

Ökosystemdienstleistungen als ökonomische Strategie?

i-Tree: ein Instrument für die Wertermittlung von Stadtbäumen

Bachelorarbeit

von

Géraldine Wälchli

Bachelorstudiengang 2008
Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Abgabetermin: 16. Februar 2012

Fachkorrektoren:

Baumann, Nathalie (MSc UNI Basel, Biogeographin)
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Campus Grüental, 8820 Wädenswil

Prof. Schöffel, Rainer
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Campus Grüental, 8820 Wädenswil

Zusammenfassung

Mit der fortschreitenden Verstädterung und Urbanisierung wird die Umsetzung von nachhaltigen Planungskonzepten global zu einer der wichtigsten Aufgaben unserer Zeit. Vor dem Hintergrund heutiger Herausforderungen gewinnen die vielfältigen Funktionen von Pflanzen immer mehr an Bedeutung. Besonders die CO₂-Aufnahme und die Schadstofffiltrierung stellen im Kontext des Klimawandels und der Luftverschmutzung zwei wesentliche Leistungen dar. Obwohl die Nutzen von Pflanzen unser Wohlergehen, sowie unsere Lebensqualität massgeblich mitbestimmen, werden Ökosystemleistungen von politischen und wirtschaftlichen Prozessen zumeist ausgeklammert. Dies führt dazu, dass der Natur im Allgemeinen kein angemessener Wert zugeschrieben wird und aufgrund ökonomischer Interessen ökologische Erfordernisse hintergangen werden. Die monetäre Wertermittlung von Ökosystemdienstleistungen stellt eine mögliche Strategie dar, diesem Umstand entgegenzuwirken.

I-Tree ist ein Computermodell, das die Funktionen und Leistungen von urbanen Gehölzen beziffert und einen monetären Wert daraus ableitet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf Baumalleen und fünf Parkbäume in Zürich erfasst und mit i-Tree quantifiziert. Den Berechnungen von i-Tree Eco zufolge, speicherten die 130 untersuchten Stadtbäume zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme über 45 Tonnen Kohlenstoff. Rund 1.7 Tonnen wurden im selben Jahr durch CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre aufgenommen. Dazu kamen rund 36 kg Schadstoffe, die von den Bäumen gefiltert wurden. Je nach Programmapplikation, werden jedoch andere Zahlen gewonnen. Wie die Anwendung von i-Tree Streets darlegt, sind die Methode und die Berechnungsmodelle für die Resultate und für die Endaussagen entscheidend. Es wird der Frage nachgegangen, wie die Methode von i-Tree zu beurteilen ist und ob eine Anwendung in der Schweiz oder Europa denkbar ist. Es werden mögliche Anpassungsvorschläge dargelegt, die eine globale Nutzung des Modells erleichtern könnten.

Bewertungsmodelle wie i-Tree stellen sektorielle Lösungsansätze dar, die zur Bewältigung der heutigen Herausforderungen beitragen. Mit der ökonomischen Argumentationsbasis lassen sich politische und wirtschaftliche Entwicklungen beeinflussen und nachhaltige Planungskonzepte lancieren und festigen.

Abstract

With the continuing urbanization, the implementation of sustainable design concepts is globally one of the most important tasks of our time. Against the backdrop of today's challenges, the diverse functions of plants gain growing importance. Especially the CO₂ absorption and the filtration of pollutants represent two main benefits in the context of climate change and air pollution. The benefits of plants - although largely responsible for our well-being and for the quality of urban life - are mostly excluded from political and economic processes. This means that the value of nature is not attributed appropriately and that economic interests are generally favored over environmental needs. The monetary valuation of ecosystem services represents a possible strategy to counteract this situation.

i-Tree is a computer model that estimates the features and benefits of urban trees and derives a monetary value of it. Within this work five rows of trees and five park trees were recorded in Zurich and quantified with i-Tree. According to the calculations of i-Tree Eco, the 130 examined trees stored over 45 tons of carbon at the time of the inventory. Approximately 1.7 tons were sequestered in the same year by separating CO₂ from the atmosphere. In addition, around 36 kg of pollutants were filtered by the trees. Depending on the program application, however, different numbers are derived. As the use of i-Tree Streets shows, the method and calculation models are crucial for the results and the statements. It is questioned how the method of i-Tree is to judge and whether an application in Switzerland or Europe is feasible. Possible modification suggestions that could facilitate global use of the model are discussed.

Valuation models such as i-Tree represent sectoral approaches that contribute to addressing today's challenges. The economic argument can affect political and economic developments and launch and strengthen sustainable design concepts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Abstract	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	6
1.1 Aufbau	7
2 Ökonomische Prinzipien: ein Überblick	9
2.1 Die Potenziale der Ökonomie.....	9
2.2 Die Schwächen der Ökonomie	10
3 Ecosystem Services: die Dienstleistungen der Ökosysteme	12
3.1 Überblick über die Ökosystemdienstleistungen	13
3.2 Monetäre Wertermittlung	14
3.2.1 Ökonomische Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte	17
3.2.1.1 Schadenskosten.....	18
3.2.1.2 Vermeidungskosten.....	20
3.2.1.3 Gegenüberstellung des Schadens- und Vermeidungskostenansatzes.....	22
3.2.2 Ökonomische Ansätze im Kontext der Luftverschmutzung	23
3.3 The Economics of Ecosystems & Biodiversity: der TEEB-Ansatz	25
3.3.1 Anwendung des Ansatzes auf Siedlungen.....	28
3.4 Ökosystemdienstleistungen von Stadtäumen.....	30
3.4.1 CO ₂ – Reduzierung.....	30
3.4.2 Verbesserung der Luftqualität.....	32
3.4.3 Negative Effekte von Stadtbäumen	33
4 i – Tree.....	35
4.1 i – Tree Applikationen	37
4.2 Anwendung des Programms	39
4.2.1 Vergleich von i-Tree Eco und i-Tree Streets	41
4.2.2 Phase I: Planung und Vorbereitung der Bestandsaufnahme	43
4.2.3 Phase II: Bestimmung der Untersuchungsflächen in Zürich.....	47
4.2.4 Phase III: Datenerhebung	56
4.2.5 Phase IV: Verarbeitung der Daten.....	59

4.3	Resultate.....	60
4.3.1	Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung.....	60
4.3.2	Filterung von Luftschadstoffen.....	62
4.3.3	i-Tree Streets	63
4.3.3.1	Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung.....	64
4.3.3.2	Schadstoffbeseitigung	65
4.3.3.3	Monetäre Quantifizierung.....	66
4.3.4	Gegenüberstellung der Resultate von Eco und Streets.....	69
4.4	Methode (UFORE-Modell).....	71
4.4.1	Kohlenstoffspeicherung und jährliche Sequestrierung.....	71
4.4.2	Schadstoffbeseitigung	73
4.5	Interpretation der Ergebnisse von i-Tree Eco	76
4.6	Schlussfolgerungen.....	80
5	Diskussion.....	82
5.1	Wie ist die Methode von i-Tree zu beurteilen?.....	82
5.1.1	Fazit und Anmerkungen	84
5.2	Anwendung von i-Tree im internationalen Kontext.....	86
5.2.1	Zürich und Schweiz.....	87
5.2.2	Europa	88
5.3	i-Tree aus ökonomischer Sicht	90
5.3.1	Ökonomische Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte in Bezug zu i-Tree	90
6	Ausblick	92
7	Literaturverzeichnis.....	95
8	Quellenverzeichnis	98
9	Abbildungsverzeichnis.....	99
10	Tabellenverzeichnis.....	100
11	Anhang	101

1 Einleitung

Der rapide Bevölkerungsanstieg der letzten Jahrzehnte und die damit einhergehende weltweite Verstädterung, stellen uns global wie auch national vor eine der grössten Herausforderungen unserer Zeit. Erstmals in der Geschichte leben weltweit mehr Menschen in Städten als auf dem Land (UN-Habitat 2009). Zwischen 2005 und 2050 ist mit einer Verdopplung der Stadtbevölkerung, von drei auf gut sechs Milliarden Menschen zu rechnen (UN-Habitat 2009). Vordergründig könnte die effizientere *Bodennutzung* in Städten als sinnvoll erachtet werden – immerhin drängen sich 50 Prozent der Bevölkerung auf 2 Prozent der Landfläche (TEEB 2010). Der urbane Lebensstil und die damit verbundenen hohen Konsum- und Mobilitätsansprüche, übersteigen jedoch die effektiv zur Verfügung stehenden Ressourcen bei Weitem. 80 Prozent der jährlichen Produktion von Öl, Gas und Kohle wird derzeit in den Städten verbraucht (Girardet 2011). Damit ist der CO₂-Ausstoss von Städten enorm und für den Verlauf des Klimawandels entscheidend. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen zudem grosse Mengen an Schadstoffen, die die Luftqualität in urbanen Zentren stark verschlechtern. Sowohl die Luftverschmutzung, als auch der Klimawandel sind in Städten besonders ausgeprägt. Zudem schreitet mit der Verstädterung die Bodenversiegelung voran, wodurch die biologische Vielfalt weiter abnimmt. Auch Wasserkreisläufe werden gestört und Trinkwasserreserven gefährdet (TEEB 2010).

Angesichts der globalen Entwicklungen sind zukunftsgerichtete Strategien in Städten entscheidend, um den genannten Herausforderungen entgegenzuwirken. Auch die Schweizer Umweltpolitik hat verschiedene Handlungsmassnahmen ausformuliert, um die negativen Folgen des Klimawandels abzuschwächen. Dabei beziehen sich die Massnahmen vordergründig auf Immissionsgrenzwerte und Abgasvorschriften (UVEK 2009). Seit 1990 sind die Treibhausgasemissionen jedoch auf einem hohen Stand nahezu konstant geblieben (Umwelt Schweiz 2011). Die Handlungskonzepte sehen nur eine Reduktion der Emissionen vor, sodass bei steigendem Energie- und Treibstoffbedarf keine Verbesserung erzielt wird. Es sind keine Massnahmen vorhanden, die die ausgestossenen Schadstoffe und Treibhausgase wieder abbauen. Dass Pflanzen genau diese Leistungen erbringen, wurde in der Schweizer Umweltpolitik bisher vernachlässigt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass natürliche Prozesse nicht quantifiziert werden und deshalb in politisch-wirtschaftlichen Belangen keine Beachtung finden. Die Erfassung von ökologischen Nutzen kann den Wert von Pflanzen neu definieren und die Bedeutung ihrer Leistungen in politische Konzepte einbringen (TEEB 2010). Der Ansatz, den Wert von Pflanzen durch rechnerische, monetäre Bewertungsraster zu ermitteln, wird bei verschiedenen Studien und Modellen aufgenommen und umgesetzt. Die Idee stellt eine mögliche Strategie dar, den weltweiten ökologischen Herausforderungen entgegenzutreten und gleichzeitig ökonomische Ansätze zu integrieren. Eine quantitative Ermittlung der natürlichen Funktionen kann

die nötigen Argumente liefern, um wirtschaftliches Interesse zu wecken und im gleichen Zug nachhaltige Lösungswege zu fördern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Ansatz der Monetarisierung für Ökosystemleistungen zu beleuchten und anhand einer praktischen Programmanwendung zu prüfen. I-Tree ist ein U.S.-Amerikanisches Computermodell, das klima- und luftverbessernde Effekte von Stadtbäumen quantifiziert und die Leistungen in einen Dollarbetrag umrechnet. Das Programm bezieht sich auf den Lebensraum Stadt, der wie erwähnt, in besonderem Masse von den vielfältigen negativen Entwicklungen betroffen ist. Am Beispiel von Zürich wurde geprüft, ob sich mit den Werten eine fundierte Argumentationsbasis gewinnen lässt, die neue Management- und Planungsabläufe oder allenfalls politische Massnahmen vorantreiben könnte. Inwiefern ist die monetäre Erfassung von Stadtbäumen ein ökonomisches Instrument? Wie sind die methodische Vorgehensweise und die zugrundeliegenden Berechnungsmodelle von i-Tree zu beurteilen? Und ist das Modell geeignet, um es auf internationaler Stufe anzuwenden? Welche Grundgedanken und Vorgehensweisen werden allgemein bereits verfolgt?

Bei der Beantwortung der Fragestellungen wird die Auffassung vertreten, dass Ökosystemleistungen messbar sind und sich aus den verschiedenen Funktionen von Pflanzen ein monetärer Wert ableiten lässt. In der vorliegenden Arbeit werden die grundlegenden Annahmen bei der Ermittlung der Basiswerte nicht hinterfragt. Dabei werden theoretische Ansätze zur Monetisierung von Ökosystemleistungen herangezogen, die unter der Schirmherrschaft des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) definiert wurden. Auf diese Weise lässt sich ein internationaler Bezug zu i-Tree herstellen und die Wertermittlung besser interpretieren.

1.1 Aufbau

Die Arbeit ist in fünf Teile gegliedert. Zu Beginn wird mit einem kurzen Überblick über die ökonomischen Prinzipien im Zusammenhang mit Umweltfragen ins Thema eingeführt. Im zweiten Teil werden strategische Ansätze erläutert, die sich aus der momentanen Situation ergeben. Dem Leser soll dadurch klar werden, welche (alternativen) Möglichkeiten derzeit in Betracht gezogen werden, um die CO₂-Problematik und die Luftverschmutzung anzugehen.

Im praktischen Teil der Arbeit werden die Anwendung und die Methode von i-Tree beschrieben und die Hintergründe des Programms, sowie alle gewonnenen Resultate dargelegt. Der vierte Teil (Diskussion) beantwortet die anfänglich gestellten Fragen, wobei dadurch eine Verbindung mit den theoretischen Hintergründen hergestellt wird. Im letzten Teil werden die Potenziale aufgezeigt, die sich am Beispiel von i-Tree herauslesen lassen. Dabei wird der Bogen zu den globalen Zusammenhängen und Herausforderungen gespannt und ein Ausblick über zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten, sowie allgemeine Erkenntnisse diskutiert.

Da es sich bei i-Tree um ein Amerikanisches Programm handelt, bezieht sich der Grossteil der Quellen auf englischsprachige Literatur. Ausdrücke konnten zum Teil nur sinngemäss übersetzt werden, wobei die Originalausdrücke vereinzelt auch übernommen wurden (kursiv).

2 Ökonomische Prinzipien: ein Überblick

Die momentan gängige Praxis, die sich ausschliesslich auf Gewinnmaximierung und unbegrenzte Profitakkumulation ausrichtet, wird voraussichtlich bis auf weiteres dominieren und unsere Gesellschaft und Politik beherrschen. Statt abzuwarten und in einem sowohl ökologisch, als auch auf Dauer ökonomisch ineffizienten Zustand zu verharren, erscheint es sinnvoll, den „ökologischen Imperativ, die Welt zu retten“ (Paech 2011), etwas konkreter anzugehen.

2.1 Die Potenziale der Ökonomie

Obschon sich wirtschaftliche und ökologische Interessen heute mehrheitlich widersprechen, stellt die Ökonomie im Grunde ein ideales Steuerungsinstrument dar, um nachhaltige Strategien voranzutreiben: Das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage, das als eigentliche Triebkraft allen Märkten zugrunde liegt, reguliert nicht nur die zu produzierende Menge eines Gutes, sondern bestimmt gleichzeitig auch dessen Geldwert, wodurch einer allfälligen Übernutzung entgegengewirkt wird (Tsimitselis 2010). Das ökonomische Prinzip, das einen haushälterischen Umgang mit knappen Gütern vorsieht, ist stets die oberste Richtlinie der Ökonomie. Je knapper und wertvoller ein Gut ist, desto höher der gehandelte Marktpreis (BUWAL 2005). Dieser Grundsatz stellt einen optimalen Anknüpfungspunkt dar, um einen sparsameren Umgang mit Ressourcen zu erzielen.

Der Hauptgrund, der einer nachhaltigen Wirtschaftspolitik noch im Wege steht, ist die Tatsache, dass in der aktuellen volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) die Beanspruchung von Umwelt und Natur und der Verzehr von Ressourcen nicht erfasst werden (BUWAL 2005). Dies führt zu einem verzerrten Bild der effektiven Entwicklung: Wenn ökologische Güter in ökonomische Güter umgewandelt werden und die Umweltschäden, die daraus resultieren, nicht mitgerechnet werden, entstehen nebst Ineffizienzen auch hohe ungedeckte Kosten, die von der Allgemeinheit und nicht von der Privatwirtschaft getragen werden müssen. Nach wie vor werden nur die Gewinne privatisiert; die Probleme werden hingegen gerne sozialisiert. Ressourcen würden dann am effizientesten eingesetzt, wenn die Verursacher für die Kosten des Verzehrs selber aufkommen müssten (BUWAL 2005). Der allgemeine Rückschluss daraus ist, dass die verstärkte Umsetzung des Verursacherprinzips, also die Internalisierung der externen Kosten, einen Lösungsansatz auf internationaler Stufe birgt und eine anhaltende Verbesserung erzielen könnte.

Auf der Ebene der UNO oder EU sind seit über zwanzig Jahren Bestrebungen im Gange, die die Gesamtrechnung (VGR) modifizieren sollen (BUWAL 2005). Umweltbelastungen und Veränderungen im Bestand des natürlichen Kapitals müssen miterfasst werden, sodass den Ökosystemen und ihren Leistungen Rechnung getragen wird. Die fehlende Sichtbarkeit des Natur-

kapitals in unserem Wirtschaftssystem, fördert die ineffiziente Nutzung und Vernichtung von Biodiversität und führt zu Entscheidungen, die letztlich negative Wirkungen, sowohl für das eigene Wohlergehen, als auch für künftige Generationen hervorrufen (TEEB 2010).

2.2 Die Schwächen der Ökonomie

Die natürlichen Ressourcen und die Ökosysteme, von denen sie bereitgestellt werden, stellen unsere Lebensgrundlage dar und verkörpern zugleich das Fundament aller wirtschaftlichen Tätigkeiten. Trotzdem existieren weder Märkte noch Preise, die die Leistungen der Ökosysteme konsequent erfassen. Das ökonomische Prinzip funktioniert mit öffentlichen Gütern deshalb nicht, weil im Gegensatz zu privaten Gütern der Konsum von Ökosystemen für alle frei zugänglich und kostenlos erhältlich ist. Ohne Konkurrenz entstehen keine Märkte und ohne die Preise, die sonst den gesellschaftlichen Wert und die Kosten der Produktion widerspiegeln, ist auch die Ermittlung der Nachfrage nicht möglich. Das eigentliche Bedürfnis nach öffentlichen Gütern ist demnach nicht erfassbar. Da niemand vom Konsum öffentlicher Güter ausgeschlossen werden kann besteht ausserdem die Gefahr, dass sogenannte ‚Free-Rider‘ darauf spekulieren, dass das Gut durch die anderen bereitgestellt wird (BUWAL 2005). Daraus ergibt sich die individuell rationale Strategie, sich nicht zu beteiligen, weil selbst eine Teilnahme nicht garantieren würde, dass das Gut tatsächlich bereitgestellt wird (BUWAL 2005). Der Anreiz besteht also heute darin, die wahren Präferenzen zu verbergen und den Wert von öffentlichen Gütern möglichst tief zu halten, da dann die Kosten der Übernutzung von der Allgemeinheit getragen werden.

Das Fehlen von Märkten für öffentliche Güter und die Unzulänglichkeiten in den Strukturen oder Prozessen ist genau genommen nichts anderes als der Ausdruck eines Marktversagens. Die zahlreichen externen Effekte (Externalitäten), die hauptsächlich von meist unsinnigen wirtschaftlichen Triebkräften hervorgerufen werden, gefährden die Wohlfahrt unbeteiligter Dritter und belegen, dass die Marktwirtschaft keinesfalls vollständig sich selbst überlassen werden darf. Die Luftverschmutzung ist ein klassisches Beispiel dafür: die vielen Schadstoffquellen, die eine diffuse Verursachermatrix bedingen, machen es unmöglich, eine gerechte Kostenzuteilung vorzunehmen, sodass letztlich niemand für die verursachten Schäden aufkommt und es sich als viel kostengünstiger erweist, mehr Schadstoffe auszustossen, als die Umwelt aufnehmen kann. Ökonomisch sind keine Grenzen auszumachen, weshalb es notwendig ist zu intervenieren und umweltpolitische Massnahmen zu ergreifen.

Die komplex verflochtenen Zusammenhänge zwischen dem menschlichen Wohlstand, der Biodiversität, den Ökosystemen und deren Leistungen werden ökologisch und ökonomisch immer mehr verstanden. Nun geht es darum, das dazugewonnene Verständnis und Wissen in unsere Tätigkeiten zu integrieren. Das Bundesamt für Umwelt setzt schon seit Jahren auf die Kooperation mit der Wirtschaft und betont, dass eine vertiefte Kenntnis über die gegenseitigen Wech-

selwirkungen von Wirtschaft und Umwelt heute unverzichtbar ist. Soll ein wirksamer und kosteneffizienter Umweltschutz realisiert werden, sind wo immer möglich Marktmechanismen vorzuziehen (BUWAL 2005).

3 Ecosystem Services: die Dienstleistungen der Ökosysteme

Die Vielzahl der natürlichen Prozesse, die in Form von Gütern und Leistungen unsere Lebensgrundlage darstellen, wird unter dem Begriff ‚Ecosystem Services‘¹ oder zu Deutsch ‚Ökosystemdienstleistungen‘ zusammengefasst. Neben quantifizierbaren Kapitalien wie Nahrungsmittel oder Baustoffe, sind speziell die immateriellen Leistungen hervorzuheben, da deren Wert in besonderem Masse von ihrer Qualität abhängt. Saubere Luft, trinkbares Wasser, fruchtbarer Boden und ein stabiles Klima gewinnen in Anbetracht der aktuellen Ereignisse einen immer höheren Stellenwert.

Im letzten Kapitel wurden Biodiversitäts- und Ökosystemnutzwerte als ‚öffentliche Güter‘ bezeichnet, da (in der Theorie) niemand von ihrem Konsum ausgeschlossen werden kann und sie Güter ohne Märkte und Preise darstellen. Die angesprochenen Umweltschäden, die sich aus der fehlenden ökonomischen Bewertung ergeben, lassen sich auch am Verlust der Biodiversität und an der zunehmenden Degradation der Ökosysteme ablesen (TEEB 2010).

Die Vereinten Nationen haben angesichts der fortschreitenden Schädigung des Naturhaushalts eine Studie ins Leben gerufen, die einen systematischen Überblick über den effektiven Zustand der Ökosysteme ermitteln soll. Das Millennium Ecosystem Assessment (MA) wurde im Jahr 2000 von UN-Generalsekretär Kofi Annan in Auftrag gegeben, um die Konsequenzen menschlicher Aktivitäten auf den Biodiversitätsverlust zu eruieren und eine wissenschaftliche Basis für bevorstehende Handlungsschritte zu liefern. Über 1300 Experten wurden in insgesamt 95 Ländern einberufen, wobei erstmals eine so grosse Versammlung von Wissenschaftlern ein kollektives Ziel verfolgte, das zudem auf dem Konsens aller Beteiligten beruhte (MA 2011). Das Millennium Ecosystem Assessment ist die bisher einzige grossangelegte Untersuchung, die die Ökosystemdienstleistungen als ausschlaggebenden Faktor für das menschliche Wohlergehen ins Zentrum rückt. Ihre Befunde ergaben, dass sich von 24 untersuchten Ökosystemdienstleistungen 15 in einem Zustand fortgeschrittener oder anhaltender Zerstörung befinden. Die UN-Millennium-Entwicklungsziele, die den Kampf gegen Hunger und Seuchen vorantreiben sollten, können mit solch ausgeprägten Umweltschäden nicht erreicht werden (MA 2011).

Durch die Vorgehensweise, die Umwelt als Dienstleistungssektor zu betrachten, werden Zusammenhänge überschaubarer und für Entscheidungsträger besser verständlich. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse können so leichter in wirtschaftliche und politische Mechanismen aufgenommen werden.

¹ Definition nach Daily (1997): „Ecosystem services are the conditions and processes through which natural ecosystems, and the species that make them up, sustain and fulfill human life. They maintain biodiversity and the production of ecosystem goods, such as seafood, forage timber, biomass fuels, natural fiber, and many pharmaceuticals, industrial products, and their precursors.“

3.1 Überblick über die Ökosystemdienstleistungen

Das *Millennium Ecosystem Assessment* hat die Leistungen der Ökosysteme in **vier Kategorien** gegliedert. Sie beinhalten folgende Nutzen² für das menschliche Wohlergehen:

Versorgungsleistungen beschreiben den materiellen Ertrag eines Ökosystems:



- Nahrungsmittel
- Rohstoffe
- Süswasser
- Arzneimittel

Regulierungsleistungen beinhalten alle ausgleichenden Eigenschaften der Ökosysteme:



- Regulierung des lokalen Klimas und der Luftqualität
- Kohlenstoffabscheidung und – Speicherung
- Bestäubung
- Abwasserreinigung, Abfallbeseitigung
- Erosionsvermeidung und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit
- Abschwächung von Extremereignissen
- Biologische Schädlingsbekämpfung

Unterstützende Leistungen dienen der Erzeugung der meisten anderen Ökosysteme



- Habitate für Tier- und Pflanzenarten
- Erhaltung der genetischen Vielfalt
- Bodenbildung
- Stoffflüsse

Kulturelle Leistungen umfassen die immateriellen Nutzen für die Menschen:



- Geistige und körperliche Gesundheit, Erholung
- Ästhetischer Genuss, Inspiration
- Bildung
- Tourismus, kulturelles Erbe
- Spiritualität und Religion

² Die stichwortartig aufgelisteten Nutzen repräsentieren eine Auswahl der zahlreichen Dienstleistungen, die von der Natur bereitgestellt werden. Die Begriffe sind der TEEB-Studie entnommen worden und wurden mit weiteren Stichworten ergänzt, die im MA aufgeführt sind.

3.2 Monetäre Wertermittlung

Die im Allgemeinen immer noch gängige, ökonomische Praxis, die Natur als reines „open-access“-Gut anzusehen, wird vermehrt reflektiert und angefochten (Cassel-Gintz 2001). Seit den 90er Jahren ist die Zahl der Publikationen, die sich mit dem Nutzen natürlicher Ökosysteme beschäftigen, kontinuierlich angestiegen. Die monetäre Quantifizierung von Naturgütern ist inzwischen in vielen Kreisen als Notwendigkeit anerkannt worden (TEEB 2010). Durch das *Millennium Ecosystem Assessment* sind Ökosystemdienstleistungen auch Teile der politischen Agenda geworden.

Durch die Kategorisierung der Ökosystemdienstleistungen wird ersichtlich, dass sich die Abläufe und Prozesse der Natur nicht auf einige wenige Teilbereiche unseres Lebens beschränken, sondern schlicht die Grundvoraussetzung für unser Überleben auf der Erde darstellen. Diese Aussage scheint zu implizieren, dass Ökosystemdienstleistungen einen Wert haben, der weit über jedes sinnvoll in Geldeinheiten quantifizierbare Mass hinausgeht. In einem 1997 veröffentlichten Bericht wurde dennoch der Versuch unternommen, den Wert der gesamten Biosphäre zu beziffern. Die Schätzung beläuft sich auf 16-54 Billionen (10^{12}) US Dollar pro Jahr – mit einem Mittelwert von 33 Billionen (10^{12}) US Dollar³ – gegenüber 18 Billionen US Dollar für das weltweite Bruttoinlandprodukt (TEEB 2008). Der Artikel hat viel Kritik geerntet und kontroverse Debatten über die Monetarisierung von Naturgütern ausgelöst (Cassel-Gintz 2001). Zum einen wurde der ermittelte Geldwert als „wesentliche Unterschätzung der Unendlichkeit“ (Toman 1998) erachtet. Andere waren der Ansicht, dass der Wert zu hoch eingeschätzt wurde (Cassel-Gintz 2001). Zum anderen wurde das grundlegende Verständnis von Natur und Systemleistungen der Biosphäre allgemein hinterfragt.

Trotz aller Unwägbarkeiten und Subjektivität, die sich bei monetären Bewertungen von Ökosystemdienstleistungen ergeben, ist selbst eine unterschätzte Wertermittlung noch immer besser, als der Wert „Null“, der in der Ökonomie bisher Verwendung fand (Cassel-Gintz 2001). Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte sind, auch wenn die ermittelten Zahlen jeweils immer nur eine Annäherung an den tatsächlichen Wert darstellen können, vor dem Hintergrund der aktuellen wirtschaftlichen Praxis dringend einzubringen. Die Erkenntnisse, die in den letzten Jahren dazugewonnen wurden und weiterhin hinzukommen werden, werden künftig immer genauere und wirkungsvollere Schätzungen ermöglichen.

Was die Wertermittlung von Costanza's Team enorm erschwerte und die Glaubhaftigkeit ihrer Ergebnisse letztlich schwächte, war ihr Anspruch, den Wert der gesamten Biosphäre darzulegen. Die Gesamtheit der Ökosysteme ist aber kaum jemals Gegenstand menschlicher Handlungsentscheidungen. Handlungsrelevante Bewertungsfragen stellen sich erst auf ‚tieferen‘

³ Costanza et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital.

Ebenen oder Stufen, wenn wir beispielsweise einen Staat oder eine Stadt als Vollzugsorte betrachten. Die Bewertung von Ökosystemdienstleistungen macht daher mehr Sinn, wenn die einzelnen Kategorien und Untergruppen – wie vom *Millennium Ecosystem Assessment* vorgeschlagen – aufgliedert werden. Die Ergebnisse werden genauer und aussagekräftiger, wenn sich die Wertermittlungen auf einen bestimmten Teilbereich beschränken (TEEB 2008).

Die Ökonomen haben zur Bewertung der externen Kosten des Umweltverbrauchs verschiedene Methoden entwickelt, die das globale Wirtschaftssystem mittel- und längerfristig stabilisieren sollen. Ihrer Auffassung nach ergibt sich der Wert von Umwelt und Natur aus einer Bewertung der aktuellen sowie der künftigen Funktionen und Leistungen der Ökosysteme (Tsimitselis 2010). Um möglichst alle verschiedenen Nutzungsformen eines Gutes erfassen zu können, wurde das Konzept des ökonomischen Gesamtwerts entwickelt, das grob eine Unterteilung in Gebrauchs- und Nichtgebrauchswerte vorsieht (Baumgärtner 2002). Mit dem Gebrauchswert ist der Teil des Wertes gemeint, der aus der tatsächlichen oder potenziellen Nutzung der Umwelt entsteht. Die Nichtgebrauchswerte sind hingegen vollkommen unabhängig von der effektiven Nutzung (BUWAL 2005). Die von Baumgärtner vorgenommene Differenzierung der externen Kosten wurde auch vom Bundesamt für Umwelt aufgenommen. Ihre Studie über die ‚Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips‘ stützt auf den folgenden Begriffen:

Gebrauchswerte

- **Direkte Gebrauchswerte:** der direkte Verbrauch von Umweltgütern kann sowohl für produktive, wie auch für konsumtive Zwecke erfolgen und schliesst ferner auch den zerstörungsfreien Gebrauch mit ein, der bei der Bedürfnisbefriedigung der Menschen eintritt.
- **Indirekte Gebrauchswerte:** indem bei der Erzeugung und Aufrechterhaltung bestimmter Ökosystemdienstleistungen ökonomische Prozesse unterstützt werden, spielen Umweltgüter bei der indirekten Bedürfnisbefriedigung eine wichtige Rolle.
- **Optionswert:** Umweltgüter, die gegenwärtig weder direkte, noch indirekte Gebrauchswerte haben, können einen quantifizierbaren Wert aufweisen, wenn die Option besteht, diese Güter in der Zukunft zu nutzen. Dieser potenzielle Wert wird als Optionswert bezeichnet.

Nichtgebrauchswerte

- **Nachempfundener Gebrauchswert:** die Bereitschaft, Zahlungen für ein Umweltgut zu leisten (oder auf den Gebrauchsnutzen zu verzichten), sodass anderen Mitgliedern der gegenwärtigen Generation der Gebrauchsnutzen zukommt, bezeichnet man als nachempfundener Gebrauchswert.
- **Vermächtniswert:** die Bereitschaft, Zahlungen für ein Umweltgut zu leisten (oder auf den Gebrauchsnutzen zu verzichten), sodass zukünftige Generationen Zugang zu diesen

Umweltgütern haben, bezeichnet man als Vermächtniswert. Er bezieht sich nicht auf die eigene, spätere Inanspruchnahme, sondern ausschliesslich auf diejenige der nachfolgenden Generationen.

- **Existenzwert:** die Bereitschaft, Zahlungen für ein Umweltgut zu leisten (oder auf den Gebrauchsnutzen zu verzichten), sodass diese Umweltgüter weiterhin im heutigen Ausmass bestehen bleiben, wird als Existenzwert bezeichnet. Er ist Ausdruck einer Wertschätzung, die unabhängig ist von jeder tatsächlichen oder potenziellen, direkten oder indirekten Nutzung und drückt die Befriedigung aus, die darüber empfunden wird, dass es dieses Umweltgut gibt.

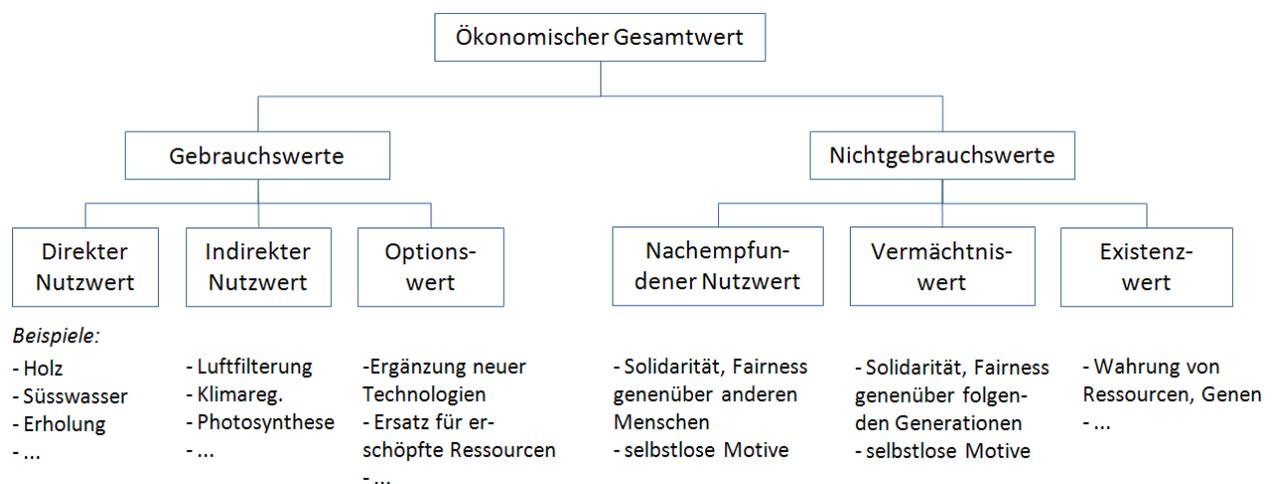


Abb. 1: Übersicht über das Konzept des ökonomischen Gesamtwerts (G. Wälchli). Quelle: Gessler et. al, 2002.

Mit Ausnahme einiger direkter Gebrauchswerte, die im letzten Kapitel als Versorgungsleistungen aufgeführt waren und neben Nutzpflanzen, Vieh oder Fisch auch Wasser, Rohstoffe und Arzneimittel enthalten, gibt es kaum Umweltgüter, die auf dem freien Markt gehandelt werden.

Der indirekte Gebrauchswert umfasst alle Regulierungsleistungen und alle unterstützenden Leistungen, die vom Millennium Ecosystem Assessment definiert wurden (s. Kap. 3.1). Die monetäre Wertermittlung dieser beiden Kategorien (z.B. Kohlenstoffspeicherung) wird erst vereinzelt in Handlungskonzepte integriert (Cassel-Gintz 2001). Obwohl sie in Berechnungen allgemein den überwiegenden Teil des ökonomischen Gesamtwerts ausmachen, bleiben sie in den üblichen Bilanzen weitgehend unsichtbar (TEEB 2010).

Der Optionswert und die Nichtgebrauchswerte stellen gewissermassen eine Erweiterung der MA- Kategorisierung dar und liefern weitere Ansätze für eine ganzheitliche monetäre Bewertung. Eine fundierte Monetarisierung kann die nötigen Marktsignale erzeugen, die für eine repräsentable Preisbildung erforderlich sind (TEEB 2010).

