

Berichte	Bd. 90, H. 2, 2016, S. 113–133	Leipzig
----------	--------------------------------	---------

Tobias SCHOLZ, Bochum  
 Angela HOF, Salzburg  
 Thomas SCHMITT, Bochum

## **Modellierung ausgewählter Ökosystemleistungen von Stadtbäumen auf Basis kommunaler Baumkatasterdaten**

### **Modeling Ecosystem Services of Trees Based on Urban Tree Cadastres**

#### **Summary**

Urban trees provide manifold ecosystem services among which regulating effects are of particular importance for urban planning challenges under climate change. The paper explores the potential of urban tree cadastres to provide researchers and practitioners with relevant data for modeling air pollution removal, carbon sequestration and storage and runoff reduction with the i-Tree Eco application. In addition, the surface temperature reduction was assessed with an innovative approach that uses i-Tree modeling results on leaf area index. Methodological results show that most data needed for direct use in i-Tree are available in tree cadastres. Vitality and height of crown base are available by applying slight adaptations and simple calculations before utilization in the model. Geostatistical methods were applied to assess crown light exposure based on crown radius and high-resolution digital surface model. Modeling results are presented for the publicly owned and managed urban tree stock in the German city of Duisburg in the Rhein-Ruhr region, the country's largest urban-industrial agglomeration. Results show that the regulating ecosystem services of the public tree stock represented in the cadastre is modest when compared to overall city levels of demand for carbon sequestration and storage, runoff reduction and air pollution removal. However, public trees annually remove 16 per cent of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in Duisburg and provide surface temperature reduction for an area of 29 per cent of their coverage. We discuss outlook and limitations of the approach in the light of practicability of its application for urban planning and urban tree management.

**Keywords:** ecosystem services, regulating services, urban trees, tree cadastre data – Ökosystemleistungen, Regulationsleistungen, Stadtbäume, Baumkataster

## 1 Einleitung und Problemstellung

Im Verlaufe des 21. Jahrhunderts wird sich die Menschheit zwei großen Herausforderungen stellen müssen: Zum einem dem Anstieg der urbanen Bevölkerung, ein Prozess, der sich zwar in den Entwicklungs- und Schwellenländern besonders rasant ereignet, in den Industrieländern jedoch ebenfalls zu beobachten ist (WBGU 2016). Zum anderen den Folgen des Klimawandels, die sich in urbanen Ökosystemen durch intensivere und länger andauernde Hitzewellen bemerkbar machen und den bereits bestehenden Wärmeineffekt von Städten noch verstärken werden. In urbanen Agglomerationen wie dem Ruhrgebiet führen steigende Flächenversiegelung, ein Mangel an Grünstrukturen und häufigere Hitzeperioden zur Intensivierung der Wärmeinselintensität (KUTTLER 2011). Häufigere Hitzeperioden in Städten werden sich darüber hinaus negativ auf die Luftqualität auswirken. Sowohl durch den Klimawandel als auch durch den urbanen Bevölkerungsanstieg ist also eine Verschlechterung der städtischen Lebensqualität zu befürchten, der von stadtpolitischer Seite begegnet werden muss.

Bei der Bewältigung der Folgen des Klimawandels und der Flächenversiegelung durch wachsende Städte nimmt das städtische Grün eine Schlüsselrolle ein. Urbane Grünflächen und Parkanlagen bieten eine Vielzahl von klimatischen Regulationsleistungen, die zur Abmilderung der Klimafolgen beitragen und damit die Klimaresilienz von Städten verbessern können. Besonders Stadtbäume erfüllen vielfältige Wohlfahrtswirkungen:

- Durch Beschattung und Transpiration führen Bäume zur Reduzierung von sommerlicher Hitzebelastung (GILLNER et al. 2015; LEHMANN et al. 2014).
- Die Blätter dienen als Filter für Luftschadstoffe ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) und Feinstäube ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ), insbesondere an viel befahrenen Straßen (FLOHR 2010; NOWAK et al. 2006; TAKASHI et al. 2005; BECKETT et al. 1998).
- Bei Starkregenereignissen werden große Wassermengen von der Baumkrone zurückgehalten (Interzeption) (XIAO et al. 1998; SANDERS 1986). Dies verringert die Bodenerosion, reduziert die Auslastung der Kanalisation und beugt Überschwemmungen vor.
- Auch tragen Bäume durch die Fixierung von  $\text{CO}_2$  im Zuge der Photosynthese aktiv zur Reduzierung von Treibhausgasen in der Atmosphäre bei (NOWAK & CRANE 2002; STROHBACH & HAASE 2012).

In kommunalen Planungsprozessen werden diese Wohlfahrtswirkungen im Sinne von Ökosystemleistungen (ÖSL) bisher zumeist qualitativ bewertet. Von einer Quantifizierung in physikalische Größen (z. B. Kaltluftproduktion von Freiflächen in  $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ ) oder gar einer Übersetzung dieser in monetäre Werte ist die Planungspraxis jedoch weit entfernt. Insbesondere die Notwendigkeit und die Problematik einer Monetarisierung von ÖSL werden aktuell kontrovers diskutiert (JUNGMEIER 2016). Erste Ansätze zur konkreten Einbeziehung von ÖSL in Planungsprozesse finden sich z. B. bei ALBERT et al. (2016, 2014). HEILAND et al. (2016) schlagen vor, ÖSL als sogenannte „Add-ons“ in Landschaftsplänen zu berücksichtigen. Existierende Pläne und Prozesse sollen durch ÖSL ergänzt werden, wenn diese entscheidungsrelevante Argumente einbringen können. Hierbei wird jedoch nicht der Anspruch auf eine systematische und vollständige Erfassung gelegt. ÖSL wer-

den demnach als Ergänzung zu bereits bestehenden Methoden und Inhalten in der Planung verstanden (HEILAND et al. 2016, 316).

Für den städtischen Kontext wird diskutiert, die ÖSL des urbanen Grüns verstärkt in Entscheidungssituationen einzubeziehen und die Bedeutung und den ökonomischen Wert von Stadtökosystemen sichtbar zu machen (HAMM 2016; KOWARIK et al. 2016). In der Alltagswirklichkeit von Stadtentwicklung genießt der Erhalt von Stadtbäumen jedoch oft geringe Priorität. Die Wahrnehmung der Bürger und der öffentlichen Verwaltung ist verengt auf die Kosten für die Pflege und Erhaltung der Stadtbäume, während ihre stadtkologische Bedeutung zu wenig berücksichtigt wird (KRONENBERG 2015). Gleichzeitig ist vielerorts ein struktureller Umbau des Stadtbaubestandes im Sinne einer Multifunktionalität (Biodiversität, Ökosystemleistungen) und Aufrechterhaltung der Wohlfahrtswirkungen erforderlich. Die Wahl geeigneter Baumarten zur Optimierung von ÖSL unter sich verändernden stadtklimatischen Bedingungen ist eine Zukunftsaufgabe mit hoher planungspraktischer Relevanz (GILLNER et al. 2016; WITTIG et al. 2012).

Eine wesentliche Restriktion bei der Berücksichtigung von ÖSL in Planungsprozessen stellt die Ressourcenverfügbarkeit dar. Knappe Finanz- und Personalressourcen stehen der Quantifizierung und monetären Bewertung entgegen, die im Gegensatz zur qualitativen Bewertung von Schutzgütern aufwändiger in der Erhebung, Analyse und Interpretation sind (HEILAND et al. 2016, 315). Auch fehlen häufig Vergleichsstudien oder anerkannte Bewertungskriterien, die die Messwerte in einen übergeordneten Kontext stellen. Somit ist der Wunsch nach einfachen Verfahren zur Abschätzung von ÖSL vielfach gegeben.

Der vorliegende Beitrag stellt anwendungsorientiert und am Beispiel der Stadt Duisburg dar, wie klimatische Regulationsleistungen von Stadtbäumen auf Basis vorliegender kommunaler Baumkatasterdaten quantifiziert werden können. Hier wird erstmals für eine deutsche Stadt eine Ist-Zustandsbewertung, bezogen auf einen kommunalen Baumbestand von 50.000 Bäumen, im gesamtstädtischen Kontext durchgeführt. Eine Möglichkeit zur kostengünstigen Ermittlung regulierender ÖSL bei Stadtbäumen bietet die Modellierungssoftware i-Tree Eco (FOREST SERVICE 2016), mit deren Hilfe für eine beliebige Anzahl an Bäumen ÖSL kalkuliert und monetär bewertet werden können (Abschnitt 2.1). Zugleich wird mit einem eigens entwickelten Ansatz die Beschattungswirkung als lokal bedeutsame mikroklimatische Leistung der Stadtbäume erhoben (Abschnitt 2.4). In der Ergebnisdarstellung erfolgt beispielhaft eine artspezifische und eine räumliche Bewertung der ÖSL des kommunalen Baumbestands, die handlungsleitend für ein klimaangepasstes Stadtbaummanagement sein kann (Abschnitt 3).

