



# Einfluss der Landnutzung auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz am Beispiel der Gemeinde Tharandt

## Special Report to Action C8.1

Autoren: Thomas Pluntke  
Thomas Grünwald  
Majana Heidenreich  
Barbara Köstner  
Christian Bernhofer

Institution: Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie

Projektstart: 01.07.2016

Projektende: 31.12.2021

Datum: April 2021





## Inhalt

1	Einleitung.....	5
2	Energie- und Treibhausgasbilanzierung.....	8
2.1	Einführung .....	8
2.2	Methodik und Software.....	10
3	Untersuchungsgebiet .....	12
4	Daten und Simulationen.....	13
5	Ergebnisse und Diskussion .....	19
6	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	25
7	Literatur.....	28

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen für Deutschland (UBA) .....	6
Abbildung 2: Globaler terrestrischer Kohlenstoffrückhalt (IPCC 2000, s. Text).....	8
Abbildung 3: Landnutzung der Gemeinde Tharandt (Daten: CORINE 2012). .....	12
Abbildung 4: EC-Messstationen der TU Dresden .....	14
Abbildung 5: Vergleich der Emissionsfaktoren für Wald, Grünland und Ackerland für Deutschland (DEU), Sachsen (SN) und den ICOS-Standort.....	18
Abbildung 6: ECOSPEED-Bericht zum Mengengerüst, dem Endenergieverbrauch und den THG-Emissionen in Tharandt für das Jahr 2019.....	19
Abbildung 7: ECOSPEED-Bericht: Vergleich des Mengengerüsts, des Endenergieverbrauchs und der THG-Emissionen in Deutschland und Tharandt für das Jahr 2019 .....	20
Abbildung 8: Emissionen der Gemeinde Tharandt berechnet mit ECOSPEED: Oben: Energetische Emissionen, Unten: nicht-energetische Emissionen basierend auf den Emissionsfaktoren des nationalen Inventarberichts. ....	21
Abbildung 9: Flächenhafte, energetische und nicht-energetische Emissionen der Gemeinde Tharandt berechnet mit ECOSPEED. Flächenhafte Emissionen für den Wald berechnet mit nationalen (DEU), sächsischen (SN) und lokalen (ICOS) Emissionsfaktoren, für Grün- und Ackerland mit ICOS Emissionsfaktoren. ....	22

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Landnutzung der Gemeinde Tharandt. ....	12
Tabelle 2: Emissionsfaktoren für verschiedene Landnutzungen und deren Kompartimenten für Deutschland (DEU), für Sachsen (SN) und für ICOS-Standorte in Sachsen. Negative Werte entsprechen einer CO <sub>2</sub> -Senke (Werte aus Grünwald et al. (2020), modifiziert).....	15
Tabelle 3: Baumartenzusammensetzung (%) in Deutschland, in Sachsen, im Tharandter Wald (TW) und am ICOS Standort.....	16
Tabelle 4: Mittelwerte der Emissionen für Tharandt für 2008-2019, berechnet mit <i>ECOSPEED Region</i> . Die flächenhaften Emissionen für Wald wurden mit drei Emissionsfaktoren gerechnet. Die rechte Spalte ist das Verhältnis zwischen der Emission des Waldes (THG-Senke) und den übrigen Emissionen (alle THG-Quellen) .....	22

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
<b>ASTW</b>	Ankerstation Tharandter Wald (ICOS Station DE-Tha)
<b>BDF</b>	Bodendauerbeobachtungsflächen
<b>BWI</b>	Bundeswaldinventur
<b>BZE</b>	Forstliche Bodenzustandserhebung
<b>C</b>	Kohlenstoff
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>DEU</b>	Nationaler Emissionsfaktor
<b>DTF</b>	Landwirtschaftliche Dauertestflächen
<b>EC</b>	Eddy-Kovarianz
<b>ICOS</b>	Integrated Carbon Observation System; steht hier auch für den standortspezifischen Emissionsfaktor
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Primärenergie)
<b>SBS</b>	Staatsbetrieb Sachsenforst
<b>SN</b>	Sächsischer Emissionsfaktor
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt



# 1 Einleitung

Klimaschutz und Klimaanpassung sind unterschiedliche Aspekte bzw. Notwendigkeiten des menschengemachten Klimawandels. Die stetig ansteigende Konzentration an Treibhausgasen (THG) ist für die Zunahme der globalen Mitteltemperatur und deren vorrangig negativen Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft verantwortlich. An die schon existierenden bzw. nicht mehr abwendbaren Auswirkungen des Klimawandels gilt es sich anzupassen. Ein wichtiger Schritt zur Reduzierung der THG-Emissionen und für eine erfolgreiche Klimaschutzpolitik auf kommunaler Ebene ist die Kenntnis der THG-Bilanz, also der Quellen und Senken von THG. Es existieren mehrere Initiativen rund um das Thema Klimaschutz und -anpassung, in denen sich Kommunen zusammengeschlossen haben, um u.a. ihre THG-Emissionen entsprechend internationaler Verpflichtungen zu reduzieren sowie einen gemeinsamen Handlungsansatz für Klimaschutz und Klimaanpassung umzusetzen (Service- und Kompetenzzentrum: Kommunaler Klimaschutz, 2018). Dazu gehören:

- das Klimabündnis ([www.klimabuendnis.org/](http://www.klimabuendnis.org/))
- der Konvent der Bürgermeister für Klima und Energie (<https://www.konventderbuergermeister.eu/>)
- der European Energy Award (<https://www.european-energy-award.de/>).

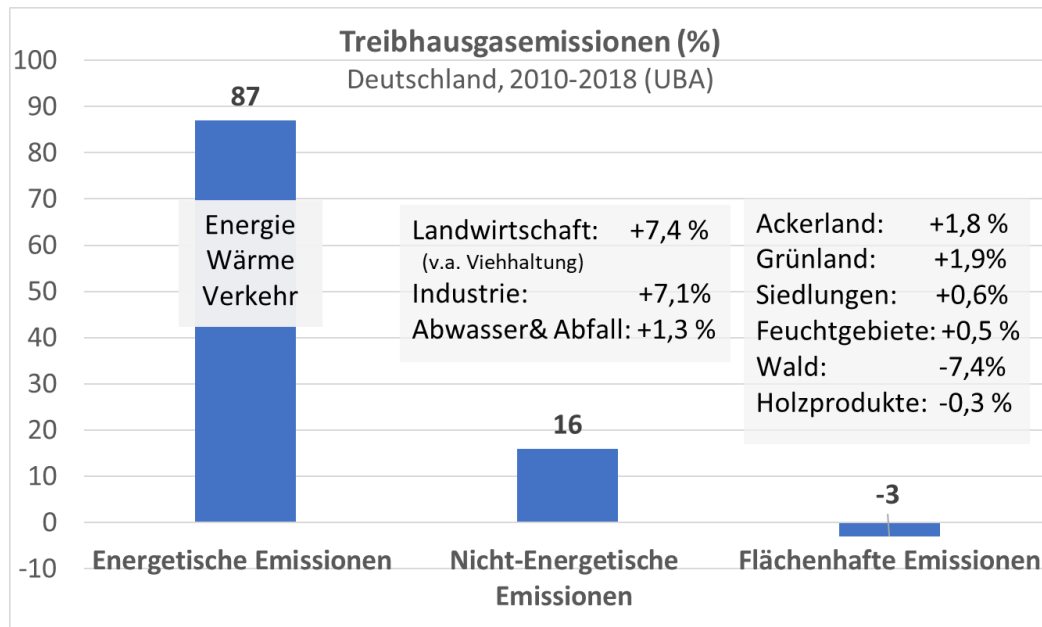
Im Rahmen des EU-Projekts LIFE LOCAL ADAPT – finanziert vom LIFE Programm – werden Kommunen primär bei der Suche nach geeigneten Klimaanpassungsmaßnahmen unterstützt. Klimaschutz ist aber weiter nötig, da nur so irreversible Systemänderungen vermieden werden können, die die Anpassungskapazität überfordern würden. Um das Thema Klimaschutz exemplarisch im Projekt zu bearbeiten, soll in dieser Arbeit die Rolle der Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Bindung/Freisetzung im nicht-energetischen Bereich am Beispiel der Gemeinde Tharandt untersucht werden. Die Wahl Tharandts erfolgte wegen des vorhandenen Treibhausgasmonitoring-Netzes der TU Dresden im Gemeindegebiet und dessen unmittelbarer Nähe. Dieses erlaubt zum einen eine unabhängige Prüfung der national bzw. regional abgeleiteten Emissionsfaktoren und zum anderen tiefere Einblicke in die Dynamik der THG-Flüsse.

In Deutschland werden Kohlenstoffinventuren über das Umweltbundesamt (UBA) durchgeführt. Für den Zeitraum 2010-2018 lassen sich anhand von UBA-Angaben<sup>1</sup> die Quellen der THG-Emissionen Sektor-spezifisch quantifizieren (Abbildung 1, CO<sub>2</sub>-Äquivalente). Die energetischen Emissionen betragen 87 %, die nicht-energetischen Emissionen 16 %. Die flächenhaften Emissionen aus der Landnutzung (Siedlungen, Wald, Acker- und Grünland), Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft stellen mit durchschnittlich -3 % eine THG-Senke dar. Siedlungen, Grünland, Ackerland und Feuchtgebiete sind eine THG-Quelle, der Wald und langlebige Holzprodukte eine THG-Senke. Natürliche Einflüsse wie Waldbrände, Stürme, Dürren etc.

---

<sup>1</sup> Trendtabelle Treibhausgase auf: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#nationale-und-europaische-klimaziele>

können die Einflüsse aus menschlichen Aktivitäten (z.B. Holzeinschläge) übertreffen bzw. sind nur schwer von diesen trennbar. Die flächenhaften Emissionen der Landnutzung sind im Vergleich zu punktuell fassbaren Emissionen durch ihre hohe zeitliche und räumliche Dynamik die am schwersten zu quantifizierenden.



**Abbildung 1: Treibhausgasemissionen für Deutschland (UBA)**

Die Professur für Meteorologie der TU Dresden betreibt gegenwärtig sechs Stationen zum Monitoring von Energie-, Wasser und Treibhausgasflüssen von unterschiedlichen Landnutzungen. Darunter sind drei Messstationen im Rahmen des ICOS-Ökosystemprogramms<sup>2</sup> über Wald, Grünland und Ackerland. Die Messungen des CO<sub>2</sub>-Austauschs über Wald starteten im Tharandter Wald schon Mitte der 90er Jahre. Nur sehr wenige Stationen weltweit können auf so lange Datenreihen zurückgreifen. An den Stationen Grillenburg und Klingenberg werden die atmosphärischen Flüsse über extensiv bewirtschaftetem Grünland bzw. über Ackerland gemessen. Alle drei Standorte liegen nicht weit voneinander entfernt und sind somit der gleichen Witterung ausgesetzt.