Nutzungsunabhängige Werte (meist zerstörungsfreier Gebrauch), zu denen die Erholung, die Spiritualität oder aber das kulturelle Erbe gehören, werden in touristischen Angeboten zum Teil erfasst. Sie sind jedoch schwierig zu isolieren und werden nicht mit einem festen Preis ausgedrückt, obwohl sie bei Entscheidungen häufig bestimmend sind (TEEB 2010).

3.2.1 Ökonomische Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte

Je nach Fragestellung und Umweltbereich, aber auch je nachdem, welche Daten zur Verfügung stehen, bieten sich verschiedene Methoden an, die den Umweltnutzen als Geldwert beziffern (BUWAL 2005). Die Ökonomie verfolgt den Ansatz, Umweltbelastungen als Grenzkosten darzustellen, um daraus die optimale Menge an Umweltbelastung bestimmen zu können (BUWAL 2005). Mathematisch betrachtet, lässt sich das Optimum dann erreichen, wenn die Grenzkosten der Umweltbelastung gleich gross sind wie die Grenzkosten der Vermeidung dieser Belastungen (Frey et al. 1991).

Der Zusammenhang zwischen Schadens- und Vermeidungskosten lässt sich in einem Kurvendiagramm gut verdeutlichen: nicht nur die Umweltbelastung, sondern auch die Beseitigung des entstandenen Schadens ist mit Kosten verbunden (s. Abb. 2).

Der Schnittpunkt der beiden Kurven stellt ökonomisch betrachtet demnach die optimale Menge an Umweltbelastungen dar. Werden die Grenzkosten korrekt ermittelt, strebt der Ansatz also insgesamt eine Minimierung der Belastungskosten an. Belastungen werden jedoch in Kauf genommen, solange sich die Vermeidungs- und Schadenskosten die Waage halten. Das U_{opt} kann sowohl bei niedrigen, als auch erst bei hohen Umweltbelastungsstufen liegen. Es wird demnach nicht vorzugsweise eine Verhinderung von Umweltbelastungen angestrebt, sondern eher eine Hemmung des schlimmstmöglichen und teuersten Szenarios, was die rein ökonomische Betrachtungsweise deutlich zum Ausdruck bringt. Der Schnittpunkt stimmt zudem selten mit dem politischen Umweltziel überein (BUWAL 2005).

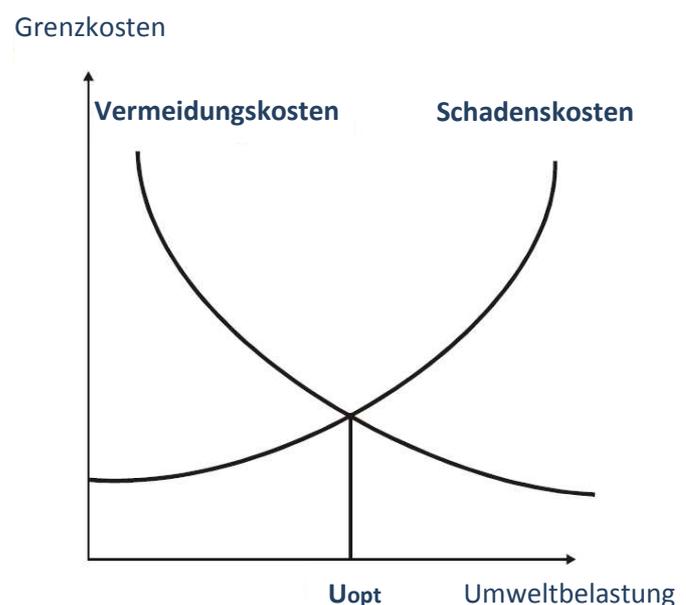


Abb. 2: Schadens und Vermeidungskosten (Quelle: Frey 1991)

Auf den folgenden Seiten sollen die gängigsten, auf Schadens- und Vermeidungskosten beruhenden Ansätze kurz vorgestellt werden.

3.2.1.1 Schadenskosten

Die entstandenen Schäden und Nutzensverluste die bei Betroffenen entstehen, werden als Schadenskosten erfasst und können sowohl direkt, als auch indirekt bewertet werden (BAFU 2005).

Direkte Methoden:

Die Grundidee der Schadensbewertung ist einfach: bewertet werden materielle Schäden an Bauwerken und Pflanzen sowie gesundheitliche Schäden bei der Bevölkerung. Die Schadenskosten entsprechen dann den Kosten für die Reparaturen der geschädigten Objekte oder der Ertragsausfälle in Franken (BUWAL 2005). Dass mit einer solchen Schadensbewertung nur ein (kleiner) Teil der negativen Wirkungen erfasst wird, liegt auf der Hand. Alle nicht materiellen und nicht reparierbaren irreversiblen Schäden, alle Belastungen, die nicht messbar sind oder nur mit grossem (finanziellen) Aufwand zu ermitteln sind, sowie alle Langzeitwirkungen, die sich schlicht nicht prognostizieren lassen, werden nicht berücksichtigt und fallen bei der Bewertung weg. Dies ist umso störender, da gerade diese Effekte besonders bedeutend sein können. Aus diesem Grund wurden Methoden entwickelt, die diese Lücken schliessen sollen.

- **Befragungen:** stellen eine Möglichkeit dar, fehlende Gesichtspunkte einzubeziehen, indem versucht wird, die individuelle Zahlungsbereitschaft für solche Werte in Erfahrung zu bringen.

Das Bundesamt für Umwelt hat in Zusammenarbeit mit der ETH (Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich) und der Universität der italienischen Schweiz eine Studie durchgeführt, die den Wert verschiedener Faktoren, die die Lebensqualität entscheidend mitbestimmen, anhand der Zahlungsbereitschaft für höhere Mietpreise in Zahlen ausgedrückt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensibilität der Befragten gegenüber Lärm und-Luftverschmutzung sehr gross sind (BAFU 2007).⁴ Für einen Wechsel von einer Wohnung mit schlechter zu einer Situation mit mittlerer Luftqualität würden Zürcher Mieterinnen und Mieter im Durchschnitt beispielsweise 130 Franken mehr bezahlen. Die Bevölkerung der Stadt Zürich wäre somit bereit, jährlich 290 Millionen Franken für eine Verbesserung der Luftqualität auszugeben (BAFU 2007).

Grundsätzlich wird zwischen zwei Zahlungsbereitschaften unterschieden: *Willingness to pay* (WTP) meint die Zahlungsbereitschaft zur Verhinderung einer Umweltverschlechterung (oder zur Erlangung einer Umweltverbesserung) – *Willingness to accept* (WTA) drückt die Kompensationsbereitschaft als Entschädigung einer eingetretenen Umweltverschlechterung aus (BUWAL 2005). Je nach Befragungsmethode (unstrukturierte, strukturierte, auf Wahlalterna-

⁴ Pressemitteilung BAFU (17.09.2007): Wie viel ist uns eine intakte Umwelt wert?

tiven beruhende oder durch Experimente erfolgende), kann die Wertermittlung höher oder tiefer ausfallen. Ein Problem, das bei empirischen Erfassungen allgemein bekannt ist, ist das strategische Verhalten (Iten 1990). Es können Anreize bestehen, das Untersuchungsergebnis mit zu hohen oder zu niedrigen Angaben zu beeinflussen. Ausserdem entsprechen die angegebenen Daten möglicherweise nicht der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft, da die Befragungen meist auf hypothetischen Ansätzen beruhen und keine realen, finanziellen Konsequenzen für die Teilnehmer bestehen (BUWAL 2005). Dass die Ergebnisse zudem vom (fachlichen) Wissen, der individuellen Vernetzungsgabe (Erkennung von Zusammenhängen) und der persönlichen Vorstellungskraft abhängt (die die Bestimmung eines Preises für Güter, die noch nie auf einem Markt gehandelt wurden, stark beeinflusst), ist eine Tatsache, die der Genauigkeit der Resultate zwar abträglich ist, im Grossen und Ganzen aber nicht so stark ins Gewicht fällt, dass die Bewertungsmethode die Aussagekraft verlieren würde.

Ein wesentlicher Vorteil der Befragungsmethode ist, dass der Options-, Existenz- und Vermächtniswert miterfasst werden und die Resultate an Genauigkeit zunehmen, je mehr Aspekte miteinbezogen werden. Der tatsächliche Wert der Luftqualität ist in Wahrheit aber noch viel höher, als die Studie des BAFU ermittelt hat: neben den individuellen Präferenzen der zufällig befragten Personen, müssten auch die weiter oben angesprochenen direkten Schadenskosten, sowie viele weitere Faktoren einberechnet und zusammengezählt werden, die die Luftqualität mitbestimmen.

Indirekte Methoden:

Die indirekten Methoden haben das gleiche Ziel wie die direkten Befragungsmethoden, basieren jedoch nicht auf den Äusserungen, sondern auf dem beobachtbaren Verhalten der Individuen (BUWAL 2005). Die auf Daten beruhende Ermittlung der individuellen Präferenzen gilt als besonders zuverlässig, da sie nur die effektiven Zahlungen der Bevölkerung wiedergibt und dadurch von vielen Ungenauigkeitsfaktoren absieht (von subjektiven Wahrnehmungen, strategischen Absichten u.s.w.).

Es werden vier Arten von indirekten Methoden unterschieden, die die Wertschätzung öffentlicher Güter auf unterschiedliche Weise darlegen können. (Alle Begriffe entstammen der BUWAL-Studie 2005):

- Die **Marktpreismethode** verfolgt das Kaufverhalten auf den Märkten und leitet die Wertschätzung gegenüber der Umwelt anhand der getätigten Aufwendungen ab. Ein Beispiel ist der *Lifestyle of Health and Sustainability* (LOHAS), der aus dem etwas verstaubten Image des Ökomarkts ein trendiger, lukrativer Geschäftszweig geschaffen hat und der immer mehr Geld einbringt sowie folglich auf die sich verändernden Prioritäten (und das steigende Einkommen) der Marktteilnehmer hinweist.

- Beim **Ausweich- oder Reisekostenansatz** werden die Ausgaben für komplementäre Güter analysiert. Zeit- und Reisekosten oder Eintrittsgelder, die mit Umweltgütern zusammenhängen, reflektieren die Zahlungsbereitschaft für natürliche Ressourcen.
- Mit der **Erfassung von Risikopräferenzen** werden die Externalitäten bewertet, die nur mit einer beschränkten Wahrscheinlichkeit eintreten oder bei denen man noch nicht weiss, wie gross der zu befürchtende Schaden sein wird. Die potenziellen Externalitäten können bei der Risikobewertung mittels Versicherungsansatz ermittelt werden. Dabei werden die Kosten (Prämien) errechnet, die erforderlich sind, damit eine Versicherung das Risiko eines Störfalls trägt. Allerdings können nur materielle Schäden versichert werden; Angst und Leid, die im Falle einer Katastrophe unweigerlich aufkommen, werden nicht berücksichtigt. (Sie müssten separat/mit anderen Ansätzen erfasst werden.)
- Die **Analyse von Abstimmungsergebnissen** ist eine naheliegende Methode, um den politischen Willensbildungsprozess besser nachvollziehen zu können. Durch die Analyse mehrerer Abstimmungen, die das gleiche öffentliche Gut betreffen, lassen sich Nachfragefunktionen, und folglich Bewertungsfunktionen für Umweltgüter berechnen. Die direkte Demokratie in der Schweiz bietet beste Voraussetzungen, um die Bewertung öffentlicher Güter über die Abstimmungsergebnisse abzuleiten.

3.2.1.2 Vermeidungskosten

Im Gegensatz zur Schadenskosten-Berechnung, wird mit der Aufstellung der Vermeidungskosten ein vorsorglicher Ansatz verfolgt, der den Erhalt der Umweltfunktionen und die Wiederherstellung von Funktionsverlusten anstrebt. Während sich die Schadenskosten hauptsächlich auf schon eingetretene Verluste konzentrieren und allgemein als zeitlich verschobene Reaktionen auf aktuelle Probleme zu verstehen sind, werden mit der Vermeidung von Umweltbelastungen nachhaltige Handlungsschritte umgesetzt, die die Regenerations- oder Absorptionsfähigkeit der Natur berücksichtigen. Das Nachhaltigkeitskonzept der Schweizer Umweltpolitik gilt als Richtschnur bei der Ausarbeitung von konkreten Konzepten und baut auf den Grenzwerten auf, die vom Bund bereits festgelegt worden sind.

Die Vermeidungskosten unterstützen also eine dem Naturschutz nahestehende, ideologische Strategie, Umweltschäden möglichst an der Quelle anzugehen. Daneben werden sie aber auch aus ökonomischer Sicht vermehrt empfohlen, da sie die Schadenskosten nicht nur ergänzen, sondern aufgrund der genannten Bewertungsprobleme bei den Schadenskosten die Kosten der Vermeidung eines externen Effekts direkt beziehen können (BUWAL 2005).

Zu den Vermeidungskosten zählen (BUWAL 2005):

- **Wiederherstellungskosten und Reparaturkosten:** gemeint sind Aufwendungen zur Wiederherstellung eines bestimmten (nachhaltigen) Funktionsniveaus (beispielsweise eines Habitats), die (weitere) negative Folgewirkungen zu vermeiden vermögen.
- **Ersatz- oder Substitutionskosten:** beinhalten die Kosten für den langfristigen Erhalt gefährdeter Umweltfunktionen (z.B. mit Ersatzhabitaten, durch die Substitution nichterneuerbarer Energien oder durch Effizienzsteigerung).
- **Kosten für die Vermeidung von Umweltbelastungen mit End-of-Pipe-Massnahmen oder durch Reduktion der Umweltbelastungen an der Quelle:** dabei unterscheidet man aktive und passive Vermeidungskosten: Die Aktiven werden von den Verursachern von externen Effekten getragen, um die Emissionen zu begrenzen. Filteranlagen oder Katalysatoren stellen sogenannte End-of-Pipe-Technologien dar, deren Anschaffung und Unterhalt zugleich die Kosten darstellen, die bei den Verursachern anstehen. Bei passiven Vermeidungskosten handelt es sich um Aufwendungen, die die Geschädigten tätigen, um Immissionen an ihrem Wohnort zu vermeiden.

Vermeidungskosten lassen sich einfach bestimmen, solange vorgegebene Grenzwerte und Vermeidungstechnologien vorhanden sind und als Berechnungsgrundlage herangezogen werden können. Vermeidungskosten beruhen demnach auf dem Verursacherprinzip und zielen auf ein quantifizierbares Niveau von Umweltqualität hin, das von Behörden vorgegeben wird (BUWAL 2005).

Schwieriger wird es, wenn sich die Vermeidung des Schadens nicht (ausschliesslich) mit technischen Massnahmen erreichen lässt, sondern nur mit Verzichtsmassnahmen zu lösen ist. Der Verzicht auf eine Autofahrt ist beispielsweise schwierig zu berechnen (siehe Schadenskosten).

Allgemein besteht der grösste Nachteil des Vermeidungsansatzes darin, dass die Massnahmen bereits im vornherein bestimmt werden müssen und nicht als marktwirtschaftliches Ergebnis der Internalisierung von externen Kosten resultieren (BUWAL 2005). Da die Vermeidungsmassnahmen nicht auf den Präferenzen der Individuen abgestützt sind, stellt sich die Frage, ob die Gesellschaft tatsächlich bereit ist, für die Vermeidung zu bezahlen oder ob sie lieber unter dem Schaden leiden würde (ExternE 1999). Auch ist unklar, ob die Bevölkerung wirklich daran interessiert ist, das Verursacherprinzip konsequent anzuwenden.

3.2.1.3 Gegenüberstellung des Schadens- und Vermeidungskostenansatzes

Grundsätzlich erscheint der Ansatz der Vermeidungskosten sinnvoller, wenn insgesamt eine auf Nachhaltigkeit beruhende Strategie verfolgt werden soll. Die aktuellen Umweltbelastungen/-probleme würde es nicht geben, wenn negative Kettenwirkungen schon an ihrer Basis abgefangen und potenzielle Probleme im Keim erstickt würden.

Die grösste Herausforderung bei der Wertermittlung öffentlicher Güter besteht meist darin, die Komplexität der verschiedenen Wechselwirkungen sinngemäss und vollständig zu erfassen. Auch Kenntnisse über komplizierte Wirkungsweisen von Schadstoffen auf unsere Gesundheit sind zu verfeinern und in Datenmodelle zu integrieren. Solch komplexe Angaben sind bei der Berechnung der Vermeidungskosten nicht nötig, was die Methoden ungemein vereinfacht und für den Vermeidungskosten-Ansatz spricht. Doch darauf zu hoffen, dass der Mensch seine materiell gewinnbringenden Geschäftigkeiten schlagartig aufgibt um sie mit vorsorglichen, verantwortungsbewussten Betätigungen zu ersetzen, wäre nicht nur naiv, sondern auch sehr unrealistisch. Die Schadensbewertungen bleiben (vorerst) also unerlässlich. Ferner lassen sich bereits verursachte Zerstörungen nicht rückgängig machen, was die Dringlichkeit einer Schadensbegrenzung zusätzlich bestärkt.

Schadenskosten sind demnach die naheliegenderen Grössen, wenn es um die Bewertung der externen Effekte geht. Nur diese können die direkte Bewertung der effektiv durch die Externalitäten anfallenden Schäden in Zahlen ausdrücken – „und genau diese sollen ja den VerursachernInnen angelastet werden.“ (BUWAL 2005)

Vermeidungskosten sind vor allem dann interessant, wenn es um die Formulierung von Strategien und Massnahmepaketen zur Internalisierung von externen Kosten geht. Insbesondere, wenn die zu erwartenden Schäden hoch sind, wie beispielsweise bei der CO₂-Problematik, können Vermeidungskosten als Schätzung für die Untergrenze der tatsächlichen externen Kosten verwendet werden (BUWAL 2005).

In der folgenden Tabelle sind die im Text genannten Bewertungsansätze auf den Klimawandel und die Luftverschmutzung bezogen und auf ihre Anwendung beurteilt worden:

Tabelle 1: Übersicht über die möglichen Bewertungsansätze nach Schadensbereichen.
(INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996)

Bereich	Mögliche Bewertungsansätze	Beurteilung
Klimawandel	<p><i>Schadenskosten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von Klimakatastrophen - Grobschätzung weltweiter Schäden durch Klimaänderungen <p><i>Vermeidungskosten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kosten der Massnahmen zur Erreichung vorgegebener Klimaziele 	<ul style="list-style-type: none"> - Mittel: Informationsproblem - Schlecht: Kausalität und Schadenssummen unklar - Mittel: Festlegung der Ziele/Kausalität schwierig
Luftverschmutzung	<p><i>Schadenskosten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zahlungsbereitschaft für bessere Luftqualität - Kosten durch Ressourcenausfälle (durch Gesundheits- Gebäude und Waldschäden, Ernteaufälle) <p><i>Vermeidungskosten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kosten der Massnahmen zur Erreichung der Luftreinhalteziele 	<ul style="list-style-type: none"> - Mittel: Problem der Über- oder Unterschätzung - Gut: Kausalität von Verkehr oder Energie jedoch z.T. schwierig - Mittel: verhaltensorientierte Massnahmen schwierig quantifizierbar

3.2.2 Ökonomische Ansätze im Kontext der Luftverschmutzung

Die Luftverschmutzung ist seit Beginn der Industrialisierung ein grosses Problem und nimmt heute durch die wachsenden Bevölkerungszahlen und den erhöhten Ressourcenverbrauch weiterhin stetig zu (UN-Habitat 2009). Verkehr und Energie produzieren grosse Mengen an Schadstoffen, wobei die Folgewirkungen der Belastungen in den urbanen Zentren besonders stark ausfallen. Eine verschlechterte Luftqualität wirkt sich negativ auf die Gesundheit (sowohl der Bevölkerung, als auch der Pflanzen und Tiere), auf die Biodiversität, die Landwirtschaft, die Wälder, sowie auf die Gebäudehüllen und Materialien aus (BAFU 2012). Die Problemfelder des Stadtklimas (städtische Wärmeinseln, lufthygienische Belastungen durch fehlende Frischluftschneisen, extreme Wetterereignisse, Versiegelung und Niederschlagsverhalten u.a.) werden durch den Klimawandel zusätzlich verschärft (MUNLV 2011).

In der Schweiz verursacht die Luftverschmutzung jährlich ungedeckte Kosten in Höhe von über 5 Milliarden Franken (BAFU 2011). Damit bleibt die Belastung trotz zahlreicher Massnahmen zur Verbesserung der Luftqualität ein Problem, das von der Allgemeinheit in Form von diversen

direkten und indirekten Schäden getragen werden muss. Die Luftverschmutzung ist allein in der Schweiz für den vorzeitigen Tod von 3000 bis 4000 Personen mitverantwortlich, was etwa 6 Prozent aller Todesfälle entspricht (BAFU 2011). Zu den gesundheitsschädigenden Luftschadstoffen zählen insbesondere Feinstaubimmissionen (PM10), sowie Stickstoff-, Schwefeldioxid und Ozonimmissionen (Econcept 2006). Die primären Wirkungen sind Atemwegs-, Herz-/Kreislauf- sowie längerfristig auch Krebserkrankungen (Econcept 2006). Neben Gesundheitskosten werden auch Gebäudeschäden und Ernteauffälle in die schweizerische Gesamtrechnung einbezogen (BAFU 2011).

Die externen Kosten der Luftverschmutzung liefern wichtige Informationen für die Luftreinhaltepolitik und zeigen, wie gross die kostenmässigen Nutzen sein können, wenn vorsorgliche Massnahmen ergriffen werden (Econcept 2006). Die Kosten und Nutzen der Luftqualität sind ein bedeutendes Element der Massnahmenplanung, welche bestrebt ist, die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Sie werden als wichtiger Input bei politischen Diskussionen eingebracht (Econcept 2006). Es ist jedoch festzuhalten, dass nicht alle Wirkungen der Luftverschmutzung erfasst und in Franken ausgedrückt werden. Die ermittelten externen Kosten des BAFU oder des AWEL umfassen nur diejenigen Bereiche, bei denen mit Sicherheit ein Wirkungszusammenhang hergestellt werden kann und sich eine Monetarisierung vornehmen lässt.

Die Bezifferung der externen Kosten der Luftverschmutzung gründet auf den Schadens- und Vermeidungskostenansätzen, die im Kapitel 3.2 beschrieben wurden und beruht demnach auf den dargelegten ökonomischen Ansätzen zur Abschätzung der Naturwerte. Die Gesundheitskosten, Gebäude-, Waldschäden, Ernteauffälle und Biodiversitätsverluste, die vom AWEL ermittelt werden, entsprechen direkten Schadenskosten; wobei durch die Berechnungsgrundlagen, die die vorgegebenen Grenzwerte des Bundes einbeziehen, auch der Vermeidungskostenansatz zu tragen kommt. (Die Monetarisierung der Biodiversitätsverluste wird zudem hauptsächlich mit dem Wiederherstellungskostenansatz berechnet.) Mit der Zuordnung der immissionsbedingten Schadenskosten auf die verursachenden Emissionen, verfolgt das AWEL (und BAFU) konsequent das Verursacherprinzip, das vom Nachhaltigkeitskonzept der Schweizer Umweltpolitik vorgegeben wird (s. Kap. 3.2.1.2).

3.3 The Economics of Ecosystems & Biodiversity: der TEEB-Ansatz

Die Monetarisierung stellt für die Bewertung von Ökosystemdienstleistungen die Grundvoraussetzung dar, wenn es gilt, den Nutzen und die Leistungen von natürlichen Kreisläufen in wirtschaftliche Entscheidungsprozesse zu integrieren. Die ökonomische Bewertung sollte jedoch nicht als Patentrezept, sondern vielmehr als Instrument verstanden werden, das die kostbaren, vielfältigen Güter der Ökosysteme zu konkretisieren vermag und quantifizierbar macht, sowie als Basis für neue ökonomische Konzepte dienen kann (TEEB 2010).

Im Rahmen der TEEB-Studie – „die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität“ (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) wird der globale wirtschaftliche Nutzen der biologischen Vielfalt untersucht und die „Kosten des Biodiversitätsverlusts aufgrund unterlassener Schutzmassnahmen im Vergleich zu den Kosten eines wirkungsvollen Naturschutzes“ ermittelt (TEEB 2010). Die TEEB-Studie wurde 2007 in Potsdam von den Umweltministern der G8+5-Staaten angeregt und steht unter der Schirmherrschaft des Umweltprogramms der Vereinten Nationen, sowie weiteren Ministerien und Departementen.⁵ Es wurden mehrere Berichte erstellt, die sowohl auf politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger, als auch auf unterschiedliche Anforderungen der breiten Öffentlichkeit eingehen. Ziel der Berichte ist jeweils die Verdeutlichung und Veranschaulichung der ökonomischen Konzepte und Instrumente, die die Werte der Natur in Entscheidungsprozesse auf allen Ebenen integrieren (TEEB 2010). „Die TEEB-Studie will eine Brücke schlagen zwischen multidisziplinärer wissenschaftlicher Betrachtung der Biodiversität einerseits und internationaler sowie einzelstaatlicher Politik, Kommunalpolitik und Wirtschaft andererseits.“ (TEEB 2010) Bewusst breit angelegt, soll TEEB als Anregung und Aufforderung aufgefasst werden, die Erkenntnisse der Studie weiter zu vertiefen und konkrete Handlungsschritte daraus abzuleiten.

Eine grundlegende Annahme der TEEB-Studie besteht darin, dass Ökosystemleistungen mehrheitlich klar bewertet werden können. Für die Analyse und Strukturierung der Inwertsetzung sieht sie ein schrittweises Vorgehen auf drei Ebenen vor (TEEB 2010):

- **Werte anerkennen:** In vielen älteren Kulturen ist der Wert der Natur tief im Bewusstsein verankert und verkörpert sowohl spirituelle, als auch existenzielle Bedeutungen, sodass der Schutz dieser Lebensräume mit den menschlichen Tätigkeiten einhergeht. Eine Bezifferung von Ökosystemleistungen ist in solchen Gebieten nicht erforderlich und hätte eher eine kontraproduktive Wirkung; eine in Geldwerten formulierte Quantifizierung könnte die Pluralität

⁵ United Nations Environment Programme (UNEP), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, D), Norwegian Ministry of Foreign Affairs (Bokmål, N), Department for Environment, Food and Rural Affairs (defra, GB), Department for International Development (UKaid, GB), Rijksoverheid (das schwedische Umweltministerium), SIDA (das niederländische Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umwelt), Kankyō-shō (das japanische Umweltministerium) (TEEB 2010).

der Werte nicht berücksichtigen und würde den Wert bedeutend herabsetzen (TEEB 2010). Auf die Grenzen monetärer Bewertungen wird in in der Diskussion nochmals vertiefter eingegangen.

Die Einsicht, dass das menschliche Wohlergehen von Ökosystemdienstleistungen abhängt, wurde mehrheitlich (zurück-) gewonnen und wird mittlerweile von den meisten Instanzen als Tatsache anerkannt.

- **Werte analysieren:** Es gibt diverse Möglichkeiten, sich dem Wert von Ökosystemdienstleistungen anzunähern. Einige davon wurden im letzten Kapitel mit den verschiedenen ökonomischen Methoden vorgestellt. Im TEEB-Bericht „*Ecological and Economic Foundations*“ werden die wichtigsten Verfahren und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile untersucht und auf Biodiversität und Ökosystemleistungen angewandt.

Die Bewertungsmethoden wurden auf verschiedene Fragestellungen angepasst, wobei in erster Linie die Wirkungen von menschlichen Eingriffen beurteilt werden, die mit alternativen Handlungsoptionen verbessert werden könnten. Der ökonomische Nachweis des Naturwertes kann beispielsweise über eine vollständige Kosten-Nutzen-Analyse erfolgen, der die äquivalenten Kosten einer technischen Vorrichtung erfasst (s. Kap 3.2.1.2). Für eine wirksame Einbindung von Politik und Wirtschaft ist es wichtig, möglichst alle Kosten und Nutzen zu erfassen und nicht nur solche, die für Produktion und Verkauf von Gütern auf dem Markt relevant sind. Dabei ist es sinnvoller, sich auf einige wenige Dienstleistungen zu beschränken und (dafür) eine differenziertere Abschätzung vorzunehmen, als den Anspruch zu erheben, den (ungefähren) Gesamtwert des Ökosystems zu ermitteln (s. Kap 3.2).

Die Monetarisierung birgt einige Schwächen, die zum Teil ungenaue Werte hervorbringt und das Naturkapital tendenziell eher unterschätzt. Allgemein ist die Bewertung von Ökosystemen zwar häufig ein Argument für die Erhaltung von Ökosystemen, kann an sich Entscheidungen, die zur Beeinträchtigung eben dieser Leistungen führen, aber nicht unbedingt verhindern (Bsp. Abholzung tropischer Wälder). Grundsätzlich hat bei Entscheidungen, die ein Naturkapital von essentieller Bedeutung betreffen (z.B. Kohlenstoffspeicher), die Beachtung von Vorsorgegrundsätzen und sicheren Grenzwerten Priorität vor der ökonomischen Bewertung von Zielkonflikten (TEEB 2010).

- **Werte in Entscheidungsprozesse integrieren:** Die letzte Stufe des ökonomischen Ansatzes von TEEB umfasst die Anwendung von Instrumenten, die durch Anreize und Preissignale wirksam wird. Dazu können „Zahlungen für Ökosystemdienstleistungen, die Reform umweltschädlicher Subventionen, Steuererleichterungen für Erhaltungsmaßnahmen oder die Schaffung neuer Märkte für nachhaltig erzeugte Güter und Ökosystemleistungen“ gehören (TEEB 2010). Die Aufgabe für Entscheidungsträger besteht darin, die marktbasieren Lösungsstrategien sinnvoll einzusetzen und zu erkennen, wann welche Strategien den effizien-

testen Nutzen erbringen. TEEB bezieht unterschiedliche Massnahmengruppen ein: staatliche Interventionen, verbindliche Regeln, freiwillige Instrumente und Märkte.

Dort, wo ein stabiler kultureller Konsens über den Wert von Ökosystemdienstleistungen besteht und die wissenschaftlichen Zusammenhänge ausreichend geklärt sind, ist die Monetarisierung des Naturkapitals gut umsetzbar (TEEB 2010). Neben festgelegten Warenwerten (Vieh, Holz u.a.) lassen sich entsprechende Ansätze auch auf die Menge gespeicherten Kohlenstoffs oder die Bereitstellung von sauberem Wasser anwenden. Bevor jedoch eine ökonomische Bewertung überhaupt angewandt werden kann, müssen die natürlichen Prozesse (zu)erst biophysikalisch erforscht werden, was insbesondere bei den regulierenden Ökosystemdienstleistungen noch nicht vollständig erfolgt ist. Die folgende Grafik zeigt, dass die Wertermittlung von Naturgütern auf qualitativen Analysen und physischen Indikatoren beruht.

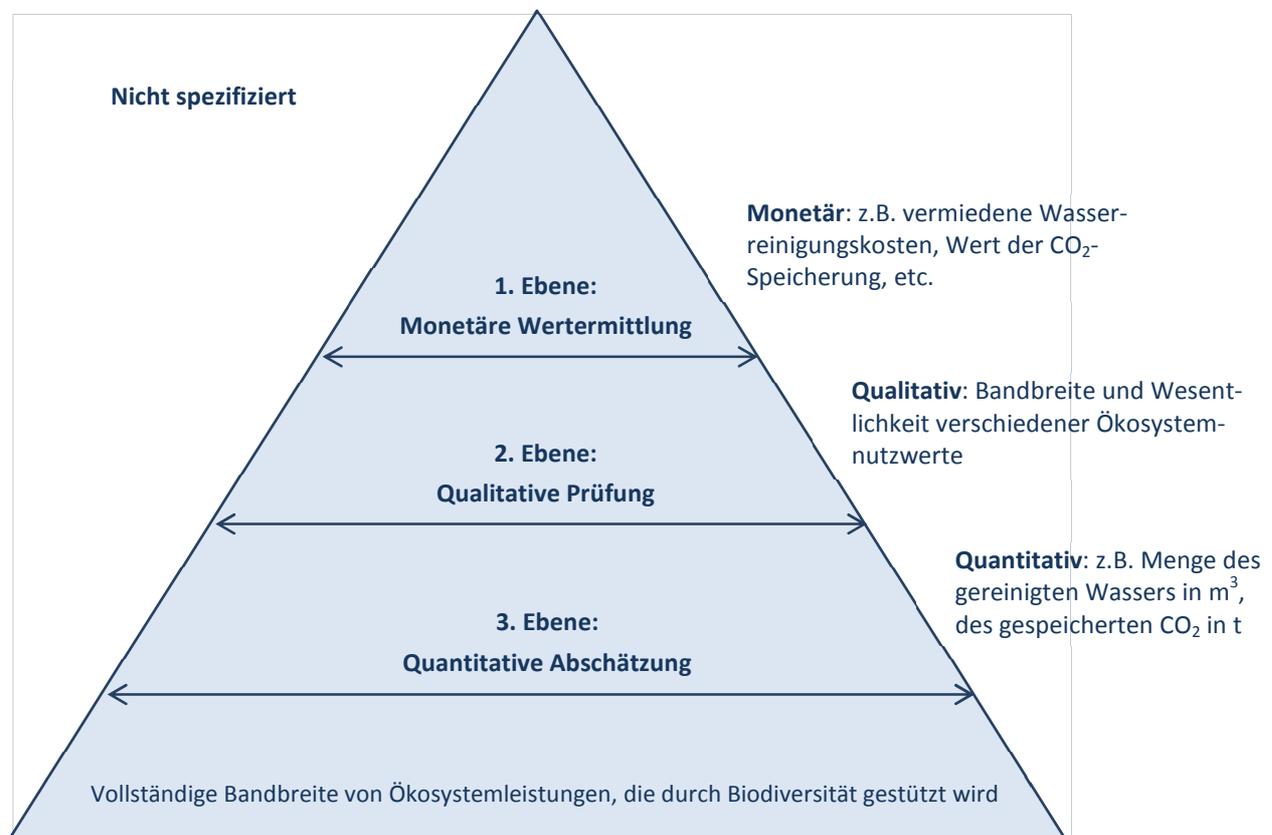


Abb. 3: Qualitative und quantitative Abschätzung von Ökosystemdienstleistungen (G. Wälchli, nach TEEB 2008).
Quelle: P. Brink, Workshop on the Economics of the Global Loss of Biological Diversity, März 2008, Brüssel.

Die monetäre Wertermittlung von Ökosystemleistungen lässt sich also erst vornehmen, wenn die zu Grunde liegenden biologischen und physikalischen Prozesse verstanden sind, die zu deren Bereitstellung führen (TEEB 2008). Die Messung der Quantität und Qualität stellen hierbei gleichermassen eine zentrale Schwierigkeit, jedoch auch eine Chance dar, den Wert von Ökosystemleistungen nicht ausschliesslich auf die Monetarisierung zu reduzieren.

3.3.1 Anwendung des Ansatzes auf Siedlungen

Die TEEB-Berichte enthalten neben möglichen Vorgehensweisen zur Ermittlung von monetären Zahlenwerten auch zahlreiche Fallbeispiele, die sich auf die vielfältigen Leistungen der Land-, Süsswasser- und Meeresökosysteme beziehen (TEEB 2010). Die ermittelten Ökosystemdienstleistungen beschränken sich dabei aber nicht ausschliesslich auf die Biome unberührter Wildnis, sondern gewinnen zunehmend auch im städtischen Kontext an Bedeutung. Der Synthesbericht von TEEB nennt als Fallbeispiel für die „Anwendung des Ansatzes auf Siedlungen“ unter anderem die Stadtverwaltung in Canberra, die insgesamt 400'000 Bäume pflanzen liess, um das Mikroklima zu regulieren, die Luftverschmutzung zu senken, den Kohlenstoff zu speichern und den Energieverbrauch der Klimaanlage zu reduzieren. Der damit verbundene Nutzen für die Stadt wird auf 20 – 67 Mio. US Dollar geschätzt; ausgedrückt als zusätzliche Nutzen oder eingesparte Kosten für den Zeitraum von 2008 bis 2010 (TEEB 2010).

