



Ökosystemdienstleistungen von Straßenbäumen

Etablierung eines webbasierten Umweltinformationssystems

Master Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (GIS)

vorgelegt im Rahmen des Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“ (UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS) der
Paris-Lodron-Universität Salzburg

von:

Dipl.-Geogr. Jens Weinert

U1440, UNIGIS MSc Jahrgang 2009

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. J. Strobl

Leipzig, den 18. Dezember 2011

Diese Arbeit wurde mit Hilfe von KOMA-Script und L^AT_EX gesetzt und auf 100% Recyclingpapier (FSC[®]) gedruckt.

Danksagung

Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen wäre eine Realisierung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Ich möchte mich an dieser Stelle bei den Personen bedanken, die mir während der Umsetzung der Arbeit hilfreich zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Geoök. Michael Strohbach. Er gab den Anstoß zu dieser Arbeit und war während der gesamten Zeit ein stets kompetenter und immer erreichbarer Ansprechpartner. Er half mir in den entscheidenden Momenten das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Ein großer Dank gilt auch Frau Prof. Dr. Dagmar Haase für ihre kritische Durchsicht der Arbeit und die Einräumung des zeitlichen Rahmen zur Bearbeitung. Ein Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Inf. Florian Thürkow für seine vielen technischen Hinweise und Ratschläge. Danken möchte ich außerdem Herrn Prof. Dr. Josef Strobl für die Annahme des Themas und die professionelle Begleitung während des Studiengangs.

Der größte Dank gilt meiner Familie für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und vor allem ihre Geduld über die gesamte Studiendauer.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11
1.1	Motivation und Ziele der Arbeit	12
1.2	Struktur der Arbeit	13
2	Grundlagen	15
2.1	Untersuchungsgebiet und -gegenstand	15
2.1.1	Leipzig	15
2.1.2	Straßenbäume	16
2.1.3	Ökosystemdienstleistungen	20
2.1.4	Umweltinformationssysteme	23
2.1.5	Geo-Dienste und deren Bereitstellung	24
2.2	Stand der Forschung	27
3	Materialien und Methodik	33
3.1	Berechnung der Ökosystemdienstleistungen	33
3.1.1	Das Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig	33
3.1.2	Auswahl der Referenzstadt	37
3.1.2.1	Biophysikalische Bedingungen	37
3.1.2.2	Die Auswahl von Fort Collins, CO als Referenzstadt	41
3.1.3	<i>i-Tree Streets</i>	44
3.1.4	Nutzung der Basisdaten aus <i>i-Tree Streets</i>	45
3.1.4.1	Bindung von Kohlenstoffdioxid	47
3.1.4.2	Bindung von Luftschadstoffen	48
3.1.4.3	Verminderung des Oberflächenabflusses	48
3.2	Umsetzung in ein Umweltinformationssystem	49
3.2.1	Erstellung der Datenbank	50
3.2.2	Veröffentlichung des WMS auf dem <i>GeoServer</i>	51
3.2.3	Visualisierung mit <i>OpenLayers</i>	52
3.2.4	Definition der Filter	54
3.2.5	Abfragen der Ökosystemdienstleistungen	55
3.2.6	Konzeption und Design der Website	56
4	Ergebnisse	59
4.1	Die berechneten Ökosystemdienstleistungen	59
4.2	Die Website <i>www.strassenbaum-leipzig.info</i>	67
5	Diskussion	71
5.1	Methodendiskussion Ökosystemdienstleistungen	71
5.2	Ergebnisdiskussion Ökosystemdienstleistungen	72
5.3	Methodendiskussion Umweltinformationssystem	77
5.4	Ergebnisdiskussion Umweltinformationssystem	78

6 Zusammenfassung und Ausblick	81
7 Referenzen	83
Literatur	83
Internetseiten	87
8 Anhang	89
Selbständigkeitserklärung	105

Tabellenverzeichnis

2.1	Positive Wirkungen von urbanen (Straßen-) Bäumen	18
2.2	Ursachen von Schäden und Wachstumsbeeinträchtigungen an Straßenbäumen	19
2.3	Eigenschaften des idealen Straßenbaums	20
2.4	Durch urbane Ökosysteme generierte lokale Dienstleistungen (hervorgehoben sind die in dieser Untersuchung quantifizierten Dienstleistungen)	23
3.1	Jährliche Heating Degree Days (HDD), Cooling Degree Days (CDD) und Growing Degree Days (GDD) der 16 Referenzstädte in den USA und Leipzigs mit Basistemperaturen	39
3.2	Jährlicher Niederschlag in den 16 Referenzstädten der USA und in Leipzig sowie deren geographische Lage	40
3.3	Normalisierte Intervallwerte (erste Spalte) und zugehörige Differenzwerte der fünf Kriterien	42
3.4	Absolutwerte, Differenzwerte $[(ABS(Leipzig - Referenzstadt))]$ und normalisierte Werte für Leipzig und sieben Referenzstädte	43
3.5	Root Mean Squared Errors (RMSE) berechnet mit gleich gewichteten Koeffizienten (jeweils 0,2) und ungleich gewichteten Koeffizienten* für jedes Auswahlkriterium	43
3.6	Zuordnung der Leipziger Baumarten zu den Arten der Referenzstadt (Auszug)	45
4.1	Absolute und relative Anteile, Basalflächen sowie Verteilung der von den Straßenbäumen erbrachten Ökosystemdienstleistungen pro Jahr nach Gattungen .	60
4.2	Verteilung des in den Straßenbäumen gebundenen Kohlenstoffs seit Anpflanzung und Basalflächen nach Gattungen	63
4.3	Gebundene Luftschadstoffe und freigesetzte flüchtige organische Verbindungen pro Jahr nach Gattungen	65
4.4	Durch die Straßenbäume reduzierte Menge des Oberflächenabflusses nach Gattungen	67
5.1	Durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat pro Baum der Leipziger Straßenbäume im Vergleich zu den Ergebnissen von FRENZEL (2009) und zur Stadt Chicago, IL (NOWAK, 1994b)	73
5.2	Jährliche Bindung von Ozon (O_3) ausgewählter Baumarten in Leipzig, Mailand und Florenz	75
8.1	Landnutzungsverteilung in der Stadt Leipzig	89
8.2	Species Codes der Baumarten der Referenzstadt und die Zuordnung von Assigned Species Values nach Baumtyp zur Verknüpfung mit den zugrunde liegenden Wachstumskurven	97
8.3	Erbrachte Ökosystemdienstleistungen pro Jahr nach Ortsteil	103
8.4	Gebundene Luftschadstoffe und freigesetzte flüchtige organische Verbindungen pro Jahr nach Ortsteil	104

Abbildungsverzeichnis

2.1	Landnutzung in der Stadt Leipzig	17
2.2	<i>Platanus x acerifolia</i> in der Johannisallee	19
2.3	Wichtige Faktoren in einem Modell zur Auswahl der Gehölzart in Städten . .	21
2.4	Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen	22
2.5	Funktionsweise eines WMS-Dienstes	25
2.6	Obligatorische Anfragen eines <i>basic WMS</i> und Erweiterung zum <i>queryable WMS</i>	25
3.1	Methodendesign dieser Untersuchung	34
3.2	<i>Platanus x acerifolia</i> auf dem Mittelstreifen der Kurt-Eisner-Straße (Neupflanzen im Hintergrund)	35
3.3	Prozentuale Verteilung der Straßenbäume nach Gattungen	36
3.4	Häufigkeitsverteilung der Straßenbäume nach Brusthöhendurchmesser (BHD)	36
3.5	Häufigkeitsverteilung der Straßenbäume nach Alter	37
3.6	Beispiel für Basisdaten aus <i>i-Tree Streets</i> (hier CO ₂ sequestered)	46
3.7	Darstellung aller Straßenbäume auf der Website	49
3.8	Ausschnitt der Ergebnistabelle vor der Überführung in die Datenbank	50
3.9	Erstellung eines <i>PostGIS</i> -Stores auf dem <i>GeoServer</i>	51
3.10	Variablendefinition	52
3.11	Generieren der Karte mit <i>OpenLayers</i> und Einbinden von <i>Google Maps</i> . . .	52
3.12	Einbinden des Straßenbaum-Layers	53
3.13	GetFeatureInfo-Request zur Anzeige der Sachdaten einzelner Bäume	53
3.14	CQL-Filter	54
3.15	Übergabe der Abfragen zu den Ökosystemdienstleistungen an ein PHP-Skript	55
3.16	PHP-Skript zur Abfrage der Ökosystemdienstleistungen aus der Datenbank .	56
3.17	Konzeptioneller Entwurf der Website	57
4.1	Häufigkeitsverteilung der Gattungen <i>Fraxinus</i> und <i>Platanus</i> nach Alter . . .	61
4.2	Häufigkeitsverteilung der Gattungen <i>Fraxinus</i> und <i>Platanus</i> nach BHD . . .	61
4.3	Häufigkeitsverteilung der Gattung <i>Populus</i> nach Alter und BHD	62
4.4	Kohlenstoffvorrat der Ortsteile Stötteritz (li.) und Grünau-Siedlung (re.) visualisiert über das Umweltinformationssystem	62
4.5	Kohlenstoffvorrat der Leipziger Straßenbäume pro Hektar nach Ortsteilen . .	64
4.6	Kontaktformular	68
4.7	Suchfelder	68
4.8	Visualisierte Abfrage: <i>Baumart: Tilia, Straße: Prager Strasse</i> und <i>Ort: Stoetteritz</i>	69
4.9	Kartenlayer	69
4.10	Details eines Baumes	70
8.1	Die <i>i-Tree Streets</i> zugrunde liegenden Klimazonen	90
8.2	Klimadiagramme der 16 Referenzstädte und Leipzigs (in alphabetischer Reihenfolge)	90

8.3	Zusammensetzung der Baumarten in den 16 Referenzstädten und die relative Übereinstimmung mit Leipzig	93
8.4	Quellcode zur Implementierung des WMS und Abfrage der Datenbank	99

1 Einführung

„Trees ... are the most important elements of [urban] green areas, yet their benefits are often overlooked and their proper care neglected.“
(KONIJNENDIJK ET AL., 2005, S. 1)

Vor kurzem überschritt die Weltbevölkerung die 7-Milliarden-Grenze. Die Vereinten Nationen halten in ihrem letzten Bericht zur weltweiten Urbanisierung fest, dass bereits heute gut die Hälfte (50,6 % im Jahr 2010) aller Menschen in Städten leben. Sie gehen des Weiteren davon aus, dass dieser Anteil im Laufe der nächsten Jahrzehnte auf 67,5 % im Jahr 2050 bei einem mittleren angenommenen Wachstum der Weltbevölkerung ansteigen wird, wobei dann bereits über neun Milliarden Menschen auf der Erde leben werden. Europa weist traditionell einen hohen Urbanisierungsgrad auf. Leben aktuell gut 70 % der knapp 740 Millionen Einwohner hier in Städten, werden es 2050 bereits über 80 % von dann nur noch knapp 720 Millionen Menschen sein (UNITED NATIONS, 2010, 2011).

Städte sind erheblich wärmer als ihr Umland (urbane Hitzeinsel), weisen eine erhöhte Belastung durch Schadstoffe, Licht und Lärm auf. Der hohe Versiegelungsgrad führt zu vermehrtem Oberflächenabfluss der Niederschlagswässer und somit zu trockeneren Böden. Urbane Flora und Fauna besitzen nach WITTIG (1998) in diesen hoch verdichteten Räumen entscheidende Bedeutung für das Klima und die Bodeneigenschaften. Sie sind insbesondere im Hinblick auf ihre klimatische Funktion „unverzichtbarer Bestandteil einer menschenwürdigen Stadt“ (ebd., S. 252). KONIJNENDIJK ET AL. (2005) weisen darauf hin, dass innerstädtische Grünflächen den hier lebenden Menschen eine Bandbreite an ökologischen, sozio-kulturellen und ökonomischen Leistungen erbringen. Bäume, sei es in urbanen Wäldern, Parks, Gärten oder entlang von Straßen und Plätzen stellen dabei die wichtigsten Bestandteile dar (ebd.). Städte profitieren demnach in hohem Maße von diesen lokal generierten urbanen Ökosystemdienstleistungen, die einen wesentlichen, positiven Einfluss auf die Lebensqualität und Gesundheit der Menschen ausüben (BOLUND & HUNHAMMAR, 1999). Laut KRIEGER ET AL. (1996, S. 45) ermöglichen (Straßen-) Bäume einen Bezug zur Natur und sind oft „das ‚Trostpflaster‘ für den Naturverlust durch die ständig steigende Flächeninanspruchnahme“. Auf die Straßenbäume als einen Teilaspekt urbaner Ökosysteme und ihren Beitrag zur Verbesserung der städtischen Umwelt sowie ihre Funktion als ein wesentliches jedes stadtbildprägende Element soll sich diese Arbeit konzentrieren.

1.1 Motivation und Ziele der Arbeit

Ein weiterhin hoch aktuelles Thema stellt der fortschreitende Klimawandel dar. Vor allem der Umgang mit den stetig zunehmenden Treibhauseffekt-verstärkenden Luftschadstoffen wie Kohlenstoffdioxid (CO_2) stellt die Menschen global wie lokal vor enorme Herausforderungen (IPCC, 2007). Es wird nach immer neuen Möglichkeiten der Verminderung und vor allem Speicherung beispielsweise von Kohlenstoffdioxid gesucht. Ein großes Potential für die Speicherung von CO_2 bieten Bäume, die durch Sequestrierung den Kohlenstoff (C) binden und bei entsprechend langem Leben der Bäume und Weiterverarbeitung, also Fortbestand und nicht Wiederfreisetzung von Kohlenstoff, diesen dauerhaft speichern können. Da die in Städten anzutreffenden Mengen an CO_2 größtenteils lokal emittiert werden, ist es sinnvoll, die Bindung/Speicherung auch lokal zu forcieren. Gleichzeitig ermöglichen Bäume die Filterung von Luftschadstoffen und Aerosolen wie Ozon (O_3), Stickstoffdioxid (NO_2), Schwefeldioxid (SO_2) und Feinstaub (PM_{10}) und vermindern den oberflächlichen Abfluss von Niederschlagswässern. Hierbei kommt neben den urbanen Wäldern den Straßenbäumen, mit ihren Standorten an einer Hauptquelle der Emissionen, eine große Bedeutung zu. Mit dem durch die Stadt Leipzig gepflegten Straßenbaumkataster besteht die Möglichkeit, den Anteil des Straßenbegleitgrüns an der Verbesserung der städtischen Umwelt zu quantifizieren. Das zum Management und Pflege der Bäume angelegte Kataster kann so über seinen ursprünglichen Zweck hinaus einer weiteren sinnvollen Nutzung zugeführt werden. In verschiedenen Untersuchungen wurde auf die Bedeutung von Bäumen in der Stadt und vor allem auf die Funktion der Straßenbäume als C/ CO_2 -Speicher eingegangen (FRENZEL, 2009; STROHBACH ET AL., 2011).

Quantifizierungen ökosystemarer Dienstleistungen (ÖSD) von Straßenbäumen, die über die Speicherung von Kohlenstoffdioxid hinausgehen, sind dem Autor bei derzeitigem Wissensstand für eine Stadt im deutschsprachigen Raum nicht bekannt. In der Anwendung der Software *i-Tree Streets* zur Ermittlung von ÖSD für eine kühlgemäßigte Klimazone außerhalb der USA hat diese Untersuchung somit Pilotcharakter. Die vorliegende Arbeit verfolgt einen möglichst praxisnahen Ansatz um das CO_2 - und Luftschadstoffspeichervermögen sowie die Verminderung im Oberflächenabfluss durch die Leipziger Straßenbäume zu ermitteln. Hierbei werden zunächst zwei Ziele verfolgt:

1. **Auswertung und Anpassung** des Straßenbaumkatasters an die Software *i-Tree Streets*
2. **Berechnung** der Ökosystemdienstleistungen der Leipziger Straßenbäume
Eine Quantifizierung erfolgt für die Bindung von CO_2 und der Luftschadstoffe O_3 , SO_2 , PM_{10} und NO_2 sowie für die Reduktion des oberflächlichen Abflusses von Niederschlagswässern.

Nach DUNN ET AL. (2006) kann davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil der in den Städten lebenden Menschen persönlich nie einen Organismus oder ein Habitat gesehen hat,

welches sich nicht in einer Stadt befindet. Um diese von der natürlichen Umwelt „entfremdeten“ Menschen für die Natur, den respektvollen und nachhaltigen Umgang und ihren Schutz zu interessieren (in den Städten leben viele potentielle Wähler, hier sind die finanziellen Mittel für den Umweltschutz zu finden) ist es von höchster Bedeutung, dass Stadtmenschen mit der Natur in Berührung kommen und sie erfahren können (ebd.). Neben der persönlichen Erfahrung qualitativ hochwertiger innerstädtischer Grün- und Freiflächen sowie urbanen Wäldern ist ein wichtiger Punkt die Bürger darüber zu informieren, was die Natur, neben gestalterisch-ästhetischen Aspekten, leistet. Die Entwicklung einer ökologisch informierten Öffentlichkeit ist vonnöten (MCKINNEY, 2002). Zur Bereitstellung entsprechender Informationen bieten sich gerade für die digital vernetzte urbane Bevölkerung, webbasierte Umweltinformationssysteme an. Daher werden auf Basis oben genannter Ziele zwei weitere Punkte im Rahmen dieser Arbeit verfolgt:

3. **Überführung** des Katasters und der Ergebnisse in eine *Datenbank* bzw. einen *web mapping service (WMS)*
4. **Konzipierung und Erstellung** einer Website zur Visualisierung der Leipziger Straßenbäume (WMS) und Abfrage der Ökosystemdienstleistungen (Datenbank)

Die vorliegende Master Thesis wurde im Rahmen des Universitätslehrgangs „Geographical Information Science & Systems“ an der Paris-Lodron-Universität Salzburg angefertigt. Mit der Unterteilung der Arbeit in zwei vom Umfang nahezu gleichwertige Teile wird versucht dem wissenschaftlich-technischen Anspruch dieses Lehrgangs gerecht zu werden.

1.2 Struktur der Arbeit

In einem Grundlagenkapitel werden zunächst die wesentlichen theoretischen und technischen Konzepte vorgestellt. Daran anschließend werden die Materialien und Methoden erläutert. Hier wird zunächst das Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig vorgestellt und analysiert. Dann folgt ein detaillierter Überblick zur Berechnung der Ökosystemdienstleistungen, welche die Ausgangsbasis für das webbasierte Umweltinformationssystem (UIS) bilden. Im zugehörigen Methodenkapitel werden die technischen Voraussetzungen erläutert und das Vorgehen zur Umsetzung bis hin zur Publikation der erstellten Website verdeutlicht. An die Ausführungen zur Methodik schließt sich das Ergebniskapitel an. Hier werden die ermittelten Werte der Ökosystemdienstleistungen und das UIS vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel werden die angewandten Methoden und die erzielten Ergebnisse diskutiert und in die Forschung eingeordnet. In einem abschließenden Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weitere Schritte gegeben. Im Anhang der Arbeit finden sich ergänzende und weiterführende Materialien zum besseren Verständnis der Arbeit.

2 Grundlagen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem möglichst praxisnahen Zugang zur Ermittlung ökosystemarer Dienstleistungen von Straßenbäumen. Prinzipiell kann der verwendete Ansatz auf jede Art von (Straßen-)Baumkataster und somit Kommune angewendet werden. Die Umsetzung erfolgte für die Stadt Leipzig, da hier ein von zentraler Stelle einheitlich verwaltetes und gepflegtes Kataster zur Verfügung stand. Im Folgenden werden wesentliche Grundlagen zum weiteren Verständnis und zur Einordnung der Arbeit erläutert.

2.1 Untersuchungsgebiet und -gegenstand

2.1.1 Leipzig

Die Stadt Leipzig liegt im kontinental beeinflussten Binnentiefeland zwischen 51°14' bis 51°26' nördlicher Breite und 12°14' bis 12°32' östlicher Länge und einer durchschnittlichen Höhenlage von 118m über NN im Nordwesten des Freistaates Sachsen. Mit 518.862 Einwohnern leben auf einer Fläche von gut 297 km² durchschnittlich 1.745 Einwohner auf einem km² Stadtgebiet (AMT FÜR STATISTIK UND WAHLEN, 2010)¹.

Leipzigs Gründung im elften Jahrhundert an der Kreuzung bedeutender Handelsstraßen ließ die Stadt im Laufe ihrer Geschichte zu einem der wichtigsten Handelsplätze in Europa aufsteigen. Im Zuge der Industrialisierung ab etwa 1830 bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts wuchs die Stadt enorm und erreichte im Jahre 1933 ihren bis dato nicht wieder erzielten Bevölkerungshöchststand von über 710.000 Einwohnern (ebd.). Der zweite Weltkrieg beendete dieses Wachstum abrupt. In den folgenden durch die sozialistische Planwirtschaft geprägten Jahrzehnten kam es fast ausschließlich zu Investitionen in die Zentren der Städte was zur Folge hatte, dass Leipzig von den Prozessen der Suburbanisierung und Zersiedelung nahezu vollständig verschont blieb (HAASE & NUSSL, 2010). Ab den späten 1950er Jahren verlor die Stadt zunehmend an Bedeutung und somit kam es auch zu sinkenden Bevölkerungszahlen bis zu einem Stand von ca. 530.000 Einwohner im Jahr 1989. Im Zuge der nun folgenden Jahre der umfassenden Transformationen im politischen, wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Leben kam es zu einem weiteren Bevölkerungsrückgang auf den Tiefststand von knapp 437.000 Einwohnern im Jahr 1998 (AMT FÜR STATISTIK UND WAHLEN, 2010). Bis zu diesem Zeitpunkt

¹alle Angaben mit Stand: 31.12.2009

kam es zu intensiver Suburbanisierung und Zersiedelung mit Einkaufszentren, Wohn- und Gewerbegebieten, welche anschließend deutlich zurückgingen. Die Wanderung eines Teils der Bevölkerung „vor die Tore“ der Städte sowie der Wegzug vieler ostdeutscher Bewohner in die alten Bundesländer trug enorm zum Bevölkerungsverlust bei. Ein starker Rückgang der Geburtenrate führte zu einer weiteren Verschärfung der Situation. Die im Jahr 1998 von der Stadt Leipzig vollzogene Eingemeindung von Umlandgemeinden und der allmählich einsetzende und bis heute, wenn aktuell auch abgeschwächt anhaltende wirtschaftliche Aufschwung ließen die Bevölkerung auf zuletzt gut 525.000 Einwohner² anwachsen (STADT LEIPZIG, 2011c). Die in diesem Zusammenhang seit kurzem zu beobachtende innerstädtische Reurbanisierung mit dem damit verbundenen Zuzug von Menschen und Unternehmen in die attraktiven Lagen Leipzigs bei gleichzeitig ablaufenden Schrumpfungsprozessen mit Brachflächenbildung im Stadttinneren und Ausfransen der Stadtränder spiegeln eine für eine ostdeutsche Großstadt typische Entwicklung wider (KABISCH ET AL., 2010; HAASE & NUISSL, 2010; NUISSL & RINK, 2005).

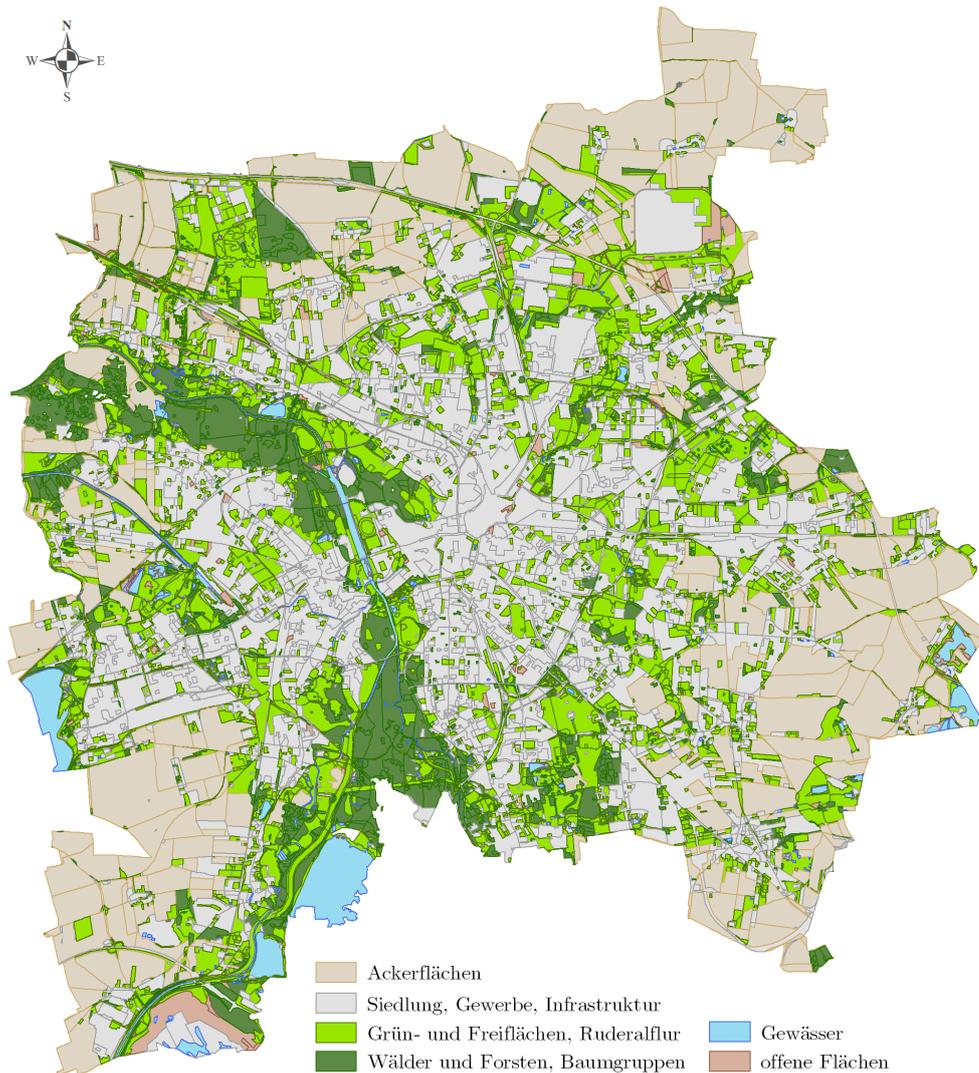
Der Nordwesten Sachsens mit dem Gebiet der Stadt Leipzig und ihres Umlandes ist auf Grund der fruchtbaren Böden und dichten Besiedelung eine vorwiegend landwirtschaftlich geprägte und somit waldarme Region (BURKHARDT ET AL., 2008). Das Stadtgebiet von Leipzig weist mit einem Anteil von 7 % im Vergleich zu anderen Städten in Sachsen, wie Dresden (20 %) und Chemnitz (14 %) auch nur einen eher geringen Anteil an Wald auf (ebd.). Im Bereich der Waldflächen stellt die Kategorie Feuchtwald mit dem Leipziger Auwald und seinen gut 1.000 ha das größte zusammenhängende naturnahe Gebiet dar. Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich wird, verfügt die Stadt Leipzig aber, rechnet man die Anteile an Wäldern, Grün- und Freiflächen zusammen, über gut 5.600 ha an innerstädtischem Grün (Kategorisierung siehe Tabelle 8.1 im Anhang). Vor allem die bürgerlich geprägten Quartiere verfügen über eine oftmals herausragende Qualität des Stadtgrüns (Parkanlagen u.ä.). Dem gegenüber fehlt es an Grünausstattung bzw. mangelt es an der Qualität des Vorhandenen in den traditionell gewerblich-industriell geprägten Stadtteilen sowie in den Großwohnsiedlungen. Die zur Kategorie Siedlung/Gewerbe und z.T. auch Grün- und Freiflächen zählenden Straßenbäume sind flächenmäßig nicht gesondert erfasst, da eine Abgrenzung schwer möglich ist.

2.1.2 Straßenbäume

In den engen dicht bebauten mittelalterlichen Städten gab es für Straßenbäume keinen Platz. Bäume fanden sich in den Städten vor allem in den, den Häusern zugeordneten Gärten. Vereinzelt gab es Bäume oder Baumgruppen auf größeren freien Flächen wie den Markt-, Rathaus- oder Kirchplätzen. Erst im Verlauf des 17. Jahrhunderts wurden Bäume, geplant

²Stand: 30.06.2011

Abbildung 2.1: Landnutzung in der Stadt Leipzig



Quelle: eigene Darstellung nach LFULG (2005)

angelegt entlang von Wegen als Betonung dieser Achsen im klassischen französischen Garten zur Anwendung gebracht. Als erste Straßen wurden in den folgenden Jahrhunderten die großen, die Residenzstädte verbindenden Handels- und Landstraßen mit Bäumen bepflanzt (BALDER ET AL., 1997). In den Städten wurden als erste die Straßen zu wichtigen Orten, wie Kirchen, Schlössern und Regierungssitzen mit Bäumen gestaltet. Von herausragender Bedeutung waren und sind bis heute die häufig auf geschliffenen Wehranlagen angelegten Promenaden. Als ein repräsentativer Vertreter ist hier der Promenadenring Leipzigs zu nennen. Dieser entstand ab 1777 durch den Rückbau der alten Befestigungsanlagen (AMT FÜR STADTERNEUERUNG UND WOHNUNGSBAUFÖRDERUNG, 2005). Bereits zu Beginn des 18. Jahrhunderts hatte man damit begonnen regelmäßige Alleen im Bereich der Stadtbefestigung anzulegen. Die angeleg-

ten Promenadenanlagen sind geprägt „durch einen breiten, von Alleebäumen beschatteten äußeren Promenadenweg, der die Innenstadt ringförmig umläuft und angrenzende Parkpartien einschließt“ (STADT LEIPZIG, 2011d).

In den folgenden Jahrzehnten erschienen erste Abhandlungen über Straßenbäume. So beschreibt HÜBNER (1914) in seiner Funktion als königlicher Garteninspektor und Kreisobergärtner des Kreises Teltow vor hundert Jahren den „Straßenbaum in der Stadt und auf dem Lande“ und gibt Hinweise und Anregungen zu dessen „Pflanzung und Pflege sowie die erforderlichen Maßnahmen zu seinem Schutz“.

Tabelle 2.1: Positive Wirkungen von urbanen (Straßen-) Bäumen

Funktion/Wirkung	Erläuterung
Stadt-/Mikroökologische Funktion	Verminderung der Luftverschmutzung durch Ausfilterung von Stäuben und Aerosolen; Sauerstoffproduktion; Aufnahme von CO ₂ ; Temperaturausgleich durch Transpiration/Luftkühlung; Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit
Bioökologische Funktion	Lebensraum für Tiere und Pflanzen; Bodenleben
Erholungs- und Erlebnisfunktion	Naturerlebnis; Wohlbefinden; Lärmreduktion
Ästhetische Funktion	Straßenbildprägend; Kontrast zur gebauten Architektur; Raumbildung/Raumgliederung; Orientierung/optische Führung
Hydrologische Funktion	Reduktion des Oberflächenabflusses von Niederschlagswasser
Gebäudeenergetische Funktion	Strahlungsminderung/Beschattung; Windreduktion; geringerer Heiz- und Kühlungsbedarf
Ökonomische Funktion	gesteigerte Immobilienwerte; Tourismus

Quelle: nach BALDER ET AL. (1997); BURKHARDT ET AL. (2008), TYRVÄINEN ET AL. (2005) und KRIEGER ET AL. (1996)

Nach BALDER ET AL. (1997, S. 12) sind „Straßenbäume aufgrund ihres Beitrages zur Umwelt- und Wohnumfeldverbesserung unverzichtbare ökologische Bestandteile einer Stadt.“ Die Bäume können beispielsweise gasförmige Bestandteile sowohl über die Spaltöffnungen (Absorption) aufnehmen als auch auf der Cuticula anlagern (Adsorption). Stickoxide und Ozon werden hauptsächlich über die Spaltöffnungen ins Blatt aufgenommen. Kohlenstoffdioxid wird auf diese Weise aufgenommen, der Kohlenstoff gebunden und Wasser sowie Sauerstoff wieder an die Umgebungsluft abgegeben (FORUM DIE GRÜNE STADT, 2008). Feinstaub fällt oder weht mit dem Wind auf das Blatt (Impaktion). Blatthaare, die Feuchtigkeit und „Klebrigkeit“ eines Blattes sowie die Dichte der Baumkrone haben Auswirkungen auf die Höhe an gebundenem PM₁₀ (ebd.).

Die Funktionen und positiven Wirkungen von urbanen Straßenbäumen und Stadtgrün im Allgemeinen sind aus Tabelle 2.1 ersichtlich. Um ihre Funktionen und somit Dienstleistungen für den Menschen erbringen zu können, müssen die im Straßenraum angepflanzten Bäume nach den hier vorherrschenden Bedingungen ausgewählt werden.

Abbildung 2.2: *Platanus x acerifolia* in der Johannisallee

Quelle: eigene Aufnahme

Auswahlkriterien für Straßenbäume Laut KRIEGER ET AL. (1996) treten bei der Auswahl von Straßenbäumen gestalterische Auswahlkriterien im Vergleich zu den ökologischen Kriterien in den Hintergrund. Dies liegt in den meist extremen Standortverhältnissen begründet, so dass sich die Auswahl einer geeigneten Gehölzart an den vorliegenden Standortbedingungen orientieren muss, um ein Überleben des Baumes zu gewährleisten. Die zumeist in den Städten vorherrschenden Bedingungen (vgl. Tabelle 2.2) erschweren es den einheimischen Arten zu überleben. Sie sind an Waldstandorte angepasst und verfügen häufig nur über begrenzte Standortamplituden. NOWAK (1994b) hält in diesem Zusammenhang eine um 20 % reduzierte Biomasse der Straßenbäume in Chicago im Vergleich zu ihren im Freiland wachsenden Artgenossen fest.

Tabelle 2.2: Ursachen von Schäden und Wachstumsbeeinträchtigungen an Straßenbäumen

Ursache	Erläuterung
Ungünstige Bodenverhältnisse	
Bodenverdichtung	durch Befahren, Betreten und Erschütterungen
undurchlässige Bodenabdeckungen	Asphalt, Pflaster
zu kleine Baumscheiben	
Eingeengter Wurzelraum	Versorgungsleitungen
Sauerstoffmangel	Anreicherung von Kohlendioxid
Wassermangel	
Nährstoffmangel	physiologisch unzureichende Nährstoffverhältnisse
ungünstige Bodenreaktionen	überwiegend zu hohe pH-Werte
Verarmung des Humus	
Schadstoffbelastungen des Bodens	Tausalze, Schwermetalle u.a.
Stadt- und/oder Erdgasaustritte	undichte Rohrleitungen
Immissionen	Stäube, Aerosole, Abgase von Industrie, Kraftfahrzeugverkehr, Heizungsanlagen
Mechanische Stamm- und Wurzelschäden	Kraftfahrzeuge, Bauarbeiten, z.T. auch unsachgemäße baumchirurgische Maßnahmen
Befall durch Schadorganismen	

Quelle: LEH (1991, S. 5)

Nach WITTIG (1998) erfüllt bisher keine in Städten angepflanzte (Straßen-)Baumart alle für eine positive Entwicklung in den gemäßigten Breiten als ideal angenommenen Kriterien (Tabelle 2.3). Am nächsten kommen diesen Kriterien die Arten: „*Ailanthus altissima* (Götterbaum), *Celtis occidentalis* (Westlicher Zürgelbaum), *Fraxinus velutina* (Samt-Esche), *Gleditsia triacanthos* (Lederhülsenbaum), *Phellodendron amurense* (Amur-Korkbaum), *Platanus x acerifolia* (Platane), *Quercus coccinea* (Scharlach-Eiche), *Quercus robur* (Stiel-Eiche), *Robinia pseudoacacia* (Robinie) und *Sophora japonica* (Japanischer Schnurbaum)“ (WITTIG, 1998, S. 248). SÆBØ ET AL. (2005) schlagen als innerstädtisches straßenbegleitendes Grün Gehölzarten vor, die einen eher säulenförmigen Wuchs mit vorhersagbaren Wachstumsraten aufweisen, hohen ästhetischen Ansprüchen genügen und eine, gemessen an den Standortbedingungen, hohe Lebenserwartung erwarten lassen. Sie führen weiter aus, dass Arten mit großen Fruchtständen und allergieauslösenden Pollen vermieden werden sollten.

Tabelle 2.3: Eigenschaften des idealen Straßenbaums

Eigenschaft
Pioniercharakter
weite ökologische Amplitude
Fehlen von Ectomykorrhiza
tiefreichendes Wurzelsystem
Ringporigkeit
Fiederblätter
behaarte Blattunterseite
glänzende Blattoberseite
Toleranz gegen heiße Sommer und Trockenheit
Salztoleranz

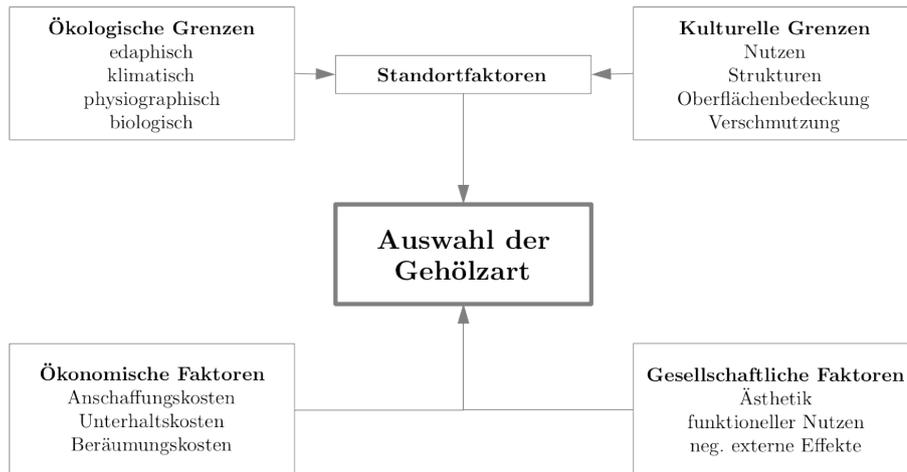
Quelle: nach MEYER (1982)

Eine Möglichkeit, die passenden Gehölzarten für den jeweiligen Standort auszuwählen, stellt ein Art-Auswahl-Modell wie es MILLER (2007) vorschlägt, dar (vgl. Abbildung 2.3). Hierbei werden auf der einen Seite als Standortfaktoren ökologische und kulturelle Einschränkungen berücksichtigt. Dazu zählen beispielsweise klimatische und biologische Beschränkungen oder physische Grenzen, gesetzt durch menschliche Strukturen und Aktivitäten. Die richtige Auswahl der Arten wird auf der anderen Seite durch ökonomische und gesellschaftliche Faktoren beeinflusst.