Im Vordergrund des Beitrags steht die Frage nach der Anwendbarkeit des Modells auf kommunale Baumkatasterdaten. Ferner wird diskutiert, welche Vorteile eine solche Erhebung bietet, mit welchen Unsicherheiten gerechnet werden muss und welche Anforderungen an die Baumkontrolle im städtischen Raum gestellt werden müssten, um eine praxistaugliche Bewertung von ÖSL für Stadtbäume zu gewährleisten.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Das Modell i-Tree Eco

Das verwendete Modell i-Tree Eco ist in einer frei verfügbaren Computersoftware realisiert, welche federführend vom Forest Service des U.S. Department of Agriculture entwickelt wurde. Das Programm richtet sich in erster Linie an kommunale Verwaltungen und Entscheidungsträger, wird jedoch auch von Wissenschaftlern, Verbänden und Organisationen sowie von interessierten Bürgern genutzt. Die verwendeten Modellgleichungen sind mehrfach *peer-reviewed*, basieren auf jahrzehntelanger Grundlagenforschung und werden laufend an den aktuellen Forschungsstand angepasst (FOREST SERVICE 2016). i-Tree Eco bietet folgende Funktionen:

- *Bestimmung der Struktur des urbanen Baumbestandes*: Baumartenzusammensetzung, Baumdichte, Gesundheitszustand der Bäume, Berechnung der Blattfläche;
- *Modellierung von Ökosystemleistungen*: CO<sub>2</sub>-Speicherung und -Sequestrierung, Filterung von Luftschadstoffen und Feinstäuben (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), Interzeptionsvermögen und Energieeinsparungen durch Beschattung und Kühlwirkung sowie Berechnung der Emission von biogenen, flüchtigen organischen Verbindungen (Monoterpene und Isopren);
- *Unterstützung beim Baummanagement*: Risikoabschätzung gegenüber Schädlingsbefall.

Die Erhebungen können für unterschiedliche Maßstabebenen – für ein ganzes Stadtgebiet bis hin zu einzelnen Straßenzügen – erfolgen. Als Dateninput werden baumstrukturelle Daten benötigt, die über Feldmessungen erhoben werden (Abschnitt 2.3). Ausdrückliches Ziel von i-Tree Eco ist es, die Bewertung und Analyse des innerstädtischen Baumbestandes für verschiedene Akteure zu erleichtern und in Form von ÖSL in Wert zu setzen. Um auch den Zugang für fachfremde Personen zu ermöglichen, ist das Programm bedienungsfreundlich gestaltet (FOREST SERVICE 2016). Es werden sowohl physikalische Ergebnisse ausgegeben als auch Umrechnungen in monetäre Werte (US-Dollar) vorgenommen.

Bisher gelangte i-Tree Eco bei nur wenigen europäischen Projekten zum Einsatz. Beispiele sind Bozen (RUSSO et al. 2016), London (ROGERS et al. 2015) und Barcelona (BARÓ et al. 2014). Die Software wurde in Deutschland bisher 92 Mal heruntergeladen (Stand Februar 2016), allerdings wurden bis auf das hier vorgestellte Projekt noch keine Erhebungen für deutsche Städte veröffentlicht.

### 2.2 Das kommunale Baumkataster der Stadt Duisburg

Kommunale Baumkataster sind administrative Verzeichnisse, in denen Daten zu stadteigenen Bäumen einer Kommune erfasst sind und welche zur Verwaltung der Baumpflege und Baumkontrolle dienen. Da jeder Baumeigentümer für die Verkehrssicherheit seiner Bäume verantwortlich ist, muss die Kommune die Baumkontrolle, das Schadbild und die Pflegemaßnahmen manipulationssicher und damit gerichtsfest mit Angaben zum Erfassungsdatum, zur Kontrolle, zum Ort und zum

Prüfergebnis eines jeden Baumes aus versicherungstechnischen Gründen nachhalten (DOOBE 2008). Weiterhin dient ein solches Kataster zur Koordination und Organisation der Baumpflegemaßnahmen. In digitaler Form sind statistische Abfragen und Auswertungen für Zustandsberichte möglich. Die Bestimmung und das Monitoring von ÖSL sowie die damit verbundene Wertermittlung werden bei der Pflege eines Baumkatasters bisher nicht berücksichtigt, allerdings stellen diese Erhebungen vor dem Hintergrund eines zukunftsorientierten und klimaangepassten Grünflächenmanagements eine potentielle und sinnvolle Erweiterung dar.

In Duisburg sind rund 50.000 Bäume im digitalen Kataster erfasst. Die letzte Baumkontrolle der vorliegenden Version erfolgte am 28.10.2015. Im Laufe des Jahres 2015 wurden 49.921 Bäume überprüft. Die Daten bilden also den aktuellen Zustand der stadteigenen Bäume in Duisburg ab. Jedoch sind nicht alle Bäume auf Duisburger Stadtgebiet im Kataster enthalten, sondern fast ausschließlich Straßebäume und Bäume an öffentlichen Plätzen. Bäume in Parkanlagen oder Stadtwäldern fehlen in der Betrachtung. Ebenso liegen keine Informationen zu Bäumen auf Privatgrundstücken vor. Auch sind die einzelnen Stadtteile unterschiedlich intensiv bearbeitet. Trotz alledem bilden 50.000 Bäume eine sehr gute Stichprobengröße, um ÖSL auf Art- und auf räumlicher Ebene abzuleiten.

Im Baumkataster sind Informationen zur Baumart und Sorte, zum Standort (Stadtteil, Straße, GPS-Koordinaten), zu baumstrukturellen Größen wie Brusthöhendurchmesser (BHD) und Kronenbreite, zur Vitalität und zu Stamm-, Kronen- und Wurzelschäden enthalten. Somit stellen Baumkataster eine vielseitige Informationsquelle für baumstrukturelle Größen dar, die sich hervorragend für die Bestimmung von ÖSL eignen.

### 2.3 Modellierung von ÖSL mit *i-Tree Eco* auf Basis des Baumkatasters

Das Duisburger Baumkataster bietet bereits viele Informationen, die für eine *i-Tree Eco* Analyse notwendig sind (vgl. Tab. 1). Im Baumkataster sind 236 *Baumarten* erfasst, die alle in der Datenbank von *i-Tree* inkludiert sind. Insgesamt umfasst die *i-Tree*-Datenbank Modellgleichungen zur Berechnung von ÖSL für 7.884 Baumarten inkl. Sorten. Der *Status* definiert, ob es sich um einen gepflanzten oder verwilderten Baum handelt, während die *Landnutzung* den Baumstandort beschreibt. Da es sich bei allen betrachteten Bäumen um gepflanzte Straßebäume handelt, sind sowohl die *Landnutzung* als auch der *Status* leicht zu definieren. Die *Kronenbreite* und der *Brusthöhendurchmesser* (BHD) werden bei der regelmäßigen Baumkontrolle gemessen und liegen für jeden erfassten Baum vor. Die stündlich gemessenen Luftschadstoff- und Feinstaubdaten der Messstationen des LANUV NRW (2016) in Duisburg wurden für die Modellierung zugrunde gelegt. Die verwendeten stündlich gemessenen Klimadaten stammen von der nächstgelegenen Station Düsseldorf Airport (Station ID: 10400099999), da Duisburg selbst keine Klimastation besitzt, die bei der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) gelistet ist. Angaben zum *Anteil der Kronenauflichtung* sowie zum *Anteil der abgestorbenen Krone* sind im Kataster nur qualitativ in Form von Informationen zur Vitalität und zu Kronenschäden enthalten. Diese können jedoch in prozentuale Werte übersetzt werden.

Tab. 1: Abgleich der Datenanforderung für das i-Tree-Modell mit der Datenverfügbarkeit im Baumkataster. ✓ = Daten vorhanden; (✓) = Daten qualitativ ableitbar; × = Daten nicht vorhanden.