Für Gewöhnlich wird das öffentliche Grün nur anhand der Pflege- und Unterhaltungskosten monetär erfasst (Sachs & Dujesiefken 2010). Dies vermittelt den Eindruck, dass Grünflächen in erster Linie viel Geld kosten und nur dann erschwinglich sind, wenn der Budgetplan der Stadtverwaltung solche Ausgaben vorsieht. Noch immer werden Grünflächen vielerorts als ‚Verschönerung‘ städtischer Siedlungen angesehen, die im Grunde entbehrlich sind und an sich eher ein Luxus-Gut darstellen. Der ökologische Wert der Stadtvegetation wird zumeist komplett ausser Acht gelassen (Sachs & Dujesiefken 2010). Dabei ist urbane Vegetation in Stadtkernen und belasteten Peripherien bedeutend: Pflanzen beschatten, kühlen, befeuchten Luft und binden Staub – städtische Hitzeinseln („heat-island effect“) werden abgeschwächt, der Wasserabfluss vermindert, die Luftqualität verbessert und das bodennahe Ozon (O₃) reduziert (Heymann et. al 2010). Angesichts des ohnehin schon extremeren Stadtklimas verkörpern Ökosystemdienstleistungen somit Lösungsansätze, die der lokalen Aufheizung und Luftverschmutzung entgegenwirken, wobei auch das regionale Klima von den positiven Effekten profitiert. Der ästhetische und erholende Nutzen von städtischen Grünflächen, erweitert die ökologischen Funktionen zudem um eine weitere Dimension und lässt die Lebensqualität in Städten signifikant ansteigen. Die Gesundheit der Stadtbewohner stellt in diesem Zusammenhang einen wichtigen Aspekt dar (TEEB 2010).

Es gibt verschiedene Verfahren, um Bäume und Grünanlagen in Siedlungen zu erfassen und zu bewerten. Baumkataster gehören wohl zu den verbreitetsten Instrumenten (Sachs & Dujesiefken 2010). Sie beschränken sich jedoch überwiegend auf Informationen, die hauptsächlich für das Grünflächenamt oder den zuständigen Baumpfleger von Bedeutung sind und beziehen sich zumeist vor allem auf die Verkehrssicherheit.

In den USA wurde hingegen bereits ein praxistaugliches Verfahren entwickelt, das die ökologischen Leistungen des öffentlichen Grüns bewertet (Sachs & Dujesiefken 2010). Die Rede ist

hier von i-Tree, einem Computerprogramm, welches verschiedene Ökosystemdienstleistungen von Bäumen in Zahlen ausdrückt und den zugehörigen monetären Geldwert errechnet. Ähnlich wie im Beispiel von Canberra wurde mittels i-Tree unter anderem auch in New York der Gesamtwert der Stadtbäume errechnet. Die Resultate von i-Tree sind jedoch differenzierter und beziehen sich auf den gesamten Baumbestand: Die 5.2 Mio. erfassten Stadtbäume New Yorks lagern in ihren Stämmen und Ästen insgesamt rund 1.35 Mio. Tonnen Kohlenstoff (\$24.9 Mio.); dazu kommen 42'000 Tonnen, die jährlich sequestriert werden (\$779,000 /Jahr). Die Energieeinsparungen der Gebäude, die insbesondere dank der Beschattung generiert werden (\$11.2 Mio./Jahr) und der dadurch vermiedene CO₂-Ausstoss (\$167,000 /Jahr), werden ebenfalls einberechnet. Insgesamt werden zudem 2'200 Tonnen Schadstoffe von den Bäumen absorbiert (\$10.6 Mio./Jahr). Zusammen mit dem strukturellen Wert der Gehölze (\$5.2 Mio.) entspricht der mit i-Tree ermittelte Gesamtwert der Stadtbäume New Yorks total 5'250 Mio. US Dollar.⁶

Wie die Zahlen genau zustande kommen und welche Methodik sich hinter dem Programm verbirgt, soll anhand einer praktischen Anwendung von i-Tree am Beispiel von Zürich aufgezeigt werden. Dabei werden die oben beschriebenen, theoretischen Ansätze mit dem Computermodell angewandt und das Verständnis von Ökosystemdienstleistungen weiter vertieft.

⁶ Nowak et. al (2007): Assessing Urban Forest Effects and Values. New York City's Urban Forest

3.4 Ökosystemdienstleistungen von Stadtbäumen

Bäume erfüllen eine Vielzahl von Leistungen und Funktionen, die je nach Definition und Fokus anders ausgelegt werden können. Da die Wertermittlung der Stadtbäume in Zürich im Rahmen dieser Arbeit mit i-Tree durchgeführt wurde, wurden für die nachstehenden Ausführungen die Literaturquellen von i-Tree herangezogen. Dabei beziehen sich die Kurzbeschreibungen ausschliesslich auf die Leistungen, die in Zusammenhang mit der Luftqualität und der CO₂-Problematik in Städten stehen und von i-Tree berechnet werden.



Abb. 4: Strassenbäume in Zürich (Foto G. Wälchli).

3.4.1 CO₂ – Reduzierung

Urbane Baumbestände können Kohlendioxid auf zwei unterschiedliche Arten reduzieren:

- Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff
- Energieeinsparungen durch Schattenwirkung und Windbarriere

Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff

Wie bei allen Pflanzen sind die Wachstumsprozesse mit der Aufnahme von Kohlenstoff verknüpft. Das Kohlendioxid (CO₂) gelangt bei der Photosynthese durch die Spaltöffnungen ins Blattinnere und wird nach einer Reihe von chemischen Vorgängen in Zucker, Zellulose und andere Stoffe umgewandelt, wobei das Sonnenlicht und das Wasser eine entscheidende Rolle spielen (Chaparro & Terradas 2009). Bäume reduzieren die CO₂-Konzentration der Luft demnach durch die Bildung von neuer Biomasse. Die Menge des gespeicherten CO₂ verhält sich

proportional zur Biomasse der Bäume, die wiederum vom Stammdurchmesser, von der Kronenfläche und der Blattdichte bestimmt wird (Chaparro & Terradas 2009).

Der Längen- und Dickenzuwachs findet bei laubabwerfenden Bäumen nur während der Vegetationsperiode statt und ist je nach Baumart durch die Witterung und die Wasserverfügbarkeit, sowie der Tageslänge abhängig (Bartels 1993). Die Kohlenstoffbindung bezieht sich demnach auf die jährliche Abscheidung von CO₂ (Sequestrierung), die sich im Zuwachs der Bäume widerspiegelt. Die Gesamtmenge des gespeicherten Kohlenstoffs entspricht somit der Summe der jährlich sequestrierten Menge Kohlenstoff und wird vom Zustand, Alter und von der Baumart bedingt (Chaparro & Terradas 2009). Gesunde Bäume mit grossen Stammdurchmessern sequestrieren mehr CO₂ als Bäume, die eine tiefe Vitalitätsstufe aufweisen (Nowak et al. 2007).

Energieeinsparungen

Bäume können den Energiehaushalt von Gebäuden verbessern, indem durch die Schattenwirkung und die Temperaturreduktion im Sommer oder durch die Blockierung kalter Winde im Winter weniger geheizt, bzw. weniger gekühlt werden muss (www.ufore.org 2012). Die richtige Platzierung der Bäume und der korrekte Abstand und Winkel zu den Gebäuden ist jedoch entscheidend für eine maximale Energieeinsparung (USDA 2007). Bäume können durch Beschattung im Winter (v.a. Immergrüne oder Koniferen) oder durch die Blockierung von Sommerbrisen auch einen negativen Effekt auf den Energieverbrauch haben.⁷

Die effektive CO₂-Reduktionsmenge durch die Gehölze wird von regionalen Unterschieden von Klima und Energiemix bestimmt (USDA 2007). Während in den USA mehrheitlich Kohlekraftwerke zur Energiegewinnung eingesetzt werden, erzeugt die Schweiz den Grossteil der Energie mittels Wasserkraft. Demnach entspricht eine Energieeinsparung in den USA einer grösseren CO₂-Menge als hierzulande.

⁷ Hinweise für eine optimale Platzierung können dem Gemeinde-Baumführer des USDA entnommen werden (2007).

3.4.2 Verbesserung der Luftqualität

Urbane Vegetation kann die lokale und regionale Luftqualität durch direkte und indirekte Wirkungen/Prozesse verändern. Es werden zwei Haupteffekte unterschieden:

- Temperaturreduktion
- Schadstoffbeseitigung

Temperaturreduktion

Die Temperaturreduktion durch Bäume wird durch diverse Faktoren hervorgerufen: Die Baumkronen beeinflussen die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit/Turbulenzen, sowie die Strahlungsabsorption und Wärmespeicherung, das Rückstrahlvermögen (Albedo), die Oberflächenstruktur (surface roughness) und die Höenschichtung (mixing-layer heights) (Nowak 2000c). Daneben trägt auch die Transpiration⁸ der Bäume zur Temperaturreduktion bei.

Die Schadstoffkonzentration hängt von den oben genannten lokalen physikalischen Faktoren ab: Da viele Schadstoffe oder ozonbildende Chemikalien temperaturabhängig sind, kann die Temperaturreduktion durch Bäume die Luftqualität verbessern (www.ufore.org 2012).

Schadstoffbeseitigung

Bäume entfernen gasförmige Luftschadstoffe primär durch die Aufnahme über die Stomata (Spaltöffnungen), wobei einige Gase auch an der Oberfläche der Pflanzen eingebunden werden. Im Inneren des Blattes diffundieren die Gase in interzellularen Zwischenräumen, wo sie von Wasserfilmen absorbiert und zu Säuren umgewandelt, oder mit der Innen-Blattoberfläche reagieren können (Nowak 2000c).

Die festen Bestandteile der Luftschadstoffe werden zumeist nur abgefangen und bleiben an der Oberfläche von Blättern oder der Rinde haften. Nur ein kleiner Teil der Schwebeteilchen dringt in den Baumkörper hinein. Die Partikel werden demnach nur vorübergehend fixiert und werden mit dem Regen abgewaschen, fallen mit Blättern oder Zweigen zu Boden oder gelangen durch Resuspendierung zurück in die Atmosphäre (Nowak 2000c).

Die Luftschadstoffabnahme durch Bäume ist von der regionalen Schadstoffkonzentration, von der Vegetationsperiode, der Niederschlagsmenge und anderen meteorologischen Variablen abhängig. Die Luftqualität verbessert sich, je grösser der Bedeckungsgrad der Bäume und des-

⁸ Stomatäre Transpiration: Verdunstung von Wasser über die Spaltöffnungen (von Pflanzen steuerbar, um Wasserverlust zu minimieren). Kutikuläre Transpiration: „das Schwitzen“ über gesamte Blattoberfläche (nicht steuerbar; von Kutikuladicke abhängig). (Wikipedia)

to kleiner die Höhenunterschiede (mixing-layer heights) im Baumbestand sind (Nowak 2000c). Die luftreinigende Wirkung kann aerodynamisch erfolgen, wenn der Baumkörper in der Windachse steht und Partikel auf diese Weise abgefangen oder aufgenommen werden können (Chaparro & Terradas 2009). Grosse, gesunde Bäume mit einem Stammdurchmesser von über 77 cm entfernen jährlich ca. 70-mal mehr Luftschadstoffe (1.4 kg/Jahr) als kleine gesunde Bäume mit <8 cm Stammdurchmesser (0.02 kg/Jahr) (Nowak 2000c).

Pflanzen reagieren unterschiedlich auf die Luftqualität; je nach Art und Reife des Baumes, der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit und der Belastung von bestimmten Schadstoffen. Luftschadstoffe können das Wachstum der Triebe an Keimlingen reduzieren und das Höhenwachstum von adulten Bäumen einschränken. Ausserdem kann die Blattfläche durch das Vorhandensein gewisser Schadstoffe aufgrund der Hemmung der Blattbildung, der Unterbindung der Expansion des Blattes oder der Beschleunigung des Blattfalls reduziert werden (Chaparro & Terradas 2009).

3.4.3 Negative Effekte von Stadtbäumen

Sollen die vielfältigen Funktionen von Stadtbäumen bezüglich Luftqualität und Klima möglichst ganzheitlich aufgezeigt werden, ist es erforderlich, nebst den positiven Wirkungen auch die negativen Effekte der urbanen Gehölze einzubringen (Nowak 2000c).

Das Ozon in der Troposphäre erzeugt zusammen mit anderen Verbindungen (Stickoxide, VOCs u.a.) photochemischen Smog, der besonders in den Sommermonaten durch die Erhöhung der Sonneneinstrahlung und die verringerte Luftbewegung eintritt und als rotbrauner Nebel in Städten sichtbar wird. VOCs (Volatile Organic Compounds) sind natürliche chemische Verbindungen wie ätherische Öle, Harze und andere Pflanzenprodukte und erfüllen zumeist wichtige Funktionen (z.B. die Anlockung von Bestäubern). Sie werden in unterschiedlichen Mengen von Bäumen abgegeben und können die Bildung von bodennahem Ozon (O_3) und Kohlenmonoxid (CO) verstärken (Chaparro & Terradas 2009). Die emittierte Menge VOCs ist abhängig von der Baumart, der Blattbiomasse, der Lufttemperatur, sowie anderen Umweltfaktoren und ist an die Reaktion von Ozon und Stickoxiden (NO_x) gebunden, die bei erhöhten Temperaturen verstärkt auftritt (Nowak et al. 2000b). Nach Nowak können in NO_x -armen Gebieten (z.B. in ländlichen Zonen) die flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) O_3 eliminieren. Da VOC-Emissionen durch hohe Temperaturen hervorgerufen werden und Bäume allgemein eine temperatursenkende Wirkung haben wird davon ausgegangen, dass ein hoher Bedeckungsgrad von Gehölzen die O_3 -Emissionen insgesamt reduzieren (Nowak et al. 2002). Zudem lassen sich mit Bäumen, die auf Parkflächen stehen, durch die Beschattung (Temperaturreduktion allgemein) zusätzliche VOC-Emissionen von Fahrzeugen vermindern (Nowak 2000c).

Die luftbelastenden Aufwendungen, die durch Pflege- und Unterhaltungsarbeiten von Stadtbäumen hervorgerufen werden, müssen ebenfalls beachtet werden, wenn zuletzt der Netto-Effekt der urbanen Baumbestände in Bezug zur Luftqualität vorliegen soll. Bei den Wartungsarbeiten werden dutzende Geräte und Fahrzeuge eingesetzt, die grösstenteils mit Benzinmotoren angetrieben werden und nebst Kohlendioxid auch VOC-Emissionen, Kohlenmonoxid, Stick- und Schwefeldioxide sowie Feinstaub ausstossen.

Auch die Zersetzungsprozesse von abgesägten Ästen oder ganzen Bäumen, die den gespeicherten Kohlenstoff zum Teil als gasförmiges CO₂ wieder an die Atmosphäre abgeben, sind in der Gesamtrechnung zu berücksichtigen, wobei die Geschwindigkeit der Freisetzung davon abhängt ob und wie das Holz wiederverwendet wird. Holzabfälle können als Mulch wiederverwendet werden oder als Energiequelle genutzt werden. Wenn die Energiegewinnung durch Biomasse eine kohlenstoffintensivere Energiequelle ersetzt, kann insgesamt eine Verringerung der atmosphärischen CO₂-Konzentration erzielt werden (USDA 2007).

4 i – Tree

Mit i-Tree wurde ein Computerprogramm entwickelt, das eine ganzheitliche Erfassung und Bewertung der strukturellen und funktionellen Eigenschaften urbaner Baumbestände anstrebt (itreetools.org). Durch die spezifischen Messresultate der Ökosystemdienstleistungen werden die vielfältigen Nutzen der Bäume quantifizierbar, wobei die Funktionen sowohl in bezifferbaren Messgrössen (Gramm, Tonnen u.s.w.), als auch in Geldwerten ausgedrückt werden können. Das i-Tree-Modell gilt derzeit als das umfassendste Werkzeug zur Analyse der städtischen Vegetation und liefert die detailliertesten Resultate in Bezug auf die Funktionen und Strukturen der Stadtbäume (Chaparro & Terradas 2009).

Die i-Tree-Software wurde allein in den USA bereits rund 6400-mal heruntergeladen (siehe Abb. 5). Neben New York wurde das Programm auch in anderen grossen Städten wie Chicago, Atlanta, Boston, San Francisco oder Washington angewendet (Chaparro & Terradas 2009). Zwei Drittel der Studien wurden in Nordamerika durchgeführt; wobei weltweit knapp 50 Städte verzeichnet sind, die in Kooperation mit lokalen Institutionen das Modell genutzt haben (Nowak et. al 2008): Beijing, Mexico City, Santiago de Chile, Porto Alegre, Barcelona und viele mehr, haben die Leistungen ihrer Bäume mit i-Tree beziffert. Die meisten Städte haben ihre Resultate publiziert oder sind gerade dabei, ihre Berichte zu verfassen (Chaparro & Terradas 2009).

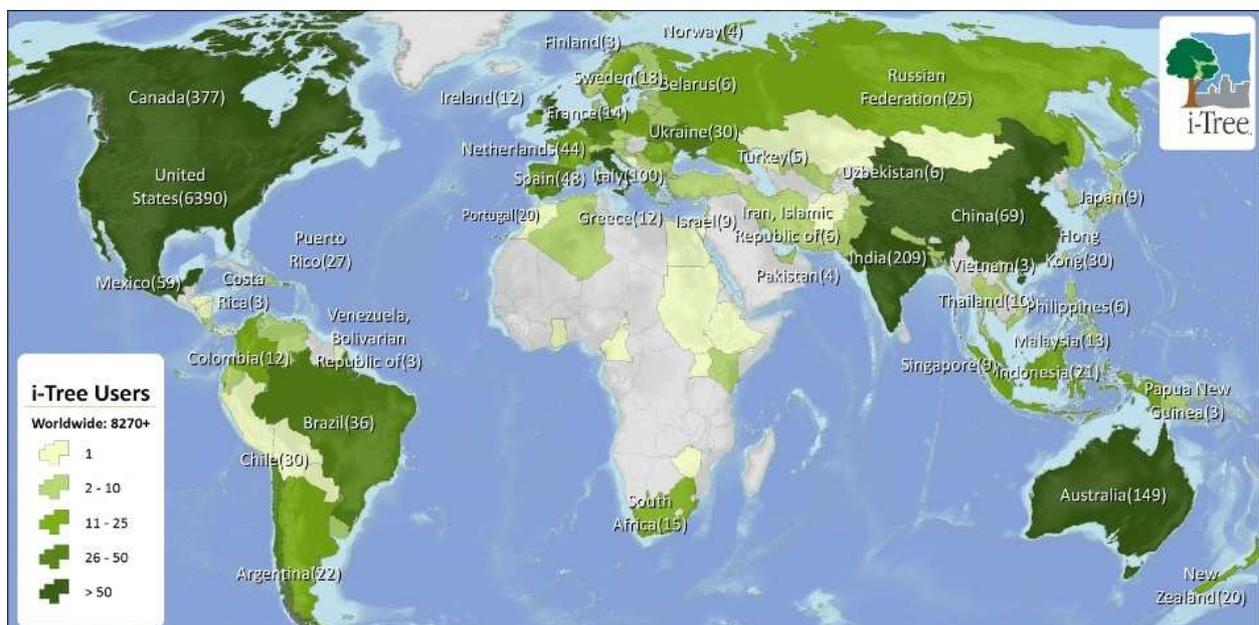


Abb. 5: i-Tree Benutzer Statistik (<http://www.itreetools.org/index.php>)

In der Schweiz sind insgesamt sechs Benutzer registriert, die i-Tree heruntergeladen haben. Dem Support von i-Tree sind keine Schweizer Untersuchungen bekannt, die eine Bewertung der Stadtbäume mit i-Tree durchgeführt haben.

Das Software-Paket von i-Tree wurde vom USDA Forest Service⁹ in Syracuse, New York entwickelt und in Kooperation mit diversen weiteren Organisationen¹⁰ realisiert (i-Tree Eco Users Manual (v.4) 2011). Das Programm wird nicht kommerziell vertrieben, sondern steht als Free-ware samt Anwendungsempfehlungen und technischem Support allen Interessierten kostenlos zur Verfügung. I-Tree wird sowohl von städtischen Grünflächenämtern, als auch von Privatpersonen oder Kommunen, von gemeinnützigen Organisationen, Umweltberatern oder Studenten genutzt (i-Tree Eco Users Manual 2011). I-Tree richtet sich bewusst an eine breite Nutzergruppe, sodass verschiedene Interessen und Bedürfnisse vertreten werden. Die standardisierte Methodik macht die Resultate der verschiedenen Benutzer zudem vergleichbar, was weitere Erkenntnisse liefern kann und für eine Anwendung im globalen Rahmen durchaus förderlich ist. Durch die laufende Testung der Software und dank Rückmeldungen der User, können laufend Verbesserungen getätigt werden, wobei nicht nur fachlich-methodische Ergänzungen, sondern zugleich auch die Nutzerfreundlichkeit bei der Anwendung des Programms gesteigert werden kann. I-Tree wurde durch Fachleute geprüft und von Experten begutachtet, sodass die Analyse- und Bewertungsinstrumente auf dem neusten Stand der Technik beruhen (itreetools.org).

Die monetäre Bezifferung der Ökosystemleistungen der Stadtbäume ermöglicht es, ganze Staaten, Städte oder auch einzelne Quartiere untereinander zu vergleichen. In den USA sind auf diese Weise bereits öffentlichkeitswirksame Wettbewerbe entstanden, wobei die gewonnenen Daten auch für Imagekampagnen eingesetzt werden.



Abb. 6: Plakative Öffentlichkeitsarbeit mit i-Tree: auf den Preisschildern sind die mit i-Tree ermittelten ökologischen Werte der Bäume aufgezeigt (Quelle: Sachs & Dujesiefken 2010).

⁹ U.S. Department of Agriculture, Washington DC

¹⁰ Davey Tree Expert Company, National Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists (sma), International Society of Arboriculture (ISA) und Casey Trees

Ausdrückliches Ziel von i-Tree ist es, die Bewertung und Analyse des innerstädtischen Baumbestandes zu erleichtern und die verschiedenen Akteure anzuregen und aufzufordern, den Wert und Nutzen der Stadtbäume auf eigene Faust zu ermitteln (itreetools.org). Damit verfolgt i-Tree den ‚bottom-up-Ansatz‘ der unter anderem auch von der UNO als strategische Vorgehensweise bei der nachhaltigen Stadtentwicklung empfohlen wird (UN-Habitat 2009): I-Tree stellt die Methoden und den wissenschaftlichen Rahmen zur Verfügung, der für die Messung der Ökosystemdienstleistungen erforderlich ist. Dadurch können nötige Informationen und Argumente gewonnen werden und Entscheidungsträger überzeugt werden, die Bedeutung von Bäumen angemessen zu beachten und in Planungsschritte zu integrieren. Die Etablierung der ökologischen Wertermittlung von Stadtbäumen und die Einbindung der Ergebnisse in stadtplanerische Entscheidungen, sind somit sowohl von wissenschaftlichen Fortschritten, als auch vom Einsatz und von den Initiativen „von unten“ in hohem Mass abhängig. Die eigentliche Ausführung der Analyse liegt letztlich in den Händen der Akteure, die das Programm benutzen.

4.1 i – Tree Applikationen

Seit der Einführung des Programms im August 2006 wurde i-Tree laufend erneuert und mit weiteren Applikationen ergänzt. Die aktuelle Version (Software Suite v 4.0) enthält insgesamt neun verschiedene Softwares, die je spezifische Aspekte beleuchten und die Beurteilung urbaner Gehölze anhand verschiedener Methoden vornehmen:¹¹

- **i – Tree Eco** ist eine Adaptation des UFORE-Modells (Urban Forest Effects Model)¹² und bildet das eigentliche Kernstück von i-Tree (i-Tree-Support 2011). Es liefert ein umfassendes Bild des gesamten Baumbestands und beruht auf Felddaten, die entweder durch vollständige Bestandsaufnahmen, oder mit stichprobenartig ausgewählten Plots erhoben werden (itreetools.org). I-Tree Eco wurde entwickelt, um Wissenschaftler und ‚städtische Forstmanager‘ mit einem Instrument auszustatten, das die Quantifizierung und Bewertung verschiedener Ökosystemdienstleistungen und Forststrukturen ermöglicht und meteorologische, sowie lokale Schadstoffmessungen einbezieht (i-Tree Eco Users Manual). Das Modell berechnet folgende Parameter:
 - stündliche Schadstoffbeseitigung durch urbane Gehölze (SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀)¹³
 - stündliche Beseitigung von Kohlenmonoxid (CO)

¹¹ Wo nicht anders vermerkt, stammen alle Informationen von itreetools.org/applications, sowie von der summarischen Kurzfassung „Tools for assessing and managing community forests“ (itreetools.org/resources/content/i-Tree_v4_summary.pdf)

¹² UFORE (Urban Forest Effects Model): ein in den Neunzigerjahren entwickeltes Computerprogramm, das zur Darstellung der Beiträge des öffentlichen Grüns entwickelt wurde und die wissenschaftliche Grundlage von i-Tree bildet.

¹³ die potentiellen negativen Effekte der flüchtigen organischen Verbindungen (BVOC), die auch von Bäumen stammen können, werden einberechnet.

- Gesamtmenge des gespeicherten Kohlenstoffs im gesamten Baumbestand
 - Nettomenge des jährlich sequestrierten Kohlenstoffs
 - urbane Forststruktur, einschliesslich Artzusammensetzung, Bedeckungsgrad, Dichte, Gesundheit, Biomasse, Bodenbewuchs (Gebüsche u.a.)
 - Effekt von Bäumen auf Energiehaushalt von Gebäuden (einschliesslich Reduktion des CO₂-Ausstosses)
 - Anfälligkeit gegenüber Schädlingen
 - Komposition der Baumarten (inkl. exotische Spezies u.a.)
- **i-Tree Streets** (früher STRATUM)¹⁴ ist speziell für Strassenbäume konzipiert worden und richtet sich in erster Linie an Stadt- oder Kommunalverwaltungen, die den monetären Wert von ökologischen und ästhetischen Nutzen von Bäumen in die Gesamtrechnung einfließen lassen wollen. Dabei werden Kosten einbezogen, die bei der Stadt für Pflege- und Unterhaltungsarbeiten von Stadtbäumen anfallen, sodass eine Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen erfolgt und bestehende Management-Abläufe überprüft werden können. Auf diese Weise lassen sich Ressourcen wirksamer verwalten und Prioritäten setzen, die die Ausarbeitung neuer Richtlinien vereinfachen können.

Die Berechnungsmodelle beruhen auf Erfahrungswerten US-amerikanischer Klimaregionen; im Gegensatz zu Eco werden demnach weder lokale Schadstoffmessungen, noch meteorologische Daten ins Programm eingespeist. Streets wird dadurch zwar benutzerfreundlicher, büsst im Gegenzug jedoch an Genauigkeit ein und ist für Länder ausserhalb der USA nicht konfiguriert.

Wie bei Eco können sowohl Stichproben, als auch vollständige Bestandsaufnahmen als Datengrundlage dienen, um die Verbesserung der Luftqualität, die CO₂-Reduktion, die Aufnahme von Regenwasser und den gesteigerten Immobilien-/ Grundstückswert zu beziffern.

- **i-Tree Hydro** (beta) simuliert die Auswirkungen/Effekte von veränderten Strukturen im Baumbestand (Deckungsgrade u.a.) auf die Strömungs- und Wasserqualität. Hydro ist eine neuere Anwendung auf die in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen wird.
- **i-Tree Vue** ist ein Tool, das die Flächenbedeckung der Baumkronendächer anhand der „National Land Cover Data Maps“ ermitteln (für US-Amerikanische User frei zugänglich) und grobe Schätzungen einiger Ökosystemdienstleistungen vornehmen kann.
- **i-Tree Design** (beta) ist mit Google Maps verlinkt und ermöglicht es, den Effekt, den Bäume aufgrund ihrer Grösse, Position und Spezies auf den Energieverbrauch von Gebäu-

¹⁴ Street Tree Resource Analysis Tool for Urban Forest Managers

den haben, zu eruieren. Es ist ein einfaches online-Instrument für die Erfassung einzelner Bäume auf Parzellenebene und ist ebenfalls eine neuere Anwendung.

- **i-Tree Canopy** bietet ein schnelles, einfaches online-Tool für die Erstellung einer statistisch stichhaltigen Schätzung der Flächenbedeckung. Die Bestimmung erfolgt mit Luftbildern, die auf Google Maps verfügbar sind. Sie können von Forstwarten und Baumpfleger für die Überprüfung von Baumkronendeckungsgraden und verfolgten Strategien und Zielen herangezogen werden.
- **i-Tree Species** basiert auf neueren Erkenntnissen über die ökologischen Vorteile der einzelnen Baumarten und wurde entwickelt, um den Anwendern die geeignetsten Baumarten für die gewünschten Ökosystemdienstleistungen, sowie den vorliegenden geografischen Raum vorzuschlagen. Species ergänzt vorhandene Baum-Auswahl-Programme, die sich zumeist auf klimatische oder ästhetische Aspekte beschränken.
- **i-Tree Storm** erstellt eine Standard-Methode zur Beurteilung von grossflächigen Schäden nach heftigen Stürmen.
- **i-Tree PED** „das integrierte Schädlingsbekämpfungs- Detektionsmodul“ ist ein standardisiertes Protokoll für die Beobachtung potentieller Gefahren durch Insekten oder Krankheiten.

4.2 Anwendung des Programms

Wie aus der oben stehenden Zusammenfassung der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von i-Tree erkennbar wird, ist das Spektrum und das Einsatzgebiet des Programms sehr gross. Eine Beschränkung auf einzelne Teilbereiche ist deshalb notwendig. Aufgrund des thematischen Schwerpunkts, beschränkt sich die praktische Anwendung von i-Tree auf die Instrumente, die den Fokus auf Luftschadstoffe und Kohlendioxid richten.

I-Tree Eco und i-Tree Streets sind die beiden Applikationen, die sich für das Vorhaben, Luftschadstoffe zu quantifizieren und den daraus resultierenden Wert der Stadtbäume zu ermitteln, am besten eignen. Beide Programme weisen für Benutzer ausserhalb der USA jedoch Lücken oder Einschränkungen auf. Die **International Limitations**, die sich bei der Anwendung des Programms ergaben, werden hier kurz dargelegt:¹⁵

- Air Pollution Data: Die Berechnungen von i-Tree Eco basieren auf den effektiv gemessenen Schadstoffkonzentrationen vor Ort und sind in den USA für jede Region bereits im Programm gespeichert. Für Benutzer ausserhalb der USA müssen die benötigten Daten bei der zuständigen, lokalen Behörde erfragt werden.¹⁶ Die stündlichen Messwerte von Koh-

¹⁵ Wo nicht anders vermerkt, stammen alle Informationen vom i-Tree Eco Users Manual, Version Juli 2011.

¹⁶ In der Schweiz beim Bundesamt für Umwelt (BAFU)

lenstoff (CO), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Ozon (O₃) und Feinstaub (PM10) müssen für ein ganzes Jahr vorliegen. Die Schadstoffkonzentrationen werden zusammen mit den erhobenen Daten der Bestandsaufnahme eingereicht, damit diese vor Ort vom i-Tree Team aufeinander abgeglichen werden können und die quantitative Ermittlung erfolgen kann. (Das Users Manual von i-Tree Eco liefert eine genaue Anleitung, wie die Schadstoffmessdaten formatiert werden müssen.)

- Processing Time: Durch die manuelle Abgleichung der Daten und die zusätzlichen Formattierungen, die vor Ort vom US-Forest Department vorgenommen werden müssen, entstehen bei der Anwendung von i-Tree Eco Wartezeiten von 2 bis 6 Monaten.
- Carbon Valuation: I-Tree Eco liefert für Projekte innerhalb der USA für jeden einzelnen Baum einen Dollarbetrag, der die Kohlenstoffresorption monetär quantifiziert. Da die monetäre Wertermittlung auf der Methodik der strukturellen Eigenschaften beruht und diese sich wiederum spezifisch auf die USA beziehen, werden für Projekte ausserhalb der USA keine Dollarwerte berechnet.

Auch bei i-Tree Streets basiert die monetäre Wertermittlung auf US-amerikanischen Modellen und Preisen, die sich auf staatliche oder regionale Strompreise beziehen. Die Dollarwerte werden jedoch auch bei internationalen Projekten berechnet.

- Pollution removal valuation: der monetäre Wert der Schadstoffbeseitigung durch Bäume wird mit dem Medianwert der Externalitäten angegeben, die in den USA für jeden analysierten Schadstoff beziffert sind (Nowak et al. 2008). Die Schätzungen werden neu in Dollars pro Tonne angegeben und wurden kürzlich an die Werte von 2007 angepasst, die sich am Erzeugerpreisindex orientieren. Internationale Publikationen werden derzeit ausgewertet, um die Wertermittlung von Schadstoffen zukünftig genauer bestimmen zu können (i-Tree Eco Users Manual 2011).
- Charts and tables: Viele Grafiken und Tabellen sind für internationale i-Tree Eco-Benutzer nicht verfügbar. Die Resultate beschränken sich auf die Kohlenstoffresorption eines Jahres in Gramm (der monetäre Wert wird nicht berechnet) und die jährliche Schadstofffixierung, die sowohl quantitativ als auch monetär ermittelt wird (insgesamt zwei Tabellen pro Untersuchungsfläche). Grafiken, die die stündlichen oder monatlichen Leistungen der Bäume aufzeigen und in Zusammenhang mit der lokalen Schadstoffkonzentration stehen, können bei internationalen Projekten beispielsweise nicht abgerufen werden. Daneben fallen viele weitere Funktionen weg, die den Eco-Benutzern innerhalb der USA zur Verfügung stehen und die Interpretation und Nachvollziehbarkeit der Resultate erheblich erleichtern.
- Species list limitations: gewisse Baumarten sind in der Datenbank nicht aufgeführt, sodass in manchen Fällen stattdessen Baumarten mit analogen Eigenschaften ausgewählt werden müssen, die in Grösse, Struktur oder Blattart ähnlich sind wie die erfasste Baumart. Eine

Methodik für die Ergänzung neuer Baumarten in die Datenbank wurde noch nicht entwickelt. (Eco & Streets)

- Structural value: i-Tree Eco verwendet die Berechnungsformel vom Council of Tree and Landscape Appraisers (CTLA) um den strukturellen Wert von Bäumen zu bestimmen. Andere internationale Methoden zur Ermittlung des Erholungswerts von Bäumen können mit i-Tree nicht generiert werden, da die Daten hierzu fehlen. Der strukturelle Wert von Bäumen kann mit dem Programm für internationale Projekte somit nicht abgeschätzt werden.
- Energy effects: das Tool ist speziell auf die nordamerikanischen Klimata, den Baustil, den Energieverbrauch und die Emissionsfaktoren der USA abgestimmt worden. Das Werkzeug wurde zwar auch schon von Europäischen Städten genutzt, die ein ähnliches Klima aufweisen, doch rät i-Tree davon ab, da die Schätzungen sehr ungenau werden. Die Nutzer werden deshalb angehalten, zuerst die eigenen Energiemärkte zu prüfen und erst dann die Wechselbeziehung „Baum – Gebäude“ mit Daten zu versehen.

Mit i-Tree Streets können die Energieeffekte dennoch eingesehen werden. Da die Dollarbeträge auf der Grundlage von U.S. amerikanischen Berechnungsmodellen beruhen, sind sie jedoch entsprechend ungenau.

Das i-Tree Team kooperiert derzeit mit internationalen Partnern, um die Einschränkungen möglichst zu minimieren und die Funktionen des Modells zukünftig auch ausserhalb der Vereinigten Staaten uneingeschränkt zur Verfügung zu stellen.

Für Benutzer ausserhalb der USA bietet der Support von i-Tree professionelle Hilfe an. Der Support ist per Email erreichbar und steht sowohl bei der praktischen Programmanwendung, als auch bei allgemeinen Fragen über i-Tree weltweit zur Verfügung. Das Support-Team hat sich bei der Durchführung des Projekts als sehr hilfreich und zuverlässig erwiesen und Emails in der Regel innert wenigen Tagen beantwortet.