2.1.3 Ökosystemdienstleistungen

Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen (*ecosystem services*) wird in der Wissenschaft und seit einigen Jahren auch zunehmend in der Politik und der breiteren Gesellschaft als ein viel versprechender Ansatz angesehen, die Zusammenhänge zwischen Ökosystemen und dem menschlichen Wohlbefinden zu vermitteln (MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Der

Abbildung 2.3: Wichtige Faktoren in einem Modell zur Auswahl der Gehölzart in Städten



Quelle: (MILLER, 2007)

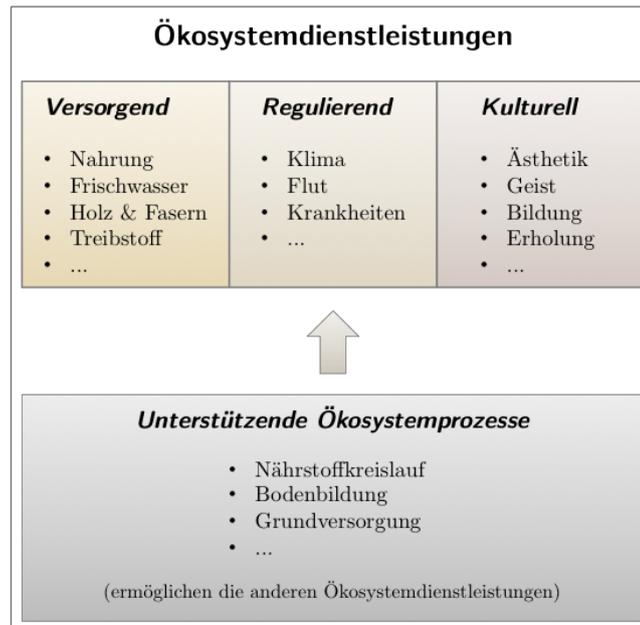
Begriff „ecosystem services“ wurde erstmals von EHRlich & MOONEY (1983) geprägt und in die wissenschaftliche Diskussion eingeführt. In eine breitere (wissenschaftliche) Öffentlichkeit wurde das Konzept vor allem durch die Arbeiten von DAILY (1997) und COSTANZA ET AL. (1997) getragen. Die politische Ebene wurde durch das im Jahre 2001 von den Vereinten Nationen ins Leben gerufene Forschungsprogramm und die daraus resultierenden Ergebnisse im MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005) erreicht. Seit der Veröffentlichung des Millenium Assesement haben sich eine Reihe von Autoren und Projekten mit Fragestellungen der Klassifizierung, Quantifizierung, Festlegung und Taxierung von Ökosystemdienstleistungen u.a. mit dem Ziel die entwickelten Konzepte in die politischen Entscheidungsprozesse zu übertragen, beschäftigt (TURNER ET AL., 2003; MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005; KREMEN, 2005; NAIDOO ET AL., 2008; BURKHARD ET AL., 2011).

HERMANN ET AL. (2011) geben einen zusammenfassenden Überblick über den aktuellen Stand des Ökosystemdienstleistungskonzepts. Die klare und eindeutige Definition der Kernbegriffe *Ökosystemprozesse*, *Ökosystemfunktionen*, *Ökosystem- oder Landschaftsdienstleistungen* und *Nutzen* ist nach BOYD & BANZHAF (2007) sowie WALLACE (2007) in diesem Kontext von entscheidender Bedeutung. Werden die Begriffe Ökosystemprozess und -funktion häufig synonym verwendet, bezeichnen beide das komplexe Zusammenspiel von biotischen und abiotischen Elementen von Ökosystemen, welche wiederum die Ökosystemdienstleistungen generieren, die dem Menschen dann zur Verfügung stehen.

Ökosystemdienstleistungen werden von BOYD & BANZHAF (2007) umgangssprachlich auch als die Leistungen der Natur umschrieben, die sie den Haushalten, Gemeinschaften und Wirtschaften zur Verfügung stellen. Die in ihrer Arbeit propagierte und weithin anerkannte Definition einer Ökosystemdienstleistung lautet: „Final ecosystem services are components

of nature, directly enjoyed, consumed, or used to yield human well-being“ (BOYD & BANZHAF, 2007, S. 619). Die vier Kategorien von ÖSD (vgl. Abbildung 2.4), welche durch das MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005) vorgeschlagen wurden, unterteilen sich in *Versorgungsdienstleistungen* (provisioning services), *Regulierende Dienstleistungen* (regulating services), *Kulturelle Dienstleistungen* (cultural services) und *Unterstützende Dienstleistungen* (supporting services).

Abbildung 2.4: Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen



Quelle: eigener Entwurf nach MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005)

Die Diskussion über die Verwendung der oft synonym gebrauchten Begriffe Landschaftsdienstleistung oder Ökosystemdienstleistung ist noch nicht abgeschlossen. Hierbei werden Funktionen und Dienstleistungen auf Landschaftsebene definiert um das Konzept in Entscheidungen der Raumplanung einbeziehen zu können (HERMANN ET AL., 2011). Das menschliche Wohlbefinden ist von Faktoren wie kulturellen und ökologischen Rahmenbedingungen abhängig (BOYD & BANZHAF, 2007). Laut HERMANN ET AL. (2011) ist der Nutzen dagegen räumlich explizit und kann als direkte Verbindung zwischen dem menschlichen Wohlergehen und den bereitstellenden Ökosystemen angesehen werden, worauf theoretisch ein ökonomischer Wert angelegt werden kann (siehe COSTANZA ET AL. (1997)).

Als einen wichtigen Teilaspekt der Forschung zu Ökosystemdienstleistungen können die urbanen Ökosystemdienstleistungen (*urban ecosystem services*) betrachtet werden (vgl. BOLUND & HUNHAMMAR (1999); TRATALOS ET AL. (2007); KUGEL (2009)). Die Grenzen zwischen Ökosystemen sind in der Regel diffus. In einem urbanen Kontext sind trotzdem grundsätzlich

zwei Sichtweisen möglich. Zum einen kann die gesamte Stadt als ein Ökosystem, „abgegrenzt“ zu seinem Umland, betrachtet werden. Zum anderen ist es möglich, die Stadt als einen Verbund aus mehreren Einzelökosystemen (Parks, urbane Wälder, Gewässer etc.) wahrzunehmen. Da die meisten in Städten auftretenden Probleme, wie Lärm oder Luftschadstoffausstoß durch Verkehr, lokale Ursachen haben, also zuvorderst Einzelökosysteme betreffen, ist die beste und oft auch einzige effektive Lösung ebenfalls lokal basiert. Den urbanen Ökosystemdienstleistungen, ersichtlich aus Tabelle 2.4, kommt in diesem Kontext somit eine enorme Bedeutung zu (BOLUND & HUNHAMMAR, 1999). Unter den mit Straßenbäumen assoziierten Dienstleistungen werden in der vorliegenden Arbeit die Bindung von Kohlenstoffdioxid und Luftschadstoffen sowie die Verminderung von oberflächlichem Niederschlagsabfluss (hervorgehoben in Tabelle 2.4) näher untersucht.

Tabelle 2.4: Durch urbane Ökosysteme generierte lokale Dienstleistungen (hervorgehoben sind die in dieser Untersuchung quantifizierten Dienstleistungen)

	Straßenbäume	Grünfläche/ Park	urbaner Wald	Acker	Feuchtgebiet	Fluss	See
CO ₂ -Bindung	X	X	X	X	X		X
Filterung von Luftschadstoffen	X	X	X	X	X		
Versickerung von Niederschlagswasser	x*	X	X	X	X		
Regulierung Mikroklima	X	X	X	X	X	X	X
Lärmreduzierung	X	X	X	X	X		
Abwasserklärung					X		
Erholung/ kulturelle Werte	X	X	X	X	X	X	X

Quelle: nach BOLUND & HUNHAMMAR (1999); *und somit Vermeidung von Oberflächenabfluss, ausgeprägt zu einem wesentlich geringeren Teil im Vergleich zum Freiland/Wald, aber vorhanden

2.1.4 Umweltinformationssysteme

Umweltinformationssysteme (UIS) werden heute durch die Verabschiedung von Konventionen und Gesetzen zum freien Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen, u.a. Bundes- und Landesumweltinformationsgesetze, zunehmend zur Information der Öffentlichkeit über den Zustand der Umwelt eingesetzt (FISCHER-STABEL, 2005). Die Bedeutung von UIS erfährt neben ihren traditionellen Einsatzbereichen in Umweltmonitoring, Verwaltungsvollzug, Störfallmanagement und Forschung hierdurch einen enormen Schub.

UIS stellen nach FISCHER-STABEL (2005) heute wichtige Hilfsmittel dar, um angesichts der ständig wachsenden Anforderungen im Umweltbereich ein schnelles und qualifiziertes Handeln sicherzustellen. Sie dienen als Abbildung des Ist-Zustandes der Umwelt und ermöglichen

der Öffentlichkeit den Zugang zu Umweltdaten. Neben anderen wichtigen Kriterien sieht FISCHER-STABEL (2005) die Stärken eines UIS in folgenden Eigenschaften:

- Sie haben i.d.R. eine räumliche Komponente.
- Sie geben Antworten auf Fragen.
- Sie informieren die Öffentlichkeit.

Systemkategorien, die FISCHER-STABEL (2005) benennt, reichen von Nationalen und transnationalen Umweltinformationssystemen über Landesweite UIS, Kommunale UIS, Verwaltungsunabhängige UIS bis hin zu Betrieblichen Umweltinformationssystemen. Das in dieser Arbeit entwickelte UIS basiert auf kommunalen Daten, gehört aus technisch-definitiver Sicht aber eher zu den Verwaltungsunabhängigen Umweltinformationssystemen. Durch die Ausrichtung auf das Internet als das Schlüsselmedium für die Verbreitung und den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen trägt diese Arbeit den aktuellen technischen Entwicklungen Rechnung.

2.1.5 Geo-Dienste und deren Bereitstellung

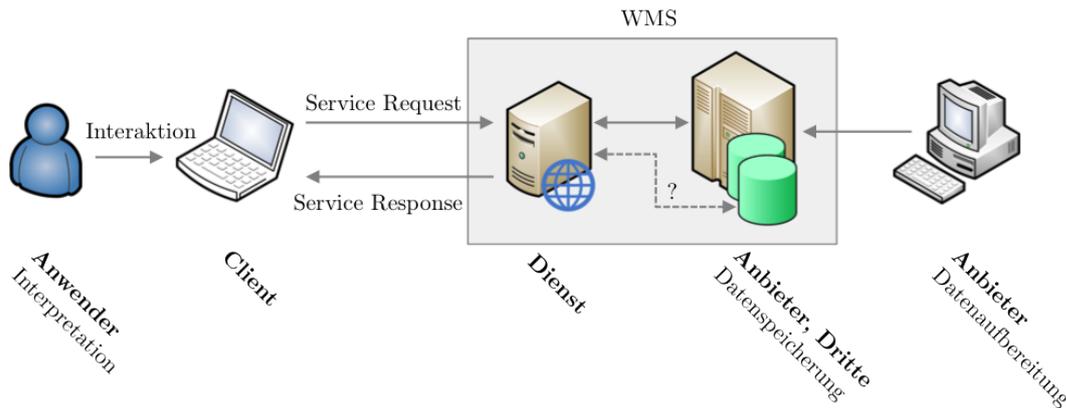
Das Angebot von (Geo-)Diensten im Internet wächst beständig. Bei der Nutzung eines Dienstes ruft ein Client nach Interaktion mit dem Anwender eine URL³ auf, welche in eine Anfrage übersetzt, von einem oder mehreren Servern entgegen genommen und verarbeitet wird. Anschließend wird die Antwort zurück an den Client geschickt und der Anwender interpretiert diese entsprechend seinem Wissen und seinen Fähigkeiten (vgl. Abbildung 2.5). Im Bereich der Geoinformationsverarbeitung werden solche Dienste beispielsweise in Form von Web Map Services (WMS) angeboten, was zu einer stetigen Zunahme von Serviceorientierten Architekturen (SOA) führt.

Web Map Service Ein durch das Open Geospatial Consortium (OGC) verabschiedeter und sehr weit verbreiteter Standard ist der Web Map Service (WMS). Ein OpenGIS-Web-Kartendienst (WMS) gibt als Antwort auf eine Anfrage über das HTTP-Protokoll⁴ eine Karte an die anfragende Anwendung zurück (ANDRAE ET AL., 2011). Die Spezifikationen des OGC (2006) für den WMS legen alle möglichen Anfragen (Request), deren Parameter sowie die erlaubten Antworten (Response) des Servers fest. Mögliche Anfragen an einen WMS-Server sind: `GetCapabilities`, `GetMap`, `GetFeatureInfo` (optional), `GetLegendGraphic` (optional), `GetStyle` (optional) und `DescribeLayer` (optional). Es lassen sich nach ANDRAE ET AL.

³Durch eine URL (*Uniform Resource Locator*) wird eine Quelle im Internet eindeutig identifiziert und lokalisiert.

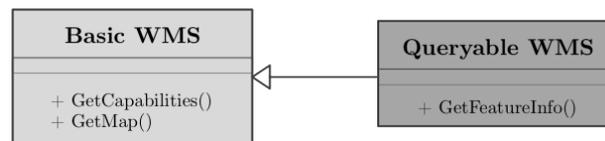
⁴Das *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) ist ein Protokoll zur Übertragung von Daten über ein Netzwerk.

Abbildung 2.5: Funktionsweise eines WMS-Dienstes



Quelle: eigene Bearbeitung

(2011) zwei wesentliche WMS-Arten unterscheiden (vgl. Abbildung 2.6). Bei einem *basic WMS* können die zwei grundlegenden Operationen `GetCapabilities` und `GetMap` aufgerufen werden. Ein *queryable WMS* erweitert das Angebot mindestens um die `GetFeatureInfo`-Operation. Nachfolgend werden diese drei wesentlichen Operationen eines WMS näher erläutert.

Abbildung 2.6: Obligatorische Anfragen eines *basic WMS* und Erweiterung zum *queryable WMS*

Quelle: eigene Bearbeitung nach ANDRAE ET AL. (2011)

Über einen `GetCapabilities`-Request fragt eine Clientkomponente das Angebot eines OpenGIS-Dienstes ab. Hierbei muss die HTTP-Anfrage mindestens die Parameter `Service=WMS` und `Request=GetCapabilities` enthalten. Weitere Parameter können optional angegeben werden. Als Antwort werden die Service-Metadaten in Form eines XML-Dokumentes⁵ vom Server zurückgegeben. Hierdurch erfährt die anfragende Anwendung/der Nutzer, über welche Fähigkeiten der WMS verfügt (ANDRAE ET AL., 2011).

Die im Anschluss über eine `GetMap`-Operation angeforderten Karten sind vollständig gerendert und die angeforderten Daten werden in einem Bildformat (meist JPEG, PNG oder GIF) zurückgeliefert (JANSEN & ADAMS, 2010). Ein `GetMap`-Request wird auf Basis der Informationen aus den zuvor empfangenen Service-Metadaten ausgeführt. Hierzu werden durch die Clientkomponente die gewünschten Parameter wie Kartenausschnitt (BBOX), Koordinatensystem (CRS), gewünschte Kartenlayer (LAYERS), Darstellungsstile (STYLES), gewünschtes

⁵Die *Extensible Markup Language* (XML) ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten.

Grafikformat (**FORMAT**), die Breite und Höhe des Kartenausschnitts in Pixeln (**WIDTH; HEIGHT**) sowie mögliche Transparenzen (**TRANSPARENT**) übermittelt (ANDRAE ET AL., 2011).

Sind die beiden vorangegangenen Operationen obligatorisch für jeden WMS, stellt ein **GetFeatureInfo-Request** eine optionale Komponente dar. Diese liefert als Antwort Sachdaten von in den Layern enthaltenen Geoobjekten (*Features*). Ein **GetFeatureInfo-Request** wird zumeist durch einen Klick des Nutzers auf die Karte ausgelöst und die relative Kartenposition sowie eine Liste der angezeigten Layer durch die Clientkomponente übermittelt. Der Server findet zu dieser relativen Position die nächstgelegenen Features und gibt die darin enthaltenen Sachdaten des ausgewählten Layers in einem vorher definierten Format zurück. Die relative Position bezieht sich auf ein zuvor getätigtes **GetMap-Request**. Diese wird vom WMS aber nicht gespeichert. Daher enthält ein **GetFeatureInfo-Request** auch alle wichtigen Parameter eines **GetMap-Request** (ebd.).

GeoServer Um einen Geo-Dienst über das Internet bereitstellen zu können, ist eine entsprechende Web-Mapping-Software nötig. Der *GeoServer*⁶ ist ein freies Softwareprojekt (Free OpenSource), welches in Java entwickelt ist und auf den *GeoTools*⁷ aufbaut. *GeoServer* erfüllt aktuell die OGC-Spezifikationen WMS (Version 1.1.1), WFS⁸ und WFS-T⁹ (Versionen 1.0 und 1.1) sowie WCS¹⁰ (Version 1.1). Mit einer Implementierung ist es möglich, geographische Daten als oben genannte Dienste zur Verfügung zu stellen und mit dem transaktionalen WFS-T zu editieren (JANSEN & ADAMS, 2010). Für eine vereinfachte Anwendung können alle durch den *GeoServer* angebotenen Dienste über eine webbasierte Oberfläche aufgesetzt werden.

OpenLayers *OpenLayers*¹¹ ist eine JavaScript-Bibliothek zur Entwicklung von Web-Mapping-Anwendungen. Ein auf *OpenLayers* basierender Web Mapping Client ermöglicht die über den *GeoServer* bereitgestellten Geo-Dienste in einer mit Bedienelementen ausgestatteten Oberfläche in einem Internetbrowser zu visualisieren (JANSEN & ADAMS, 2010). In Anwendungen, welche auf *OpenLayers* basieren, lassen sich unterschiedlichste Daten einbinden. Sowohl freie Daten wie *OpenStreetMap* als auch proprietäre Formate von *Google Maps*, *Yahoo! Maps* oder *Microsoft Bing Maps* können integriert werden. *OpenLayers* wird als kostenlose freie Software unter einer angepassten BSD-Lizenz¹² angeboten.

⁶<http://geoserver.org/display/GEOS/Welcome>

⁷<http://geotools.org/>

⁸WFS: Web Feature Service

⁹WFS-T: Web Feature Service Transactions

¹⁰WCS: Web Coverage Service

¹¹<http://openlayers.org/>

¹²<http://opensource.org/licenses/category>

PostgreSQL und PostGIS Um die jedem Visualisierungsprojekt zugrunde liegenden Geodaten halten und verwalten zu können, sind geeignete Datenbankmanagementsysteme (DBMS) nötig. Eine OpenSource Software stellt das relationale DBMS *PostgreSQL*¹³ mit der GIS-Erweiterung *PostGIS*¹⁴ dar. Durch *PostGIS* wird *PostgreSQL* zu einer räumlichen Datenbank (spatial database) und ist in der Lage, geometrische und geographische Objekte wie andere Daten in Tabellen der Datenbank abzulegen und zu verwalten (MITCHELL, 2008). Über SQL-Anweisungen¹⁵ kann auf die Daten in einer *PostGIS*-Datenbank zugegriffen werden. Es lassen sich auch Geometrien über SQL-Anweisungen auswählen. *PostGIS* bietet Funktionen zur Datenmanipulation und -zusammenfassung, und es können neue Geometriedaten erzeugt werden (ebd.).

2.2 Stand der Forschung

Die seit einigen Jahren, vor allem in den USA, vorangetriebenen Forschungen zu urbanen Wäldern (*urban forests*) untersuchen die Funktionen urbanen Grüns z.B. im Hinblick auf das Speichervermögen von CO₂ oder anderen Luftschadstoffen und daraus schließend den Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden. MILLER (2007, S. 27) definiert den urbanen Wald „as the sum of all woody and associated vegetation in and around dense human settlements, ranging from small communities in rural settings to metropolitan regions. [...] This forest is the sum of street trees, residential trees, park trees and greenbelt vegetation“. Aufgrund der zunehmend hohen Dringlichkeit des Themas Kohlenstoffdioxidvermeidung bzw. -speicherung sowie Reduktion von Luftschadstoffen rückt in den letzten Jahren die Untersuchung von urbanen Wäldern/Stadtbäumen als CO₂-Senke und Luftfilter sowie vor allem die Quantifizierung und z.T. auch Monetarisierung dieser Dienstleistungen in den Fokus der internationalen Forschungen.

Eine Quantifizierung des Kohlenstoff-Speichervermögens von urbanen Wäldern wurde in mehreren Untersuchungen vorgenommen (ROWNTREE & NOWAK, 1991; NOWAK, 1994b; MCPHERSON, 1998; BRACK, 2002; NOWAK & CRANE, 2002; KÄNDLER ET AL., 2011; STROHBACH & HAASE, 2011; STROHBACH ET AL., 2011). Die Funktion der urbanen Wälder als Filter für Luftschadstoffe und Aerosole wie O₃, SO₂, NO₂ und PM₁₀ wurde u.a. von NOWAK (1994a), BRUSE (2003), NOWAK ET AL. (2006), ESCOBEDO ET AL. (2008), JIM & CHEN (2008), ESCOBEDO & NOWAK (2009), PAOLETTI (2009), TALLIS ET AL. (2011) und ALONSO ET AL. (2011) untersucht.

Zur Berechnung der stadtweiten in den Bäumen gespeicherten Menge an Kohlenstoff wurden

¹³<http://www.postgresql.org/>

¹⁴<http://postgis.refractions.net/>

¹⁵Die *Structured Query Language* (SQL) ist eine standardisierte Datenbanksprache zur Definition, Abfrage und Manipulation von Daten in relationalen Datenbanken.

in den meisten Untersuchungen Datenerhebungen an sogenannten *sample plots* vorgenommen. Hierbei werden über die zu untersuchende Stadt zufällige Plots auf unterschiedliche Landnutzungstypen verteilt. An den jeweiligen Standorten werden dann Baumdimensionen wie Höhe, Kronenbreite und Brusthöhendurchmesser (BHD) aufgenommen. Damit kann die Biomasse einzelner Baumarten bestimmt und somit auf die Fläche extrapoliert werden (NOWAK, 1994b; MCPHERSON, 1998; NOWAK & CRANE, 2002). Das von NOWAK & CRANE (1998) auf diesen Grundlagen entwickelte *Urban Forest Effects Model (UFORE)* ermöglicht die Quantifizierung von Strukturen und Funktionen urbaner Wälder. Es ermöglicht neben der Aufnahme der Waldstruktur die Berechnung des gespeicherten Kohlenstoffs sowie die Reduktion von Luftschadstoffen durch trockene Deposition und wurde in mehreren Untersuchungen angewendet (NOWAK ET AL., 2006; ESCOBEDO ET AL., 2008; PAOLETTI, 2009; DOBBS ET AL., 2011; TALLIS ET AL., 2011). Zur Ermittlung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen (fiktives Entfernen eines Waldgebietes) auf die Luftqualität in Madrid, Spanien setzen ALONSO ET AL. (2011) das meteorologische *CHIMERE chemistry-transport model* ein.

Um möglichst alle in einem Untersuchungsgebiet vorhandenen Bäume berücksichtigen zu können, wird entweder auf Bestandsdaten zurückgegriffen (BRACK, 2002) oder es werden mittels Fernerkundungsdaten (i.d.R. Laserscan-Methoden) die Bäume anhand ihrer durch die Baumkronen bedeckte Fläche extrahiert (z.B. STROHBACH & HAASE (2011); KÄNDLER ET AL. (2011); TALLIS ET AL. (2011)). Zur Berechnung des Kohlenstoffgehalts kommen meist allometrische Funktionen zur Anwendung. Diese ermöglichen es über den BHD oder eine Kombination aus BHD und Baumhöhe die Biomasse basierend auf der jeweiligen Baumart zu berechnen. Die Biomasse wird anschließend mit dem Kohlenstoffanteil multipliziert (Faktor 0,5) und ermöglicht so die Bestimmung des gespeicherten Kohlenstoffs.

Wurden in einigen Arbeiten auch Kohlenstoffspeicherverluste beispielsweise durch Pflegemaßnahmen der Bäume berücksichtigt (NOWAK ET AL., 2002), gehen neuere Ansätze dazu über den Nutzen urbaner Wälder mit dem Lebenszykluskonzept zu verknüpfen (STROHBACH ET AL., 2011). Hierbei wurde in einem umfassenden Ansatz der Kohlenstoff-Fußabdruck eines innerstädtischen aufgeforsteten Gebiets in Leipzig über einen Zeitraum von 50 Jahren quantifiziert. Berücksichtigt wurden bei diesem Ansatz alle den Kohlenstoffspeicher reduzierenden Faktoren wie Transport der Setzlinge von der Baumschule zum Pflanzort, Maschineneinsatz beim Aushub der Pflanzlöcher, Pflegemaßnahmen und schließlich Abtransport nach Fällung bzw. Absterben. Bei all diesen Faktoren wird CO₂ freigesetzt, welches in die Gesamtbilanz eingeht und reduzierend auf das tatsächliche Speichervermögen an Kohlenstoff wirkt.

Die Berechnung des Bindungsvermögens von Luftschadstoffen erfolgt in den meisten Untersuchungen über eine Zeitfunktion. Hierbei wird der Luftschadstofffluss durch ein Produkt aus der Reduktionsgeschwindigkeit eines Baumes über seine Blattfläche und der Luftschadstoffkonzentration ermittelt (NOWAK, 1994a). Die Luftschadstoffkonzentrationen werden i.d.R.

in festgelegten Intervallen von vorhandenen Messstationen abgerufen (zumeist stündlich). Dieser von NOWAK (1994a) entwickelte Ansatz ging ebenfalls in das durch NOWAK & CRANE (1998) entwickelte Modul *UFORE-D: Dry Deposition of Air Pollution* ein und wurde seither in verschiedenen Untersuchungen angewendet (ESCOBEDO ET AL., 2008; JIM & CHEN, 2008; PAOLETTI, 2009; TALLIS ET AL., 2011). Den größten Einfluss auf die Reduktion der Luftschadstoffe O₃, SO₂ und NO₂ haben Stadtbäume am Tag während der Wachstumsperiode (*in-leaf season*) wo die Bäume durch Transpiration Wasser freisetzen. Die Bindung von PM₁₀ erfolgt über das gesamte Jahr sowohl am Tag als auch bei Nacht (NOWAK ET AL., 2006).

Neben den bisher dargestellten und ausnahmslos als positiv bewerteten *ecosystem services* der urbanen Bäume weisen einige Autoren in neuerer Zeit auch auf mögliche *ecosystem disservices* hin (PATAKI ET AL., 2011). LYYTIMÄKI & SIPILÄ (2009) führen als mögliche negative Auswirkungen beispielsweise physische Schäden an Straßen und Gehwegen durch Wurzeln oder an Gebäuden durch umstürzende Bäume, durch Vogelexkrementen verursachte Korrosion an Fahrzeugen sowie Kosten für die Bekämpfung von unerwünschten invasiven Arten an. ESCOBEDO ET AL. (2011) unterteilen *ecosystem disservices* in finanzielle, gesellschaftliche und ökologische Beeinträchtigungen. Hierzu zählen neben An- und Umpflanzung, Verschnitt, Bewässerung und Schädlingsbekämpfung der Bäume über allergieauslösende Pollen, versperrte Aussichten bis hin zu erhöhter Schadstoffbelastung durch CO₂-Emissionen bei Pflegemaßnahmen, Freisetzen flüchtiger organischer Verbindungen und verminderter Wasserqualität durch die Ausspülung von Düngemitteln und Pestiziden.

Bezogen sich alle bisherigen Betrachtungen zumeist auf den Gesamtbestand an urbanen Bäumen, worin die Straßenbäume i.d.R. eingeschlossen sind, gibt es bisher wenige Untersuchungen zu den Ökosystemdienstleistungen von Straßenbäumen. FRENZEL (2009) hat sich für die Straßenbäume der Stadt Leipzig ausschließlich auf die Ermittlung des aktuell und zukünftig gespeicherten Kohlenstoffs konzentriert. Hierfür hat sie über eine zufällige Auswahl die Bäume den Altersklassen der vier Hauptgattungen zugeordnet und im Anschluss Wachstumsraten mittels eines Bootstrapping-Verfahrens bestimmt. Die oberirdische Holzbiomasse wurde hierbei durch allometrische Regressionsgleichungen bestimmt und der Kohlenstoffgehalt wie oben beschrieben ermittelt. Keine Berücksichtigung fanden in dieser Arbeit weitergehende Ökosystemdienstleistungen.

MACO & MCPHERSON (2003) haben das *Street Tree Resource Analysis Tool for Urban Forest Managers (STRATUM)* am Beispiel der Stadt Davis, CA angewendet, um die Ökosystemdienstleistungen des durch die Kommune verwalteten Straßenbaumbestands zu ermitteln. Sie berechneten die Reduktion des atmosphärischen CO₂ und die Verbesserung der Luftqualität durch Reduktion der Luftschadstoffe NO₂ und PM₁₀. Entwickelt wurde *STRATUM* basierend auf den Forschungen von Greg McPherson, Scott Maco und Jim Simp-

son am USDA Forest Service, PSW Research Station¹⁶. Dieses Werkzeug ermöglicht es ein Straßenbaumkataster hinsichtlich seiner Zusammensetzung auszuwerten und die durch die Bäume erbrachten ÖSD zu quantifizieren. Bei Vorliegen der entsprechenden Daten ist es zudem möglich, die ermittelten Werte zu monetarisieren. Im Zuge der weiteren Forschungen und Entwicklungskooperationen wurde *STRATUM* in die *i-Tree Tools*¹⁷ als Modul *i-Tree Streets* zur Analyse urbaner Straßenbaumbestände überführt. Die *i-Tree Tools* beinhalten neben anderen Modulen auch eine weiterentwickelte Version des oben erwähnten *UFORE* in Form von *i-Tree Eco*. *i-Tree Streets* basiert auf einer Einteilung der USA in 16 Baumwachstumszonen, welche aus den Klimazonen der USA (vgl. Abbildung 8.1 im Anhang) abgeleitet wurden (MCPHERSON ET AL., 2003). Beispielhaft ermittelt wurden in mehreren großen Projekten die Ökosystemdienstleistungen in 16 als Referenz für die jeweilige Baumwachstumszone ausgewählten Städten. Daraus entstanden die sogenannten *tree guides*¹⁸, welche einen ausführlichen Überblick über die jeweils angewendete Methodik bieten. MCPHERSON (2010) zeigt einen Ansatz auf, wie *i-Tree Streets* an eine zu untersuchende Stadt außerhalb der USA angepasst werden kann. Welche Ergebnisse für die ÖSD zu erwarten sind, zeigen SOARES ET AL. (2011) am Beispiel von Lissabon, Portugal.

Zum Aufbau eines Umweltinformationssystems eignen sich aus technischer Sicht grundsätzlich zwei Herangehensweisen. Zum einen ist es möglich, so die finanziellen Mittel vorhanden sind, proprietäre, in sich geschlossene und z.T. hoch spezialisierte Systeme einzusetzen. Stellvertretend sei hier auf eine Kombination aus ESRI ArcGIS Server und einem relationalen Datenbankmanagementsystem wie Oracle Spatial verwiesen. Sie bieten als mögliches Vorteil einen umfassenden Support über entsprechend kostenpflichtige Lizenmodelle. Die zweite mögliche Herangehensweise nutzt kostenfreie OpenSource Software. Dieser Weg bietet den möglicherweise entscheidenden Kostenvorteil bei, bis auf Einzelfälle, kaum oder nicht geringerem Funktionsumfang. Auch eine Kombination aus beiden Ansätzen ist, in Grenzen, möglich.

OpenLayers als die kostenfreie Anwendung für Karten-basierte Anwendungen im Internet wird beispielsweise im Gewässerkundlichen Informationssystem Pegel-Online¹⁹ der Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes eingesetzt. Das Projekt Urban Forest Map²⁰ nutzt *OpenLayers* und verfolgt die Kartierung aller Bäume in San Francisco mit Hilfe einer Community sowie die Ermittlung der Ökosystemdienstleistungen der kartierten Bäume. Ein Ableger dieses Projektes beschäftigt sich mit dem selben Ziel im Großraum Philadelphia, USA²¹.

¹⁶<http://www.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/stratum.shtml>

¹⁷<http://www.itreetools.org/applications.php>

¹⁸http://www.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/tree_guides.php

¹⁹<http://www.pegelonline.wsv.de/gast/start>

²⁰<http://www.urbanforestmap.org/>

²¹<http://www.phillytreemap.org/>

Mit dem Mapping von Bäumen befassen sich u.a. das Ancient Tree Hunt-Projekt²² des britischen Woodland Trust zur Identifizierung und Verortung alter Bäume und das deutsche Mundraub-Projekt²³ zur Lokalisierung von herrenlosen Obstbäumen. THORNHILL ET AL. (2009) haben zur Implementierung eines WMS für das Community-basierte Mapping urbaner Bäume asynchrone Datenübertragungstechniken auf Basis von JavaScript eingesetzt. Diese ermöglichen eine ununterbrochene Interaktion zwischen Nutzer und Anwendung durch das Nachladen von Daten ohne Neuladen der Website. Als Kartengrundlage dienen in allen Fällen, bis auf Pegel-Online, über die jeweiligen APIs²⁴ angebundene proprietäre Daten von *Google Maps* oder *Bing Maps*.

²²<http://www.ancient-tree-hunt.org.uk/discoveries/interactivemap/>

²³<http://www.mundraub.org/>

²⁴Ein *Application Programming Interface* (API) ist eine Programmierschnittstelle eines Softwaresystems zur Anbindung von Programmen an dieses System.

3 Materialien und Methodik

Um die in Kapitel 1.1 vorgestellten Ziele zu erreichen, wurde zunächst das von der Stadt Leipzig zur Verfügung gestellte Straßenbaumkataster analysiert und zur Berechnung der Ökosystemdienstleistungen aufbereitet. Im Anschluss wurden die Ergebnisse als Ausgangsbasis für das Umweltinformationssystem genutzt und die Visualisierungs- und Abfragefunktionalitäten in eine Website implementiert (vgl. Abbildung 3.1).

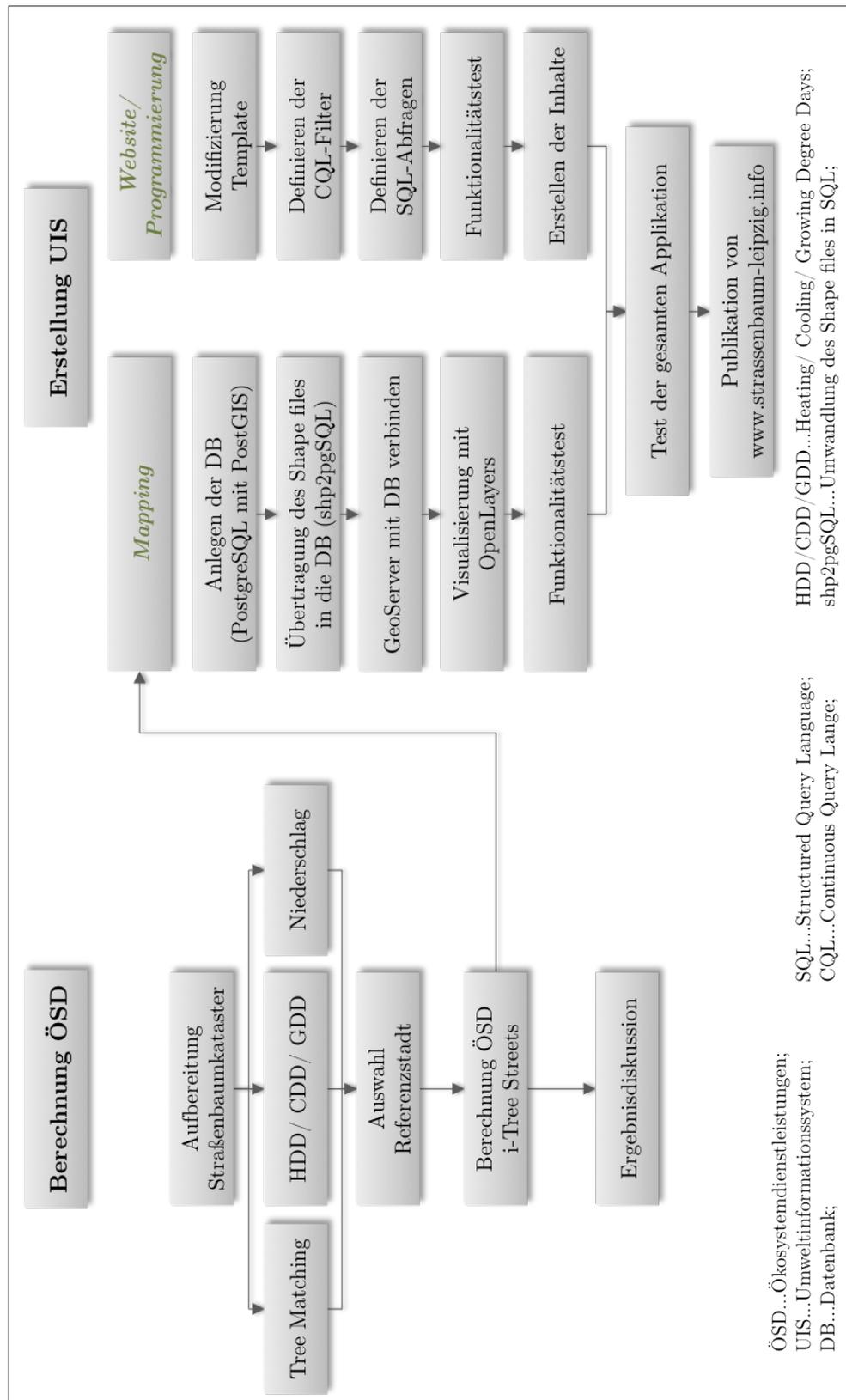
3.1 Berechnung der Ökosystemdienstleistungen

Nach intensivem Literaturstudium zum Thema und Diskussion der verwendeten Ansätze zur Berechnung des CO₂- und Luftschadstoff-Speichervermögens von (Straßen-) Bäumen sowie zur Oberflächenabflussreduzierung, wurde ein praxisnaher Ansatz zur Berechnung von Ökosystemdienstleistungen mit einem alle drei Bereiche abdeckenden, in den USA etablierten Werkzeug (*i-Tree Streets*) gewählt. Geprüft werden sollte u.a. ob *i-Tree Streets*, welches für die nordamerikanischen klimatischen Verhältnisse kalibriert wurde, auch für eine mitteleuropäische Stadt zu plausiblen Ergebnissen führt. Ein möglicher Ansatz für Anpassung und Nutzung von *i-Tree Streets* außerhalb der USA wurde durch MCPHERSON (2010) vorgeschlagen. Mit Ausnahme des auf diesem Ansatz beruhenden Beispiels Lissabon, Portugal (SOARES ET AL., 2011) wurde die Software *i-Tree Streets*, nach derzeitigem Kenntnisstand des Autors, bisher ausschließlich für die Quantifizierung ökosystemarer Dienstleistungen bei Straßenbäumen in den Vereinigten Staaten von Amerika angewendet.