Im Rahmen der folgenden THG-Bilanzierung sollen für die Gemeinde Tharandt

- der Einfluss forstlicher und landwirtschaftlicher Ökosysteme auf die Gesamtbilanz bewertet,
- der Einfluss von Emissionsfaktoren auf Grundlage langfristiger Messungen bestimmt,
- die Klimasensibilität von Emissionen (Einfluss von Trockenheit, Borkenkäfer) dargestellt,
- der Handlungsspielraum einer Gemeinde im Bereich der flächenhaften Emissionen abgeschätzt sowie

<sup>2</sup> ICOS - Integrated Carbon Observation System, Teil des European Research Infrastructure Programms (ERIC)



- Empfehlungen für eine nachhaltige Landnutzung zur Erhöhung der Kohlenstoff-Speicherung gegeben werden.

Dem Wald kommt für die direkt durch den Menschen beeinflussbare Kohlenstoff-Speicherung die größte Bedeutung zu. Eine 35 m hohe, 100 Jahre alte Fichte mit einem Durchmesser von 50 cm in Brusthöhe hat ein oberirdisches Holzvolumen von etwa 3,4 m<sup>3</sup>. Das entspricht einer Fixierung von 0,7 t Kohlenstoff (C) bzw. 2,6 t Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Eine Buche mit gleichem Holzvolumen fixiert aufgrund der höheren Holzdichte 0,95 t C bzw. 3,5 t CO<sub>2</sub>. Der Wald stellt eine gute Möglichkeit zur Bekämpfung des Treibhauseffektes dar, da er der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzieht. Die C-Speicherung verlängert sich, wenn Holz etwa für Neubauten, Modernisierungen oder Möbel verwendet und der enthaltene Kohlenstoff so langfristig fixiert wird. Des Weiteren ersetzt Holz andere energieintensive Materialien wie Stahl oder Beton, die auf Basis endlicher Rohstoffe hergestellt werden und bei deren Herstellung viel CO<sub>2</sub> emittiert wird. Selbst der Ersatz von fossilen Energieträgern, z.B. bei einer Pelletheizung, kann ein Beitrag zum Klimaschutz sein.

In den nationalen THG-Bilanzen werden neben energetischen und nicht-energetischen Emissionen auch die flächenhaften Emissionen von Siedlungen, Wäldern, Acker- und Grünland sowie Mooren berücksichtigt und somit auch die C-Senke Wald für den Klimaschutz angerechnet. Im Rahmen einer kommunalen Bilanzierung werden diese flächenhaften Emissionen jedoch in der Regel nicht betrachtet. Die wesentlichen Gründe hierfür sind: a) geringer Anteil von flächenhaften Emissionen an der Gesamtbilanz, b) schwierige Quantifizierung der Emissionen und c) erschwerte Vergleichbarkeit zwischen Kommunen aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Landnutzungen. Trotzdem spielen Wälder eine bedeutende Rolle, da sie neben der C-Speicherung weitere wichtige Ökosystemdienstleistungen bereitstellen: Regulierung des Wasserhaushaltes und des Klimas, Luftreinhaltung, Raum für Erholung und Sport etc. Der Leitsatz „Think global, act local!“ ist in diesem Zusammenhang sehr relevant. Die Reduktion von THG-Emissionen bzw. der Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ist von globaler Bedeutung. Auf lokaler Ebene muss jedoch gehandelt werden. Auch wenn die kommunale THG-Bilanzierung aus pragmatischen Gründen die flächenhaften Emissionen ausspart, müssen die Kommunen motiviert werden, sich für ein nachhaltiges Landmanagement zu engagieren.

Im Rahmen dieser Arbeit möchten wir die kommunale THG-Bilanzierung um die flächenhaften Emissionen erweitern, um deren Relevanz, Dynamik sowie die bestehenden Einflussmöglichkeiten exemplarisch zu zeigen. Hierzu werden drei Variantenrechnungen für die Periode 2008 bis 2019 unter Verwendung unterschiedlicher Emissionsfaktoren für den Wald durchgeführt.

## 2 Energie- und Treibhausgasbilanzierung

### 2.1 Einführung

Zur Eindämmung des globalen Klimawandels und dessen Folgen ist eine drastische Reduktion der THG-Emissionen notwendig. Basierend auf den Beschlüssen des Pariser Klimaabkommens aus dem Jahr 2015 verabschiedete die Bundesregierung 2016 den Klimaschutzplan 2050. Demzufolge soll Deutschland bis zum Jahr 2050 weitgehend treibhausgasneutral werden. Das erfordert eine Senkung der THG-Emissionen um 80 bis 95 % gegenüber 1990.

Die wichtigsten anthropogen emittierten THG und deren Anteile an den deutschen THG-Emissionen sind Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ , 88 %), Methan ( $\text{CH}_4$ , 6 %) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ , 4 %) (Mittelwert 2010-2018, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)).  $\text{CO}_2$  entsteht überwiegend bei der Verbrennung fossiler Energieträger (Strom- und Wärmeerzeugung, Verkehr, Industrie etc.). Methan entsteht in Land-, Forst-, Abfall- und Abwasserwirtschaft sowie bei industriellen Prozessen, vor allem bei Förderung, Transport und Verarbeitung von Erdgas. Anthropogen verursachte Lachgas-Emissionen stammen hauptsächlich aus der Landwirtschaft. Zur Vollständigkeit wird darauf hingewiesen, dass  $\text{CO}_2$  sich auch in einem großen natürlichen Kreislauf von Photosynthese und Atmung befindet, dass Methan auch natürlich in Mooren und durch die Verdauung bei Wiederkäuern entsteht und dass Lachgas auch ein Resultat von natürlichen Stickstoff-abbauenden Prozessen sein kann. Methan ist ein 25-mal und Lachgas ein 298-mal wirksameres THG als  $\text{CO}_2$ . Als vergleichbare Maßzahl wurde hierzu das  $\text{CO}_2$ -Äquivalent eingeführt.

Aufgrund des überwiegenden Anteils von  $\text{CO}_2$  an den THG und seiner hohen atmosphärischen Verweilzeit von ca. 120 Jahren kann jedoch nur die Senkung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen bzw. der  $\text{CO}_2$ -Entzug aus der Atmosphäre langfristig die Klimaerwärmung bremsen. Die bedeutendsten natürlichen C-Senken sind die photosynthetische C-Bindung in Meeres- und Landpflanzen, die Lösung von  $\text{CO}_2$  im Wasser und die C-Speicherung in Böden und Mooren. Direkt durch den Menschen beeinflussbar sind – trotz Versuchen wie Eisendüngung des Ozeans – kurz- bis mittelfristig nur C-Senken terrestrischer Ökosysteme.

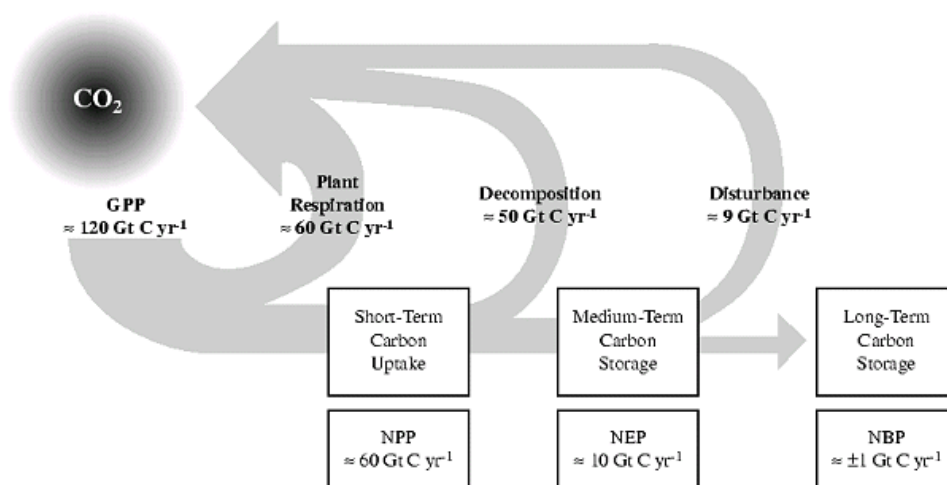


Abbildung 2: Globaler terrestrischer Kohlenstoffrückhalt (IPCC 2000, s. Text)

Für den terrestrischen C-Rückhalt haben sich folgende Begriffe etabliert (IPCC 2000, siehe Abbildung 2):

- **GPP** (engl.: Gross Primary Production): Die Bruttoprimärproduktion bezeichnet die Gesamtmenge an Kohlenstoff, die durch den Prozess der Photosynthese von Pflanzen in einem Ökosystem, wie z. B. einem Baumbestand, gebunden wird.
- **NPP** (engl.: Net Primary Production): Die Nettoprimärproduktion bezeichnet die GPP abzüglich der Verluste, die durch die (autotrophe) Atmung der Pflanzen entstehen (pflanzlicher Zuwachs).
- **NEP** (engl.: Net Ecosystem Production): Die Netto-Ökosystemproduktion bezeichnet die Nettoakkumulation von organischer Substanz oder Kohlenstoff durch ein Ökosystem. Die NEP ist die Differenz zwischen der Produktionsrate (NPP) und der Zersetzungsrate toter organischer Substanz (heterotrophe Atmung). Diese umfasst Verluste durch Pflanzenfresser und die Zersetzung von organischen Ablagerungen durch Bodenlebewesen (vor allem mikrobielle Atmung).
- Als **NBP** (engl.: Net Biome Production) wird die Netto-C-Bindung oder C-Freisetzung an einem Standort oder in einer Region bezeichnet. Sie schließt Prozesse ein, die zum Verlust oder Gewinn von lebender und toter organischer Substanz führen (Ernte, Durchforstung, organische Düngung, Pflanzung, Windschäden, Feuer etc.).