4.2.1 Vergleich von i-Tree Eco und i-Tree Streets

Vordergründig erscheint i-Tree Streets für die Untersuchung in Zürich geeigneter: Die internationalen Einschränkungen beziehen sich mehrheitlich auf die Benutzung von Eco. Auch die zeitlich aufwändige Beschaffung und Bearbeitung der lokalen Schadstoffmessungen fällt bei Streets weg, wodurch die Wartezeiten, die sich bei der Abgleichung der Messdaten in Syracuse ergeben, umgangen werden können. Das Verfahren bei der Bestandsaufnahme ist zudem weniger detailliert und somit zeitsparend. Ferner ist die Anwendung des Programms mit Streets einfacher und da alle Grafiken und Tabellen nach Eingabe der erforderlichen Daten sofort einsehbar sind, weitaus bequemer. Dagegen beruhen die Resultate von i-Tree Eco auf genaueren Messmethoden und auf Daten, die die lokalen Bedingungen widerspiegeln. Die Aussagen, die

sich aus den Resultaten von Eco gewinnen lassen, sind dadurch fundierter und die Quantifizierung der Leistungen aufgrund tatsächlich gemessener Baumparameter adäquater und subjektbezogen. Zudem ist Streets vordergründig als Managementwerkzeug entwickelt worden, das eine Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen von Stadtbäumen beabsichtigt und nachhaltige, strategische Planungskonzepte vorantreiben will. Eine Anwendung von Streets macht folglich vor allem dann Sinn, wenn die Ausgaben des städtischen Grünflächenamts vorliegen. Sollen bedeutungsvolle Erkenntnisse gewonnen werden, werden bei Streets demnach viele Daten benötigt, die im Rahmen dieser Bachelorthesis nicht zur Verfügung standen.

Tabelle 2: Vergleich von i-Tree Eco und i-Tree Streets

Kriterien	i-Tree Eco	i-Tree Streets
Internationale Einschränkungen	ja	ja
Lokale Schadstoffmessdaten	erforderlich	-
Lokale Klimadaten	erforderlich	-
Wartezeiten	ja	nein
Bestandsaufnahme	aufwändig	-
Genauigkeit der Resultate	gut	ungenügend
Monetäre Wertermittlung	nur bei Schadstoffen	uneingeschränkt
Resultate (Menge)	limitiert	unlimitiert; grosse Datenmenge
Programmanwendung allg.	aufwändig	wenig aufwändig
Lokale Basisdaten*	-	empfohlen

* Pflegekosten, Grundstücks-/Immobilienwerte, Energiepreise, Wasserpreise (BAFU), ermittelte Externalitäten (für jeden Schadstoff), u.a.

Die Gegenüberstellung von i-Tree Eco und Streets zeigt, dass eine rein summarische Abwägung der Vor- und Nachteile keine zufriedenstellende Entscheidung liefert. Beide Programmapplikationen weisen Einschränkungen auf und bezeugen auf unterschiedliche Weise, dass sie für eine Anwendung in der Schweiz (noch) nicht vorgesehen sind. Da i-Tree Eco jedoch bereits öfter ausserhalb der USA eingesetzt wurde und demnach mehrere internationale Untersuchungen vorliegen, macht es Sinn, die bereits gewonnenen Erfahrungen auszunutzen. Desweiteren riet der Support von i-Tree klar davon ab, Streets bei internationalen Projekten zu verwenden.

Das ausschlaggebende Kriterium war zuletzt der Genauigkeitsfaktor und die Aussagekraft, die bei Eco für Untersuchungen ausserhalb der USA als deutlich höher einzustufen sind. Die vorliegende Arbeit richtet den Schwerpunkt bei der Vorgehensweise und Methodik deshalb auf i-Tree Eco. Um die oben beschriebenen Nachteile der Applikation jedoch partiell kompensieren zu können, wurden die Messdaten der Bestandsaufnahme zusätzlich mit Streets berechnet,

sodass nicht gänzlich auf die ergänzenden Programmfunktionen von Streets verzichtet werden musste. Auf die zugrunde liegenden Berechnungsmodelle von Streets wird jedoch nicht näher eingegangen.

4.2.2 Phase I: Planung und Vorbereitung der Bestandsaufnahme

Für die Methodik bei der Bestandsaufnahme in Zürich waren insbesondere die limitierenden Faktoren von Belang. Der beschränkte Zeitrahmen, der sich bei einer Bachelorarbeit zwangsläufig ergibt und die ‚international limitations‘, die ausserhalb der USA unvermeidlich sind, haben das Vorgehen massgeblich bestimmt. Nach eingehender Auseinandersetzung mit den verschiedenen Manuals und Papers von i-Tree Eco und Streets und nach Absprache mit dem Support von i-Tree, konnte eine auf die Zielsetzung abgestimmte Methode ausgearbeitet werden, die sowohl die zeitlichen, als auch die technischen Einschränkungen berücksichtigt.

Bevor mit der Bestandsaufnahme begonnen werden konnte, mussten im Vorfeld wichtige Grundsatzentscheidungen getroffen werden:

1) Bestimmung der Untersuchungsfläche

Eine Bewertung mit i-Tree (Eco oder Streets) kann sich auf eine ganze Stadt, auf ein bestimmtes Quartier, einen Park oder auch nur auf einen kleinen Hinterhof beziehen. Unabhängig von der Fragestellung, sind die zeitlichen, personellen, und fachlich-technischen Ressourcen frühzeitig abzuklären und bei der Bestimmung der Untersuchungsfläche zu berücksichtigen.

2) Tools/ Werkzeuge

Es stehen verschiedene Instrumente zur Verfügung, um die Daten zu erfassen. PDA-Applikationen sind mit i-Tree kompatibel und können, falls die entsprechenden Geräte¹⁷ zur Verfügung stehen, für eine schnelle Übertragung in die i-Tree-Software verwendet werden.

Werden die Daten in Papierformulare eingetragen, liefert das Handbuch von i-Tree Eco die nötigen Informationen für das korrekte Einspeisen der Messungen.

3) Felddaten

Bei Bedarf können weitere, optionale Informationen erfasst werden: Der Energieverbrauch von Gebäuden, der Ökosystemdienstleistungs-Beitrag von Gebüsch und die zur Verfügung stehende, potentielle Bepflanzungsfläche. Jede zusätzliche Variable vertieft und verbreitert die Analyse, erhöht jedoch auch den zeitlichen Aufwand (und die Kosten) der Studie.

¹⁷ PDAs, smart phones, Trimble dataloggers, etc.

4) Bestimmung des Verfahrens bei der Bestandsaufnahme

Je nach Zielsetzung ist entweder die Stichprobenmethode mit einer Reihe von Probeflächen (series of sample plots) oder die vollständige Bestandsaufnahme (complete inventory) vorzuziehen. Bei den meisten Projekten, die mit i-Tree Eco durchgeführt werden, wird die Stichprobenmethode angewandt (i-Tree Support 2011). Je nach Grösse der Untersuchungsfläche kann es aber auch sinnvoller sein, eine vollständige Bestandsaufnahme vorzunehmen, da dadurch viele Ungenauigkeitsfaktoren wegfallen und die Resultate insgesamt genauer werden. Doch je grösser die Untersuchungsfläche, desto aufwändiger und zeitintensiver die Datenerhebung, da jeder einzelne Baum gemessen werden muss. Ein weiterer Nachteil der vollständigen Bestandsaufnahme ist, dass gewisse Programmfunktionen von i-Tree (Eco) wegfallen [siehe unter 3) Felddaten]. Die Stichprobenmethode macht indes nur dann Sinn, wenn es sich bei der Untersuchungsfläche um ein grosses Gebiet handelt (z.B. eine ganze Stadt) und entsprechend viele Probeflächen (Plots) untersucht werden können. Da der Standardfehler von der Anzahl Plots abhängt und deshalb bei zu geringer Dichte keine repräsentativen Resultate zustande kommen, steigt auch bei dieser Methode der zeitliche Aufwand bedeutend an, je grösser die Untersuchungsfläche ist.

Im Folgenden werden die Hintergründe und Überlegungen kurz erläutert, die die Vorgehensweise bei der Bestandsaufnahme in Zürich bestimmt haben.

Die Stichprobenschichtung (Stratified Sample Method¹⁸) liefert die präzisesten Resultate und erlaubt es, verschiedene Landnutzungstypen miteinander zu vergleichen (z.B. Vergleich der Effekte von Bäumen in Industrie- und Wohngebieten). Dies setzt jedoch voraus, dass die Nutzungstypen im Vorfeld definiert und die Stadt in die gewünschten Zonen eingeteilt wird. (S. Abb. 7) Ausserdem werden die Privatgrundstücke bei der Sampling-Methode einbezogen, sodass bei der Vermessung der Bäume jeweils zuerst die Erlaubnis eingeholt werden muss, um das Grundstück betreten zu können. Auch die Reisezeit und Orientierung/Lokalisierung bei der Feldarbeit sollte nicht unterschätzt werden und muss, insbesondere bei einem knapp bemessenen Zeitrahmen, schon im Vorfeld einkalkuliert werden (i-Tree Eco Users Manual 2011).

¹⁸ Je nach Ziel und Zweck der Untersuchung, wird zwischen Pre- und Post-Stratification unterschieden. Detaillierte Informationen dazu finden sich in der Literatur (Nowak et. al: Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services (2008), S. 347-349, sowie i-Tree Eco Users Manual (Juli 2011) S. 6-10 und Appendix 1, S. 54-79).

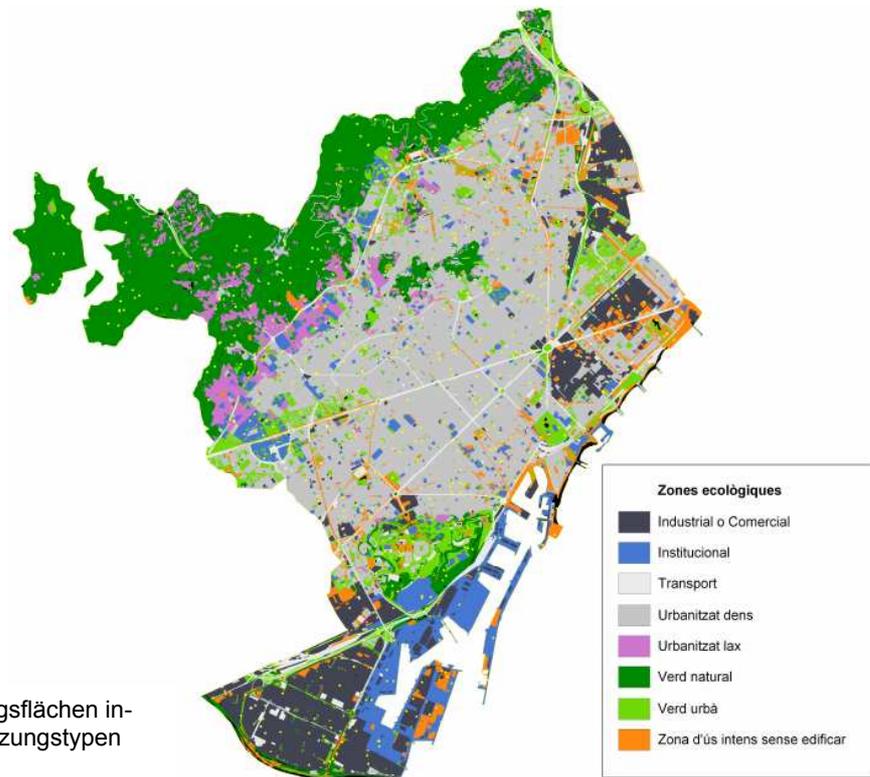


Abb. 7: Verteilung der Untersuchungsflächen innerhalb der verschiedenen Landnutzungstypen am Beispiel von Barcelona.

Quelle: Chaparro & Terradas (2009)

Pro Stadt werden für Gewöhnlich mindestens 200 Plots aufgenommen. Die empfohlene Probenflächen-Grösse beträgt 0.1 Acre, also etwa 400 m² (Radius 11.3 m) (Nowak et. al 2008). Für Zürich, die mit nur 90 km² flächenmässig nicht als Grossstadt bezeichnet werden kann, würden nach Angaben vom i-Tree Support 30 Plots reichen. Da bei einer Stichprobenschichtung ein Minimum von 20 Plots pro Stichprobe (Strata) vorgegeben ist, wäre eine ungeschichtete Zufallsstichprobe (simple unstratified random sample) die einzige auf Plots basierende Bestandsaufnahme, die in Zürich durchgeführt werden könnte. Ohne Stratifikation fallen jedoch die Funktionen mit den Landnutzungstypen weg. Ferner würde der Standardfehler bei über 30% liegen, wenn nur 30 Plots erfasst würden (s. Abb. 8). Aus diesen Gründen sind die Sampling-Methoden für die vorliegende Untersuchung als ungeeignet zu erachten.

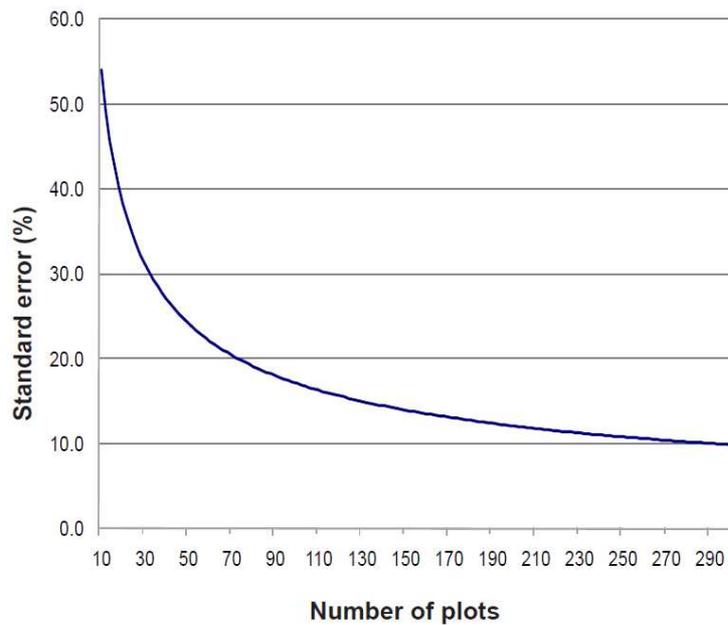


Abb. 8: Standardfehler in Prozent in Abhängigkeit der Anzahl Plots. Quelle: i-Tree Eco Users Manual (Juli 2011)

Die ursprüngliche Idee, die Ökosystemdienstleistungen des gesamten Baumbestands von Zürich zu bewerten, ist im Rahmen einer Bachelorarbeit nicht realisierbar. Studien, die den Wert von allen Bäumen einer Stadt bestimmen, werden lange im Voraus geplant und in monatelanger Teamarbeit durchgeführt (i-Tree Support 2011). Das Untersuchungsgebiet in Zürich wurde deshalb auf ausgesuchte Baumbestände eingegrenzt. Insgesamt wurden fünf Baumalleen und ein kleiner Park in Zürich untersucht.

4.2.3 Phase II: Bestimmung der Untersuchungsflächen in Zürich

Bei der Bestimmung der Untersuchungsflächen wurden anfänglich verschiedene Möglichkeiten in Betracht gezogen. Denn je nach Auswahlkriterien können andere Aussagen und Informationen über die Funktionen der Bäume dazugewonnen werden, sodass mit der Wahl der Untersuchungsflächen letztlich die Art der Erkenntnisse mitgesteuert wird.

Aufgrund einer Reihe von Überlegungen wurde der Fokus auf Strassenbäume gerichtet. Nicht nur, weil sie zahlenmässig die anderen Baumtypen in Zürich übertreffen, sondern auch, weil sie sich direkt an der Quelle der schädlichen Emissionen befinden und ihre oft unbefriedigende Vitalität von den belastenden Stadtverhältnissen zeugt (Grün Stadt Zürich 2011). Ausserdem können mit der Erfassung von Strassenabschnitten verschiedene Stadtteile integriert und die unterschiedlichen Standortbedingungen je nach Strassenbreite, Verkehr und allgemeinen Einflussfaktoren einbezogen werden. Die Baumalleen können zudem so ausgewählt werden, dass sie eine möglichst repräsentative Strassenbaumsituation der Stadt Zürich darstellen. Auf diese Weise sind Vergleiche und mit Vorsicht zum Teil auch gewisse Rückschlüsse auf die ganze Stadt denkbar.

Die Untersuchungsgebiete wurden dank freundlicher Genehmigung von Grün Stadt Zürich mit Hilfe des Baumkatasters bestimmt. In einem ersten Schritt ging es darum, einen Überblick über die Stadtbäume zu gewinnen und die mit GIS erfassten Daten einzuordnen: Auf dem Stadtgebiet von Zürich sind insgesamt 64'117 Bäume vom Grünflächenamt erfasst. Jeder Baum verfügt über eine ID, eine Baumnummer mit zugehörigem Vermessungsbezirk und Strassennamen, sowie genauen Koordinaten. Neben Gattung und Art sind bei einigen Bäumen auch Höhe, Stammumfang und Kronendurchmesser eingetragen. Bei einer Minderheit der Bäume ist auch das Pflanzjahr aufgeführt, wobei es sich bei den Zahlen hauptsächlich um Schätzungen handelt. Die Tabellenfelder der Pflegemassnahmen (Kappung, Fällung u.a.) und der Vitalitätsstufe sind selten ausgefüllt.

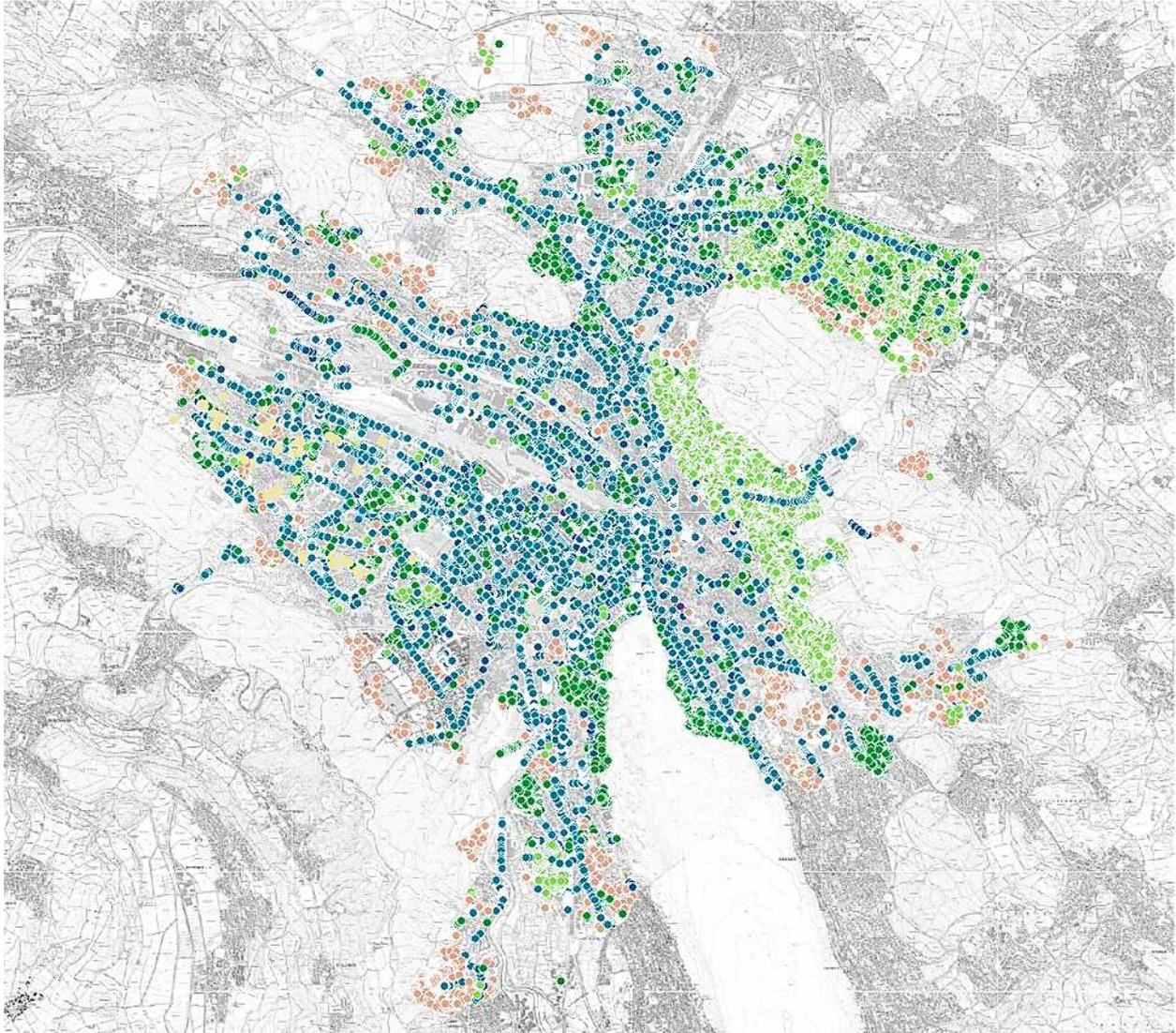


Abb. 9: GIS- Karte des Baumkatasters von Grün Stadt Zürich. Legende: blau=Strassenbaum, dunkelgrün = Grünanlage, hellgrün = Privatbäume, braun = Obstbäume, gelb = Schulanlagen (Quelle: Grün Stadt Zürich und Universitätsrechenzentrum Basel)

Anhand der Daten von Grün Stadt Zürich konnte eine erste Vorauswahl getroffen werden, wobei die Baumgrösse, die Baumart und der Standort die wichtigsten Auswahlkriterien waren. Es wurde darauf geachtet, dass die Bäume weder zu gross/qualitativ, noch zu jung/klein sind und möglichst gut miteinander vergleichbar sind. Die Standorte wurden bewusst in verschiedenen Teilen von Zürich gewählt, sodass sowohl zentral gelegene, als auch am Stadtrand wachsende Bäume erfasst wurden. Ausserdem wurden ausschliesslich Baumreihen in Betracht gezogen, die aus nur einer Baumart bestehen (Reinbestände), damit die gewonnenen Resultate mit i-Tree auch Aufschluss über artspezifische Unterschiede bei den Ökosystemdienstleistungen geben können.

In einem zweiten Schritt wurden die Bäume mit Street View von Google Maps (www.google.com/streetview) am Bildschirm betrachtet, um einen ersten Eindruck über den Zustand der Baumreihen und die Standortverhältnisse zu erhalten. Die Strassenabschnitte lies-

sen sich auf diese Weise bequem vom Schreibtisch aus bestimmen und mit dem Gis-Plan abgleichen, sodass die Feldarbeit dank Kartenausschnitt und zugehöriger Attributtabelle von Grün Stadt Zürich erleichtert wurde. Diese Vorgehensweise wurde der Begehung vor Ort aus Zeitgründen vorgezogen.

Insgesamt wurden fünf Strassenabschnitte bestimmt, die je 25 Bäume umfassen (die Anzahl Bäume pro Untersuchungsfläche wurde von den Vermessungsformularen von i-Tree übernommen). Es wurde speziell auf jüngere und mittelgrosse Baumalleen abgezielt, die eine einheitliche Altersverteilung aufweisen. Tatsächlich konnte jedoch bei allen gesichteten Baumreihen keine einzige gefunden werden, bei der durchgehend alle 25 ursprünglich gepflanzten Bäume noch lebten. Die Stammdurchmesser variiert(en) zwischen 5 und 80 cm, wobei es sich sowohl bei den kleinsten, als auch bei den grössten Gehölzen um Ausreisser handelt. Die Mehrzahl der untersuchten Bäume weist einen Stammdurchmesser von 25 bis 45 cm auf (s. Anhang).

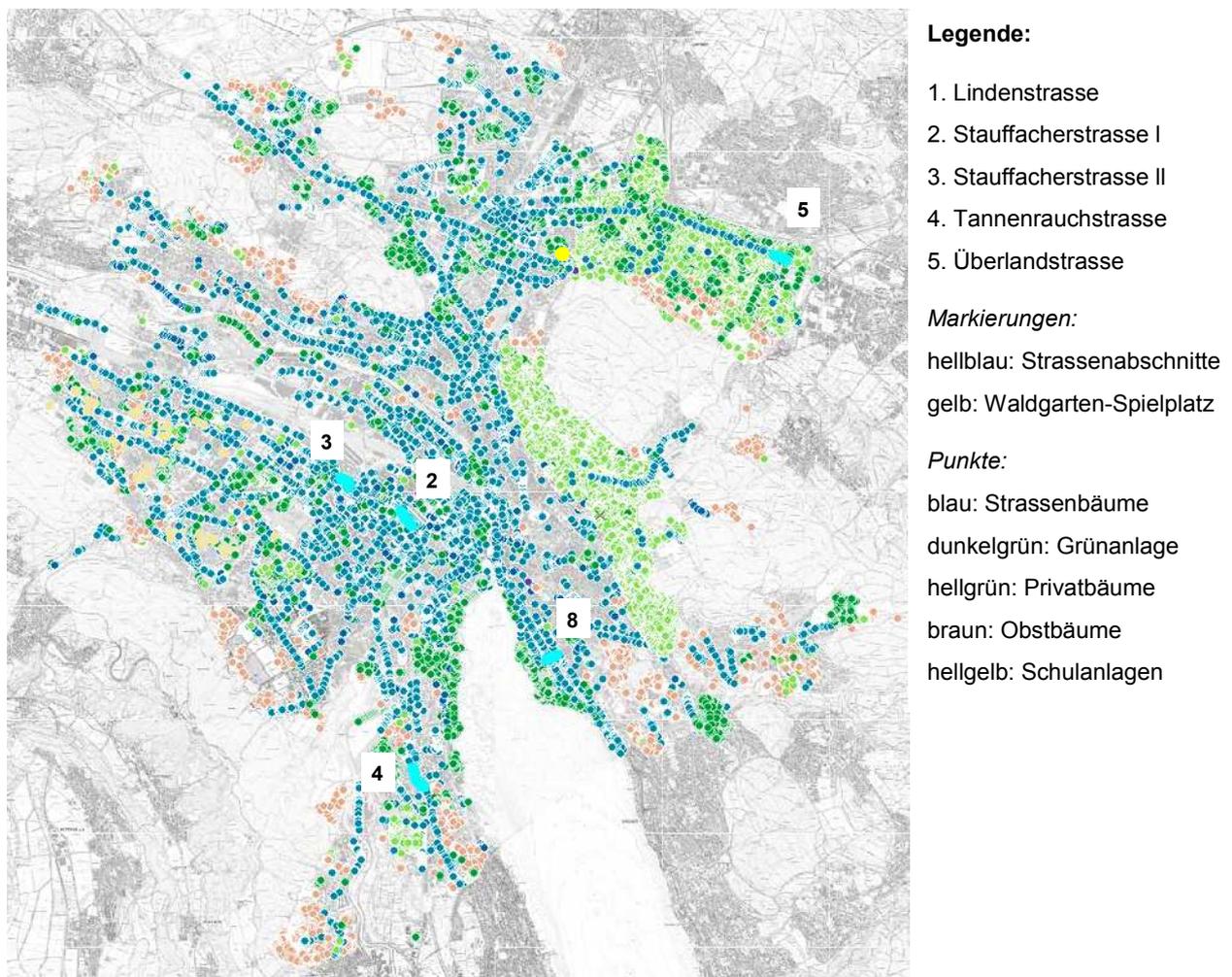
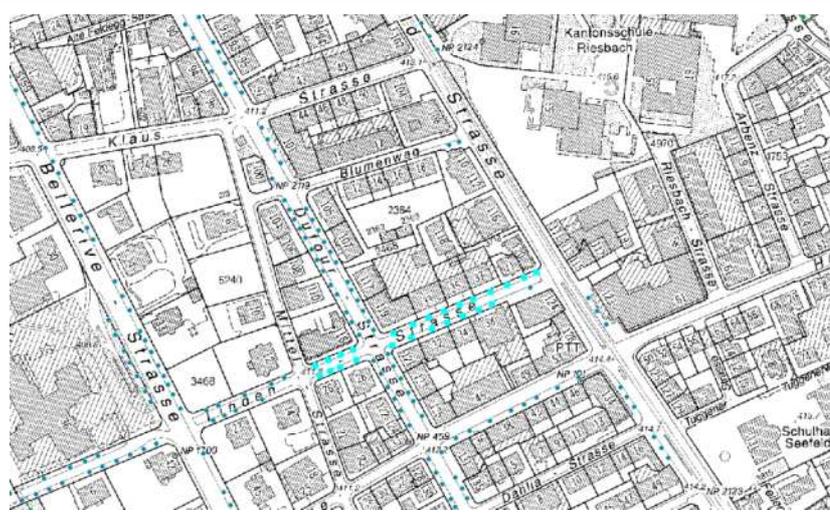


Abb. 10: Untersuchungsflächen in Zürich (Quelle: Baumkataster von Grün Stadt Zürich, Stadtkarte vom Universitätsrechenzentrum Basel)

Die untersuchten Strassenabschnitte werden nachstehend kurz portraitiert:¹⁹

<p>Lindenstrasse</p> <p>Untersuchungsfläche: ca. 1920 m² (160m x 12m)</p> <p>Baumart: Linde <i>Tilia cordata</i> (5), <i>Tilia tomentosa</i> (2), <i>Tilia x europaea Euchlora</i> (18)</p> <p>Stammdurchmesser: Ø 32.3 cm Median: 29.6 cm</p>	 
--	--

Die Lindenstrasse befindet sich an ruhiger Lage im gehobeneren Züricher Seefeld. Die Strasse ist sehr verkehrsarm und wird vordergründig als Parkfläche genutzt. Die Baumscheiben sind je nach Baum zum Teil sehr klein; die grosszügigeren Kiesstreifen im jüngeren Alleeabschnitt werden vor Hauseinfahrten jeweils unterbrochen. Die Baumreihe westlich der Dufourstrasse (Foto rechts) ist jünger als die restliche Untersuchungsfläche, die zum Teil auch alte Bäume mit dicken Stammdurchmessern aufweist. Der allgemeine Gesundheitszustand ist gut bis sehr gut.

Bemerkung: Während der Bestandsaufnahme haben sich verschiedene Passanten und Büroangestellte über die Gründe der Vermessung erkundigt und grosses Interesse gezeigt. Der Aussage einer älteren Anwohnerin zufolge, ist die Lindenbaum-Allee im Seefeld die einzige Lindenstrasse der Welt, die tatsächlich nur mit Linden bepflanzt ist. Sie hat die Veränderungen an der Lindenstrasse seit ihrem Zuzug Anfang 1960er Jahre genau nachverfolgt und drückte den Linden gegenüber grosse Wertschätzung aus.

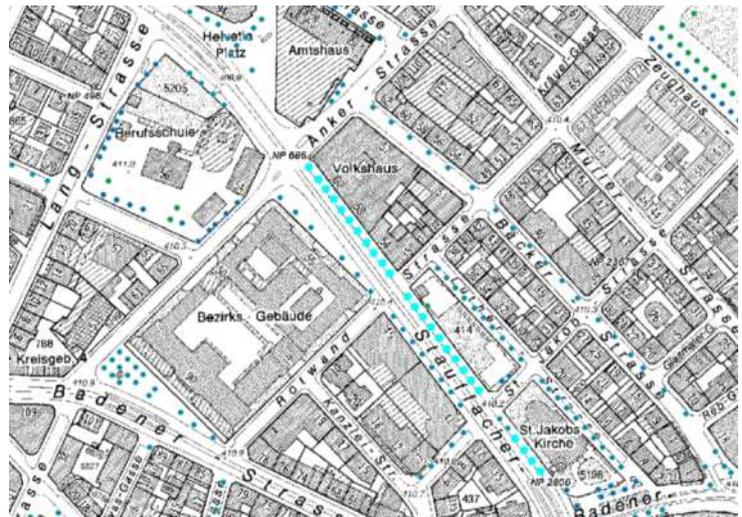
¹⁹ Die Kartenausschnitte sind Vergrösserungen des Gis-Baumkatasterplans von Grün Stadt Zürich. Die Fotos wurden während der Bestandsaufnahme im Juli 2011 von Géraldine Wälchli aufgenommen.

Stauffacherstrasse I

Untersuchungsfläche:
ca. 3000m² (250m x 12m)

Baumart: Rosskastanie
Aesculus hippocastanum (25)

Stammdurchmesser:
Ø 36.2 cm
Median: 32.1 cm



Stauffacherstrasse II

Untersuchungsfläche:
ca. 2640 m² (220m x 12m)

Baumart: Rosskastanie
Aesculus hippocastanum (17),
Aesculus x carnea (8)

Stammdurchmesser:
Ø 43 cm
Median: 43.3 cm



Die Stauffacherstrasse wurde an zwei verschiedenen Abschnitten untersucht. Wie die Bilder zeigen, unterscheiden sich die Standorte deutlich. Während bei der Stauffacherstrasse I beim Volkshaus die Strasse breiter ist und durch Tram und Autoverkehr stärker genutzt wird, liegt die Stauffacherstrasse II beim Bullingerplatz in einem ruhigen Wohnquartier. Die Bäume entlang des Volkshauses, die unter beengten Verhältnissen wachsen (sehr kleine Baumscheiben, unmittelbare Nähe zur Fassade), wiesen beträchtliche Schäden auf, wogegen die Bäume beim Bullingerplatz in einem guten bis sehr Zustand waren und durchgehend auf durchlässigen Pflanzstreifen standen. (Baumscheiben mit Unterpflanzung an der Erismannstrasse: ca. 2.5m²). Die Untersuchungsflächen wurden bewusst an derselben Strasse festgelegt, sodass die Einflüsse der verschiedenen Standortfaktoren anhand der Leistungsunterschiede der gleichen Baumart besser veranschaulicht werden können.

Bemerkung: Die oben beschriebene Vorgehensweise bei der Bestimmung der Strassenabschnitte mit Google Maps, hat sich bei der Stauffacherstrasse als wenig zuverlässig erwiesen. Die Kastanien entlang des Volkshauses waren während der Bestandsaufnahme in einem erheblich schlechteren Zustand als auf den Fotos von Street View, obwohl es sich bei Street View um eine neue Anwendung handelt.²⁰ Der Zustand der Bäume hat sich demnach innert kurzer Zeit verschlechtert. Da auch bei der Stauffacherstrasse II auf den Bildern nicht erkennbar war, wie gross die Bäume tatsächlich sind, wurde der Strassenabschnitt während der Bestandsaufnahme mit jüngeren Rosskastanien an der Erismannstrasse ergänzt, sodass die durchschnittlichen Stammdurchmesser mit den anderen Strassenabschnitten besser vergleichbar sind.

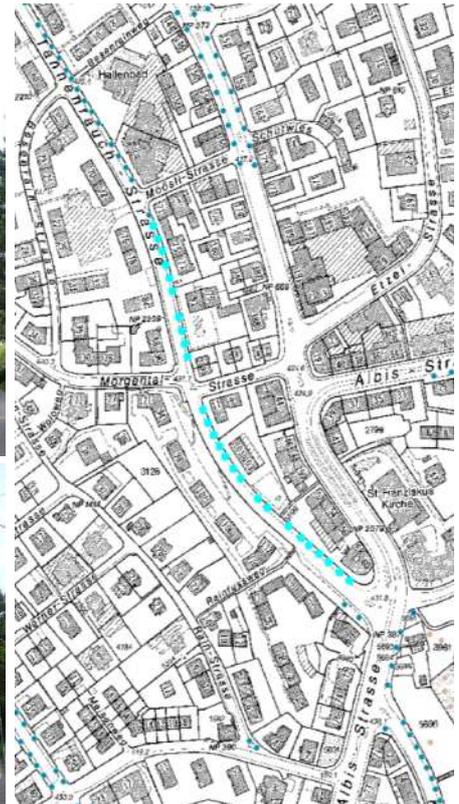
²⁰ Start von Street View in der Schweiz im Jahr 2009, wobei die meisten Bilder im Herbst 2010 entstanden sind. (Wikipedia 01.2012). Die einzelnen Fotos sind nicht datiert.

Tannenrauchstrasse

Untersuchungsfläche:
ca. 3840 m² (320m x 12m)

Baumart: Japanischer Schnurbaum
Sophora japonica (25)

Stammdurchmesser:
Ø 28.6 cm
Median: 31.5 cm



Die Tannenrauchstrasse liegt in einem Wohnquartier in Zürich Wollishofen. Der allgemeine Gesundheitszustand der einseitig bepflanzten Baumreihe ist als gut bis sehr gut einzustufen. Allerdings ist bei den grösseren Bäumen das Platzangebot auf der den Häusern zugewandten Seite beschränkt, weshalb Kronenpartien aufgrund von Rückschnitten teilweise fehlen (% Missing, s. Kap. 4.2.4).

Bemerkung: Auch hier haben sich während der Messung verschiedene Anwohner über ‚ihre‘ Bäume geäussert. Ein Mann, deren Balkon auf der Höhe der Baumkronen liegt, erwähnte die vielen Schmetterlinge und Vögel, die den Baum als Nahrungsquelle nutzen und zeigte sich sehr erfreut über den Einblick ins Blätterdach und die duftenden Blüten im Frühling.