3.1.1 Das Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig

Straßenbäume wurden bereits im Jahr 1864 im Statistischen Jahrbuch der Stadt Leipzig erfasst. 1932 waren über 38.000 Straßenbäume in den Unterlagen verzeichnet (STADT LEIPZIG, 2011a). Zu Beginn der 1990er Jahre wurde damit begonnen das Straßenbaumkataster anzulegen. Verzeichnet sind darin u.a. genaue Angaben zu Standort und Baumart sowie baumpflegerisch relevante Informationen zu Stamm, Kronenbreite und Gesundheitszustand (ebd.). „Mit dem Kataster ist der Stadt ein Instrument für die Planung, Erhaltung und Pflege der Straßenbäume ... in die Hand gegeben“ (ebd.). Es wurde angelegt, um gezielte Maßnahmen hinsichtlich der Bestandsentwicklung, Sanierung bzw. Gesunderhaltung ableiten zu können (ebd.).

Abbildung 3.1: Methodendesign dieser Untersuchung



Quelle: eigene Bearbeitung

Hervorzuhebende Beispiele für eine gelungene Gestaltung mit Straßenbäumen in der Stadt Leipzig sind nach HEYNISCH (2011) u.a. die Pflanzungen in der August-Bebel-Straße, Johannisallee und Kurt-Eisner-Straße. Diese repräsentieren stellvertretend sowohl gut erhaltene Altbestände (Johannisallee, vgl. Abbildung 2.2) als auch Neu- und Nachpflanzungen im Bereich von Mittelstreifen im Straßenraum (vgl. Abbildung 3.2)

Abbildung 3.2: *Platanus x acerifolia* auf dem Mittelstreifen der Kurt-Eisner-Straße (Neupflanzungen im Hintergrund)



Quelle: eigene Aufnahme

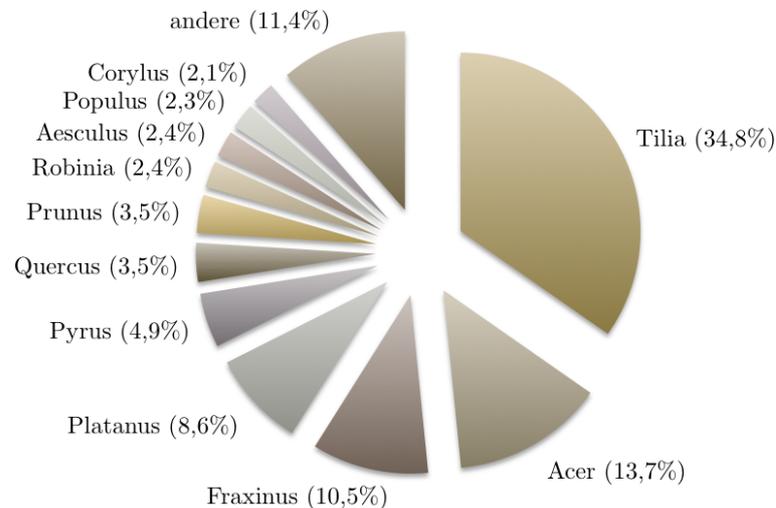
Das Straßenbaumkataster mit dem Stand 27. Januar 2011 wurde von der Stadt Leipzig (AMT FÜR STADTGRÜN UND GEWÄSSER, 2011) für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird das Wort Straßenbaumkataster bzw. Kataster für das *bereinigte* Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig verwendet. Alle Angaben (Zahlen und Prozentwerte etc.) beziehen sich auf den bereinigten Bestand von 57.910 Straßenbäumen. Entfernt wurden zunächst alle leeren Baumscheiben sowie Bäume mit unklaren Koordinatenangaben oder fehlenden bzw. offensichtlich falschen Angaben zum Stammumfang. Aus den Werten zum Stammumfang wurde über die Kreisformel (i) die wichtigste Größe für Einzelbäume, der Brusthöhendurchmesser (BHD) abgeleitet. Der BHD dient der Beschreibung der Baumdimensionen und wird in einer definierten Höhe (z.B. Brusthöhe 1,30 m) angegeben (NAGEL, 2001).

$$BHD = \text{Stammumfang} / \pi \quad (i)$$

Die im Straßenbaumkataster verzeichneten Arten wurden mit Hilfe von SCHÜTT ET AL. (2004, 2006), THROM (2007) und der über das Internet zur Verfügung stehenden Datenbanken

PLANTS (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2011), *UIPlants* (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 2011) sowie *Baumkunde.de* (HEPP & GURK, 2011) ihren Gattungen und Familien zugeordnet und wo notwendig entsprechend angepasst.

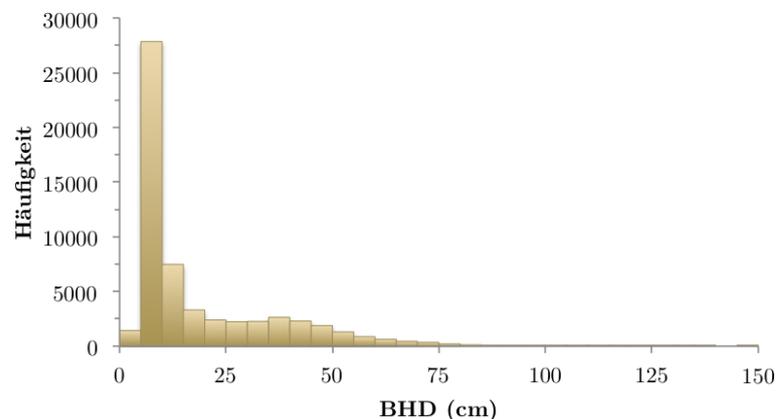
Abbildung 3.3: Prozentuale Verteilung der Straßenbäume nach Gattungen



Quelle: eigene Berechnung

Dominiert wird der Bestand von den Bäumen der vier Gattungen *Tilia* (Linde), *Acer* (Ahorn), *Fraxinus* (Esche) und *Platanus* (Platane) welche zusammen gut 65 % aller Bäume ausmachen (vgl. Abbildung 3.3). Der weitaus größte Teil der im Straßenbaumkataster vertretenen Bäume (27849 Bäume) fällt in die Klasse mit 5 bis 10 cm Brusthöhendurchmesser. Einen BHD von mehr als einem Meter weisen lediglich 44 Bäume auf (vgl. Abbildung 3.4). Der größte und auch älteste im Januar 2011 im Straßenbaumkataster verzeichnete Baum ist eine Stiel-Eiche (*Quercus robur*) mit einem BHD von knapp 150 cm.

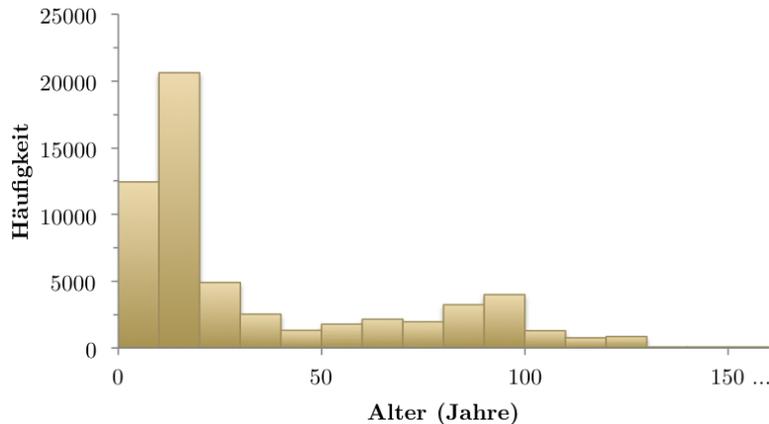
Abbildung 3.4: Häufigkeitsverteilung der Straßenbäume nach Brusthöhendurchmesser (BHD)



Quelle: eigene Berechnung (Klassenbreite: 5 cm)

Leipzigs Straßenbaumbestand ist mit einem Medianwert von 16 Jahren (Mittelwert: 34 Jahre) vergleichsweise jung. Wie auch aus der Altersverteilung in Abbildung 3.5 deutlich wird, befinden sich mehr als die Hälfte aller Bäume (ca. 57 %) in den beiden Altersklassen bis einschließlich 20 Jahre. Diese Bäume wurden in den Jahren nach der politisch gesellschaftlichen Wende von 1989 angepflanzt.

Abbildung 3.5: Häufigkeitsverteilung der Straßenbäume nach Alter



Quelle: eigene Berechnung (Klassenbreite: 10 Jahre)

3.1.2 Auswahl der Referenzstadt

Zur Berechnung der Ökosystemdienstleistungen der Leipziger Straßenbäume wurde als wesentliche Leitlinie der Ansatz von MCPHERSON (2010) verwendet. Er zeigt eine systematische Methode auf, wie die am besten zur Untersuchungsstadt passende US-Referenzstadt gefunden werden kann. Die Auswahl der richtigen Referenzstadt und somit Klimazone (vgl. Abbildung 8.1 und 8.2 im Anhang) für die Berechnung der ÖSD in *i-Tree Streets* ist Grundvoraussetzung für eine bestmögliche Schätzung der von den Straßenbäumen erbrachten Dienstleistungen. Um die Auswahl der Referenzstadt zu vereinfachen, beschränkt sich MCPHERSON (2010) auf drei Kriterien: Baumartenzusammensetzung (tree matching), Heating und Cooling Degree Days und den Niederschlag als die Faktoren, die eine Abschätzung der ÖSD wesentlich beeinflussen. Ergänzt durch die Growing Degree Days kommen für die Ermittlung der Referenzstadt eben genannte biophysikalische Faktoren in dieser Untersuchung zur Anwendung.

3.1.2.1 Biophysikalische Bedingungen

Tree Matching Die Baumartenzusammensetzung der Untersuchungsstadt sollte der der Referenzstadt möglichst nahe kommen. Da die erbrachten ÖSD aufs Engste mit artspezifischen Variablen wie Blattfläche und Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen

zusammenhängen, hat ein guter *tree match* hohe Priorität. Um eine Auswahl treffen zu können, werden die relative Häufigkeit der in Leipzig vorherrschenden Arten mit denen für die Referenzstädte verzeichneten Arten verglichen (vgl. Abbildung 8.3 im Anhang). Hierbei ist ein Vergleich (*tree match*) nach den Baumarten wünschenswert. Ein Vergleich nach Gattungen ist bei gleicher Wachstumsrate, Verhalten und Größe von Arten ein und derselben Gattung ebenfalls zulässig.

Heating degree days and cooling degree days Heating degree days (HDD) und cooling degree days (CDD) bilden jährliche Muster der Lufttemperatur ab und stellen Indikatoren für den Heiz- bzw. Kühlaufwand (Klimaanlagen) von Gebäuden dar. MCPHERSON (2010) erachtet diese Indikatoren als wichtig, da Bäume durch die Reduzierung der Windgeschwindigkeiten, Schattenwurf und somit Einstrahlungsminderung sowie Regulierung der Lufttemperatur durch Evapotranspiration Einfluss auf das Heiz- und Kühlverhalten von Gebäuden ausüben. HDD und CDD werden aus stündlich erfassten meteorologischen Daten zumeist für ein Kalenderjahr berechnet. HDD sind die Anzahl der Tage im Jahr, wo die Lufttemperatur unter einer Basistemperatur (z.B. 18°C) liegt und somit ein Gebäude geheizt werden muss. Umgekehrt geben CDD die Tage wieder, an denen die Lufttemperatur entsprechend über einer Basistemperatur liegt und ein Gebäude gekühlt werden müsste. Die Werte für die Referenzstädte wurden aus MCPHERSON (2010) entnommen (vgl. Tabelle 3.1). Weltweit für viele Orte zur Verfügung stehen diese Werte über das Online-Portal www.degreedays.net. Die Werte für Leipzig wurden über die Station *Flughafen (Schkeuditz)* abgerufen. Diese Station befindet sich am Flughafen Leipzig-Halle ca. 15 km nordwestlich des Stadtzentrums und ca. 5 km nordwestlich der Stadtgrenze. Hier standen Werte ab Mai 2008 zur Verfügung. Für die drei Stationen innerhalb der Stadt (Erich-Zeigner-Allee, Rundling, Willi-Bredel-Straße) standen entsprechende Werte erst ab Ende 2010 bzw. Anfang 2011 zur Verfügung. Da für einen plausiblen Vergleich Werte für mindestens ein Kalenderjahr vorliegen müssen, kamen diese Stationen für die Untersuchung nicht in Frage.

Niederschlag Der jährliche Niederschlag beeinflusst die Höhe der Wasseraufnahme der Baumkronen. Auch wenn die Saisonalität, Intensität und die Dauer von Niederschlagsereignissen wichtige Faktoren für die numerische Modellierung der Wasseraufnahme sind, verweist MCPHERSON (2010) auf den weltweit zugänglichen durchschnittlichen jährlichen Niederschlag für Vergleichszwecke zwischen Untersuchungs- und Referenzstadt in diesem Zusammenhang. Bei der Auswahl der Referenzstadt sollte daher, je nach Niederschlag eine entsprechende Gewichtung vorgenommen werden. Für besonders feuchte oder trockene Standorte dürfen die Abweichungen in diesem Punkt nur entsprechend minimal ausfallen. Die Niederschlagswerte der Referenzstädte gehen aus MCPHERSON (2010) hervor (vgl. Tabelle 3.2). Leipzig verfügt

Tabelle 3.1: Jährliche Heating Degree Days (HDD), Cooling Degree Days (CDD) und Growing Degree Days (GDD) der 16 Referenzstädte in den USA und Leipzigs mit Basistemperaturen

Referenzstadt	HDD 15,5°C	CDD 15,5°C	HDD 18°C	CDD 18°C	HDD 18,3°C	CDD 18,3°C	GDD 10°C
Albuquerque, NM	1836	1119	2352	723	2416	677	2262
Berkeley, CA	935	209	1682	44	1786	39	1647
Boise, ID	2596	680	3242	414	3325	387	1615
Charleston, SC	803	1728	1171	1183	1221	1124	3607
Charlotte, NC	1377	1355	1832	898	1891	847	2731
Claremont, CA	280	577	791	162	872	134	2511
Fort Collins, CO	2620	660	3252	379	3332	349	1427
Glendale, AZ	353	2866	602	2203	637	2128	4646
Honolulu, HI	0	3438	0	2526	0	2416	5642
Indianapolis, IN	2507	886	3079	546	3153	510	1937
Longview, WA	1716	427	2381	180	2468	157	1125
Minneapolis, MN	3721	662	4354	383	4436	355	1539
Modesto, CA	921	1556	1378	1100	1439	1052	2774
Orlando, FL	121	2660	265	1891	289	1806	4458
Queens, NY	2174	938	2746	597	2819	560	2086
Santa Monica, CA	253	831	644	310	710	266	2383
Leipzig	2584	447	3298	253	3450*	225*	1198

Quelle: verändert nach MCPHERSON (2010); *Werte nur für eine Basistemperatur von 18,5°C verfügbar

im langjährigen Mittel (1961-1990) über einen jährlichen durchschnittlichen Niederschlag von 507 mm (DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST, 2011).

Growing degree days Erweitert wurde der Ansatz von MCPHERSON (2010) zur Ermittlung einer geeigneten Referenzstadt um die Berücksichtigung der *Growing Degree Days (GDD)*. GDD werden in der Landwirtschaft genutzt um die Wachstumsperioden von Pflanzen bestimmen zu können. Sie werden analog zu den HDD und CDD im Jahresdurchschnitt berechnet, hier allerdings zu einer Basistemperatur von 10°C. Die zusätzliche Einbeziehung der GDD ermöglicht eine fundiertere Basis für die Auswahl der zur Untersuchungsstadt am besten passenden Klimazone. Die Werte für die GDD der 16 US-Referenzstädte wurden der Datenbank des *National Climatic Data Center (NCDC)* (UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE, 2011) entnommen (vgl. Tabelle 3.1). Da diese Werte in °F angegeben sind, erfolgte für eine bessere Vergleichbarkeit die Umrechnung in GDD nach °C über eine entsprechende Verhältnisformel (ii).

$$9 \text{ GDD } ^\circ\text{F} = 5 \text{ GDD } ^\circ\text{C} \quad (\text{ii})$$

$\text{GDD } ^\circ\text{F}$... Growing Degree Days ermittelt in °F

$\text{GDD } ^\circ\text{C}$... Growing Degree Days ermittelt in °C

Tabelle 3.2: Jährlicher Niederschlag in den 16 Referenzstädten der USA und in Leipzig sowie deren geographische Lage

Referenzstadt	Niederschlag (mm)	Breite	Länge	Höhe ü. NN (m)
Albuquerque, NM	250	35,0844909	-106,6511367	1.619
Berkeley, CA	564	37,8715926	-122,272747	400
Boise, ID	417	43,612631	-116,211076	823
Charleston, SC	1.555	32,7765656	-79,9309216	4
Charlotte, NC	1.426	35,2270869	-80,8431267	229
Claremont, CA	523	34,0966764	-117,7197785	358
Fort Collins, CO	452	40,5852602	-105,084423	1.525
Glendale, AZ	174	33,5386523	-112,1859866	351
Honolulu, HI	392	21,3069444	-157,8583333	0
Indianapolis, IN	1.110	39,767016	-86,156255	219
Longview, WA	1.059	45,6387281	-122,6614861	6
Minneapolis, MN	622	44,9799654	-93,2638361	264
Modesto, CA	315	37,6390972	-120,9968782	28
Orlando, FL	1.367	28,5383355	-81,3792365	34
Queens, NY	1.041	40,7498243	-73,7976337	10
Santa Monica, CA	570	34,0194543	-118,4911912	32
Leipzig	507	51,340333	12,37475	118

Quelle: verändert nach MCPHERSON (2010)

Für Leipzig standen keine Werte für die GDD zur Verfügung. Diese wurden aus langjährigen Mittelwerten des Deutschen Wetterdienstes der Station Leipzig-Schkeuditz berechnet. Für den Zeitraum Mai 1972 bis Februar 2010 standen mittlere, minimale und maximale Tagestemperaturen zur Verfügung. Zur Berechnung der GDD wurde einem allgemein anerkannten Ansatz der IOWA STATE UNIVERSITY (2011) gefolgt. In einem ersten Schritt wurden alle minimalen Tagestemperaturen unter 10°C auf eben diesen Wert und alle maximalen Tagestemperaturen oberhalb von 30°C auf diesen Wert gesetzt. Aus den angepassten Werten wurden die täglichen GDD mittels der Statistiksoftware *R*, wie in Formel (iii) aufgezeigt, berechnet.

$$GDD = (Tmax + Tmin)/2 - Tbase \quad (iii)$$

GDD ... Growing Degree Days

Tmax ... maximale Tagestemperatur

Tmin ... minimale Tagestemperatur

Tbase ... Basistemperatur = 10°C

Im Anschluss wurden durch Addition der Tageswerte für den zur Verfügung stehenden Zeitraum (1972 bis 2010) jährliche GDD ermittelt. Nun konnte der Durchschnitt der Jahresmittelwerte der GDD gebildet werden. Demnach verfügt Leipzig über 1198 GDD bei einer Basistemperatur von 10°C (vgl. Tabelle 3.1).

Auf Grundlage dieser fünf ermittelten Werte wurde eine Vorauswahl aus den 16 Referenzstädten getroffen. Es wurden die zwei jeweils am besten mit Leipzig übereinstimmenden Städte ausgewählt. Aufgrund von Dopplungen sind dies, in alphabetischer Reihenfolge, die sieben Städte Boise, ID, Claremont, CA, Fort Collins, CO, Longview, WA, Minneapolis, MN, Queens, NY und Santa Monica, CA.

3.1.2.2 Die Auswahl von Fort Collins, CO als Referenzstadt

Für diese Vorauswahl wurde nach MCPHERSON (2010) jeweils der RMSE (root mean squared error) wie in Formel (iv) dargestellt, berechnet. Die Stadt, welche den niedrigsten RMSE aufweist, passt am besten zur Untersuchungsstadt. Als Voraussetzung zur Berechnung der RMSE sind zwei Schritte notwendig.

$$RMSE = SQRT[a * (HDD_L - HDD_R)^2 + b * (CDD_L - CDD_R)^2 + c * (GDD_L - GDD_R)^2 + d * (N_L - N_R)^2 + e * TM_R^2] \quad (iv)$$

HDD_L, HDD_R ... Heating Degree Days von **L**eipzig und einer **R**eferenzstadt

CDD_L, CDD_R ... Cooling Degree Days von **L**eipzig und einer **R**eferenzstadt

GDD_L, GDD_R ... Growing Degree Days von **L**eipzig und einer **R**eferenzstadt

N_L, N_R ... Niederschlag von **L**eipzig und einer **R**eferenzstadt

TM_R ... Tree Match der jeweiligen **R**eferenzstadt zu Leipzig

a, b, c, d, e ... nicht-negative Koeffizienten, welche in Summe 1,0 ergeben

Zunächst wurden die Absolutwerte der fünf oben angeführten Kriterien und die jeweiligen Differenzwerte zur Untersuchungsstadt Leipzig normalisiert. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit. Niedrige Werte bedeuten in diesem Zusammenhang, dass die zugehörigen Städte besser zu Leipzig passen als Städte mit hohen Werten. Hierfür wurden die Wertebereiche für jedes der fünf Kriterien in zehn gleich große Intervalle unterteilt (vgl. Tabelle 3.3). Um den normalisierten Wert jedes Differenzwertes zu ermitteln, wurden die Werte linear interpoliert. Beispielsweise beträgt der HDD-Differenzwert von Santa Monica, CA zu Leipzig 2654. Er würde demzufolge in das Intervall 7-6 (2612-3048) fallen. Nach der linearen Interpolation beträgt der normalisierte Wert 6,10, nahe zur unteren Intervallgrenze 6, da der Differenzwert nahe am Intervallwert 6 liegt. Eine Übersicht der Absolut- und Differenzwerte sowie der normalisierten Werte ist aus Tabelle 3.4 ersichtlich.

Anschließend wurde jedes der fünf Kriterien nach seiner relativen Bedeutung gewichtet (vgl. Tabelle 3.5). Wird allen fünf Kriterien die gleiche Bedeutung zugemessen, geht jedes Kriterium als Koeffizient mit einem Wert von 0,2 in die Berechnung der RMSE ein. Zusammen

Tabelle 3.3: Normalisierte Intervallwerte (erste Spalte) und zugehörige Differenzwerte der fünf Kriterien

Wert	Tree Match (%)	HDD (18°C)	CDD (18°C)	GDD (10°C)	Niederschlag (mm)
10-9	<10	>3919	>537	>2260	>954
9-8	10-15	3483-3919	478-537	2009-2260	848-954
8-7	15-20	3048-3483	418-478	1758-2009	742-848
7-6	20-25	2612-3048	358-418	1507-1758	636-742
6-5	25-30	2177-2612	299-358	1256-1507	530-636
5-4	30-35	1742-2177	239-299	1004-1256	424-530
4-3	35-40	1306-1742	179-239	753-1004	318-424
3-2	40-45	871-1306	119-179	502-753	212-318
2-1	45-50	435-871	58-119	251-502	106-212
1-0	>50	<435	<58	<251	<106

Quelle: verändert nach MCPHERSON (2010)

ergeben die Faktoren den Wert 1,0. Die Bedeutung der einzelnen Kriterien kann für ein genaueres Ergebnis durch unterschiedliche Wichtungen herausgestellt werden. Den größten Einfluss auf die Auswahl der Referenzstadt hat ein guter tree match. Daher wurde diesem Kriterium mit einem Wert von 0,3 die größte Bedeutung zugemessen. Durch den Vergleich der Niederschlagsmengen und -verteilung der vorausgewählten Städte mit der Untersuchungsstadt wurde dem Niederschlag mit einem Wert von 0,25 der zweitgrößte Einfluss zugewiesen. Daran anschließend folgen mit abnehmender Bedeutung die HDD, CDD und GDD.

Die bei gleicher bzw. ungleicher Gewichtung ermittelten RMSE sind aus Tabelle 3.5 ersichtlich. Hier wird deutlich, dass bei gleicher Gewichtung die Stadt Fort Collins, CO mit einem Abstand von 0,22 zu Boise, ID am besten zu Leipzig passt. Anschließend folgen mit größerem Abstand Longview, WA, Minneapolis, MN, Queens, NY sowie noch einmal deutlich zurück Claremont, CA und Santa Monica, CA. Bei ungleicher Gewichtung ergibt sich mit leichten Verschiebungen ein fast identisches Bild. Fort Collins, CO weist auch hier den niedrigsten RMSE auf. Der Abstand zu Boise, ID ist mit 0,21 nur minimal kleiner geworden. Nun folgen mit einem sogar noch leicht vergrößerten Abstand Queens, NY vor Minneapolis, MN und Longview, WA. Die RMSE von Claremont, CA und Santa Monica, CA sind dagegen kaum gesunken und so bilden diese beiden Städte auch bei ungleicher Gewichtung den Abschluss.

Konnte man beim Blick nur auf das Kriterium tree match noch den Eindruck gewinnen, dass Queens, NY die perfekte Referenzstadt sei, hat sich dies bei Betrachtung aller einfließenden Faktoren deutlich geändert. Queens, NY passt mit seinem immerfeuchten Küstenklima und der v.a. mehr als doppelt so hohen Niederschlagsmenge nicht zu Leipzig. Die beiden mediterran geprägten kalifornischen Städte Claremont und Santa Monica wären als Referenz nicht geeignet. Longview, WA geprägt durch sein immerfeuchtes Westküstenklima, den mehr als doppelt so hohen Niederschlägen und im Vergleich zu Leipzig sehr milden Wintern kommt als Referenzstadt ebenfalls nicht in Frage. Minneapolis, MN und Boise, ID weisen zwar einen

Tabelle 3.4: Absolutwerte, Differenzwerte [(ABS(Leipzig - Referenzstadt))] und normalisierte Werte für Leipzig und sieben Referenzstädte

	Leipzig	Boise	Claremont	Fort Collins	Longview	Minneapolis	Queens	Santa Monica
Tree match (%)								
Absolutwert		43,8	15,6	29,5	59,9	43,2	66,9	2,7
normalisierter Wert		2,24	7,88	5,10	0,41	2,36	0,00	9,73
HDD (Basis 18°C)								
Absolutwert	3298	3242	791	3252	2381	4354	2746	644
Differenzwert		56	2507	46	917	1056	552	2654
normalisierter Wert		0,13	5,76	0,11	2,11	2,43	1,27	6,10
CDD (Basis 18°C)								
Absolutwert	253	414	162	379	180	383	597	310
Differenzwert		161	91	126	73	130	344	57
normalisierter Wert		2,70	1,54	2,12	1,25	2,18	5,76	0,98
GDD (Basis 10°C)								
Absolutwert	1198	1615	2511	1427	1125	1539	2086	2383
Differenzwert		417	1313	229	73	342	888	1186
normalisierter Wert		1,66	5,23	0,91	0,29	1,36	3,54	4,72
Niederschlag/a (mm)								
Absolutwert	507	417	523	452	1059	622	1041	570
Differenzwert		90	16	55	552	115	534	63
normalisierter Wert		0,85	0,15	0,52	5,21	1,09	5,04	0,59

Quelle: verändert nach MCPHERSON (2010)

Tabelle 3.5: Root Mean Squared Errors (RMSE) berechnet mit gleich gewichteten Koeffizienten (jeweils 0,2) und ungleich gewichteten Koeffizienten* für jedes Auswahlkriterium

Wichtung	Boise	Claremont	Fort Collins	Longview	Minneapolis	Queens	Santa Monica
gleich	2,31	3,10	2,09	2,68	2,70	2,74	3,11
ungleich	2,19	3,08	1,98	2,70	2,69	2,68	3,10

Quelle: eigene Berechnung (*ungleich gewichtete Koeffizienten: Tree Match=0,3; Niederschlag=0,25; HDD=0,2; CDD=0,15; GDD=0,1)

besseren tree match als Fort Collins, CO auf, verlieren aber mit ihren sehr stark kontinental geprägten Klimaten an Bedeutung.

Nachdem auf diesem Weg die Stadt Fort Collins, CO als Referenz für die Untersuchungsstadt Leipzig ermittelt wurde, erfolgte die Berechnung der ÖSD mittels der Software *i-Tree Streets* unter Nutzung der zugehörigen Klimazone.

3.1.3 i-Tree Streets

i-Tree Streets als Teil der *i-Tree Tools*¹ wurde vom USDA Forest Service entwickelt. Die *i-Tree Tools* sind kostenfrei verfügbar und werden in einer Kooperation aus USDA Forest Service, Davey Tree Expert Company, National Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists und International Society of Arboriculture weiterentwickelt. *i-Tree Streets* fokussiert auf die Ökosystemdienstleistungen und die strukturelle Zusammensetzung von kommunalen Straßenbäumen. Es nutzt eine Stichprobe oder ein komplettes Kataster um die jährlichen ökosystemaren Leistungen zu quantifizieren und zu monetarisieren. Hierzu zählen Energieeinsparungen, Verbesserungen der Luftqualität, Reduzierungen von Kohlenstoffdioxid, Regulierung von Niederschlagswässern sowie Erhöhungen von Immobilienwerten (*i-Tree Streets. User's Manual*, 2011).



Möglichkeiten und Grenzen Durch die Nutzung von *i-Tree Streets* ist es im besten Fall möglich, Aussagen über die von einem Straßenbaumbestand einer Stadt eingesparten Mengen an Energie (Strom, Erdgas), reduzierten Luftschadstoffen (CO₂, O₃, SO₂, PM₁₀, NO₂) sowie gesteigerten Immobilienwerten in \$/€ zu treffen. Dies trifft aber nur, und das auch verbunden mit entsprechenden Unsicherheiten auf die Anwendung in den USA zu. Für eine Anwendung außerhalb der Vereinigten Staaten von Amerika, wie im vorliegenden Fall in Mitteldeutschland ist die Angabe von \$/€-Werten v.a. für eine mögliche Energieeinsparung nicht fundiert möglich. Diese basiert in *i-Tree Streets* auf der Vermeidung von Kohlenstoffdioxid und anderer Luftschadstoffe durch einen reduzierten Heiz- bzw. Kühlaufwand von Gebäuden, dadurch geringerem Energieverbrauch und somit verminderter Emission beim Energie erzeugenden Unternehmen. Da v.a. die Architektur und Bauweise (Materialien, Dämmung) der Gebäude zwischen den USA und Deutschland deutlich verschieden sind, kann dieser Teil nicht für die Untersuchung des Leipziger Straßenbaumkatasters genutzt werden. Ebenso schwer ist es möglich, die Steigerung von Immobilienwerten durch Straßenbäume zu monetarisieren. Daher konzentriert sich diese Arbeit auf die Quantifizierung der bereits oben beschriebenen Ökosystemdienstleistungen und deren Angabe in den entsprechenden Maßeinheiten.

Um die ÖSD der Leipziger Straßenbäume in das Umweltinformationssystem überführen und dort über die unterschiedlichsten Abfragen (Straße oder Ortsteil oder Baumart etc.) nutzen zu können, ist es notwendig Werte für jeden Einzelbaum zu ermitteln. *i-Tree Streets* ermöglicht es bei Verwendung seiner graphischen Benutzeroberfläche allerdings nur Werte für einen Gesamtbestand zu berechnen. Daher war es nötig für die Berechnung der ÖSD auf die Basisdaten der Software zurückzugreifen und die Berechnung über eine lineare Interpolation „manuell“ vorzunehmen. Nachfolgend wird die Vorgehensweise der Berechnung erläutert.

¹<http://www.itreetools.org/>

3.1.4 Nutzung der Basisdaten aus i-Tree Streets

Nach Korrespondenz und Abstimmung mit den Entwicklern von *i-Tree Streets* wurden zur Berechnung der ÖSD die der Software zugrunde liegenden und bei einer Installation mitgelieferten Basisdaten verwendet. Um die Ökosystemdienstleistungen korrekt berechnen zu können, liegen den Baumarten der Referenzstadt Wachstumskurven zugrunde. Alle in Leipzig vorkommenden Baumarten müssen daher mit denen von Fort Collins, CO abgeglichen und wo nötig zugeordnet werden (Assigned Species Value). In einem taxonomischen Ansatz wurden die Baumarten der Untersuchungsstadt den Arten der Referenzstadt und somit den dort ermittelten Wachstumsraten zugeordnet. Zunächst wurde nach der Baumart abgeglichen und wenn dies nicht möglich war nach der Gattung (vgl. Tabelle 3.6 und Tabelle 8.2 im Anhang).

Tabelle 3.6: Zuordnung der Leipziger Baumarten zu den Arten der Referenzstadt (Auszug)

Baumart	Species Code	Anzahl (absolut)	Anteil (relativ %)	zugewiesene Art* (Wachstumsrate)
<i>Tilia</i>	TI	10760	18,6	FRPE
<i>Platanus x acerifolia</i>	PLAC	5004	8,6	BDL
<i>Tilia cordata Greenspire</i>	TICO	4369	7,5	TICO
<i>Fraxinus excelsior</i>	FRPE	4207	7,3	FRPE
<i>Acer pseudoplatanus</i>	AC	2727	4,7	FRPE
<i>Tilia x vulgaris Pallida</i>	TI	2487	4,3	FRPE
<i>Acer platanoides</i>	ACPL	2149	3,7	ACPL
<i>Pyrus calleryana Chanticleer</i>	PY	1953	3,4	PY
<i>Fraxinus excelsior Westhofs Glorie</i>	FR	1405	2,4	FRPE
<i>Corylus colurna</i>	COCO2	1191	2,1	ACPL
<i>Quercus uercus robur</i>	QURO	1089	1,9	FRPE
<i>Betula pendula</i>	BEPE	1064	1,8	BDL
<i>Tilia cordata</i>	TICO	1056	1,8	TICO
<i>Aesculus hippocastanum</i>	AEHI	1040	1,8	ACPL
<i>Tilia cordata Rancho</i>	TICO	1014	1,8	TICO
<i>Pyrus</i>	PY	845	1,5	PY
<i>Malus</i>	MA2	808	1,4	MA2
<i>Robinia pseudoacacia</i>	ROPS	755	1,3	FRPE
<i>Populus</i>	PO	705	1,2	FRPE
<i>Carpinus betulus Frans Fontaine</i>	CABE	630	1,1	ACPL
<i>Acer platanoides Schwedleri</i>	ACPL	592	1,0	ACPL
andere		12060	20,8	

Quelle: eigene Bearbeitung auf Basis von *i-Tree Streets*; *FRPE = *Fraxinus pennsylvanica*, BDL = *Broadleaf Deciduous Large*, TICO = *Tilia cordata*, ACPL = *Acer platanoides*, PY = *Pyrus species*, MA2 = *Malus species*

Die manuelle Ermittlung der ÖSD bietet im Vergleich zur Nutzung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) einen entscheidenden Vorteil. Bei Nutzung des GUI sortiert *i-Tree Streets* intern die Bäume in DBH-classes (Angabe in cm)². Die Berechnung würde anschließend auf dieser Basis erfolgen. Beispielsweise nutzt ein Baum mit einem zugewiesenen „Assigned Species Value“ ACPL (*Acer platanoides*) und einem BHD von 15,60 cm den Mittelwert der DBH-class

²DBH = Diameter at Breat Height = Brusthöhendurchmesser

15,2 bis 30,5 cm (22,86 cm) für die Berechnung von beispielsweise sequestriertem CO₂. Diesem Baum wird demnach ein Wert von 59,8 kg zugewiesen (vgl. Abbildung 3.6). Das bedeutet, dass allen Bäumen die in diese DBH-class sortiert werden, der gleiche Wert zugewiesen wird. Es erfolgt keine Differenzierung bei unterschiedlichen BHD in einer Klasse.