Tab. 1: Comparison between the data requirement for the i-Tree model and the data availability in the tree cadastre. ✓ = Data available; (✓) = Data can be derived; × = Data not available.

Datenanforderung	Datenverfügbarkeit
Baumart	✓
Status	✓
Landnutzung	✓
BHD [cm]	✓
Kronenbreite [m]	✓
Klimadaten der Projektregion	✓
Kronenauflichtung [%]	(✓)
Abgestorbene Krone [%]	(✓)
Baumhöhe [m]	×
Kronenansatz [m]	×
Lichtexposition der Krone	×

Im Kataster fehlende Informationen beziehen sich auf die *Baumhöhe*, den *Kronenansatz* und die *Lichtexposition* der Krone. Dies stellt ein erhebliches Problem dar, denn ohne diese Informationen ist die Berechnung von ÖSL mit i-Tree Eco nicht möglich. Eine Nachkartierung der fehlenden Größen für 50.000 Bäume stellt sowohl finanziell als auch personell keine realistische Alternative dar, da die Kosten der Erhebung den Nutzen in den meisten Fällen übertreffen werden. Daher wurden mit Blick auf die Praxistauglichkeit des Vorgehens (geo-)statistische Methoden entwickelt, um die fehlenden Größen zu bestimmen.

Die *Baumhöhe* wird über allometrische Wachstumsgleichungen anhand des Stammumfanges in Anlehnung an PEPER et al. (2001) abgeleitet. Um Regressionsfunktionen zum Höhenwachstum zu erarbeiten, wurde das Bochumer Stadtbaumkataster hinzugezogen, bei dem die Höhe und der BHD für 40.000 Bäume angegeben sind. Auch im Bochumer Baumkataster sind fast ausschließlich Straßenbäume erfasst. Für das Bochumer Stadtgebiet darf von standörtlich vergleichbaren Wuchsbedingungen ausgegangen werden und auch die bioklimatischen Bedingungen sind vergleichbar: Beide Städte weisen mit > 100.000 Einwohnern eine dichte Besiedlung und ein ausgeprägt urbanes Klima auf. Für jede Art und Sorte wurde der BHD als unabhängige und die Baumhöhe als erklärte Variable mithilfe des Statistikprogramms SPSS (Version 22, IBM 2013) korreliert und eine Regressionsfunktion berechnet. Dabei gelangten lediglich Regressionsgleichungen zur Anwendung, die mindestens ein Bestimmtheitsmaß von 0,5 und einen p-Wert von <0,001 (hoch signifikant) aufwiesen. Bei den meisten Arten erbrachten Potenzfunktionen das höchste Bestimmtheitsmaß. Diese Funktionen berücksichtigen,

dass das Höhenwachstum bei geringen Umfängen stärker ausgeprägt ist und sich mit zunehmendem Stammumfang allmählich abschwächt, während das sekundäre Dickenwachstum weiter voranschreitet (BÖHLMANN 2013). Mithilfe der art- bzw. sortenspezifischen Regressionsgleichungen konnten die Höhen von 43.826 Bäumen des Duisburger Katasters geschätzt werden, was 88 % des Baumbestandes im Kataster entspricht. Für die übrigen 12 % wurden gattungsspezifische Gleichungen oder höhen- und kronenspezifische Gleichungen verwendet. Final wurden die Höhen pro Baumart und Sorte qualitativ mithilfe der einschlägigen Literatur (GALK 2016, VOGT et al. 2015, ROLOFF & Bärtels 2006) geprüft und artspezifisch zu hoch eingeschätzte Bäume wurden entsprechend der maximalen Wuchsleistung korrigiert. Dies war nur bei wenigen Arten notwendig.

Aus Verkehrssicherungsgründen haben die Straßenbäume der Stadt Duisburg einen *Kronenansatz* von mindestens 3 m. Nur die Neupflanzungen könnten etwas niedrigere Kronenansätze aufweisen. Daher wurde bei Bäumen > 5 m der Kronenansatz auf 3 m festgelegt. Bei Wuchshöhen von 3–5 m wurde der Kronenansatz auf 2 m definiert, bei < 3 m auf 1 m.

Die *Lichtexposition der Krone* (*Crown Light Exposure, CLE*) wird anhand einer fünfstufigen Skala im Modell rangskaliert angegeben. Dabei erhält der Baum den höchsten Wert (5), wenn dieser aus vier Himmelsrichtungen und von oben Licht erhält. Wenn der Baum durch einen benachbarten Baum oder durch eine Hausfassade von einer Seite beschattet wird, dann wird der nächst kleinere Wert vergeben (4). Bäume, die unter Bäumen stehen und von allen Seiten beschattet werden, erhalten eine Bewertung von 0. Da die Lichtexposition der Krone keine Rolle bei der Baumpflege und dem Baummanagement spielt, wird diese Größe während der Baumkontrolle nicht erfasst. Deshalb wurde auch hier eine praxistaugliche Methode entwickelt, die den CLE für alle Bäume im Kataster automatisiert ableitet. Als Datengrundlage wird das digitale Oberflächenmodell (DOM1L) für das Duisburger Stadtgebiet verwendet und mit einer Zellgröße von 0,5 m<sup>2</sup> gerastert. Um die Oberflächenhöhe nördlich, südlich, westlich und östlich der Krone zu ermitteln, wird mithilfe des Tools „Bearing Distance to Line“ in ArcGIS (Vers. 10.1, GI Geoinformatik GmbH 2012) vom Baummittelpunkt in alle vier Himmelsrichtungen jeweils eine *Polyline* mit der Länge des Kronenradius + 3 m gepeilt. Dieser Vorgang wird mit der Länge des Kronenradius wiederholt, sodass zwei unterschiedlich lange Liniensegmente übereinander liegen. Mithilfe des Tools „Symmetrical Difference“ wird der Kronenradius von der Linie „Kronenradius + 3 m“ abgezogen, sodass Liniensegmente von 3 m Länge entstehen, die erst am Rand der Krone ansetzen (Abb. 1).

Diese Liniensegmente werden im nächsten Schritt dazu genutzt, das Höhenmodell auszulesen, indem jeweils der durchschnittliche Rasterwert entlang dieser Segmente extrahiert und in die Sachdatentabelle des Features geschrieben wird. Schließlich werden die Höhen der Segmente von der Baumhöhe subtrahiert. Ist das Ergebnis negativ, dann ist der Baum niedriger als das Liniensegment. In diesem Fall würde aus der einen Richtung eine Beschattung z. B. durch andere Bäume oder Häuser stattfinden. Bei einem positiven Ergebnis liegen keine Hindernisse im Umfeld der Krone vor oder der Baum überragt die Krone anderer Bäume oder



Häuser. In diesen Fällen liegt keine Einschränkung des Lichteinfalls vor. In der Regel werden Straßenbäume so gesetzt, dass diese eine breite Krone entfalten können. Daher wird angenommen, dass eine Einschränkung des Lichtprofils von oben nicht stattfindet, jeder Baum also mindestens die Bewertung 1 erhält.

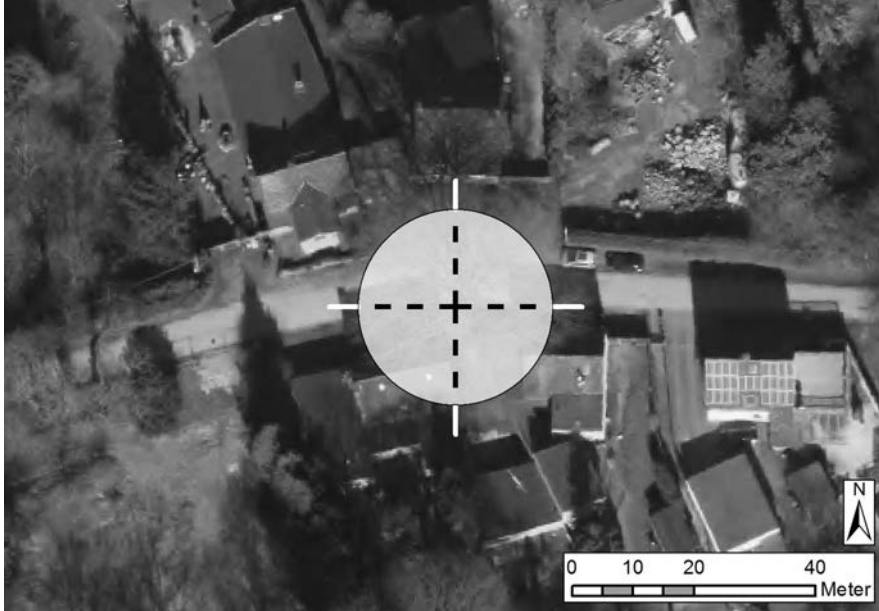


Abb. 1: Konstruktion von Linien, die am Rand der Baumkrone ansetzen. Die weißen Segmente sind drei Meter lang und werden zum Auslesen des Oberflächenmodells verwendet. Datengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.