Überlandstrasse

Untersuchungsfläche:
ca. 2040 m² (170m x
12m)

Baumart: Spitzahorn
Acer platanoides

Stammdurchmesser:
Ø 26.7 cm
Median: 20.4 cm



Foto oben/ unten: maps.google.ch



Die Überlandstrasse befindet sich in Zürich Oerlikon, in der peripheren Zone der Stadt. Die Strasse wird beidseitig zweispurig befahren. Die betrachtete Baumreihe trennt die Strasse von den dahinterliegenden Parkplätzen ab; mit Ausnahme des durchgehenden Rasenstreifens sind die Bäume von versiegelten Flächen umgeben. Der mittlere Teil der Baumreihe besteht aus Jungbäumen mit 35 cm bis 100 cm dicken Stammumfängen. Die beiden äusseren Abschnitte sind älter und weisen Kronenbreiten von bis zu 16 Metern auf (Stammumfänge von 100 bis 170 cm). Der Gesundheitszustand der Individuen variiert zum Teil stark.

Zusätzlich zu den Strassenalleen wurden fünf grosse, ältere Bäume eines kleinen Parks ausgemessen, um auch den Wert von besonders leistungsfähigen Pflanzen aufzuzeigen. Parkbäume haben meist viel Platz sowie beste Wachstumsbedingungen und stellen gewissermassen das Gegenstück von Strassenbäumen dar, die sich vorwiegend unter beengten Verhältnissen und diversen anthropogenen Stressfaktoren entwickeln müssen. Die Ermittlung der Ökosystemdienstleistungen der Parkbäume kann demnach als Exempel betrachtet werden, welches die Abweichungen in Bezug zu den Strassenbäumen aufzeigt.

Waldgarten

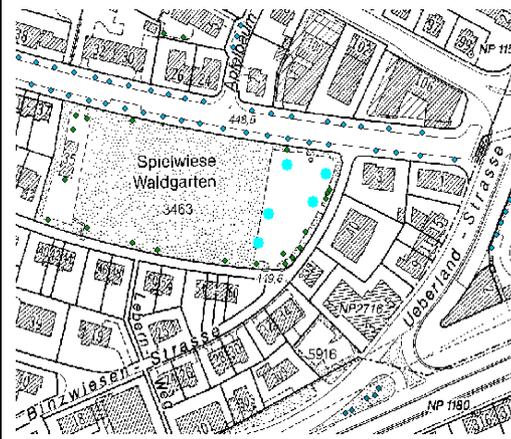
Untersuchungsfläche:
ca. 1800 m²

Baumarten:
Acer platanoides, *Acer Saccharinum*,
Tilia sp., *Liriodendron tulipifera*

Stammdurchmesser:
Ø 68 cm
Median: 73 cm

Die Fotos der Bäume wurden während der Messung aufgenommen.

Von oben nach unten (v. l. n. r.):
Tilia sp. (ID 4), *Acer platanoides* (ID 1),
Acer Saccharinum (ID 2), *Liriodendron tulipifera* (ID 5), *Liriodendron tulipifera* (ID 6)

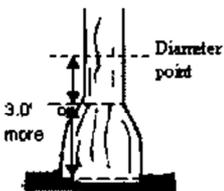
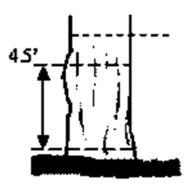
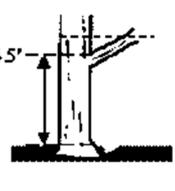
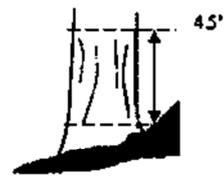
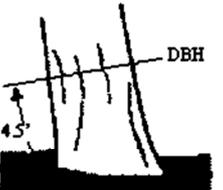
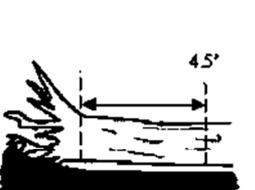


4.2.4 Phase III: Datenerhebung

Die These des UFORE-Modells beruht auf der Annahme, dass die Struktur und der Zustand der urbanen Gehölze den Wert und die Funktionen der Stadtbäume entscheidend beeinflussen (Nowak et. al 2008). Mit einer differenzierten Bestandsaufnahme, die eine sorgfältige Strukturbewertung der Bäume einbezieht, können demnach bessere Schätzungen in Bezug auf ihre Ökosystemdienstleistungen erzielt werden.

Die präziseste Methode für eine genaue Abschätzung der Gehölzstrukturen ist die Messung und Aufzeichnung jedes einzelnen Baumes (Nowak et. al 2008). Anweisungen und Hilfestellungen für die Datenerfassung sind im Handbuch von i-Tree Eco aufgeführt.

Die Datenerhebung wurde während der Vegetationsperiode im Juli 2011 durchgeführt (06.07.11 bis 15.07.11). Die erforderlichen Baumparameter und die angewandten Messmethoden werden im Folgenden kurz beschrieben:

<p>Tree ID</p>	<p>Identifikationsnummer von 1-25</p>
<p>Stammumfang</p>	<p>Stammumfang auf Brusthöhe = 1.37 m (4.5 ft.) zentimetergenau, mit Massband</p>
<p>DBH</p>	<p>Diameter at Breast Height (= 1.37 m) $DBH = U / \pi$</p> <p>Da der Durchmesser bei asymmetrischen und/oder dicken Stämmen schwierig zu messen ist, wurde der DBH mittels Stammumfang berechnet und zentimetergenau eingetragen.</p> <p>Bei Unregelmässigkeiten im unteren Stammbereich (Verdickungen, Beulen u.a.) wurden die Messungen nach der Methode von i-Tree vorgenommen:</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Tree with swelled butt</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Tree with swelling</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Tree with branch</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Tree on a slope</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Leaning tree</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Tree on the ground</p> </div> </div> <p>Abb. 11: Messung von unregelmässigen DBH (Quelle: i-Tree Eco Users Manual)</p>

Total Height	<p>Gesamthöhe des Baumes</p> <p>Da keine Winkel- und Entfernungsmesser zur Verfügung standen, wurde ein klappbarer Meter senkrecht an den Stamm gelehnt (2m) und aus grösstmöglicher Entfernung aufaddiert.</p> <p>Die Baumhöhe wurde metergenau gerundet.</p>
Live Top	<p>Höhe des Baumes ohne abgestorbene Spitzen</p> <p>Da die Baumwipfel selten abgestorben waren, entsprach die Gesamthöhe zumeist der lebenden, belaubten Baumhöhe.</p> <p>Live Top wurde auf 0.5 m genau gemessen.</p>
Crown Base	<p>Kronenansatz</p> <p>Die Basis der Baumkrone entspricht nicht der Asthöhe, sondern der untersten belaubten Schleppe der Krone. Crown Base wurde auf 0.5 m genau gerundet (s. auch Abb.12).</p>
Width NS / EW	<p>Kronenbreite: Nord-Süd / Ost-West</p> <p>Je nach Standort konnten die Himmelsrichtungen aufgrund von Hindernissen/ Verkehr nur grob eingehalten werden.</p>
% Missing	<p>Percent Canopy Missing (fehlendes Baumkronen-Volumen in Prozent):</p> <p>Die Krone eines gesunden, vitalen Baumes weist bei optimalen Standortbedingungen eine symmetrische Silhouette und eine dichte, der Baumart entsprechenden Belaubung auf. Dieses ‚Optimum‘ wird bei der Beurteilung eines Baumes herangezogen, um die fehlenden Kronenpartien aufgrund abgestorbener oder zurückgeschnittener Äste, Kahlfrass durch Schädlinge, sowie karges oder unterentwickeltes Laub zu erfassen.</p> <p>Die Methodik von i-Tree sieht vor, die Messung zu zweit vorzunehmen und den Baum im 90° Winkel zu begutachten. Da dies bei der Bestandsaufnahme in Zürich nicht möglich war, wurden die Bäume jeweils aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und erst dann das fehlende Baumkronenvolumen in Prozent ausgedrückt.</p> <p>Die Prozentangaben sind in 5%-Intervallen angegeben (3%, 8%, 13%, etc.).</p>

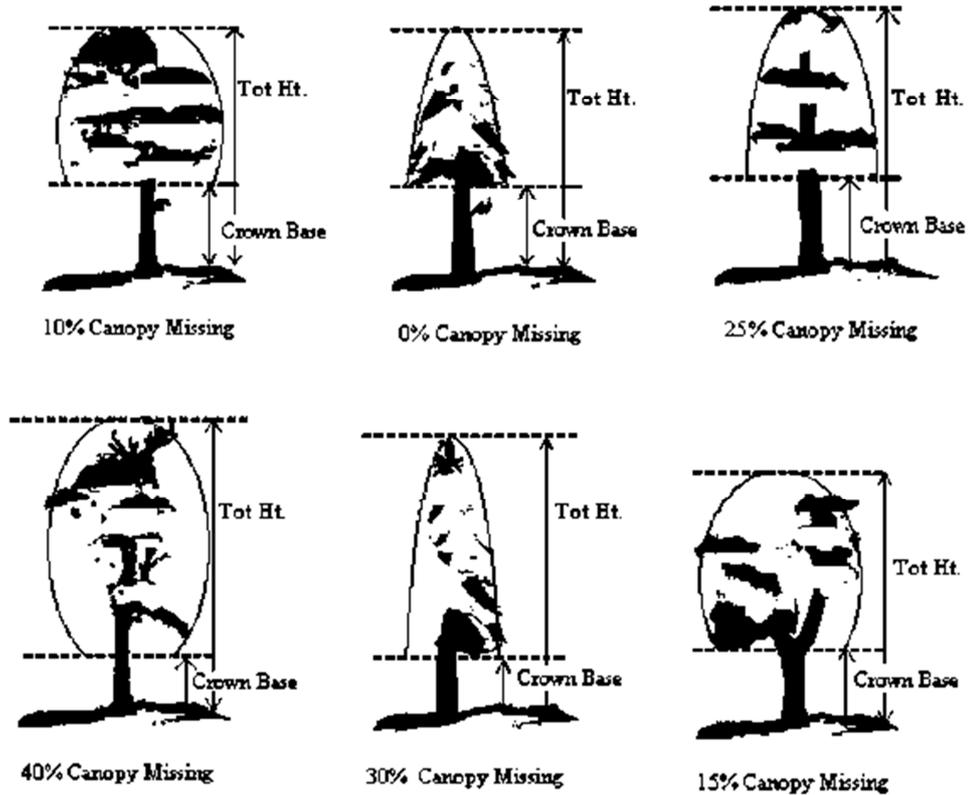


Abb. 12: Illustration der Messmethode von fehlenden Kronenpartien und Kronenbasis
(i-Tree Eco Users Manual)

% Dieback

Percent Dieback in Crown Area (Absterben der Baumkrone in Prozent):

% Dieback umfasst das Absterben von Kronenpartien, das von äusseren Einflüssen (z.B. Schattenwirkung durch Gebäude/ andere Bäume) bewirkt wird. Die natürliche Astung der Bäume, die durch Konkurrenz innerhalb eines Baumes zustande kommt, wird nicht einbezogen. Der Unterschied zu *% Missing* besteht darin, dass statt des gesamten fehlenden Volumens nur diejenigen Partien beachtet werden, die aufgrund von suboptimalen Standortverhältnissen absterben.

Auch bei diesem Parameter wird empfohlen, die Messung im Team vorzunehmen. Je nach Sichtverhältnissen sind zudem Feldstecher mitzunehmen, um die Art des Absterbens besser erkennen zu können.

Wie beim *% Missing* sind die Prozentangaben in 5 %-Intervallen anzugeben, wobei 100% Dieback ausdrückt, dass der Baum komplett abgestorben ist.

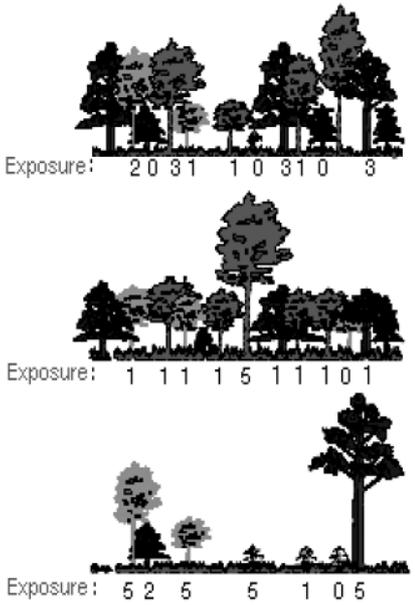
<p>CLE</p>	<p>Crown Light Exposure (Lichtexposition der Baumkrone):</p> <p><i>Die Lichtverhältnisse sind für das Wachstum und die Photosyntheserate der Bäume entscheidend. CLE drückt das direkte Sonnenlicht mittels der Anzahl Seiten aus, von denen ein Baum Sonnenlicht erhält.</i></p> <p>Maximal sind 5 Seiten möglich (Nord, Ost, Süd, West und Oben).</p> <p>Bsp: Ein Baum wird östlich von einer Häuserreihe, südlich von einem grossen Baum komplett beschattet. Der kleinere Baum in nördlicher Richtung beschattet ihn nur wenig: CLE = 3</p> <div style="text-align: right;">  </div>
-------------------	--

Abb. 13: Lichtexposition der Baumkronen

4.2.5 Phase IV: Verarbeitung der Daten

Nachdem die Felddaten vollständig gesammelt und schriftlich festgehalten waren, konnten die Messergebnisse bei i-Tree Eco direkt ins Programm eingegeben werden. Bei i-Tree Streets mussten die Rohdaten zuerst mit Microsoft Excel und Access bearbeitet werden. (Die genauen Formatierungsvorgaben sind im Benutzerhandbuch von i-Tree Streets nicht angegeben; Ergänzende Anleitungen können aber auf itreetools.org > Resources > Archives heruntergeladen werden.) Da bei i-Tree Streets weniger Daten bearbeitet werden müssen und weder Klima- noch Schadstoffdaten des Untersuchungsortes berücksichtigt werden, sind die Ergebnisse nach erfolgter Eingabe sofort einsehbar. Bei i-Tree Eco müssen die Schadstoff- und Klimadaten per Email an den Support von i-Tree gesendet werden und die Messdaten der Untersuchungsflächen für die Verarbeitung mit i-Tree Eco online übermittelt werden (s. Kap. 5.2 „International limitations“). Sobald die Daten verarbeitet sind, wird der Benutzer des Programms per Email benachrichtigt. Die Resultate können dann mit dem Programm heruntergeladen werden (s. Anhang).

4.3 Resultate

Im Folgenden werden die mit i-Tree Eco berechneten Ökosystemdienstleistungen der erhobenen Stadtbäume von Zürich zusammengetragen. Die Resultate beziehen sich auf die Kohlenstoffspeicherung, die Sequestrierung und die Schadstoffresorption. Da die Resultate von i-Tree Eco und i-Tree Streets stark voneinander abweichen, werden die Ergebnisse von i-Tree Streets in einem separaten Kapitel aufgeführt, wobei die für das Verständnis relevanten Hintergründe dort aufgeführt werden.

4.3.1 Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung

Den Berechnungen von i-Tree Eco zufolge, speicherten die erhobenen Bäume in Zürich im Jahr 2010 insgesamt über 45 Tonnen Kohlenstoff. Dazu kamen rund 1.7 Tonnen Kohlenstoff, die durch das Wachstum der Bäume sequestriert wurden.

Der Grundriss der Baumkronen (Ground Area) erstreckte sich auf über 0.83 ha. Dies entspricht einer Blatt-Biomasse (Leaf Biomass) von knapp 2,4 Tonnen. Die Blattoberfläche der Bäume (Leaf Area) wurde auf insgesamt rund 3.6 ha geschätzt.

Tabelle 3: Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung

Untersuchungsgebiet	Baumart	Ground Area (m ²)	Leaf Area (m ²)	Leaf Biomass (kg)	Carbon Storage (kg)	Carbon Sequestration (kg/yr)
Lindenstrasse	<i>Tilia sp.</i>	1305	7597	386	4631	235*
Stauffacherstrasse I	<i>Aesculus hippocastanum</i>	1241	5311	371	10252	270
Stauffacherstrasse II	<i>Aesculus hippocastanum / x carnea</i>	1802	7850	558	14517	554
Tannenrauchstrasse	<i>Sophora japonica</i>	1548	4145	471	5273	316
Überlandstrasse	<i>Acer platanoides</i>	1651	6928	374	4994	202
Strassenbäume total		7547	31831	2160	39667	1577
Waldgarten/ Spielplatz	<i>Ac.pl, Ac.sa, Li.tu, Ti.spec.</i>	786	4395	232	5687	109
Untersuchungsfläche total		8333	36226	2392	45354	1686

* korrigierter Wert [Aufgrund eines Eingabefehlers wurde ein gesunder Baum vom Programm als tot klassifiziert, weshalb das Total bei der Sequestrierung nachträglich mit 10 kg/J addiert wurde. (10 kg/J entspricht der Menge, die *Tilia x vulgaris* bei vergleichbaren Grössen in etwa sequestriert.)]

Die Zahlen zeigen, dass zum Teil grosse Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen bestehen. Das C-Speichervermögen der Stauffacherstrasse I und II übersteigt die entsprechenden Resultate der anderen Strassenabschnitte deutlich. Mit 14.5 Tonnen resp. 10.3 Tonnen weist *Aesculus hippocastanum* von allen untersuchten Baumarten das grösste Speichervermögen auf.

gen auf. Es folgt *Sophora japonica* mit 5.3 Tonnen, *Acer platanoides* mit 5 Tonnen und *Tilia sp.* mit 4.6 Tonnen.

Bei der jährlichen Kohlenstoff-Sequestrierung scheidet die Stauffacherstrasse II mit 554 kg am meisten Kohlenstoff ab. Die Rosskastanien der Stauffacherstrasse I liegen mit 270 kg im Mittelfeld. *Sophora japonica* resorbiert jährlich 316 kg Kohlenstoff, *Tilia sp.* 235 kg und *Acer platanoides* 202 kg pro Jahr. Bei der jährlichen Kohlenstofffixierung verhält es sich demnach anders als beim absoluten/gesamthaften Speichervermögen und die Baumalleen, die die höchsten Resultate bei der C-Speicherung lieferten, erzielen nicht a priori die höchsten Resultate bei der jährlichen C-Fixierung.

Die erhobenen Parkbäume erzielen weit höhere Resultate als die einzelnen Strassenbäume. Werden die Leistungen mit dem Faktor 5 multipliziert, sodass deren Anzahl hypothetisch derjenigen der Strassenabschnitte entspricht, ist die Blattoberfläche, die Blatt-Biomasse, die C-Sequestration (mit Ausnahme der Stauffacherstrasse II) und insbesondere das C-Speichervermögen deutlich höher als die Ergebnisse der untersuchten Baumalleen.²¹

Bemerkung: Die Resultate der Tabelle 3 lassen kein bestimmtes Verhältnis zwischen der Baumkronenfläche, der Blattoberfläche und der Biomasse der Blätter erkennen: Aus einer grossen Baumkronenfläche resultiert nicht systematisch eine grössere Blattoberfläche und entgegen logischer Folgerungen, ist auch die Biomasse nicht zwingend schwerer, wenn die Blattoberfläche gross ist. Grosse Flächen- oder Kilozahlen haben zudem nicht zwangsläufig eine höhere Kohlenstoffspeicherung oder Sequestrierung zur Folge. Dagegen ist der Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser (DBH) und der Kohlenstoffspeicherung jeweils eindeutig. Unabhängig von der Gattung und Art, sind bei grossen Stammdurchmessern generell höhere Erträge bei der C-Speicherung und Sequestrierung zu erwarten. Die spezifischen Resultate der einzelnen Bäume sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

²¹ Resultate des Waldgartens multipliziert mit Faktor 5 (=25 Bäume): C-Speichervermögen: 5687 kg x 5 = 28'435 kg; C-Sequestration: 109 kg/yr x 5 = 545 kg/yr

4.3.2 Filterung von Luftschadstoffen

Die untersuchten Bäume in Zürich haben im Jahr 2010 insgesamt 36 kg Schadstoffe aus der Luft entzogen. Die Schadstoffbeseitigung, die vom Programm berechnet wurde, bezieht sich auf Kohlenmonoxid, Ozon, Stickstoffdioxid, Feinstaub (Particulate Matter >10 µm) und Schwefeldioxid. Die Beseitigung von Ozon macht mit 21.3 kg oder 60% mengenmässig den grössten Anteil der Resorption aus. Es folgen PM₁₀ (24.7%), Stickstoffdioxid (13.6%), Kohlenmonoxid (1.5%) und Schwefeldioxid (1.1%).

Tabelle 4: jährliche Luftschadstoffentfernung (g/Jahr)

Untersuchungsgebiet	Baumart	CO	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	Total
Lindenstrasse	<i>Tilia sp.</i>	84	3649	872	1707	69	6381
Stauffacherstrasse I	<i>Aesculus hippocastanum</i>	78	3086	706	1265	59	5194
Stauffacherstrasse II	<i>Aesculus hippocastanum/ x carnea</i>	116	4655	1068	1921	89	7849
Tannenrauchstrasse	<i>Sophora japonica</i>	97	3313	710	1177	65	5361
Überlandstrasse	<i>Acer platanooides</i>	110	4348	992	1769	84	7302
Strassenbäume total		485	19051	4348	7838	366	32088
Waldgarten/ Spielplatz*	<i>Ac.pl, Ac.sa, Li.tu, Ti.sp</i>	53	2288	545	1052	43	3981
Untersuchungsfläche total		538	21339	4892	8890	409	36069

Im Vergleich zu den Resultaten der Kohlenstoffspeicherung- und Sequestrierung, weichen die Ergebnisse der einzelnen Strassenabschnitte bei der Resorption der Schadstoffe weniger voneinander ab. Die Stauffacherstrasse II beim Bullingerplatz erlangt zwar bei allen Schadstoffen nach wie vor die höchsten Zahlen, doch sind die Unterschiede weniger frappant. Die Stauffacherstrasse I auf Höhe des Volkshauses liefert bei der Resorption von vier von fünf Schadstoffen dagegen die tiefsten Ergebnisse. Die Überlandstrasse, die sich auf Tabelle 2 im Mittelfeld befand, erreicht bei der Abscheidung der Luftschadstoffe bei allen erhobenen Substanzen die zweithöchsten Zahlen.

Die Parkbäume des Spielplatzes waren verhältnismässig deutlich effizienter als die Strassenbäume.²²

²² Resultate des Waldgartens multipliziert mit Faktor 5 (=25 Bäume): CO: 265g/yr, O₃: 11'440g/yr, NO₂: 2725g/yr, PM₁₀: 5260g/yr, SO₂: 215g/yr.

Tabelle 5: Wert der Schadstoffentfernung (\$/Jahr)

Untersuchungsgebiet	Baumart	CO	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	Total
Lindenstrasse	<i>Tilia sp.</i>	0.1	36	9	11	0.2	56
Stauffacherstrasse I	<i>Aesculus hippocastanum</i>	0.1	31	7	8	0.1	46
Stauffacherstrasse II	<i>Aesculus hippocastanum/ x carnea</i>	0.2	46	11	13	0.2	70
Tannenrauchstrasse	<i>Sophora japonica</i>	0.1	33	7	8	0.2	48
Überlandstrasse	<i>Acer platanooides</i>	0.2	43	10	12	0.2	65
Strassenbäume total		0.7	189	43	52	0.9	285
Waldgarten/ Spielplatz*	<i>Ac.pl, Ac.sa, Li.tu, Ti.</i>	0.1	23	6	8	0.1	37
Untersuchungsfläche total		0.8	211	49	59	1	322

Das Programm berechnet für jeden einzelnen Baum einen Dollarbetrag, der die jährliche Schadstoffabscheidung monetär quantifiziert. Diese Ökosystemdienstleistungen werden bei den erhobenen Bäumen in Zürich mit total 322 Dollar beziffert.

Die Reduzierung des bodennahen Ozons wird mit dem höchsten Betrag, nämlich mit 211 Dollar angegeben, was einem Anteil von 66% entspricht. Die Filtration des Feinstaubes wird auf 59 Dollar geschätzt, was 18% des Totalbetrags entspricht, die Resorption von Stickstoffdioxid auf 49 Dollar (15%), die Beseitigung von Schwefeldioxid auf 1 Dollar (0.3%) und die Aufnahme von Kohlenmonoxid auf 80 Cents (0.25%). (Der monetäre Geldwert resultiert somit nicht ausschliesslich aus der genauen Grammmenge des beseitigten Stoffes, sondern bezieht sich auf die jeweiligen Eigenschaften und Wirkungen der Stoffe; s. Methode.)

4.3.3 i-Tree Streets

Die Resultate von i-Tree Streets beziehen sich auf die vom Programm vorgegebenen Parameter (Baumart und Stammdurchmesser) und auf die optional hinzugefügten Daten wie Baumhöhe, Baumzustand (Good, Fair, Poor, Dying) und Landnutzungstyp, der bei den Strassenabschnitten von Zürich bestimmt wurde (Multi-family Residential, Small Commercial). Die restlichen Eingaben hatten keinen Einfluss auf die gewonnenen Ergebnisse. Es handelt sich bei den Resultaten von Streets folglich um grobe Schätzungen, die im Gegensatz zu den Resultaten von i-Tree Eco weder auf den lokalen Schadstoffmessungen oder meteorologischen Daten, noch auf aufwändigen Messmethoden beruhen.

I-Tree Streets verwendet bei der Berechnung der Leistungen und Funktionen der Strassenbäume Referenzdaten, die auf den Forschungsergebnissen von sechzehn U.S.-amerikanischen Städten beruhen (McPherson 2010). Jede Stadt liegt in einer der sechzehn Klimazonen, die von i-Tree definiert wurden. Für Programmbenutzer ausserhalb der USA liegen verschiedene Publi-

kationen vor, die die Methodik für die Bestimmung der stellvertretenden Klimazone beschreibt. Nach Durchsicht der Literatur wurde der mittlere Westen (the Midwest) aufgrund der Baumartenzusammensetzung, der Temperatur und Niederschlagsverteilung als die korrespondierende Klimazone festgelegt.²³

Bei der Verwendung von Streets haben die *Species List Limitations*, die im Kapitel 4.2 bereits erwähnt wurden, zu Problemen geführt. Bei der Baumallee an der Tannenrauchstrasse konnten die Einschränkungen nicht umgangen werden. Die *Tree-Species*-Datenbank ist bei Streets wesentlich kleiner als diejenige von Eco und verfügt über keine Baumart, die in Grösse, Struktur oder Blattart dem japanischen Schnurbaum (*Sophora japonica*) ähnlich ist. Um die Resultate nicht zu verfälschen, wurde der Strassenabschnitt letztlich weggelassen. Da *Sophora japonica* auf den untenstehenden Tabellen wegfällt, verändert sich die Anzahl und die Artzusammensetzung der Untersuchungsfläche.²⁴ Im Gegenzug wurden die Ergebnisse der Stauffacherstrasse präziser: Da beide Unterarten der Rosskastanie (*A. hippocastanum* und *A. x carnea*) in der Datenbank aufgeführt waren, sind die Resultate nicht mehr nach Strasse, sondern nach Spezies aufgeführt. Total wurden 50 Rosskastanien aufgenommen (25 Bäume pro Strassenabschnitt I und II), davon 40 *Aesculus hippocastanum* und 10 *Aesculus x carnea*.

I-Tree Streets liefert eine Reihe von Resultaten, die nicht nur die C-Fixierung und Schadstoffbeseitigung beleuchten, sondern viele weitere Gesichtspunkte miteinschliessen. Die wichtigsten, für den vorliegenden Bericht relevanten Ergebnisse, werden im Folgenden in drei Tabellen zusammengefasst und nach Themenschwerpunkten aufgeteilt: Kohlenstoff-Fixierung, Schadstoffbeseitigung und übrige, monetäre Quantifizierung.

4.3.3.1 Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung

Die Berechnungen von i-Tree Streets haben ergeben, dass die erhobenen Strassenbäume an der Stauffacherstrasse (Abschnitt I und II), der Überlandstrasse und Lindenstrasse zum Zeitpunkt der Datenaufnahme insgesamt rund 179.1 Tonnen Kohlenstoff speicherten. Dies entspricht einem Betrag von knapp 3000 Dollar. Dazu kommen rund 240 Dollar oder fast 15 Tonnen Kohlenstoff, die im gleichen Jahr sequestriert wurden.

²³ Die Methode ist im Midwest Urban Tree Index (Schoon1993) nachzulesen.

²⁴ Da sich i-Tree Streets ausschliesslich auf Strassenbäume ausrichtet, fallen die Parkbäume des Waldgartens ebenfalls weg.

Tabelle 6: Kohlenstoffspeicherung und jährliche Sequestrierung nach Baumart (i-Tree Streets)

Baumart	C-Speicherung		C-Sequestrierung								
	(t)	(\$)	Brutto		C-Freilassung			C-Vermeidung		Netto	
			(t/J)	(\$/J)	Zers. (kg)	Pflege (kg)	Total (\$)	(t/J)	(\$/J)	(t/J)	(\$/J)
<i>Aesculus hippocastanum</i>	106.6	1763	5.776	96	-512	-40	-9	6.627	110	11.85	197
<i>Aesculus x carnea</i>	8.2	136	1.170	19	-39	-6	-1	0.946	16	2.07	34
<i>Acer platanoides</i>	28.6	473	3.212	53	-138	-17	-3	2.897	48	5.954	98
<i>Tilia x europaea</i>	35.7	590	4.568	76	-171	-18	-3	2.689	44	7.068	117
Total	179.1	2962	14.726	244	-860	-81	-16	13.159	218	26.943	446

Streets unterscheidet bei der Sequestrierung zwischen Brutto- und Nettobeträgen und veranschaulicht auf diese Weise auch die indirekten Einflüsse der Strassenbäume: Die C-Freilassung schliesst die Zersetzungsprozesse absterbender Baumteile und den CO₂-Ausstoss mit ein, der bei Pflegeeinsätzen auftritt (Fahrzeuge, Motorsägen etc.). Mit der C-Vermeidung ist die CO₂-Reduktion gemeint, die dank der Schattenwirkung im Sommer, sowie der Abschwächung kalter Winde im Winter, Energieeinsparungen generiert. Mit über 13 Tonnen Kohlenstoff, die auf diese Weise jährlich eingespart werden, entspricht die C-Vermeidung beinahe der jährlichen Abscheidung und Speicherung von CO₂ durch die Bäume. Unter Berücksichtigung der positiven und negativen Vorzeichen ergibt sich eine jährliche Gesamtbilanz von knapp 27 Tonnen Kohlenstoff. Die Strassenbäume haben im Jahr 2011 demnach total 206 Tonnen Kohlenstoff resorbiert und eingelagert, was einem Wert von 1960 Dollar entspricht.

Von allen untersuchten Baumarten ist *Aesculus hippocastanum* die Spezies, die am meisten Kohlenstoff aufgenommen und gespeichert hat. Mit 49 Dollar pro Baum ist sie zugleich auch die wertvollste Baumart und überbietet *Tilia x europaea* (\$ 28.3 pro Individuum), *Acer platanoides* (\$ 22.8 pro Ind.) und *Aesculus x carnea* (\$ 15.5 pro Individuum) bei Weitem.²⁵

4.3.3.2 Schadstoffbeseitigung

Die hundert ermittelten Strassenbäume haben im Jahr 2011 durch die Deposition und Vermeidung insgesamt über 100 kg Schadstoffe aus der Luft entfernt. Dies entspricht 616 Dollar Netto. Die Beseitigung von Ozon, Stickstoffdioxid, Feinstaub und Schwefeldioxid erfolgt einerseits durch die Ablagerung auf der Blattoberfläche der Baumkronen (Deposition). Andererseits werden die Schadstoffe von den Pflanzen absorbiert (Vermeidung/,Avoided'), was mengenmässig dem grösseren Anteil entspricht. Zusätzlich werden die VOC-Emissionen (Volatile Organic

²⁵ C-Speicherung (\$) + C-Sequestrierung (Netto \$/J) / Anz. Bäume

Compound) der Bäume ermittelt, die zur Bildung von O₃ und CO führen. Mit jährlich 2.9 kg sind die VOC-Emissionen der Strassenabschnitte tiefer als die Aufnahme von VOC, die auf insgesamt 5.2 kg pro Jahr geschätzt wird.

Tabelle 7: jährliche Leistungen zur Luftreinhaltung nach Baumart (i-Tree Streets)

Baumart	Deposition (kg) (\$)					Vermeidung (kg) (\$)					BVOC Emissions		TOTAL Netto	
	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	Tot.	NO ₂	PM ₁₀	VOC	SO ₂	Tot.	kg	\$	kg	\$
<i>Aesculus hippocastanum</i>	6.4	1.1	3.2	0.3	77	19.1	2.8	2.6	17.9	261	-1.5	-13	51.9	325
<i>Aesculus x carnea</i>	0.5	0.1	0.3	0.0	6	2.8	0.4	0.4	2.5	38	-0.1	-1	6.8	43
<i>Acer platanoides</i>	1.7	0.3	0.9	0.1	21	8.3	1.2	1.1	7.8	114	-0.5	-4	21.1	131
<i>Tilia x europaea</i>	1.6	0.3	0.9	0.1	19	7.6	1.1	1.0	7.2	105	-0.8	-7	19.0	117
Total	10.1	1.7	5.3	0.5	123	37.8	5.5	5.2	35.5	518	-2.9	25	98.8	616

Die quantitativ wirkungsvollste Absorption erfolgt bei Stickstoffdioxid (37 kg/Jahr) und Schwefeldioxid (35.5 kg/Jahr), wogegen nur 5.5 kg Feinstaub und 5.2 kg VOC aufgenommen werden. Der Wert der Vermeidungswirkung wird auf total 518 Dollar geschätzt und ist damit die ertragreichste.

Bei den Ablagerungen verhält es sich anders. Mit 10.1 kg ist die Deposition von Ozon am effizientesten. Es folgt der Feinstaub mit 5.3 kg, das Stickstoffdioxid mit 1.7 kg und das Schwefeldioxid mit lediglich 0.5 kg pro Jahr. Die Wertschätzung dieser Leistungen beläuft sich auf 123 Dollar pro Jahr.

Erneut ist *Aesculus hippocastanum* die Baumart, die die Leistungen aller übrigen Baumalleen deutlich übersteigt. Die Gesamtleistung bei der Schadstoffbeseitigung beläuft sich auf 8.3 Dollar pro Individuum, gefolgt von *Acer platanoides* (\$ 5.2 pro Ind.), *Tilia x europaea* (\$ 4.7 pro Ind.) und *Aesculus x carnea* (\$ 3.9 pro Ind.) (siehe Tabelle 8). Auch bei dieser Aufstellung wird deutlich, dass nicht die Anzahl Bäume den Ausschlag für die höheren Resultate geben.

4.3.3.3 Monetäre Quantifizierung

Die Resultate der Untersuchung in Zürich beziehen sich auf U.S.-amerikanische Daten und sind daher ungenau. Insbesondere die monetäre Wertermittlung ist angesichts der mangelnden Übereinstimmung der beiden Länder in Bezug zur Baustruktur, zu Heiz- und Strompreisen sowie zu Heizungs- und Kühlungsanlagen für Schweizer Städte unrealistisch und nicht direkt übertragbar (gerade die Anzahl Klimaanlage ist in den USA verhältnismässig um ein vielfaches höher als in der Schweiz).

Die nachstehende Aufführung der verschiedenen Leistungen die von i-Tree Streets zusätzlich berechnet wurden, ist daher eher als ein Beispiel zu betrachten, wie eine monetäre Quantifizie-

rung erfolgen kann und um aufzuzeigen, welche anderen Aspekte miteinflussen können, um weitere Funktionen in die Bewertung von Strassenbäumen einzubinden.

