

Die Ökosystemleistungen des „Urbanen Forsts“: Flächenendeckende Modellierung mittels Fernerkundung und künstlicher Intelligenz



Abschlussbericht

Projektkoordinator

Dr. Klaus MARTIN / Sachverständigenbüro für Luftbildauswertung und Umweltfragen (SLU) (KMU)

Dr. Klaus Martin (klaus.martin@slu-web.de), Tel. 089-851663
Kohlsteiner Straße 5, 81243 München

Kooperationspartner

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München (TUM)

Prof. Dr. Thomas Rötzer (thomas.roetzer@tum.de), Tel. 08161-714667
Hans-Carl-v.-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising

Lehrstuhl für Fernerkundung, Universität Würzburg

Prof. Dr. Hannes Taubenböck (hannes.taubenboeck@uni-wuerzburg.de), Tel. 08153-282480
John-Skilton-Str. 4a, 97074 Würzburg

Lehrstuhl für Strategie und Management in der Landschaftsentwicklung, Technische Universität München (TUM) (assoziiierter Partner ohne eigenes Budget)

Prof. Dr. Stephan Pauleit (pauleit@tum.de), Tel. 08161-714780
Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Deutsches Zentrum für Luft- & Raumfahrt (DLR) e.V. (assoziiierter Partner ohne eigenes Budget)

Dr. Tobias Leichtle (tobias.leichtle@dlr.de), Tel. 08153-283461
Münchener Straße 20, 82234 Weßling

Baureferat Gartenbau, Landeshauptstadt München (Praxispartner ohne eigenes Budget)

Frau Gudrun Kloos
Friedenstraße 40, 81660 München

DBU-Aktenzeichen

37076/01

Projektlaufzeit

01.12.2021-28.02.2025

Kurzfassung

Stadtbäume spielen bei der Klimaanpassung urbaner Räume eine entscheidende Rolle, indem sie Ökosystemleistungen wie Kühlung, Beschattung, Kohlenstoffspeicherung und Biodiversitätsförderung erbringen. Bislang fehlen jedoch detaillierte, flächendeckende Daten zu Wachstum und Leistungsfähigkeit einzelner Bäume auf Stadtebene, was eine gezielte Planung und nachhaltiges Management erschweren.

In diesem Projekt wurde ein innovativer Ansatz entwickelt, um das Wachstum und die Ökosystemleistungen von Stadtbäumen in Mitteleuropa systematisch zu erfassen und zu modellieren. Dazu wurden Einzelbaumdaten aus Feldmessungen von 460 Bäumen in München mit hochauflösenden Fernerkundungsdaten sowie Informationen aus dem städtischen Baumkataster kombiniert. Diese Datengrundlage diente der Kalibrierung eines KI-gestützten Klassifikationsverfahrens, das eine automatische Detektion und Erkennung der Gattung von Bäumen ermöglichte. Auf dieser Basis konnten über 160.000 Einzelbäume in einem 44 km² Teil des Münchner Stadtgebiets erfasst und kategorisiert werden.

Anschließend wurden die Ökosystemleistungen der Bäume mit dem prozessbasierten Modell „CityTree“ simuliert. Der Abgleich zwischen in-situ-Messungen und fernerkundungsbasierten Parametern zeigte eine hohe Übereinstimmung, wobei geringfügige Abweichungen – etwa eine leichte Unterschätzung der Baumhöhe in den Fernerkundungsdaten – festgestellt wurden. Die Modellierung ergab, dass öffentliche Bäume, insbesondere in Erholungsflächen, den größten Beitrag zu den Ökosystemleistungen (61–66 %) leisteten, während private Bäume mit über 33 % ebenfalls signifikante Leistungen erbrachten, vor allem in den Bereichen Beschattung und Reduzierung von Oberflächenabfluss.

Die Projektergebnisse wurden in Form von thematischen Karten aufbereitet, die die räumliche Verteilung der Ökosystemleistungen wie Biomasseproduktion, CO₂-Speicherung und Kühlwirkung visualisieren. Zudem wurde ein webbasiertes Dashboard entwickelt, das die gewonnenen Daten für kommunale Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit zugänglich macht. Dieses Tool ermöglicht eine datengestützte Planung von städtischen Grünflächen und unterstützt die Entwicklung klimaangepasster Strategien.

Die im Projekt angewandten Methoden sind nicht nur auf München beschränkt, sondern lassen sich aufgrund der verwendeten Fernerkundungsdaten und automatisierten Verfahren auch auf andere Städte übertragen. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung und zur Verbesserung der urbanen Lebensqualität im Kontext des Klimawandels.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
1. Einleitung	4
1.1. Problemstellung	4
1.2. Ziele	4
1.3. Projektdurchführung (Überblick der Arbeitspakete)	4
1.4. Zeitplan	6
2. Forschungsdesign	6
2.1. Datengrundlagen	6
2.2. Methoden	7
2.2.1. Erkennung einzelner Bäume und Erfassung der Baumdimensionen	7
2.2.2. Baumgattungsklassifikation und standortspezifische Parameter	7
2.2.3. Modellierung der Ökosystemleistungen mit „CityTree“	8
3. Ergebnisse	8
3.1. In-situ Erfassung von Bäumen	8
3.2. Kartierung von Einzelbäumen, Baumarten und Baumparametern	9
3.3. Modellierung der Ökosystemleistungen (ÖLS)	10
3.4. Extrapolation und Modellierung der ÖSL	10
3.5. Projekttreffen	14
4. Ergebnisverbreitung und -verwertung	15
4.1. Beitrag zu einem Buchkapitel	15
4.2. Vorträge	15
4.3. Wirtschaftliche Verwertung	16
4.4. Links zu Meetings und Tagungsbeiträgen	16
5. Datenquellen	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Fernerkundungsbasierte Baumklassifikation	9
Abbildung 2. Vergleich der mit Baumdaten aus verschiedenen Datenquellen eingeschätzten Ökosystemleistungen.....	10
Abbildung 3. Räumliche Verteilung von Ökosystemleistungen.....	12
Abbildung 4. Vergleich der mit Baumdaten aus verschiedenen Datenquellen geschätzten Ökosystemleistungen.....	13
Abbildung 5. Visualisierungs-Dashboard.....	14

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Städtische Bäume erbringen eine Vielzahl von Ökosystemleistungen (ÖSL). Diese tragen zur Verbesserung des Stadtklimas, zur Erhöhung der Biodiversität und zur Steigerung der Lebensqualität bei. Trotz der wachsenden Bedeutung dieser Leistungen für eine nachhaltige Stadtentwicklung fehlen den kommunalen Entscheidungsträgern bislang flächendeckende und aktuelle Informationen über den Baumbestand auf Einzelbaumebene. Vorhandene Baumkataster sind in der Regel auf öffentlich verwaltete Flächen beschränkt und erfassen keine privaten Bäume, obwohl diese einen erheblichen Anteil am gesamten Baumbestand in Städten ausmachen können.

Die Erhebung dieser Daten ist bisher sehr ressourcenintensiv, da die Einzelbäume manuell erfasst werden und der Datenbestand kontinuierlich aktualisiert und gepflegt werden muss. Dadurch fehlen vielen Städten belastbare und aktuelle Daten zur Anzahl, Art und Struktur von Stadtbäumen sowie zu deren Beitrag zu ÖSL. Zwar existieren leistungsfähige Modelle zur Bewertung dieser Leistungen, doch deren Aussagekraft ist stark begrenzt, wenn die zugrundeliegenden Einzelbaumdaten nicht verfügbar sind.

Diese unzureichende Datenlage erschwert die strategische Planung und Umsetzung effektiver Maßnahmen zur Stadtbegrünung, Klimaanpassung und Flächenentwicklung erheblich. Eine belastbare, objektive und möglichst automatisiert aktualisierbare Datengrundlage ist daher eine zentrale Voraussetzung für Stadtbegrünung, Klimaanpassung und Flächenplanung.