Fig. 1: Method for creating lines from the border of the tree crown. The white lines are three meters long and are used to read out the surface model. Data source: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.

#### 2.4 Abschätzung der Beschattungswirkung

Das Abkühlungsvermögen der Bäume durch Schattenwurf und Transpiration kann mit i-Tree Eco nicht berechnet werden. Allerdings berechnet i-Tree Eco die Blattfläche der Bäume, die als wesentliche Steuerungsgröße bei der Beschattung fungiert. Für die Berechnung der Beschattungswirkung wird die empirische Arbeit von GILLNER et al. (2015) zugrunde gelegt. In dieser Studie wurden Temperaturdifferenzen zwischen sonnenexponierten und beschatteten Asphaltflächen unter verschiedenen Baumarten in Dresden während einer Hitzeperiode mithilfe von Thermalsequenzen untersucht. Dabei konnten die Autoren einen positiven Zusammenhang zwischen der Absenkung der Oberflächentemperatur und der Blattflächendichte (*Leaf Area Density* LAD) herausstellen und daraus eine lineare Regressionsfunktion ableiten. Auf Basis dieser Regressionsfunktion von GILLNER et al. (2015, 39) wurde die Temperaturabsenkung bei Hitzeperioden folgendermaßen berechnet:



$$T = 2,38 + 4,63 * LAD$$

T = Differenz zwischen baumbeschatteter und sonnenexponierter Asphaltfläche [K];

LAD = Leaf Area Density [ $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ], vgl. GILLNER et al. 2015, 39.

Da i-Tree Eco die Blattfläche [ $\text{m}^2$ ] und den Blattflächenindex (*Leaf Area Index*, LAI) für jeden Baum bestimmt, können diese Parameter zur Berechnung der LAD genutzt werden. Die LAD ergibt sich nach LARCHER (2001) aus der Division zwischen der Blattfläche und dem Kronenvolumen:

$$LAD = LA * V_K^{-1}$$

LAD = Leaf Area Density [ $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ]; LA = Leaf Area [ $\text{m}^2$ ];  $V_K$  = Volumen der Baumkrone [ $\text{m}^3$ ]

$$V_K = B_K^2 * H_K$$

$B_K$  = Kronenbreite [m];  $H_K$  = Kronenhöhe [m]

$$H_K = H_B - H_A$$

$H_B$  = Baumhöhe [m];  $H_A$  = Kronenansatzhöhe [m]

Das Kronenvolumen ( $V_K$ ) wird geometrisch anhand der Baumkatasterdaten berechnet, indem die Kronenbreite quadriert und mit der Kronenhöhe multipliziert wird. Die Höhe der Krone errechnet sich aus der Baumhöhe ( $H_B$ ) abzüglich der Kronenansatzhöhe ( $H_A$ ).

Nach GILLNER et al. (2015) beträgt die maximale Absenkung der Oberflächentemperatur durch den Schattenwurf von Straßenbäumen 16 K bei einer Blattdichte von  $3 \text{ m}^2 \text{m}^{-3}$ . Die Temperaturabsenkung der Bäume wurde daher prozentual (16 K = 100 %) anhand der maximal möglichen Temperaturabsenkung ausgedrückt und in den Dezimalwert (100 % = 1) umgewandelt. Diese anteilmäßige Temperaturabsenkung wird als Gewichtungsfaktor verwendet und mit der durch die Baumart beschatteten Fläche multipliziert. Das Ergebnis stellt die Fläche dar, welche durch die Baumkrone effektiv gekühlt wird und kombiniert zum einen das Vermögen der Temperaturabsenkung pro Baumindividuum und zum anderen die Größe der beschatteten Fläche.

$$A_{\text{eff}} = A_b * T_{\text{Fak}}$$

$A_{\text{eff}}$  = effektiv gekühlte Fläche [ $\text{m}^2$ ];  $A_b$  = beschattete Fläche [ $\text{m}^2$ ];  $T_{\text{Fak}}$  = Temperaturfaktor

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 ÖSL der Straßenbäume im gesamtstädtischen Kontext

Die Bilanzierung der gesamtstädtischen Wirkungen erfolgt ausschließlich für den direkten Wirkungsbereich der Bäume, der als die Summe der Kronenflächen aller betrachteten Baumindividuen definiert wird und die sich auf  $2,95 \text{ km}^2$  beläuft. Die durchschnittliche Emissionsmenge an  $\text{CO}_2$  beträgt in Duisburg  $120.469 \text{ t a}^{-1}$  pro  $\text{km}^2$  (LANUV NRW 2012). Daraus resultiert auf einer Fläche von  $2,95 \text{ km}^2$  ein jährlicher  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von  $355.383 \text{ t a}^{-1}$  im Wirkungsbereich der Bäume. Pro  $\text{km}^2$  und

Jahr werden in Duisburg im Schnitt 212 t Luftschadstoffe ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) und Feinstäube emittiert (LANUV NRW 2012). Im Wirkungsbereich der Bäume ist daher mit einer stofflichen Luftbelastung von  $626 \text{ t a}^{-1}$  zu rechnen.

Tab. 2: Bedeutung der ÖSL der betrachteten 50.000 Bäume im direkten Wirkungsbereich ( $2,95 \text{ km}^2$ ). Datenquelle: LANUV NRW 2012. Für Ozon liegen keine Vergleichswerte vor. Nennenswerte Effekte sind *kursiv* dargestellt.

Tab. 2: Ecosystem services provided by 50.000 trees in their effective range (sum of the crown area =  $2.95 \text{ km}^2$ ). Data source: LANUV NRW 2012. There are no comparative values for ozone in the Emission-Cadastre. Strong effects are highlighted in *italics*.

Ökosystemleistungen	Bäume im Kataster	Städtische Emissionen, Niederschlag, Gesamtfläche im Bereich der Bäume	Anteil
C-Speicherung	21.749 t	–	–
$\text{CO}_2$ -Sequestrierung	$708 \text{ t a}^{-1}$	$355.383 \text{ t a}^{-1}$	0,2 %
Filterfunktion (ohne $\text{O}_3$ )	$16 \text{ t a}^{-1}$	$626 \text{ t a}^{-1}$	2,6 %
$\text{NO}_2$	$6 \text{ t a}^{-1}$	$266 \text{ t a}^{-1}$	2,3 %
$\text{SO}_2$	$3 \text{ t a}^{-1}$	$316 \text{ t a}^{-1}$	0,9 %
$\text{PM}_{10} + \text{PM}_{2,5}$	$7 \text{ t a}^{-1}$	$44 \text{ t a}^{-1}$	15,9 %
$\text{O}_3$	$11 \text{ t a}^{-1}$	–	–
Interzeption	$69.832 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$	$2.382.715 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$	2,9 %
Temperaturabsenkung	97 ha	331 ha	29,3 %