NBP kann durch Messung der langjährigen Veränderungen der C-Vorräte in der Vegetation und im Boden (Inventuren) quantifiziert werden. Eine zeitlich besser auflösende Methode ist die Messung der CO<sub>2</sub>-Flüsse zwischen Pflanzenbestand und Atmosphäre mittels Eddy-Kovarianz (EC) oberhalb der Vegetation (auch bezeichnet als Netto-Ökosystem-Austausch, NEE). Als Maß für die langfristige CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung eines Waldes ist NBP zu verwenden (also NEP abzüglich der C-Exporte). Durch ein nachhaltiges Waldmanagement und die Verarbeitung des Holzes zu langlebigen Produkten kann die langfristige C-Speicherung positiv beeinflusst werden.

## 2.2 Methodik und Software

Es gibt verschiedene Energie- und THG-Bilanzierungssysteme in Abhängigkeit von der räumlichen Skala (international, national, regional, kommunal) und den Anbietern/Klimaschutzinitiativen. Die Systeme unterscheiden sich durch verschiedene Annahmen und Prinzipien:

1. Bilanzierungsgröße: Primär-, Sekundär- oder Endenergie<sup>3</sup>
2. Bilanzierungsprinzip: Territorial- oder Verursacherprinzip<sup>4</sup>

Ein Standard für die Erstellung kommunaler Energie- und THG-Bilanzen stellt in Deutschland die Bilanzierungssystematik Kommunal (BISKO) dar (ifeu 2014, ifeu 2019). Sie ermöglicht einen Vergleich der Emissionen verschiedener Städte und Gemeinden durch Nutzung eines gemeinsamen Datenpools und einheitlicher Parameter. BISKO zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Es ist eine endenergiebasierte Territorialbilanz.
- Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden nach der Methode der Primärenergie (LCA) ausgewiesen und berücksichtigen somit auch die Emissionen während der Gewinnung, der Verarbeitung und dem Transport der Energieträger.
- Es muss mit dem Bundesstrom-Mix gerechnet werden. Sowohl der lokale Stromverbrauchs-Mix als auch der lokale Stromproduktions-Mix dürfen bei der kommunalen CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht angerechnet werden.
- Bei der Struktur der zu bilanzierenden Bereiche (Haushalte, Wirtschaft, Verkehr, etc.) werden klare Vorgaben gemacht. So muss beispielsweise der Bereich Wirtschaft in die beiden Sub-Bereiche „Industrie“ und „Gewerbe/Handel/Dienstleistungen“ unterschieden werden.
- Die Primärenergiefaktoren und Emissionsfaktoren sind für die einzelnen Energieträger vorgegeben und können nicht überschrieben werden.
- Die Basis für die Primärenergiefaktoren bildet die GEMIS-Datenbank (Fritsche et al. 1989).

Die THG-Emissionen werden für Energieträger aus deren eingesetzter Menge und deren spezifischen Emissionsfaktoren berechnet. Der Emissionsfaktor stellt das Verhältnis der Masse eines freigesetzten Stoffes (z.B. CO<sub>2</sub>) zu der aufgewendeten Masse eines Ausgangsstoffes (z.B. Erdgas) beziehungsweise zur produzierten Energieeinheit dar. Wie hoch er ausfällt, ist abhängig vom Ausgangsstoff, von dem Prozess des Emittierens und dem sich daraus ergebenden

---

<sup>3</sup> Primärenergie ist die Energie, die mit den ursprünglich vorkommenden Energieformen zur Verfügung steht (Brennstoff, Sonne, Wind). Sie wird durch einen mit Verlusten behafteten Umwandlungsprozess in Sekundärenergie umgewandelt. Die vom Verbraucher nutzbare Endenergie ergibt sich nach Abzug der Übertragungsverluste.

<sup>4</sup> In einer Territorialbilanz wird nur die auf dem Territorium der Kommune verbrauchte Energie betrachtet. Wird nach dem Verursacherprinzip bilanziert werden die Energieverbräuche der Bewohner eines Gebietes unabhängig vom Ort des Verbrauchs quantifiziert.

Stoff. Emissionsfaktoren werden auch für Landnutzungen wie Siedlung, Wald, Ackerland und Grünland ermittelt und beziehen sich auf eine bestimmte Fläche (z.B. t CO<sub>2</sub>/ha). Die finale THG-Bilanz nach dem BSKO-Standard enthält die energetischen und nicht-energetischen Emissionen. Die flächenhaften Emissionen der verschiedenen Landnutzungen fließen nicht mit ein.

Spezielle Softwareprodukte sollen Kommunen, lokalen und regionalen Behörden die Bilanzierung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen erleichtern sowie ergänzende Funktionen bieten. Zwei häufig genutzte Softwarelösungen sind der *Klimaschutzplaner* des Klima-Bündnisses ([www.klimaschutz-planer.de](http://www.klimaschutz-planer.de)) und *ECOSPEED Region* der Schweizer Firma ECOSPEED ([www.ecospeed.ch/region](http://www.ecospeed.ch/region)). Zusätzlich nutzen Ingenieur- und Beratungsbüros eigene Softwarelösungen bzw. bieten Bundesländer, wie zum Beispiel Baden-Württemberg, eigene Entwicklungen an.

Für diese Arbeit wurde mit *ECOSPEED Region* gearbeitet und die Bilanzierung auf Basis des BSKO Standards gewählt. Begonnen wird in der Regel mit der **Startbilanz**. In dieser Top-down Bilanz werden die Emissionen auf Basis statistischer Daten und nationaler Kennwerte berechnet. Hierzu gehören die Einwohnerzahl, die Anzahl an Beschäftigten in 19 Sektoren, eine mittlere Landnutzungsänderung, mittlere Energieverbräuche, Fahrleistungen, mittlere Emissionsfaktoren, der Strommix-Deutschland etc. Die Bilanz kann durch die Eingabe gemeindebezogener Daten verbessert werden – die **Endbilanz** (bottom-up approach).

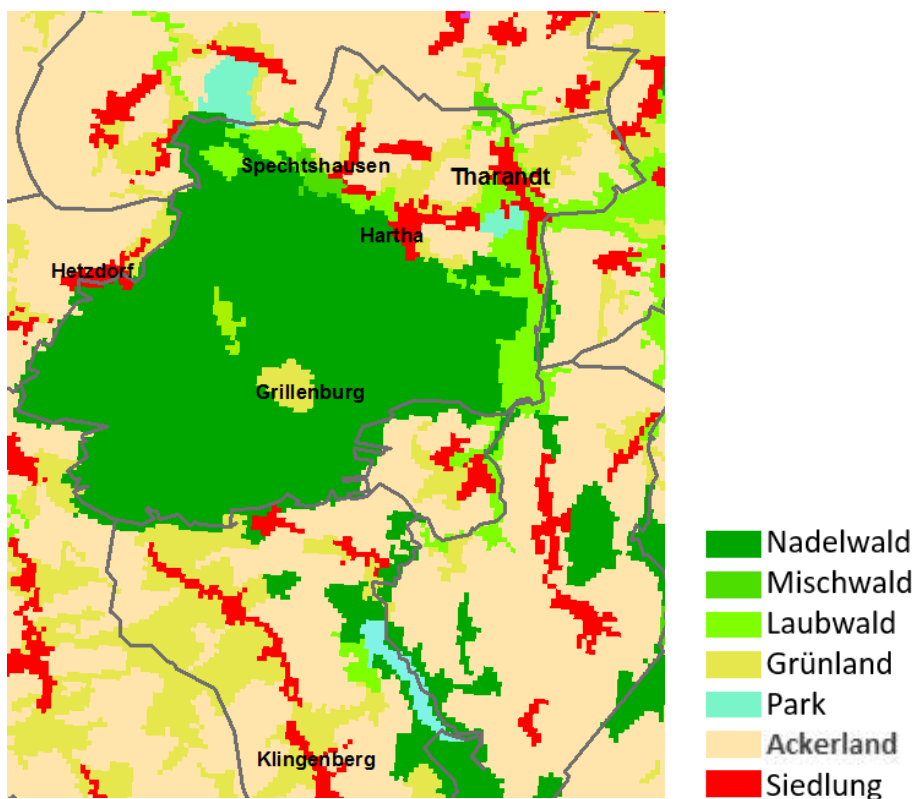
Die BSKO Bilanz berücksichtigt keine flächenhaften THG-Emissionen, die auf Grünland, Ackerland, im Wald und in Siedlungen anfallen. Nachrichtlich werden sie jedoch durch die Software *ECOSPEED Region* bereitgestellt. Da das Thema dieser Arbeit diese flächenhaften CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Senken sind, werden im Folgenden nur die Auswirkungen veränderter Emissionsfaktoren dieser Flächen auf die kommunale Bilanz analysiert. Das bedeutet, dass nur Varianten der Startbilanz gerechnet werden.

### 3 Untersuchungsgebiet

Die Gemeinde Tharandt liegt im sächsischen Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und umfasst eine Fläche von 71,22 km<sup>2</sup>. Sie besteht aus der Stadt Tharandt und den Ortsteilen bzw. Gemarkungen Kurort Hartha, Fördergersdorf, Grillenburg, Spechtshausen, Großopitz und Pohrsdorf, die in einer Verwaltungsgemeinschaft organisiert sind. Verwaltungssitz ist die Stadt Tharandt. In der Gemeinde leben 5.439 Einwohner (Stand 31.12.2019). Landschaftlich wird die Gemeinde vom Tharandter Wald dominiert, der über dreiviertel der Landnutzung einnimmt (Tabelle 1 und Abbildung 3).

**Tabelle 1: Landnutzung der Gemeinde Tharandt.**

Landnutzung	(ha)	(%)
Stadt	287	4
Wald	5582	78
Grünland	463	6
Ackerland	806	11



**Abbildung 3: Landnutzung der Gemeinde Tharandt (Daten: CORINE 2012).**

## 4 Daten und Simulationen

In dieser Arbeit werden CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren aus drei verschiedenen Quellen verwendet:

- I) nationaler Inventarbericht (DEU),
- II) sächsische Inventuren (SN) und
- III) EC-Messungen des ICOS-Konsortiums (ICOS).

In *ECOSPEED Region* werden für die BSKO Bilanz standardmäßig die Emissionsfaktoren des nationalen Inventarberichts (UBA 2020) verwendet (DEU).

Die sächsischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren (SN) basieren auf den Kohlenstoffinventuren der Landesbehörden. Der Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) führt regelmäßig Inventuren durch:

- In der Bundeswaldinventur (BWI) werden die Kompartimente Baumbiomasse, Verjüngung, Bodenvegetation (jeweils ober- und unterirdisch) und
- in der Bodenzustandserhebung (BZE) die Humusaufgabe und der Mineralboden erfasst (Staatsbetrieb Sachsenforst 2019).