1.2. Ziele

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines innovativen, skalierbaren und übertragbaren Modells zur flächendeckenden Abschätzung der ÖSL von Stadtbäumen auf Basis hochaufgelöster Fernerkundungsdaten. Damit leistet das Projekt einen konkreten Beitrag zur strategischen Planung und zum Management urbaner Gehölzbestände im Sinne einer nachhaltigen grünen Infrastruktur. Die angestrebten Modellierungen und Datengrundlagen sollen maßgeblich zur Verbesserung stadtklimatischer und stadthydrologischer Bedingungen beitragen – insbesondere durch thermische Entlastung, Reduktion von Regenwasserabfluss und Speicherung von Kohlenstoff. Das Projekt liefert am Beispiel der Stadt München einen praxisnahen Beitrag zur Klimawandelanpassung, wobei die entwickelten, weitgehend automatisierten Methoden aufgrund ihrer Datenbasis gut auf andere Städte übertragbar sind. Als Ergebnis entsteht ein methodisches Instrumentarium aus Algorithmen und Modellen zur quantitativen Erfassung und Charakterisierung der ÖSL von Stadtbäumen.

1.3. Projektdurchführung (Überblick der Arbeitspakete)

AP1: In-situ Erfassung von Baumarten und deren Wuchsleistungen

In diesem Arbeitspaket werden rund 500 Einzelbäume in München durch terrestrische Vor-Ort Begehung und Vermessung erfasst, welche die häufigsten Stadtbaumarten an verschiedenen Standorten (Straßen, Plätze, Parks) repräsentieren. Neben Messungen wie Stammdurchmesser,

Baumhöhe, Kronenstruktur und Blattflächenindex wird auch die Umgebung der Bäume dokumentiert. Ziel ist die Erstellung eines umfangreichen Datenpools mit strukturellen und standörtlichen Referenzdaten der häufigsten Stadtbaumarten in München, der durch frühere Datensätze ergänzt wird.

AP2: Modellierung der ÖSL von einzelnen Baumarten

Basierend auf den in AP1 erfassten Referenzdaten werden Baumwachstum, Strukturveränderungen und ÖSL unter Berücksichtigung von Art, Alter und Standortbedingungen mit dem Modell CityTree simuliert. Neue Baumarten werden parametrisiert, um die Modellabdeckung zu erhöhen. Das Modell berücksichtigt klimatische und standörtliche Einflussfaktoren und simuliert u. a. Biomasseaufbau, Kohlenstoffbindung, Wasserverbrauch und Kühlleistung. Die Ergebnisse werden baumindividuell gespeichert und stehen für nachfolgende APs zur Verfügung.

AP3: Flächendeckende Kartierung von Einzelbäumen, Baumarten und Baumparametern aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten

In AP3 wird eine KI-gestützte Methodik zur flächendeckenden Erfassung von Einzelbäumen, Baumarten sowie strukturellen und standortbezogenen Baumparametern aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten entwickelt. Zum Einsatz kommen optische Luft- und Satellitenbilder sowie digitale Höhendaten. Auf Basis punktgenauer Referenzdaten aus AP1 und Baumkataster werden Deep-Learning-Modelle trainiert, die anschließend auf große Stadtgebiete übertragen werden. Zusätzlich werden Umweltparameter wie Versiegelungsgrad und SkyView-Faktor automatisiert extrahiert. Ziel ist ein robustes Verfahren zur detaillierten Charakterisierung von Stadtbäumen.

AP4: Extrapolation und Modellierung der ÖSL auf repräsentative Stadtquartiere

In AP4 werden die aus vorherigen Arbeitspaketen gewonnenen Informationen auf Quartiersebene skaliert. Dazu werden auch nicht direkt messbare Parameter wie das Baumalter approximiert, etwa durch die Einteilung in Altersklassen basierend auf der Baumhöhe. Die Modellierung nutzt fernerkundlich gewonnene Baum- und Standortparameter und wird durch in-situ-Daten validiert. Ziel ist die flächendeckende Berechnung der Ökosystemleistungen (ÖSL) von Stadtbäumen in repräsentativen Münchner Stadtquartieren.

AP5: Bewertung der ÖSL von Stadtbäumen unter besonderer Berücksichtigung zukünftiger klimawandelbedingter Veränderungen

AP5 analysiert die Wirkung und Wirksamkeit von ÖSL städtischer Bäume unter Annahme zukünftiger klimatischer Veränderungen am Beispiel Münchens. Ziel ist die Entwicklung und Bewertung konkreter, praxisnaher Anpassungsstrategien zum Klimawandel. Damit wird die Relevanz städtischer Bäume als Klimaanpassungsmaßnahme unterstrichen.

1.4. Zeitplan

AP	Bezeichnung	2021	2022				2023				2024				2025
		IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
1	In-situ Erfassung von Baumarten														
2	Modellierung der ÖLS von Baumarten														
3	Kartierung von Einzelbäumen														
4	Extrapolation und Modellierung der ÖSL														
5	Bewertung der ÖSL von Stadtbäumen														

2. Forschungsdesign

2.1. Datengrundlagen

Die Analyse basierte auf einer Kombination aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten, terrestrischen In-situ-Messungen und ergänzenden Geodatenprodukten. Zur Detektion und Abgrenzung von Einzelbäumen wurden Luftbilder mit einer Bodenauflösung von 10 cm sowie ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDSM = Differenzmodell aus einem Digitalen Geländemodell und einem Digitalen Oberflächenmodell, das eine Ermittlung der relativen Objekthöhe über der als Ebene abgebildeten Geländeoberfläche erlaubt) verwendet, das mittels photogrammetrischer Verfahren abgeleitet wurde (d'Angelo & Kurz, 2019). Für die Klassifikation von Baumgattungen kamen multi-temporale Satellitenbilder der WorldView-Mission aus den Jahren 2019 (WV-3) und 2021 (WV-2) zum Einsatz. Diese kommerziellen Satellitendaten verfügen über eine panchromatische Auflösung von bis zu 0,31 m und multispektrale Kanäle mit bis zu acht Spektralbändern, darunter red-edge und nahinfrarote Wellenlängen. Alle Fernerkundungsdaten wurden während der belaubten Vegetationsperiode aufgenommen: August 2017 (Luftbilder, nDSM), Juli 2019 (WV-3) und September 2021 (WV-2). Die Luftbilder sowie das nDSM wurden von der Landeshauptstadt München zur Verfügung gestellt, die Satellitendaten stellte European Space Imaging (EUSI, www.euspaceimaging.com) bereit. Alle Datensätze wurden für Forschungszwecke kostenfrei überlassen.

Zur Kalibrierung und Validierung standen In-situ-Daten von 460 Einzelbäumen im Münchner Stadtgebiet zur Verfügung. Diese umfassen präzise terrestrische Messungen von Baumhöhe, Kronenradius, Kronenlänge und Brusthöhendurchmesser (BHD) sowie eine Bestimmung der Baumarten und der Standorte mit GPS-Geräten. Ergänzend konnte auf Bauminformationen zu ca. 78.300 Einzelbäumen auf öffentlichen Flächen innerhalb des Mittleren Rings der Stadt München zurückgegriffen. Neben Lage und Gattung sind dort auch Vitalität sowie strukturelle Merkmale wie Höhe, Kronenausdehnung und Stammdurchmesser erfasst. Zu den häufigsten Arten zählen Spitzahorn (*Acer platanoides*), Winterlinde (*Tilia cordata*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*), die zusammen mehr als die Hälfte des städtischen Baumbestandes dort ausmachen.

Zur Einordnung der Standortbedingungen wurden weitere Geodaten integriert, darunter Gebäudegrundrisse aus OpenStreetMap (u.a. zur Filterung von begrünten Dachflächen) sowie

die „Tatsächliche Nutzung“ (Bayerisches Open Data Portal / ATKIS, 2023: <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=tatsaechlichenutzung>). Die Zusammenführung dieser vielfältigen Datenquellen ermöglichte eine umfassende raumbezogene Modellierung städtischer Baumstrukturen und ihrer Ökosystemleistungen.