In der Bilanzbetrachtung zeigt sich, dass die Bäume im Kataster diese gesamtstädtischen Emissionen nicht im Entferntesten ausgleichen können (Tab. 2). Durch die Bäume werden nur 0,2 % des jährlich ausgestoßenen  $\text{CO}_2$  sequestriert. Die Filterfunktion beläuft sich auf 2,6 % der ausgestoßenen Menge im Wirkungsbereich der Bäume. Jedoch sollte hier eine differenzierte Betrachtung erfolgen: Die Filterfunktion gegenüber Luftschadstoffen ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) liegt zwischen 0,9 und 2,3 % und ist damit als unerheblich zu bewerten. Hingegen zeigt die Filterfunktion eine hohe Wirkung bei Feinstäuben ( $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ ). Beträchtliche 15,9 % der im Wirkungsbereich der Stadtbäume emittierten Feinstäube werden durch das Blätterdach gefiltert. Da im Emissionskataster NRW keine Informationen zu Ozon vorliegen, kann für diesen Stoff keine Bilanzierung erfolgen. Doch dürfte auch die relative Filterleistung in Bezug auf Ozon nicht unerheblich sein, da die absolute Filterung sich auf 11 t pro Jahr beläuft. Die Interzeption ist hingegen gering. Nur 2,9 % des Niederschlages, der im Wirkungsbereich der Bäume fällt, wird zurückgehalten. Die Temperaturabsenkung deutet hingegen wieder auf eine bedeutende Funktion hin: 29,3 % der Fläche im Wirkungsbereich wird effektiv gekühlt.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten auch BARÓ et al. (2014) in ihrer i-Tree-Studie für die Stadt Barcelona. Hier filterten die Bäume ebenfalls weniger als 1 % der städ-

tischen  $\text{NO}_2$ -Emissionen, jedoch bis zu 22 % der Feinstaubemissionen. Eine empirische Studie von LANGNER (2002) unterstreicht ebenfalls die Größenordnung. So filterte ein Einzelbaum (*Acer platanoides*) etwa 11 % der am Standort emittierten Feinstäube. DOCHINGER (1980) maß in einem Laubbaumbestand eine Reduzierung der Feinstäube um bis zu 30 %. Auch hinsichtlich der  $\text{CO}_2$ -Sequestrierung stimmen die Ergebnisse mit der Studie aus Barcelona gut überein. So verdeutlichen BARÓ et al. (2014), dass die jährliche Sequestrierung äquivalent zu den  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist, die 0,38 % der Stadtbevölkerung (6.000 Einwohner) von Barcelona in einem Jahr emittieren (CHAPPARO & TERRADAS 2009). Somit bleibt festzuhalten, dass die betrachteten Straßenbäume insbesondere bei der Feinstaubfilterung und der Absenkung der Oberflächentemperatur großes Potential zeigen, die Funktionen der Filterung von Luftschadstoffen und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen jedoch von untergeordneter Bedeutung sind. Die hydrologische Regulationsleistung ist gering, weil die Interzeptionskapazität von Bäumen im Vergleich zur Niederschlagshöhe bei Starkregenereignissen nur einen Bruchteil ausmacht.

### 3.2 Artspezifische Bewertung

Um einen Überblick über die artspezifischen Ausprägungen der ÖSL zu erhalten, werden die in Duisburg vorkommenden Baumarten anhand ihrer durchschnittlichen regulativen Wirkungen (C-Speicherung,  $\text{CO}_2$ -Sequestrierung, Filterleistung, Beschattungswirkung, Interzeption) in vier Klassen (sehr hoch, hoch, mittel, niedrig) eingeteilt. Die Einteilung in die Klassen erfolgt in Anlehnung an die Methode der natürlichen Unterbrechungen (*natural breaks*). Diese sieht vor, dass bei enger Streuung der Ergebnisse eine Feingliederung der Klassen erfolgt, während die Klasseneinteilung großzügiger wird, wenn die Ergebnisse über einen größeren Wertebereich streuen. Das Ziel des Ansatzes ist es, die Unterschiede innerhalb einer Klasse zu minimieren und die Unterschiede zwischen den Klassen zu maximieren (JENKS & CASPALL 1971). Jedoch wird auf eine gleichmäßige Verteilung der Baumarten zwischen den Klassen geachtet. Eine qualitative Einteilung muss deshalb erfolgen, weil keine Vergleichswerte vorliegen. Vier Gruppen werden gewählt, um eine mittlere Gruppe zu vermeiden, sodass direkt Tendenzen (überdurchschnittlich, unterdurchschnittlich) erkennbar werden (Tab. 3).

Tab. 3: Klasseneinteilung zur Bewertung der ÖSL der Baumarten

Tab. 3: Classification for assessing ecosystem services which are provided by tree species

Klasse	C-Speicherung [kg]	$\text{CO}_2$ -Sequestrierung [ $\text{kg a}^{-1}$ ]	Filterleistung [ $\text{g a}^{-1}$ ]	Beschattung [ $\text{m}^2$ ]	Interzeption [ $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ ]
Sehr hoch (4)	250–1.250	20–40	500–1.100	20–50	1–3
Hoch (3)	150–249	10–19	250–499	12–19	0,5–0,9
Mittel (2)	85–149	5–9	100–249	6–11	0,25–0,4
Gering (1)	<85	<5	<100	<6	<0,25

Tab. 4: Bewertung der einzelnen Baumarten anhand ihrer durchschnittlichen Erfüllung von ÖSL.\* = Wirkung wird auf langfristige Sicht unterschätzt.  
 Tab. 4: Assessment of ecosystem services which are provided by different tree species, depending on their average value.\* = Long-terms effects are underrated.

Baumart	C	CO <sub>2</sub>	Filte- rung	Beschat- tung	Inter- zeption	Bewertung
<i>Aesculus hippocastanum</i>	4	4	4	4	4	alle Wirkungen über- durchschnittlich
<i>Ailanthus altissima</i>	4	4	4	4	4	
<i>Fagus sylvatica</i>	4	4	4	4	4	
<i>Platanus x acerifolia</i>	4	4	4	4	4	
<i>Quercus rubra</i>	4	4	4	4	4	
<i>Acer saccharinum</i>	4	3	4	4	4	
<i>Tilia tomentosa</i>	4	3	4	4	4	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	4	4	3	3	4	
<i>Tilia cordata</i>	4	3	4	3	4	
<i>Tilia x euchlora</i>	4	3	4	3	4	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	4	3	3	3	4	
<i>Quercus palustris</i>	4	3	3	3	3	
<i>Quercus robur</i>	4	3	3	3	3	
<i>Acer platanoides</i> 'Cleveland'	3	3	3	3	3	
<i>Tilia platyphyllos</i>	3	2	3	3	4	nur 1 Wirkung unter- durchschnittlich
<i>Acer platanoides</i>	3	2	3	3	3	CO <sub>2</sub> -Sequestrierung ↓
<i>Sophora japonica</i>	3	2	3	3	3	
<i>Betula pendula</i>	4	3	3	2	3	Beschattung ↓
<i>Prunus serrulata</i> 'Kanzan'	3	3	2	2	2	2–3 Wirkungen unter- durchschnittlich
<i>Alnus glutinosa</i>	2	2	3	2	3	
<i>Carpinus betulus</i>	2	2	2	2	3	nur 1 Wirkung über- durchschnittlich
<i>Corylus colurna</i>	2	2	2	2	3	
<i>Tilia x intermedia</i>	2	2	2	2	3	
<i>Liquidambar styraciflua</i>	2	1	2	2	3	
<i>Tilia x vulgaris</i> 'Pallida'*	2	1	2	2	3	
<i>Liquidambar styraciflua</i> 'Burgundy'	1	1	2	2	3	Interzeption ↑
<i>Crataegus monogyna</i>	2	2	3	2	2	Filterfunktion ↑
<i>Fraxinus excelsior</i> *	2	2	3	2	2	
<i>Fraxinus excelsior</i> 'Westhof Glorie'*	1	1	3	2	2	

Modellierung ausgewählter Ökosystemleistungen von Stadtbäumen

Baumart	C	CO <sub>2</sub>	Filte- rung	Beschat- tung	Inter- zeption	Bewertung
<i>Acer campestre</i>	2	2	2	2	2	unterdurchschnittliche Wirkungen
<i>Acer platanoides</i> 'Globosum'	2	2	2	2	2	
<i>Crataegus lavallei</i> 'Carrierei'	2	2	2	2	2	
<i>Gleditsia triacanthos</i>	2	2	2	2	2	
<i>Sorbus aria</i>	2	2	2	2	2	
<i>Alnus x spaethii</i>	1	2	2	2	2	
<i>Fraxinus angustifolia</i> 'Raywood'*	1	1	2	2	2	
<i>Robinia pseudoacacia</i> 'Umbraculifera'	2	2	1	2	1	
<i>Crataegus laevigata</i> 'Paul Scarlet'	1	2	1	2	1	
<i>Prunus cerasifera</i> 'Nigra'	1	2	1	2	1	
<i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata'	1	1	2	1	2	
<i>Acer platanoides</i> 'Columnare'	1	1	1	1	2	
<i>Amelanchier lamarckii</i>	1	1	1	1	1	keine nennenswerten Wirkungen
<i>Carpinus betulus</i> 'Frans Fontaine'	1	1	1	1	1	
<i>Fraxinus ornus</i>	1	1	1	1	1	
<i>Ginkgo biloba</i>	1	1	1	1	1	
<i>Prunus serrulata</i>	1	1	1	1	1	
<i>Pyrus calleryana</i> 'Chanticleer'	1	1	1	1	1	
<i>Quercus robur</i> 'Fastigiata'	1	1	1	1	1	
<i>Sorbus aucuparia</i>	1	1	1	1	1	
<i>Sorbus aucuparia</i> 'Fastigiata'	1	1	1	1	1	
<i>Sorbus aucuparia</i> var. <i>edulis</i>	1	1	1	1	1	
<i>Sorbus thuringiaca</i> 'Fastigiata'	1	1	1	1	1	