Die Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe unterhält zusammen mit der Abteilung Landwirtschaft des Sächsischen Landesamtes für Umwelt Landwirtschaft und Geologie

- 60 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) sowie
- 857 fest eingemessene Flächen auf landwirtschaftlichen Praxisschlägen, sogenannte Dauertestflächen (DTF),

an denen Kohlenstoffgehalte gemessen werden.

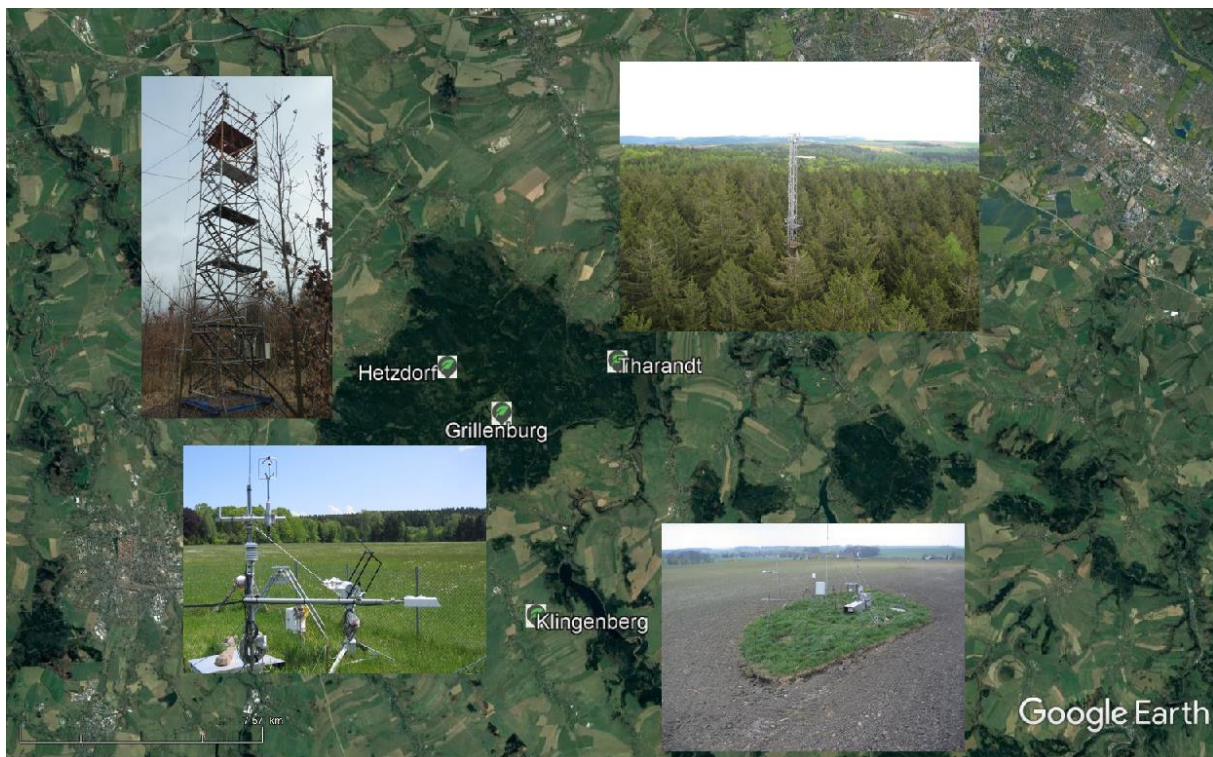
Die Professur für Meteorologie ist mit ihren EC-Messungen Teil des europäischen ICOS-Konsortiums. Mit fast 100 „site years“ (Beobachtungsjahre aller Standorte) ist die Abdeckung bezüglich Landnutzung und Klimaextremen sehr gut. ICOS an der TU Dresden liefert damit einen erheblichen Beitrag zum langfristigen Klimafolgen-Monitoring durch die international vergleichbare Bilanzierung von Treibhausgasen und -quellen. Ein Alleinstellungsmerkmal der sächsischen Standorte ist ihre räumliche Nähe, so dass Landnutzungseffekte ohne Berücksichtigung klimatischer Unterschiede untersucht werden können.

In Abbildung 4 werden die von der TU Dresden betriebenen ICOS-Stationen (DE-Tha, DE-Kli, DE-Gri) sowie eine zusätzliche EC-Station (DE-Hzd) in der Umgebung von Tharandt dargestellt:

- DE-Tha, Ankerstation Tharandter Wald (ASTW), 117 Jahre alte Fichten, Monitoring seit 1996
- DE-Gri, Grillenburg, Dauergrünland, seit 1987 ungedüngt und extensiv genutzt, Monitoring seit 2002
- DE-Kli, Klingenberg, Ackerbau, 5-jährige Fruchtfolge (Raps, Winterweizen, Mais, Sommergerste und Wintergerste), Monitoring seit 2004.
- DE-Hzd, Hetzdorf, Neuanpflanzung mit hauptsächlich Eichen in 2008, Monitoring seit 2010

Mit dem sächsischen Beitrag zu ICOS ist es möglich, nicht nur die C-Bilanz typischer sächsischer Ökosysteme kontinuierlich zu beobachten, sondern auch Managementoptionen, Landnutzungsänderungen, Störungen, Höhengradienten und den Einfluss der Wasserverfügbarkeit exemplarisch zu bewerten.

Ergänzend zu den EC-Messungen wurden C-Inventuren des Bodens an den drei ICOS-Standorten in 2007-2009 und 2018-2019 durchgeführt. 1997 und 2020 wurden an DE-Tha vier Fichten gefällt und die allometrische Beziehung zwischen dem Brusthöhendurchmesser der Bäume, der oberirdischen Biomasse und deren C-Gehalt bestimmt. Auf Grundlage langfristiger Umfangsmessungen und Informationen über die Stammzahl pro Hektar (1999: 444 ha<sup>-1</sup>, 2007: 230 ha<sup>-1</sup>, 2019: 220 ha<sup>-1</sup>) kann der oberirdische C-Vorrat berechnet werden (Grünwald et al. 2020).



**Abbildung 4: EC-Messstationen der TU Dresden**

In Tabelle 2 werden die nationalen Emissionsfaktoren für Deutschland (DEU), die sächsischen (SN) und die der ICOS-Standorte gegenübergestellt, basierend auf aktuellen Berechnungen von Grünwald et al. (2020). Bei Letzteren handelt es sich ebenfalls um NBP-Werte, das heißt C-Exporte durch Ernte und Durchforstung sowie Importe durch Düngung wurden implizit erfasst.



**Tabelle 2: Emissionsfaktoren für verschiedene Landnutzungen und deren Kompartimenten für Deutschland (DEU), für Sachsen (SN) und für ICOS-Standorte in Sachsen. Negative Werte entsprechen einer CO<sub>2</sub>-Senke (Werte aus Grünwald et al. (2020), modifiziert).**

Emissionsfaktoren (t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )		DEU <sup>1</sup>	SN <sup>2</sup>	ICOS <sup>3</sup>
Wald gesamt	2002-2012	-1,13	-2,1	-2,8 (EC)
	2012-2017	-1,58		
<i>Wald (Boden)</i>		-0,41		-0,7 (Inventuren)
<i>Wald (unterirdische Biomasse)</i>		-0,11	-0,58	
<i>Wald (oberirdische Biomasse)</i>		-0,624	-1,52	-1,5 (Fichte)
<i>Wald (Totholz)</i>		-0,006		
<i>Wald (Streu)</i>		+0,02		
Dauergrünland gesamt		0		-0,1 (EC)
<i>Dauergrünland (Boden)</i>		0		-0,3 ... -0,8 (Inventuren)
Ackerfruchtfolge gesamt		0		+0,9 (EC)
<i>Ackerfruchtfolge (Boden)</i>		0		-1,0 ... -1,6 (Inventuren)

<sup>1</sup> UBA (2020): Zeitraum 2002 – 2012, für Wald gesamt zusätzlich 2012-2017

<sup>2</sup> Staatsbetrieb Sachsenforst (2019): Zeitraum 2002 – 2012

<sup>3</sup> Grünwald et al. (2020): Zeiträume: EC 2002 – 2012 (für Dauergrünland 2004-2012 und Ackerfruchtfolge 2005-2012), Bodeninventuren 2007/2009 und 2018/2019

Der Emissionsfaktor des sächsischen Waldes ist in der Periode 2002-2012 mit -2,1 (Einheit: t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) deutlich niedriger als für den gesamtdeutschen Wald (-1,13). Das heißt, der sächsische Wald stellte eine größere CO<sub>2</sub>-Senke dar. Im Zeitraum 2012-2017 vergrößerte sich die CO<sub>2</sub>-Senke im deutschen Wald auf -1,58. Der fichtendominierte ICOS-Standort weist mit -2,8 den niedrigsten Emissionsfaktor für das Ökosystem Wald in diesem Vergleich auf. Die Differenz des deutschen und sächsischen Emissionsfaktors für Wald resultiert im Wesentlichen aus der Variabilität der natürlichen Standortfaktoren (Klima, Boden) sowie der Bewirtschaftung. Letztere betrifft die Speicheränderung in der oberirdischen Biomasse und ist somit von Baumartenzusammensetzung (Tabelle 3), Zuwachs, Bestandesalter, Entnahmen und Störungen abhängig. Beide Emissionsfaktoren sind Durchschnittswerte für unterschiedliche Waldflächen bezüglich geographischer Lage, klimatischer Einflüsse sowie Waldstruktur und Management.

Im Gegensatz dazu handelt es sich beim ICOS-Waldstandort um einen weitgehend homogenen, von klimatischen Extremen (Trockenheit, Hitze, Sturm) weitestgehend verschonten Bestand, der mit ca. 100 Jahren ein hohes Bestandesalter aufweist und damit eine große C-Senke darstellt.

Für den Waldboden (inkl. unterirdische Biomasse) sind dagegen die nationalen und sächsischen Emissionsfaktoren in etwa gleich (-0,52 vs. -0,58). Die C-Inventuren des Waldbodens (ohne unterirdische Biomasse) am ICOS-Standort ergaben einen Emissionsfaktor von -0,7, der sich nicht signifikant von den Werten für D und SN unterscheidet.