2.2. Methoden

Die Methodik des vorliegenden Projekts gliedert sich in drei zentrale Arbeitsschritte:

- (1) Die Erkennung einzelner Bäume und Ableitung ihrer Dimensionen,
- (2) die Klassifikation der Baumgattungen sowie Erhebung standortspezifischer Parameter und
- (3) die modellgestützte Abschätzung der Ökosystemleistungen mittels des prozessbasierten Baumwachstumsmodells „CityTree“.

2.2.1. Erkennung einzelner Bäume und Erfassung der Baumdimensionen

Die Detektion und Abgrenzung einzelner Baumkronen erfolgte auf Basis hochauflösender Luftbilder und eines normalisierten nDSM nach dem Verfahren von Leichtle et al. (2021). Dabei wurde zunächst ein Canopy Height Model (CHM) generiert, indem das nDSM mit einem Vegetationsfilter auf Basis des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) kombiniert wurde. Im nächsten Schritt wurden baumhöhenabhängige lokale Maxima als Kronenzentren ermittelt. Diese dienten als Marker für eine Watershed-Segmentierung, durch die die individuelle Kronegeometrie extrahiert werden konnte.

Die Kronendurchmesser wurden durch Verdopplung des mittleren Radius berechnet, der sich aus den Distanzen zwischen Kronenzentrum und Kronenrand ergibt. Die Baumhöhe wurde als 90. Perzentil der Höhenwerte innerhalb jedes Kronensegments bestimmt. Auf Basis von allometrischen Gleichungen wurden daraus der Brusthöhendurchmesser (BHD) und die Kronenlänge abgeschätzt.

2.2.2. Baumgattungsklassifikation und standortspezifische Parameter

Die Baumgattungsklassifikation stützte sich auf die in Schritt (1) abgeleiteten Kronensegmente sowie auf bi-temporale multispektrale Satellitenbilder. Multispektrale Bänder, der Vegetationsindex NDVI und Höhenwerte des CHM wurden als Prädiktoren verwendet. Die Klassifikation erfolgte mit einem hierarchischen Random-Forest-Modell. Es wurden sechs Klassen unterschieden: Ahorn (Acer), Linde (Tilia), Robinie (Robinia), Rosskastanie (Aesculus), und Pappel (Populus). Diese Gattungen wurden ausgewählt, da sie in Mitteleuropa weit verbreitet sind und ihre Erkennbarkeit sich vorab mit unserer Methodik nachweisen ließ.

Neben den Baummerkmalen wurden zwei standortbezogene Parameter berücksichtigt, die als maßgebliche Einflussfaktoren auf Baumwachstum und Ökosystemleistungen gelten: Der Versiegelungsgrad und der Sky View Factor (SVF). Der SVF wurde an den Baumzentren auf Grundlage des nDSM mittels des SAGA-Toolbox-Moduls in QGIS berechnet. Mittelwerte des

Versiegelungsgrads je Landnutzungs-kategorie wurden berechnet und anschließend jeder Baumkrone entsprechend ihrer Lage zugewiesen.

Das Verfahren der Baumgattungsklassifikation wurde in einem wissenschaftlichen Paper aufbereitet und befindet sich derzeit bei der internationalen Fachzeitschrift "Urban Forestry & Urban Greening" (www.sciencedirect.com/journal/urban-forestry-and-urban-greening) in der Begutachtung.

2.2.3. Modellierung der Ökosystemleistungen mit „CityTree“

Zur Abschätzung der Ökosystemleistungen kam das Modell „CityTree“ (Rötzer et al., 2019) zum Einsatz. Es handelt sich um ein prozessorientiertes Wachstumsmodell für urbane Einzelbäume, das die Simulation biophysikalischer Prozesse erlaubt. Modelliert wurden dabei unter anderem die Biomassezunahme, die Kohlenstoffspeicherung, die Kühlung durch Transpiration und die Verschattung, der Wasserverbrauch und die Abflussminderung.

Als Eingangsdaten dienten neben den aus Fernerkundung und Feldmessung abgeleiteten Baummerkmalen auch standort- und klimaspezifische Parameter. Letztere beinhalten langjährige Monatsmittelwerte (Referenzzeitraum 1991 - 2020) zu Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Niederschlag sowie ein konstanter CO₂-Gehalt von 400 ppm. Die Bodeneigenschaften wurden pauschal für die Untersuchungsfläche als sandiger Lehm mit einer nutzbaren Feldkapazität von 25 %, einem Welkepunkt von 8 % und einer Durchwurzelungstiefe von 80 cm angesetzt.

Die Ökosystemleistungen wurden schließlich sowohl für die vollständig aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Parameter als auch für terrestrisch erhobene Vergleichsdaten modelliert und einander gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Modellierung der Ökosystemleistungen werden aktuell zur Einreichung bei einer internationalen Fachzeitschrift (z.B. „Ecosystem Services“ <https://www.sciencedirect.com/journal/ecosystem-services>) vorbereitet.

3. Ergebnisse

3.1. In-situ Erfassung von Bäumen

In der ersten Projektphase wurde im Zuge einer systematischen Geländeerhebung eine Datenbank mit georeferenzierten Informationen zu 460 Einzelbäumen in München aufgebaut. Die Datenbank umfasst präzise Messwerte auf Einzelbaumebene zu Strukturparametern wie Stammumfang (bzw. BHD), Baumhöhe und Kronenprojektionsfläche. Ergänzend wurden Daten aus dem offiziellen Bauminformationssystem der Stadt München integriert, das detaillierte Aussagen zu Baumart, Gattung, Baumhöhe, BHD, Baumalter und Vitalität von über 70.000 Einzelbäumen enthält. Diese umfangreichen Referenzdaten dienten als Grundlage für die Kalibrierung und Validierung sowohl der baumartenspezifischen Klassifikation auf Basis von Fernerkundungsdaten als auch des CityTree-Modells zur Abschätzung der Ökosystemleistungen.

3.2. Kartierung von Einzelbäumen, Baumarten und Baumparametern

Zur Klassifikation der Gattung von Stadtbäumen wurde ein Machine-Learning-Ansatz auf Basis von in-situ erhobenen Baumdaten eingesetzt. Folgende sechs Klassen wurden unterschieden: Ahorn (Acer), Linde (Tilia), Robinie (Robinia), Rosskastanie (Aesculus), und Pappel (Populus). Diese Referenzdaten dienen als Grundlage für das Training und Validierung eines überwachten Klassifikationsverfahrens, mit dem verschiedene, hierarchische Ebenen des Vegetations- und Baumbestands aus Fernerkundungsdaten abgeleitet wurden. Das Ergebnis umfasste folgende thematische Ebenen: Eine generelle Vegetationsmaske und eine separate Baummaske (Abbildung 1a) sowie eine pixelbasierte Klassifikation der Baumgattungen (Abbildung 1b) und eine objektspezifische Gattungszuweisung auf Einzelbaumebene. Die Methode wurde zunächst auf einem 4 km² großen Testgebiet erprobt und anschließend erfolgreich auf das 44 km² große Stadtgebiet von München innerhalb des Mittleren Rings angewendet. Insgesamt konnten dabei über 160.000 Einzelbäume klassifiziert werden.