Je nachdem ob die Baumarten überdurchschnittliche (sehr hoch bis hoch) oder unterdurchschnittliche (mittel bis gering) regulative Wirkungen zeigen, werden die Arten gruppiert (Tab. 4). Individuen der Baumarten *Platanus x acerifolia*, *Acer saccharinum*, *Aesculus hippocastanum*, *Fagus sylvatica*, *Ailanthus altissima*, einige *Quercus*-Arten (*Quercus palustris*, *Q. palustris*, *Q. robur*), *Robinia pseudo-acacia*, *Tilia cordata*, *Tilia x euchlora*, *Acer pseudoplatanus* und *A. platanoides* 'Cleveland' haben im Baumkataster bereits stattliche Größen erreicht und erzeugen überdurchschnittliche regulative Ökosystemleistungen. *Tilia platyphyllos*, *Acer platanoides* und *Sophora japonica* sind unterdurchschnittlich in der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, während *Betula pendula* ein Defizit in der Beschattungswirkung aufweist, in den übrigen ÖSL jedoch überdurchschnittlich abschneidet.

Das Ergebnis vermag nur eine Übersicht über den Ist-Zustand der ÖSL zu geben, die im Baumkataster enthalten sind. Bei Arten, die mit vielen Jungpflanzen und wenigen ausgewachsenen Exemplaren im Kataster vertreten sind, sind die Wirkungen geringer ausgeprägt als bei Arten, die nur mit sehr großen Individuen in die Analyse eingehen. So ist es auch zu erklären, dass manche Großbäume, wie *Fraxinus excelsior* (inkl. Sorten) und *Tilia x vulgaris* 'Pallida' nur in einer Wirkung überdurchschnittlich sind und *Fraxinus angustifolia* 'Raywood' sogar in allen Wirkungen unterdurchschnittlich ist. Ursächlich dafür ist, dass die Individuen dieser Arten im Kataster nur mit einem durchschnittlichen BHD von 12–25 cm erfasst sind. Bei diesen Baumarten sind aber Durchmesser von bis zu 60 cm durchaus möglich. Aufgrund dessen werden diese Arten durch die Modellierung in ihren längerfristigen Wirkungen unterschätzt.

### 3.3 Räumliche Bewertung

Häufig sind Baumkataster mit Geographischen Informationssystemen kompatibel oder liegen ausschließlich in Form von Geodaten vor. Durch die räumliche Verortung der Bäume können deren ÖSL nicht nur artspezifisch, sondern auch standort- und flächenbezogen ausgewertet werden. Zur Veranschaulichung werden im Folgenden die Straßenzüge hervorgehoben, die aktuell besonders gut und besonders schlecht hinsichtlich baumspezifischer ÖSL abschneiden (Tab. 5).

Die besten Wirkungen hinsichtlich ÖSL sind in der Voßstraße in Obermeiderich und in der Königsberger Allee gegeben. Beide Wohnstraßen sind überwiegend durch alte, großkronige Platanen (*Platanus x acerifolia*, *P. occidentalis*) gekennzeichnet. In der Voßstraße werden pro Baum die höchsten Wirkungen erzielt, während in der Königsberger Allee in der Summe die höchsten Wirkungen gewährleistet werden (Abb. 2). Die aktuell niedrigsten Wirkungen sind an der Schifferstraße am Innenhafen und an der Europaallee im Gewerbegebiet Friemersheim gegeben (Abb. 3). In beiden Straßen wurden erst vor wenigen Jahren überwiegend junge Eschen (*Fraxinus excelsior*) und Linden (*Tilia platyphyllos*) gepflanzt, die entsprechend noch keine große Blatt- und Biomasse ausbilden konnten. Da es sich bei beiden Arten um Großbaumarten handelt, dürfte zukünftig mit einer Verbesserung der ÖSL in diesen Straßen gerechnet werden (Abb. 2 u. 3).



Tab. 5: ÖSL ausgewählter Straßenzüge in Duisburg. In *kursiv* sind die niedrigsten bzw. die höchsten Werte dargestellt.

Tab. 5: Ecosystem services provided by trees in selected streets in Duisburg. Very high and very low values are highlighted in *italics*.

Straße	Anzahl	C-Speicherung [t]		CO <sub>2</sub> -Sequestrierung [kg a <sup>-1</sup> ]		Filterwirkung [kg a <sup>-1</sup> ]		Effektiv gekühlte Fläche [m <sup>2</sup> ]		Interzeption [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]	
		Mittel	Gesamt	Mittel	Gesamt	Mittel	Gesamt	Mittel	Gesamt	Mittel	Gesamt
<i>Straßen mit der höchsten Ausprägung der ÖSL</i>											
Vußstraße	50	3,5	176,5	62,8	3.141,3	2,1	105,8	66,6	3.330,6	6,3	316,7
Königsberger Allee	104	1,5	158,9	39,9	<i>4.152,1</i>	1,8	<i>183,2</i>	62,0	<i>6.443,5</i>	5,2	<i>542,6</i>
<i>Straßen mit der niedrigsten Ausprägung der ÖSL</i>											
Schifferstraße	237	<i>0,02</i>	4,3	2,8	669,1	<i>0,06</i>	14,5	3,7	887,5	<i>0,12</i>	28,5
Europaallee	62	<i>0,02</i>	<i>1,1</i>	3,4	<i>211,6</i>	0,07	<i>4,4</i>	3,5	<i>217,1</i>	<i>0,12</i>	<i>7,4</i>

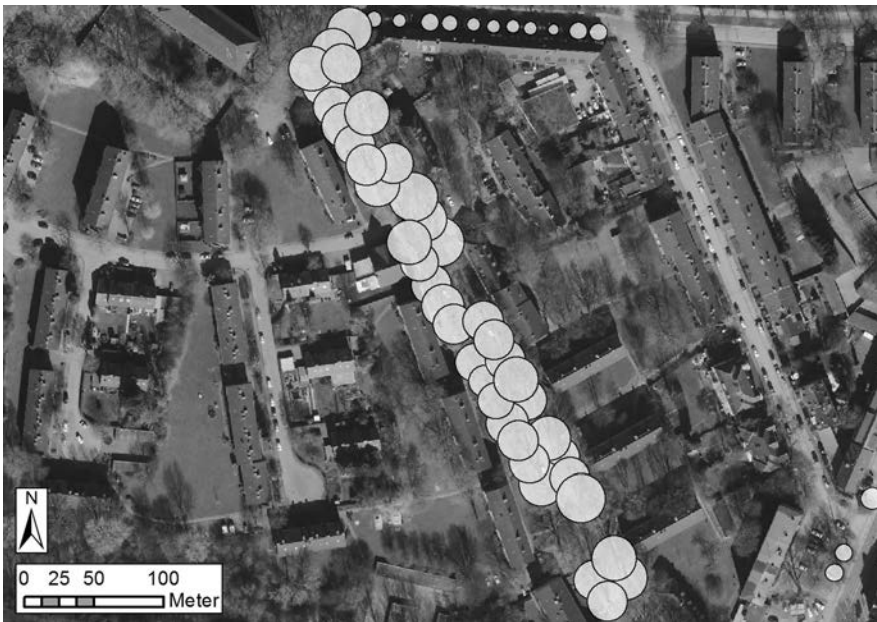


Abb. 2: Baumkronen des Baumbestands der Voßstraße in Obermeiderich, dargestellt anhand des Kronenradius. Datengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.

Fig. 2: Tree canopy in the Voßstraße in Obermeiderich, plotted by the crown radius. Data source: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.



Abb. 3: Baumkronen der Schifferstraße am Duisburger Innenhafen, dargestellt anhand des Kronenradius. Datengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.  
Fig. 3: Tree canopy in the Schifferstraße located at the inland port from Duisburg, plotted by the crown radius. Data source: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2016.