Tabelle 8: monetäre Quantifizierung von Ästhetik, Energieeinsparung, Regenwassernutzung und Ersatzleistung der erhobenen Bäume für das Jahr 2011 (i-Tree Streets)

Baumart	Anz. Bäume	Ästhetik		Energieeinsparung			Regenwasser			
		\$/J	Ø \$/ Baum	Gas MWh (Therms)	Total \$/J	Ø \$/ Baum	H ₂ O-Aufnahme (l)	\$/J	Ø \$/ Baum	
<i>Aesculus hippocastanum</i>	40	1'259	32	8.7	1'237	1'873	48	280'000	1'997	51
<i>Aesculus x carnea</i>	10	292	26	1.2	197	288	26	30'000	214	19
<i>Acer platanoides</i>	25	756	30	3.8	546	824	33	94'000	673	27
<i>Tilia x europaea</i>	25	1'140	45	3.5	473	732	29	97'000	694	28
Total	100	3'447		17.2	2'453	3'717		501'000	3'578	

Baumart	Ersatzleistung nach Baumart und DBH (\$)						Total \$/J	Ø \$/ Baum	TOTAL \$/J	TOTAL \$/Baum
	(cm)									
	0-15	15-30	15-45	45-60	60-75	75-90				
<i>Aesculus hippocastanum</i>	392	3'263	8'509	12'142	12'138	10'816	47'260	1'211.8	52'389	1'343
<i>Aesculus x carnea</i>	392	5'116	0	2'044	0	0	7'552	686.5	8'346	757
<i>Acer platanoides</i>	1'175	6'266	7'665	4'929	0	0	20'035	801.4	22'288	891
<i>Tilia x europaea</i>	317	8'128	13'368	0	7'291	0	29'104	1'164.2	31'670	1'266
Total	2'276	22'773	29'542	19'115	19'429	10'816	103'951	3'863.9	114'693	

I-Tree Streets bewertet die Leistungen von Strassenbäumen in Bezug auf Ästhetik, Energieeinsparung, Regenwassernutzung und Ersatzleistung (replacement value). Die Kosten, die bei einem Ersatz entstehen, werden mit jährlich etwa 104'000 Dollar weitaus am höchsten eingeschätzt. Dabei berücksichtigt das Modell, wie alt und gross der Baum war, der ersetzt werden musste und addiert die Pflege- und Unterhaltungsarbeiten dazu, die bis zum Erreichen derselben Wachstumsgrösse aufgewendet werden muss. Der kühlende Effekt im Sommer und die isolierende Wirkung von Bäumen im Winter wird mit Energieeinsparungen in der Höhe von über 3'700 Dollar assoziiert. Die Einsparungen, die dank der Regenwasseraufnahme durch die Bäume generiert werden (Entlastung der Kanalisation u.a.), werden mit rund 3'600 Dollar angegeben. Gemäss Berechnungen des Programms haben die hundert mit Streets erfassten Bäume im Jahr 2011 über 500'000 Liter Regenwasser aufgenommen. Der ästhetische Wert wird mit dem kleinsten Wert beziffert; wobei die Leistung mit 3'450 Dollar nah bei den letzten beiden Werten liegt.

Neben dem jährlichen Gesamtertrag der Baumarten, berechnet i-Tree Streets auch den durchschnittlichen Wert jedes einzelnen Baumes, was bei dieser Untersuchung aufgrund der unter-

schiedlichen Anzahl Bäume pro Spezies absolut Sinn macht. Die höchsten Werte erzielt *Aesculus hippocastanum* mit einem Gesamtwert von 1'340 Dollar pro Individuum, dicht gefolgt von *Tilia x europaea* mit 1'270 Dollar pro Baum. Der Wert der *Acer platanoides* wird auf total 890 Dollar, *Aesculus x carnea* auf 760 Dollar pro Baum geschätzt. Die Reihenfolge entspricht den gemessenen Stammdurchmessern, woraus die Berechnungsgrundlagen von i-Tree Streets gut erkennbar sind.

Auf der folgenden Tabelle wurden die Wertermittlungen der untersuchten Baumarten zwecks Übersichtlichkeit nach Leistung zusammengetragen.

Tabelle 9: Überblick aller erhobenen Leistungen nach Baumart (i-Tree Streets)

Leistungen	<i>Aesculus hippocastanum</i>		<i>Aesculus x carnea</i>		<i>Acer platanoides</i>		<i>Tilia x europaea</i>		TOTAL alle Bäume	
	Tot.(\$)	\$/ind.	Tot.(\$)	\$/ind.	Tot.(\$)	\$/ind.	Tot.(\$)	\$/ind.	Tot.(\$)	\$/ind.
C-Speicherung	1'763	44.1	136	12.4	473	18.9	590	23.6	2'962	28.5
C-Sequestrierung	197	4.9	34	3.1	98	3.9	117	4.7	446	4.3
Schadstoffbeseitigung	325	8.3	43	3.9	131	5.2	117	4.7	616	6.2
Energie-Einsparungen	1'873	48.0	288	26.2	824	33.0	732	29.3	3'717	37.2
Minderung Regenabfluss	1'997	51.2	214	19.5	673	26.9	694	27.8	3'579	35.8
Ästhetische Wirkung	1'259	32.3	292	26.5	756	30.2	1'140	45.6	3'447	34.5
Total	7'414	188.8	1'007	91.6	2'955	118.1	3'390	135.7	14'767	146.5

Die Leistungen der Strassenbäume sind je nach Baumart anders gewichtet. Tendenziell werden die Energieeinsparungen, die Minderung des Regenabflusses und zum Teil auch die Ästhetik am höchsten eingeschätzt. Die Kohlenstoffspeicherung wird tiefer bewertet (mit Ausnahme von *A. hippocastanum*), liegt mit einem Anteil von 13 bis 24 Prozent jedoch noch deutlich im wirkungsvollen Bereich. Die jährliche Sequestrierung und Schadstoffbeseitigung nimmt mit 3 bis maximal 8 Dollar pro Baum hingegen eine untergeordnete Rolle ein.

A. hippocastanum erzielen mit fast 190 Dollar pro Baum erneut deutlich höhere Werte als die anderen Baumarten. Da die jüngeren Rosskastanien derselben Untersuchungsfläche (*A. x carnea*) bei i-Tree Streets separat aufgeführt werden und die ausgleichende Wirkung bezüglich Stammdurchmessern somit wegfällt, lassen sich die hohen Ergebnisse mit den grossen Stammdurchmessern von *A. hippocastanum* erklären. Dass bei der Ästhetik *Tilia x europaea* mit 46 Dollar pro Individuum alle anderen Werte klar übertrifft ist ein Hinweis dafür, dass die Berechnungen nur indirekt mit den Messparametern verknüpft sind.

4.3.4 Gegenüberstellung der Resultate von Eco und Streets

Wie den obenstehenden Tabellen zu entnehmen ist, fällt die Quantifizierung bei i-Tree Streets sehr viel höher aus als bei i-Tree Eco. Dies liegt einerseits daran, dass die Applikationen verschiedene Formeln und andere Datengrundlagen verwenden. Andererseits werden die verschiedenen Leistungen der Bäume bei Streets stärker differenziert und mit zusätzlichen Leistungen ergänzt, die bei Eco nicht berücksichtigt werden.

Der Vergleich der Resultate zeigt deutlich, wie weit die Ergebnisse auseinanderliegen, obwohl die gleichen Bäume und dieselben Messdaten vorliegen.

Tabelle 10: Vergleich der Resultate von Eco und Streets (Ø Werte pro Baumart, nach i-Tree Eco und Streets)*

Kohlenstoff:	C - Speicherung (t)		C- Sequestrierung (kg)		
	ECO:	STREETS:	ECO:	STREETS:	STREETS netto:
Aesculus species Ø	12.4	57.4	412	3473	6960
Acer platanoides	5	28.6	202	3212	5954
Tilia species	4.6	35.7	235	4568	7068
Abweichung (Faktor)	Ae sp	4.6		8.4	16.9
	Ac pl	5.7		15.9	29.5
	Ti sp	7.8		19.4	30.1

Schadstoffe:	Deposition (kg)		Total Netto (kg)		Geldwert total \$	
	ECO:	STREETS:	ECO:	STREETS:	ECO:	STREETS:
Aesculus species Ø	-	5.95	6.5	28.85	58	184
Acer platanoides		3	7.3	21.1	65	131
Tilia species		2.9	6.4	19	56	117
Abweichung (Faktor)	Ae sp	-		4.4		3.2
	Ac pl			2.9		2.0
	Ti sp			3.0		2.1

* Die Zahlen entsprechen dem jeweiligen Gesamtwert pro Baumart bei 25 Individuen. Da die Spezies von *Aesculus* bei Eco nicht unterschieden werden, wurde der durchschnittliche Wert aller Rosskastanien ermittelt und durch zwei dividiert, sodass bei allen drei Baumarten dieselbe Anzahl Bäume vorliegt. Es werden nur *Aesculus*, *Acer* und *Tilia* aufgeführt, da bei Streets keine Daten zu *Sophora* vorliegen.

Die Abweichungen der Resultate sind bei der Sequestrierung besonders gross. Während bei Eco die ermittelten Zahlen zwischen rund 200 und 400 kg Kohlenstoff liegen, sind es bei Streets etwa 3000 bis 4500 kg, also je nach Baumart acht-, sechzehn oder zwanzigmal mehr. Noch grösser sind die Unterschiede, wenn die Nettoergebnisse von Streets herangezogen werden (s. letzte Spalte oben). Bei der Kohlenstoffspeicherung und Netto-Schadstofffiltrierung weichen die Resultate ebenfalls deutlich, um die Faktoren drei bis acht voneinander ab. Weniger extrem sind die Unterschiede bei den errechneten Dollarbeträgen, wobei Streets die totalen Leistungen der Bäume immerhin zwei bis dreimal höher bewertet als Eco. Da bei der Wertermittlung letztlich aber jeweils andere Zwischenergebnisse vorliegen, können aus den Dollarbeträgen keine

direkten Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Annahmen bei der Monetarisierung gezogen werden.

Obwohl die Unterschiede zwischen i-Tree Eco und Streets (sowohl bei der Methode als auch bei den Ergebnissen, die daraus resultieren) beträchtlich sind, lassen sich aus den Ergebnissen grobe Tendenzen herauslesen (s. Kapitel 4.5, Interpretation der Ergebnisse). Die obenstehende Zusammenfassung der Ergebnisse gewinnt auch deshalb an Aussagekraft, da die überdurchschnittlichen Resultate der Rosskastanien durch die Berechnung der Mittelwerte (s. Tabellenbeschriftung) den Vergleich mit den anderen Baumarten besser aufzeigen. Demnach kann die hohe Leistung der Gattung nur zum Teil bekräftigt werden. Mit Ausnahme der Kohlenstoffspeicherung gleichen sich die Leistungen von *Aesculus sp.* nämlich tendenziell an diejenigen der anderen Baumarten an. Die Werte bleiben zwar hoch, werden zum Teil jedoch von den anderen beiden Baumarten überrundet. Beispielsweise ist die geschätzte C-Resorptionsmenge bei den Linden höher (nach Streets) und die Schadstofffilterleistung der Spitzahorne grösser als bei den erhobenen Rosskastanien (nach Eco). Es bleibt jedoch unklar, wie die Ergebnisse genau zustande kommen und wie stark sich die eingegebenen Parameter auf die jeweiligen Resultate auswirken.

Um die gewonnenen Werte besser nachvollziehen und interpretieren zu können, werden die Berechnungsgrundlagen von i-Tree im nächsten Kapitel etwas näher beleuchtet.

4.4 Methode (UFORE-Modell)

Die dargelegten Methoden beziehen sich auf die Berechnungsmodelle der Kohlenstoff- und Schadstoffbeseitigung von i-Tree Eco (UFORE: Urban Forest Effects Model).

4.4.1 Kohlenstoffspeicherung und jährliche Sequestrierung

Das UFORE-Modell kalkuliert die Kohlenstoff-Fixierung anhand der ermittelten Biomasse und unter Einbezug der geschätzten Wachstumsrate. Dabei werden die Parameter für jeden einzelnen Baum angewendet, wobei die Baumart und Vitalitätsstufe jeweils mitberücksichtigt wird.

Biomasse

Die Biomasse wird für jeden gemessenen Baum mit allometrischen Gleichungen²⁶ berechnet, die für die häufigsten U.S.-Baumarten der Fachliteratur zu entnehmen sind.²⁷ Liegt bei einer untersuchten Baumart keine allometrische Gleichung vor, wird der Durchschnitt der Gattung verwendet oder, falls auch keine Daten über den Genus vorliegen, der Durchschnitt aller Laubbäume oder Koniferen (Nowak 1994). Da die Gleichungen das Frischgewicht der Bäume als Rechnungsgrundlage verwenden, werden die gewonnen Zahlen mit artspezifischen Umwandlungsfaktoren multipliziert (die Umwandlungsfaktoren werden von den durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalten der Spezies abgeleitet) sodass zuletzt das Trockengewicht der artbezogenen Biomasse vorliegt (Nowak et al. 2008). Die durchschnittlichen Umwandlungsfaktoren betragen bei Harthölzern 0.56 (Nowak 1994; Nowak et al. 2002). Um das Total des gespeicherten Kohlenstoffs zu erhalten, wird das Gesamtrockengewicht der Biomasse mit dem Faktor 0.5 multipliziert (Forest Products Laboratory 1952; Chow & Rolfe 1989).

Die Gleichungen können sowohl auf dem Stammdurchmesser₁), als auch auf den Kronenparametern₂) beruhen:

Formel Blattfläche und -Biomasse: * $\ln Y_1) = b_0 + b_1X + b_2S$

$$\ln Y_2) = b_0 + b_1H + b_2D + b_3S + b_4C$$

Y = Blattfläche (m²) oder Blatt-Biomasse (Trockengewicht in g), X = DBH (cm), H = Kronenhöhe (m), D = Ø Kronendurchmesser (m), S = Ø Schattenfaktor für jede Spezies (% abgefangene Lichtstrahlung durch belaubte Kronen) (McPherson 1984), C = Aussenfläche der Krone ($\pi D(H+D)/2$) (Gacka-Grzesikiewicz 1980). *Quelle: David J. Nowak (1994).

²⁶ Gleichungen, die auf dem Vergleich unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten im Verhältnis zur Körpergrösse/ Organen basieren.

²⁷ Eine Zusammentragung der verwendeten Literatur, kann dem 1994 erschienen Bericht von David J. Nowak entnommen werden (Tabelle 1, S. 85).

Da Stadtbäume aufgrund häufiger Rückschnitte in der Regel über weniger Biomasse verfügen als ihre Artgenossen mit gleichen Stammdurchmessern in den Wäldern, werden die urbanen Gehölze mit dem Faktor 0.8 multipliziert (Nowak et al. 2008). Bei Individuen, die auf natürlichen Standorten oder Freiflächen stehen, werden keine Anpassungen vorgenommen.

Bei der Berechnung der Biomasse werden bei laubabwerfenden Bäumen, deren Blätter sich jährlich zersetzen, nur die verholzten Baumteile einbezogen. Die mit i-Tree Eco ermittelte Gesamtmenge Kohlenstoff bezieht sich demnach nur auf den Kohlenstoff, der im überdauernden Holzkörper eingelagert ist (www.ufore.org 2012).

Wachstumsrate

Die Wachstumsrate ist eng verknüpft mit der Dauer der Vegetationsperiode. Die Ergebnisse der Sequestrierung für das Jahr 2010 beruhen entsprechend auf den Klimadaten der Stadt Zürich. Die Formel für die Bestimmung der Wachstumsrate schliesst die Länge der Wachstumsperiode mit ein und wird ausserdem für jeden Baumtyp separat angeglichen: für Strassenbäume wurde die Standardwachstumsrate (Stw) auf 0.83 cm pro Jahr festgelegt (Fleming 1988; Frelich 1992; Nowak 1994). Da bei Park- und Waldbäumen die Konkurrenz um Licht und Raum häufig grösser ist als bei gepflanzten Alleen, wachsen die Strassenbäume im Vergleich zu Parkbäumen 1.78 mal schneller (2.29 mal schneller als Waldbäume). Die Zahlen gründen auf DBH-Messresultaten von Nowak (1994). Für die Typisierung eines Baumes wird die Lichtexposition der Baumkrone (CLE 1-5, s. Kap. 4.2.4) herangezogen, die bei der Bestandsaufnahme eruiert wurde. CLE 0-1 entspricht dem Standort Wald, CLE 2-3 einer Parksituation und CLE 4-5 einer Freifläche, die also sowohl eine locker bepflanzte Allee, als auch ein freistehender Park- oder Strassenbaum einschliessen kann.

Neben den Temperatur- und Lichtverhältnissen der Baumstandorte wird auch der Baumzustand bei der Berechnungen der Wachstumsrate miteinbezogen. Die Bäume werden in fünf ‚Vitalitätsstufen‘ eingeteilt: Ausgezeichnet, Dürftig, Kritisch, Eingehend und Tot (Excellent, Poor, Critical, Dying and Dead). Die Vitalitätsstufen beziehen sich auf das fehlende Baumkronen-Volumen in Prozent (% Missing) und das Absterben der Baumkrone in Prozent (% Dieback). Es wird davon ausgegangen, dass bereits weniger als 25 Prozent *Crown Dieback* einen limitierenden Effekt auf die Zuwachsraten haben (Nowak et al. 2008). Bäume, die in einem sehr schlechten Zustand sind und eingehen, werden mit Konditionsfaktor (Kf) 0.15 multipliziert, kritische Gesundheitszustände mit Kf 0.42 und ‚Dürftige‘ mit Kf 0.76. Tote Bäume werden mit 0 multipliziert, da keine Wachstumsprozesse mehr stattfinden. Gesunde Bäume, die keine Schäden aufweisen und folglich die maximale Leistung erbringen können, mit 1.

Formel:

$$\text{Wachstumsrate} = \frac{\text{Stw (cm/J)} \cdot \text{Anzahl frostfreie Tage/153}}{\text{CLE} - \text{Divisor}} \cdot \text{Kf}$$

Baumart

Eine Aufstellung der artspezifischen, zugrunde liegenden Grössen konnte trotz aufwändiger Recherche nirgends gefunden werden. Auch der Support von i-Tree konnte die Quellen, die bei der Berechnung der Leistungen nach Baumart verwendet werden, nicht angeben.

Monetäre Wertermittlung

I-Tree Eco schätzt den monetären Wert der CO₂-Abscheidung und –Speicherung auf 22.8 Dollar pro Tonne Kohlenstoff. Diese Zahlen basieren auf den geschätzten sozialen Kosten von Kohlendioxid zwischen 2001 und 2010 (i-Tree Eco Users Manual 2011). Wie bereits erwähnt, nimmt Eco bei internationalen Projekten keine monetäre Kohlenstoff-Bewertung vor.

4.4.2 Schadstoffbeseitigung

Die Luftschadstoffbeseitigung durch urbane Gehölze wird mit dem Multi-Layer- und Big-Leaf Modeling- Ansatz berechnet, wobei das Multi-Layer Modell die Photosyntheserate für multiple Baumkronenschichten kalkuliert und speziell für die Abschätzung von beschatteten Blättern wichtig ist. Das Big-Leaf Modell prognostiziert die Photosynthese und den Gasaustausch der Blätter und überträgt die Zahlen auf die Kronenfläche (www.ufore.org 2012).

Das i-Tree Modul ist darauf ausgerichtet, standardisierte lokale Wetterdaten und stündliche Schadstoffmessungen mit den Feldmessdaten zu verknüpfen, um daraus die stündliche Schadstoffbeseitigung zu eruieren (Nowak et al. 2008). Da die Deposition der Luftschadstoffe mit der Transpiration der Bäume verknüpft ist, werden die saisonalen Leistungsschwankungen berücksichtigt, die gerade bei laubabwerfenden Bäumen offensichtlich sind (www.ufore.org, 01.2012). Auch der Tagesverlauf, der die Prozesse im Baumkörper entscheidend mitsteuert, wird vom Programm einkalkuliert (z.B. die stomatäre Bewegung; Spaltöffnungen geschlossen bei Nacht).

UFORE verwendet das Gasaustausch- Depositionsmodell (Gas-Exchange Dry Deposition Model²⁸), das die trockene Deposition, also die Sedimentation und Adsorption/Diffusion von Schadstoffen während niederschlagsfreien Perioden berechnet (Nowak et al. 1998; 2000). Die

²⁸ ursprünglich vom Oak Ridge National Laboratory entwickelt (Baldocchi et al. 1987; Baldocchi 1988).

Fixierung von Partikeln und gasförmigen Depositionen durch die Baumrinde, wird hingegen auch im Winter einkalkuliert (Whittaker & Woodwell 1967).

Folgende Parameter werden für die Ästimation der Schadstoffbeseitigung berechnet und in die Gesamteinschätzung einbezogen:

- Luftschadstoff-Fluss (air pollutant flux)
- Depositionsgeschwindigkeit (deposition velocity)
- Luftwiderstand (aerodynamic resistance)
- Reibungsgeschwindigkeit (friction velocity)
- Widerstand quasi-laminare Grenzschicht (quasi-laminar boundary layer resistance)
- Kronendach-Widerstand (canopy resistance)
- Stomatärer Widerstand (stomatal resistance)
- Transpiration (transpiration)
- Geldwert (monetary value)
- [Verbesserung Luftqualität (air quality improvement)]

Die zugrunde liegenden Annahmen der einzelnen Methoden sind das Ergebnis jahrelanger Forschungsarbeiten und demnach entsprechend komplex. Da für das Verständnis der vorliegenden Untersuchung die Hintergründe der einzelnen Parameter nicht zwingend erforderlich sind, werden im Folgenden nur die Methoden näher betrachtet, die die erhobenen spezifischen Messresultate und Daten einschliessen und für die Nachvollziehbarkeit der ermittelten Resultate von Bedeutung sind. Die vollständige Formelsammlung kann der angegebenen Literatur entnommen werden (Hirabayashi et al. 2011; Nowak et al. 2006 und 2008; www.ufore.org).

Der **Luftschadstoff-Fluss** (F , in $\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ist das Produkt der Depositionsgeschwindigkeit (V_d , in m s^{-1}) und der Schadstoffkonzentration (C ; in g m^{-3}):

$$F = V_d \cdot C$$

Die **Depositionsgeschwindigkeit** (V_d) setzt sich zusammen aus dem Luftwiderstand (R_a), dem Widerstand der quasi-laminaren Grenzschicht (R_b) und dem Kronendach-Widerstand (R_c) (Bal-docchi et al. 1987):

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1}$$

R_a und R_b basieren auf den stündlichen meteorologischen Daten der Stadt Zürich und werden mit einer Reihe von Formeln ermittelt, die an dieser Stelle nicht aufgeführt werden.

Um den stündlichen **Kronendachwiderstand** R_c für O_3 , SO_2 und NO_2 zu berechnen, werden drei Komponenten einbezogen: der stomatäre Widerstand (r_s)²⁹, der Widerstand des Mesophylls (r_m) und der kutikuläre Widerstand (r_t):

$$1/R_c = 1/(r_s + r_m) + 1/r_t$$

Der kutikuläre Widerstand wurde bei SO_2 auf $8'000 \text{ m s}^{-1}$, bei O_3 auf $10'000 \text{ m s}^{-1}$ und bei NO_2 auf $20'000 \text{ m s}^{-1}$ festgesetzt, um die typischen Abweichungen zwischen den Stoffen anzurechnen (Lovett 1994). Die Mesophyll Resistenz wurde bei SO_2 mit 0 (Wesely 1989), bei O_3 auf 10 s m^{-1} (Hosker and Lindberg 1982) und bei NO_2 auf 100 s m^{-1} festgesetzt, da der Transport von Wasser und NO_2 im Blattinneren differiert und auf diese Weise die berechneten, in der Literatur üblichen Depositionsgeschwindigkeiten für NO_2 eingehalten werden (Lovett 1994).

Weil die Fixierung von CO und PM10 nicht direkt mit der Transpiration verknüpft ist, werden Konstanten verwendet: Kohlenmonoxid (CO): $R_{c,InLeaf} = 50'000 \text{ (sm}^{-1}\text{)}$, $R_{c,OutLeaf} = 1'000'000 \text{ (sm}^{-1}\text{)}$, nach Bidwell & Fraser (1972); Feinstaub (PM10): $V_{d,Median} = 0.018 \text{ m s}^{-1}$, nach Lovett (1994).

Folgende Faktoren werden in die Berechnungen des stündlichen Kronendachwiderstands eingebunden: Lufttemperatur (K°), photosynthetisch aktive Strahlungen (PAR; $\mu E \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}), Reibungsgeschwindigkeit (m s^{-1}), CO_2 -Konzentration (ppm) und absolute Luftfeuchtigkeit (kg m^{-3}).

[Der Kronendachwiderstand R_c wird mit einer modifizierten Version des Big-Leaf- und Multi-Layer Modells berechnet (Baldocchi et al. 1987; Baldocchi 1988).]

Die Ermittlung der Schadstoffbeseitigung von einzelnen Bäumen erfolgt anhand des Kronendurchmessers und der Blattoberfläche:

$$I_x = R_t \cdot (L_{Ax} / L_{At}) / N_x$$

I_x = Schadstoffbeseitigung von Individuum mit Kronendurchmesser x , R_t = Total Schadstoffbeseitigung (kg) (alle Kronendurchmesser), L_{Ax} = Total Blattoberfläche mit Kronendurchmesser x (m^2), L_{At} = Total Blattoberfläche (m^2) (alle Kronendurchmesser), N_x = Anzahl Bäume mit Kronendurchmesser x .

(Alle Formeln stammen von Hirabayashi et al. 2011; Nowak et al. 2006 und 2008)

²⁹ Die Methode, die der Ermittlung des stomatären Widerstands zugrunde liegt, wird von Hirabayashi et al. (2011) ausführlich beschrieben (S. 10-22).

Monetäre Wertermittlung

Die monetäre Bewertung der Schadstoffabnahme, die durch die diversen Wirkungen der urbanen Gehölze generiert wird, wird mit dem Median der Externalitäten ermittelt, die in den Vereinigten Staaten für jeden Schadstoff definiert wurde. Diese Werte entsprechen, in Dollars pro Tonne: NO₂ = 6752, O₃ = 6752, PM10 = 4508, SO₂ = 1653, CO = 959 (Murray et al. 1994). Diese Beträge wurden kürzlich an die Werte von 2007 angepasst, die auf dem PPI (Producers Price Index) basieren (Capital District Planning Commission, 2008) und entsprechen heute, nach Nowak et al. (2008):

NO ₂	=	\$ 9906 / t
O ₃	=	\$ 9906 / t
PM10	=	\$ 6614 / t
SO ₂	=	\$ 2425 / t
CO	=	\$ 1407 / t

4.5 Interpretation der Ergebnisse von i-Tree Eco

Nach Einsicht der gewonnenen Resultate sind verschiedene Fragen aufgetaucht, die sich anhand des methodischen Ansatzes von i-Tree Eco nun zum Teil klären lassen.

Die Hauptfaktoren, die bei den Leistungen der Bäume in Bezug zur Kohlenstoff- und Schadstoffbeseitigung am stärksten ins Gewicht fielen, sind der Stammdurchmesser, die Baumart und der allgemeine Gesundheitszustand.

Kohlenstoffspeicherung

Bei der Kohlenstoffspeicherung ist neben dem Stammdurchmesser der Bezug zur Baumart besonders hoch. Die überragenden Resultate der Stauffacherstrasse veranschaulichen dies deutlich: Obwohl die Bäume entlang des Volkshauses (Stauffacherstrasse I) zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme in einem sehr schlechten Zustand und zum Teil schon beinahe eingegangen waren, sind die ermittelten Zahlen etwa doppelt so hoch wie die Ergebnisse der restlichen Strassenalleen. Zwar waren die Stammdurchmesser mit durchschnittlich 36.2 cm grösser als diejenigen der anderen Strassenalleen, doch können die grossen Leistungsunterschiede nicht allein mit der Stammdicke erklärt werden. (Der Median liegt mit 32.1 cm zudem im Bereich der anderen Alleen.) Die Stauffacherstrasse II beim Bullingerplatz hebt sich bezüglich Stammdicke indes von allen Baumreihen stark ab (\emptyset Stammdurchmesser = 43 cm; Median = 43.3 cm), wodurch ein direkter Vergleich mit den anderen Strassenabschnitten erschwert wird. Der Abweichung wurde schon während der Bestandsaufnahme entgegengewirkt, indem als ,ausglei-

chende Massnahme' ein Drittel des Strassenabschnitts (8 Bäume) mit einem jüngeren Alleeabschnitt an der Erismannstrasse ersetzt wurde (s. Kartenausschnitt S. 51). Wie den Tabellen der Resultate von i-Tree Streets zu entnehmen ist, ist die dort vorgefundene Unterart der Roskastanie (*A. x carnea*) viel weniger leistungsfähig als *A. hippocastanum*. Trotz dieses senkenden Faktors übersteigen die ermittelten Zahlen die Resultate der anderen Strassenabschnitte jedoch sehr klar. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Baumart einen grösseren Einfluss auf das C-Speichervermögen ausübt als die Durchmesser der Stämme.

Vor diesem Hintergrund lässt sich auch erklären, wieso die Lindenstrasse mit dem hohen Anteil von älteren Bäumen keine höheren Zahlen liefert (\emptyset Stammdurchmesser = 32.3 cm; Median = 29.6 cm). Sowohl bei der Speicherung, als auch bei der jährlichen Abscheidung von Kohlenstoff, weist die Baumreihe im Vergleich zu den anderen Strassenabschnitten tiefe Zahlen auf (mit 4631 kg die tiefsten bei der C-Speicherung). Dies, obwohl die Bäume mit einer durchschnittlichen Höhe von etwa 13 Metern gleich gross waren wie die leistungsstärksten Roskastanien beim Bullingerplatz und 20 von 25 Bäumen in einem ausgezeichneten Zustand waren (die restlichen waren in einem guten Zustand³⁰). Bei %-Missing und %-Dieback wiesen sie deutlich kleinere Zahlen auf, sodass beim Kronenvolumen kaum Abzüge vorlagen. Der allgemeine Zustand der Linden war demnach mindestens so gut und besser als derjenige der Roskastanien, woraus sich ableiten lässt, dass *Tilia sp.* aufgrund ihrer Physiognomie oder ihres Metabolismus weniger Kohlenstoff einlagert als beispielsweise *Aesculus hippocastanum*.

Sequestrierung

Bei der Sequestrierung ist der Zusammenhang zwischen der Baumart und der Kohlenstoffaufnahme weniger eindeutig. Dafür nimmt die Bedeutung des Gesundheitszustands merklich zu. Dies wird erneut am Beispiel der Stauffacherstrasse I gut erkenntlich; die eingehenden Bäume beim Volkshaus schneiden bei der Sequestrierung deutlich schlechter ab. Bedenkt man, dass die Mehrheit der Bäume fehlende oder abgestorbene Kronenpartien aufwiesen und viele Jungbäume inmitten der Vegetationsperiode (14.07.2011) braune statt grüne Blätter besaßen, erscheinen die berechneten Werte im Vergleich zu den anderen Baumreihen dennoch als zu hoch. Es ist denkbar, dass aus ungenauen Feldmessungen (die bei % Missing und % Dieback ohnehin auf Schätzmethoden beruhen) überschätzte Leistungen resultieren können. Andererseits erscheint die Annahme, dass der limitierende Effekt bei den Zuwachsraten erst bei <25 Prozent eintritt (s. Kap. 4.4.1) als sehr grosszügig, was eine Überschätzung der Leistungen bei wenig vitalen Bäumen noch verstärken kann. Dabei ist festzuhalten, dass der Schätzungs-Standardfehler (estimation error), der sowohl die Ungenauigkeiten bei den Messungen, als

³⁰ Beim vom Programm als tot erklärten Baum (ID 1), handelt es sich um einen Eingabefehler (s. Tabelle 3).

auch die Unsicherheit der Gleichungen und Umrechnungsfaktoren einbezieht, unbekannt ist (Nowak et al. 2008). Doch obschon es sich bei den Zahlen zum Teil möglicherweise um ungenaue Schätzungen handelt, ist der Einfluss des Gesundheitszustands klar erkennbar und zeigt auf, dass die Leistungen in Bezug auf die Sequestrierung stark abnehmen, wenn die Bäume nicht in einem guten Zustand sind.

Schadstofffiltrierung

Ähnlich verhält es sich bei der Schadstofffiltrierung: Neben dem Stammdurchmesser ist auch hier der Gesundheitszustand der Bäume für die betreffenden Leistungen ausschlaggebend. Die Resultate sind nachvollziehbar, zumal die Absonderung der Schadstoffe von der Depositionsgeschwindigkeit abhängt und diese wiederum mit dem Kronendachwiderstand verknüpft ist, die die verschiedenen Abläufe und Prozesse im Pflanzeninneren einbezieht (s. Kap. 4.4.2).

Die verschiedenen Baumarten weisen bei den Resultaten der Schadstofffiltrierung hingegen keine signifikanten Unterschiede untereinander auf. Dass sich die Ergebnisse nicht deutlicher voneinander abheben ist erstaunlich, da bei vielen Baumarten bekannt ist, wie sie auf Schadstoffe reagieren. Der schwache Bezug zur Gattung lässt sich damit erklären, dass die Baumarten bei den verwendeten Formeln nur indirekt mit der Blattoberfläche einbezogen werden (s. Formel S. 75).

Auf der folgenden Tabelle sind Baumarten aufgeführt, die in den Vereinigten Staaten bei der Steigerung der Luftqualität die höchsten Werte erzielen. Die Rangabfolge basiert auf den Effekten der Bäume in Bezug auf Schadstoffe, VOC-Emissionen und auf die Temperatur, sowie auf den externen Kosten, die für die Schadstoffe bestimmt wurden (s. S. 76) (Nowak 2000c).

Tabelle 11: Bestplatzierte Baumarten für die Verbesserung der Luftqualität in den USA (nach Nowak 2000c).¹⁾

O ₃	CO	Total	
<i>Ulmus procera</i>	<i>Tilia americana</i> *	<i>Ulmus procera</i> *	* empfohlene Baumarten für urbane Standorte
<i>Tilia europea</i> *i	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Tilia europea</i>	i mittlere Toleranz (intermediate tolerance)
<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Tilia tomentosa</i> *	<i>Liriodendron tulipifera</i> *S	S empfindlich (sensitive to pollution)
<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Ulmus rubra</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	T SO ₂ -tolerant
<i>Liriodendron tulipifera</i> *S	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Tilia platyphyllos</i> *	i/U mittlere Toleranz gegenüber SO ₂
PM10	SO ₂ / NO ₂	Total	
<i>Ulmus procera</i> *	<i>Ulmus procera</i> *i/U	<i>Tilia cordata</i> *	S/U SO ₂ -empfindlich
<i>Platanus x acerifolia</i> *	<i>Tilia europea</i> *T/S	<i>Tilia tomentosa</i> *	T/S SO ₂ -tolerant und NO ₂ empfindlich
<i>Cupressocyparis x ley.</i>	<i>Populus deltoides</i> T	<i>Betula papyrifera</i>	
<i>Juglans nigra</i>	<i>Platanus x acerifolia</i> *T	<i>Celtis laevigata</i> *	
<i>Tilia europea</i>	<i>Liriodendron tulipifera</i> *T	<i>Fraxinus excelsior</i> *	

¹⁾ Die Untersuchung wurde an ausgewachsenen Exemplaren in urbanen Zonen von Nordamerika durchgeführt. Die vollständige Liste enthält 242 Baumarten.

Die Tabelle führt vier Baumarten auf, die bei der Untersuchung in Zürich erhoben wurden: *Tilia cordata*, *Tilia europaea*, *Tilia tomentosa* und *Liriodendron tulipifera*. Die gewonnenen Resultate mit i-Tree können die Forschungsergebnisse der U.S.-Studie jedoch nicht bestätigen; die Bäume an der Lindenstrasse zeigten im Vergleich zu den anderen Baumarten bei der Schadstofffilterung keine ausserordentlich hohen Leistungen, die die Bestplatzierung auf der Liste untermauern würden. Es ist aber festzuhalten, dass die Untersuchung in Amerika an ausgewachsenen Exemplaren durchgeführt wurde, was bei den Strassenbäumen in Zürich nicht der Fall war und für die Ergebnisse entscheidend ist. Bei der Linde im Waldgarten sehen die Resultate nämlich bereits anders aus: Wie der Tabelle im Anhang zu entnehmen ist, sind bei allen Schadstoffen die Zahlen bei *Tilia sp.* am höchsten. [Der Spitzahorn (*Acer platanoides*), der bei den Berechnungen mit i-Tree, sowohl bei Eco als auch bei Streets, ebenfalls hohe Leistungen erbrachte, ist in der amerikanischen Liste nicht aufgeführt.]