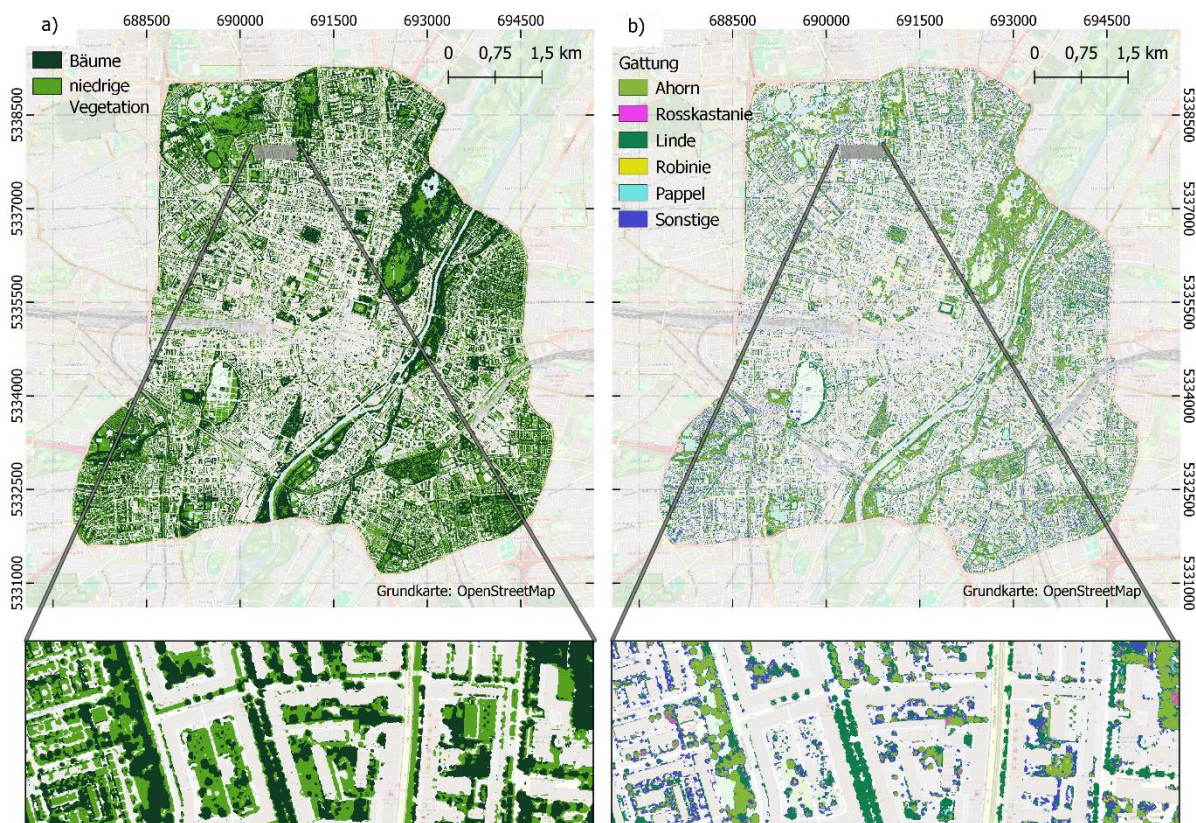


Abbildung 1. Fernerkundungsbasierte Baumklassifikation innerhalb des Mittleren Rings in München

3.3. Modellierung der Ökosystemleistungen (ÖLS)

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Fernerkundungs- und In-situ-Daten wurde anschließend die Modellierung der Ökosystemleistungen mit dem Modell „CityTree“ durchgeführt. Zunächst erfolgte ein Vergleich von 460 Bäumen, für die sowohl In-situ-Messungen als auch entsprechende, fernerkundungsbasierte Parameter vorlagen (Leichtle et al., 2025). Dabei zeigte sich, dass insbesondere bei hohen Bäumen die Höhe in den fernerkundungsbasierten Daten im Vergleich zu den In-situ-Werten tendenziell unterschätzt wurden. Folglich wurde auch der BHD aus Fernerkundungsdaten etwas niedriger eingeschätzt. Beim Kronenradius gab es einzelne Ausreißer, bei denen die Fernerkundung deutlich größere Werte ergab als die Vor-Ort-Messungen. Die Klassifikation der Baumgattungen auf Basis multi-temporalen Fernerkundungsdaten erreichte eine Gesamtgenauigkeit von 66,7 % im Vergleich zu den vor Ort bestimmten Gattungen. Für die häufigsten Gattungen lagen die balancierten Genauigkeiten bei 71,1 % für Ahorn (*Acer*) und 75,5 % für Linde (*Tilia*).

Im Anschluss wurden „CityTree“-Simulationen durchgeführt – eine mit In-situ-Daten und eine mit Fernerkundungsdaten als Eingabeparameter. Die Ergebnisse zeigten eine weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich der simulierten Biomasse und der transpirationsbasierten Kühlleistung. Die Simulation auf Basis der Fernerkundungsdaten führte jedoch zu leicht erhöhtem Baumwachstum, höherer CO₂-Speicherung, gesteigertem Wasserverbrauch sowie deutlich größerem Schattenwurf – vermutlich aufgrund der im Vergleich größeren Kronenmaße aus der Fernerkundung.

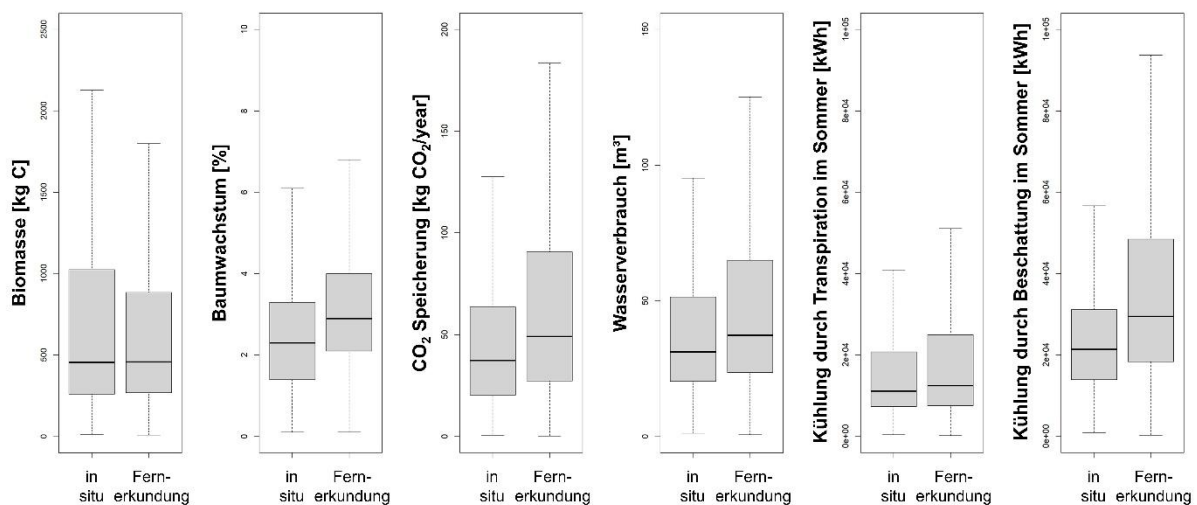


Abbildung 2. Vergleich der mit Baumdaten aus verschiedenen Datenquellen eingeschätzten Ökosystemleistungen in München

3.4. Extrapolation und Modellierung der ÖSL

Aufgrund der guten Übereinstimmung beider Datensätze sowie der Robustheit des Modells wurden die fernerkundungsbasierten Parameter anschließend verwendet, um die Modellierung auf die mehr als 160.000 klassifizierten Bäume im 44 km² großen Untersuchungsgebiet in der Münchner Innenstadt zu übertragen. Der Einsatz von Fernerkundungsdaten ist dabei besonders

entscheidend, da er eine flächendeckende und einheitliche Erfassung städtischer Baumbestände ermöglicht, die mit herkömmlichen Erhebungsmethoden nur mit erheblichem Aufwand realisierbar wäre. So können auch Bäume in schwer zugänglichen oder privaten Bereichen erfasst und in die Analyse integriert werden. Zunächst wurde die räumliche Verteilung ausgewählter ÖSL im Untersuchungsgebiet kartiert, wie in Abbildung 3 dargestellt. Diese Visualisierung zeigt zentrale räumliche Muster sowie Bereiche mit besonders hoher oder niedriger ÖSL-Intensität.

a) Biomasse (kg C)



b) CO₂-Speicherung (kg CO₂/Jahr)



c) Abfluss unter dem Baum (mm/Jahr)



d) Kühlung durch Transpiration im Sommer (kWh)



e) Kühlung durch Beschattung im Sommer (kWh)

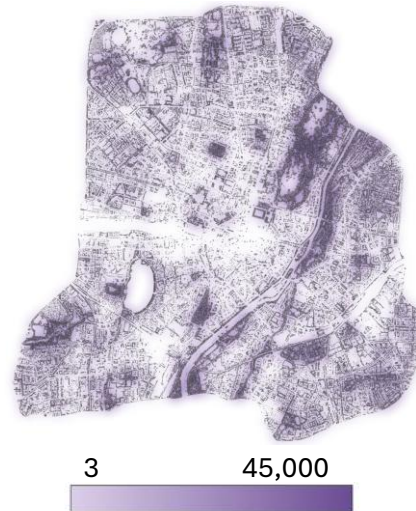


Abbildung 3. Räumliche Verteilung von Ökosystemleistungen der Stadtbäume innerhalb des Mittleren Rings in München

In einem weiteren Schritt wurden die klassifizierten Bäume nach Eigentumsverhältnissen analysiert. Von den insgesamt erfassten Bäumen befanden sich rund 81.000 auf Privatgrundstücken und etwa 80.000 auf öffentlichem Grund, der in Erholungsflächen, Verkehrsflächen und sonstige behördliche Flächen unterteilt wurde. Ein Vergleich der Baummerkmale zeigte, dass Bäume in Erholungsflächen tendenziell größere Dimensionen aufwiesen, während private Bäume geringere Stammdurchmesser und Kronenflächen besaßen.