Abbildung 3.6: Beispiel für Basisdaten aus *i-Tree Streets* (hier CO₂ sequestered)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Assigned Species Value	3,81	11,43	22,86	38,10	53,34	68,58	83,82	99,06	114,30
3	ACPL	7,8	25,6	59,8	102,5	134,7	138,9	100,7	125,5	0,0
4	ACSA2	4,0	15,8	49,6	110,5	195,1	292,1	416,3	0,0	0,0
5	ACSA1	3,8	32,2	84,9	163,7	237,2	288,7	319,3	302,5	192,3
6	CEOC	1,7	10,1	31,3	64,9	97,9	126,0	146,6	155,0	144,8
7	FRAM	4,8	27,5	69,1	139,0	206,4	262,0	288,5	0,0	0,0
8	FRPE	6,6	22,7	61,6	129,5	189,1	237,6	261,1	0,0	0,0
9	GLTR	2,4	22,9	58,2	104,7	146,2	171,0	160,1	0,0	0,0
10	GVDI	6,0	14,2	43,4	107,3	194,6	0,0	0,0	0,0	0,0
11	POSA	7,7	11,0	30,6	68,9	110,0	144,5	173,5	189,2	181,9
12	QUMA1	3,6	20,3	58,0	104,3	144,8	0,0	0,0	0,0	0,0
13	TIAM	2,3	19,4	43,5	76,2	100,5	117,7	129,5	0,0	0,0
14	TICO	1,7	15,6	44,2	78,3	74,6	0,0	0,0	0,0	0,0
15	ULAM	3,8	36,3	71,6	112,7	138,8	155,1	164,0	168,1	168,7
16	ULPU	7,9	34,6	81,5	139,0	187,4	225,5	254,8	278,1	294,3
17	PY	4,6	12,5	43,1	103,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	MA2	4,5	19,4	47,4	77,9	74,5	0,0	0,0	0,0	0,0
19	PR	2,6	18,8	17,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	PIPO	1,8	4,5	16,8	39,5	62,0	36,8	0,0	0,0	0,0
21	PIPU	4,4	21,7	46,5	70,7	86,8	96,7	102,3	0,0	0,0
22	PINI	1,7	5,5	19,3	43,2	66,7	85,5	0,0	0,0	0,0
23	PIC05	1,0	6,1	18,1	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	ILOP	1,6	7,2	21,3	49,9	87,4	0,0	0,0	0,0	0,0
25	MAGR	0,0	9,4	33,1	83,9	161,9	246,9	354,8	488,4	0,0
26	QUNI	5,6	27,4	89,6	189,8	296,5	414,5	523,6	629,2	721,9
27	BDL OTHER	6,6	22,7	61,6	129,5	189,1	237,6	261,1	0,0	0,0
28	BDM OTHER	7,8	25,6	59,8	102,5	134,7	138,9	100,7	125,5	0,0
29	BDS OTHER	4,5	19,4	47,4	77,9	74,5	0,0	0,0	0,0	0,0
30	CEL OTHER	4,4	21,7	46,5	70,7	86,8	96,7	102,3	0,0	0,0
31	CEM OTHER	1,7	5,5	19,3	43,2	66,7	85,5	0,0	0,0	0,0
32	CES OTHER	1,0	6,1	18,1	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
33	BEL OTHER	5,6	27,4	89,6	189,8	296,5	414,5	523,6	629,2	721,9
34	BEM OTHER	0,0	9,4	33,1	83,9	161,9	246,9	354,8	488,4	0,0
35	BES OTHER	1,6	7,2	21,3	49,9	87,4	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: *i-Tree Streets*

Der Vorteil der Berechnung über eine lineare Interpolation nach Formel (v) liegt darin, dass für jeden Baum mit seinem spezifischen Brusthöhendurchmesser der tatsächliche Wert ermittelt werden kann. Die Berechnung erfolgte mittels der Statistiksoftware *R*. Für den oben als Beispiel angeführten Baum mit einem BHD von 15,60 cm ergibt sich so ein der Realität viel näherer Wert von 38,1 kg an sequestriertem CO₂ pro Jahr.

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (\text{v})$$

y ... gesuchte Größe je nach Basisdaten (z.B. CO₂ sequestered)

y_0 ... untere Klassengrenze (gesuchte Größe, z.B. CO₂ sequestered in kg)

y_1 ... obere Klassengrenze (gesuchte Größe, z.B. CO₂ sequestered in kg)

x ... BHD in cm

x_0 ... untere Klassengrenze (BHD in cm)

x_1 ... obere Klassengrenze (BHD in cm)

Eine Einschränkung wird bei genauerer Betrachtung der Daten der Untersuchungsstadt und der Basisdaten erkennbar (vgl. Abbildung 3.6). Für Straßenbäume, deren ÖSD beispielsweise mit einem Assigned Species Value TICO (*Tilia cordata*) ermittelt werden, stehen in den

Basisdaten nur Werte bis zu einem BHD von ca. 60 cm zur Verfügung. Um für entsprechend größere Bäume ÖSD berechnen zu können, wurde jeweils mit dem Wert aus der letztmöglichen BHD-Klasse gerechnet. So kann zumindest ein Teil der ÖSD dieser großen Bäume ermittelt werden. Zu erwarten sind hier entsprechende Unterschätzungen, da die erbrachte Leistung exponentiell ansteigt. Dies betrifft 22 Bäume denen FRPE als Assigned Species Value zugeordnet wurde, 15 Bäume mit zugeordnetem Wert TICO, 50 Bäume bei PY, 53 Bäume mit PR und 26 Bäume denen BDL als Assigned Species Value zugeordnet wurde. Betroffen sind hiervon nur die Berechnungen zu jährlichem sequestrierten Kohlenstoffdioxid. Bei allen anderen ÖSD sind für jede BHD-Klasse entsprechende Werte vorhanden.

Alle Angaben mit Ausnahme der Werte für die Speicherung von CO₂ seit der Anpflanzung der Bäume (CO₂ storage) beziehen sich auf ein Jahr. Den in den Basisdaten enthaltenden Werten liegen entsprechende nachfolgend erwähnte Methoden und Modelle zugrunde. Diese wurden von den Entwicklern für die hier genutzte regionale Baumwachstumszone Fort Collins, CO in *i-Tree Streets* implementiert.

3.1.4.1 Bindung von Kohlenstoffdioxid

Nach dem oben beschriebenen Muster (vgl. Abbildung 3.6) liegen Basisdaten jeweils für die Bindung von Kohlenstoffdioxid durch Sequestrierung (CO₂ sequestered), die Freisetzung von CO₂ durch Pflegemaßnahmen (CO₂ maintenance release) und Dekomposition (CO₂ decomposition release) sowie die Speicherung von Kohlenstoffdioxid seit Anpflanzung (CO₂ storage) vor. Für diese vier Bereiche wurden Werte für jeden Baum nach Formel (v) berechnet.

Den aus den einzelnen Wertetabellen ersichtlichen Angaben liegt die Berechnung der Biomasse jedes Baumes, ausgehend vom BHD und der Baumhöhe, über von PILLSBURY ET AL. (1998) entwickelten Wachstumskurven zugrunde. Aus diesen sind die Werte für die sequestrierten Mengen an CO₂ abgeleitet. Durch Pflegemaßnahmen (Nutzung von Kraftfahrzeugen, Motorsägen, Häcksler) wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt (CO₂ maintenance release). Dies wird bei der Berechnung der Leistung berücksichtigt. Nach MCPHERSON ET AL. (2003) sind das pro Zentimeter BHD 0,14 kg CO₂. Durch die Berücksichtigung von Mortalitätsraten und damit verbundener Freisetzung von Kohlenstoffdioxid wird das Ergebnis des tatsächlich gespeicherten CO₂ weiter modifiziert. MCPHERSON ET AL. (2003) gingen in ihrem modellierten Zeitraum für Fort Collins, CO bei der Ermittlung der Werte (CO₂ decomposition release) von einer jährlichen Mortalitätsrate von 3 % in den ersten fünf Jahren und 1 % in den restlichen 35 Jahren aus. Dabei folgten sie der Annahme, dass abgestorbene Bäume im Jahr des Absterbens beräumt und gemulcht werden und hierbei 80 % des in ihnen gebundenen Kohlenstoffs als CO₂ in die Atmosphäre entlassen werden. Somit ergibt sich die tatsächlich von einem Baum gebundene Menge an Kohlenstoffdioxid durch eine Subtraktion der freigesetzten

CO₂-Mengen durch Pflegemaßnahmen und Dekomposition von der sequestrierten Menge an Kohlenstoffdioxid.

i-Tree Streets geht bei der Berechnung des gespeicherten CO₂ seit Anpflanzung (CO₂ storage) vom aktuellen Zustand des Baumes (BHD, Baumart) aus. Auf Basis der Wachstumskurven wird sozusagen zurückgerechnet, wie alt der Baum bei derzeitigen Merkmalen ist und somit, wie viel Kohlenstoffdioxid er in den Jahren seines Wachstums bis zum Untersuchungszeitpunkt gespeichert hat. Aus diesen modellierten Gesamtwerten für CO₂ lässt sich der in der Holzbiomasse gespeicherte Kohlenstoffgehalt (C) bestimmen. Kohlenstoff hat in dieser Verbindung einen Masseanteil von 27 %. Der Faktor 3,67 ergibt sich aus dem Verhältnis der Molaren Massen von C zu O₂ (MCPHERSON, 1998). Um näherungsweise Aussagen zum C-Gehalt der Bäume treffen zu können, müssen die ermittelten Werte durch 3,67 dividiert werden.

3.1.4.2 Bindung von Luftschadstoffen

Für die von den Bäumen gebundenen und durch Interpolation zu ermittelnden Luftschadstoffe O₃, SO₂, PM₁₀ und NO₂ lagen ebenfalls Basisdaten in Tabellenform vor. Den darin enthaltenden Werten, welche die modellierte aufgenommene Schadstoffmenge darstellen, liegt die von SCOTT ET AL. (1998) entwickelte Methodik zugrunde. Im Gegenzug zur Schadstoffbindung setzen Bäume flüchtige organische Verbindungen (BVOC - biogenic volatile organic compounds) v.a. während der Wachstumsperiode frei. Die in den entsprechenden Basisdaten enthaltenden Werte basieren auf den von GUENTHER ET AL. (1991, 1993) entwickelten Algorithmen. Freigesetzte BVOCs tragen in Verbindung mit NO₂ unter Einfluss von Sonnenlicht zur Bildung von Ozon (O₃) bei. Erhöhte Ozonkonzentrationen in den Sommermonaten verursachen Gesundheitsschäden bei Menschen (FORUM DIE GRÜNE STADT, 2008). Die Berechnung für die Leipziger Straßenbäume erfolgte ebenfalls mit oben genannter Formel (v).

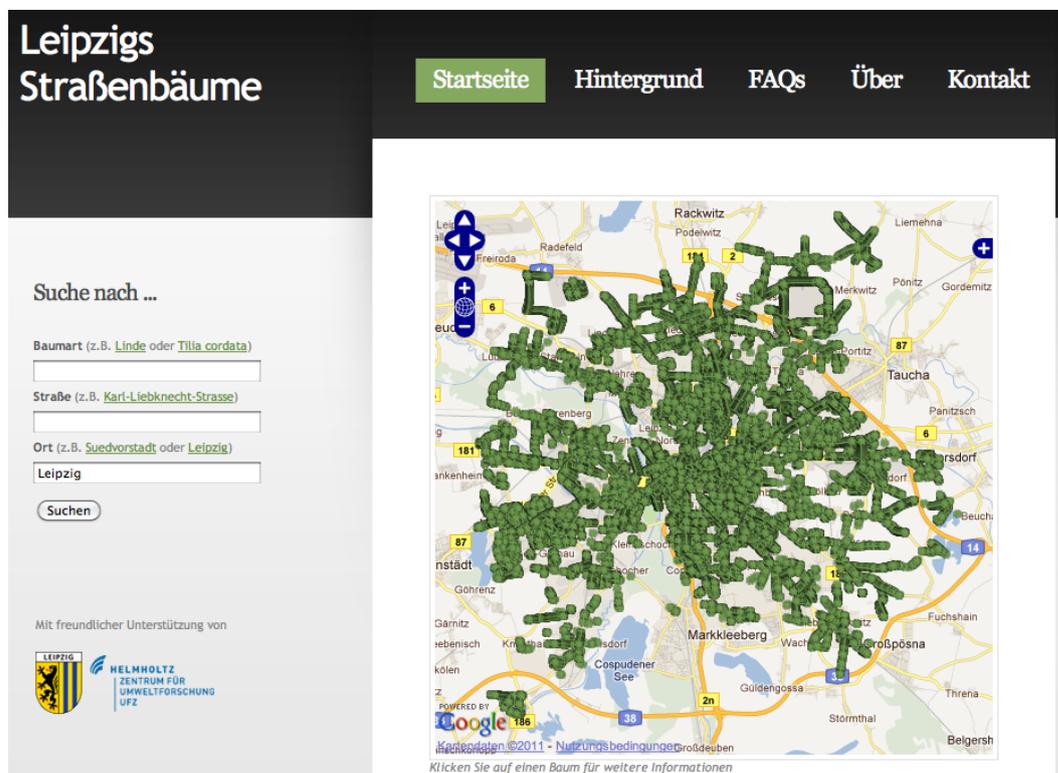
3.1.4.3 Verminderung des Oberflächenabflusses

Um die Menge an Niederschlagswässern zu quantifizieren, welche durch die Bäume am Oberflächenabfluss gehindert wurden, wurde das von XIAO ET AL. (2000) entwickelte numerische Simulationsmodell von den Entwicklern in *i-Tree Streets* integriert. Die den Basisdaten von *i-Tree Streets* entnommenen Werte berücksichtigen sowohl die Mengen an Regenwasser, welche von den Bäumen aufgefangen werden, als auch die Mengen, welche durch die Bäume hindurchfallen und am Stamm ablaufen. Sobald ein Blatt vollständig mit Wasser gesättigt ist, tropft das überschüssige Wasser vom Blatt ab und fließt den Stamm hinunter zum Boden oder entweicht durch Evaporation (MCPHERSON ET AL., 2003). Die den Oberflächenabfluss reduzierende Menge an Regenwasser wurde analog zu den anderen Dienstleistungen nach Formel (v) berechnet.

3.2 Umsetzung in ein Umweltinformationssystem

Die ermittelten Ökosystemdienstleistungen dienen im zweiten Teil der Arbeit als Grundlage für den Aufbau des Umweltinformationssystems. Für den Nutzer zugänglich ist das UIS über die Domain www.strassenbaum-leipzig.info. Die vom Autor gestaltete und in ihrer Funktionalität programmierte Website ermöglicht es dem Nutzer Informationen zu ÖSD der Leipziger Straßenbäume abzufragen (vgl. Abbildung 3.7). Es können über die drei eingebetteten Suchfelder Anfragen an das zugrunde liegende Straßenbaumkataster abgeschickt werden. Mögliche Abfragen können nach folgendem Muster gestaltet sein: Suche nach „Baumart“ (deutsche oder wissenschaftliche Bezeichnung), „Gattung“ oder „Familie“. Eine räumliche Auswahl erfolgt über die Beschränkung auf eine „Straße“ und/oder einen „Ortsteil“ bzw. die gesamte Stadt.

Abbildung 3.7: Darstellung aller Straßenbäume auf der Website



Quelle: eigene Bearbeitung

Nachfolgend werden die Arbeitsschritte der Umsetzung näher erläutert. Zunächst wurden die oben ermittelten Ergebnisse in eine Datenbank überführt, um die ÖSD mit den Abfragen der Nutzer verbinden zu können. Die aus Abbildung 3.7 ersichtliche Karte wurde über einen auf dem *GeoServer* implementierten WMS, welcher über *OpenLayers* visualisiert wurde, erzeugt. Auf dem für diese Arbeit genutzten Server sind neben dem *GeoServer* sowohl *OpenLayers*

als auch eine Implementierung des DBMS *PostgreSQL* mit der GIS-Erweiterung *PostGIS* installiert.

3.2.1 Erstellung der Datenbank

In einem ersten Schritt wurde die Ergebnistabelle (vgl. Abbildung 3.8) mit den darin für jeden Baum enthaltenen Koordinaten in ein ESRI Shape file umgewandelt. Die mitgelieferten Koordinaten lagen in der Projektion Gauß-Krüger Zone 4 vor. Diese Projektion ist für die Anwendung in Google Maps nicht geeignet. Daher erfolgte eine Umprojektion des Shape files in das für Google Maps lesbare und darstellbare Coordinate Reference System (CRS) mit dem Code EPSG:900913³.

Abbildung 3.8: Ausschnitt der Ergebnistabelle vor der Überführung in die Datenbank

	Ort	Ortsteil ▲	Strasse	Baumart_de	Baumart_wi		
4172	Leipzig	Connewitz	Windscheidstrasse	Stadt-Linde	Tilia cordata Greenspire		
	Gattung	Familie	BHD_cm	CO2_seques	CO2_decomp	CO2_maint	CO2_stored
	Tilia	Tiliaceae	14.64	23.637663	0.637245	2.049659	130.327781
	Stormwater	O3_depos	NOx_depos	PM10_depos	SOx_depos	BVOC	
	1.827886	0.018176	0.005497	0.006621	0.001967	-0.027366	
	CO2_total	AirSum_dep	AirQ_total	x_google	y_google		
	20.950759	0.032261	0.004895	12.3689464718	51.31194068		

Quelle: eigene Bearbeitung (CO₂_seques = sequestriertes CO₂ in kg/a; CO₂_decomp = Decomposition Release in kg/a; CO₂_maint = Maintenance Release in kg/a; CO₂_stored = gebundenes CO₂ seit Anpflanzung in kg; O₃_depos (u.a.) = gebundene Luftschadstoffe in kg/a; BVOC = freigesetzte flüchtige organische Verbindungen in kg/a; CO₂_total = CO₂_seques - CO₂_decomp - CO₂_maint; AirSum_dep = O₃_depos + NO_x_depos + PM₁₀_depos + SO_x_depos in kg/a; AirQ_total = AirSum_dep - BVOC)

Über die Operation `createdb` wurde eine Datenbank mit dem Namen „strassenbaum“ unter Nutzung der Standardvorlage von *PostGIS* auf dem Server angelegt. Hierbei wurden zwei Standardtabellen angelegt. Eine Tabelle, „geometry columns“, beinhaltet die geometrischen Informationen zu den Objekten der Datentabelle. Das sind in dieser Untersuchung ausschließlich Punkte. Die zweite Tabelle, „spatial_ref_sys“, enthält Informationen zu einer Vielzahl an möglichen Koordinatensystem aus der PROJ.4 Bibliothek⁴. Die abgelegten Koordinaten liegen im kanonischen Format vor, welches von *GeoServer* für die Verortung der Punkte auf der Karte genutzt wird. Nun musste die Datenbank mit den Daten aus der Untersuchung befüllt werden. *PostGIS* bietet die Möglichkeit GIS-Daten über einen Shape file loader direkt in SQL-Statements umzuwandeln und anschließend die erstellten Tabellen zu füllen⁵. Das Shape

³Die European Petroleum Survey Group (EPSG) ist im Jahr 2005 im OGP Geomatics Committee aufgegangen. In den EPSG Geodetic Parameter Datasets sind nahezu alle zur Verfügung stehenden CRS kodiert und durch die Angabe des entsprechenden Code für unterschiedlichste Anwendungen lesbar.

⁴<http://trac.osgeo.org/proj/>

⁵<http://postgis.refractory.net/documentation/manual-1.3/ch04.html>

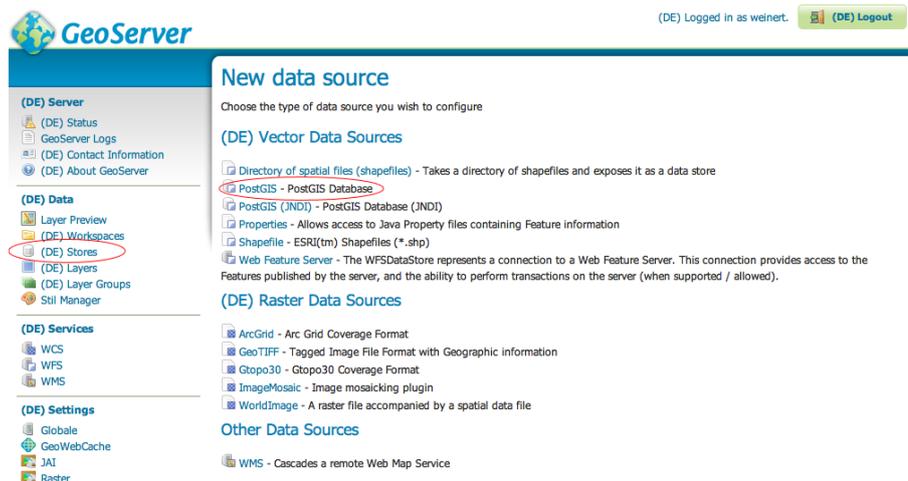
file wurde mit dem Befehl `shp2pgsql` in ein SQL passendes Format überführt. Im Anschluss wurde durch Ausführen der Operation `psql` die Datenbank befüllt. Eine Tabelle mit dem Namen „baeume“ wurde hierbei angelegt und enthält die eigentlichen Daten wie sie beispielhaft in Abbildung 3.8 dargestellt sind.

1. `createdb -T postgistemplate strassenbaum`
2. `shp2pgsql -s 4236 strassenbaumkataster_for_google.shp baeume > insert.sql`
3. `psql -h localhost -d strassenbaum -f insert.sql`

3.2.2 Veröffentlichung des WMS auf dem GeoServer

Nachdem die Datenbank erstellt und mit den notwendigen Daten gefüllt wurde, erfolgte die Erstellung des WMS über den *GeoServer* (vgl. Abbildung 3.9). Hierfür wurde die graphische Benutzeroberfläche verwendet. Ein neuer *PostGIS*-Store wurde erstellt, welcher die oben erzeugte Tabelle „Baeume“ enthält. Mit der Publikation („Publish“) des Stores wurde der WMS zur Nutzung bereit gestellt. Zur Darstellung der Straßenbäume wurde eine Grafik als neuer Stil über den *Styled Layer Descriptor* (SLD) des *GeoServer* definiert. In Abhängigkeit der Zoom-Stufe auf der Karte wird die Grafik entsprechend skaliert. Nach diesen vorbereitenden Arbeiten wird nachfolgend die Umsetzung der Visualisierung der Straßenbäume näher erläutert. Hierzu werden die Ausführungen an passender Stelle mit Codebeispielen aus der durch die Arbeit des Autors entstandenen Website unterlegt. Der für die Umsetzung der Funktionalität programmierte Code ist aus Abbildung 8.4 im Anhang der Arbeit sowie auf beiliegender CD-ROM ersichtlich.

Abbildung 3.9: Erstellung eines *PostGIS*-Stores auf dem *GeoServer*



Quelle: eigene Bearbeitung

3.2.3 Visualisierung mit OpenLayers

Zur Präsentation des erzeugten WMS kommt die JavaScript Bibliothek *OpenLayers* zur Anwendung. Diese wurde über die Anweisung `<scriptsrc="http://openlayers.org/dev/OpenLayers.js" type="text/javascript"></script>` aufgerufen. Als Kartengrundlage dienen die von Google Maps bereit gestellten Karten, die über die Anweisung `<scriptsrc='http://maps.google.com/maps?file=api&v=2&key=...></script>` eingebunden werden. Die Variablen `map`, `Baeume`, `epsg900913`, `epsg4326` sowie `minLon`, `maxLon`, `minLat`, `maxLat` zur Festlegung der Ausdehnung in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung wurden festgelegt und z.T. bereits definiert (vgl. Abbildung 3.10).

Abbildung 3.10: Variablendefinition

```
var map;
var Baeume;

var epsg900913 = new OpenLayers.Projection("EPSG:900913");
var epsg4326 = new OpenLayers.Projection("EPSG:4326");

var minLon = 12.24;
var maxLon = 12.54;
var minLat = 51.225;
var maxLat = 51.45;
```

Die Variable `map` wurde nun über die vom Framework bereit gestellten Klassenmethoden manipuliert. Ihr wurden die Variablen zur Ausdehnung, zur Projektion, der Anzahl an Zoom-Stufen sowie die Karteneinheiten übergeben. Als nächstes wurden die für den Nutzer umschaltbaren Anzeigeformen von Google Maps (*Normal*, *Satellite* und *Hybrid*), wie in Abbildung 3.11 dargestellt, als Variablen `gmap`, `gsat` und `ghyb` eingebunden. Der WMS soll seine Layer als `FORMAT=Image/PNG` ausliefern, um vorhandene Transparenzen berücksichtigen zu können.

Abbildung 3.11: Generieren der Karte mit *OpenLayers* und Einbinden von *Google Maps*

```
function init(){
    format = 'image/png';

    map = new OpenLayers.Map('map', {projection: epsg900913, displayProjection: epsg4326,
                                     maxExtent: new OpenLayers.Bounds(minLon, minLat, maxLon, maxLat).transform(epsg4326, epsg900913),
                                     numZoomLevels: 20, units: 'm'});

    // Google Maps Layer
    var gmap = new OpenLayers.Layer.Google(
        "Google Karte",
        {type: G_NORMAL_MAP, sphericalMercator: true}
        //moegliche Kartentypen sind: NORMAL, SATELLITE, HYBRID
    );

    var gsat = new OpenLayers.Layer.Google(
        "Google Satellit",
        {type: G_SATELLITE_MAP, sphericalMercator: true}
        //moegliche Kartentypen sind: NORMAL, SATELLITE, HYBRID
    );

    var ghyb = new OpenLayers.Layer.Google(
        "Google Hybrid",
        {type: G_HYBRID_MAP, sphericalMercator: true}
        //moegliche Kartentypen sind: NORMAL, SATELLITE, HYBRID
    );
}
```

Die Variable `Baeume` wird nun über *OpenLayers* als WMS eingebunden (vgl. Abbildung 3.12). Dieser Layer beinhaltet den zuvor auf dem *GeoServer* angelegten *PostGIS*-Store. Er wird ebenfalls im PNG-Format ausgeliefert und lässt die Darstellung von Transparenzen zu. Über die Anweisung `map.addLayers([Baeume, gmap, gsat, ghyb]);` werden die oben definierten Variablen der Karte hinzugefügt.

Abbildung 3.12: Einbinden des Straßenbaum-Layers

```
// Strassenbaeume Layer
Baeume = new OpenLayers.Layer.WMS(
  "B&auml;ume", "http://85.214.60.79:8080/geoserver/nurc/wms",
  {
    LAYERS: 'nurc:strassenbaumkataster_for_google',
    STYLES: '',
    format: format,
    transparent: true,
    srs: 'EPSG:4326'
  },
  {singleTile: true, ratio: 1}
);
```

Anschließend folgt ein `GetFeatureInfo`-Request (vgl. Abbildung 3.13), welcher auf den Baum-Layer verweist und die Sachdaten einzelner Bäume abfragt. Diese werden über die Operation `Element.innerHTML = Ajax.response` in einem DIV Container, welcher aus der Antwort auf eine Ajax-Anfrage befüllt wird, unter den Suchfeldern der Website angezeigt sobald der Nutzer auf einen Baum klickt.

Abbildung 3.13: `GetFeatureInfo`-Request zur Anzeige der Sachdaten einzelner Bäume

```
// support GetFeatureInfo
map.events.register('click', map, function (e) {

  document.getElementById('nodelist').innerHTML = "Lade... bitte warten...";
  var params = {
    REQUEST: "GetFeatureInfo",
    EXCEPTIONS: "application/vnd.ogc.se_xml",
    BBOX: map.getExtent().toBBOX(),
    SERVICE: "WMS",
    VERSION: "1.1.1",
    X: e.xy.x,
    Y: e.xy.y,
    INFO_FORMAT: 'text/html',
    QUERY_LAYERS: map.layers[0].params.LAYERS,
    FEATURE_COUNT: 50,
    Layers: 'nurc:strassenbaumkataster_for_google',
    WIDTH: map.size.w,
    HEIGHT: map.size.h,
    format: format,
    styles: map.layers[0].params.STYLES,
    srs: map.layers[0].params.SRS};
  // merge filters
  if(map.layers[0].params.CQL_FILTER != null) {
    params.cql_filter = map.layers[0].params.CQL_FILTER;
  }
  if(map.layers[0].params.FILTER != null) {
    params.filter = map.layers[0].params.FILTER;
  }
  if(map.layers[0].params.FEATUREID) {
    params.featureid = map.layers[0].params.FEATUREID;
  }

  OpenLayers.loadURL("http://85.214.60.79:8080/geoserver/nurc/wms", params, this, setHTML, setHTML);
  OpenLayers.Event.stop(e);
});
```

Berücksichtigt wird an dieser Stelle die vom Nutzer getroffene Auswahl über die Suchfelder. Diese Auswahl löst die Funktion `updateFilter` aus, welche über Wenn-Dann-Beziehungen die Auswahl ermöglicht. Diese Funktion erfüllt zwei Zwecke. Zum einen wird über immer neue vom Nutzer abgesetzte Anfragen die Karte (WMS) aktualisiert und zum anderen erfolgt die Berechnung der ÖSD einer Auswahl von Bäumen über ein Konzept der asynchronen Datenübertragung (Ajax⁶). Dies ermöglicht das Senden und Empfangen von Daten, ohne dass der Browser die Seite neu laden muss. Die Definition der hier verwendeten Filter wird nachfolgend erläutert.

3.2.4 Definition der Filter

Um eine Auswahl aus dem Straßenbaumkataster zu ermöglichen, wurden die drei Variablen `art`, `ort1` und `ort2` definiert. Diese Variablen sind mit den für den Nutzer sichtbaren Suchfeldern verknüpft. Über die Variable `art` ist es möglich nach der Baumart in ihrer deutschen oder wissenschaftlichen Bezeichnung, nach der Gattung sowie Familie zu suchen. Die Variable `ort1` ermöglicht die Einschränkung über einen Straßennamen. Mit der Verwendung der Variable `ort2` wird die Auswahl auf einen Ortsteil von Leipzig oder die gesamte Stadt definiert (vgl. Abbildung 3.14).

Abbildung 3.14: CQL-Filter

```

if(art == "" && ort1 == "" && ort2 == ""){
  alert("Bitte geben Sie einen Suchbegriff ein!")
}
if(art != "" && ort1 == "" && ort2 == ""){
  var filter = "strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
  + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%" + art + "%'";
}
if(art == "" && ort1 != "" && ort2 == ""){
  var filter = "strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%'";
}
if(art == "" && ort1 == "" && ort2 != ""){
  var filter = "strToLowerCase(ort) like '%" + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%'";
}
if(art != "" && ort1 != "" && ort2 == ""){
  var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
  + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
  + art + "%') AND (strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%)";
}
if(art == "" && ort1 != "" && ort2 != ""){
  var filter = "(strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%"
  + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%)";
}
if(art != "" && ort1 == "" && ort2 != ""){
  var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
  + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
  + art + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%" + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%)";
}
if(art != "" && ort1 != "" && ort2 != ""){
  var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
  + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
  + art + "%') AND (strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%"
  + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%)";
}
}

```

⁶Asynchronous JavaScript and XML

Da der WMS-Standard in Bezug auf Filterfunktionen nicht sehr weitreichend ist, wurden die hier genutzten CQL-Filter⁷ in JavaScript programmiert. Durch die Verwendung von JavaScript ist es möglich Inhalte zu generieren und nachzuladen. Die Filter wurden so ausgeführt, dass der Nutzer bei der Eingabe die Groß- und Kleinschreibung vernachlässigen kann und Wortteile als Suchanfragen ebenfalls zulässig sind.

3.2.5 Abfragen der Ökosystemdienstleistungen

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf die Visualisierung der Bäume in der Karte sowie die Abfrage einzelner Sachdaten über den WMS. An dieser Stelle kommt die oben generierte *PostGIS*-Datenbank zur Anwendung. Jeder Eintrag/Baum in der Datenbank enthält die von ihm erbrachten Ökosystemdienstleistungen. Für die Ausgabe der Leistungen einer Auswahl von Bäumen ist es notwendig jeweils die Summen der abgefragten Spalten zu bilden. Die Abfragen zu den ÖSD einer Auswahl wurden in PHP⁸ ausgeführt. Hierdurch ergeben sich weit mehr Möglichkeiten als der für einen WMS definierte Standard vorsieht. PHP zeichnet sich u.a. durch eine breite Datenbankanbindung aus. Daher verweist die folgende Operation (vgl. Abbildung 3.15) auf ein separates Skript, welches die vom Nutzer abgeschickte Abfrage über die Datenbank bearbeitet.

Abbildung 3.15: Übergabe der Abfragen zu den Ökosystemdienstleistungen an ein PHP-Skript

```

http.abort();
http.open("GET", "ergebnis.php?art=" + art + "&ort1=" + ort1 + "&ort2=" + ort2, true);
http.onreadystatechange=function() {
    if(http.readyState == 4) {
        document.getElementById('odelist1').innerHTML = http.responseText;
    }
}
http.send(null);

```

Bei Ausführung des Skripts wird zunächst eine Verbindung zur Datenbank hergestellt und über die Variablen `$art_url`, `$ort1_url` und `$ort2_url` die vom Nutzer getätigten Einträge der Suchfelder abgegriffen. Hieran schließt sich die SQL-Anfrage der Spalten `C02_total`, `C02_stored`, `AirSum_dep`, `AirQ_total` und `Stormwater` in der Tabelle `baeume` basierend auf den eben genannten Variablen an. Das Ergebnis der Anfrage wird anschließend in der Variable `$result` übergeben. Die nun definierten, auf den Spaltennamen beruhenden Variablen werden in Verbindung mit der Variable `$result` zur Aufsummierung der ÖSD genutzt. Über die Variable `$anzahl` kann die Anzahl der ausgewählten Straßenbäume auf der Website ausgegeben werden. Die in Kilogramm angegebenen Werte für `C02_total` und `C02_stored` werden für eine bessere Übersichtlichkeit in Tonnen umgerechnet (vgl. Abbildung 3.16). Der nächste

⁷Die *Continuous Query Language* (CQL) als deklarative Anfragesprache ist eine Erweiterung der SQL.

⁸PHP ist eine Skriptsprache, die hauptsächlich zur Erstellung dynamischer Webseiten oder Webanwendungen verwendet wird.

Schritt in diesem Skript ist die Auszeichnung der Ergebnisanzeige auf der Website mit HTML⁹-Anweisungen (nicht in der Abbildung dargestellt). Abschließend wird der Speicher wieder freigegeben und die Verbindung zur Datenbank geschlossen.

Abbildung 3.16: PHP-Skript zur Abfrage der Ökosystemdienstleistungen aus der Datenbank

```
<?php
// Verbindungsaufbau und Auswahl der Datenbank
$dbconn = pg_connect("host=localhost dbname=strassenbaum user=weinert password=
"
)
or die("Verbindungsaufbau fehlgeschlagen: " . pg_last_error());

$art_url = strtolower($_REQUEST['art']);
$ort1_url = strtolower($_REQUEST['ort1']);
$ort2_url = strtolower($_REQUEST['ort2']);

// Eine SQL-Abfrage ausführen
$query = "SELECT CO2_total, CO2_stored, AirSum_dep, AirQ_total, Stormwater FROM baeume WHERE (LOWER(Baumart_de)
LIKE ('%$art_url%') OR LOWER(Baumart_wi) LIKE ('%$art_url%') OR LOWER(Gattung) LIKE ('%$art_url%') OR LOWER(Familie)
LIKE ('%$art_url%')) AND (LOWER(Strasse) LIKE ('%$ort1_url%')) AND (LOWER(Ortsteil) LIKE ('%$ort2_url%') OR LOWER(Ort)
LIKE ('%$ort2_url%'))";
$result = pg_query($query) or die("Abfrage fehlgeschlagen: " . pg_last_error());

$CO2_total = 0;
$CO2_stored = 0;
$AirSum_dep = 0;
$AirQ_total = 0;
$Stormwater = 0;
$anzahl = 0;

while ($row = pg_fetch_assoc($result)) {
    $CO2_total = $CO2_total + $row['co2_total'];
    $CO2_stored = $CO2_stored + $row['co2_stored'];
    $AirSum_dep = $AirSum_dep + $row['airsum_dep'];
    $AirQ_total = $AirQ_total + $row['airq_total'];
    $Stormwater = $Stormwater + $row['stormwater'];
    $anzahl++;
}

$CO2_total = $CO2_total / 1000;
$CO2_stored = $CO2_stored / 1000;

// Speicher freigeben
pg_free_result($result);

// Verbindung schließen
pg_close($dbconn);
?>
```

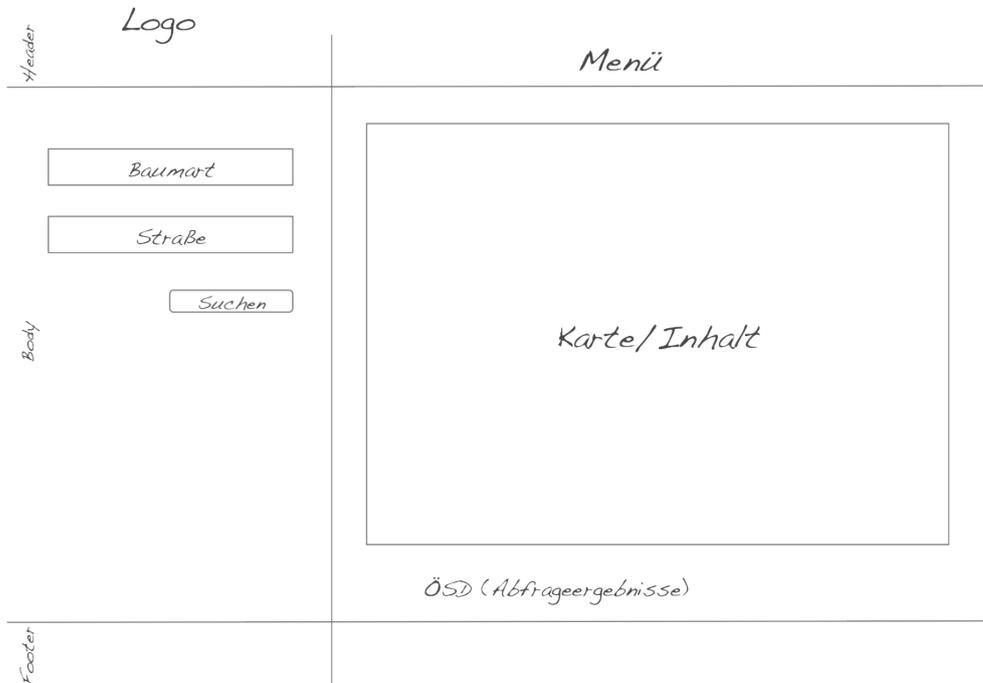
3.2.6 Konzeption und Design der Website

Da der zentrale Bestandteil des Umweltinformationssystems die Visualisierung der Straßebäume und die Abfrage der von ihnen erbrachten Ökosystemdienstleistungen ist, musste bei der Konzeption der Website auf folgende wesentliche Merkmale eingegangen werden. Wichtig beim Design der Website war der Zugriff auf die Suchfunktionalität von allen Seiten der Website aus. Daher wurde die Website grundsätzlich in zwei Bereiche (linker und rechter Bereich) aufgeteilt (vgl. Abbildung 3.17). Im linken Teil der Website sind die Suchfelder zur Eingabe der Abfragen für den Nutzer von allen Seiten jederzeit zugänglich. Im rechten, zentralen Bereich befinden sich die Informationen zum UIS und über das im Header jederzeit verfügbare Menü können weitere Informationen zum Hintergrund der Arbeit, Frequently Asked Questions (FAQs) mit den Nutzungshinweisen sowie eine Kontaktseite aufgerufen

⁹Die *Hypertext Markup Language* ist eine textbasierte Auszeichnungssprache zur Strukturierung von Inhalten wie Texten, Bildern und Hyperlinks in Dokumenten zur Nutzung im Internet.

werden. Über die Implementierung eines Kontaktformulars kann der Nutzer mit dem Autor in Verbindung treten. Bei der Erstellung der textlichen Inhalte ist darauf zu achten, dass sich die Website an die breite (interessierte) Öffentlichkeit wendet. Die Erläuterungen sollten daher in einem möglichst allgemein verständlichen Stil verfasst werden.