Fazit

Dass die Kombination der drei Hauptfaktoren die leistungsfähigsten Bäume hervorbringt, wird anhand der Ergebnisse des Waldgartens beispielhaft demonstriert. Die Parkbäume erbringen bei allen untersuchten Parametern die höchsten Leistungen.

Geht man in der Annahme, dass die Bäume des Spielplatzes den durchschnittlichen Parkbaum von Zürich repräsentieren, ist die Kohlenstoffspeicherung eines Parkbaums beinahe viermal höher als diejenige der gemittelten Resultate der Strassenbäume.³¹ Bei gleicher Individuenzahl würden demnach jährlich über 2'700 kg Kohlenstoff (gegenüber total rund 1500 kg bei den Strassenbäumen) durch die Sequestrierung hinzukommen. Grosse Leistungsunterschiede lassen sich auch bei der Schadstofffilterung herauslesen: Eine hypothetische Anzahl von 125 Waldgarten-Bäume würde demnach 100 kg Schadstoffe aus der Luft entfernen, wobei es bei den 125 erhobenen Strassenbäume total 32 kg sind.

Diese Hochrechnung soll die Leistungen der Strassenbäume keinesfalls abwerten, doch kann eine Gegenüberstellung helfen, das mögliche Potential von Stadtbäumen aufzuzeigen. Die Untersuchungsfläche beim Waldgarten wurde gewählt, um die Leistungen von vitalen, älteren Stadtbäumen zu erfassen, sodass die Bedeutung der Standortverhältnisse veranschaulicht werden kann. Gute Wachstumsbedingungen steigern nicht nur den ästhetischen Wert, sondern verbessern zugleich die Luftqualität und das Klima. Obwohl Parkbäume aufgrund der verschiedenen Voraussetzungen und Funktionen nicht direkt mit Strassenbäumen vergleichbar sind,

³¹ Es handelt sich bei den mit Faktor 25 ermittelten Zahlen nicht um *allgemeingültige* Ergebnisse sondern um Schätzungen, die auf den Resultaten von i-Tree beruhen und nur zur Veranschaulichung der groben Tendenzen verwendet werden.

drücken die gewonnenen Resultate dennoch aus, dass mit grossen, gesunden Bäumen viel höhere Leistungen zu erreichen sind.

4.6 Schlussfolgerungen

Die Leistungsfähigkeit bezüglich Kohlenstoffresorption und Schadstoffbeseitigung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Von grosser Bedeutung ist die Struktur und Zusammensetzung der Gehölze: Ein hoher Anteil von alten Bäumen mit grossen Stammdurchmessern steigert das C-Speichervermögen, ebenso verbessert sich das Ergebnis der jährlichen Sequestrierung und Schadstofffilterung, wenn die Gehölze in einem guten Gesundheitszustand sind und eine hohe Vitalität aufweisen. Eine optimale Konstellation besteht demnach aus gesunden Bäumen mit hoher Alterserwartung, die auf lange Sicht gesteigerte Leistungen garantieren und den Baumbestand sichern (Chaparro & Terradas 2009).

Vor dem Hintergrund der CO₂-Problematik ergeben sich weitere positive Aspekte bei alten Bäumen; denn je älter die Bäume werden, desto seltener müssen neue Bäume gepflanzt werden, desto entbehrlicher sind die Pflegeeinsätze (die stets mit CO₂-Abgaben und Kosten verbunden sind) und desto länger zögert sich der Zersetzungsprozess hinaus. Urbane Gehölze, die gefällt werden müssen, werden zumeist geschreddert und zu Kompost verarbeitet. Wenn aus den Bäumen hingegen Holzprodukte hergestellt werden, bleibt der gespeicherte Kohlenstoff länger eingebunden. Dass die Weiterverarbeitung von Holz im grösseren Rahmen eine CO₂-Senke darstellt ist bekannt und wird als Empfehlung für nachhaltiges Forstmanagen bereits abgegeben (Chaparro & Terradas 2009).

Der Zerfall der Bäume wird in den Berechnungsmodellen von i-Tree Eco nicht berücksichtigt, wodurch die Resultate der Kohlenstoffspeicherung wohl überbewertet werden (Nowak 2008). Auch der CO₂-Ausstoss, der bei der Baumpflege durch den Einsatz von diversen Geräten und Fahrzeugen auftritt, wird nur bei i-Tree Streets einberechnet. Der Überschätzung der C-Bilanz bei Eco wird jedoch mit der eher zurückhaltenden Ästimation der Kohlenstoffspeicherung, die auf Feldmessungen von Strassenbäumen in Chicago beruhen, entgegengewirkt (Nowak 1994). Die tatsächliche Menge gespeicherten Kohlenstoffs ist gerade in wärmeren Zonen möglicherweise höher (Nowak 2008). Um die regionale Variabilität besser verstehen und einkalkulieren zu können, werden mehr Forschungsarbeiten und vor allem auch mehr Daten zu urbanen Wachstumsraten benötigt. Momentan werden regionale Wachstumsdurchschnitte verwendet, die auf begrenzt verfügbaren gemessenen Baumwachstumsdaten urbaner Standorte beruhen und anhand der Wachstumsperiode und Konkurrenz standardisiert werden (s. S. 72). Die Methodik, die von forstwissenschaftlichen Modellen abgeleitet und auf Stadtbäume übertragen wurde, muss noch genauer spezifiziert und durch möglichst häufige Anwendungen weiter geprüft werden (Nowak 2008). Dank der vereinfachten Version des Modells, die als i-Tree Streets

Applikation weltweit zur freien Verfügung steht, können nun im grösseren Stil Messdaten angesammelt werden, die die Wachstumsmodellierung zukünftig verfeinern wird (Nowak 2008). Da die Benutzer angeregt werden, die Bestandsuntersuchung in regelmässigen Abständen zu wiederholen (um allfällige Veränderungen im Bestand nachzuverfolgen u.a.), können über die Jahre neue Erkenntnisse über die Wachstumsentwicklung von urbanen Gehölzen dazugewonnen werden. Die Schätzungen der jährlichen Sequestrierungen werden auf diese Weise genauer und die Aussagekraft der Ergebnisse gewinnt an Bedeutung.

Die Resultate, die im Rahmen dieser Arbeit mit i-Tree Streets gewonnen wurden, sind wie schon erwähnt nicht direkt auf die Schweiz übertragbar. Dass sich die Applikation für eine Anwendung in Europa zukünftig möglicherweise trotzdem besser eignen könnte als Eco, wird in der Diskussion eingehender besprochen.

5 Diskussion

5.1 Wie ist die Methode von i-Tree zu beurteilen?

I-Tree berücksichtigt bei der Berechnung der Ökosystemdienstleistungen diverse Einflussfaktoren und vernetzt auf diese Weise das Wissen langjähriger Forschungsarbeiten in einem komplexen Computermodell. Nebst stündlichen Schadstoffmessungen und regionalen Wetterdaten, fliessen etliche physikalische Gesetzmässigkeiten und Messgrössen der Bäume mit ein, um die Prozesse in den Bäumen zu berechnen. Doch lässt sich mit diesen Daten die Methode von i-Tree nun besser beurteilen?

Um dieser Frage nachzugehen, wird eine Forschungsarbeit herangezogen, die zur Beantwortung einer ähnlichen Fragestellung fünf verschiedene Methoden aus fünf Ländern miteinander verglichen hat (*Comparing Formula Methods of Tree Appraisal*, Watson 2002). Die Gegenüberstellung der Methoden hat gezeigt, dass die unterschiedlichen Herangehensweisen zu stark divergierenden Ergebnissen geführt haben. Den Modellen liegen jeweils andere Bewertungsansätze und verschiedene Formeltypen zugrunde, sodass die Gewichtungen der entsprechenden Kriterien anders ausfallen. Doch obwohl sich die fünf untersuchten Methoden auf andere Gesichtspunkte ausrichten und auch nicht die gleichen Ziele verfolgen wie i-Tree, können die angewandten Formeln gut miteinander verglichen werden und Rückschlüsse zulassen, die auf mathematischen Grundsätzen beruhen und bei allen Modellen gelten. Dies soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden: Die Ausgangslage der meisten Formeln ist die initiale Wertermittlung anhand der Baumgrösse, worauf in einem zweiten Schritt die Werte anhand der Faktoren angepasst werden, die vom Modell vorgegeben sind (Watson 2002). Diese können beispielsweise den Zustand, die Standortmerkmale oder spezifische Baumfunktionen (ökologische, ästhetische, historische, etc.) miteinschliessen. Die Anpassung erfolgt meistens durch Multiplikation, sodass der Initialwert je nach Faktoren sowohl zunehmen, als auch abnehmen kann. So besteht auch die Möglichkeit, den Wert mit Null zu beziffern, wenn bei einem Faktor keine Leistungen erbracht werden. Bei der jährlichen Sequestrierung kann dies auftreten, wenn der Baum abgestorben ist und demnach kein Stoffaustausch mehr stattfindet (s. Kap. 4.4.1). Andererseits bewirkt die Multiplikation auch eine Zunahme der Varianz, sodass bei ungenauen oder verfehlten Annahmen die Resultate stark verfälscht werden können (Watson 2002). Je nach Methode kann der Variationskoeffizient sehr hoch sein und die Ergebnisse am meisten beeinflussen (Watson 2002). Bei i-Tree wird diesem Effekt entgegengewirkt, indem die meisten Formeln mit Additionen kombiniert werden und der Variationskoeffizient auf diese Weise verkleinert wird. Macht es hingegen Sinn, den Wert Null zuzulassen wie bei der Sequestrierung, wird die Formel mit einem Faktor ergänzt (Konditionsfaktor K_f , s. S. 73).

Die Gründe, die im Bericht von Watson als Hauptfaktoren für mögliche Ungenauigkeiten bei Wertermittlungen dargelegt werden, beziehen sich hauptsächlich auf Parameter, die aufgrund von subjektiven Verfahren auftreten. Ästhetische Eigenschaften sind quantitativ beispielsweise schwierig zu erfassen und können selbst unter Berücksichtigung von genauesten Kriterien kaum völlig objektiv beurteilt werden. Allgemein vertrauen viele Methoden oft stark auf die Erfahrung und Expertise des Gutachters (Watson 2002). Dank ausführlich beschriebenen Messmethoden, Datenvorgaben und genauen Erklärungen im Benutzerhandbuch, fallen bei der Anwendung von i-Tree viele dieser Ungenauigkeitsfaktoren weg. Der Spielraum bei der Bestandsaufnahme ist klein und da viele qualitative Funktionen, darunter auch die Ästhetik, nicht berechnet werden, ist die Methode von i-Tree im Vergleich zu den fünf anderen Modellen konsistenter. Zwar können auch bei i-Tree Messfehler oder Ungenauigkeiten auftreten, doch ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse insgesamt höher einzuschätzen. Am ehesten können bei der Ermittlung der fehlenden oder abgestorbenen Kronenbereiche (% Missing, % Dieback) Abweichungen erfolgen, wenn verschiedene Gutachter die Messungen vornehmen. Deshalb wird empfohlen, die Bestandsaufnahme zu zweit durchzuführen, sodass bei ungleicher Beurteilungsart die Bäume vor Ort nochmals betrachtet werden können (s. Kap. 4.2.4). Da die Stadtbäume in Zürich nicht im Team aufgenommen werden konnten, fehlte bei der vorliegenden Untersuchung die Zweitmeinung, sodass bei den Resultaten mit einer tendenziellen Über- oder Unterbewertung zu rechnen ist. Andererseits ist bei einer Untersuchung, die von nur einer Person durchgeführt wird, die Inkontinuität kleiner (z.B. bei der ermittelten Kronenbreite oder Baumhöhe) als wenn mehrere Gutachter separat unterwegs sind.

Die Wertermittlung von urbanen Gehölzen sollte die Unterschiede in Bezug zur Grösse, dem Zustand und der untersuchten Leistungen reflektieren (Watson 2002). Je nach Methode können die Parameter stark, schwach oder auch gar nicht gewichtet werden, sodass die Resultate je nach Formel entweder gut interpretierbar oder kaum nachzuvollziehen sind. Die neuseeländische Methode (STEM), die von Watson in seinem Bericht vorgestellt wird, ist ein Punktesystem mit 20 Attributen, die mit je 3 bis 37 Punkten gewichtet werden. Die Attribute werden in drei Kategorien eingeteilt, wobei je fünf Attribute den ersten beiden und zehn der dritten Kategorie zugewiesen sind. Demnach findet bei STEM gleich eine zweifache Gewichtung statt; einmal bei der Punkteverteilung und einmal bei der Kategorie (Verhältnis 1:1:2). Liegen die Basisdaten vor, können die ermittelten Geldbeträge somit leicht erläutert werden. Bei i-Tree sind die einzelnen Faktoren zum Teil zwar auch gewichtet, doch sind die Formeln so komplex (und zahlreich), dass es schwierig ist, einen Zusammenhang zwischen den Resultaten und den eingegebenen Parametern aufzuzeigen. Wie gross der Einfluss der Baumart oder des Stammdurchmessers tatsächlich ist, oder wie stark die einzelnen Messgrössen bei den Berechnungen von Eco einfließen, kann beispielsweise nicht mit Sicherheit gedeutet werden. Die Interpretationen der Ergebnisse beruhen auf Vermutungen, die sich aufgrund von beobachteten Tendenzen erge-

ben. Die Annahmen des vorliegenden Berichts können kaum mit der Herleitung der Formeln belegt werden. Zudem sind die Einflussfaktoren bei i-Tree nicht nur zahlreich, sondern häufig auch nicht herauslesbar: Die Resultate werden nicht allein von den bekannten Messgrössen bestimmt, sondern rühren ebenfalls von den zugrundeliegenden Theorien aus der Literatur, was das Verständnis und die Bestimmung der ausschlaggebenden Faktoren erschwert. Die Wechselwirkungen zwischen den Variablen und den Parametern können demnach nicht systematisch nachverfolgt und hergeleitet werden und bleiben folglich meist verborgen.

5.1.1 Fazit und Anmerkungen

Die Unterschiede in Bezug zur Grösse, Baumart, Zustand und den verschiedenen Leistungen werden in die Wertermittlung von i-Tree aufgenommen und können durch Gegenüberstellung der Resultate partiell auch dargelegt werden. Die Komplexität des UFORE-Modells macht die Analyse der Ergebnisse jedoch schwierig, wenn die gewonnenen Zahlen belegt und erklärt werden sollen. Das Programm ist deshalb vordergründig als Bewertungstool zu betrachten, das den Schwerpunkt auf die Anwendung und die Resultate legt. Die zugrunde liegende Methodik und Theorie läuft für den Benutzer im Hintergrund ab. Eine Zusammenstellung von wissenschaftlichen Berichten und Hintergrundartikeln steht auf der Homepage in der Archiv-Rubrik zwar zur Verfügung, doch wenn genauere Informationen über einzelne Messparameter oder die von i-Tree verwendeten Formeln eingesehen (oder hinterfragt) werden sollen, sind die Informationen eher spärlich oder teilweise gar nicht vorhanden. Da amerikanische Programmbenutzer dutzende themenspezifische Grafiken und Tabellen abrufen können und die Interpretation der Ergebnisse grundsätzlich bereits vorgefertigt ist, ist der Bedarf an Hintergrundinformationen vor Ort vermutlich eher gering. Wird das Programm so verwendet wie es vorgesehen ist (Stratified Sample Method), können sogar vom Programm vorgeschaltete, zwanzigseitige Berichte ausgedruckt werden, die die Zahlen der Untersuchung bereits enthalten und im Text erläutern. I-Tree ist für amerikanische User insofern ein zeitsparendes, klarstrukturiertes Werkzeug, das nicht nur die verschiedenen Leistungen der Bäume aufzeigt sondern zugleich übersichtlich dargestellte Argumente für zukunftsgerichtete, raumplanerische Strategien liefert. Das Programm eignet sich mit anderen Worten sehr gut, solange sich die Fragestellung auf die zur Verfügung stehenden Diagramme ausrichten. Sollen jedoch andere Zusammenhänge aufgezeigt werden, wird die Interpretation der Ergebnisse umständlich und sehr zeitaufwändig. Für Projekte, die auf kompletten Bestandsaufnahmen beruhen oder ausserhalb von Amerika durchgeführt werden, eignet sich das Programm als Analysewerkzeug eher wenig.

Wie bereits dargelegt, verringert die Multidimensionalität des UFORE-Modells die Überschaubarkeit und die Nachvollziehbarkeit der Resultate; sie steigert im gleichen Zug dank diversen spezifischen Messgrössen aber auch die Glaubwürdigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse. Die Anzahl der Konstanten wird so gering wie möglich gehalten, um sie stattdessen mit effektiv

gemessenen Werten zu ersetzen: Die Vegetationsperiode wird anhand der Klimadaten ermittelt, nicht anhand Erfahrungswerten, wobei sich dadurch auch die Resultate der Transpiration und Photosynthese auf das datierte Wetter beziehen. Niederschläge, Lichtverhältnisse, Schattenwirkungen und viele weitere physikalische Einflussfaktoren werden ebenfalls einberechnet (s. Kap. 4.4.2). Die Blattfläche und die Biomasse gründen auf aufwändigen Messmethoden und auf Forschungsergebnissen, die sich auf die jeweilige Baumart beziehen (s. Kap. 4.4.1). Auch die Schadstoffkonzentration, die sich stark auf die Leistungsfähigkeit bei der Verbesserung der Luftqualität auswirkt, wird mitkalkuliert. Das Modell wendet demnach eine äusserst differenzierte Methodik an und verfolgt einen sehr fundierten Ansatz bei der Ermittlung der angesteuerten Ökosystemdienstleistungen.

Der Vergleich mit den anderen fünf Methoden zeigt, dass i-Tree Eco sehr viele Messparameter aufweist. Trotz vieler berücksichtigter Faktoren deckt der Einblick in die ‚fremden‘ Modelle allerdings auch mögliche Lücken oder Unvollständigkeiten bei i-Tree auf. So wird die Lebenserwartung der Bäume, die gerade bei nachhaltigen Planungskonzepten- und Zielen von grosser Relevanz ist, nicht einbezogen. Ob die Lebenserwartung aufgrund mangelnder Übereinstimmung in urbanen Gebieten bewusst weggelassen wurde, ist nicht bekannt, wäre aber vorstellbar, da sich die in der Literatur angegebenen Zahlen in der Regel auf Bäume beziehen, die in natürlichen Umgebungen vorgefunden werden. Es ist möglich, dass nicht genügend Datenmaterial von Stadtbäumen vorliegt, welches sich auf die Lebenserwartung unter Berücksichtigung der schädigenden Umwelteinwirkungen in urbanen Gebieten bezieht. Da jedoch gerade die städtischen Standortverhältnisse von zentraler Bedeutung sind und der Gesundheitszustand, sowie folglich auch die Ökosystemdienstleistungen direkt davon abhängen, erscheint es nachlässig, dass i-Tree die Standortverhältnisse nicht eingehender berücksichtigt. Die Baumalleen in Zürich wurden bewusst an verschiedenen Standorten gewählt, sodass unterschiedliche Typen von Strassenbäumen erfasst werden konnten. Doch da das Programm die Standortfaktoren nur indirekt durch das Wuchsverhalten oder durch fehlende Kronenpartien festhält, können keine Rückschlüsse auf die Wirkung der Standortverhältnisse gemacht werden. Damit gehen diese Informationen verloren.

Andererseits sind Standortverhältnisse schwierig zu quantifizieren, zumal die urbanen Einflüsse äusserst vielfältig sind und eine genaue Abklärung der Wachstumsbedingungen sehr aufwändig wäre. (Anthropogene Faktoren schliessen Salzeinträge, Verkehr, Verletzungen, Pflegeeingriffe, Bodenverdichtungen und viele weitere Schädigungen mit ein.) Jedoch könnte zumindest die Grösse der Baumscheibe oder der Anteil der versiegelten Fläche erfasst werden und als zusätzlicher Standortfaktor (neben CLE und % Dieback) in die Berechnung einfließen. Wenn bei grösseren Bestandsaufnahmen aufgezeigt werden könnte, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der unversiegelten Bodenfläche und dem Gesundheitszustand der Bäume besteht und sich dieser quantitativ nachweisen liesse, könnten die Zahlen als Argumentationsbasis für

stadtplanerische Massnahmen und Reformen in Bezug zu Platzvorgaben bei Stadtbäumen genutzt werden.

Ein weiteres Defizit des Programms ergibt sich durch die Ausklammerung der ökologischen Leistungen in Bezug zur Biodiversität. Stadtbäume erfüllen eine Reihe von wichtigen Funktionen, wie die Bereitstellung von Nahrung, Nistplätzen und Lebensräumen, die für die Stadtnatur von grosser Bedeutung sind. Auch die ästhetische Wirkung der Bäume, die Zunahme der Lebensqualität und die sozialräumlichen Aspekte werden vom Programm nicht berücksichtigt. Die Wertschätzung, die Menschen für Bäume entgegenbringen, wird nicht angerechnet. Das bekundete Interesse der Anwohner während der Bestandsaufnahme und die Aussagen, die sie über die Strassenbäume machten, zeigen, dass der tatsächliche Wert von Bäumen weit über eine monetär quantifizierbare Bezifferung hinausgeht. Es könnten viele weitere Nutzen aufgezählt werden, die Stadtbäume für Mensch und Natur erbringen und die Schwierigkeit darlegen, die sich bei der Wertermittlung eines so vielseitig verflochtenen Umweltgutes ergeben. I-Tree stellt jedoch nicht den Anspruch, den Wert von Stadtbäumen ganzheitlich zu erfassen. Das Modell verkörpert vielmehr einen Ansatz, der die Bewertung von urbanen Gehölzen anhand bestimmter Kriterien vornimmt und auf diese Weise ein Werkzeug darstellt, das sich auf eine sektorale Bewertung der Ökosystemdienstleistungen beschränkt. Allgemein ist bei Modellen jeweils ausschlaggebend, welche Ziele verfolgt werden und wie sich die Inhalte modellieren lassen. Die grossen Unterschiede zwischen den Resultaten von i-Tree Eco und Streets bestätigen deutlich, dass es sich beim Ansatz zur Abschätzung von Naturwerten immer nur um eine Annäherung an den realen Wert handelt. Obwohl die Ergebnisse stark voneinander abweichen und die Dollarwerte keinen echten Bezug zur Situation in Zürich aufweisen, können die Resultate aber dennoch als Diskussionsgrundlage dienen und Anlass geben, die Zahlen an Zürichs Strassenbaumverhältnisse anzupassen.

5.2 Anwendung von i-Tree im internationalen Kontext

Die Einschränkungen die für i-Tree Benutzer ausserhalb der Vereinigten Staaten zu verzeichnen sind, beziehen sich vordergründig auf die Monetarisierung, also auf die Umrechnung von Messgrössen (g/kg/t) zu Geldbeträgen (\$). Die ermittelten Dollarwerte basieren auf den sozialen Kosten (Externalitäten), die für die Treibhausgase und Schadstoffe für die USA definiert wurden. Aus diesem Grund sind die monetären Resultate der vorliegenden Untersuchung nicht direkt verwendbar. Die wissenschaftliche Grundlage der Methodik, die auf fundierten biologischen und chemisch-physikalischen Erkenntnissen beruht, ist hingegen universal, sodass die gewonnenen quantitativen Grössen von i-Tree auch in der Schweiz gelten, zumal die lokalen Gegebenheiten bei Eco einberechnet werden. Ein Vergleich mit anderen wissenschaftlichen Forschungsergebnissen wäre dennoch zu empfehlen, sollte das Programm zukünftig im grösseren Rahmen angewendet werden. Nach Prüfung der Literaturquellen von i-Tree und nach An-

passung der monetären Werte, wäre eine Anwendung von i-Tree im internationalen Kontext denkbar.

5.2.1 Zürich und Schweiz

Im Kanton Zürich werden die externen Kosten von Luftschadstoffen und Treibhausgasemissionen vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) bestimmt (Massnahmeplan Lufthygiene, 2006). Die externen Kosten der Luftverschmutzung betragen im Kanton Zürich 818 Mio. Franken pro Jahr; diejenigen der Treibhausgasemissionen rund 257 Mio. Franken pro Jahr (AWEL 2006). Die Zahlen gründen auf immissionsbedingten Gesundheitskosten, Gebäudeschäden, Waldschäden, Ernteaussfällen, Biodiversitätsverlusten und treibhausgasbedingten Klimakosten (Vermeidungskosten von CO₂, NO_x, CH₄ und N₂O) (Econcept 2006). Eine Zuteilung der ermittelten externen Kosten der Luftschadstoffbelastung auf die einzelnen Schadstoffe ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Da PM₁₀ der Leitschadstoff bei den Gesundheits- und bei den Gebäudeschäden ist und die anderen Schadstoffe nicht separat beziffert werden, müssten sogenannte Äquivalenzfaktoren bestimmt werden, die das Verhältnis der Konzentration dieser Schadstoffe zu den momentan voll dem Feinstaub zugewiesenen Schadenswirkungen angeben. Bei den Treibhausgasen sind CO₂-Äquivalenzfaktoren bereits vorhanden, die die Wirkungen der verschiedenen Treibhausgase quantifizieren (Econcept 2006). Für die Benutzung von i-Tree in der Schweiz bedeutet dies, dass die Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung mit dem Vermeidungskostenansatz vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) oder AWEL in Zürich berechnet werden könnte. Zur Erreichung der Kyotoziele für den Zeitraum von 2008 bis 2012 wurden die Vermeidungskosten auf 35 CHF pro Tonne CO₂-Äquivalent festgelegt (Econcept 2006). Wird die mit i-Tree Eco berechnete Kohlenstofffixierung von rund 47 Tonnen mit diesem Wert multipliziert, entsprechen die Leistungen der untersuchten Stadtbäume, ausgedrückt in externen Klimanutzen 1645 CHF für das Jahr 2010. Bei einer langfristigen Betrachtungsweise gemäss UNFCCC-Stabilisierungsszenarien (United Nations Framework Convention on Climate Change) werden die Klimakosten mitsamt den ungedeckten Schadenskosten ermittelt, sodass die Schadenskosten auf 80 CHF pro Tonne CO₂-Äquivalent ansteigen (Econcept 2006). Die Klimanutzen der Untersuchungsflächen in Zürich entsprächen dann 3760 CHF. Je nach Berechnungsansatz verändern sich die Zahlen demnach deutlich. Der Kostenansatz der Vereinten Nationen erscheint durch die Einbindung der ungedeckten Schadenskosten nachhaltiger und ist dank der internationalen Gültigkeit für die Wertermittlung mit i-Tree als sinnvoller zu erachten als die tieferen nationalen Schätzwerte.

Die monetäre Bezifferung der Luftschadstoffe, die in den USA anhand des PPI definiert wird, hat bei der Bewertung mit i-Tree sowohl bei Eco (\$ 322) als auch bei Streets (\$ 616) sehr tiefe Zahlen hervorgebracht. Der Median der Externalitäten von PM₁₀ wird beispielsweise mit 6614 Dollar pro Tonne angegeben (s. Kap 4.4.2), wogegen die entsprechenden Werte von AWEL -

obwohl sie sich lediglich auf die externen Gesundheitskosten beziehen - sich auf 300'000 CHF pro Tonne PM10 belaufen. Eine Programmanpassung an die Werte von AWEL würde demnach viel höhere Werte liefern, was die Wirksamkeit bei der Argumentation für das urbane Grün in Zürich ungemein steigern könnte.

5.2.2 Europa

Die Entwickler von i-Tree haben Bereitschaft signalisiert, das Programm an europäische Erfordernisse anzupassen, sodass eine Version mit entsprechenden Daten für eine realistische Kosten-Nutzen-Analyse auch ausserhalb der USA eingesetzt werden könnte (s. Kap. 4.2). Die Umprogrammierung und Übersetzung von i-Tree kann jedoch nur erfolgen, wenn ein grösserer Kreis an Interessenten vorhanden ist (Sachs & Dujesiefken). Da in der Schweiz das Programm laut Support von i-Tree bisher erst sechsmal heruntergeladen wurde (s. Abb. 5), ist vorerst jedoch nicht mit einer Anpassung für die Schweiz zu rechnen.

Wird i-Tree Eco wie in der vorliegenden Untersuchung mit der *Complete Inventory*-Methode durchgeführt, müssen nur die monetären Werte für die Schadstoffe und das CO₂ angepasst werden. Dies ist allenfalls auch manuell, ohne Programmanpassung zu bewerkstelligen. Wie die Resultate von Eco darlegen, fehlen bei der *Complete Inventory*-Methode jedoch die Resultate, die sich auf die CO₂-senkenden Effekte beziehen, die durch Energieeinsparungen generiert werden. Dadurch fallen die ermittelten Werte sehr tief aus. Die Vermeidungskosten dank Strom- oder Öl/Gas-Einsparungen können nur mit der *Sample-Inventory*-Methode berechnet werden. Die auf Probeflächen basierende Stichprobenmethode ist deshalb nach Möglichkeit der vollständigen Bestandsaufnahme vorzuziehen. Da der zeitliche und technische Aufwand der Stichprobenmethode mit Eco bedeutend grösser ist, stellt sich aber die Frage, ob städtische Grünflächenämter die personellen und finanziellen Mittel aufwenden würden, um die Bewertung der Bäume im grossen Rahmen mit i-Tree durchführen zu können.

Eine mögliche Alternative könnte zukünftig i-Tree Streets darstellen. Momentan ist die Applikation nur für den nordamerikanischen Kontinent vorgesehen, doch könnten ergänzende Forschungsarbeiten die Anwendung auf weitere Kontinente erweitern. Die Referenzdaten, die bei der Berechnung der Leistungen und Funktionen der Strassenbäume verwendet werden, beruhen auf den Forschungsergebnissen von sechzehn U.S.-amerikanischen Städten, die jeweils je eine Klimazone vertreten (s. Kap. 4.3.3). Solche Klimazonen könnten auch in Europa bestimmt werden, wobei analoge Untersuchungen die Referenzdaten für das europäische Modell liefern könnten. Auf diese Weise würden sich die Werte nicht vordergründig auf Länder beziehen, sondern auf Umweltfaktoren, die das Wachstum und den Zustand der Bäume tatsächlich beeinflussen.

Weiterhin könnte die monetäre Bewertung, die von nationalen, regionalen, sowie von städtischen Entscheidungsträgern mitbestimmt werden, von den Programm Benutzern durch die manuelle Eingabe der erforderlichen Basisdaten ermittelt werden, um die lokalen Nutzen und Kosten der Stadtbäume zu berechnen (Lokale Basisdaten, s. Tabelle 2). Die externen Kosten von Luftschadstoffen und Treibhausgasemissionen könnten dagegen sowohl mit nationalen oder kantonalen, als auch mit Bewertungsansätzen der EU oder UN bestimmt werden. Die gewonnenen Ergebnisse liessen sich besser vergleichen, wenn internationale Ansätze verwendet würden und könnten wie bereits dargelegt (s. Kap. 4.6), die neuen Erkenntnisse über die Entwicklung/Tendenzen urbaner Baumbestände besser aufzeigen. Gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Luftverschmutzung, stellen internationale Herangehensweisen sinnvolle Massnahmen dar, um im grösseren Massstab Wirkungen zu erzielen. Ein Bewertungstool wie i-Tree, das durch die Aufgliederung in Klimazonen allen (europäischen) Ländern zur Verfügung stehen könnte, würde die monetäre Erfassung der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen allgemein vorantreiben. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewertung von urbanen Baumbeständen vorgenommen wird, steigt beträchtlich an, wenn ein benutzerfreundliches Werkzeug bereits verfügbar ist und zudem kostenlos heruntergeladen werden kann. Ausserdem entfällt der Aufwand, der bei der Entwicklung eines eigenen Bewertungstools anstehen würde. Eine Anpassung von i-Tree Streets an europäische Gegebenheiten birgt demnach ein enormes Potenzial für die Einbindung von Ökosystemdienstleistungen in stadtplanerische Entscheidungsprozesse und Nachhaltigkeitskonzepte.

Die Vor- und Nachteile von i-Tree Streets und die Gründe, die für i-Tree Eco sprechen, wurden bereits ausführlich beschrieben (Kap. 4.2 und 4.3.3). Eine Kombination der beiden Applikationen wäre demnach die ideale Verknüpfung. Gerade die Genauigkeit, die bei Eco durch lokale Schadstoff- und Klimadaten, sowie durch eine sorgfältigere Methode bei der Bestandsaufnahme angestrebt wird, stellt ein wichtiger Aspekt für die Nachvollziehbarkeit und Glaubhaftigkeit der Resultate dar. Die Differenzierung der direkten und indirekten Leistungen der Bäume in Bezug auf Schadstoffabsonderung und Kohlenstoffspeicherung, wird hingegen nur bei Streets vorgenommen. Zudem erscheinen die Berechnungsgrundlagen von Streets geeigneter, wenn Entscheidungsträger von der Signifikanz eines nachhaltigen Begrünungskonzeptes überzeugt werden sollen. Schliesslich sind letztlich die festgelegten Werte oder ‚Preise‘ die bestimmenden Instrumente, die wirtschaftliche und politische Aktivitäten dirigieren (s. Kap. 2) und da diese bei Streets höher ausfallen, ist auch die Überzeugungskraft als grösser einzustufen. Könnten in einer neuen Programmanwendung für Europa (oder andere Kontinente) die Vorteile der beiden Applikationen vereint werden, liesse sich ein sehr vielversprechendes Werkzeug für die Abschätzung der Ökosystemdienstleistungen von urbanen Baumbeständen gewinnen. Ob i-Tree die Kapazität und das Interesse für eine solch grosse Anpassung entgegenbringen würde,

bleibt jedoch offen. Die politische Entwicklung wird zudem darüber mitentscheiden, ob die Nachfrage nach solchen Bewertungsinstrumenten zukünftig steigen wird.

5.3 i-Tree aus ökonomischer Sicht

Der Ansatz, die Umwelt als Dienstleistungssektor in ökonomische Prozesse einzubinden, gewinnt vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen einen immer grösseren Stellenwert bei strategischen Entwicklungskonzepten. Auch das Bundesamt für Umwelt propagiert die Einbindung von Marktmechanismen im Umweltschutz und betont die positiven Wechselwirkungen von Wirtschaft und Natur, wenn finanzielle Anreize geschaffen werden.

I-Tree stellt ein mögliches Instrument dar, um den Nutzen und die Funktionen von biologischen Prozessen in wirtschaftliche und stadtplanerische Entscheidungsabläufe zu integrieren. Dabei richtet sich i-Tree Eco und Streets gänzlich auf die quantitative Bewertung von Stadtbäumen aus und setzt den Fokus auf die Luftqualität und auf klimatische Aspekte. Die gewonnenen Werte beziehen sich demnach nur auf einen kleinen Teilbereich der Ökosystemdienstleistungen. Diese Fokussierung, die im Zusammenhang mit der Kategorisierung des *Millenium Ecosystem Assessment* (MA) schon diskutiert wurde, richtet sich auf die handlungsvollziehende Ebene, die in diesem Falle die städtischen Grünflächenämter verkörpern, sodass die gewonnenen Ergebnisse direkt in planerische Massnahmen einfließen können. Kommunalpolitik wird so mit wissenschaftlichen Betrachtungsweisen verknüpft und mit wirtschaftlichen Interessen vereint.

Da bei der Wertermittlung der Ökosystemleistungen mit i-Tree die externen Kosten der Schadstoffe als Bewertungsgrundlage dienen (die Dollarbeträge lassen sich partiell mit den Werten des BAFU und AWEL ersetzen), beruht das Modell von i-Tree auf den Schadens- und Vermeidungskostenansätzen und befolgt folglich auch das Verursacherprinzip.