Öffentliche Bäume trugen in der Regel den Großteil zur Gesamtleistung der ÖSL bei – je nach Kategorie zwischen 61 % und 66 %. Private Bäume erreichten jedoch bei allen ÖSL einen Anteil von über 33 % und übernahmen bei bestimmten Leistungen, wie der Reduktion von Oberflächenabfluss, sogar eine führende Rolle. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Einbeziehung privater Bäume in die Planung urbaner Grünstrategien, da ihr Beitrag zur städtischen Ökosystemleistung sowohl erheblich als auch räumlich relevant ist. Besonders Bäume in Erholungsflächen wiesen die höchsten Beiträge zu Biomasse, Kohlenstoffspeicherung, Wasserverbrauch sowie zur Kühlung durch Transpiration und Verschattung auf. Private und verkehrsnahе Bäume zeigten im Verhältnis zur Gesamtzahl einen vergleichsweise höheren Beitrag zur Verschattung.

Darüber hinaus wurden zu Vergleichszwecken sowohl Katasterdaten als auch Parameter aus der Fernerkundung verwendet (Abbildung 4). Insgesamt ergaben sich bei den meisten ÖSL-Kategorien geringfügig niedrigere Werte für die auf Fernerkundung basierenden Schätzungen im Vergleich zu den Katasterdaten, mit durchschnittlichen Abweichungen zwischen 22 % und 26 %. Die Reduktion des Oberflächenabflusses zeigte hingegen nur minimale Unterschiede zwischen den beiden Methoden.

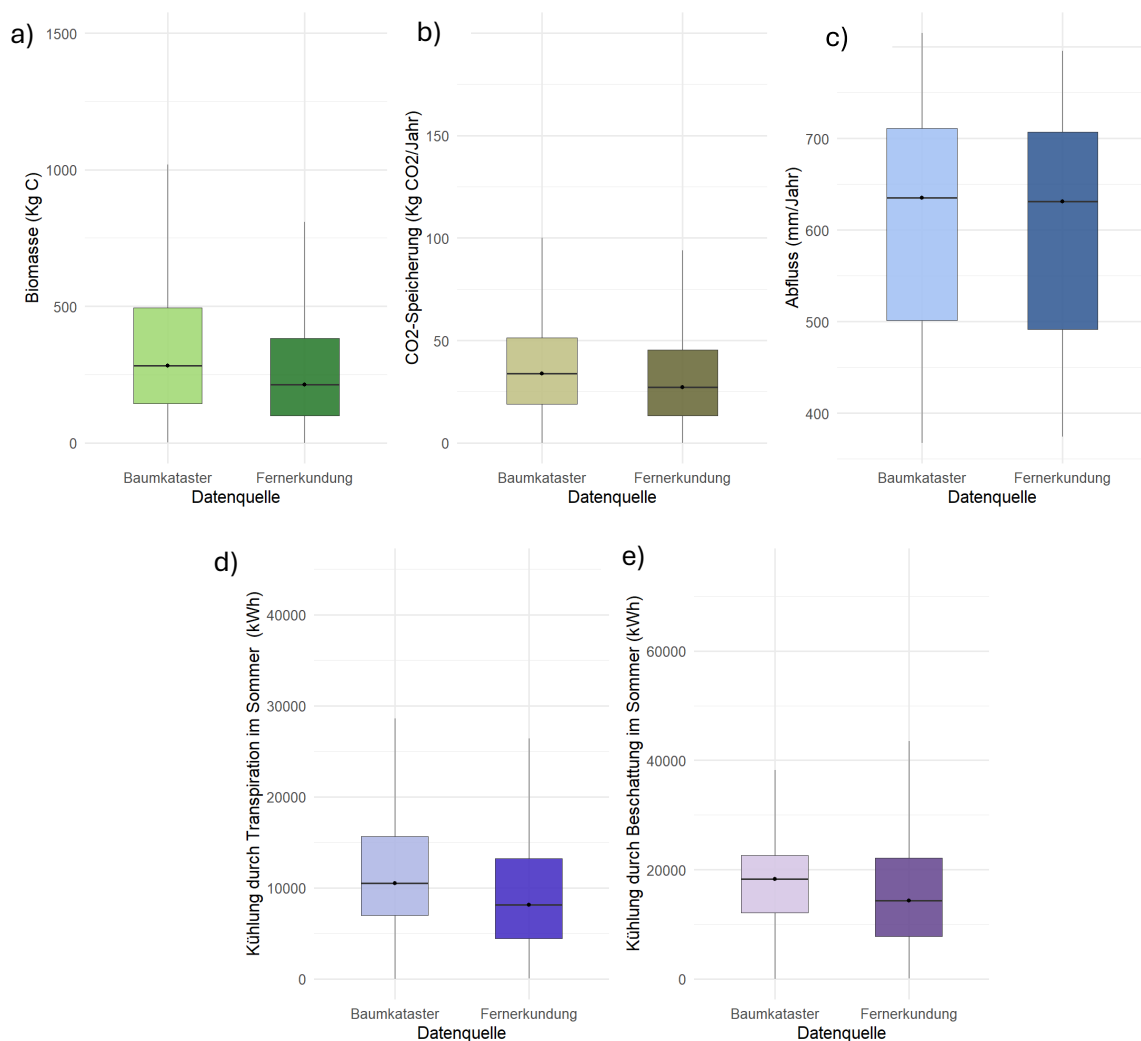


Abbildung 4. Vergleich der mit Baumdaten aus verschiedenen Datenquellen geschätzten Ökosystemleistungen. Die schwarze Linie stellt den Median aller Bäume dar.

Es wurde ein webbasiertes Visualisierungs-Dashboard entwickelt (Abbildung 5), das die Ergebnisse des Projekts für verschiedene Zielgruppen – insbesondere für die kommunale Verwaltung, Planungsbehörden sowie die interessierte Öffentlichkeit – zugänglich, verständlich und nutzbar macht.

Neben den Baumpositionen enthält das Dashboard auch attributive Informationen wie Baumart (Gattung), Dimensionen (z. B. Höhe, Kronendurchmesser), Standortbedingungen (z. B. Versiegelungsgrad, Sky View Factor) sowie die aus dem Modell „CityTree“ abgeleiteten Ökosystemleistungen. Die Nutzer*innen können dabei verschiedene Filterfunktionen (z. B. nach Baumart, Stadtteil oder Leistungstyp) nutzen, um gezielt Informationen abzurufen.

Ein wesentliches Ziel besteht darin, durch eine transparente und visuell ansprechende Darstellung der Daten ein Bewusstsein für den ökologischen Wert urbaner Bäume zu schaffen und datenbasierte Entscheidungsgrundlagen für Begrünungsstrategien und Klimaanpassungsmaßnahmen zu liefern. Langfristig könnte das Dashboard auch in bestehende städtische Geoinformationssysteme integriert werden. Das Dashboard wurde auf der „Woche der Umwelt (04.-05.06.2024)“ vorgestellt.