Abbildung 3.17: Konzeptioneller Entwurf der Website



Quelle: eigene Bearbeitung

Tätigt der Nutzer eine Abfrage erscheint an Stelle des zentralen Inhalts im Body der Website ein Fenster mit einer Karte und dem Layer der visualisierten Straßenbäume. Unterhalb der Karte werden die im Moment des Auslösens der Abfrage ermittelten ÖSD dieser Auswahl angezeigt. Der Nutzer kann sich durch einen Klick auf einen einzelnen Baum den Anteil dieses Baumes an der erbrachten Leistung über ein daraufhin im linken Bereich der Website erscheinendes Element anzeigen lassen. Für eine bessere räumliche Einordnung ist es dem Nutzer möglich zwischen verschiedenen Darstellungsarten der Karte zu wechseln. Es besteht die Auswahl zwischen einer Karten- und Satellitenansicht oder einer Kombination aus beiden durch eine Hybridansicht.

Um den Arbeitsaufwand für die Gestaltung der Website in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wurde auf eine Vorlage, welche über die Website <http://www.4templates.com/> angeboten wurde, zurückgegriffen. Die Vorlage wurde vom Autor an die eigenen Anforderungen angepasst. Ausgeführt wurde die Gestaltung der Website in der Auszeichnungssprache HTML.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse der Ökosystemdienstleistungen der Leipziger Straßenbäume sowie die im Rahmen der Arbeit konzipierte und implementierte Website vorgestellt.

4.1 Die berechneten Ökosystemdienstleistungen

In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung der mittels linearer Interpolation auf den zugrunde liegenden Basisdaten von *i-Tree Streets* ermittelten Ökosystemdienstleistungen der Leipziger Straßenbäume.

Bindung von Kohlenstoffdioxid Für alle zum Stand 27. Januar 2011 im bereinigten Straßenbaumkataster verzeichneten 57.910 Bäume berechnet *i-Tree Streets* eine jährliche Sequestrierung von 2.928,2 t CO₂. Bei der Dekomposition und Mulchung der abgestorbenen Bäume werden jährlich 225,2 t CO₂ (7,7 % der sequestrierten Menge) wieder freigesetzt. Durch den Einsatz von Kraftfahrzeugen, Motorsägen und Häckslern etc. bei der Durchführung von Pflegemaßnahmen an den Bäumen werden im Jahr 148,8 t CO₂ (5,1 %) in die Atmosphäre entlassen. Die freigesetzten Mengen an Kohlenstoffdioxid werden für eine realistischere Bilanz von der sequestrierten Menge abgezogen. Dies ergibt eine jährliche Bindung von 2.554,2 t CO₂ bezogen auf alle Straßenbäume. Zusammen werden etwa 12,8 % oder 374 t der sequestrierten Menge an Kohlenstoffdioxid wieder in die Atmosphäre entlassen. Im Durchschnitt aller Bäume nimmt jeder Straßenbaum 44,1 kg CO₂ pro Jahr auf. Die von den Leipziger Straßenbäumen jährlich erbrachten Ökosystemdienstleistungen und die Anteile der vorherrschenden Gattungen sind aus Tabelle 4.1 ersichtlich. Um die jährlich gebundene Menge an CO₂ in ein nachvollziehbares Verhältnis zu setzen, soll folgender Vergleich vorgenommen werden. Ein durchschnittlicher im Jahr 2009 produzierter Pkw stößt pro gefahrenem Kilometer 156 g CO₂ aus (UBA - UMWELTBUNDESAMT, 2009). Bei einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km (STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND, 2010) beträgt die ausgestoßene Menge demnach 2,3 t Kohlenstoffdioxid. Die Leipziger Straßenbäume kompensieren also den jährlichen CO₂-Ausstoß von gut 1.091 Pkw. Angenommen wird hier, dass die Autos ihre gesamte Jahresfahrleistung in der Stadt zurücklegen. Betrachtet man den jährlichen CO₂-Ausstoß eines Bundesbürgers sieht diese Verhältnisrechnung wie folgt aus. SCHÄCHTELE & HERTLE (2007) weisen in ihrer

„CO₂-Bilanz des Bürgers“ darauf hin, dass es bei der Angabe von Pro-Kopf-Werten stark auf den zugrunde liegenden Bilanzrahmen ankommt. In ihrer Querschnittsuntersuchung haben sie festgestellt, dass sich die Werte in einem Bereich von 10 bis 12,5 t CO₂ pro Person und Jahr für den untersuchten Zeitraum von 2002 bis 2005 bewegen. OLIVIER ET AL. (2011) halten einen Wert von 10,0 t CO₂-Ausstoß je Einwohner für das Jahr 2010 fest. Wird dieser Wert als Basis angenommen, binden die hier betrachteten Straßenbäume die jährlichen CO₂-Emissionen von etwa 255 Bürgern der Stadt Leipzig.

Tabelle 4.1: Absolute und relative Anteile, Basalflächen sowie Verteilung der von den Straßenbäumen erbrachten Ökosystemdienstleistungen pro Jahr nach Gattungen

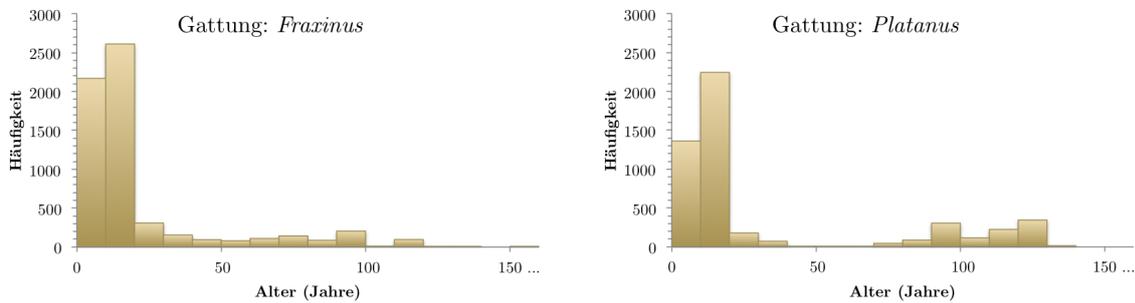
Gattung	Anzahl (absolut)	Anteil (relativ %)	Basalfläche (m ²)*	Anteil der jährlich erbrachten Leistung (%)		
				Bindung Kohlenstoffdioxid	Bindung Luftschadstoffe	Verminderung Oberflächenabfluss
<i>Tilia</i>	20.140	34,8	1.145,7	42,5	43,1	41,9
<i>Acer</i>	7.926	13,7	294,4	12,2	5,6	12,0
<i>Fraxinus</i>	6.076	10,5	195,3	7,5	7,0	7,0
<i>Platanus</i>	5.004	8,6	404,1	10,6	15,5	11,2
<i>Pyrus</i>	2.854	4,9	90,4	2,2	1,4	2,5
<i>Quercus</i>	2.047	3,5	113,5	3,5	4,1	3,4
<i>Prunus</i>	2.006	3,5	62,6	1,0	3,1	2,0
<i>Robinia</i>	1.390	2,4	91,7	2,9	3,4	2,9
<i>Aesculus</i>	1.370	2,4	108,8	2,7	1,8	3,4
<i>Populus</i>	1.352	2,3	288,5	6,8	11,4	7,4
<i>Corylus</i>	1.191	2,1	15,4	1,1	-0,4	0,9
andere	6.554	11,4	149,4	7,0	3,9	5,4
Gesamt	57.910	100	2.959,8	100	100	100

Quelle: eigene Berechnung; *Basalfläche = Summe aller Stammquerschnittsflächen in Höhe des BHD; CO₂ = sequestriertes CO₂ - freigesetztes CO₂ durch Dekomposition/Mulchung und Pflegemaßnahmen; Luftschadstoffe = gebundene Luftschadstoffe - freigesetzte flüchtige organische Verbindungen

Die in Leipzig mit einem Anteil von mehr als einem Drittel dominierende Gattung *Tilia* (Linde) ist für die jährliche Bindung von 42,5 % des Kohlenstoffdioxids verantwortlich. Mit abnehmendem Anteil der Gattungen am Gesamtbestand nehmen die anteilig erbrachten Leistungen, bis auf zwei deutliche Ausnahmen, ab. Obwohl die Gattung *Fraxinus* (Esche) über knapp 18 % mehr Bäume verfügt als die Gattung *Platanus* (Platane) bindet sie ca. ein Viertel weniger CO₂ pro Jahr. Erklären lässt sich dies aus den Verteilungen nach Alter und Brusthöhendurchmesser (BHD) der beiden Gattungen (vgl. Abbildungen 4.1 und 4.2). Ein Maß um die Größe und das Alter von Bäumen näher zu spezifizieren stellen die aus den BHD der Bäume ermittelten Basalflächen dar. Die Basal- oder Stammquerschnittsfläche ist ein von Förstern häufig verwendetes Maß und beschreibt die sog. Dominanz der jeweiligen Baumart. Sie gibt die Grundfläche an, welche der Baum in Höhe des BHD inklusive Borke bedeckt (vgl. Tabelle 4.1). Durch Aufsummierung der Werte beispielsweise für Gattungen

können Größenverhältnisse besser abgebildet und differenziertere Aussagen zu den von den Straßenbäumen erbrachten Leistungen gemacht werden.

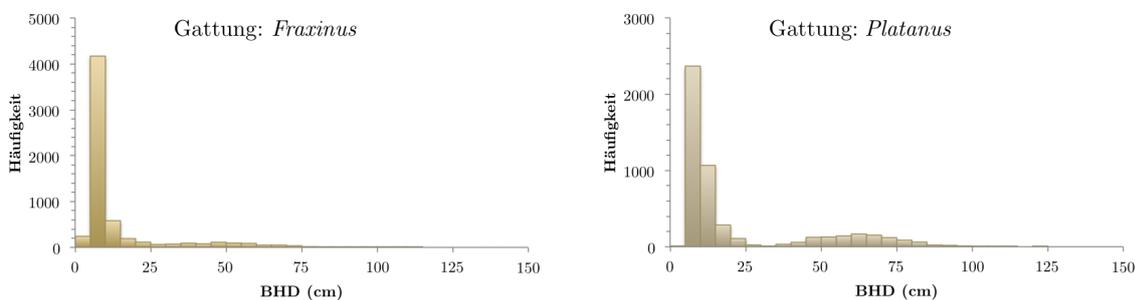
Abbildung 4.1: Häufigkeitsverteilung der Gattungen *Fraxinus* und *Platanus* nach Alter



Quelle: eigene Berechnung (Klassenbreite: 10 Jahre)

Vergleicht man unter diesem Gesichtspunkt die von den Gattungen *Fraxinus* und *Platanus* erbrachten Leistungen wird deutlich, dass *Platanus* eine gut doppelt so große Basalfläche bedeckt, was auf einen höheren Anteil an großen Bäumen schließen lässt. Große, also alte Bäume können nach NOWAK (1994b) bis zu Tausend mal mehr Kohlenstoff durch die Sequestrierung von CO₂ speichern als kleine/junge Bäume.

Abbildung 4.2: Häufigkeitsverteilung der Gattungen *Fraxinus* und *Platanus* nach BHD

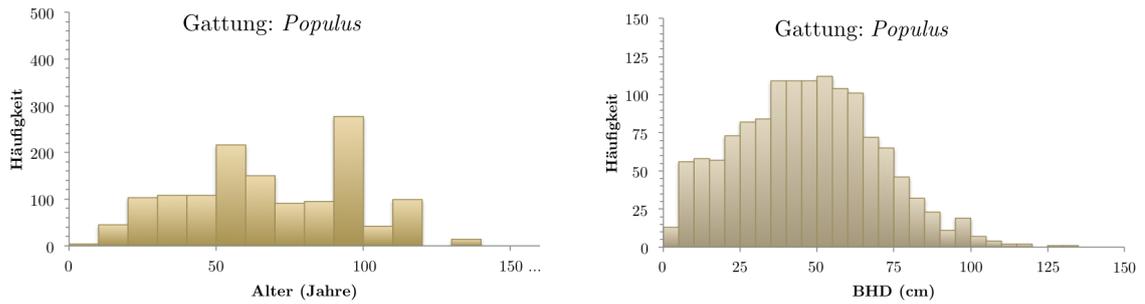


Quelle: eigene Berechnung (Klassenbreite: 5 cm)

Die zweite Ausnahme stellt die Gattung *Populus* (Pappel) dar. Sie erbringt mit nur 1.352 Straßenbäumen einen Anteil von 6,8 % an der gesamten Menge gebundenen Kohlenstoffdioxids pro Jahr. *Populus* erbringt damit fast die gleiche Leistung wie die von der Anzahl her ca. 4,5-fach stärkere Gruppe der Gattung *Fraxinus*. Erklären lässt sich dies aus der knapp um die Hälfte größeren Basalfläche von *Populus* gegenüber *Fraxinus* und dem damit höheren Anteil großer Bäume in dieser Gattung (vgl. Abbildung 4.3 und Tabelle 4.1).

Betrachtet man die Ergebnisse auf Ortsteilebene zeigt sich, dass Eutritzsch mit 2.710 Straßenbäumen über die höchste Anzahl und Grünau-Siedlung mit 108 Bäumen über die niedrigste Anzahl verfügt. Die jährlich größte Menge an Kohlenstoffdioxid, nach Abzug der

Abbildung 4.3: Häufigkeitsverteilung der Gattung *Populus* nach Alter und BHD

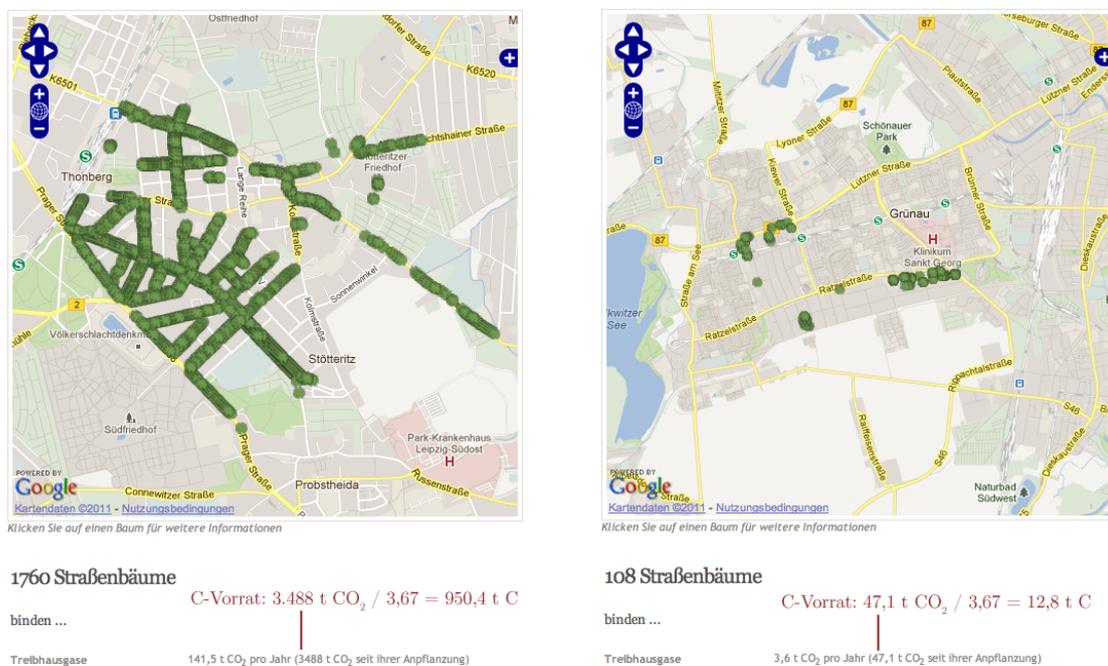


Quelle: eigene Berechnung (Klassenbreite: 10 Jahre)

freigesetzten Mengen durch Dekomposition und Pflegemaßnahmen, wird mit 141,5 t von den 1.760 Straßenbäumen im Ortsteil Stötteritz gebunden. Die geringste Menge wird wiederum in Grünau-Siedlung mit 3,6 t CO₂ pro Jahr aufgenommen (vgl. Tabelle 8.3 im Anhang).

Nach der Berechnung mit *i-Tree Streets* haben alle Straßenbäume zusammen 46.669,5 t CO₂ seit ihrer Anpflanzung aufgenommen. Pro Baum wurden so bisher durchschnittlich 805,9 kg Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre entzogen. Bezogen auf alle Straßenbäume haben die größten 5 % der Leipziger Straßenbäume (nach BHD) 41,3 % des CO₂ respektive Kohlenstoffs gebunden. Dies unterstreicht die bereits oben erwähnte Aussage von NOWAK (1994b) zum deutlich höheren Speichervermögen großer, alter Bäume.

Abbildung 4.4: Kohlenstoffvorrat der Ortsteile Stötteritz (li.) und Grünau-Siedlung (re.) visualisiert über das Umweltinformationssystem



Quelle: www.strassenbaum-leipzig.info

Aus der gebundenen Menge an Kohlenstoffdioxid ergibt sich ein gespeicherter Vorrat von 12.716,5 t Kohlenstoff (C) in der gesamten ober- und unterirdischen Biomasse der Leipziger Straßenbäume. Jeder Baum hat somit bisher durchschnittlich 219,6 kg Kohlenstoff gespeichert. Der Ortsteil Stötteritz verfügt mit einem C-Vorrat von 950,4 t in seinen Straßenbäumen über den nach Ortsteilen größten Speicher. Demgegenüber ist in den Straßenbäumen von Grünau-Siedlung mit 12,8 t Kohlenstoff die geringste Menge im Vergleich aller Ortsteile gebunden (vgl. Abbildung 4.4).

Die vier Hauptbaumgattungen speichern 70,5 % des gesamten Kohlenstoffs, wobei *Tilia* mit einem Anteil von 38,4 % die mit Abstand größte Menge gebunden hat (vgl. Tabelle 4.2). Zur besseren Einordnung dieser Werte sei Folgendes angenommen. Alle im bereinigten Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig verzeichneten Bäume (57.910) haben, wie oben erwähnt, der Atmosphäre knapp 47.000 t Kohlenstoffdioxid seit ihrer Anpflanzung entzogen. Geht man hier von weiter oben genannten 10,0 t CO₂-Emissionen pro Bundesbürger und Jahr aus, haben die Straßenbäume seit ihrer Anpflanzung die Menge an CO₂ gebunden, die von 4.666 Personen jedes Jahr verursacht wird.

Tabelle 4.2: Verteilung des in den Straßenbäumen gebundenen Kohlenstoffs seit Anpflanzung und Basalflächen nach Gattungen

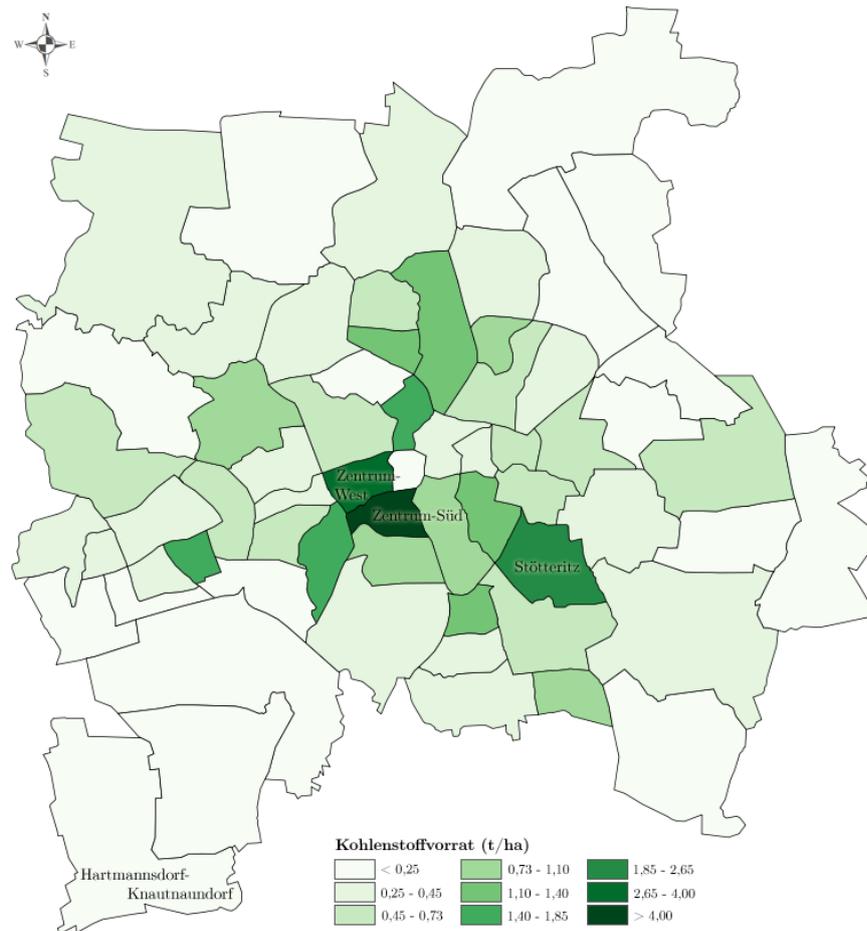
Gattung	Basalfläche (m ²)*	Kohlenstoffvorrat (t)	Anteil am gesamten Kohlenstoffvorrat (%)
<i>Tilia</i>	1.145,7	4.883,8	38,4
<i>Acer</i>	294,4	1.196,8	9,4
<i>Fraxinus</i>	195,3	879,1	6,9
<i>Platanus</i>	404,1	2.004,7	15,8
<i>Pyrus</i>	90,4	222,5	1,8
<i>Quercus</i>	113,5	514,2	4,0
<i>Prunus</i>	62,6	128,3	1,0
<i>Robinia</i>	91,7	431,9	3,4
<i>Aesculus</i>	108,8	480,5	3,8
<i>Populus</i>	288,5	1.403,1	11,0
<i>Corylus</i>	15,4	53,2	0,4
andere	149,4	518,4	4,1
Gesamt	2.959,8	12.716,5	100

Quelle: eigene Berechnung; *Basalfläche = Summe aller Stammquerschnittsflächen in Höhe des BHD

In Abbildung 4.5 ist die räumliche Verteilung des Kohlenstoffvorrates pro Ortsteil und Hektar (ha) dargestellt. Daraus wird deutlich, dass die 1.324 Straßenbäume im Ortsteil Zentrum-Süd mit seiner Fläche von ca. 170 ha und einem Kohlenstoffvorrat von gut 5 t pro Hektar die größte Menge bezogen auf die Fläche seit ihrer Anpflanzung gespeichert haben. Daran anschließend folgen die Ortsteile Zentrum-West (4 t) und Stötteritz (2,6 t). Den geringsten Kohlenstoffvorrat im Verhältnis zur seiner Fläche weist der stark sub-urban und agrarisch geprägte und am südwestlichen Rand von Leipzig gelegene Ortsteil Hartmannsdorf-Knautnaundorf mit 0,02 t

bei 314 Straßenbäumen und ca. 1.590 ha Fläche auf (vgl. Tabelle 8.3 im Anhang).

Abbildung 4.5: Kohlenstoffvorrat der Leipziger Straßenbäume pro Hektar nach Ortsteilen



Quelle: eigene Bearbeitung

Bindung von Luftschadstoffen Die Straßenbäume der Stadt Leipzig binden durch trockene Deposition 5,7 t der Luftschadstoffe Ozon (O_3), Schwefeldioxid (SO_2), Feinstaub (PM_{10}) und Stickstoffdioxid (NO_2) pro Jahr. Aufgeteilt nach den einzelnen Luftschadstoffen werden jährlich 3,5 t O_3 , 0,9 t NO_2 , 0,9 t PM_{10} und 0,4 t SO_2 der Atmosphäre entzogen. Im Gegenzug geben einige Baumarten der in Leipzig vorhandenen Gattungen während einer Wachstumsperiode flüchtige organische Verbindungen in Höhe von 0,5 t wieder ab. Zieht man diesen Teil zur Bildung einer realistischeren Bilanz von gebundenen Luftschadstoffen ab, nehmen die Straßenbäume der Untersuchungsstadt 5,3 t Luftschadstoffe pro Jahr auf. Im Durchschnitt aller Straßenbäume bindet jeder Baum jährlich 61,2 g O_3 , 15,1 g NO_2 , 15,8 g PM_{10} und 6,7 g SO_2 - zusammen 98,8 g an Luftschadstoffen. Freigesetzt werden von jedem Baum durchschnittlich 8,1 g an flüchtigen organischen Verbindungen pro Jahr. In der Bilanz

entzieht somit jeder Straßenbaum der Atmosphäre durchschnittlich 90,7 g Luftschadstoffe.

Die vier den Bestand dominierenden Gattungen *Tilia*, *Acer*, *Fraxinus* und *Platanus*, zusammen 39.146 Bäume, erbringen einen Anteil von 71,2 % an der durch alle Straßenbäume zusammen jährlich erbrachten bilanzierten Speicherleistung (vgl. Tabelle 4.1). Beispielhaft werden hier die Werte der Gattung *Tilia* vorgestellt. Die Straßenbäume dieser Gattung binden jährlich knapp 1,5 t Ozon, jeweils knapp 0,4 t Stickstoffdioxid und Feinstaub sowie knapp 0,2 t Schwefeldioxid. Freigesetzt werden von *Tilia* ungefähr 0,08 t an flüchtigen organischen Verbindungen (vgl. Tabelle 4.3). Somit speichert *Tilia* jährlich 2,3 t an Luftschadstoffen, was einem Anteil von 43,1 % der gesamten erbrachten Leistung entspricht. Für eine detaillierte Aufschlüsselung der durch die anderen Gattungen erbrachten Anteile sei auf die beiden oben genannten Tabellen verwiesen.

Tabelle 4.3: Gebundene Luftschadstoffe und freigesetzte flüchtige organische Verbindungen pro Jahr nach Gattungen

Gattung	Bindung O ₃ /a (kg)	Bindung NO ₂ /a (kg)	Bindung PM ₁₀ /a (kg)	Bindung SO ₂ /a (kg)	Freisetzung BVOC/a* (kg)	Bilanz/Bindung Luftschadstoffe/a (kg)
<i>Tilia</i>	1.447,0	359,8	378,3	155,7	-75,7	2.265,1
<i>Acer</i>	277,9	67,8	75,8	30,5	-160,1	291,9
<i>Fraxinus</i>	227,7	56,1	57,3	24,5	0,0	365,8
<i>Platanus</i>	510,0	125,8	125,4	55,1	0,0	816,3
<i>Pyrus</i>	86,0	21,5	23,0	11,4	-67,0	74,9
<i>Quercus</i>	135,4	33,4	33,7	14,6	0,0	217,2
<i>Prunus</i>	102,1	25,6	25,6	12,3	-0,9	164,8
<i>Robinia</i>	112,3	27,7	28,2	12,1	0,0	180,3
<i>Aesculus</i>	110,8	27,0	29,7	12,6	-84,5	95,6
<i>Populus</i>	372,8	92,1	92,4	40,3	0,0	597,7
<i>Corylus</i>	5,3	1,2	1,7	0,7	-27,6	-18,7
andere	157,2	38,8	43,5	17,8	-52,0	205,2
	3.544,7	876,8	914,5	387,7	467,7	5.256,0

Quelle: eigene Berechnung; *BVOC = Biogenic Volatile Organic Compounds = flüchtige organische Verbindungen

Auffällig sind beim Blick auf die jährlich erbrachten Leistungen mehrere Werte. Zum einen sind dies, lässt man *Tilia* außen vor, die im Vergleich hohen Anteile der Gattungen *Platanus* (15,5 % bzw. 0,8 t) und *Populus* (11,4 % bzw. 0,6 t). Erklären lässt sich dies, wie bei der Bindung von Kohlenstoffdioxid, teilweise mit der verhältnismäßig hohen Anzahl an alten, großen Bäumen (vgl. Abbildungen 4.1, 4.2, 4.3 und Tabelle 4.1). Diese von ihrem Wuchs hohen Bäume verfügen im Vergleich zu einem gleichaltrigen Baum beispielsweise der Gattung *Acer* über große Mengen an Laub welches für die Aufnahme von Luftschadstoffen eine größere Blattoberfläche (Leaf Surface Area) bietet. Somit können über dieses Mehr an Fläche größere Mengen an Luftschadstoffen der Atmosphäre entzogen werden. Zum anderen fällt der negative Wert der Gattung *Corylus* (-0,4 % bzw. -0,02 t) auf. Straßenbäume dieser Gattung setzten

mehr flüchtige organische Verbindungen frei, als sie im Gegenzug Luftschadstoffe binden. Nach MCPHERSON ET AL. (2003) sind die Aufnahme von Luftschadstoffen und die Verminderung des Oberflächenabflusses eng mit der Kronenbreite (tree canopy cover) und der Blattoberfläche (leaf surface area) verbunden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass große Bäume für die Erbringung einer höchst möglichen Leistung besser geeignet sind als kleine Bäume. *i-Tree Streets* gibt in den Basisdaten, die als Grundlage der Berechnung dienten, erst Werte für die Deposition von Luftschadstoffen für Bäume mit mindestens 3,81 cm BHD und teilweise erst ab 11,43 cm BHD an. Demgegenüber setzen die Bäume von Beginn ihres Wachstums (jährliche Wachstumsperiode) durch Photosynthese flüchtige organische Verbindungen frei. Betrachtet in einer Bilanz, wie in der vorliegenden Arbeit, entstehen somit teilweise negative Werte. Generell braucht jeder Baum eine gewisse Größe, eher er über eine genügend große Blattoberfläche verfügt, um eine positive Bilanz erreichen zu können. Dies lässt nicht den Schluss zu, dass die Gattung *Corylus* ungeeignet oder für den Menschen evtl. schädlich ist. Die Gattungen *Pyrus*, *Quercus*, *Prunus*, *Robinia* und *Aesculus* speichern jährlich zwischen 0,1 t bis 0,2 t an Luftschadstoffen und haben somit zusammen einen Anteil von 13,8 % an der Gesamtleistung. Die übrigen Gattungen binden 0,2 t oder 3,9 % Luftschadstoffe pro Jahr (für detailliertere Angaben vgl. Tabelle 4.3).

Betrachtet man die Verteilung der gebundenen Luftschadstoffe in der Bilanz nach Ortsteilen, nehmen die Straßenbäume in Stötteritz mit 416,6 kg pro Jahr vor den Bäumen im Zentrum-Süd (368 kg/a) die meisten Luftschadstoffe auf. Die 1.407 Straßenbäume im Ortsteil Lausen-Grünau nehmen weniger Luftschadstoffe auf als sie flüchtige organische Verbindungen freisetzen. Sie emittieren jährlich 1,1 kg mehr als sie aufnehmen (vgl. Tabelle 8.4 im Anhang). Die daraus für den Menschen möglicherweise erwachsenen *disservices*, beispielsweise z.T. verstärkte Ozonbildung etc., spielen laut HEYNISCH (2011) aus rein praktischen Gesichtspunkten bei der Auswahl von neu anzupflanzenden Straßenbäumen eine untergeordnete Rolle. Hier stehen klar andere Punkte, wie gestalterische und v.a. pflegerische Aspekte im Vordergrund.

Verminderung des Oberflächenabflusses Gemeinsam reduzieren die Bäume an den Straßen der Stadt Leipzig den Oberflächenabfluss von Niederschlagswässern um 158.138,8 m³ pro Jahr. Im Durchschnitt aller Straßenbäume verhindert jeder Baum, dass jährlich 2,7 m³ Regenwasser ungenutzt in die Kanalisation abfließen. Diese Wassermenge wird teilweise von den Blättern der Bäume aufgenommen und durch Evaporation wieder freigesetzt, was sich temperaturregulierend auf die Umgebung auswirkt. Zum anderen fällt das Wasser durch die Bäume hindurch oder läuft von den gesättigten Blättern ab und versickert im Boden der Baumscheibe. Die den Oberflächenabfluss jährlich vermindernde Menge lässt sich für ein besseres Verständnis der Größenordnung in folgendes Verhältnis setzen. Ein Bundesbürger verbrauchte im Jahr 2007 laut STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND (2009) 122 Liter

Trinkwasser pro Tag. Das sind im Jahr 44.530 Liter bzw. 44,5 m³. Die Straßenbäume dieser Untersuchung verhindern demnach jährlich den Abfluss der Menge an Wasser, die 3.553 Personen im selben Zeitraum verbrauchen.

Aus Tabelle 4.1 gehen die anteilig erbrachten Leistungen der einzelnen Gattungen hervor. Auch in diesem Bereich dominiert *Tilia* mit einem Anteil von knapp 42 % der erbrachten Leistung oder gut 66.000 m³ durch ihre schiere Anzahl und den verhältnismäßig vielen Altbäumen (7.437 Bäume die 60 Jahre und älter sind, 1.202 Bäume die einen BHD von 50 cm und mehr aufweisen und einer Basalfläche von fast 1.150 m²). Analog zur Bindung von Kohlenstoffdioxid und Luftschadstoffen verteilen sich die den Oberflächenabfluss reduzierenden Anteile und Mengen auf die restlichen Gattungen (vgl. Tabelle 4.4)

Tabelle 4.4: Durch die Straßenbäume reduzierte Menge des Oberflächenabflusses nach Gattungen

Gattung	Anzahl (absolut)	Anteil (relativ %)	Basalfläche (m ²)	Verminderung Oberflächenabfluss (m ³)
<i>Tilia</i>	20.140	34,8	1.145,7	66.303,7
<i>Acer</i>	7.926	13,7	294,4	18.915,2
<i>Fraxinus</i>	6.076	10,5	195,3	11.088,1
<i>Platanus</i>	5.004	8,6	404,1	17.658,6
<i>Pyrus</i>	2.854	4,9	90,4	4.003,8
<i>Quercus</i>	2.047	3,5	113,5	5.434,3
<i>Prunus</i>	2.006	3,5	62,6	3.124,9
<i>Robinia</i>	1.390	2,4	91,7	4.561,0
<i>Aesculus</i>	1.370	2,4	108,8	5.343,4
<i>Populus</i>	1.352	2,3	288,5	11.729,0
<i>Corylus</i>	1.191	2,1	15,4	1.473,9
andere	6.554	11,4	149,4	8.503,1
Gesamt	57.910	100	2.959,8	158.138,8

Quelle: eigene Berechnung

Die Straßenbäume im Ortsteil Stötteritz vermindern den oberflächlichen Abfluss von Niederschlagswässern um knapp 8.950 m³ pro Jahr und belegen damit unter allen Ortsteilen die Spitzenposition. Anschließend folgen mit gut 7.950 m³ und ungefähr 7.450 m³ die Ortsteile Eutritzsch und Zentrum-Süd. Den geringsten Anteil mit ca. 225 m³ jährlich erbringen die 108 Bäume im Ortsteil Grünau-Siedlung (vgl. Tabelle 8.3 im Anhang).

4.2 Die Website www.strassenbaum-leipzig.info

Nachfolgend wird das im Rahmen dieser Arbeit erstellte webbasierte Umweltinformationssystem näher vorgestellt. Da es sich um ein sich stetig entwickelndes Projekt handelt, spiegeln v.a. die textlichen Inhalte nicht unbedingt den über die Website tatsächlich aufrufbaren Inhalt wider. Hier sind aufgrund von Aktualisierungen und Anpassungen Änderungen möglich. Der

funktional technische Inhalt, die Abfragefunktionalität und die Visualisierung der Ergebnisse durch den implementierten Web Map Service über das eingebundene Kartenmaterial von Google Maps sowie die Ausgabe der Ökosystemdienstleistungen, entsprechen dem aktuellen, vorerst endgültigen Stand.