#### 4 Diskussion und Methodenkritik

Diese Arbeit zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Regulationsleistungen mit Baumkatasterdaten zu modellieren, um einen ersten Eindruck über die artspezifische und räumliche Ausprägung der regulativen ÖSL von Stadtbäumen zu erhalten. Die dargelegte Methode ist kostengünstig, wenig zeitaufwändig und auf jedes kommunale Baumkataster anwendbar, das eine vergleichbare oder bessere Datengrundlage als das vorliegende Baumkataster bietet. Die Kommune erhält einen Zustandsbericht über den Ist-Zustand der baumspezifischen ÖSL auf räumlicher und artspezifischer Ebene. Aus den so erhobenen Kenntnissen können defizitäre Räume identifiziert und Planungsszenarien zur Verbesserung der klimatischen Leistungen entworfen werden. Dadurch lassen sich klimatische Wohlfahrtswirkungen für die Stadtbewohner verbessern. Auch können in Planungsprozessen die Werte von Bäumen beziffert werden, um sie als entscheidungsrelevante Argumente in Abwägungsentscheidungen zu berücksichtigen. Die durch das Programm berechnete Blattfläche kann zur Quantifizierung der effektiv gekühlten Fläche verwendet werden, wie hier anhand einer innovativen Berechnungsmethode dargestellt wird. Die Quantifizierung von regulativen, stadtklimatisch wirksamen ÖSL kann erfolgreich als neuer Anwendungsbereich für Baumkatasterdaten bestätigt werden. Dabei stellen die hier vorgestellten artspezifischen und räumlichen

Auswertungen nur erste Ansätze dar, wie die Ergebnisse einer solchen Modellierung genutzt werden können.

Modelle wie das vorgestellte ermöglichen eine Ersteinschätzung der von Stadtbäumen erbrachten Dienstleistungen. Dabei ist ihre Praxistauglichkeit hervorzuheben: Empirische Erhebungen zu klimatischen Regulationsleistungen sind kostenintensiv, zeitaufwändig und übersteigen häufig den Nutzen, den eine Kommune aus solchen Erhebungen ziehen kann. Um einen Mehrwert für die Praxis und die Gesellschaft zu generieren, ist es daher notwendig, die bisher geleistete Grundlagenforschung in vereinfachte, allgemein anwendbare Modelle zu überführen. Eine wesentliche Rolle spielt dabei jedoch, welches Modell mit welchen Annahmen angewendet wird. AGUARON & MCPHERSON (2012) berechneten die C-Speicherung und CO<sub>2</sub>-Sequestrierung mit verschiedenen Modellen für die Stadtbäume Sacramentos. Dabei erzielte i-Tree Eco bei den meisten Baumarten die konservativste Schätzung der ÖSL. Insgesamt schwankten die Ergebnisse in der C-Speicherung um 29 % (38–49 t ha<sup>-1</sup>) und bei der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung um 55 % (1,8–2,8 t ha<sup>-1</sup>).

Neben den grundlegenden Einschränkungen, die das i-Tree Eco Modell birgt, kommen in dieser Arbeit weitere Ungenauigkeiten hinzu, die sich aus dem Datenumfang des Baumkatasters ergeben. Da es sich beim Duisburger Baumkataster in erster Linie um ein administratives Verzeichnis zur Baumkontrolle handelt, war es erst nach Erweiterungen für die Analyse mit i-Tree Eco einsetzbar. Wesentliche Parameter (z. B. Kronenansatz, Baumhöhe, Lichtexposition der Krone) fehlten zur Modellierung. Sie wurden in diesem Beitrag auf der Grundlage empirischer Daten aus einem Vergleichsraum mit (geo-)statistischen Verfahren ermittelt, zum Teil generalisiert und vereinfacht. Sie können demnach diverse Unsicherheiten und Fehlerquellen besitzen. An dieser Stelle ist an die Praxis zu appellieren, bei der Baumkontrolle zumindest leicht zu erhebende Parameter, wie Baumhöhe und Kronenansatz, zukünftig mit zu erfassen, um die potentiellen Unschärfen zu minimieren.

Die Ermittlung der Temperaturabsenkung durch den Schattenwurf und die Transpiration von Bäumen ist in i-Tree Eco bisher nicht integriert. Die Grundlagenforschung steht bei dieser ÖSL gerade erst am Anfang (DONOVAN & BUTRY 2009, HARDIN & JENSEN 2007, LEHMANN et al. 2014, MOSER et al. 2015), sodass noch keine abgesicherten Modellierungen möglich sind. In dieser Arbeit wird auf eine empirische Studie aus Dresden zurückgegriffen, die die Absenkung der Oberflächentemperatur prognostiziert. Jedoch ist die Oberflächentemperatur selten äquivalent zur Lufttemperatur, die für den Menschen direkt fühlbar ist. Daher gibt die effektiv gekühlte Fläche lediglich einen Hinweis auf das potentielle Kühlvermögen der Bäume. Eine Möglichkeit, die Einflussgrößen der Lufttemperaturreduktion und/oder den Zusammenhang zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur bei verschiedenem Untergrund in urbanen Räumen zu untersuchen, bietet die Simulationssoftware ENVI-met, die bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen zur Analyse des Einflusses von Stadt- und Freiraumstrukturen auf das Mikroklima eingesetzt wurde (SCHIRMANN & HOF 2015). Außerdem wäre die Untersuchung von GILLNER et al. (2015) in anderen Städten zu wiederholen, um die Muster zu stützen und die Regressionsgleichung zu verbessern.

Insgesamt stellt die vorliegende Modellierung den Ist-Zustand der ÖSL auf Duisburger Stadtgebiet dar, und zwar in einer vom Duisburger Baumkataster abhängigen Genauigkeit. Mit der Kartierung weiterer Bäume in Parks, Privatgärten und Wäldern könnten räumliche Lücken geschlossen werden. Auch fehlen vergleichbare Grünstrukturen wie Hecken in der Betrachtung, die in kompakter Form ein hohes Feinstaubfilterungspotential aufweisen können. Temporale Veränderungen der Regulationsleistungen durch das Wachstum von Bäumen sind zurzeit noch nicht berücksichtigt. Jedoch ist es zukünftig möglich, aus den bereits modellierten Bäumen artspezifische Gleichungen zu entwickeln, um fehlende Bäume zu ergänzen. Wenn die standortabhängige und artspezifische Wuchsleistung der Bäume bekannt ist (jährliche Zunahme an Blattfläche und Biomasse; Höhe und BHD), sind Prognosen der zukünftigen Regulationsleistungen von Bäumen möglich.

## 5 Fazit

Gemessen an den gesamtstädtischen Emissionen tragen die bewerteten Straßenbäume derzeit nur geringfügig zur Minderung bei. Nennenswerte Effekte im Wirkungsbereich zeigen die Bäume dagegen bei der Feinstaubfilterung (16 % der im Wirkungsbereich entstehenden Feinstäube) und der Beschattungswirkung (29 % des Wirkungsbereichs der Bäume wird effektiv gekühlt). Die wichtigsten physiologischen und morphologischen Eigenschaften zur Gewährung der betrachteten ÖSL sind die Biomasse und die Blattfläche. Dabei gelten: Je größer die Biomasse, desto höher ist die C-Speicherung und CO<sub>2</sub>-Sequestrierung und je größer die Blattfläche, desto größer ist die Interzeption, die Filterwirkung und die Temperaturabsenkung. Das führt dazu, dass vor allem breitkronige Großbäume mikroklimatisch wirksam sind, während der Beitrag schmalkroniger und kleinwüchsiger Baumarten deutlich geringer ausfällt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Baumart bei der Anpflanzung vor dem Gesichtspunkt der Regulationsleistungen zweitrangig ist, solange die Art an ihrem Pflanzstandort vital ist, gut gedeiht und damit viel Bio- und Blattmasse produziert. Um klimatische ÖSL zu fördern, sollte die Baumpflanzung daher standortgerecht und mit dem Hinblick auf den Klimawandel erfolgen, um eine hohe Vitalität des Straßenbaums an seinem Wuchsort zu garantieren.