Abbildung 5. Visualisierungs-Dashboard mit Darstellung der Innenstadt von München

3.5. Projekttreffen

- Kick-Off Meeting am 21.01.2022
- Interne Projekttreffen (07.12.2021, 11.01.2022, 28.01.2022, 04.05.2022, online + 01.06.2022 vor Ort in Freising)
- Interne Projekttreffen (01.06.2022 vor Ort in Freising + 26.10.2022, online)
- Interne Projekttreffen (03.02.2022 + 26.04.2022, online)
- Interne Projekttreffen: 14.06.2023 in Würzburg mit Projektpartner von SLU, TUM, DLR und der Universität Würzburg
- Interne Projekttreffen: 05.09.2023 mit Projektpartner von TUM, DLR und der Universität Würzburg (online)
- Interne Projekttreffen: 29.01.2024 am DLR mit allen Projektpartnern von SLU, TUM, DLR und der Universität Würzburg
- Interne Projekttreffen: 17.05.2024 mit Projektpartnern von TUM, DLR und der Universität Würzburg (online)
- Interne Projekttreffen: 11.07.2024 am DLR mit allen Projektpartnern von SLU, TUM, DLR und der Universität Würzburg
- Interne Projekttreffen: 07.03.2025 am DLR mit allen Projektpartnern von SLU, TUM, DLR und der Universität Würzburg

4. Ergebnisverbreitung und -verwertung

4.1. Beitrag zu einem Buchkapitel

Pauleit S, Gulsrud N, Raum S, Taubenböck H, Leichtle T, Erlwein S, Rötzer T, Rahman M & Moser-Reischl A (2022): Smart Urban Forestry: Is It the Future? In: Informed Urban Environments. The Urban Book Series. Springer, Cham.

4.2. Vorträge

Leichtle T., Kühnl M., Osterkamp N., Garcia de León A. S., Martin K., Taubenböck H. (2022): Mapping urban green – The capabilities of remote sensing data with spatial resolutions from 10 meters to 10 centimeters. Dresden Nexus Conference 2022, 23.-25.05.2022 (online).

García de León A. S., Leichtle T., Taubenböck H., Rötzer T., Martin K. (2022): Detection and classification of urban trees using AI and remote sensing: Outline & proof of concept. University of Würzburg 2022, 09.11.2022 (online).

García de León A. S., Leichtle T., Taubenböck H., Rötzer T., Martin K. (2023): Exploring the use of multi-temporal high-resolution images for single tree classification. Institut für Geographie und Geologie, Universität Würzburg, 26.01.2023 (online).

Leichtle T. "Earth Observation for mapping urban green and estimation of heat exposure in cities." GI Kolloquium „Urbane Fernerkundung“, Ruhr-Universität Bochum, 28.06.2023.

Leichtle T. „Erfassung des Stadtklimas mit Methoden der Erdbeobachtung“ Data Science Summit „Städte & Kommunen“, Frankfurt am Main, 09.11.2023.

Leichtle, T.: Earth Observation for assessment of urban green infrastructure and heat exposure in cities. TUM Research Training Group "Urban Green Infrastructure", 04.03.2024, Raitenhaslach.

Garcia de Leon, S., Castañeda, A., Karges, N., Leichtle, T., Rötzer, T., Ludwig, A., Bury, A., Martin, K., Ullmann, T., Taubenböck, H.: Variation der Landoberflächentemperatur städtischer Landnutzungsklassen basierend auf der Baumbestandsverteilung: Ein fernerkundlicher Ansatz. 10. BIOMET-Tagung "Lebensräume im Wandel", 19.-21.03.2024, Offenbach.

Leichtle, T., Garcia de Leon, S., Rötzer, T., Martin, K., Taubenböck, H.: Ökosystemleistungen des Urbanen Forsts: Modellierung mittels Fernerkundung & künstlicher Intelligenz. Woche der Umwelt, 04.-05.06.2024, Berlin.

García de León, A. S., Leichtle, T., Rötzer, T., Martin, K., Ullmann, T., Taubenböck, H.: Remote sensing-based tree species classification for estimating ecosystem services. XXVI IUFRO World Congress 2024, 23.-29.06.2024, Stockholm.

Leichtle, T., García de León, A. S., Rötzer, T., Martin, K., Wurm, M., Pauleit, S., and Taubenböck, H. Estimating ecosystem services of urban trees based on remote sensing and in-situ measurements: A comparative study in Munich, Germany. JURSE2025: JOINT URBAN REMOTE SENSING EVENT. 04-07.05.2025, Tunis.

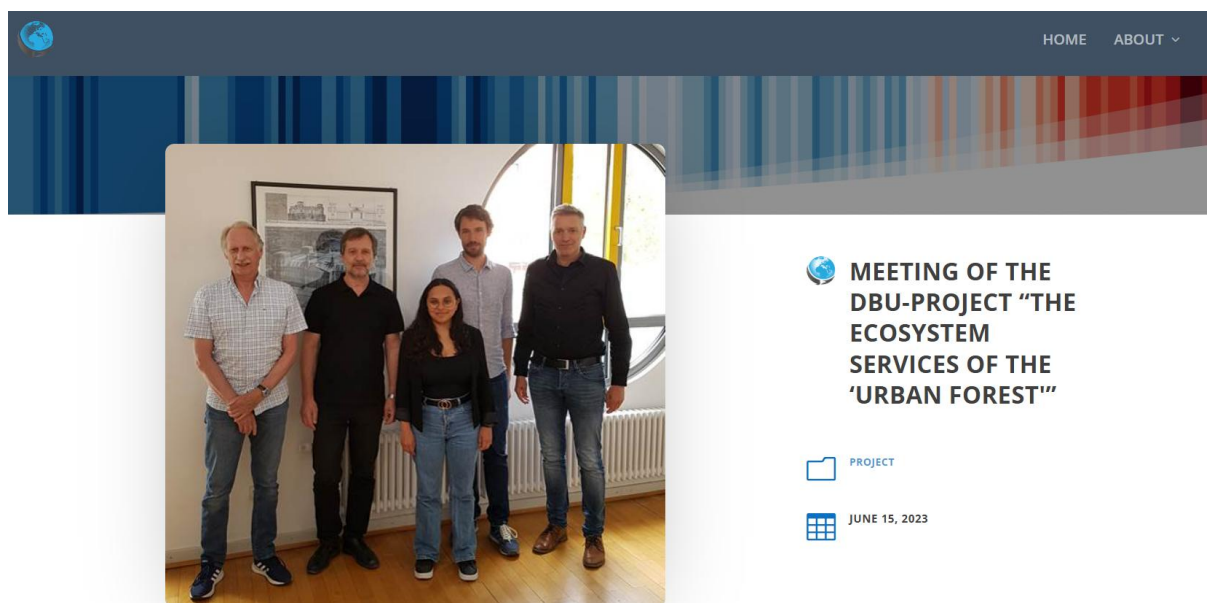
García de León, A. S., Castañeda-Gómez, A., Karges, N., Leichtle, T., Rötzer, T., Martin, K., Ullmann, T., and Taubenböck, H. The relation of LST and trees across different urban land use based on remote sensing. JURSE2025: JOINT URBAN REMOTE SENSING EVENT. 04-07.05.2025, Tunis.

