte Auswirkungen auf das Gesamtnetzwerk hat. Im Zukunftspfad „Natürliche Senken & Action Now!“ erweist sich die Verfügbarkeit von Carbon-Removal-Zertifikaten in der EU als zentraler Einflussfaktor für die Vermarktung von Ökosystemdienstleistungen in Landwirtschaft und Wald, wobei die Effekte auf die letztlichen Speicherkapazitäten gering bleiben. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse den explorativen Charakter der BBNs und ihren Nutzen zur Abschätzung von Wirkungszusammenhängen unter Unsicherheit.

Ein nächster Schritt zur Erhöhung der Stabilität der hier präsentierten BBNs bestünde in der Durchführung eines größeren Stakeholderprozesses, in dessen Rahmen weitere individuelle Schätzwerte gesammelt, gebündelt diskutiert und eventuell konsentiert würden. Sobald das geschehen ist, könnte auch besser eingeschätzt werden, wie sich die Manipulation einzelner Elternfaktoren auf die restlichen Netzwerkelemente auswirkt. Dadurch könnten schließlich die aufgrund der anderen Analyseschritte bereits formulierten

² Statistisch stabilere Zahlen zu individuellen Faktoren können dem Z-T-G 003 Factsheet *Kosten & Potentiale des Carbon Managements in der Steiermark* (Penz et al. 2026) entnommen werden.

Handlungsempfehlungen (Maier et al. 2026a, 2026 b) spezifiziert sowie etwaige weitere Ansätze identifiziert werden.

Literatur

- Barbrook-Johnson, Pete, und Alexandra S. Penn. 2022. „Bayesian Belief Networks“. S. 97–112 in *Systems Mapping: How to build and use causal models of systems*, herausgegeben von P. Barbrook-Johnson und A. S. Penn. Cham: Springer.
- Daniel, D., Widya Prihesti Iswarani, Saket Pande und Luuk Rietveld. 2020. „A Bayesian Belief Network model to link sanitary inspection data to drinking water quality in a medium resource setting in rural Indonesia.“ *Scientific Reports* 20:18867.
- Giordano, R., E. Preziosi und E. Romano. 2010. „An integration between Cognitive Map and Bayesian Belief Network for conflict analysis in drought management.“ *5th International Congress on Environmental Modelling and Software*, Ottawa, ON, Canada, July 2010.
- Krieg, Mark L. 2001. *A Tutorial on Bayesian Belief Networks*. DSTO-TN-0403. Surveillance Systems Division, Electronics and Surveillance Research Laboratory, Defence Science & Technology Organisation DSTO, Department of Defence, Commonwealth of Australia. Edinburgh, Australia.
- Maier, Raphaela, Peter Obersteiner, Philipp Wolf-Zöllner, Markus Lehner, Christian Dayé und Karl Steininger. 2026a. *Zukunftsvisionen, Transformationspfade und Handlungsempfehlungen für das Carbon Management in der Steiermark*. Bericht. Z-T-G 003. Graz, Österreich.
- Maier, Raphaela, Peter Obersteiner, Philipp Wolf-Zöllner, Markus Lehner, Christian Dayé und Karl Steininger. 2026b. *Handlungsempfehlungen für das Carbon Management in der Steiermark*. Policy Brief. Z-T-G 003. Graz, Österreich.
- Penz, Manuel, Nadja Leschka, Raphaela Maier, Philipp Wolf-Zöllner, Markus Lehner und Karl Steininger. 2026. *Kosten & Potentiale des Carbon Managements in der Steiermark*. Factsheet. Z-T-G 003. Graz, Österreich.