**Tabelle 3: Baumartenzusammensetzung (%) in Deutschland, in Sachsen, im Tharandter Wald (TW) und am ICOS Standort**

	Laubbäume	Fichten	Sonstige Nadelbäume
D <sup>1</sup>	44.5	26	29.5
SN <sup>2</sup>	32	35	33
TW <sup>3</sup>	19	55	26
ICOS <sup>4</sup>	22	75	3

<sup>1</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Wald\\_in\\_Deutschland#Hauptbaumarten](https://de.wikipedia.org/wiki/Wald_in_Deutschland#Hauptbaumarten)

<sup>2</sup> [http://www.wald.sachsen.de/Der\\_Wald\\_in\\_Sachsen.pdf](http://www.wald.sachsen.de/Der_Wald_in_Sachsen.pdf)

<sup>3</sup> [http://osterzgebirge.org/wp-content/uploads/2020/01/11\\_Tharandter\\_Wald.pdf](http://osterzgebirge.org/wp-content/uploads/2020/01/11_Tharandter_Wald.pdf)

<sup>4</sup> Waldinventur 2013

Für Dauergrünland und Ackernutzung (jeweils ohne Landnutzungsänderung) werden im nationalen Inventarbericht keine Änderungen im C-Vorrat sowohl bei den Mineralböden als auch bei der Biomasse ausgewiesen, der Emissionsfaktor beträgt 0 (Tabelle 2). Für Sachsen können auf Basis der C-Vorratsänderungen an den landwirtschaftlichen BDF keine belastbaren Aussagen getroffen werden, da die Stichprobenumfänge noch zu klein sowie die Streuung von C-Vorräten und deren Änderungen groß sind. Am ICOS-Standort mit der Landnutzung Dauergrünland wird der nationale Emissionsfaktor im Wesentlichen bestätigt (EC: -0,1; Inventuren: -0,3 bis -0,8). Am größten sind die Differenzen für die ackerbauliche Landnutzung. Der aus den EC-Messungen abgeleitete Emissionsfaktor am ICOS-Standort ist mit +0,9 deutlich größer als der nationale Emissionsfaktor (0) und weist auf eine C-Quelle hin. Dagegen deuten die C-Inventuren des Bodens mit einem Emissionsfaktor von -1,0 bis -1,6 eher auf eine (nicht signifikante) CO<sub>2</sub>-Senke hin.

Für die THG-Bilanzierungen werden drei Sätze von Emissionsfaktoren für Wald gleichberechtigt verwendet: DEU (**Simulation 1**) als Referenz, SN-Emissionsfaktoren (**Simulation 2**) für eine besser regional angepasste Darstellung des Waldes und des Managements (typische Bewirtschaftung) und die ICOS-Emissionsfaktoren (**Simulation 3**), ermittelt aus zeitlich hochauflösenden Messungen.

Für die DEU- und ICOS-Emissionsfaktoren liegen Zeitreihen von 2005 bis 2019 für Wald vor (Abbildung 5). Für SN gibt es nur einen Wert für die Periode 2002-2012. Daher wird als Abschätzung die Zeitreihe von DEU mit dem Faktor 1,5 multipliziert. Der Faktor resultiert aus dem Verhältnis der Emissionsfaktoren für DEU und SN in der Periode 2002-2017 (2,1 für SN und 1,4 für DEU, vgl. Tabelle 2).

Die Emissionsfaktoren für DEU (und demzufolge auch die abgeleiteten Werte für SN) zeigen im Unterschied zu den ICOS-Werten nur eine geringe überjährige Variabilität. Hierfür ist die Größe des Betrachtungsraums verantwortlich. Auf Bundes- und Landesebene mitteln sich der Einfluss der Witterung und des Managements, z.B. Holzentnahmen und Aufforstungen, heraus. Dagegen führen die lokale Witterung, z.B. Schneebruch, Stürme, Trockenheit, und das Waldmanagement an der ICOS-Station zu großen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Die ICOS-Standorte zeigen daher deutlicher die Möglichkeiten des lokalen Managements von Wäldern als potentiellen Beitrag zum Klimaschutz. Gleichzeitig können positive Effekte des Klimawandels, z.B. längere Vegetationsperioden, oder Konsequenzen von Störungen, wie Dürren oder Stürme, besser eingeordnet werden.

In den DEU- und SN-Daten ist ein Trend zu einer höheren CO<sub>2</sub>-Speicherung im Wald ersichtlich, der mit dem zunehmenden Alter der deutschen Waldbestände und den günstigen Wachstumsbedingungen (höhere Temperaturen, erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>- und Stickstoffgehalt) begründet werden kann. Eventuelle Trends in kleinen Bestandsflächen, wie dem ICOS-Standort, werden von Holzentnahmen und Schäden überlagert.

Abbildung 5 zeigt auch für Ackerland und Grünland den Vergleich der in ECOSPEED verwendeten Emissionsfaktoren (DEU) sowie der eigenen Messungen (ICOS). Ackerland stellt eine geringe CO<sub>2</sub>-Quelle dar, ein nahezu konstanter Wert über die Zeit, wenn man DEU betrachtet, und ein stark variabler und etwas höherer Wert für ICOS. Ein etwas anderes Bild ergibt sich für Grünland. Die deutschlandweiten Emissionsfaktoren deuten auf eine konstant hohe CO<sub>2</sub>-Quelle hin. Die ICOS Werte zeigen große Schwankungen von Jahr zu Jahr, so dass Grünland mal als CO<sub>2</sub>-Quelle und mal als Senke fungiert. Das Grünland an der ICOS Station in Grillenburg wächst auf Mineralboden, wofür UBA (2020) Emissionen von Null für Deutschland angibt. Für Grünland auf organischen Böden werden große positive Emissionen angegeben UBA (2020). In ECOSPEED wird lediglich ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für Grünland angegeben, der in seiner Größenordnung dem von Grünland auf organischen Böden entspricht.

Für die Bilanzierung in Tharandt werden die regional gemessenen Werte verwendet (ICOS).