4.3 Wirtschaftliche Verwertung

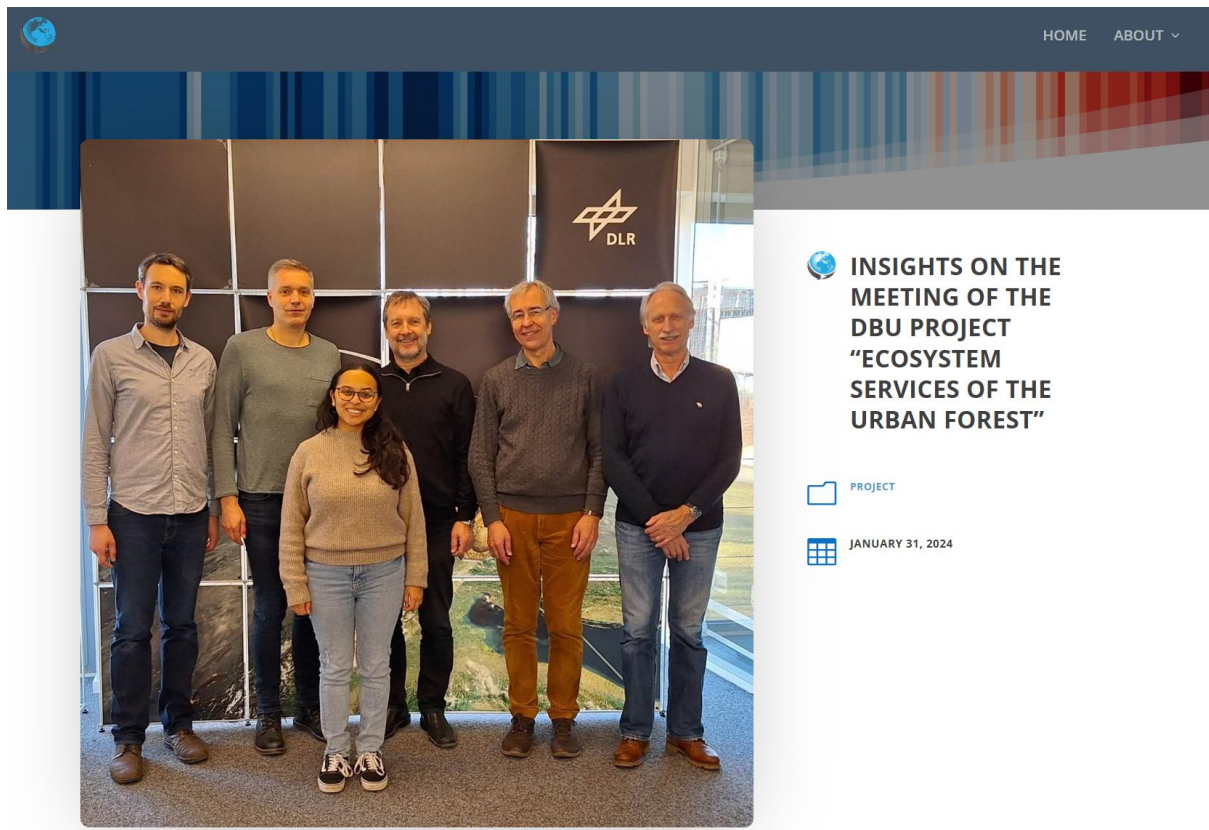
Bereits kurzfristig ergänzen die Ergebnisse des Vorhabens das Portfolio des beteiligten KMUs SLU um den Themenbereich „automatisierte Erfassung von Grünbeständen im urbanen Umfeld“. Als potenzielle Kunden werden Städte, Gemeinden und auch Planungsbüros gesehen, zu deren Aufgaben und Tätigkeitsfeldern die Verarbeitung von Informationen zu Grünbeständen zählt. So wird SLU bereits im Sommer 2025 die im Projekt entwickelten Methoden zur Erfassung von Einzelbäumen in zwei Gemeinden im Zuge der Erstellung bzw. Ergänzung eines Baumkatasters einsetzen.

4.4. Links zu Meetings und Tagungsbeiträgen

[Die Ökosystemleistungen des ‚Urbanen Forsts‘: flächenendeckende Modellierung mittels Fernerkundung und künstlicher Intelligenz - Earth Observation Research Cluster](#)



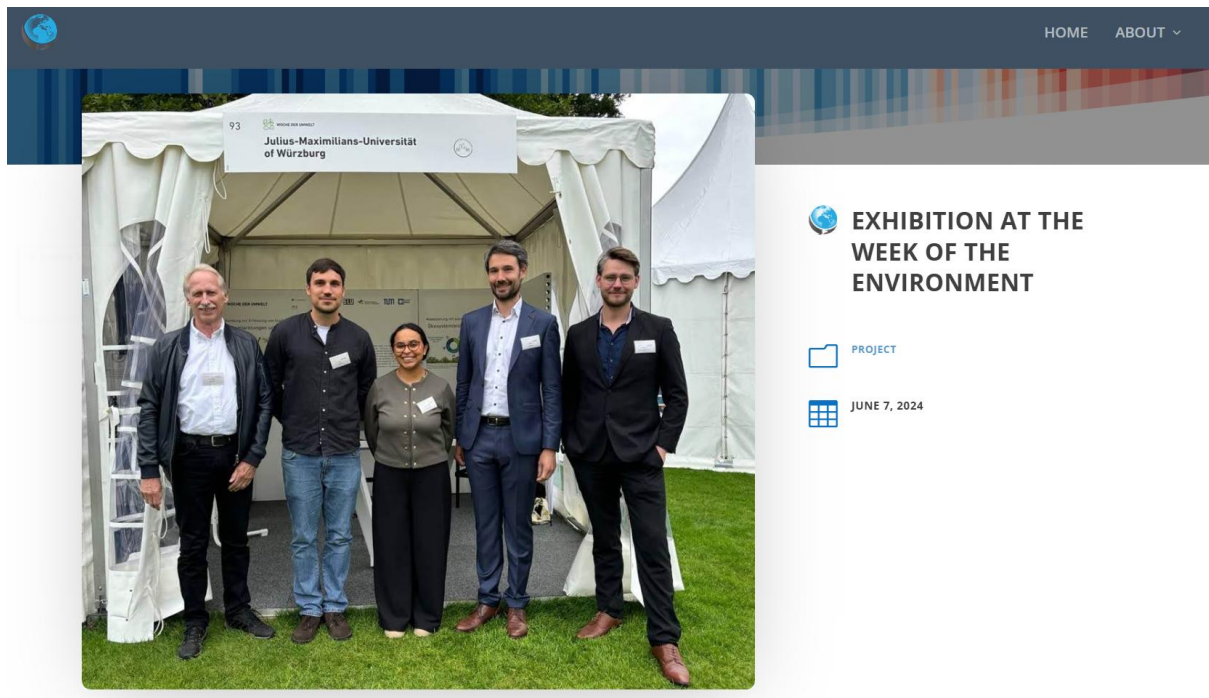
[Meeting of the DBU-project "The ecosystem services of the 'urban forest'" - Earth Observation News](#)



[Insights on the meeting of the DBU project "Ecosystem Services of the Urban Forest" - Earth Observation News](#)



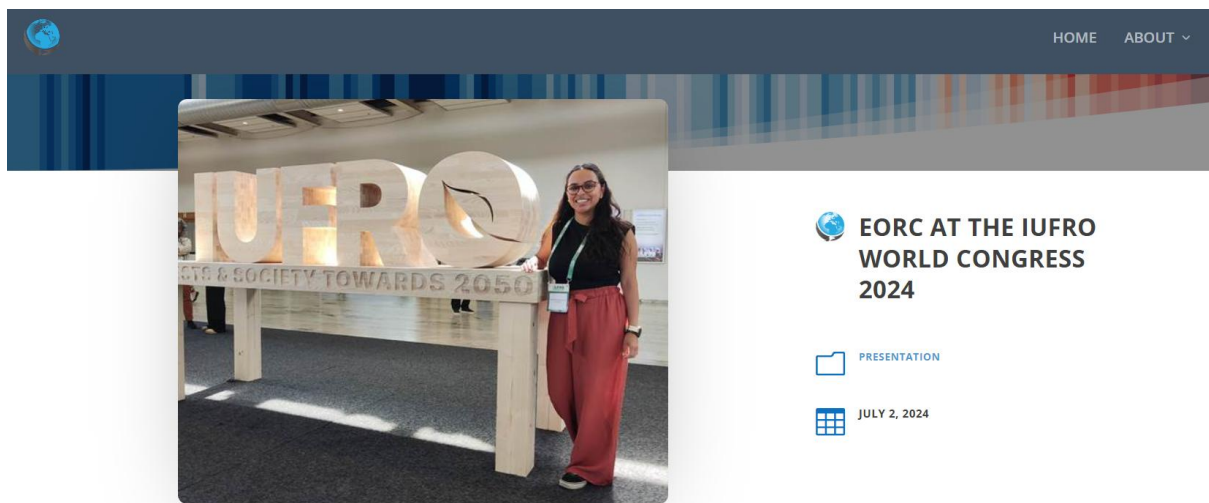
[Presentation at the Biomet conference - Earth Observation News](#)