## Literatur

- AGUARON, E., & E. G. MCPHERSON 2012: Comparison of Methods for Estimating Carbon Dioxide Storage of Sacramento's Urban Forest. In: LAL, R. & B. AUGUSTIN (Eds.): Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Heidelberg/London/New York, S. 43–72.
- ALBERT, C., C. GALLER, J. HERMES, F. NEUENDORF, C. VON HAAREN & A. LOVETT 2016: Applying ecosystem services indicators in landscape planning and management: The ES-in-Planning framework. In: Ecological Indicators 61, S. 100–113.
- ALBERT, C., J. ARONSON, C. FÜRST & P. OPDAM 2014: Integrating ecosystem services in landscape planning: requirement, approaches and impacts. In: Landscape Ecology 29, S. 1277–1285.

- BARÓ, F., L. CHAPARRO, E. GÓMEZ-BAGGETHUN, J. LANGEMEYER, D. J. NOWAK & J. TERRADAS 2014: Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forest in Barcelona, Spain. In: *AMBIO* 43, S. 466–479.
- BECKETT, K. P., P. H. FREER-SMITH & G. TAYLOR 1998: Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. In: *Environmental Pollution* 99, S. 347–360.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (HRSG.) 2016: DOP20, web map service. URL: [https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dop20](https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dop20). Für den Abdruck gilt die Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Lizenztext unter [www.govdata.de/dl-de/by-2-0](http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0). (letzter Zugriff 18.01.2017).
- BÖHLMANN, D. 2013: *Gehölzbiologie*. Wiebelsheim.
- CHAPARRO, L. & J. TERRADAS 2009: *Ecological Services of Urban Forest in Barcelona*. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Barcelona.
- DOCHINGER, L. S. 1980: Interception on airborne particles by tree planting. In: *Journal of environmental quality* 9, S. 265–268.
- DONOVAN, G. H. & D. T. BUTRY 2009: The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. In: *Energy and Buildings* 41, S. 662–668.
- DOOBE, G. 2008: *Digitales Baumkataster*. Empfehlungen des Arbeitskreises Stadtbäume der GALK für Aufbau und Fortschreibung. In: *Stadt + Grün* 10/2008, S. 14–19.
- FLOHR, S. 2010: *Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub (PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt- und Achsenoberfläche und der Einwirkung von Staubauflagen auf die Lichtreaktion der Photosynthese*. Dissertation an der Universität Duisburg-Essen.
- FOREST SERVICE 2016: *i-Tree Eco User's Manual*, Version 6.0. New York.
- GALK – DEUTSCHE GARTENAMTSLEITERKONFERENZ 2016: *Straßenbaumliste*. URL: [http://www.galk.de/arbeitskreise/ak\\_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/](http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/) (letzter Zugriff 30.11.2016).
- GI Geoinformatik GmbH 2012: *ArcGIS 10.1 und 10.0: Das deutschsprachige Handbuch für ArcGIS for Desktop Basics & Standards*. Berlin.
- GILLNER, S., M. HOFMANN, A. THARANG & J. VOGT 2016: Development of a database for urban trees. In: ROLOFF, A. (Ed.): *Urban tree management. For the sustainable development of green cities*. Hoboken, NJ, S. 196–210.
- GILLNER, S., J. VOGT, A. THARANG, S. DETTMANN & A. ROLOFF 2015: Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. In: *Landscape and Urban Planning* 143, S. 33–42.
- HAMM, A. 2016: *Urbane Wälder – Alternative zu traditionellen Grünflächen?* In: *Stadt + Grün* 1, S. 35–40.
- HARDIN, P. J. & R. R. JENSEN 2007: The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 6, S. 63–72.
- HEILAND, S., R., KAHL, H. SANDER & R. SCHLIEP 2016: *Ökosystemleistungen in der kommunalen Landschaftsplanung*. Möglichkeiten zur Integration. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48, S. 313–320.
- IBM – International Business Machines Corporation 2013: *IBM SPSS Statistics 22 Core-System Benutzerhandbuch*.
- JENKS, G. F. & F. C. CASPALL 1971: Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. In: *Annals of the Association of American Geographers* 61, 2, 217–244.
- JUNGMEIER, M. 2016: 42! – Zur Monetarisierung von Ökosystemleistungen aus planerischer und naturschutzpraktischer Perspektive. Das Konzept auf dem Prüfstand und der Bedarf der Forschung. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48, S. 241–247.



- KOWARIK, I., R. BARTZ & M. BRECK (HRSG.) 2016: Naturkapital Deutschland – TEEB DE: Ökosystemleistungen in der Stadt. Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Berlin, Leipzig: Technische Universität; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ.
- KRONENBERG, J. 2015: Why not to green a city? Institutional barriers to preserving urban ecosystem services. In: *Ecosystem Services* 12, S. 218–227.
- KUTTLER, W. 2011: Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen. In: *Environmental Science Europe* 23, 11.
- LANUV NRW – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN 2016: Stündliche Immissionswerte an kontinuierlich messenden Station in Duisburg. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/stationen-und-messwerte/> (letzter Zugriff 30.11.2016).
- LANUV NRW – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN 2012: Online-Emissionskataster Luft NRW. URL: <http://www.ekl.nrw.de/ekat/> (letzter Zugriff 30.11.2016).
- LANGNER, M. 2002: Analysen zur Staubauflage auf Bäume (*Acer platanoides*) innerstädtischer Standorte. Karlsruhe (= Karlsruhe Berichte zur Geographie und Geoökologie, 15).
- LARCHER, W. 2001: Ökophysiologie der Pflanzen. Stuttgart.
- LEHMANN, I., J. MATHEY, S. RÖSSLER, A. BRÄUER & V. GOLDBERG 2014: Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects. In: *Ecological Indicators* 42, S. 58–72.
- MOSER, A., T. RÖTZLER, S. PAULEIT & H. PRETZSCH 2015: Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata*) and black locust (*Robinia pseudoacacia*) in urban environments. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 14, S. 1110–1121.
- NOWAK, D. J., D. E. CRANE & C. S. JACK 2006: Air pollution removal by urban trees in the United States. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 4, S. 115–123.
- NOWAK, D. J. & D. E. CRANE 2002: Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. In: *Environmental Pollution* 116, S. 381–389.
- PEPER, P. J., E. G. MCPHERSON & S. M. MORI 2001: Equations for predicting Diameter, Height, Crown Width and Leaf Area of San Joaquin Valley Street Trees. In: *Journal of Arboriculture* 27, 6, S. 306–317.
- ROGERS, K., K. SACRE, J. GOODENOUGH & K. DOICK 2015: Valuing London's Urban Forest. Results of the London i-Tree Eco Project. London.
- ROLOFF, A. & A. BÄRTELS 2006: Flora der Gehölze. Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung. Stuttgart.
- RUSO, A., F. J. ESCOBEDO & S. ZERBE 2016: Quantifying the local-scale ecosystem services provided by urban tree streetscapes in Bolzano, Italy. In: *AIMS Environmental Science* 3, 1, S. 58–76.
- SANDERS, R. A. 1986: Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio. In: *Urban Ecology* 9, S. 361–376.
- SCHIRMANN, A. & A. HOF (2015): Gezielte urbane Freiraumgestaltung wider den Hitze-stress. Prospektiv-modellierende mikroklimatische Analysen zur innerstädtischen Freiraumgestaltung. In: *Berichte. Geographie und Landeskunde* 89, 3, S. 237–256.
- STROHBACH, M. W. & D. HAASE 2012: Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. In: *Landscape and Urban Planning* 104, S. 95–104.
- TAKASHI, M., A. HIGAKI, M. NOHNO, M. KAMADA, Y. OKAMURA, K. MATSIU, S. KITANI & H. MORIKAWA 2005: Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level. In: *Chemosphere* 61, S. 633–639.



- VOGT, J., S. GILLNER, A. THARANG, S. DETTMANN, M. HOFMANN & T. GERSTENBERG 2015: Die Citree Datenbank – für eine standortangepasste Gehölzartenauswahl in Städten. URL: <http://citree.ddns.net/database.php#> (letzter Zugriff 30.11.2016).
- WBGU – WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Berlin.
- WITTIG, R., W. KUTTLER & O. TACKENBERG 2012: Urban-industrielle Lebensräume. In: MOSBRUGGER, V., G. BRASSEUR, M. SCHALLER & B. STRIBRNY (Hrsg.): Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland. Darmstadt, S. 290–307.
- XIAO, Q., E. G. MCPHERSON, J. R. SIMPSON & S. L. USTIN 1998: Rainfall interception by Sacramento's urban forest. In: *Journal of Arboriculture* 24, 4, S. 235–244.