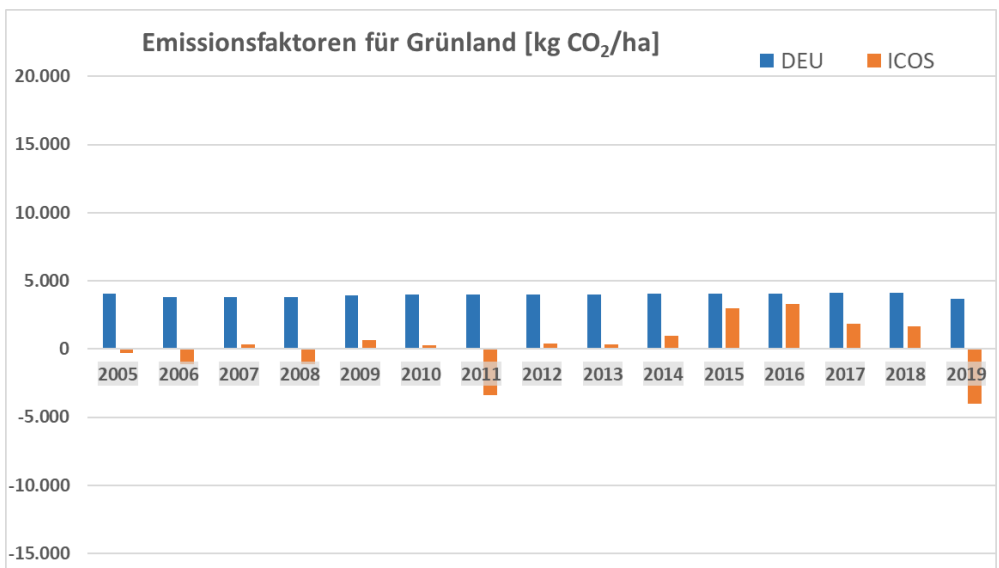
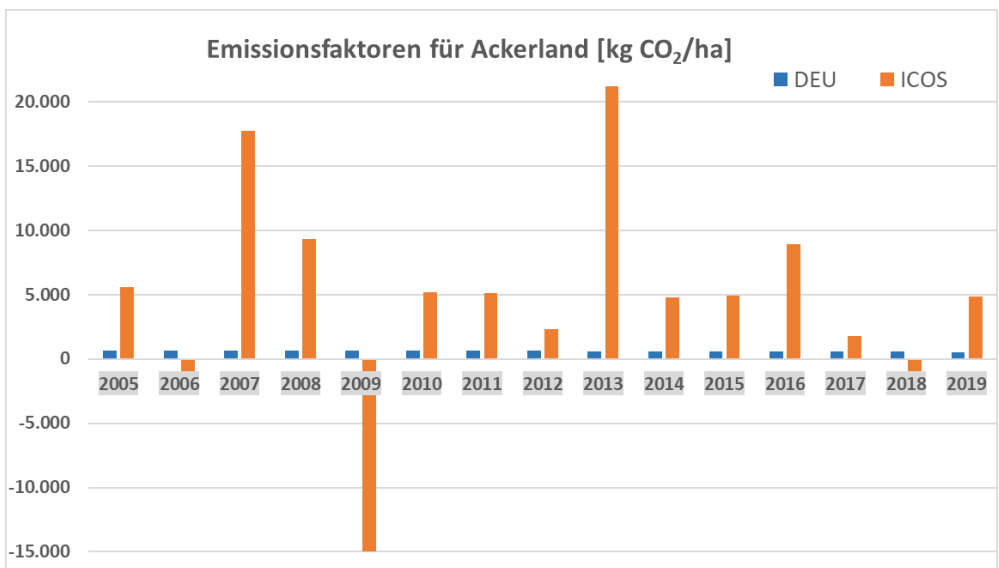
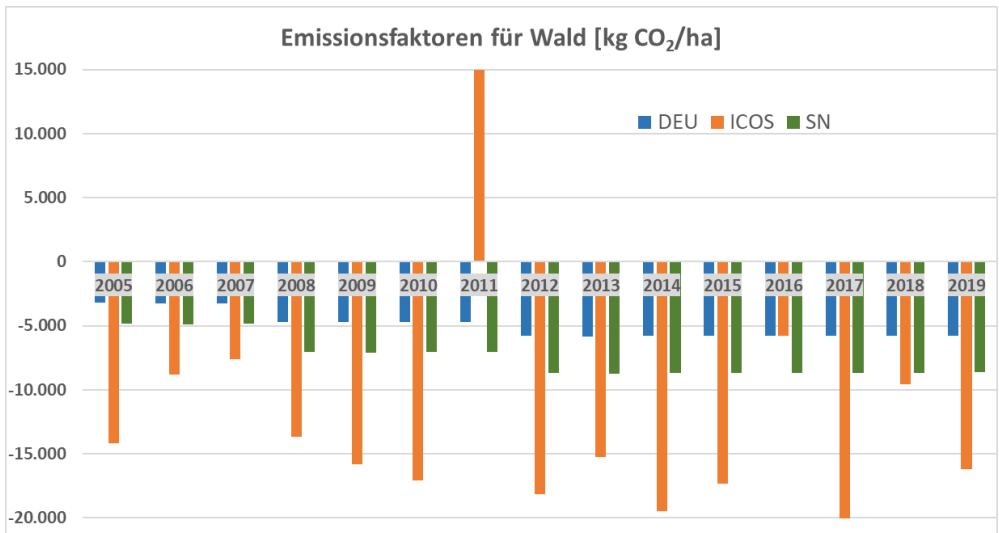
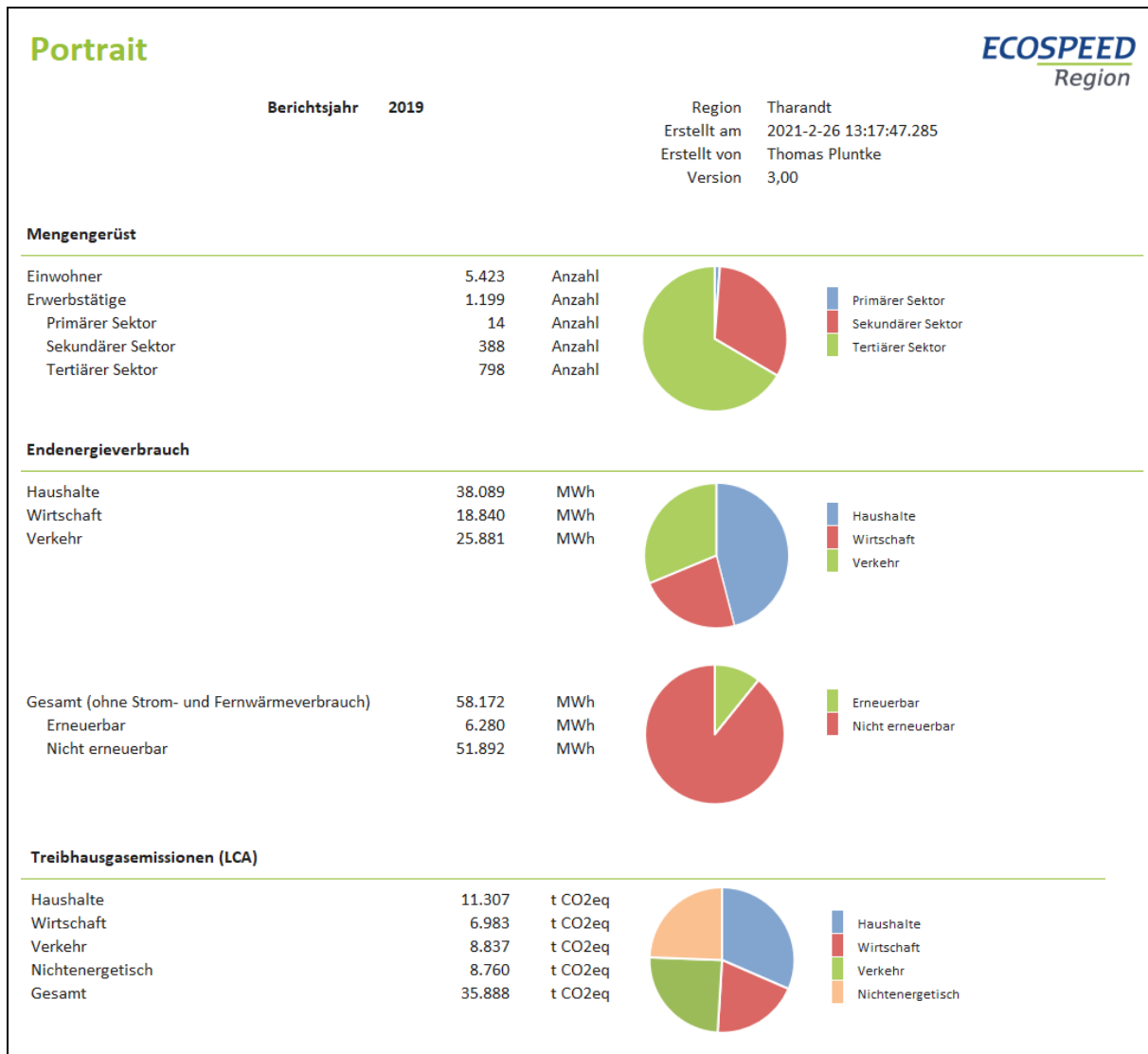


Abbildung 5: Vergleich der Emissionsfaktoren für Wald, Grünland und Ackerland für Deutschland (DEU), Sachsen (SN) und den ICOS-Standort.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

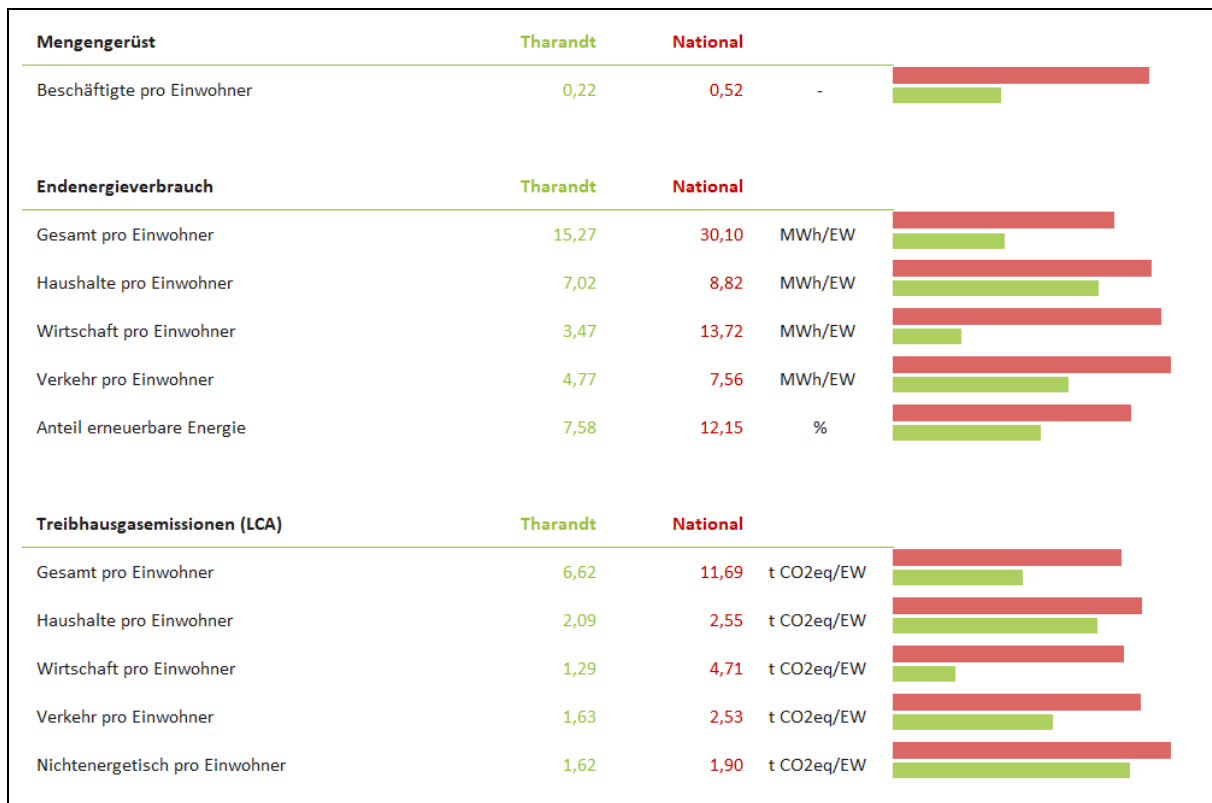
Die Ergebnisse der BSKO-Startbilanz zeigen exemplarisch für das Jahr 2019, dass in Tharandt nahezu 50 % der Endenergie in Haushalten genutzt wird, 23 % in der Wirtschaft und 31 % im Verkehr (berechnet aus den absoluten Werten in Abbildung 6). Auf Haushalte entfallen damit 32 % der THG-Emissionen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten), auf die Wirtschaft 19 % und den Verkehr 25 %. Die restlichen 24 % entfallen auf die nicht-energetischen Emissionen. Dazu gehören Emissionen aus der Landwirtschaft (Viehhaltung und Düngung), aus industriellen Prozessen, aus Abwasser und Abfall sowie flüchtige Emissionen.



**Abbildung 6: ECOSPEED-Bericht zum Mengengerüst, dem Endenergieverbrauch und den THG-Emissionen in Tharandt für das Jahr 2019.**

Der Vergleich mit Deutschland zeigt (Abbildung 7), dass es aufgrund des geringeren Wirtschaftsanteils deutlich weniger Beschäftigte in Tharandt gibt und der Energieverbrauch sowie die THG-Emissionen deshalb deutlich unter dem deutschen Durchschnitt liegen. Die Jahreswerte der energetischen Emissionen zwischen 2008 und 2019 unterliegen dabei nur geringen

Schwankungen (Abbildung 8, oben). Lediglich die THG-Emissionen der Haushalte sind rückläufig – bedingt durch energetische Sanierungen, energetisch günstigere Neubauten und einen sich mit der Zeit verbessernden Emissionsfaktor für den Strommix Deutschland. Die nicht-energetischen Emissionen sind in der Summe deutlich geringer (Abbildung 8, unten) und werden von Emissionen aus der Landwirtschaft dominiert. Lediglich bei den Emissionen von Abwasser und Abfall ist ein abnehmender Trend erkennbar.