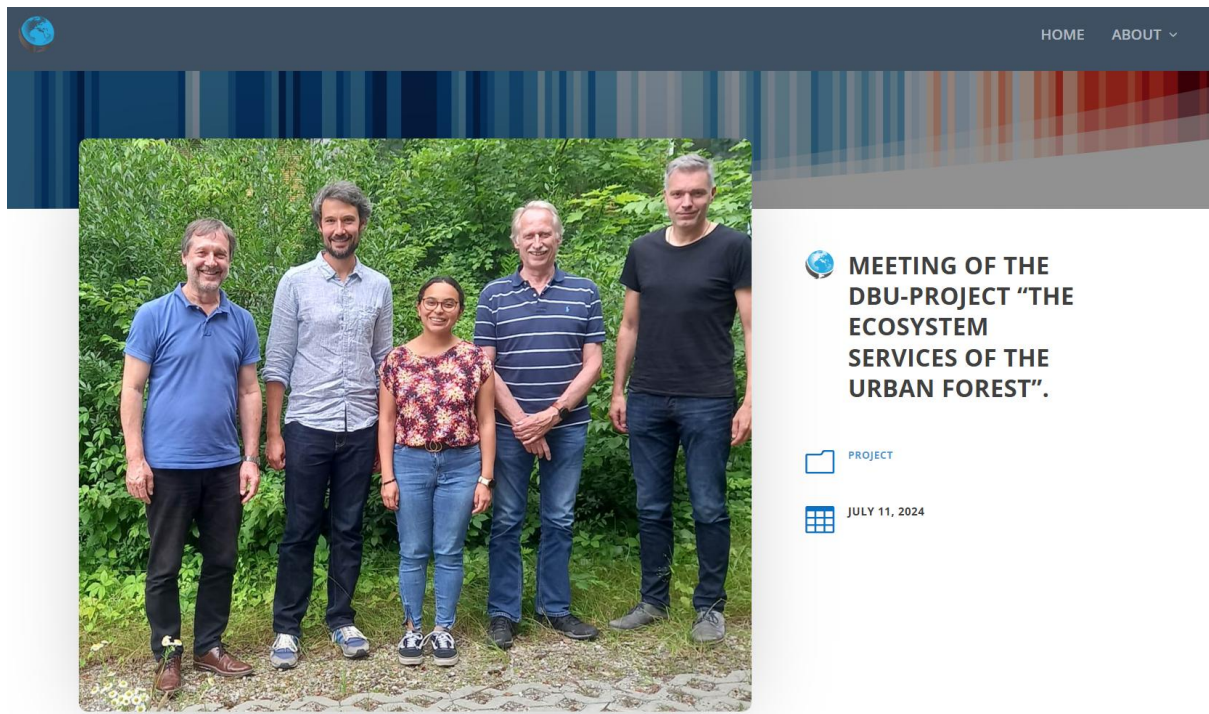
[Woche der Umwelt 2024 – EOC im Schloss Bellevue](#)

[Exhibition at the Week of the Environment - Earth Observation News](#)

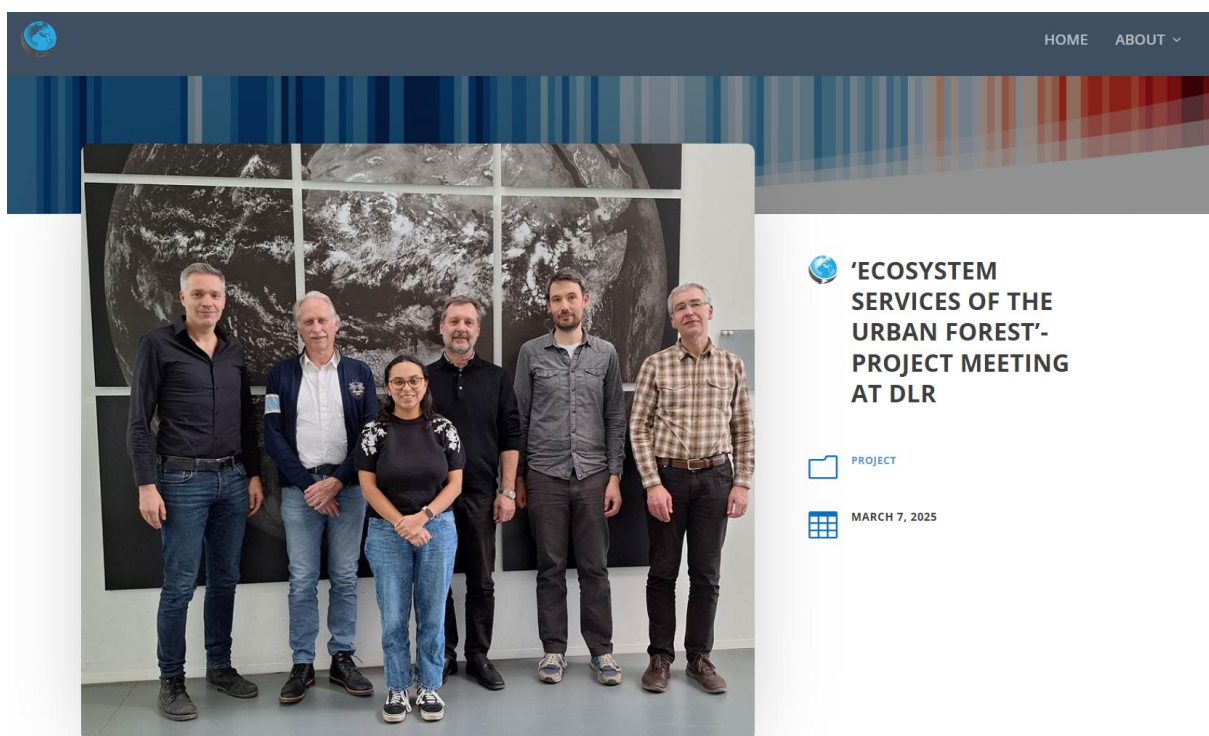
[Julius-Maximilians-Universität of Würzburg – Woche der Umwelt](#)



[EORC at the IUFRO World Congress 2024 - Earth Observation News](#)



[Meeting of the DBU-project “The ecosystem services of the urban forest”. - Earth Observation News](#)



['Ecosystem Services of the Urban Forest'-project meeting at DLR - Earth Observation News](#)

5. Datenquellen

- ATKIS. (2023). *Tatsächliche Nutzung (TN)* [Dataset].
<https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=tatsaechlichenutzung>
- d'Angelo, P., & Kurz, F. (2019). AIRCRAFT BASED REAL TIME BUNDLE ADJUSTMENT AND DIGITAL SURFACE MODEL GENERATION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W13*, 1643–1647.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1643-2019>
- Leichtle, T., García de León, A. S., Rötzer, T., Martin, K., Wurm, M., Pauleit, S., & Taubenböck, H. (2025, May). *Estimating ecosystem services of urban trees based on remote sensing and in-situ measurements: A comparative study in Munich, Germany*. Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), Tunis, Tunisia.
- Leichtle, T., Zehner, M., Kühnl, M., Martin, K., & Taubenböck, H. (2021, September 7). Urban Trees – Detection, Delineation, Quantification, and Characterisation based on VHR Remote Sensing. *REAL CORP 2021: CITIES 20.50. Creating Habitats for the 3rd Millennium: Smart - Sustainable - Climate Neutral*. 26th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society, Vienna, Austria.
- Rötzer, T., Rahman, M. A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., & Pretzsch, H. (2019). Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of The Total Environment*, 676, 651–664.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>