Auf der *Startseite* erfährt der Nutzer sofort welche Möglichkeiten diese Website bietet. Sie gibt schlaglichtartig einen Überblick über die Thematik. Über den *Mehr*-Link wird der Nutzer auf die *Hintergrund*-Seite geführt und kann sich an dieser Stelle ausführlicher über den Inhalt der Website informieren. Über den Link unter dem Punkt *Hinweise zur Benutzung* gelangt der Nutzer auf die Seite *FAQs* (Frequently Asked Questions). Hier erfolgt eine Untergliederung in allgemeine Benutzungshinweise nach der Art: Was kann ich in die Suchfelder eingeben? Wie gehe ich mit Umlauten um? etc. und einen zweiten Block in welchem der Nutzer mehr über die angezeigten Ökosystemdienstleistungen erfährt und was diese Werte bedeuten. Auf der Seite *Über* wird dargestellt, wer hinter der Website steht. Die *Kontakt*-Seite (vgl. Abbildung 4.6) ermöglicht es dem Nutzer sich per Email mit dem Autor in Verbindung zu setzen. Ausgewählte Teile der Website sollen nachfolgend näher erläutert werden.

Abbildung 4.6: Kontaktformular

Kontaktieren Sie uns ...

Anrede Herr Frau

Name

E-Mail

Betreff

Ihre Nachricht

Abbildung 4.7: Suchfelder

Suche nach ...

Baumart (z.B. [Linde](#) oder [Tilia cordata](#))

Straße (z.B. [Karl-Liebknecht-Strasse](#))

Ort (z.B. [Suedvorstadt](#) oder [Leipzig](#))

Über Eingaben in die Suchfelder (vgl. Abbildung 4.7) kann der Nutzer die ausgegebenen Ergebnisse entsprechend einschränken. Beim Klick auf den Suchen-Button löst der Nutzer jeweils ein *GetMap*-Request für die Visualisierung der Straßenbäume und eine Abfrage an die Datenbank für die Ergebnisausgabe aus. Für einen leichteren Einstieg wurden dem Nutzer pro Suchfeld zwei Beispiele zur Verfügung gestellt. Bei einem Klick auf die jeweiligen Links werden diese Einträge automatisch in die Suchfelder übernommen. Dies dient zur ersten Orientierung und teilweisen Erläuterung der Funktionsweise. So wird bereits hier deutlich, dass die Umlaute ä, ö und ü entsprechend ausgeschrieben werden müssen. Der Buchstabe ß muss durch ss ersetzt werden. Der Nutzer kann seine Suche schrittweise eingrenzen. Beispielsweise kann er mit einer Abfrage der Gattung *Tilia* beginnen. Nachdem die Ergebnisse angezeigt wurden, ist es nun möglich die Suche über eine Eingabe z.B. der Prager Straße weiter einzugrenzen. Nach erfolgter Visualisierung ist eine weitere Eingrenzung über den Ortsteil möglich. Da die Prager Straße durch mehrere Ortsteile verläuft, ist eine Eingrenzung auf einen Ortsteil, beispielsweise Stötteritz möglich. Die sich daraus ergebenden Ergebnisse sind aus Abbildung 4.8 ersichtlich.

Abbildung 4.8: Visualisierte Abfrage: *Baumart: Tilia, Straße: Prager Strasse und Ort: Stoetteritz*

Leipzigs Straßenbäume

Startseite Hintergrund FAQs Über Kontakt

Suche nach ...

Baumart (z.B. [Linde](#) oder [Tilia cordata](#))
 Tilia
 Straße (z.B. [Karl-Liebknecht-Strasse](#))
 Prager Strasse
 Ort (z.B. [Suedvorstadt](#) oder [Leipzig](#))
 Stoetteritz

Suchen

Dieser Baum ...

Baumart	Linde (<i>Tilia</i>)
Standort	Prager Strasse (Stoetteritz)
bindet ...	
Treibhausgase (pro Jahr)	124.353036 kg CO ₂
Treibhausgase (seit Anpflanzung)	2042.066202 kg CO ₂
Luftschadstoffe*	0.277816 kg pro Jahr
vermeidet ...	
Oberflächenabfluss (pro Jahr)	7.367651 m ³

* O₃, NO₂, PM₁₀, SO₂

Mit freundlicher Unterstützung von

Stadt Leipzig HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ

88 Straßenbäume

binden ...

Treibhausgase	6,5 t CO ₂ pro Jahr (88,8 t CO ₂ seit ihrer Anpflanzung)
Luftschadstoffe*	11 kg pro Jahr (11,2 kg pro Jahr [#])

vermeiden ...

Oberflächenabfluss	387,7 m ³ Regenwasser pro Jahr
--------------------	---

* O₃, NO₂, PM₁₀, SO₂ # ohne Freisetzung flüchtiger organischer Verbindungen

Quelle: www.strassenbaum-leipzig.info

Die über die Suchanfrage ausgewählten Straßenbäume werden auf Kartenmaterial von Google Maps visualisiert. Der Nutzer hat zum einen über die Kontrollelemente am linken Kartenrand die Möglichkeit die Zoomstufe zu verändern. Am rechten Rand der Karte befindet sich ein Fenster, welches bei einem Klick des Nutzers geöffnet wird. Hier kann der Nutzer zwischen drei Darstellungsformen des Kartenmaterials wählen (vgl. Abbildung 4.9). Eine Kartenansicht ermöglicht eine schnelle und gute Orientierung und Lokalisierung der visualisierten Straßenbäume. In der Satellitenansicht kann der Nutzer die tatsächliche Lage der Bäume prüfen und erhält entsprechend zusätzliche Informationen aus der photorealistischen Aufsicht der Stadt. Eine dritte Option ist die Hybridansicht. Hier werden zusätzlich zur Satellitenansicht kartographische Elemente wie Straßen und Straßennamen angezeigt.

Abbildung 4.9: Kartenlayer

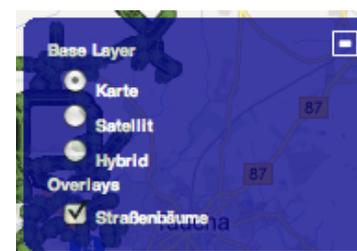


Abbildung 4.10: Details eines Baumes

Dieser Baum ...	
Baumart	Linde (<i>Tilia</i>)
Standort	Prager Strasse (Stoetteritz)
bindet ...	
Treibhausgase (pro Jahr)	124.353036 kg CO ₂
Treibhausgase (seit Anpflanzung)	2042.066202 kg CO ₂
Luftschadstoffe*	0.277816 kg pro Jahr
vermeidet ...	
Oberflächenabfluss (pro Jahr)	7.367651 m ²
* O ₃ , NO ₂ , PM ₁₀ , SO ₂	

Nachdem der Nutzer eine Suche ausgeführt hat und das Ergebnis visualisiert wurde, können detaillierte Informationen für einzelne Straßenbäume des Suchergebnisses aufgerufen werden. Unterhalb der Karte wird der Nutzer mit dem Hinweis „Klicken Sie auf einen Baum für weitere Informationen“ auf diese Möglichkeit hingewiesen. Hierfür wird bei einem Klick auf einen der Bäume ein `GetFeatureInfo`-Request an den Web Mapping Service ausgeführt, der die Sachdaten des entsprechenden Features (Baum) abrufen. Angezeigt werden diese Daten in einem DIV Container (ein HTML Element) im linken Bereich der Website unter den Suchfeldern (vgl. Abbildung 4.10). Der Nutzer erfährt hier die Bezeichnung der Baumart auf deutsch

sowie die wissenschaftliche Bezeichnung, den Standort (Straßenname und Ortsteil) sowie die von diesem Baum erbrachten Ökosystemdienstleistungen. Das Element mit den Detailinformationen wird bei Auslösung einer neuen Suchanfrage über einen Klick auf den Suchen-Button wieder ausgeblendet.

5 Diskussion

Dieses Kapitel diskutiert die angewendete Methodik zur Berechnung der Ökosystemdienstleistungen und Erstellung des Umweltinformationssystems sowie die jeweils erzielten Ergebnisse und ordnet sie in die aktuelle Forschung ein.

5.1 Methodendiskussion Ökosystemdienstleistungen

Das über Wachstumskurven simulierte Baumwachstum hat den größten Einfluss auf die Ergebnisse. Um nur eine Quantifizierung des CO₂-Speichervermögens in der Untersuchungsstadt vorzunehmen, gibt es etablierte und zu guten Ergebnissen führende Methoden (vgl. FRENZEL (2009); STROHBACH ET AL. (2011)). Ihnen liegen für die lokal vorherrschenden Baumarten entwickelte Wachstumsraten zugrunde. Für eine darüber hinausgehende Berechnung von ÖSD wie die Bindung von Luftschadstoffen und die Verminderung des Oberflächenabflusses und v.a. für einen integrierten Ansatz zur Ermittlung aller hier vorgestellten ÖSD musste auf andere Methoden und Werkzeuge zurückgegriffen werden. Die daher in der vorliegenden Arbeit angewendete und an MCPHERSON (2010) angelehnte Methodik zur Ermittlung der Ökosystemdienstleistungen der Leipziger Straßenbäume stellt eine praktikable Möglichkeit dar, ÖSD mit einem überschaubaren Aufwand zu berechnen und mit gewissen Einschränkungen gute Ergebnisse zu erzielen. *i-Tree Streets* berücksichtigt hierbei die besonderen Faktoren, die das Baumwachstum in der Stadt und speziell an Straßen beeinflussen. Hierzu zählen das Wachstum einschränkende Aspekte wie sie aus Tabelle 2.2 in Kapitel 2.1.2 ersichtlich sind. Da *i-Tree Streets* für Baumwachstumszonen in den USA entwickelt und kalibriert wurde, musste eine zu Leipzig passende Zone ausgewählt werden. Das, neben den klimatischen Bedingungen wesentliche Kriterium für die Auswahl der Baumwachstumszone, stellt der Abgleich der Baumartenzusammensetzung mit der Untersuchungsstadt dar. Durch ein Ermitteln des „best match“ ergeben sich gewisse Unsicherheiten, welche die Ergebnisse beeinflussen können. Ein Unsicherheitsfaktor stellt die Zuordnung der in Leipzig vorherrschenden Baumarten zu den in Fort Collins, CO vorkommenden Arten dar (Assigned Species Value). Hier können bei falscher Zuordnung die Ergebnisse über- bzw. unterschätzt werden. Die im Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig mit ca. 10.000 Bäumen vorkommende Baumart *Tilia* ist nicht weiter differenziert. Sie wurde daher, gemäß den Vorgaben in *i-Tree Streets* der für die Berechnung zugrunde liegenden Art *Fraxinus pennsylvanica* (FRPE) zugeordnet und nicht *Tilia cordata* (TICO)

(vgl. Tabelle 3.6 und Tabelle 8.2 im Anhang). Der im Kataster enthaltenen Art *Tilia cordata* wurde der den Vorgaben entsprechende Assigned Species Value TICO zugeordnet. Da beiden Assigned Species Values unterschiedliche Werte für sequestriertes Kohlenstoffdioxid zugrunde liegen, kann es hier zu Verschiebungen in den Ergebnissen kommen.

Eine generelle Schwäche in der Anwendung von *i-Tree Streets* ist die fehlende Ausgabe von eventuellen Unsicherheiten oder Schwankungsbereichen in den Ergebnissen. Es ist somit nicht möglich die Streuung der Ergebnisse oder mögliche Fehler zu quantifizieren. Hinzu kommt die Tatsache, dass den für Leipzig angewendeten, in *i-Tree Streets* implementierten Wachstumsraten und Luftschadstoffkonzentrationen, Daten der Baumwachstumszone Fort Collins, CO zugrunde liegen. Es können derzeit keine lokal erhobenen Daten in *i-Tree Streets* integriert werden. Für den in dieser Arbeit angewandten Ansatz der Ermittlung einer Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen mit einem alle ÖSD integrierenden Werkzeug gibt es derzeit allerdings keine praktikablen Alternativen.

5.2 Ergebnisdiskussion Ökosystemdienstleistungen

Bindung von Kohlenstoffdioxid Um die Ergebnisse besser mit Arbeiten anderer Autoren vergleichen zu können, sollen im Folgenden nur die erzielten Werte für die oberirdische Biomasse betrachtet werden. Der ermittelte, oben genannte Wert von 12.716,5 t Kohlenstoffvorrat wird hierfür um einen Wurzelanteil von 22 % (2.797,6 t) und einen Laubanteil von 4 % (508,7 t) reduziert. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher auf einen Kohlenstoffvorrat von 9.410,2 t in der oberirdischen Holzbiomasse der Straßenbäume. FRENZEL (2009) hat für das Untersuchungsjahr 2005 den Kohlenstoffvorrat von 51.867 Straßenbäumen in Leipzig ermittelt. Sie erzielte über die Bestimmung von Wachstumsraten und allometrischen Regressionsgleichungen einen Kohlenstoffvorrat von 10.506,5 t. Obwohl die Baumanzahl in der vorliegenden Untersuchung gut 10 % über der von FRENZEL (2009) liegt, wurde durch die in *i-Tree Streets* implementierten Algorithmen ein Kohlenstoffvorrat geschätzt, der 10,4 % unter diesem Wert liegt. Zurückzuführen ist dies darauf, dass FRENZEL (2009) für die Ermittlung der Werte die nicht immer mit ihrem aktuellen Stand (Alter, BHD) im Straßenbaumkataster enthaltenen Bäume mit den von ihr entwickelten Wachstumskurven auf den Stand von 2005 hat „nachwachsen“ lassen. Diese dann entsprechend größeren Bäume entziehen der Atmosphäre mehr CO₂ und verfügen somit über einen höheren Kohlenstoffvorrat. Bei der Berechnung der Ökosystemdienstleistungen mit *i-Tree Streets* wurde der im Kataster enthaltene Stand für die Berechnungen zugrunde gelegt und keine Anpassung an ein bestimmtes Jahr vorgenommen. Es ist bisher nicht vorgesehen, eigene lokal entwickelte Wachstumskurven zu implementieren. Daher wird auf die für die Referenz-Baumwachstumszone entwickelten Kurven und sich daraus ergebenden Wachstumsraten zurückgegriffen.

Vergleicht man die Verteilung des Kohlenstoffvorrats pro Baum in unterschiedlichen BHD-Klassen dieser Untersuchung mit den Ergebnissen von FRENZEL (2009) für die Leipziger Straßenbäume und den Werten von Chicago, IL, ergibt sich das aus Tabelle 5.1 ersichtliche Bild. Die in dieser Untersuchung erzielten Werte überschätzen v.a. in den unteren Klassen die Werte von FRENZEL (2009) leicht und die von NOWAK (1994b) für den urbanen Wald von Chicago ermittelten Werte deutlich. Die Unterschiede entstehen durch die Baumarten- und BHD-Verteilung. Seit dem Jahr 2005 wurden in Leipzig ca. 2.900 Straßenbäume gepflanzt. Der Anteil an Bäumen in den unteren Klassen ist somit im Vergleich zu FRENZEL (2009) deutlich höher. Bei einer, wie oben angemerkten möglicherweise mit Unsicherheiten behafteten Zuordnung der Baumarten vor der Berechnung und einem sich daraus evtl. ergebenden multiplizierenden Fehler kann es hier zu entsprechenden Überschätzungen kommen. In den mittleren BHD-Klassen erfolgt eine Annäherung der Werte und in den oberen Klassen liegen die Werte dieser Untersuchung unter denen von FRENZEL (2009) und NOWAK (1994b). Eine mögliche Ursache für die niedrigeren Werte in den oberen BHD-Klassen kann die im Methodenkapitel erläuterte Tatsache sein, dass in den Basisdaten von *i-Tree Streets* teilweise keine Werte für große BHD vorhanden sind. Da an diesen Stellen mit den Werten aus den letztverfügbaren BHD-Klassen gerechnet wurde, kam es zu keiner weiteren Steigerung der Werte und hierdurch zu einer entsprechenden Unterschätzung für einen Teil der Straßenbäume mit großem BHD.

Tabelle 5.1: Durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat pro Baum der Leipziger Straßenbäume im Vergleich zu den Ergebnissen von FRENZEL (2009) und zur Stadt Chicago, IL (NOWAK, 1994b)

BHD (cm)	Kohlenstoffvorrat Leipziger Straßenbäume Mittelwert (kg/Baum)*	Ergebnisse für Leipzig von FRENZEL (2009) (kg/Baum)	Kohlenstoffvorrat Urbaner Wald Chicago, IL (NOWAK, 1994b) Mittelwert (kg/Baum)*
<= 8	7,05	5,6	2,2
> 8 - 15	17,03	16,7	17,80
> 15 - 30	95,93	81,7	77,70
> 30 - 46	340,39	305,0	295,30
> 46 - 61	729,26	681,9	711,90
> 61 - 76	1.365,09	1.469,0	1.337,90
> 76	2.188,32	2.604,0	2.357,60

Quelle: eigene Berechnung; *Für einen Vergleich mit FRENZEL (2009) wurden die Werte der vorliegenden Untersuchung und von NOWAK (1994b) um einen Wurzelanteil von 22 % und einen Laubanteil von 4 % reduziert; die Ergebnisse von FRENZEL (2009) stellen das Szenario mit einem mittlerem Baumwachstum dar

Vergleicht man den durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat pro Baum über alle BHD mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen ergibt sich folgendes Bild. In der vorliegenden Untersuchung wurden 219,6 kg C/Baum in der gesamten Holzbiomasse ermittelt. Für New York sind es 255 kg C/Baum, für Chicago 207 kg C/Baum, für Boston 245 kg C/Baum und für

Jersey City 142 kg C/Baum (NOWAK & CRANE, 2002). Für Lissabon, Portugal haben SOARES ET AL. (2011) einen Wert von 132,6 kg C/Baum ermittelt. Für diesen Vergleich stellt die BHD-Verteilung den wichtigsten Aspekt dar, da das Kohlenstoffspeichervermögen exponentiell mit dem BHD steigt. Große, alte Bäume können bis zu Tausend mal mehr Kohlenstoff binden als kleine, junge Bäume (NOWAK, 1994b). Leipzig verfügt in seinem Straßenbaumbestand über einen Anteil von ungefähr 0,9 % an Straßenbäumen mit einem BHD > 76 cm. Diese 497 Bäume verfügen über einen Anteil am Gesamtkohlenstoffvorrat von 11,6 %.

Der Wert für die jährlich der Atmosphäre entzogene Menge an Kohlenstoffdioxid in dieser Untersuchung beträgt 2.554,2 t. Der von FRENZEL (2009) ermittelte Wert liegt bei einem mittleren modellierten Baumwachstum im Jahr 2011 bei 1.068 t CO₂/a. Die mit *i-Tree Streets* ermittelten Ergebnisse überschätzen demnach den Wert von FRENZEL (2009) um den Faktor 2,4. Eine mögliche Ursache kann in der Zuordnung der Baumarten zu den für die Berechnung notwendigen Assigned Species Values liegen. So wurde nach den Vorgaben von *i-Tree Streets* allen Bäumen der Art *Tilia*, welche keine weitere Differenzierung aufwiesen, *Fraxinus pennsylvanica* (FRPE) als Assigned Species Value und somit zugrunde liegende Baumwachstumsrate zugeordnet (vgl. Tabelle 3.6 und Tabelle 8.2 im Anhang). Die Werte, welche für Bäume mit der Zuordnung FRPE im Bereich sequestriertes CO₂ ermittelt werden, liegen deutlich über denen mit der Zuordnung *Tilia cordata* (TICO). Diesem Assigned Species Value sind alle Bäume der Art *Tilia cordata*, so sie denn auch dementsprechend im Straßenbaumkataster ausgewiesen waren, zugeordnet worden. Wäre eine stärkere Unterteilung der Baumart *Tilia* mit ihren ungefähr 10.000 Bäumen im Kataster möglich, könnte eine genauere Zuordnung zu den Assigned Species Values erfolgen und dadurch differenziertere Werte für die Ökosystemdienstleistung sequestriertes CO₂ pro Jahr erzielt werden.

In der von SOARES ET AL. (2011) durchgeführten Untersuchung der Straßenbäume von Lissabon, Portugal übersteigt der Anteil der durch Dekomposition und Mulchung (9,3 %) sowie durch den Maschineneinsatz bei Pflegemaßnahmen (21,4 %) freigesetzten Menge an Kohlenstoffdioxid die für Leipzig (7,7 % bzw. 5,1 %) ermittelten Anteile z.T. deutlich. Vor allem der im Vergleich um das vierfache höhere Anteil der Pflegemaßnahmen fällt hier auf. Aufgrund der begrenzten Daten bei SOARES ET AL. (2011) und MCPHERSON ET AL. (2003) zu diesem Punkt kann hier nur spekuliert werden. Wünschenswert wäre eine genauere Aufschlüsselung von CO₂-Emissionen der eingesetzten Fahrzeuge und Maschinen wie dies in STROHBACH ET AL. (2011) erfolgt.

Bindung von Luftschadstoffen Die Straßenbäume der Stadt Leipzig binden pro Jahr ca. 3,5 t Ozon (0,06 kg/Baum a), jeweils 0,9 t Stickstoffdioxid (0,02 kg/Baum a) und Feinstaub (0,02 kg/Baum a) sowie knapp 0,4 t Schwefeldioxid (0,01 kg/Baum a). Pro Baum werden somit ca. 0,1 kg dieser Luftschadstoffe gebunden. Ungefähr 0,5 t flüchtiger organischer Verbindungen

werden von den Bäumen jährlich in die Atmosphäre entlassen. Bilanziert ergeben sich daraus etwa 5,3 t gespeicherter Luftschadstoffe pro Jahr.

Im folgenden sollen die hier erzielten Werte mit anderen Untersuchungen verglichen werden. YANG ET AL. (2005) haben die urbanen Bäume Pekings auf ihre Rolle als Luftschadstoffsenke untersucht. Sie haben ein jährliches Bindungsvermögen von 0,53 kg pro Baum und Jahr der auch hier quantifizierten Luftschadstoffe ermittelt. Pro Baum wurden Werte von 0,11 kg/a O₃, 0,06 kg/a NO₂, 0,32 kg PM₁₀ und 0,04 kg SO₂ berechnet. Damit liegen die Werte um das 2-fache bis 16-fache über den Werten von Leipzig. Zurückzuführen ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die unterschiedliche Baumartenzusammensetzung, die verschiedenen klimatischen Bedingungen und nicht zuletzt auf die mit Sicherheit höhere Luftschadstoffbelastung der chinesischen Hauptstadt. PAOLETTI (2009) hat das jährliche Bindungsvermögen von Stadtbäumen für Ozon an zwei Beispielen in den italienischen Städten Mailand und Florenz untersucht und die Ergebnisse nach Baumarten bzw. Gattungen aufgeschlüsselt. Aus Tabelle 5.2 wird deutlich, dass die Werte zwischen allen drei Städten unter den Baumarten stark schwanken. Am nächsten sind die Werte zwischen den Städten für *Tilia sp.* und *Populus nigra* wobei aus PAOLETTI (2009) keine Angaben zur Alters- oder BHD-Verteilung hervorgehen. Ein Vergleich der Ergebnisse ist somit sehr schwierig.

Tabelle 5.2: Jährliche Bindung von Ozon (O₃) ausgewählter Baumarten in Leipzig, Mailand und Florenz

Baumart	Bindung O ₃ /a (g/Baum)		
	Leipzig	Mailand*	Florenz*
<i>Aesculus hippocastanum</i>	124	71	257
<i>Tilia sp.</i>	94	84	-
<i>Fraxinus sp.</i>	170	-	280
<i>Platanus acerifolia</i>	230	-	140
<i>Populus nigra</i>	331	-	353

Quelle: eigene Berechnung; *Werte übernommen aus PAOLETTI (2009)

Der überwiegende Teil der Untersuchungen zur Ermittlung von Luftschadstoffreduktionen erfolgt über den Zusammenhang von, meist aus Fernerkundungsdaten ermittelten Flächen welche durch Baumkronen bedeckt sind (Tree Canopy Cover). Die Angaben erfolgen i.d.R. als reduzierte Menge Luftschadstoff in Kilogramm pro Hektar oder Quadratmeter durch die von Baumkronen bedeckte Fläche (JIM & CHEN, 2008; NOWAK, 1994a; ESCOBEDO & NOWAK, 2009; TALLIS ET AL., 2011; BRACK, 2002; ESCOBEDO ET AL., 2008). Da in der vorliegenden Arbeit keine Bezüge zu Flächen hergestellt werden können, ist ein Vergleich zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen rein spekulativ.

SOARES ET AL. (2011) haben unter Nutzung von *STRATUM*, dem Vorläufer von *i-Tree Streets*, unter anderem die Reduktion der ebenfalls in dieser Untersuchung betrachteten Luftschadstoffe durch die Straßenbäume Lissabons, Portugal quantifiziert. Pro Jahr werden

von den Straßenbäumen der portugiesischen Hauptstadt knapp 25 t an O₃, SO₂, PM₁₀ und NO₂ gebunden. Eine weitere Differenzierung erfolgte nicht. Freigesetzt werden jährlich ungefähr 4,6 t an flüchtigen organischen Verbindungen. Demnach bindet jeder der ca. 41.000 Straßenbäume dieser Untersuchung, unabhängig von Art, Alter und Größe 0,6 kg oben genannter Luftschadstoffe und gibt etwa 0,1 kg an flüchtigen organischen Verbindungen pro Jahr ab. Der Wert für gebundene Luftschadstoffe liegt damit ungefähr auf dem Niveau der von YANG ET AL. (2005) erzielten Ergebnisse. MACO & MCPHERSON (2003) geben die ebenfalls unter der Anwendung von *STRATUM* für die Straßenbäume von Davis, CA ermittelten Ökosystemdienstleistungen nur in monetarisierter Form an. Daher lassen sich die Werte nicht mit der vorliegenden Arbeit vergleichen.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die den Luftschadstoff-Reduktionsraten zugrunde liegenden Modelle, Annahmen und Daten, welche für die hier verwendete Referenzstadt in *i-Tree Streets* implementiert sind, die Werte von Fort Collins, CO widerspiegeln. Die Übertragung der hier erzielten Ergebnisse auf die Untersuchungsstadt Leipzig ist, auch wenn die Referenzstadt nach bestem Wissen und Gewissen und unter Anwendung einer anerkannten Methode ausgewählt wurde, mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Generell lässt sich zum besseren Verständnis der Größenordnungen Folgendes festhalten. Ein Teil der Luftschadstoffe, dies gilt v.a. für partikuläre Luftschadstoffe wie Feinstaub (PM₁₀), lagert sich zunächst an den Blättern der Bäume an, wird aber durch Wind wieder in die Atmosphäre getragen oder mit dem nächsten Niederschlag abgewaschen und versickert entweder im Boden der Baumscheibe oder bei breiteren Baumkronen wird dieser Anteil über die versiegelte Fläche weggespült. Nach JIM & CHEN (2008) werden etwa 50 % der auf den Blättern der Bäume angelagerten partikulären Luftschadstoffe durch obige Prozesse wieder aufgewirbelt. NOWAK ET AL. (2006) haben in ihrer Untersuchung zur Reduktion von Luftschadstoffen durch urbane Wälder in einer Vielzahl US-amerikanischer Städte festgestellt, dass Stadtbäume zwar viele Tonnen Luftschadstoffe binden, aber die durchschnittliche Luftverbesserung in den untersuchten Städten während eines Tages in der Wachstumsperiode bei unter einem Prozent lag. Sie führen weiter aus, dass die Luftverbesserung mit steigendem Anteil von mit Bäumen bedeckten innerstädtischen Flächen ebenfalls ansteigt. NOWAK ET AL. (2006) stufen die erzielten Ergebnisse als signifikant genug ein, dass urbane Wälder einen mess- und spürbaren positiven Einfluss auf die urbane Umwelt und damit das Wohlbefinden der Menschen ausüben.

Verminderung des Oberflächenabflusses Ein Vergleich des für Leipzig erzielten Wertes mit der Literatur ist äußerst schwierig. Es finden sich, nach derzeitigem Kenntnisstand des Autors, nahezu keine Untersuchungen, die das Reduktionsvermögen von Straßenbäumen oder urbanen Wäldern in den Vordergrund rücken. Die überwiegende Zahl der Arbeiten konzentriert sich auf die Auswirkungen von unterschiedlichem Oberflächenabfluss auf Schadstoffkonzentrationen

in den Abwässern oder mit diesen verbundenen Ökosystemen oder veränderte Wasserflüsse und die Auswirkungen auf biochemische Kreisläufe. SOARES ET AL. (2011) haben für die Straßenbäume in Lissabon neben oben genannten Ökosystemdienstleistungen auch die Verminderung des Oberflächenabflusses quantifiziert und monetarisiert. Sie ermittelten durch Anwendung von *STRATUM* einen den Oberflächenabfluss reduzierenden Wert von knapp 187.000 m³ Niederschlagswasser, welches durch die gut 41.000 Straßenbäume am Abfluss gehindert wurde. Pro Baum, unabhängig von Art, Alter und Größe ergibt sich daraus ein Wert von durchschnittlich 4,5 m³ pro Jahr. Der Wert für Leipzig beträgt 2,7 m³ pro Baum und Jahr. Trotz geringerer Baumanzahl Lissabons ist dieser höhere pro-Baum-Wert vermutlich auf den mit 702 mm höheren Niederschlag in der portugiesischen Hauptstadt zurückzuführen (Leipzig 507 mm). Durch die größere Menge an Niederschlagswasser verhindern die Bäume durch oben beschriebene Prozesse auch entsprechend höheren Oberflächenabfluss.

Für das Ökosystem Stadt und seine Teilbereiche wie Boden, Flora und Fauna ist es von großer Bedeutung über ausreichend Wasser zu verfügen. Urbane Landschaften mit ihren 50 bis 90 % undurchlässigen den Boden versiegelnden Flächen können 40 bis 83 % der Niederschlagswässer ungenutzt durch Oberflächenabfluss verlieren (PATAKI ET AL., 2011). Daher sollte bei der Planung und Gestaltung der innerstädtischen Grünflächen auf entsprechend große Wasser durchlässige Oberflächen (Baumscheiben) geachtet werden.

5.3 Methodendiskussion Umweltinformationssystem

In einem ersten Versuch, die Visualisierung der abgefragten Ökosystemdienstleistungen in die Website zu implementieren, sollte die *JavaScript Object Notation* (JSON)¹ zur Anwendung kommen. JSON ist ein Datenaustauschformat, welches in der vorliegenden Arbeit wie folgt eingesetzt werden sollte. Die vom Nutzer ausgelöste Suchabfrage übergibt alle zur Abfrage gehörenden Objekte (Straßenbäume) inklusive aller Sachdaten (Baumart, Standort, ÖSD etc.) die für die Visualisierung nötig sind in eine JSON-Datei. Diese Datei wird im Speicher des Browser abgelegt. Mittels JavaScript wird nun bei jeder neuen Abfrage die gesamte Datei durchsucht und die Ergebnisse visualisiert/ausgegeben. Wie sich in der Testphase herausstellte, konnte diese gängige Methode im vorliegenden Fall nicht angewendet werden. Für wenige Datenpunkte liefert dieser Ansatz auf einfache Weise schnelle und gute Ergebnisse. Die hier anfallende Datenmenge (57.910 Straßenbäume inkl. Sachdaten) ist auf diese Art nicht handhabbar. So entstanden, wenn die Anfragen überhaupt beantwortet wurden, Wartezeiten von mehreren Minuten. In der Praxis ist dies einem Nutzer nicht zumutbar. Daher wurde zur Umsetzung auf die Standards des Web Mapping Service (WMS) gesetzt. Dieser bietet den großen Vorteil, dass die zu visualisierenden Objekte in einem fertig gerenderten Bildformat

¹<http://www.json.org/>

(png, jpeg etc.) ausgegeben werden und somit um ein vielfaches schneller dargestellt werden können. Doch auch der WMS bietet in seiner Funktionalität, beispielsweise in der Definition von Filtern, nur einen eingeschränkten Umfang. Daher wurden diese, wie im Kapitel zur Methodik erläutert, in JavaScript nachprogrammiert. Die eigentliche Visualisierung erfolgte anschließend durch den Einsatz von *OpenLayers*. Diese JavaScript Bibliothek stellt den de facto Standard dar, wenn es um die Visualisierung von Geodaten im OpenSource Bereich geht.

Zur Ermittlung und Ausgabe der Ökosystemdienstleistungen wurde eine *PostgreSQL* Datenbank mit der Erweiterung *PostGIS* eingesetzt. Sie ist sehr gut für die Verwaltung und Bearbeitung von Geodaten geeignet. Sie bietet gegenüber anderen Geodatenbankmanagementsystemen (GDBMS) den Vorteil über Schnittstellen zur direkten Anbindung anderer OpenSource GeoTools zu verfügen. Die hier verwendeten Werkzeuge werden ausschließlich als OpenSource Produkte vertrieben und verursachen somit nur minimale Kosten bei der Nutzung. Die in dieser Form realisierte Applikation ist hoch performant, was sich in entsprechend kurzen Ladezeiten positiv für den Nutzer bemerkbar macht.

5.4 Ergebnisdiskussion Umweltinformationssystem

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Umweltinformationssystem gibt dem Nutzer die Möglichkeit mehr darüber zu erfahren, was die Leipziger Straßenbäume neben ihren ästhetisch-gestalterischen Funktionen noch leisten. Er kann sich einen Eindruck über die jährlich erbrachten Leistungen bestimmter Baumarten verschaffen und kann sich beispielsweise darüber informieren, welchen Beitrag die Bäume in der eigenen Straße oder im Ortsteil leisten. Ein für den vielleicht von der Natur „entfremdeten“ Nutzer nicht unwesentlicher Punkt ist die Tatsache, durch Nutzung des UIS zu erfahren, was für ein Baum vor der eigenen Haustür zu finden ist. Für eine einfachere Bedienung wäre es aus Sicht der Nutzer wahrscheinlich günstiger die zur Auswahl stehenden und hinter den Suchfeldern „versteckten“ Einträge sichtbar zu machen. Dies wäre theoretisch über die Implementierung einer sogenannten Instant Search oder Dropdown-Liste realisierbar. Die Integrierung einer solchen Funktionalität hätte den Rahmen dieser Arbeit überschritten. Eine zukünftige Einbindung ist an dieser Stelle allerdings nicht ausgeschlossen. Um den Nutzern trotzdem einen Überblick über die in der Datenbank enthaltenen und abfragbaren Baumarten zu geben, wird an entsprechender Stelle auf der Seite FAQs (Frequently Asked Questions) der Website eine Übersicht zur Verfügung gestellt. Des Weiteren ist die Eingabe von ausgeschriebenen Umlauten (ä,ü,ö) und ss anstatt des Buchstabens ß eine für den Nutzer eventuell ärgerliche Einschränkung. Zur Ermittlung der Ökosystemdienstleistungen mit den oben genannten Werkzeugen war es notwendig diese Buchstaben zu ersetzen. Ob und wie weit eine Rückführung möglich und sinnvoll ist, müsste geprüft werden. Die die Entwicklung des Umweltinformationssystems begleitenden Funktions-

tests werden vor der tatsächlichen Veröffentlichung der Website weiter intensiviert, so dass den Nutzern eine reibungslos funktionierende Applikation zur Verfügung steht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei wesentliche Ziele verfolgt. Zum einen sollten die Ökosystemdienstleistungen Bindung von CO₂ und der Luftschadstoffe O₃, NO₂, PM₁₀ und SO₂ sowie die Verminderung des Oberflächenabflusses von Niederschlagswässern der Leipziger Straßenbäume quantifiziert werden. Zum anderen sollten diese Ergebnisse in ein webbasiertes Umweltinformationssystem überführt und über eine Website der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.

Die ermittelten Ökosystemdienstleistungen stellen eine Annäherung dar, welche auf den in der Software *i-Tree Streets* implementierten Annahmen und Modellen beruht. Sie sind mit nicht weiter quantifizierbaren Unsicherheiten verbunden, können aber als Anhaltspunkte für die durch die Straßenbäume erbrachten Leistungen, zusätzlich zu den unstrittigen ästhetisch-gestalterischen Aspekten dienen. So binden die im bereinigten Straßenbaumkataster der Stadt Leipzig verzeichneten 57.910 Bäume jährlich 2.554,2 t Kohlenstoffdioxid. Dies entspricht der jährlich von 1.091 Pkw ausgestoßenen bzw. von 255 Bürgern pro Jahr verursachten Menge dieses Treibhausgases. Seit ihrer Anpflanzung haben die Straßenbäume 46.669,5 t CO₂ der Atmosphäre entzogen und verfügen somit über einen Kohlenstoffvorrat von 12.716,5 t in ihrer gesamten Biomasse. Die von den z.T. über 150 Jahre alten Bäumen während ihres Wachstums aufgenommene Menge an Kohlenstoffdioxid entspricht der von 4.666 Einwohnern Deutschlands jedes Jahr verursachten Menge. Auf den ersten Blick erscheint in diesem Zusammenhang v.a. der jährliche Nutzen eher klein. In dieser Arbeit wurde allerdings nur ein Teil der in Leipzig vorhandenen Bäume untersucht. Würde dieser hier vorgestellte Ansatz auf alle innerstädtischen Bäume ausgeweitet, ergäben sich wesentlich höhere Werte.