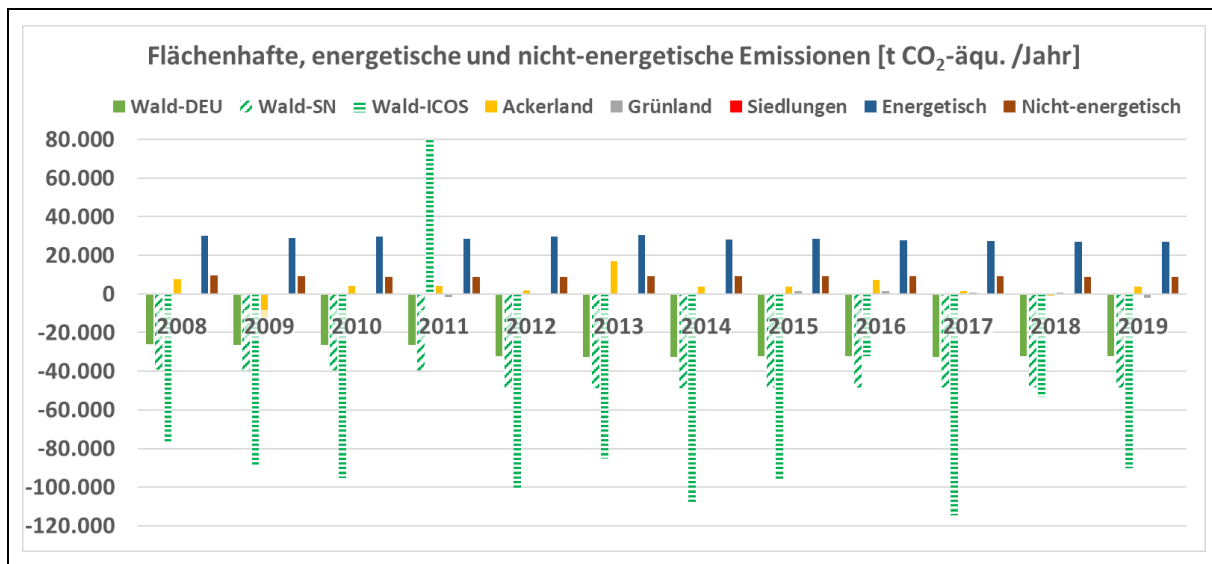


**Abbildung 7: ECOSPEED-Bericht: Vergleich des Mengengerüsts, des Endenergieverbrauchs und der THG-Emissionen in Deutschland und Tharandt für das Jahr 2019**

Obwohl die flächenhaften Emissionen nicht für die Bilanzierung nach dem BSKO-Standard genutzt werden, berechnet das Programm ECOSPEED diese. In Abbildung 9 werden summarisch die jährlichen energetischen und nicht-energetischen THG-Emissionen den flächenhaften THG-Emissionen gegenübergestellt. Ackerland, Grünland und Siedlungen stellen i.d.R. eine THG-Quelle dar, die zum einen durch die Ackerlandemissionen dominiert ist und zum anderen insgesamt geringer ist als die energetischen und nicht-energetischen Emissionen. In Einzeljahren können die Emissionen aus Ackerland, Grünland und Siedlungen auch negativ sein, d.h. CO<sub>2</sub> wird gebunden: Winterungen (Wintergerste in 2009) binden netto mehr CO<sub>2</sub> als Sommerungen (Sommergerste in 2013), weil die Phase der C-Bindung auf Grund der phänologischen Entwicklung zu Lasten der Brachzeit verlängert ist. Deswegen sollten für die Bewertung der C-Bilanz von Ackerland gesamte Fruchtfolgen herangezogen werden.



**Abbildung 8: Emissionen der Gemeinde Tharandt berechnet mit ECOSPEED: Oben: Energetische Emissionen, Unten: nicht-energetische Emissionen basierend auf den Emissionsfaktoren des nationalen Inventarberichts.**



**Abbildung 9: Flächenhafte, energetische und nicht-energetische Emissionen der Gemeinde Tharandt berechnet mit ECOSPEED. Flächenhafte Emissionen für den Wald berechnet mit nationalen (DEU), sächsischen (SN) und lokalen (ICOS) Emissionsfaktoren, für Grün- und Ackerland mit ICOS Emissionsfaktoren.**

Prägend für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Gemeinde ist der Tharandter Wald, der eine enorme CO<sub>2</sub>-Senke darstellt (Abbildung 9). Nimmt man für den Tharandter Wald den deutschen Emissionsfaktor an (DEU), so gleicht diese THG-Senke etwa 73 % der THG-Quellen aus (Mittelwert 2008-2019, siehe Tabelle 4). Bei Verwendung der Emissionsfaktoren des sächsischen Waldes (SN) könnten etwa 10 % mehr THG gebunden werden als Tharandt emittiert. Wendet man die ICOS-Emissionsfaktoren an, könnten sogar 72 % mehr THG gebunden werden.

**Tabelle 4: Mittelwerte der Emissionen für Tharandt für 2008-2019, berechnet mit ECOSPEED Region. Die flächenhaften Emissionen für Wald wurden mit drei Emissionsfaktoren gerechnet. Die rechte Spalte ist das Verhältnis zwischen der Emission des Waldes (THG-Senke) und den übrigen Emissionen (alle THG-Quellen)**

	(t CO <sub>2</sub> -äquiv. a <sup>-1</sup> )	Senke/Quelle (%)
Energetische Emissionen	28.634	
Nicht-Energetische Emissionen	9.036	
Flächenhafte Emissionen (Acker-, Grünland, Siedlung)	3.810	
Flächenhafte Emissionen (Wald - DEU)	-30.332	73
Flächenhafte Emissionen (Wald - SN)	-45.500	110
Flächenhafte Emissionen (Wald - ICOS)	-71.584	172

Die ICOS Messungen repräsentieren nur einen kleinen Teil des Tharandter Waldes, zeigen aber die Bedeutung des Forstmanagements für die CO<sub>2</sub>-Bindung. In 2011 und 2016 fanden Durchforstungen des Bestandes statt. Dadurch wurde der lokale Bestand 2011 zu einer großen CO<sub>2</sub>-



Quelle (in der Annahme, dass das exportierte Holz zu kurzlebigen Holzprodukten verarbeitet und nicht zur Substitution fossiler Energieträger verwendet wird) und 2016 war die CO<sub>2</sub>-Senkenleistung reduziert (Abbildung 9). Auch das extreme Trockenjahr 2018 fällt durch eine geringere CO<sub>2</sub>-Senkenleistung auf. Aus Sicht der CO<sub>2</sub>-Bindung in Wäldern ist eine schonende Bewirtschaftung (keine großflächigen Einschläge und Störungen der Humusaufgabe, Optimierung des mittleren Bestandesalters) sowie der Umbau zu robusten Mischwäldern, die klimatischen Extremen besser standhalten, sinnvoll.

Der Wald in unmittelbarer Umgebung des ICOS-Standortes (sogenannte Quellfläche) unterlag im Vergleich zum Tharandter Wald weniger stark den Witterungsextremen der letzten Jahre (Trockenheit, Hitze Stürme) sowie dem Borkenkäferbefall. Damit waren auch weniger Neuanpflanzungen nötig. Die ICOS-Messungen repräsentieren die CO<sub>2</sub>-Senkenleistung eines ca. 100-jährigen Waldes und entsprechen somit nicht vollständig der Senkenleistung des ca. 60-jährigen Tharandter Waldes. Wie die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Neuanpflanzungen bzw. jungen Wäldern ausfällt, belegen exemplarisch EC-Messungen am Standort Hetzdorf. Nach einem Windbruch 2007 wurden an diesem Standort im Tharandter Wald Neuanpflanzungen hauptsächlich mit Eichen vorgenommen. In den ersten 10 Jahren war dieses gestörte Ökosystem eine CO<sub>2</sub>-Quelle, etwa in der Größenordnung der CO<sub>2</sub>-Senke des 100-jährigen Fichtenwaldes. Erst ab einem Bestandesalter von 10 Jahren wurde dieser Eichenbestand zu einer CO<sub>2</sub>-Senke, wie jüngste Messungen (2018-2020) belegen.

Ist man an einem mittleren Emissionsfaktor für den gesamten Tharandter Wald interessiert, müsste der am ICOS-Standort gemessene Wert von  $-2,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Mittel 2002-2017, vgl. Tabelle 2) vergrößert werden und sich somit dem SN-Wert annähern ( $-2,1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). Für eine detailliertere Abschätzung der Emissionen des gesamten Tharandter Waldes wären Angaben zur Flächenverteilung der verschiedenen Baumarten (auch Kiefer und Buche) und deren Altersklassen nötig, die derzeit nicht detailliert vorliegen.

Das Beispiel Tharandt zeigt, welche Relationen zwischen den THG-Emissionen und dem Senkenpotential des Waldes liegen. Nimmt man die sächsischen Emissionsfaktoren (SN) für den Tharandter Wald, würde der gesamte Tharandter Wald (78 % der Gemeindefläche) benötigt, um eine lokal ausgeglichene CO<sub>2</sub>-Bilanz zu erreichen. Im Vergleich dazu beträgt der Waldanteil in Sachsen nur 28 %. Damit können ca. 13 % der sächsischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (48 Mt CO<sub>2</sub> im Jahr 2012) wieder durch den C-Vorrat im Wald und langfristige Holzprodukte gebunden werden (Staatsbetrieb Sachsenforst 2017, Schreiber 2015). Der Wald kann demzufolge nur einen begrenzten Beitrag zu einer klimaneutralen Gesellschaft leisten. Trotzdem ist dieser Beitrag relevant, da es die bedeutendste, natürliche Möglichkeit ist, atmosphärisches CO<sub>2</sub> wieder festzulegen.

Zur Reduktion von THG-Emissionen sind enorme Kraftanstrengungen in den Kommunen nötig, die sich in erster Linie auf die Reduktionen der energetischen Emissionen (Strom, Wärme, Verkehr) konzentrieren sollten, da sie den größten Anteil darstellen. Für eine gesellschaftlich ak-

zeptierte Klimawende kann eine klimakonforme Landwirtschaft dennoch einen wesentlichen Beitrag leisten. Aus Landes-, nationaler und globaler Sicht spielt die CO<sub>2</sub>-Senke Wald eine große Rolle (Global Carbon Project 2020). Global werden 31 % der anthropogen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen in terrestrischen Ökosystemen gebunden. Deshalb sind Anstrengungen zur Stabilisierung dieser Senken nötig. Das Beispiel von Tharandt zeigt die Größenordnung dieser Senke und hat daher Anschauungscharakter. Weiterhin gewinnen Wälder (auch flächenmäßig kleinere Stadtwälder) zunehmend an Bedeutung, da sie neben der Kohlenstoffbindung, der Substitution von fossilen Energieträgern und energieaufwendigen Materialien auch vielfältige Ökosystemleistungen (vgl. Kapitel 1) aufweisen, die u.a. einen wichtigen Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel liefern.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Software *ECOSPEED Region* wurde genutzt, um den Einfluss des Tharandter Waldes und seiner Bewirtschaftung auf die THG-Bilanz der Gemeinde Tharandt aufzuzeigen. Dazu wurde die Startbilanz nach dem vereinheitlichten, für Kommunen vorgesehenen BSKO Standard für Tharandt gerechnet, d.h. das Mengengerüst wurde aus nationalen Statistiken abgeleitet und für diese Studie nicht genauer spezifiziert. Ergänzt wurde die BSKO-Bilanz durch die flächenhaften THG-Emissionen, die auf Grünland, Ackerland, im Wald und in Siedlungen anfallen. Diese sind standardmäßig nicht in der BSKO-Bilanz enthalten, werden jedoch nachrichtlich durch die Software *ECOSPEED Region* bereitgestellt.