Des Weiteren binden die Straßenbäume pro Jahr gut 3,5 t Ozon (O₃), jeweils etwa 0,9 t Stickstoffdioxid (NO₂) und partikulären Feinstaub (PM₁₀) sowie knapp 0,4 t Schwefeldioxid (SO₂). Im Gegenzug setzt ein Teil der Bäume während der jährlichen Wachstumsperiode knapp 0,5 t an flüchtigen organischen Verbindungen frei. Ein daraus für den Menschen möglicherweise resultierender Schaden durch die zusätzliche Entstehung von Ozon wird durch die gebundenen Mengen mehr als ausgeglichen. Zieht man für eine Bilanzierung den freigesetzten Anteil von den gebundenen Luftschadstoffen ab, ergibt sich eine jährliche Speicherleistung von gut 5,3 t aller Leipziger Straßenbäume. Um die hier erbrachte Leistung in ein nachvollziehbares Verhältnis zu setzen, könnten sie in einem nächsten Schritt mit tatsächlich in der Untersuchungsstadt auftretenden Luftschadstoffkonzentrationen und -mengen in Beziehung gebracht

werden. Ähnliches gilt für die von den Straßenbäumen am oberflächlichen Abfluss gehinderten Niederschlagswässer. Alle Bäume zusammen reduzieren die, unbekannte, Gesamtmenge um 158.138,8 m³ pro Jahr. Dies entspricht der Menge an Trinkwasser, die 3.553 Personen im selben Zeitraum verbrauchen.

Die für jeden Straßenbaum ermittelten Ergebnisse stehen der Öffentlichkeit über die Website www.strassenbaum-leipzig.info zur Verfügung. Hier können die Nutzer die jährlich direkt oder indirekt dem Menschen erbrachten Leistungen nach Baumarten, Gattungen und Familien einsehen und die Ergebnisse räumlich auf Straßen, Ortsteile oder die gesamte Stadt eingrenzen.

Als ein zukünftiger Schritt sollten lokale Baumwachstumskurven in *i-Tree Streets* implementiert werden, um die hier vorherrschenden klimatischen Bedingungen und die daraus resultierenden Wachstumsraten besser abbilden und die Ergebnisse dieses mehrere Ökosystemdienstleistungen integrierenden Ansatzes weiter verbessern zu können.

7 Referenzen

Die Literaturangaben sind alphabetisch nach den Namen der Autoren geordnet. Bei mehreren Autoren wird nach dem ersten Autor geordnet.

Literatur

- Alonso, R., Vivanco, M. G., González-Fernández, I., Bermejo, V., Palomino, I., Garrido, J. L. et al. (2011, August). Modelling the influence of peri-urban trees in the air quality of Madrid region (Spain). *Environmental Pollution*, 159 (8-9), 2138–2147.
- Amt für Stadterneuerung und Wohnungsbauförderung. (2005). *Der grüne Promenadenring*. Stadt Leipzig.
- Amt für Stadtgrün und Gewässer. (2011). *Straßenbaumkataster*.
- Amt für Statistik und Wahlen. (2010). *Statistisches Jahrbuch*. Stadt Leipzig.
- Andrae, C., Graul, C., Over, M. & Zipf, A. (2011). *Web Portrayal Services - OpenGIS Web Map Service, Styled Layer Descriptor, Symbology Encoding und ISO 19117 Portrayal vorgestellt und erläutert* (1. Aufl.).
- Balder, H., Ehlebracht, K. & Mahler, E. (1997). *Strassenbäume - Planen, Pflanzen, Pflegen am Beispiel Berlin*.
- Bolund, P. & Hunhammar, S. (1999, Mai). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29 (2), 293–301.
- Boyd, J. & Banzhaf, S. (2007, August). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63 (2-3), 616–626.
- Brack, C. L. (2002). Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution*, 116, 195–200.
- Bruse, M. (2003). Stadtgrün und Stadtklima - Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. *LÖBF-Mitteilungen*, 1, 66–70.
- Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S. & Müller, F. (2011, September). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, in Press.
- Burkhardt, I., Dietrich, R., Hoffmann, H., Leschner, J., Lohmann, K., Schoder, F. et al. (2008). *Urbane Wälder*. Bundesamt für Naturschutz (BfN).
- Costanza, R., D'Arge, R., Groot, R. de, Farber, S., Grasso, M., Hannon, B. et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (15), 253–260.
- Daily, G. C. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* (1. Aufl.).
- Dobbs, C., Escobedo, F. J. & Zipperer, W. C. (2011, Dezember). A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. *Landscape and Urban Planning*, 99 (3-4), 196–206.
- Dunn, R. R., Gavin, M. C., Sanchez, M. C. & Solomon, J. N. (2006, Dezember). The pigeon paradox: dependence of global conservation on urban nature. *Conservation Biology*, 20 (6), 1814–1816.
- DWD - Deutscher Wetterdienst. (2011). *Mittelwerte des Niederschlags bezogen auf den aktuellen Standort*.

- Ehrlich, P. R. & Mooney, H. A. (1983). Extinction, Substitution, and Ecosystem Services. *BioScience*, 33 (4), 248–254.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T. & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159 (8-9), 2078–2087.
- Escobedo, F. J. & Nowak, D. J. (2009, April). Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 90 (3-4), 102–110.
- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodriguez, M. & Crane, D. E. (2008, Januar). Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 86 (1), 148–157.
- Fischer-Stabel, P. (Hrsg.). (2005). *Umweltinformationssysteme*.
- Forum Die Grüne Stadt. (2008). *Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen*.
- Frenzel, K. (2009). *Das Potenzial von Straßenbäumen als Kohlenstoffspeicher - Ein Beispiel für die Auswertungsmöglichkeit des Straßenbaumkatasters der Stadt Leipzig*.
- Guenther, A. B., Monson, R. K. & Fall, R. (1991). Isoprene and Monoterpene Emission Rate Variability: Observations With Eucalyptus and Emission Rate Algorithm Development. *Journal of Geophysical Research*, 96 (D6), 10799–10808.
- Guenther, A. B., Zimmerman, P. R., Harley, P. C., Monson, R. K. & Fall, R. (1993). Isoprene and Monoterpene Emission Rate Variability: Model Evaluations and Sensitivity Analyses. *Journal of Geophysical Research*, 98 (D7), 12609–12617.
- Haase, D. & Nuissl, H. (2010, Juni). The urban-to-rural gradient of land use change and impervious cover: a long-term trajectory for the city of Leipzig. *Journal of Land Use Science*, 5 (2), 123–141.
- Hermann, A., Schleifer, S. & Wrбка, T. (2011). The Concept of Ecosystem Services Regarding Landscape Research : A Review. *Living Reviews in Landscape Research*, 5 (1), 1–37.
- Heynisch, G. (2011). *Amt für Stadtgrün und Gewässer*.
- Hübner, O. (1914). *Der Straßenbaum in der Stadt und auf dem Lande - seine Pflanzung und Pflege sowie die erforderlichen Maßnahmen zu seinem Schutz*.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*.
- i-Tree Streets. User's Manual*. (2011). Verfügbar unter <http://www.itreetools.org/resources/manuals/i-TreeStreetsUsersManual.pdf>
- Jansen, M. & Adams, T. (2010). *OpenLayers. Webentwicklung mit dynamischen Karten und Geodaten* (1. Aufl.).
- Jim, C. Y. & Chen, W. Y. (2008, September). Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management*, 88 (4), 665–676.
- Kabisch, N., Haase, D. & Haase, A. (2010). Evolving Reurbanisation? Spatio-Temporal Dynamics Exemplified at the Eastern German City of Leipzig. *Urban Studies*, 47 (5), 967–990.
- Kändler, G., Adler, P. & Hellbach, A. (2011). Wie viel Kohlenstoff speichern Stadtbäume? Eine Fallstudie am Beispiel der Stadt Karlsruhe. *FVA-einblick*, 2, 7–10.
- Konijnendijk, C. C., Nilsson, K., Randrup, T. B. & Schipperijn, J. (2005). *Urban Forests and Trees*.
- Kremen, C. (2005, Mai). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8 (5), 468–479.
- Krieger, K., Böhn, V., Dreiseitl, H., Schwennen, K. B. & Sparmann, U. (1996). *Der städtische Straßenraum in den 90er Jahren: eine neue Stadtraumqualität zum Wohle des Menschen*.

- Kugel, C. (2009). *Land use and Ecosystem Services in transition: A GIS-based analysis of the historical land use change in the District of Leipzig 1964-2004*.
- Leh, H.-O. (1991). Innerstädtische Streßfaktoren und ihre Auswirkungen auf Straßenbäume. In H.-G. Brod (Hrsg.), *Straßenbaumschäden - ursachen und wirkungen*.
- LfULG. (2005). *Biotoptypen- und Landnutzungskartierung (BTLNK)*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Lyytimäki, J. & Sipilä, M. (2009). Hopping on one leg. The challenge of ecosystem disservices for urban green management. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8 (4), 309–315.
- Maco, S. E. & McPherson, E. G. (2003). A practical approach to assessing structure, function, and value of street tree populations in small communities. *Journal Of Arboriculture*, 29 (2), 84–97.
- McKinney, M. L. . (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation. *BioScience*, 52 (10), 883–890.
- McPherson, E. G. (1998). Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal Of Arboriculture*, 24 (4), 215–223.
- McPherson, E. G. (2010). Selecting Reference Cities for i-Tree Streets. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36 (5), 230–240.
- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Xiao, Q., Maco, S. E. & Hoefler, P. J. (2003). *Northern Mountain and Prairie Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting*.
- Meyer, F. H. (1982). Lebensbedingungen der Straßenbäume. In F. H. Meyer (Hrsg.), *Bäume in der stadt* (S. 84–133).
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*.
- Miller, R. W. (2007). *Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces* (2. Aufl.).
- Mitchell, T. (2008). *Web Mapping mit Open Source-GIS-Tools* (1. Aufl.).
- Nagel, J. (2001). *Waldmessenlehre*.
- Naidoo, R., Balmford, A., Costanza, R., Fisher, B., Green, R. E., Lehner, B. et al. (2008, Juli). Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (28), 9495–9500.
- Nowak, D. J. (1994a). Air Pollution Removal by Chicago's Urban Forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak & R. A. Rowntree (Hrsg.), *Chicago's urban forest ecosystem: Results of the chicago urban forest climate project* (S. 63–81).
- Nowak, D. J. (1994b). Atmospheric Carbon Dioxide Reduction by Chicago's Urban Forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak & R. A. Rowntree (Hrsg.), *Chicago's urban forest ecosystem: Results of the chicago urban forest climate project* (S. 83–94).
- Nowak, D. J. & Crane, D. E. (1998). *The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying Urban Forest Structure and Functions*.
- Nowak, D. J. & Crane, D. E. (2002, Januar). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116 (3), 381–389.
- Nowak, D. J., Crane, D. E. & Stevens, J. C. (2006, April). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4 (3-4), 115–123.
- Nowak, D. J., Stevens, J. C., Sisinni, S. M. & Luley, C. J. (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal Of Arboriculture*, 28 (May), 113–122.
- Nuissl, H. & Rink, D. (2005). The production of urban sprawl. Urban sprawl in Eastern Germany as a phenomenon of post-socialist transformation. *Cities*, 22 (2), 123–134.

- OGC. (2006). *OpenGIS Web Map Server Implementation Specification*. Open Geospatial Consortium.
- Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Peters, J. A. H. W. & Wilson, J. (2011). *Long-term trend in global CO₂ emissions. 2011 report*.
- Paoletti, E. (2009, Mai). Ozone and urban forests in Italy. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1506–1512.
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S. et al. (2011, Februar). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9 (1), 27–36.
- Pillsbury, N. H., Reimer, J. L. & Thompson, R. P. (1998). *Tree volume equations for fifteen urban species in California*.
- Rowntree, R. A. & Nowak, D. J. (1991). Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide. *Journal Of Arboriculture*, 17 (October), 269–275.
- Saebø, A., Borzan, Z., Ducatillion, C., Hatzistathis, A., Lagerström, T., Supuka, J. et al. (2005). The selection of plant materials for street trees, park trees and urban woodland. In C. C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. B. Randrup & J. Schipperijn (Hrsg.), *Urban forests and trees* (S. 207–280).
- Schächtele, K. & Hertle, H. (2007). *Die CO₂ Bilanz des Bürgers*. UBA - Umweltbundesamt.
- Schütt, P., Weisgerber, H., Schuck, H. J., Lang, U. M., Stimm, B. & Roloff, A. (2004). *Lexikon der Nadelbäume*.
- Schütt, P., Weisgerber, H., Schuck, H. J., Lang, U. M., Stimm, B. & Roloff, A. (2006). *Enzyklopädie der Laubbäume*.
- Scott, K. I., McPherson, G. E. & Simpson, J. R. (1998). Air pollutant uptake by Sacramento's urban forest. *Journal Of Arboriculture*, 24 (4), 224–234.
- Soares, A., Rego, F., McPherson, E. G., Simpson, J., Peper, P. & Xiao, Q. (2011, Januar). Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10 (2), 69–78.
- Strohbach, M. W., Arnold, E. & Haase, D. (2011). The carbon footprint of urban green space - A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, 104 (2), 220–229.
- Strohbach, M. W. & Haase, D. (2011). Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. *Landscape and Urban Planning*, 104 (1), 95–104.
- Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D. & Freer-Smith, P. (2011, November). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 103 (2), 129–138.
- Thornhill, M. E., Abd-Elrahman, A. H. & Andreu, M. G. (2009). Urban forest inventory using open access web mapping services and photogrammetric solution. In *17th international conference on geoinformatics*. Fairfax, VA.
- Throm, G. (2007). *Grundlagen der Botanik* (2. Aufl.).
- Tratalos, J., Fuller, R., Warren, P., Davies, R. & Gaston, K. (2007, Dezember). Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 83 (4), 308–317.
- Turner, R. K., Paavola, J., Cooper, P., Farber, S., Jessamy, V. & Georgiou, S. (2003, Oktober). Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*, 46 (3), 493–510.
- Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K. & Vries, S. de. (2005). Benefits and Uses of Urban

- Forests and Trees. In C. C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. B. Randrup & J. Schipperijn (Hrsg.), *Urban forests and trees* (S. 81–114).
- UBA - Umweltbundesamt. (2009). *Kraftfahrzeugbestand*. Verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2332>
- United Nations. (2010). *World Urbanization Prospects: The 2009 Revision*. Department of Economics and Social Affairs, Population Division.
- United Nations. (2011). *World Population Prospects: The 2010 Revision*. Department of Economics and Social Affairs, Population Division.
- Wallace, K. J. (2007, Oktober). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, 139 (3-4), 235–246.
- Wittig, R. (1998). Flora und Vegetation. In H. Sukopp & R. Wittig (Hrsg.), *Stadtökologie* (2. Aufl., S. 219–265).
- Xiao, Q., McPherson, G. E., Ustin, S. L., Grismer, M. E. & Simpson, J. R. (2000). Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes*, 14, 763–784.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J. & Sun, Z. (2005, Januar). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3, 65–78.

Internetseiten

- Degree Days*. (2011). Verfügbar unter <http://www.degreedays.net/>
- GeoServer*. (2011). Verfügbar unter <http://geoserver.org/display/GEOS/Welcome>
- GeoTools*. (2011). Verfügbar unter <http://geotools.org/>
- Hepp, C. & Gurk, C. (2011). *Baumkunde.de*. Verfügbar unter <http://www.baumkunde.de/>
- Iowa State University. (2011). *Growing degree-day calculation*. Verfügbar unter <http://www.agron.iastate.edu/courses/agron212/Calculations/GDD.htm>
- i-Tree*. (2011). Verfügbar unter <http://www.itreetools.org/>
- KOMA-Script*. (2011). Verfügbar unter <http://www.komascript.de/>
- LaTeX*. (2011). Verfügbar unter <http://www.latex-project.org/>
- OGC. (2011). *Open Geospatial Consortium - Standards and Specifications*. Verfügbar unter <http://www.opengeospatial.org/standards>
- OpenLayers*. (2011). Verfügbar unter <http://openlayers.org/>
- PostGIS*. (2011). Verfügbar unter <http://postgis.refractor.net/>
- PostgreSQL*. (2011). Verfügbar unter <http://www.postgresql.org/>
- Stadt Leipzig. (2011a). *Baumkataster und Statistik*. Verfügbar unter <http://www.leipzig.de/de/buerger/freizeit/leipzig/baum/strasse/allg/03447.shtml>
- Stadt Leipzig. (2011b). *Leipziger Stadtgeschichte*. Verfügbar unter <http://www.leipzig.de/de/tourist/leipzig/geschichte/>
- Stadt Leipzig. (2011c). *LIS - Leipzig-Informationssystem*. Verfügbar unter [http://statistik.leipzig.de/\(S\(c3fh45synn0k554t1xn4rx\)\)/statcity/table.aspx?cat=2&rub=1&per=q](http://statistik.leipzig.de/(S(c3fh45synn0k554t1xn4rx))/statcity/table.aspx?cat=2&rub=1&per=q)
- Stadt Leipzig. (2011d). *Von der Festungsanlage zur Promenade*. Verfügbar unter <http://www.leipzig.de/de/buerger/freizeit/leipzig/parks/promenade/02962.shtml>
- Statistisches Bundesamt Deutschland. (2009). *Pro-Kopf-Wasserverbrauch 2007 auf 122 Liter je Tag gesunken*. Verfügbar unter <http://www.destatis.de/>

- jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2009/10/PD09_377_322,templateId=renderPrint.psml
- Statistisches Bundesamt Deutschland. (2010). *Trend zum spritsparenden Auto bremst Kraftstoffverbrauch*. Verfügbar unter http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/STATmagazin/Umwelt/2010_01/2010_01Kraftstoffverbrauch,templateId=renderPrint.psml
- STRATUM. (2011). Verfügbar unter <http://www.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/stratum.shtml>
- The R Foundation. (2011). *The R Project for Statistical Computing*. Verfügbar unter <http://www.r-project.org/>
- United States Department of Agriculture. (2011). *PLANTS database*. Verfügbar unter <http://plants.usda.gov/java/>
- United States Department of Commerce. (2011). *NCDC - National Climatic Data Center*. Verfügbar unter <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>
- University of Illinois. (2011). *UI Plants*. Verfügbar unter <http://woodyplants.nres.uiuc.edu/>

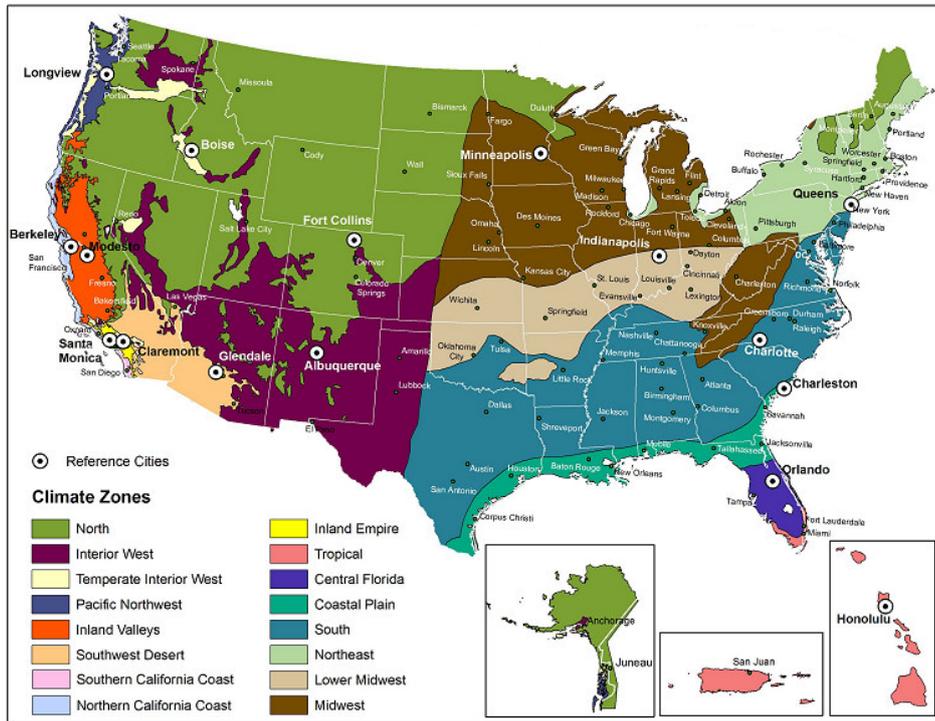
8 Anhang

Tabelle 8.1: Landnutzungsverteilung in der Stadt Leipzig

Landnutzung	Untergruppe (BTLNK*)	Fläche (in ha)	
Ackerflächen	Acker	8.175,55	
Siedlung, Gewerbe, Infrastruktur	Wohngebiet	4.883,20	
	Gewerbegebiet/techn. Infrastruktur	2.941,27	
	Mischgebiet	1.276,83	
	Verkehrsflächen	1.109,75	
	anthropogen genutzte Sonderflächen	492,72	
	Bauwerke an Gewässern	0,93	
Grün- und Freiflächen, Ruderalflur	Grün- und Freiflächen	2.717,12	
	Wirtschaftsgrünland	2.351,95	
	Ruderalflur, Staudenflur	1.482,32	
	Sonderkulturen	247,47	
	Streuobstwiese	39,38	
	Zwergstrauchheiden, Bortsgrasrasen	26,61	
	Niedermoor, Sumpf	8,24	
	Hochmoor, Zwischenmoor	4,48	
	Magerrasen trockener Standorte	4,18	
	Wälder und Forsten, Baumgruppen	Feuchtwald	1.034,19
Laubmischwald		818,61	
Laubwald (Reinbestand)		367,74	
Erstaufforstung		276,35	
Feldgehölz/Baumgruppe (dicht/geschlossen)		256,48	
Waldrandbereiche/Vorwälder		95,44	
gewässerbegleitende Vegetation		41,06	
Gebüsch		25,31	
Nadel-Laub-Mischwald		10,21	
Laub-Nadel-Mischwald		9,09	
Nadelwald (Reinbestand)		4,00	
Gewässer		Stillgewässer	585,10
		Fließgewässer	177,11
offene Flächen	offene Flächen	311,28	

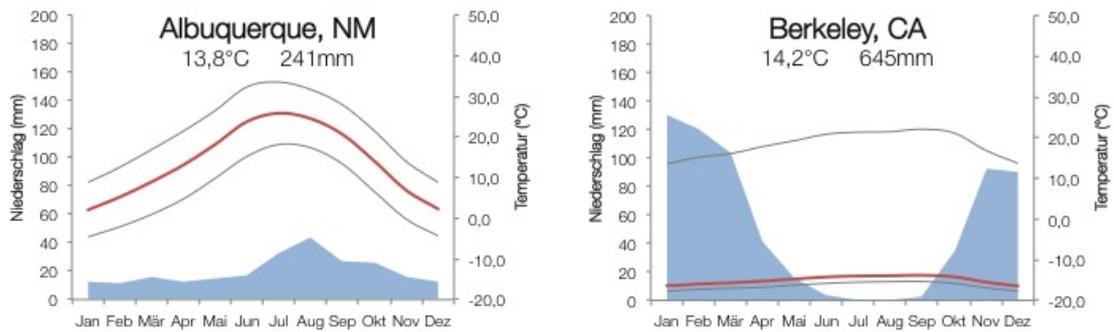
Quelle: nach LFULG (2005); *Biotoptypen- und Landnutzungskartierung (BTLNK)

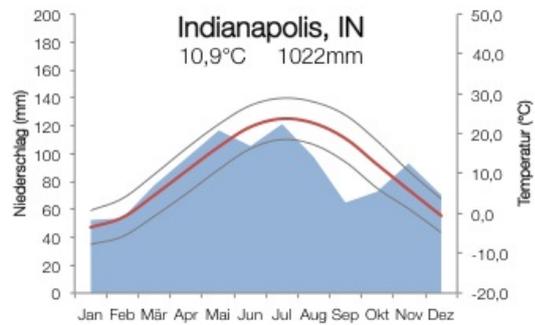
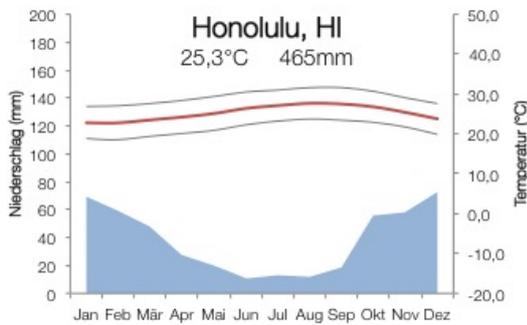
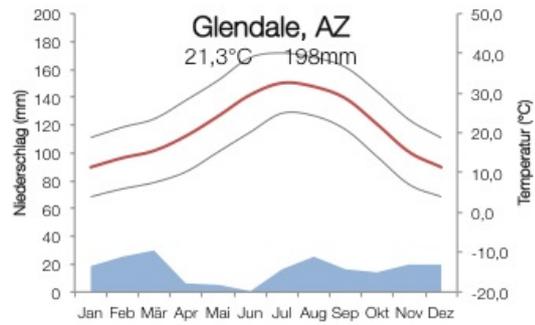
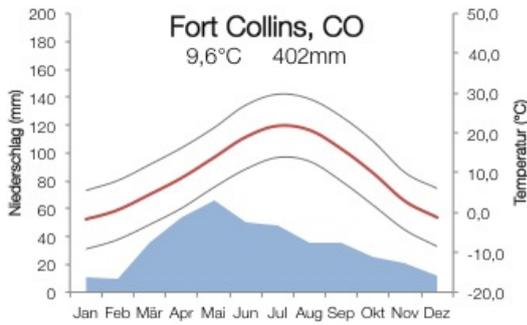
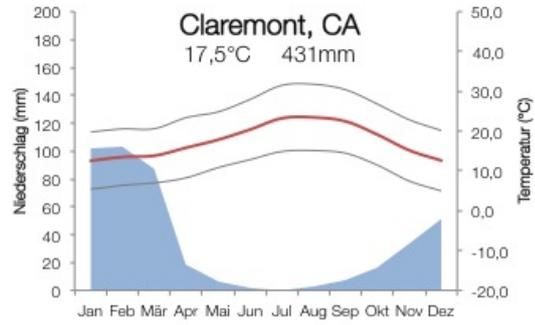
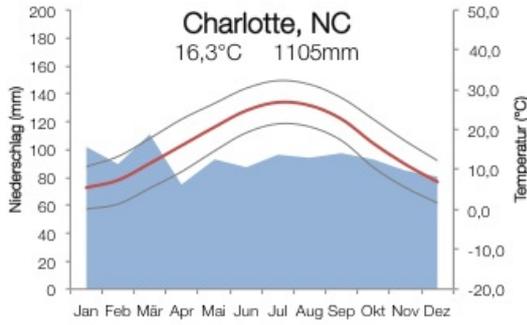
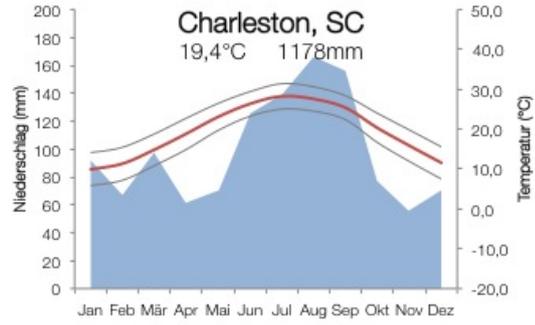
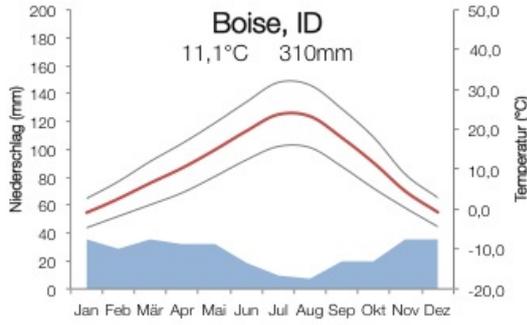
Abbildung 8.1: Die *i-Tree Streets* zugrunde liegenden Klimazonen

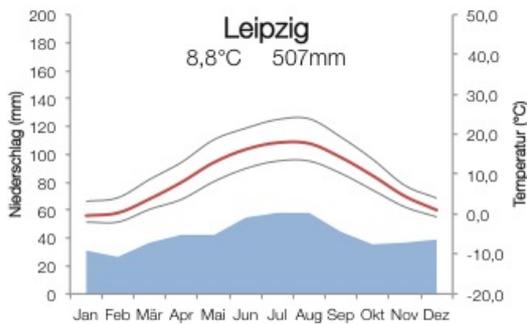
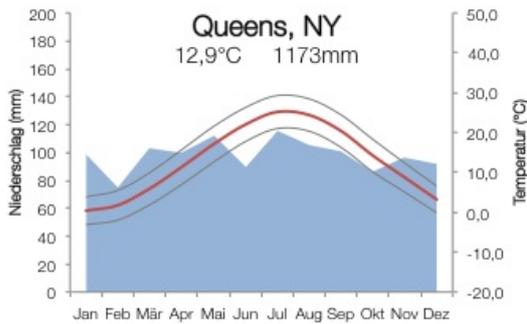
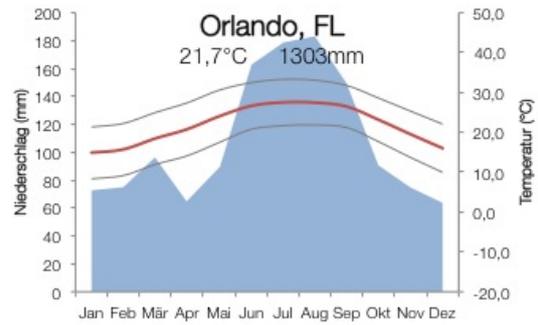
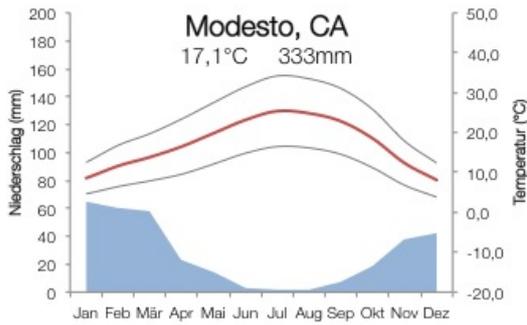
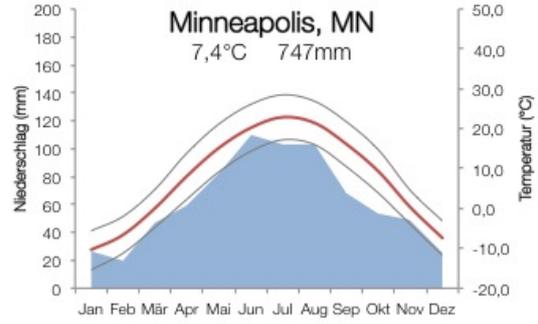
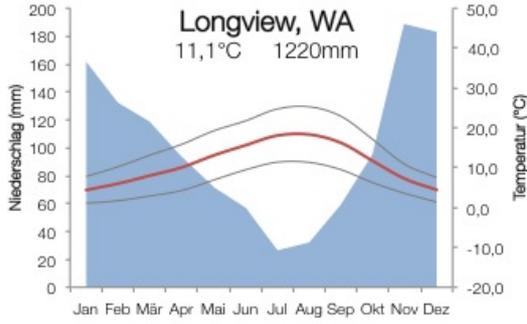


Quelle: <http://www.itreetools.org/resources/archives.php>

Abbildung 8.2: Klimadiagramme der 16 Referenzstädte und Leipzigs (in alphabetischer Reihenfolge)







Quelle: eigene Bearbeitung

Abbildung 8.3: Zusammensetzung der Baumarten in den 16 Referenzstädten und die relative Übereinstimmung mit Leipzig

Fort Collins, CO		Albuquerque, NM	
Measured species	% Pop	Measured species	% Pop
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	21,6	<i>Gleditsia triacanthos</i>	9,9
<i>Gleditsia triacanthos</i>	10,2	<i>Fraxinus velutina</i>	7,4
<i>Tilia cordata</i>	6,7	<i>Ulmus pumila</i>	6,7
<i>Quercus macrocarpa</i>	6,6	<i>Platanus hybrida</i>	6,4
<i>Celtis occidentalis</i>	5,6	<i>Chilopsis linearis</i>	6,4
<i>Malus spp.</i>	4,7	<i>Pinus nigra</i>	5,5
<i>Ulmus americana</i>	4,4	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	4,3
<i>Acer platanoides</i>	2,9	<i>Elaeagnus angustifolia</i>	4,1
<i>Ulmus pumila</i>	2,8	<i>Pyrus calleryana</i>	3,4
<i>Tilia americana</i>	2,4	<i>Pinus sylvestris</i>	2,8
<i>Acer saccharinum</i>	1,8	<i>Malus spp.</i>	2,6
<i>Fraxinus americana</i>	1,7	<i>Prunus cerasifera</i>	2,2
<i>Populus sargentii</i>	1,4	<i>Pinus edulis</i>	2,0
<i>Pinus nigra</i>	1,2	<i>Fraxinus americana</i>	1,9
<i>Gymnocladus dioicus</i>	1,1	<i>Populus fremontii</i>	1,9
<i>Pyrus sp.</i>	1,0	<i>Populus angustifolia</i>	1,8
<i>Prunus sp.</i>	1,0	<i>Fraxinus angustifolia</i>	1,6
<i>Picea pungens</i>	0,9	<i>Pinus ponderosa</i>	1,6
<i>Acer saccharum</i>	0,9	<i>Koelreuteria paniculata</i>	1,2
<i>Pinus ponderosa</i>	0,8	<i>Pistacia chinensis</i>	1,1
% of total population	79,7	% of total population	74,9
% tree match (nach Art)	29,5	% tree match (nach Art)	30,5
% tree match (nach Gattung)	73,0	% tree match (nach Gattung)	67,4

Boise, ID		Longview, WA	
Measured species	% Pop	Measured species	% Pop
<i>Acer platanoides</i>	10,4	<i>Prunus cerasifera</i> 'Thundercloud'	13,9
<i>Acer saccharinum</i>	8,3	<i>Prunus serrulata</i>	13,1
<i>Gleditsia triacanthos</i>	6,9	<i>Betula pendula</i>	8,8
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	4,5	<i>Liquidambar styraciflua</i>	6,0
<i>Malus spp.</i>	4,1	<i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata'	5,7
<i>Fraxinus americana</i>	3,8	<i>Ulmus americana</i>	4,6
<i>Pyrus calleryana</i>	3,2	<i>Acer platanoides</i>	3,7
<i>Platanus occidentalis</i>	3,1	<i>Crataegus laevigata</i>	3,4
<i>Tilia americana</i>	2,9	<i>Quercus rubra</i>	2,1
<i>Liquidambar styraciflua</i>	2,6	<i>Populus balsamifera ssp. trichocarpa</i>	1,7
<i>Robinia pseudoacacia</i>	2,6	<i>Malus angustifolia</i>	1,3
<i>Pinus sylvestris</i>	2,0	<i>Tilia cordata</i>	1,3
<i>Quercus rubra</i>	2,0	<i>Acer saccharum</i>	1,2
<i>Picea pungens</i>	1,9	<i>Tilia americana</i>	1,2
<i>Juglans nigra</i>	1,8	<i>Fraxinus latifolia</i>	1,0
<i>Crataegus spp.</i>	1,7	<i>Acer rubrum</i>	1,0
<i>Acer saccharum</i>	1,5	<i>Acer macrophyllum</i>	0,9
<i>Catalpa speciosa</i>	1,5	<i>Fagus sylvatica</i> 'atropunicea'	0,9
<i>Platanus hybrida</i>	1,5	<i>Morus alba</i>	0,8
<i>Ulmus pumila</i>	1,3	<i>Calocedrus decurrens</i>	0,7
% of total population	67,5	<i>Pinus contorta</i> 'Bolanderi'	0,5
% tree match (nach Art)	43,8	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,4
% tree match (nach Gattung)	66,0	% of total population	74,1
		% tree match (nach Art)	45,1
		% tree match (nach Gattung)	73,0

Modesto, CA	
Measured species	% Pop
<i>Fraxinus velutina</i> 'Modesto'	13,7
<i>Pistacia chinensis</i>	10,6
<i>Zelkova serrata</i>	6,8
<i>Fraxinus angustifolia</i> 'Raywood'	5,1
<i>Pyrus calleryana</i> 'Bradford'	5,1
<i>Ginkgo biloba</i>	4,2
<i>Fraxinus holotricha</i>	3,8
<i>Gleditsia triacanthos</i>	3,8
<i>Celtis sinensis</i>	3,6
<i>Liquidambar styraciflua</i>	3,4
<i>Fraxinus excelsior</i> 'Hessei'	3,2
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> 'Marshall'	3,1
<i>Platanus hybrida</i>	2,7
<i>Cinnamomum camphora</i>	1,7
<i>Acer saccharinum</i>	1,5
<i>Magnolia grandiflora</i>	1,2
<i>Quercus ilex</i>	0,8
<i>Koelreuteria paniculata</i>	0,7
<i>Pinus thunbergiana</i>	0,5
<i>Betula pendula</i>	0,4
<i>Lagerstroemia indica</i>	0,4
% of total population	76,5
% tree match (nach Art)	22,8
% tree match (nach Gattung)	53,4

Glendale, AZ	
Measured species	% Pop
<i>Ulmus parvifolia</i>	8,4
<i>Fraxinus velutina</i>	7,0
<i>Pinus eldarica</i>	7,0
<i>Prosopis chilensis</i>	5,9
<i>Acacia salicina</i>	5,8
<i>Washingtonia robusta</i>	4,9
<i>Quercus virginiana</i>	4,4
<i>Olea europaea</i>	3,6
<i>Pinus halepensis</i>	3,5
<i>Cercidium floridum</i>	3,0
<i>Phoenix dactylifera</i>	2,9
<i>Eucalyptus microtheca</i>	2,9
<i>Washingtonia filifera</i>	2,7
<i>Fraxinus uhdei</i>	2,6
<i>Rhus lancea</i>	2,6
<i>Acacia farnesiana</i>	2,3
<i>Pistacia chinensis</i>	2,0
<i>Morus alba</i>	1,4
<i>Brachychiton populneum</i>	1,3
<i>Parkinsonia aculeata</i>	1,3
<i>Chilopsis linearis</i>	1,0
% of total population	76,5
% tree match (nach Art)	0,0
% tree match (nach Gattung)	34,3