Bei der Bilanzierung haben wir den Einfluss unterschiedlicher Emissionsfaktoren auf die Emissionen von Wald verglichen. Es wurden drei Varianten gerechnet – mit deutschlandweit gültigen und sächsischen Emissionsfaktoren sowie Emissionsfaktoren für einen ICOS-Standort im Tharandter Wald. Für Grün- und Ackerland wurden ebenfalls die Emissionsfaktoren von benachbarten ICOS-Messstationen verwendet.

Die Verwendung der unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Wald führt zu deutlichen Unterschieden in der THG-Senkenleistung des Tharandter Waldes. Die für Deutschland abgeleiteten Emissionsfaktoren resultieren in einer wesentlich geringeren Senkenleistung als die für Sachsen abgeleiteten Faktoren. Die Verwendung von regional typischen Faktoren ermöglicht somit eine realere Abbildung des lokalen C-Austauschs zwischen Wald, Grün- und Ackerland mit der Atmosphäre. Die im Tharandter Wald durch hochaufgelöste EC-Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren bestätigen die sächsischen Faktoren, zeigen aber gleichzeitig die hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf. Sie ermöglichen weiterhin die Auswirkungen von Störungen (verursacht durch lokale klimatische Extrembedingungen) und von verschiedenen Managementsystemen des Waldes auf den C-Austausch zu analysieren. Beispiele sind die Schwankungen der C-Bindung des Waldes als Ergebnis von Holzexporten (z.B. durch Kahlschlag), Trockenheit, Hitze, Borkenkäferbefall oder des Verlustes von Beständen aufgrund von Stürmen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wie wichtig die Altersstruktur und eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder für die C-Bindung ist. Seit vielen Jahren steht der Umbau zu robusten Wäldern, die an die aktuellen und zukünftigen klimatischen Bedingungen mit zunehmenden Extremen angepasst sind, im Fokus der Behörden und Besitzer (z.B. Staatsbetrieb Sachsenforst 2019). Für den Ausbau bzw. den Erhalt des Kohlenstoffspeichers Wald erweisen sich hierbei viele schon in Angriff genommene Maßnahmen als günstig:

- Herstellung eines standortgerechten Kulturwaldes (Arten- und Altersmix, entsprechende Raumstruktur)
- Optimierung der Umtriebszeit der Wälder, um einerseits eine stetige C-Aufnahme und andererseits einen hohen C-Vorrat zu gewährleisten
- Optimierung von Durchforstungen ohne großflächige Einschläge

- keine Vollbaumnutzung damit Äste und Zweige als Nährstoffe im Wald verbleiben (wird in Sachsen praktiziert)
- Optimierung von Düngungen, um übermäßigen Humusabbau, Lachgasemissionen und Nitratauswaschungen zu verhindern
- Bodenschutzmaßnahmen zur Verhinderung der Freisetzung von Kohlenstoff (Verhinderung von Kahlschlägen und Bodenerosion) sowie Einsatz bodenschonender Technik
- Schutz von Moorböden, da trockengefallene Moore viel CO<sub>2</sub> emittieren

Ergänzend setzt ein nachhaltiges Holznutzungsmanagement auf eine stetige, regionale Holznutzung und ist ein weiterer wichtiger Schritt zur Reduktion des atmosphärischen CO<sub>2</sub>. Hochwertiges Holz ermöglicht eine Verarbeitung zu langlebigen Produkten (Möbel, Bau) und somit die Substitution von energieintensiven Materialien wie Stahl oder Beton. Entsprechend des sogenannten Kaskadenmodells folgt der stofflichen Nutzung die energetische Nutzung (grüner Energieträger). Eine direkte energetische Nutzung sollte sich auf Holzsortimente beschränken, die stofflich nicht wirtschaftlich genutzt werden können (Walz et al. 2010).

Die Landnutzungsanteile einer Kommune sind das Resultat vielfältiger naturräumlicher und historischer Entwicklungen. Daher ist es nicht sinnvoll, die flächenhaften CO<sub>2</sub>-Emissionen für einen Vergleich der THG-Bilanzen zwischen den Kommunen heranzuziehen. Für die nationale und globale THG-Bilanz sind diese jedoch von großer Bedeutung, insbesondere wegen der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung der Wälder. Die Waldbesitzer, also u.a. auch Kommunen, haben es in der Hand, einen Beitrag zur C-Speicherung in ihren Wäldern zu leisten. Eine entsprechende Bewirtschaftung der Wälder widerspricht jedoch den ökonomischen Interessen der Waldbesitzer und Forstwirte. Um Ökosystemdienstleistungen, wie z.B. die C-Speicherung, für die Forstwirte attraktiv zu machen, sollten Ausgleichszahlungen getätigt werden, die den erhöhten Aufwand im Forstmanagement bzw. verminderte Einnahmen kompensieren.

Im urbanen Umfeld können Stadtwälder, Alleen und auch Einzelbäume über die CO<sub>2</sub>-Bindung hinaus einen wichtigen Beitrag zur Klimaanpassung leisten, z.B. durch eine Verminderung der sommerlichen Überhitzung oder eine Reduktion von Oberflächenabflüssen bei Starkniederschlägen.

Auch in der Landwirtschaft könnte eine klimakonforme Landbewirtschaftung zu einer verbesserten C-Bilanz führen. Anstrengungen werden in Sachsen seit vielen Jahren unternommen (SMUL 2009), wie zum Beispiel eine zunehmende konservierende Bodenbearbeitung, der Anbau von Zwischenfrüchten sowie eine Begrünung vor dem Anbau von Mais. Der Vorteil einer klimakonformen Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen ist die schnellere Umsetzbarkeit und Wirksamkeit.

Zusätzlich zur vergleichbaren, standardisierten kommunalen Bilanz empfehlen wir stets eine Ausweisung der flächenhaften Emissionen, um eine klimakonforme Landbewirtschaftung zu fördern und deren Auswirkungen sichtbar zu machen. Dafür wäre die Möglichkeit einer genaueren Differenzierung der Landnutzungsformen, z.B. nach Management, Arten- und Alters-

struktur des Waldes, notwendig sowie das entsprechende Angebot verschiedener Emissionsfaktoren, abhängig von der räumlichen Skala (lokal, regional, national). Diese Emissionsfaktoren können auf Grundlage von Inventurdaten und direkten Messungen der THG-Flüsse, wie zum Beispiel die ICOS-Messungen, ermittelt werden.

Für Grünland wird eine Differenzierung der Emissionsfaktoren für mineralische und organische Böden empfohlen. Lokal kann dies darüber entscheiden, ob das Grünland als CO<sub>2</sub>-Quelle fungiert oder CO<sub>2</sub> neutral ist.

## 7 Literatur

- Grünwald T (2019): Istanalyse C-Bindung Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, 46 S., (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32640>).
- Fritsche U, Rausch L, Simon K-H (1989): Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen, Endbericht zur GEMIS-Version 1, im Auftrag des hessischen Ministers für Wirtschaft und Technik, Darmstadt/Kassel, ([http://www.iinas.org/tl\\_files/iinas/downloads/GEMIS/1989\\_g1\\_bericht.pdf](http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/1989_g1_bericht.pdf)).
- Grünwald T, Schmidt-Cotta C, Kalbitz K, Bernhofer C (2020): Kohlenstoffbindung in Böden, C-Speicherung und -Freisetzung aus Böden unter landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung. Bericht zu F&E Bericht des LfULG Sachsen.
- ifeu (2014): Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland, ([https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Bilanzierungsmethodik\\_IFEU\\_April\\_2014.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Bilanzierungsmethodik_IFEU_April_2014.pdf)).
- ifeu (2019): BSKO Bilanzierungs-Systematik Kommunal, Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland, Kurzfassung ([https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BSKO\\_Methodenpapier\\_kurz\\_ifeu\\_Nov19.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BSKO_Methodenpapier_kurz_ifeu_Nov19.pdf)).
- IPCC (2000): Land Use, Land-Use Change, and Forestry, Cambridge University Press, UK. pp 375.
- Service- und Kompetenzzentrum: Kommunaler Klimaschutz (2018): Fokus: Energie- und Treibhausgasbilanzierung in Kommunen, (<https://difu.de/publikationen/2018/fokus-energie-und-treibhausgasbilanzierung-in-kommunen>).
- Schreiber U (2015): Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen in Sachsen, Jahresbericht 2012. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Schulze ED, Körner C (2012): Nettoprimärproduktion und Bioenergie. In Leopoldina (Ed.), Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen. Berlin: Deutsche Akademie der Naturforscher der Leopoldina, pp. 90-101.
- SMUL (2009): Klimawandel und Landwirtschaft - Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel, Schriftenreihe des LFULG, [file:///C:/Users/TP/App-Data/Local/Temp/Klimawandel\\_Landwirtsch\\_ANSICHT\\_Endfassung.pdf](file:///C:/Users/TP/App-Data/Local/Temp/Klimawandel_Landwirtsch_ANSICHT_Endfassung.pdf)
- Staatsbetrieb Sachsenforst (2017): Die Kohlenstoffbilanz des sächsischen Waldes 2002-2012. Entwurf.
- Staatsbetrieb Sachsenforst (2019): Die Kohlenstoffbilanz des sächsischen Waldes 2002-2012. Kurzfassung, (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34682>)

UBA (2020): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission, Climate Change 22/2020, (<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>).

Walz A, Taverna R, Stöckli V (2010): Holz nutzen ist wirksamer als Vorräte anhäufen. Effektiver Klimaschutz durch den Wald. Wald Holz 91/4, S. 37-40.