Santa Monica, CA	
Measured species	% Pop
<i>Washingtonia robusta</i>	13,3
<i>Ficus thoningii</i>	11,6
<i>Magnolia grandiflora</i>	6,5
<i>Phoenix canariensis</i>	5,3
<i>Podocarpus macrophyllus</i>	4,8
<i>Ceratonia siliqua</i>	3,2
<i>Cupaniopsis anacardioides</i>	3,1
<i>Pinus canariensis</i>	3,0
<i>Liquidambar styraciflua</i>	2,7
<i>Cedrus deodara</i>	2,6
<i>Metrosideros excelsus</i>	2,5
<i>Melaleuca quinquenervia</i>	2,4
<i>Cinnamomum camphora</i>	2,3
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	2,3
<i>Callistemon citrinus</i>	2,2
<i>Tristaniopsis conferta</i>	1,7
<i>Schinus terebinthifolius</i>	1,6
<i>Pittosporum undulatum</i>	1,5
<i>Eucalyptus ficifolia</i>	1,0
% of total population	73,6
% tree match (nach Art)	2,7
% tree match (nach Gattung)	12,2

Berkeley, CA	
Measured species	% Pop
<i>Platanus hybrida</i>	7,4
<i>Liquidambar styraciflua</i>	6,5
<i>Quercus agrifolia</i>	6,4
<i>Prunus cerasifera</i>	4,1
<i>Cinnamomum camphora</i>	3,2
<i>Pyrus kawakamii</i>	2,8
<i>Sequoia sempervirens</i>	2,0
<i>Magnolia grandiflora</i>	1,7
<i>Ulmus americana</i>	1,7
<i>Pittosporum undulatum</i>	1,6
<i>Pistacia chinensis</i>	1,5
<i>Fraxinus velutina</i>	1,4
<i>Acer palmatum</i>	1,4
<i>Ulmus parvifolia</i>	1,4
<i>Pyrus calleryana</i>	1,3
<i>Ginkgo biloba</i>	1,2
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1,2
<i>Liriodendron tulipifera</i>	1,1
<i>Acacia melanoxylon</i>	1,1
<i>Pinus radiata</i>	0,7
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,5
% of total population	50,1
% tree match (nach Art)	17,1
% tree match (nach Gattung)	40,2

Claremont, CA	
Measured species	% Pop
<i>Liquidambar styraciflua</i>	9,2
<i>Lagerstroemia indica</i>	8,7
<i>Quercus ilex</i>	4,3
<i>Quercus agrifolia</i>	4,2
<i>Pinus canariensis</i>	4,0
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	4,0
<i>Platanus racemosa</i>	3,9
<i>Fraxinus velutina</i> 'Modesto'	2,8
<i>Platanus hybrida</i>	2,6
<i>Eucalyptus sideroxylon</i>	2,5
<i>Pistacia chinensis</i>	2,2
<i>Liriodendron tulipifera</i>	2,1
<i>Magnolia grandiflora</i>	1,9
<i>Pinus brutia</i>	1,8
<i>Ginkgo biloba</i>	1,6
<i>Fraxinus uhdei</i>	1,5
<i>Cinnamomum camphora</i>	1,2
<i>Brachychiton populneum</i>	1,2
<i>Washingtonia robusta</i>	1,1
<i>Schinus terebinthifolius</i>	1,0
<i>Schinus molle</i>	0,9
<i>Pyrus calleryana</i>	0,8
% of total population	63,6
% tree match (nach Art)	15,6
% tree match (nach Gattung)	40,7

Honolulu, HI	
Measured species	% Pop
<i>Cassia x nealiae</i>	7,6
<i>Tabebuia heterophylla</i>	6,9
<i>Cocos nucifera</i>	6,1
<i>Filicium decipiens</i>	4,1
<i>Veitchia merrillii</i>	3,9
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	3,7
<i>Samanea saman</i>	3,1
<i>Tabebuia aurea</i>	3,0
<i>Conocarpus erectus</i> var. <i>argenteus</i>	2,7
<i>Delonix regia</i>	2,6
<i>Elaeodendron orientale</i>	2,6
<i>Ilex paraguariensis</i>	1,9
<i>Melaleuca quinquenervia</i>	1,7
<i>Tabebuia ochracea</i> ssp. <i>neochrysantha</i>	1,5
<i>Calophyllum inophyllum</i>	1,4
<i>Cordia subcordata</i>	1,1
<i>Casuarina equisetifolia</i>	1,0
<i>Bauhinia x blakeana</i>	0,9
<i>Citharexylum spinosum</i>	0,9
<i>Ficus benjamina</i>	0,7
<i>Swietenia mahogani</i>	0,6
% of total population	57,9
% tree match (nach Art)	0,0
% tree match (nach Gattung)	0,0

Orlando, FL	
Measured species	% Pop
<i>Quercus virginiana</i>	25,1
<i>Lagerstroemia indica</i>	22,0
<i>Quercus laurifolia</i>	15,6
<i>Sabal palmetto</i>	4,2
<i>Ulmus parvifolia</i>	3,8
<i>Magnolia grandiflora</i>	2,9
<i>Acer rubrum</i>	2,7
<i>Quercus shumardii</i>	2,1
<i>Washingtonia robusta</i>	2,0
<i>Pinus elliotii</i>	1,4
<i>Cinnamomum camphora</i>	1,3
<i>Syagrus romanzoffiana</i>	1,2
<i>Prunus caroliniana</i>	0,8
<i>Platyclusus orientalis</i>	0,7
<i>Triadica sebifera</i>	0,6
<i>Koelreuteria elegans</i>	0,5
<i>Eriobotrya japonica</i>	0,4
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,4
<i>Platanus occidentalis</i>	0,4
<i>Juniperus virginiana</i> var. <i>silicicola</i>	0,3
% of total population	88,2
% tree match (nach Art)	6,0
% tree match (nach Gattung)	55,7

Charleston, SC	
Measured species	% Pop
<i>Quercus virginiana</i>	23,7
<i>Lagerstroemia indica</i>	19,9
<i>Sabal palmetto</i>	19,5
<i>Quercus nigra</i>	5,1
<i>Quercus laurifolia</i>	3,9
<i>Cornus florida</i>	2,3
<i>Pinus taeda</i>	1,8
<i>Butia capitata</i>	1,5
<i>Acer rubrum</i>	1,0
<i>Magnolia grandiflora</i>	0,8
<i>Gleditsia triacanthos</i>	0,8
<i>Quercus phellos</i>	0,8
<i>Ilex opaca</i>	0,7
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,7
<i>Juniperus virginiana</i>	0,6
<i>Celtis laevigata</i>	0,6
<i>Platanus occidentalis</i>	0,5
<i>Pyrus calleryana</i>	0,5
<i>Carya illinoensis</i>	0,3
% of total population	84,9
% tree match (nach Art)	3,8
% tree match (nach Gattung)	39,6

Charlotte, NC	
Measured species	% Pop
<i>Quercus phellos</i>	16,7
<i>Lagerstroemia spp.</i>	14,1
<i>Acer rubrum</i>	6,7
<i>Cornus florida</i>	5,3
<i>Acer saccharum</i>	3,5
<i>Prunus spp.</i>	2,9
<i>Juniperus virginiana</i>	2,4
<i>Acer saccharinum</i>	2,4
<i>Liquidambar styraciflua</i>	2,2
<i>Pinus echinata</i>	1,3
<i>Malus spp.</i>	1,2
<i>Ilex opaca</i>	1,1
<i>Pinus taeda</i>	1,1
<i>Pyrus calleryana</i>	1,0
<i>Prunus yedoensis</i>	1,0
<i>Quercus nigra</i>	1,0
<i>Quercus alba</i>	0,9
<i>Magnolia grandiflora</i>	0,9
<i>Quercus rubra</i>	0,9
<i>Betula nigra</i>	0,9
<i>Ulmus alata</i>	0,3
% of total population	67,9
% tree match (nach Art)	19,1
% tree match (nach Gattung)	45,0

Indianapolis, IN	
Measured species	% Pop
<i>Acer saccharinum</i>	13,9
<i>Acer saccharum</i>	6,0
<i>Celtis occidentalis</i>	5,1
<i>Malus spp.</i>	4,9
<i>Fraxinus americana</i>	4,9
<i>Ulmus pumila</i>	3,4
<i>Acer platanoides</i>	2,8
<i>Pinus strobus</i>	2,7
<i>Acer rubrum</i>	2,7
<i>Morus spp.</i>	2,6
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	2,4
<i>Picea pungens</i>	2,3
<i>Cercis canadensis</i>	1,7
<i>Quercus rubra</i>	1,7
<i>Gleditsia triacanthos</i>	1,6
<i>Populus deltoides</i>	1,6
<i>Juglans nigra</i>	1,3
<i>Pyrus calleryana</i>	1,2
<i>Catalpa speciosa</i>	1,0
<i>Tilia cordata</i>	0,9
% of total population	64,5
% tree match (nach Art)	33,6
% tree match (nach Gattung)	56,7

Queens, NY	
Measured species	% Pop
<i>Acer platanoides</i>	26,9
<i>Platanus hybrida</i>	15,1
<i>Quercus palustris</i>	9,3
<i>Gleditsia triacanthos</i>	6,1
<i>Tilia cordata</i>	5,9
<i>Acer saccharinum</i>	5,7
<i>Pyrus calleryana</i>	5,5
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	4,3
<i>Acer rubrum</i>	2,0
<i>Ginkgo biloba</i>	2,0
<i>Acer saccharum</i>	1,8
<i>Zelkova serrata</i>	1,4
<i>Quercus rubra</i>	1,0
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,8
<i>Tilia tomentosa</i>	0,7
<i>Ulmus americana</i>	0,7
<i>Prunus serrulata</i>	0,5
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,2
<i>Quercus phellos</i>	0,2
<i>Malus spp.</i>	0,1
<i>Pinus strobus</i>	0,1
% of total population	90,5
% tree match (nach Art)	66,9
% tree match (nach Gattung)	89,1

Minneapolis, MN	
Measured species	% Pop
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	20,0
<i>Ulmus americana</i>	14,0
<i>Acer platanoides</i>	12,5
<i>Acer saccharum</i>	10,9
<i>Tilia cordata</i>	10,4
<i>Celtis occidentalis</i>	6,4
<i>Gleditsia triacanthos</i>	6,4
<i>Tilia americana</i>	5,2
<i>Ginkgo biloba</i>	2,3
<i>Malus spp.</i>	1,8
<i>Acer rubrum</i>	1,8
<i>Quercus palustris</i>	1,6
<i>Acer saccharinum</i>	0,8
<i>Fraxinus americana</i>	0,3
<i>Quercus rubra</i>	0,2
<i>Acer negundo</i>	0,2
<i>Ulmus pumila</i>	0,2
% of total population	95,1
% tree match (nach Art)	43,2
% tree match (nach Gattung)	88,7

Quelle: verändert nach MCPHERSON (2010)

Tabelle 8.2: Species Codes der Baumarten der Referenzstadt und die Zuordnung von Assigned Species Values nach Baumtyp zur Verknüpfung mit den zugrunde liegenden Wachstumskurven

SpeciesCode	Wissenschaftlicher Name	Baumtyp	Assigned Species Value
ABBA	<i>Abies balsamea</i>	CEL	CEL OTHER
ABCO	<i>Abies concolor</i>	CEL	PIPU
AC	<i>Acer species</i>	BDL	FRPE
ACFR	<i>Acer x freemanii</i>	BDL	FRPE
ACGI	<i>Acer ginnala</i>	BDS	BDS OTHER
ACGL	<i>Acer glabrum</i>	BDL	FRPE
ACNE	<i>Acer negundo</i>	BDL	FRPE
ACPL	<i>Acer platanoides</i>	BDL	ACPL
ACRU	<i>Acer rubrum</i>	BDL	BDL OTHER
ACSA1	<i>Acer saccharinum</i>	BDL	ACSA1
ACSA2	<i>Acer saccharum</i>	BDL	ACSA2
ACTA	<i>Acer tataricum</i>	BDS	BDS OTHER
AEGL	<i>Aesculus glabra</i>	BDM	ACPL
AEHI	<i>Aesculus hippocastanum</i>	BDM	ACPL
AM	<i>Amelanchier species</i>	BDS	MA2
BDL OTHER	<i>Broadleaf Deciduous Large</i>	BDL	FRPE
BDM OTHER	<i>Broadleaf Deciduous Medium</i>	BDM	ACPL
BDS OTHER	<i>Broadleaf Deciduous Small</i>	BDS	MA2
BE	<i>Betula species</i>	BDM	ACPL
BEL OTHER	<i>Broadleaf Evergreen Large</i>	BEL	QUNI
BEM OTHER	<i>Broadleaf Evergreen Medium</i>	BEM	MAGR
BENI	<i>Betula nigra</i>	BDL	BDL OTHER
BEPA	<i>Betula papyrifera</i>	BDL	BDL OTHER
BEPE	<i>Betula pendula</i>	BDL	BDL OTHER
BES OTHER	<i>Broadleaf Evergreen Small</i>	BES	ILOP
CA1	<i>Carya species</i>	BDL	FRPE
CA3	<i>Catalpa species</i>	BDL	FRPE
CABE	<i>Carpinus betulus</i>	BDM	ACPL
CAOV	<i>Carya ovata</i>	BDL	FRPE
CASP	<i>Catalpa speciosa</i>	BDL	BDL OTHER
CECA	<i>Cercis canadensis</i>	BDS	MA2
CEL OTHER	<i>Conifer Evergreen Large</i>	CEL	PIPU
CEM OTHER	<i>Conifer Evergreen Medium</i>	CEM	PINI
CEOC	<i>Celtis occidentalis</i>	BDL	CEOC
CES OTHER	<i>Conifer Evergreen Small</i>	CES	PICO5
CO1	<i>Cornus species</i>	BDS	MA2
COCO2	<i>Corylus colurna</i>	BDM	ACPL
CR	<i>Crataegus species</i>	BDS	MA2
ELAN	<i>Elaeagnus angustifolia</i>	BDS	MA2
FA	<i>Fagus species</i>	BDL	FRPE
FASY	<i>Fagus sylvatica</i>	BDL	FRPE
FR	<i>Fraxinus species</i>	BDL	FRPE
FRAM	<i>Fraxinus americana</i>	BDL	FRAM
FRPE	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	BDL	FRPE
GIBI	<i>Ginkgo biloba</i>	BDL	FRPE
GLTR	<i>Gleditsia triacanthos</i>	BDL	GLTR
GYDI	<i>Gymnocladus dioicus</i>	BDL	GYDI
ILOP	<i>Ilex opaca</i>	BES	ILOP
JU	<i>Juniperus species</i>	CES	PICO5
JUCI	<i>Juglans cinerea</i>	BDL	FRPE
JUCO1	<i>Juniperus communis</i>	CES	PICO5
JUMO	<i>Juniperus monosperma</i>	CES	PICO5
JUNI	<i>Juglans nigra</i>	BDL	FRPE
JUSC	<i>Juniperus scopulorum</i>	CES	PICO5
JUVI	<i>Juniperus virginiana</i>	CES	PICO5
LIST	<i>Liquidambar styraciflua</i>	BDL	FRPE
LITU	<i>Liriodendron tulipifera</i>	BDL	FRPE
LOSP	<i>Lonicera species</i>	BDS	MA2
MA2	<i>Malus species</i>	BDS	MA2
MAGR	<i>Magnolia grandiflora</i>	BEM	MAGR
MAPU	<i>Malus pumila</i>	BDM	BDM OTHER
MEGL	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	BDL	FRPE
MORU	<i>Morus rubra</i>	BDL	BDL OTHER
PI1	<i>Picea species</i>	CEL	PIPU
PI2	<i>Pinus species</i>	CEM	CEM OTHER
PIAB	<i>Picea abies</i>	CEL	CEL OTHER
PICE	<i>Pinus cembroides</i>	CES	PICO5
PICO	<i>Pinus contorta</i>	CEM	PINI
PICO5	<i>Pinus contorta 'bolanderi'</i>	CES	PICO5
PIED	<i>Pinus edulis</i>	CES	PICO5
PIEN	<i>Picea engelmannii</i>	CEL	PIPU
PIFL	<i>Pinus flexilis</i>	CEL	CEL OTHER
PIGL1	<i>Picea glauca</i>	CEL	PIPU
PIMA	<i>Picea mariana</i>	CEL	PIPU
PIMU	<i>Pinus mugo</i>	CES	PICO5
PINI	<i>Pinus nigra</i>	CEM	PINI
PIPO	<i>Pinus ponderosa</i>	CEL	PIPO
PIPU	<i>Picea pungens</i>	CEL	PIPU
PIRU	<i>Picea rubens</i>	CEL	PIPU
PIST	<i>Pinus strobus</i>	CEL	CEL OTHER
PIST2	<i>Pinus strobiformis</i>	CES	PICO5
PISY	<i>Pinus sylvestris</i>	CEM	PINI

Fortsetzung

SpeciesCode	Wissenschaftlicher Name	Baumtyp	Assigned Species Value
PO	<i>Populus species</i>	BDL	FRPE
POAC5	<i>Populus x acuminata</i>	BDL	FRPE
POAL	<i>Populus alba</i>	BDL	FRPE
POAN	<i>Populus angustifolia</i>	BDL	FRPE
POBA	<i>Populus balsamifera</i>	BDL	BDL OTHER
POCA2	<i>Populus x canadensis</i>	BDL	FRPE
POFR	<i>Populus fremontii</i>	BDL	BDL OTHER
PONI	<i>Populus nigra BDL</i>	BDL	OTHER
POSA	<i>Populus sargentii</i>	BDL	POSA
POTR1	<i>Populus tremuloides</i>	BDM	ACPL
PR	<i>Prunus species</i>	BDS	PR
PRCE	<i>Prunus cerasifera</i>	BDS	BDS OTHER
PRPA	<i>Prunus padus</i>	BDS	MA2
PRVI	<i>Prunus virginiana</i>	BDS	MA2
PSME	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	CEL	PIPU
PY	<i>Pyrus species</i>	BDM	PY
QU	<i>Quercus species</i>	BDL	FRPE
QUBI	<i>Quercus bicolor</i>	BDL	FRPE
QUCO	<i>Quercus coccinea</i>	BDL	FRPE
QUMA1	<i>Quercus macrocarpa</i>	BDL	QUMA1
QUMU	<i>Quercus muehlenbergii</i>	BDL	FRPE
QUNI	<i>Quercus nigra</i>	BDL	QUNI
QUPA	<i>Quercus palustris</i>	BDL	FRPE
QURO	<i>Quercus robur</i>	BDL	FRPE
QURU	<i>Quercus rubra</i>	BDL	FRPE
QUSH	<i>Quercus shumardii</i>	BDL	FRPE
RHCA	<i>Rhamnus cathartica</i>	BDS	BDS OTHER
RHGL	<i>Rhus glabra</i>	BDS	BDS OTHER
RHSP	<i>Rhus species</i>	BDS	MA2
RHTY	<i>Rhus typhina</i>	BDS	MA2
ROPS	<i>Robinia pseudoacacia</i>	BDL	FRPE
SA	<i>Salix species</i>	BDL	FRPE
SAAL4	<i>Salix alba</i>	BDL	FRPE
SADI	<i>Salix discolor</i>	BDS	MA2
SAFR	<i>Salix fragilis</i>	BDL	FRPE
SO	<i>Sorbus species</i>	BDS	MA2
SOAM	<i>Sorbus americana</i>	BDS	BDS OTHER
SOAU	<i>Sorbus aucuparia</i>	BDS	BDS OTHER
SYRE	<i>Syringa reticulata</i>	BDS	MA2
SYSP	<i>Syringa species</i>	BDS	MA2
TH9	<i>Thuja species</i>	CEL	PIPU
THPL	<i>Thuja plicata</i>	CEL	PIPU
TI	<i>Tilia species</i>	BDL	FRPE
TIAM	<i>Tilia americana</i>	BDL	TIAM
TICO	<i>Tilia cordata</i>	BDL	TICO
ULAM	<i>Ulmus americana</i>	BDL	ULAM
ULPA	<i>Ulmus parvifolia</i>	BDL	BDL OTHER
ULPU	<i>Ulmus pumila</i>	BDL	ULPU
ULS	<i>Ulmus species</i>	BDL	FRPE
WISI	<i>Wisteria sinensis</i>	BDS	MA2

Quelle: *i-Tree Streets*


```

// Hinzufuegen der oben definierten Layer
map.addLayers([Baeume, gmap, gsat, ghyb]);

// Kartenkontrollelemente hinzufuegen
map.addControl(new OpenLayers.Control.LayerSwitcher());
map.setCenter(new OpenLayers.LonLat(12.373, 51.35), 11);

// den Optionen-Button verbinden
var options = document.getElementById("options");

// GetFeatureInfo
map.events.register('click', map, function (e) {

document.getElementById('nodelist').innerHTML = "Lade... bitte warten...";
var params = {
  REQUEST: "GetFeatureInfo",
  EXCEPTIONS: "application/vnd.ogc.se_xml",
  BBOX: map.getExtent().toBBOX(),
  SERVICE: "WMS",
  VERSION: "1.1.1",
  X: e.xy.x,
  Y: e.xy.y,
  INFO_FORMAT: 'text/html',
  QUERY_LAYERS: map.layers[0].params.LAYERS,
  FEATURE_COUNT: 50,
  Layers: 'nunc:strassenbaumkataster_for_google',
  WIDTH: map.size.w,
  HEIGHT: map.size.h,
  format: format,
  styles: map.layers[0].params.STYLES,
  srs: map.layers[0].params.SRS};
// merge filters
if(map.layers[0].params.CQL_FILTER != null) {
  params.cql_filter = map.layers[0].params.CQL_FILTER;
}
if(map.layers[0].params.FILTER != null) {
  params.filter = map.layers[0].params.FILTER;
}
if(map.layers[0].params.FEATUREID) {
  params.featureid = map.layers[0].params.FEATUREID;
}

OpenLayers.loadURL("http://85.214.60.79:8080/geoserver/nunc/wms", params, this, setHTML, setHTML);
OpenLayers.Event.stop(e);
});

// Setzen von HTML zur Uebergabe an das nodelist Element (Popup)
function setHTML(response){
  document.getElementById('nodelist').innerHTML = response.responseText;
};

// Setzen der Abfragefilter
function updateFilter(){

  document.getElementById("nodelist").innerHTML="";
  document.getElementById("content").style.display="none";
  document.getElementById("mapcontent").style.position="static";
  document.getElementById("mapcontent").style.float="right";
  document.getElementById("mapcontent").style.paddingTop="50px";
  document.getElementById("mapcontent").style.paddingRight="100px";
  document.getElementById("mapcontent").style.paddingBottom="0px";
  document.getElementById("mapcontent").style.paddingLeft="50px";
  document.getElementById("mapcontent").style.backgroundImage="url(images/bg05.jpg) no-repeat right top";

  var filterType = 'cql';

  var art = document.getElementById('filter_art').value;
  art = art.toLowerCase();

  var ort1 = document.getElementById('filter_ort1').value;
  ort1 = ort1.toLowerCase();

  var ort2 = document.getElementById('filter_ort2').value;
  ort2 = ort2.toLowerCase();

```

```

| | | | | if(art == "" && ort1 == "" && ort2 == ""){
| | | | | alert("Bitte geben Sie einen Suchbegriff ein!")
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art != "" && ort1 == "" && ort2 == ""){
| | | | | | var filter = "strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
| | | | | | + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%" + art + "%'";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art == "" && ort1 != "" && ort2 == ""){
| | | | | | var filter = "strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%'";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art == "" && ort1 == "" && ort2 != ""){
| | | | | | var filter = "strToLowerCase(ort) like '%" + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%'";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art != "" && ort1 != "" && ort2 == ""){
| | | | | | var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
| | | | | | + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
| | | | | | + art + "%') AND (strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%')";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art == "" && ort1 != "" && ort2 != ""){
| | | | | | var filter = "(strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%"
| | | | | | + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%')";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art != "" && ort1 == "" && ort2 != ""){
| | | | | | var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
| | | | | | + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
| | | | | | + art + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%" + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%')";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | if(art != "" && ort1 != "" && ort2 != ""){
| | | | | | var filter = "(strToLowerCase(baumart_de) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(baumart_wi) like '%"
| | | | | | + art + "%' OR strToLowerCase(gattung) like '%" + art + "%' OR strToLowerCase(familie) like '%"
| | | | | | + art + "%') AND (strToLowerCase(strasse) like '%" + ort1 + "%') AND (strToLowerCase(ort) like '%"
| | | | | | + ort2 + "%' OR strToLowerCase(ortsteil) like '%" + ort2 + "%')";
| | | | | }
| | | | |
| | | | | // Zuruecksetzen aller Filter
| | | | | var filterParams = {
| | | | | | filter: null,
| | | | | | cql_filter: null,
| | | | | | featureId: null
| | | | | };
| | | | | if (OpenLayers.String.trim(filter) != "") {
| | | | | | if (filterType == "cql")
| | | | | | | | filterParams["cql_filter"] = filter;
| | | | | | if (filterType == "ogc")
| | | | | | | | filterParams["filter"] = filter;
| | | | | | if (filterType == "fid")
| | | | | | | | filterParams["featureId"] = filter;
| | | | | }
| | | | | // Zusammenfuegen der neuen Filterdefinitionen
| | | | | mergeNewParams(filterParams);
| | | | |
| | | | | map.setCenter(new OpenLayers.LonLat(12.373, 51.35), 11);
| | | | |
| | | | | // PHP außerhalb des WMS-Standard
| | | | | // Teil 2 - Abfrage und Ermittlung der Oekosystemdienstleistungen der Auswahl
| | | | | http.abort();
| | | | | http.open("GET", "ergebnis.php?art=" + art + "&ort1=" + ort1 + "&ort2=" + ort2, true);
| | | | | http.onreadystatechange=function() {
| | | | | | if(http.readyState == 4) {
| | | | | | | | document.getElementById('nodelist1').innerHTML = http.responseText;
| | | | | | | }
| | | | | | }
| | | | | | http.send(null);
| | | | | }
| | | | |
| | | | | function mergeNewParams(params){
| | | | | | Baeume.mergeNewParams(params);
| | | | | }
| | | | |
| | | | | function updatelinks(divcon, eingabe){
| | | | | | document.getElementById(divcon).value=eingabe;
| | | | | }
| | | | |
| | | | | </script>
| | | | | </head>

```


Tabelle 8.3: Erbrachte Ökosystemdienstleistungen pro Jahr nach Ortsteil

Ortsteil	Fläche (ha)*	Anzahl Bäume	Bindung CO ₂ /a (t)	Bindung Luft- schadstoffe/a (kg)	Verminderung Ober- flächenabfluss/a (m ³)	Kohlenstoff- vorrat/ha (t)
Althen-Kleinpösna	930	528	17,57	36,19	1.179,86	0,08
Altlindenau	240	400	17,25	38,90	1.103,87	0,42
Anger-Crottendorf	190	236	19,45	43,74	1.234,79	0,61
Baalsdorf	390	441	10,43	16,03	719,10	0,10
Böhlitz-Ehrenberg	860	789	38,97	78,47	2.442,90	0,23
Burghausen-Rückmarsdorf	710	908	58,77	148,14	3.583,76	0,46
Connewitz	720	1159	56,30	112,99	3.522,67	0,38
Dölitze-Dösen	420	236	21,30	63,21	1.472,47	0,37
Engelsdorf	780	1071	65,90	172,00	4.462,91	0,55
Eutritzsch	450	2710	131,69	250,12	7.950,34	1,33
Gohlis-Mitte	130	712	34,98	61,22	2.169,78	1,20
Gohlis-Nord	210	513	37,45	61,79	2.207,09	0,65
Gohlis-Süd	200	240	6,36	15,51	443,86	0,22
Großzschocher	1550	758	34,29	79,90	2.005,10	0,11
Grünau-Mitte	120	1145	25,94	7,50	1.358,23	0,42
Grünau-Nord	100	1032	22,02	8,48	1.084,13	0,36
Grünau-Ost	110	1043	53,87	82,87	3.131,45	1,83
Grünau-Siedlung	160	108	3,59	5,24	225,67	0,08
Hartmannsdorf-Knautnaundorf	1590	314	8,42	12,92	571,56	0,02
Heiterblick	370	1163	15,45	0,11	883,89	0,05
Holzhausen	1280	1594	77,21	195,42	4.855,23	0,30
Kleinzschocher	310	354	14,48	19,54	841,00	0,17
Knautkleeberg-Knauthain	840	499	17,20	35,91	1.077,59	0,10
Lausen-Grünau	370	1407	26,14	-1,05	1.303,85	0,11
Leutzsch	450	861	70,18	169,61	4.632,53	0,91
Liebertwolkwitz	930	710	34,13	67,82	2.031,34	0,16
Lindenau	100	355	11,82	15,02	700,47	0,43
Lindenthal	1280	1083	45,02	134,63	3.078,94	0,22
Lößnig	170	625	20,07	19,93	1.153,93	0,41
Lützschena-Stahmeln	1690	1881	81,23	230,60	5.488,25	0,34
Marienbrunn	130	431	27,03	50,93	1.893,61	1,21
Meusdorf	190	178	21,62	70,24	1.529,51	0,87
Miltitz	300	269	22,40	54,59	1.472,61	0,44
Mockau-Nord	460	1114	33,91	39,58	1.973,62	0,27
Mockau-Süd	120	329	15,48	38,35	1.055,26	0,80
Möckern	480	492	23,11	69,16	1.778,94	0,28
Mölkau	530	451	29,02	89,76	2.048,55	0,44
Neulindenau	250	639	31,49	66,22	1.905,75	0,58
Neustadt-Neuschönefeld	80	836	14,62	-0,46	843,85	0,42
Paunsdorf	370	2031	34,16	31,67	1.691,46	0,24
Plagwitz	160	573	21,21	40,15	1.369,84	0,73
Plaußig-Portitz	780	2028	40,94	42,22	1.983,46	0,15
Probstheida	480	1012	68,08	139,29	4.159,01	0,66
Reudnitz-Thonberg	210	1491	66,55	119,88	4.005,82	1,40
Schleußig	220	890	73,61	180,66	4.483,08	1,81
Schönau	310	762	24,40	32,30	1.399,94	0,28
Schönefeld-Abtnaundorf	290	760	36,03	70,12	2.239,68	0,55
Schönefeld-Ost	330	1630	39,47	24,69	2.151,45	0,30
Seehausen	1840	2111	58,43	109,94	3.988,21	0,13
Sellerhausen-Stünz	330	607	34,73	80,04	2.159,71	0,60
Stötteritz	360	1760	141,47	416,57	8.945,56	2,64
Südvorstadt	260	1239	49,46	102,79	2.945,71	0,95
Thekla	700	1086	38,42	47,86	2.224,48	0,21
Volkmarsdorf	110	666	18,86	15,64	1.059,20	0,55
Wahren	460	432	28,39	63,91	1.797,30	0,33
Wiederitzsch	980	2133	63,61	105,22	3.837,55	0,26
Zentrum	80	279	5,34	2,77	372,86	0,16
Zentrum-Nord	130	915	46,20	79,24	2.798,06	1,55
Zentrum-Nordwest	390	1176	59,74	116,11	3.705,01	0,71
Zentrum-Ost	170	421	13,05	21,77	795,05	0,33
Zentrum-Süd	170	1324	114,82	367,97	7.452,01	5,01
Zentrum-Südost	300	1715	78,90	124,95	4.764,90	1,08
Zentrum-West	150	1255	102,21	259,04	6.391,20	3,98

Quelle: eigene Berechnung; *Flächen nach AMT FÜR STATISTIK UND WAHLEN (2010)

Tabelle 8.4: Gebundene Luftschadstoffe und freigesetzte flüchtige organische Verbindungen pro Jahr nach Ortsteil

Ortsteil	Bindung O ₃ /a (kg)	Bindung NO ₂ /a (kg)	Bindung PM ₁₀ /a (kg)	Bindung SO ₂ /a (kg)	Freisetzung BVOC/a* (kg)	Bilanz/Bindung Luftschadstoffe/a (kg)
Althen-Kleinpösna	25,04	6,26	6,48	2,86	-4,44	36,19
Altlindenau	26,41	6,52	6,71	2,85	-3,59	38,90
Anger-Crottendorf	31,21	7,72	8,08	3,40	-6,66	43,74
Baalsdorf	12,07	2,96	3,15	1,37	-3,52	16,03
Böhlitz-Ehrenberg	56,52	13,97	14,75	6,24	-13,00	78,47
Burghausen-Rückmarsdorf	94,11	23,25	23,90	10,20	-3,31	148,14
Connewitz	75,29	18,66	19,59	8,09	-8,63	112,99
Döhlitz-Dösen	42,24	10,41	10,68	4,61	-4,73	63,21
Engelsdorf	121,94	30,11	31,34	13,42	-24,81	172,00
Eutritzsch	164,46	40,60	42,65	17,73	-15,31	250,12
Gohlis-Mitte	41,21	10,17	10,82	4,45	-5,43	61,22
Gohlis-Nord	38,88	9,58	10,52	4,21	-1,39	61,79
Gohlis-Süd	11,09	2,76	2,76	1,19	-2,28	15,51
Großzschocher	51,76	12,79	13,34	5,70	-3,69	79,90
Grünau-Mitte	8,68	2,10	2,49	0,95	-6,71	7,50
Grünau-Nord	6,74	1,63	1,98	0,72	-2,59	8,48
Grünau-Ost	54,77	13,49	14,54	5,91	-5,85	82,87
Grünau-Siedlung	4,00	1,01	1,07	0,46	-1,30	5,24
Hartmannsdorf-Knautnaundorf	9,86	2,46	2,67	1,11	-3,18	12,92
Heiterblick	3,89	1,02	1,13	0,45	-6,38	0,11
Holzhausen	128,67	31,86	33,31	14,64	-13,06	195,42
Kleinzschocher	13,06	3,20	3,47	1,40	-1,60	19,54
Knautkleeberg-Knauthain	25,78	6,42	6,63	3,00	-5,92	35,91
Lausen-Grünau	5,30	1,29	1,48	0,57	-9,69	-1,05
Leutzsch	117,18	28,88	30,46	12,84	-19,74	169,61
Liebertwolkwitz	46,26	11,60	12,35	5,21	-7,60	67,82
Lindenau	10,68	2,61	2,84	1,14	-2,25	15,02
Lindenthal	87,37	21,90	22,41	9,74	-6,80	134,63
Lößnig	16,04	3,93	4,30	1,74	-6,07	19,93
Lützschena-Stahmeln	153,42	37,97	38,28	16,61	-15,68	230,60
Marienbrunn	40,79	10,01	10,85	4,52	-15,25	50,93
Meusdorf	47,59	11,73	12,07	5,20	-6,35	70,24
Miltitz	37,98	9,36	9,86	4,15	-6,77	54,59
Mockau-Nord	26,51	6,48	6,86	2,85	-3,12	39,58
Mockau-Süd	26,51	6,52	6,75	2,94	-4,37	38,35
Möckern	49,79	13,15	13,99	5,88	-13,65	69,16
Mölkau	60,13	14,83	14,94	6,55	-6,69	89,76
Neulindenau	42,94	10,59	11,15	4,67	-3,13	66,22
Neustadt-Neuschönefeld	6,03	1,43	1,70	0,65	-10,27	-0,46
Paunsdorf	21,22	5,24	5,49	2,29	-2,58	31,67
Plagwitz	29,78	7,36	7,69	3,24	-7,92	40,15
Plaußig-Portitz	33,06	8,23	8,78	3,87	-11,72	42,22
Probstheida	90,78	22,41	23,72	9,78	-7,41	139,29
Reudnitz-Thonberg	80,22	19,79	20,81	8,69	-9,63	119,88
Schleußig	115,09	28,43	29,38	12,44	-4,69	180,66
Schönau	20,98	5,15	5,47	2,24	-1,54	32,30
Schönefeld-Abtnaundorf	46,38	11,54	12,23	5,04	-5,07	70,12
Schönefeld-Ost	21,74	5,30	5,98	2,37	-10,71	24,69
Seehausen	81,66	20,28	21,13	9,54	-22,67	109,94
Sellerhausen-Stünz	52,19	12,88	13,29	5,65	-3,96	80,04
Stötteritz	263,17	65,02	66,12	28,51	-6,24	416,57
Südvorstadt	66,39	16,43	16,93	7,16	-4,12	102,79
Thekla	39,19	9,63	10,28	4,35	-15,59	47,86
Volkmarsdorf	14,52	3,55	3,92	1,57	-7,92	15,64
Wahren	43,03	10,60	11,17	4,71	-5,60	63,91
Wiederitzsch	72,32	17,94	18,71	7,97	-11,71	105,22
Zentrum	3,65	0,97	1,07	0,36	-3,28	2,77
Zentrum-Nord	52,82	12,99	13,77	5,66	-6,00	79,24
Zentrum-Nordwest	76,08	18,86	19,92	8,17	-6,92	116,11
Zentrum-Ost	14,72	3,64	3,85	1,60	-2,05	21,77
Zentrum-Süd	230,72	56,98	57,27	24,96	-1,96	367,97
Zentrum-Südost	86,54	21,30	22,92	9,44	-15,25	124,95
Zentrum-West	166,21	41,08	42,23	17,91	-8,39	259,04
	3.544,66	876,82	914,48	387,74	-467,74	5.255,95

Quelle: eigene Berechnung; *BVOC = Biogenic Volatile Organic Compounds = flüchtige organische Verbindungen

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Master Thesis selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in dieser noch ähnlicher Form oder auszugsweise einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Leipzig, den 18. Dezember 2011

Jens Weinert