5.3.1 Ökonomische Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte in Bezug zu i-Tree

Der Fokus von i-Tree richtet sich auf die indirekten Gebrauchswerte, die vom *Millennium Ecosystem Assessment* als Regulierungs- und Unterstützungsleistungen definiert wurden. Die Kernaussagen von i-Tree beziehen sich demnach auf die zählbaren Funktionen der Stadtbäume, wobei das Modell nicht nur die quantitative Abschätzung der Ökosystemdienstleistungen vornimmt (s. Abb. 6), sondern mit der monetären Wertermittlung weiterführende Folgerungen ermöglicht. Beispielsweise wird mit der Berechnung der Energieeinsparungen sinngemäss auch gleichzeitig die ‚Effizienzsteigerung‘ von Gebäuden durch Bäume berechnet (Substitutionskostenansatz). Werden Begriffe und Definitionen der ökonomischen Ansätze zur Abschätzung der Naturwerte (Kap. 3.2.1) herangezogen, können weitere ökonomische Zusammenhänge erkannt werden. Je nach Betrachtungsweise können die Aufwendungen, die für die Pflanzung und den Unterhalt der Stadtbäume getätigt werden, auch als Kosten für die Vermeidung von Umweltbe-

lastungen oder für die Reduktion der Schadstoffe an der Quelle verstanden werden. Beim Aufwand, der sich bei der Bewertung des Baumbestands mit i-Tree ergibt, handelt es sich demnach um passive Vermeidungskosten, die die Geschädigten tätigen, um Immissionen im Wohnumfeld längerfristig zu reduzieren (s. Kap. 3.2.2). Die diversen Vorgehensweisen bei der Monetarisierung von Umweltgütern/nutzen, die im dritten Kapitel umrissen wurden und in der Schweiz Verwendung finden, können jedoch mehrheitlich nicht mit der Methode von i-Tree in Verbindung gebracht werden. Viele Aspekte, die in die Bewertung von Stadtbäumen einfließen könnten, werden von i-Tree nicht berücksichtigt. Es werden beispielsweise weder die ästhetischen, noch die erholenden oder gesundheitssteigernden Effekte von Stadtbäumen (direkte Gebrauchswerte) einbezogen. Allgemein liessen sich weitere, auf Klima- und Luftverbesserung ausgerichtete ökonomische Ansätze einbringen.

I-Tree verfolgt nicht das Ziel, den ökonomischen Gesamtwert zu ermitteln und alle verschiedenen Nutzungsformen zu erfassen. Das Modell konzentriert sich vielmehr auf ausgesuchte Aspekte, die die bereits vorhandenen Bewertungsansätze des BAFU oder AWEL erweitern: Die Schweizer Umweltpolitik bringt Ökosystemdienstleistungen weder in Zusammenhang mit Nachhaltigkeitsstrategien, noch mit Massnahmenpaketen zur Verbesserung der Luftqualität oder zur Minderung der CO₂-Belastung. Die vielfältigen Funktionen von Pflanzen werden nirgends als (marktbasierete) Lösungsstrategien vorgesehen. I-Tree verfolgt demnach einen Ausgangspunkt, der aktuell in der Schweiz noch nicht eingebunden wird und erhält dadurch einen noch höheren Stellenwert als Werkzeug für die Vernetzung von ökonomischen und ökologischen Interessen.

6 Ausblick

Internationale Vereinigungen haben in den vergangenen Jahren Entwicklungsziele formuliert, die die Schaffung „grüner Städte“ ermöglichen sollen und mit Hilfe von Fachwissen und neuen Technologien den Umweltschutz in die Städteplanung integrieren wollen (UNO 2005). Vor dem Hintergrund der Urbanisierung und des Klimawandels stellen Massnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen und der Steigerung der Luftqualität zwei dringende Handlungsschritte dar, um die zahlreichen negativen Auswirkungen abzuschwächen. Globale Herausforderungen bedürfen globale Lösungsansätze – doch was, wenn internationale Abkommen nicht greifen? Der Weltklimagipfel in Kopenhagen 2009 hat gezeigt, dass die obersten Instanzen noch nicht bereit sind, die heutigen Herausforderungen konsequent anzugehen. Die Staatengemeinschaft hat sämtliche Massnahmen abgelehnt, die eine positive Wende für das Klima bewirken könnten. Auch die Schweiz hat noch keine konkreten Handlungsschritte gutgeheissen, mit denen sich das ambitionöse Ziel, den CO₂-Ausstoss zwischen 2008 und 2012 um 20 Prozent gegenüber 1990 zu senken (12 Mio. t), erreichen liesse (swissinfo.ch, Juni 2010). Es ist davon auszugehen, dass die Vorgaben bis 2012 nicht eingehalten werden und stattdessen weitere Emissionszertifikate gekauft werden müssen (NZZonline, Juni 2011). Das Kyoto-Protokoll sieht ausländische Emissionszertifikate jedoch nur als Ergänzung zu den eigenen Anstrengungen vor. Die Schweiz hat diese Regel in einer Verordnung verbindlich festgehalten. Ausserdem ist die Obergrenze für den Auslandanteil an CO₂-Zertifikaten bereits ausgeschöpft, was bedeutet, dass der Bundesrat laut Verordnung eine CO₂-Abgabe einführen muss (oder müsste). Für die Zeit nach 2012 wird noch verhandelt, wobei sich National- und Ständerat in den bisherigen Sitzungen für eine Reduktion um 20 Prozent bis ins Jahr 2020, ohne Kompensation im Ausland ausgesprochen haben (NZZonline, Juni 2011).

Es bleibt zu hoffen, dass die Reduktionsziele nicht wie beim Weltklimagipfel bloss verschoben werden, sondern bei Nichteinhalten der Zielvorgaben griffige Massnahmen oder Sanktionen eingeführt werden, die eine Besserung auf lange Sicht sichern. Die aktuellen Ereignisse in der Politik machen deutlich, dass top-down-Massnahmen nicht ausreichen und vor allem dann nicht genügen, wenn die Zeit drängt. Die Umsetzung von Handlungsschritten auf politischer Ebene ist jeweils von meist langwierigen Verhandlungs- und Entscheidungsprozessen gekennzeichnet. Dabei besteht auch immer die Gefahr, dass beschlossene Zielsetzungen und Verordnungen nicht eingehalten, wieder angepasst oder eingefroren werden. (Diese Gefahr besteht derzeit in der Schweiz, da statt der vorgesehenen CO₂-Abgabe möglicherweise die Obergrenze für Emissionszertifikate neu definiert wird.) Auch aus diesem Grund sind bottom-up-Initiativen, die einen partizipativen Ansatz, also eine Beteiligung und Mitwirkung von Bürgern verfolgen, von grosser Tragweite. Am Beispiel von i-Tree ist der Ansatz gut erkennbar: I-Tree ist ein Modell, das neben städtischen Planungsinstanzen speziell auch kleinere Gemeinden oder Quartierver-

eine mit einem Instrument ausstattet und durch die Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Nutzen Entscheidungsträger überzeugen kann, neue Massnahmen auszuarbeiten, die die Situation – und im gleichen Zug die Leistungen der Bäume – in urbanen Gebieten verbessern. In den USA werden öffentliche Interessen häufig von Kommunen vertreten; gerade bei ökologischen oder sozialen Belangen sind sie meist sehr aktiv. Ehrenamtliches Engagement ist nicht selten die einzige Möglichkeit, mit der sich die Umsetzung von umweltbezogenen Strategien vorantreiben lässt. Auch bei i-Tree handelt es sich bei den fast 6400 Programm Benutzern wohl grösstenteils um Privatpersonen oder Kommunen. Ob sich in der Schweiz zukünftig eine ähnliche Entwicklung abzeichnen könnte, kann nicht erahnt werden, erscheint jedoch eher unwahrscheinlich. Im Moment setzt die Anwendung von i-Tree ausserhalb der USA eine vertiefte Auseinandersetzung voraus, die sowohl zeitlich, als auch technisch und fachlich sehr aufwändig ist. Bevor eine Anwendung im grösseren Stil überhaupt in Frage kommt, müssten demnach weitere Programmabklärungen und Anpassungen erfolgen.

Studentische Arbeiten stellen eine Möglichkeit dar, Erkenntnisse über die Funktionsweise von i-Tree zu gewinnen, wobei eine Untersuchung mit der Stichprobenmethode (wie von i-Tree vorgesehen) nicht realistisch ist, wenn nur eine Person zur Verfügung steht. Deshalb ist die Anwendung des Programms in Fachkreisen und die Veröffentlichung der Resultate in Zeitschriften wohl am sinnvollsten und könnte die Bekanntmachung, sowohl von i-Tree, als auch des grundlegenden Ansatzes der Ermittlung von Ökosystemdienstleistungen vorantreiben. Die nächsten Schritte wären somit, weitere Untersuchungen durchzuführen und mit den gewonnenen Erkenntnissen und Zahlen als Argumentationsbasis, politische Vorstösse zu wagen, die die Einbindung von ökologischen Funktionen als Massnahmen gegen den Klimawandel und die Luftverschmutzung vorsehen. Die Nutzleistungen von Pflanzen könnten auf diese Weise Teil des Nachhaltigkeitskonzeptes und der politischen Agenda werden. Spätestens dann bestünde der Anreiz, städtische Bäume (und andere Grünflächen) auf ihre ökologischen Funktionen hin zu untersuchen.

Grünflächenämter stehen meist unter grossem Spardruck und können Pflege- und Unterhaltungsarbeiten vor allem aus finanziellen Gründen oft nicht optimieren. Es ist darzulegen, dass die Leistungen der Bäume die Ausgaben für Pflege und Unterhalt rechtfertigen. Die Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen würde die Bilanzen (der Gesamtrechnung) von Grünflächenämtern grundlegend verändern. Kann der Zusammenhang von gesunden Bäumen mit gesteigerten Nutzen für die Gesellschaft nachgewiesen werden, erscheint die Beantragung von Geldern für das öffentliche Grün ausserdem noch berechtigter, als es ohnehin schon ist. Mit der Einführung der CO₂-Abgabe bestünde die Möglichkeit, die Kosten abzufangen, die bei der Förderung von verbesserten Bedingungen für das urbane Grün unweigerlich entstehen würden. Soll ab 2012 die Reduktion von CO₂ ohne Kompensation im Ausland erfolgen, ist die Einbindung von ausgestossenen Emissionen vor Ort ein unverzichtbarer Bestandteil einer lösungsori-

entierten Massnahmenplanung. Gerade in Städten, die für den Grossteil der Emissionen verantwortlich sind, macht es Sinn, die Abgase lokal und möglichst direkt zu beseitigen. Grundsätzlich sind wo immer möglich Kreisläufe anzustreben und vorhandene Ressourcen zu nutzen.

Bezogen auf die luft- und klimaverbessernden Eigenschaften von Stadtbäumen, ergeben sich konkrete Handlungsmassnahmen, die die positiven Wirkungen von urbanen Gehölzen steigern: Standortgerechte, der Baumart angepasste Pflanzungen steigern die Lebenserwartung, vermindern die Pflegeeinsätze und reduzieren bei korrekter Platzierung den Energiebedarf von Gebäuden. Zudem können bei Neubepflanzungen bei der Wahl der Baumart „Ökosystemdienstleistungs-Kriterien“ integriert werden: Schadstoffresistenz, VOCs, Stresstoleranz, Schnellwüchsigkeit, Langlebigkeit und Grösse spielen bei der Leistungsfähigkeit von Stadtbäumen eine wichtige Rolle. Planungsinstanzen können die Funktionen und Nutzen von Baumbeständen demnach massgeblich mitsteuern. Werden Ökosystemdienstleistungen bei Planungsabläufen berücksichtigt und in der Gesamtrechnung miteingefasst, gewinnt die Leistungsfähigkeit von Pflanzen letztlich auch aus ökonomischer Sicht an Bedeutung. Dabei ist die Einbindung dieser Aspekte weder an die politischen Entwicklungen, noch an die Anwendung des i-Tree-Modells gebunden, sodass die Kriterien schon heute einfließen können. Im Endeffekt werden durch gesunde Stadtbäume nicht nur chemisch-physikalische Effekte erzielt, sondern gleichzeitig zahlreiche weitere Vorzüge erbracht, die die Lebensqualität in Städten nachhaltig steigern.

7 Literaturverzeichnis

- Baldocchi, D., Hicks B. und Camara, P. (1987). A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment* 21, S. 91–101.
- Baldocchi, D. (1988). A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy. *Atmospheric Environment* 22, S. 869–884.
- Baumgärtner, S. (2002). Der ökonomische Wert der biologischen Vielfalt. In: Bayrische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (Hrsg.): Grundlagen zu Verständnis der Artenvielfalt und seiner Bedeutung und der Massnahmen, dem Artensterben entgegen zu wirken, Laufen, S. 73–90.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2005). Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips. Umwelt-Materialien Nr. 201.
- Cassel-Gintz, M. (2001). GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung. Eine sektorale Anwendung des Syndromkonzepts. Potsdam Institute for Climate Impact Reserch (PIK). Dissertation Freie Universität Berlin.
- Chaparro, L. & Terradas, J. (2009). Ecological Services of Urban Forest in Barcelona. Centre de Recerca Ecologica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Chow, P. & Rolfe, G. (1989). Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 21, S. 30-36.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M. Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R, Suttonk, P. und Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, S. 253-260.
- Econcept, Forschung, Beratung Projektmanagement (2006). Die Kosten von Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich 2005. (Ott, W., Baur, M. und Steiner, P.) AWEL, Abteilung Lufthygiene.
- ExternE (1999). Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission. Europäische Kommission, Brüssel.
- Fankhauser, S. (1994). The social costs of greenhouse gas emissions: An expected value approach. *The Energy Journal*, 15, S. 157–184.
- Fleming, L.E. (1988). Growth Estimation of Street Trees in Central New Jersey. M.S. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, NJ. 143 pp.
- Forest Products Laboratory (1952). Chemical Analyses of Wood. Tech. Note 235. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 4 pp.
- Frelich, L.E. (1992). Predicting Dimensional Relationships for Twin Cities Shade Trees. University of Minnesota, Department of Forest Resources, St. Paul, MN. 33 pp.
- Frey, R., Blöchliger, H. (1991). Schützen oder Nutzen: Ausgleichszahlungen im Natur- und Landschaftsschutz. WWZ Beiträge Band 1, Chur/Zürich 1991 Frey, R.: Mit Ökonomie zur Ökologie, Basel/Frankfurt.

- Girardet, H. (2011). Von der Petropolis zur Ökopolis. Neues Modell der modernen Stadt. *Politische Ökologie* 124, S. 84-90.
- Gacka-Grzesikiewicz, E. (1980). Assimilation surface of urban green areas. *Ekol. Polska* 28(4), S. 493-523.
- Hirabayashi, S., Kroll, C.N., Nowak, D.J. (2011). Urban Forest Effects-Dry Deposition (UFORE-D) Model Descriptions. Department of Environmental Resources Engineering, State University of New York College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, The Davey Tree Expert Company, Syracuse, USDA Forest Service, Northeastern Research Station, Syracuse, New York 13210, USA.
- Iten, R. (1990). Die mikroökonomische Bewertung von Veränderungen der Umweltqualität: Dargestellt am Beispiel der Stadt Zürich. Winterthur.
- Lovett, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. *Ecological Applications* 4, S. 629–650.
- McPherson, E.G. (1984). Planting design for solar control. S. 141-164 in McPherson, E.G. (ed.) *Energy-conserving site design*. American Society of Landscape Architecture, Washington, DC.
- McPherson, E.G. (2010). Selecting Reference Cities for i-Tree Streets, *Arboriculture & Urban Forestry* 36(5), S. 230-240.
- MUNLV (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen) (2011). *Handbuch Stadtklima. Massnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel*. Düsseldorf.
- Murray, F.J., Marsh, L. & Bradford, P.A. (1994). *New York State Energy Plan, Vol. II: Issue Reports*. New York State Energy Office, Albany, NY.
- Nowak, D.J. (1994). Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest, S. 83–94. In: McPherson, E.G., D.J. Nowak, and R.A. Rowntree (Eds.). *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech. Rep. NE-186. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Radnor, PA.
- Nowak, D.J. (1996). Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. *Forest Science*. 42(4). S. 504-507.
- Nowak, D.J. & Crane, D.E. (2000a). The urban forest effects (UFORE) model: Quantifying urban forest structure and functions, S. 714–720. In: Hansen M., and T. Burk (Eds.). In: *Proceedings Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century*. IUFRO Conference, S. 16–20 August 1998, Boise, ID. General Technical Report NC-212, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, MN.
- Nowak, D.J., Civerolo, K.L., Rao, S.T., Sistla, G., Luley, C.J. & Crane, D.E. (2000b). A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment* 34, S. 1601–1613.
- Nowak, D.J. (2000c). *Tree Species Selection, Design, and Management to Improve Air Quality*. Construction Technology: Annual meeting proceedings of the American Society of Landscape Architects.
- Nowak, D.J., Crane, D.E. und Dwyer, J.F. (2002). Compensatory value of urban trees in the United States. *Journal of Arboriculture* 28, S. 194–199.

- Nowak, D.J., Crane, D.E. & Stevens, J.C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4, S. 115–123.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Hoehn, R, Stevens, J. und Walton, J.T. (2007). *Assessing Urban Forest Effects and Values. New York City's Urban Forest.* United States Department of Agriculture (USDA), Northern Research Station.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J., Hoehn, R., Walton, J. & Bond, J. (2008). A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(6), S. 347-358. International Society of Arboriculture.
- Paech, B. und Paech, N. (2011). Suffizienz plus Subsistenz ergibt ökonomische Souveränität. *Stadt und Postwachstumsökonomie. Politische Ökologie* 124, S. 54-60.
- Sachs, T. & Dujesiefken, D. (2010). I-Tree: Werbung für das Grün in den USA. *Taspo Baumzeitung* 02, S. 14-16.
- Schoon, K. J. (1993). Midwest Urban Tree Index, *Journal of Arboriculture*, 19(4), S. 230-237.
- TEEB (2008) *Die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität – ein Zwischenbericht.* UNEP 2008.
- TEEB (2010). *Die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität: Die ökonomische Bedeutung der Natur in Entscheidungsprozesse integrieren.* (TEEB (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature.*) Ansatz, Schlussfolgerungen und Empfehlungen von TEEB – eine Synthese. UNEP 2010.
- Toman, M. (1998). Special Section: Forum on Valuation of Ecosystem Services: Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics* 25, S. 57-60.
- Tsimitselis, A. (2010). *Umweltökonomie und Umweltpolitik.* In *Unterrichtsunterlagen ZHAW.* Unveröffentlicht.
- Watson, G. (2002). Comparing Formula Methods of Tree Appraisal. *Journal of Arboriculture* 28(1), S. 11-18.
- Umwelt Schweiz (2011). *Klimawandel. Kapitel 8, S. 47-49.* BAFU, Bern und Neuchâtel 2011.
- United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2009). *Planning Sustainable Cities. Global Report on Human Settlements 2009.* Earthscan, London.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2007). *Temperate Interior West Community Tree Guide. Benefits, Costs, and Strategic Planting.* Pacific South West Research Station.
- UVEK (2009). *Bisherige Massnahmen. Rechtsverbindlich festgelegte Massnahmen.* Erstellt am 1.9.2009, BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Whittaker, R.H. & Woodwell, G.M. (1967). Surface area relations of woody plants and forest communities. *American Journal of Botany*, 54, S. 931-939.

8 Quellenverzeichnis

Daten

Grün Stadt Zürich (2011). GIS-Baumkataster von Zürich. Unter freundlicher Genehmigung von Marc Fürst (GSZ).

NABEL (BAFU und Empa) (2011). Stündliche Schadstoffmessungen von CO, NO₂, O₃, PM₁₀ und SO₂ für das Jahr 2010, 01.01.2010, 00:10 Uhr bis 31.12.2010, 24:00 Uhr. Messstation Zürich-Kaserne.

Universitätsrechenzentrum Basel (2011). GIS-Karte. Übersichtsplan vom Kanton Zürich im Masstab 1 : 2'500

Internet

BAFU (2011). Luft. (Zugriff: Januar 2012)
<http://www.bafu.admin.ch/luft/index.html?lang=de>

Capital District Planning Commission (2008). Consumer and Producer Price Indices. Bewertet am 05.06.2008.
www.cdrpc.org/CPI_PPI.html

I-Tree-Website. Zugriff: Juni 2011 bis Januar 2012 von <http://itreetools.org>

Millennium Ecosystem Assessment (UNO 2000). Abgerufen im Juli 2011 von <http://www.maweb.org>

NZZonline (Juni 2011). Die Schweiz verfehlt das CO₂-Ziel. Zum Erreichen der Kyoto-Vereinbarungen sind weitere Anstrengungen nötig. Abgerufen am 12.02.2012 von
http://www.nzz.ch/nachrichten/politik/schweiz/schweiz_kyoto_protokoll_ziel_verfehlt_1.10880504.html

Swissinfo (Juni 2010). CO₂: Ambitiöses Ziel, aber keine Massnahmen. Keiser, A. (Zugriff: Februar 2012)
http://www.swissinfo.ch/ger/Politik/Sesselruecken_im_Bundesrat/Leuenberger_tritt_ab/CO2:_Ambitioeses_Ziel,_aber_keine_Massnahmen.html?cid=8992156

UFORE (2012). Homepage Urban Forest Effects Model. Abgerufen im Januar 2012 von <http://www.ufore.org>

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht über das Konzept des ökonomischen Gesamtwerts (G. Wälchli)	16
Abb. 2: Schadens und Vermeidungskosten (Quelle: Frey 1991)	17
Abb. 3: Qualitative und quantitative Abschätzung von Ökosystemdienstleistungen (G. Wälchli).	27
Abb. 4: Strassenbäume in Zürich (Foto G. Wälchli).....	30
Abb. 5: i-Tree Benutzer Statistik (Quelle: http://www.itreetools.org/index.php).....	35
Abb. 6: Plakative Öffentlichkeitsarbeit mit i-Tree (Quelle: Sachs & Dujesiefken 2010).....	36
Abb. 7: Landnutzungstypen am Beispiel von Barcelona (Quelle: Chaparro & Terradas).....	45
Abb. 8: Standardfehler in Prozent in Abhängigkeit der Anzahl Plots. (Quelle: i-Tree Eco Users Manual).....	46
Abb. 9: GIS- Karte des Baumkatasters von Grün Stadt Zürich.....	48
Abb. 10: Untersuchungsflächen in Zürich	49
Abb. 11: Messung von unregelmässigen DBH.....	56
Abb. 12: Illustration der Messmethode von fehlenden Kronenpartien und Kronenbasis	58
Abb. 13: Lichtexposition der Baumkronen.....	59

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die möglichen Bewertungsansätze nach Schadensbereichen.	23
Tabelle 2: Vergleich von i-Tree Eco und i-Tree Streets	42
Tabelle 3: Kohlenstoffspeicherung und Sequestrierung	60
Tabelle 4: jährliche Luftschadstoffentfernung (g/Jahr).....	62
Tabelle 5: Wert der Schadstoffentfernung (\$/Jahr).....	63
Tabelle 6: Kohlenstoffspeicherung und jährliche Sequestrierung nach Baumart (i-Tree Streets).....	65
Tabelle 7: jährliche Leistungen zur Luftreinhaltung nach Baumart (i-Tree Streets)	66
Tabelle 8: monetäre Quantifizierung div. Werte (i-Tree Streets)	67
Tabelle 9: Überblick aller erhobenen Leistungen nach Baumart (i-Tree Streets)	68
Tabelle 10: Vergleich der Resultate von Eco und Streets (Ø Werte pro Baumart, nach i-Tree Eco und Streets)	69
Tabelle 11: Bestplatzierte Baumarten für die Verbesserung der Luftqualität in den USA (nach Nowak 2000c).....	78

11 Anhang

Anhang A: Rohdaten i-Tree Eco

Anhang B: Rohdaten i-Tree Streets

Anhang A: Rohdaten i-Tree Eco

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Species Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m2)	Tree Condition	Leaf Area (m2)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (SwF)	Street Tree	Native To State
1	Common linden	31.0	14.00	50.30	Dead	0.00	0.00	0	131.81	0.00	0.0	YES	NO
2	Common linden	30.0	13.00	44.20	Excellent	280.78	13.06	6.36	122.00	8.70	0.0	YES	NO
3	Common linden	30.0	13.00	70.90	Excellent	201.16	9.36	2.84	122.00	8.70	0.0	YES	NO
4	Common linden	34.0	14.00	56.70	Excellent	372.99	17.35	6.57	163.89	9.09	0.0	YES	NO
5	Common linden	33.0	14.00	60.80	Excellent	394.66	18.36	6.49	152.75	8.73	0.0	YES	NO
6	Common linden	33.0	13.00	56.70	Good	345.14	16.05	6.08	152.75	8.73	0.0	YES	NO
7	Common linden	24.0	11.00	44.20	Excellent	253.69	11.80	5.74	72.09	6.46	0.0	YES	NO
8	Common linden	34.0	13.50	56.70	Excellent	370.76	17.24	6.53	163.89	9.09	0.0	YES	NO
9	Common linden	40.0	13.00	75.40	Excellent	406.48	18.91	5.39	240.43	11.31	0.0	YES	NO
10	Common linden	7.0	6.00	6.20	Excellent	25.60	1.19	4.16	3.94	1.21	0.0	YES	NO
11	Common linden	21.0	12.00	38.50	Excellent	228.50	10.63	5.94	52.61	5.40	0.0	YES	NO
12	Common linden	39.0	14.00	70.90	Excellent	394.06	18.33	5.56	226.49	10.93	0.0	YES	NO
13	Common linden	32.0	14.50	54.10	Good	377.82	17.57	6.98	142.06	8.38	0.0	YES	NO
14	Common linden	36.0	16.00	56.70	Excellent	395.64	18.40	6.97	187.54	9.82	0.0	YES	NO
15	Common linden	25.0	11.00	38.50	Good	205.81	9.57	5.35	79.37	6.82	0.0	YES	NO
16	Common linden	29.0	11.50	50.30	Excellent	280.85	13.06	5.59	112.63	8.31	0.0	YES	NO
17	Common linden	28.0	12.50	47.80	Excellent	307.07	14.28	6.43	103.69	7.93	0.0	YES	NO
18	Common linden	41.0	12.50	75.40	Excellent	574.30	26.71	7.61	254.84	11.69	0.0	YES	NO
19	Littleleaf linden	23.0	13.00	36.30	Excellent	269.33	20.17	7.42	65.20	6.10	0.0	YES	NO
20	Littleleaf linden	19.0	11.00	41.90	Good	265.41	19.88	6.34	41.55	4.73	0.0	YES	NO
21	Littleleaf linden	23.0	14.00	33.20	Excellent	283.17	21.21	8.53	65.20	6.10	0.0	YES	NO
22	Littleleaf linden	29.0	15.00	44.20	Excellent	337.90	25.31	7.65	112.63	8.31	0.0	YES	NO
23	Silver linden	29.0	14.50	38.50	Excellent	294.94	13.72	7.66	112.63	8.31	0.0	YES	NO
24	Silver linden	73.0	11.00	78.50	Excellent	334.38	15.55	4.26	993.25	27.10	0.0	YES	NO
25	Common linden	65.0	12.00	78.50	Excellent	396.93	18.46	5.05	755.42	23.17	0.0	YES	NO
	TOTAL			1'305		7'597	386		4'631	225			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPR ENE	MONO TERP	OVOC	Total VOC
1	Tilia x vulgaris	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Tilia x vulgaris	3.1	134.9	32.2	63.1	2.6	235.8	0.00	1.34	0.32	0.42	0.01	2.1	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Tilia x vulgaris	2.2	96.6	23.1	45.2	1.8	169.0	0.00	0.96	0.23	0.30	0.00	1.5	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Tilia x vulgaris	4.1	179.2	42.8	83.8	3.4	313.3	0.01	1.77	0.42	0.55	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Tilia x vulgaris	4.4	189.6	45.3	88.7	3.6	331.5	0.01	1.88	0.45	0.59	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Tilia x vulgaris	3.8	165.8	39.6	77.5	3.1	289.9	0.01	1.64	0.39	0.51	0.01	2.6	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Tilia x vulgaris	2.8	121.8	29.1	57.0	2.3	213.1	0.00	1.21	0.29	0.38	0.01	1.9	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Tilia x vulgaris	4.1	178.1	42.6	83.3	3.4	311.4	0.01	1.76	0.42	0.55	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Tilia x vulgaris	4.5	195.2	46.7	91.3	3.7	341.4	0.01	1.93	0.46	0.60	0.01	3.0	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Tilia x vulgaris	0.3	12.3	2.9	5.8	0.2	21.5	0.00	0.12	0.03	0.04	0.00	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Tilia x vulgaris	2.5	109.8	26.2	51.3	2.1	191.9	0.00	1.09	0.26	0.34	0.01	1.7	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Tilia x vulgaris	4.4	189.3	45.2	88.5	3.6	331.0	0.01	1.87	0.45	0.59	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Tilia x vulgaris	4.2	181.5	43.4	84.9	3.4	317.3	0.01	1.80	0.43	0.56	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
14	Tilia x vulgaris	4.4	190.0	45.4	88.9	3.6	332.3	0.01	1.88	0.45	0.59	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Tilia x vulgaris	2.3	98.9	23.6	46.2	1.9	172.9	0.00	0.98	0.23	0.31	0.00	1.5	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Tilia x vulgaris	3.1	134.9	32.2	63.1	2.6	235.9	0.00	1.34	0.32	0.42	0.01	2.1	N/A	N/A	N/A	N/A
17	Tilia x vulgaris	3.4	147.5	35.2	69.0	2.8	257.9	0.00	1.46	0.35	0.46	0.01	2.3	N/A	N/A	N/A	N/A
18	Tilia x vulgaris	6.4	275.8	65.9	129.0	5.2	482.4	0.01	2.73	0.65	0.85	0.01	4.3	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Tilia cordata	3.0	129.4	30.9	60.5	2.4	226.2	0.00	1.28	0.31	0.40	0.01	2.0	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Tilia cordata	2.9	127.5	30.5	59.6	2.4	222.9	0.00	1.26	0.30	0.39	0.01	2.0	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Tilia cordata	3.1	136.0	32.5	63.6	2.6	237.8	0.00	1.35	0.32	0.42	0.01	2.1	N/A	N/A	N/A	N/A
22	Tilia cordata	3.7	162.3	38.8	75.9	3.1	283.8	0.01	1.61	0.38	0.50	0.01	2.5	N/A	N/A	N/A	N/A
23	Tilia tomentosa	3.3	141.7	33.8	66.3	2.7	247.7	0.00	1.40	0.34	0.44	0.01	2.2	N/A	N/A	N/A	N/A
24	Tilia tomentosa	3.7	160.6	38.4	75.1	3.0	280.8	0.01	1.59	0.38	0.50	0.01	2.5	N/A	N/A	N/A	N/A
25	Tilia x vulgaris	4.4	190.6	45.6	89.2	3.6	333.4	0.01	1.89	0.45	0.59	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	84.1	3649.1	871.9	1,706.9	69.0	6,381.0	0.12	36.15	8.64	11.29	0.17	56.4	N/A	N/A	N/A	N/A

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m ²)	Tree Condition	Leaf Area (m ²)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (\$)	Street Tree	Native To State
1	Aesculus hippocastanum	67.0	16.00	122.70	Good	489.57	34.24	3.99	1'293.72	28.74	0.0	YES	NO
2	Aesculus hippocastanum	76.5	17.50	95.00	Excellent	390.10	27.28	4.1	1'788.72	34.81	0.0	YES	NO
3	Aesculus hippocastanum	18.0	9.00	22.10	Excellent	67.53	4.72	3.06	53.97	4.46	0.0	YES	NO
4	Aesculus hippocastanum	23.5	11.00	44.20	Excellent	195.34	13.66	4.42	103.37	6.52	0.0	YES	NO
5	Aesculus hippocastanum	27.0	11.00	38.50	Good	184.91	12.93	4.8	143.70	7.90	0.0	YES	NO
6	Aesculus hippocastanum	38.5	14.50	70.90	Excellent	372.64	26.06	5.26	342.02	13.15	0.0	YES	NO
7	Aesculus hippocastanum	7.5	5.00	4.20	Excellent	13.49	0.94	3.25	6.46	1.32	0.0	YES	NO
8	Aesculus hippocastanum	41.5	15.00	86.60	Good	408.08	28.54	4.71	410.06	14.63	0.0	YES	NO
9	Aesculus hippocastanum	79.5	17.00	118.80	Good	509.68	35.64	4.29	1'957.90	36.70	0.0	YES	NO
10	Aesculus hippocastanum	27.0	12.00	41.90	Fair	204.37	14.29	4.88	144.81	7.95	0.0	YES	NO
11	Aesculus hippocastanum	38.5	14.00	56.70	Good	266.95	18.67	4.7	340.99	13.12	0.0	YES	NO
12	Aesculus hippocastanum	17.0	10.00	23.80	Excellent	101.52	7.10	4.27	47.64	4.16	0.0	YES	NO
13	Aesculus hippocastanum	31.0	12.00	44.20	Fair	213.15	14.91	4.82	201.03	9.62	0.0	YES	NO
14	Aesculus hippocastanum	56.0	11.50	67.90	Fair	377.32	26.39	5.55	824.05	21.98	0.0	YES	NO
15	Aesculus hippocastanum	32.0	11.00	36.30	Critical	126.64	8.86	3.49	215.29	4.17	0.0	YES	NO
16	Aesculus hippocastanum	24.0	10.50	41.90	Poor	137.61	9.62	3.29	108.21	5.07	0.0	YES	NO
17	Aesculus hippocastanum	46.0	11.00	50.30	Fair	219.54	15.35	4.37	512.59	16.62	0.0	YES	NO
18	Aesculus hippocastanum	28.0	11.00	38.50	Poor	151.21	10.57	3.93	156.67	6.29	0.0	YES	NO
19	Aesculus hippocastanum	27.5	11.00	44.20	Poor	138.76	9.70	3.14	150.11	6.14	0.0	YES	NO
20	Aesculus hippocastanum	28.5	10.00	36.30	Dying	100.70	7.04	2.77	162.17	1.25	0.0	YES	NO
21	Aesculus hippocastanum	32.0	12.00	41.90	Dying	157.18	10.99	3.76	216.80	1.49	0.0	YES	NO
22	Aesculus hippocastanum	34.5	12.00	33.20	Fair	144.98	10.14	4.37	259.32	11.16	0.0	YES	NO
23	Aesculus hippocastanum	34.0	11.00	33.20	Dying	122.69	8.58	3.7	248.78	1.61	0.0	YES	NO
24	Aesculus hippocastanum	34.5	12.00	19.60	Dying	90.27	6.31	4.6	259.32	1.66	0.0	YES	NO
25	Aesculus hippocastanum	37.0	11.00	28.30	Poor	126.43	8.84	4.47	304.42	9.28	0.0	YES	NO
	TOTAL			1'241		5'311	371		10'252	270			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPRE NE	MONO TERP	OVOC	Total VOC
1	Aesculus hippocastanum	7.2	284.5	65.1	116.6	5.5	478.8	0.01	2.82	0.64	0.77	0.01	4.3	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Aesculus hippocastanum	5.7	226.7	51.9	92.9	4.3	381.5	0.01	2.25	0.51	0.61	0.01	3.4	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Aesculus hippocastanum	1.0	39.2	9.0	16.1	0.8	66.0	0.00	0.39	0.09	0.11	0.00	0.6	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Aesculus hippocastanum	2.9	113.5	26.0	46.5	2.2	191.0	0.00	1.12	0.26	0.31	0.01	1.7	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Aesculus hippocastanum	2.7	107.5	24.6	44.0	2.1	180.8	0.00	1.06	0.24	0.29	0.00	1.6	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Aesculus hippocastanum	5.4	216.6	49.5	88.7	4.2	364.4	0.01	2.15	0.49	0.59	0.01	3.2	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Aesculus hippocastanum	0.2	7.8	1.8	3.2	0.2	13.2	0.00	0.08	0.02	0.02	0.00	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Aesculus hippocastanum	6.0	237.2	54.3	97.2	4.5	399.1	0.01	2.35	0.54	0.64	0.01	3.5	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Aesculus hippocastanum	7.4	296.2	67.8	121.4	5.7	498.5	0.01	2.93	0.67	0.80	0.01	4.4	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Aesculus hippocastanum	3.0	118.8	27.2	48.7	2.3	199.9	0.00	1.18	0.27	0.32	0.01	1.8	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Aesculus hippocastanum	3.9	155.1	35.5	63.6	3.0	261.1	0.01	1.54	0.35	0.42	0.01	2.3	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Aesculus hippocastanum	1.5	59.0	13.5	24.2	1.1	99.3	0.00	0.58	0.13	0.16	0.00	0.9	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Aesculus hippocastanum	3.1	123.9	28.3	50.8	2.4	208.5	0.00	1.23	0.28	0.34	0.01	1.9	N/A	N/A	N/A	N/A
14	Aesculus hippocastanum	5.5	219.3	50.2	89.9	4.2	369.0	0.01	2.17	0.50	0.59	0.01	3.3	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Aesculus hippocastanum	1.9	73.6	16.8	30.2	1.4	123.9	0.00	0.73	0.17	0.20	0.00	1.1	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Aesculus hippocastanum	2.0	80.0	18.3	32.8	1.5	134.6	0.00	0.79	0.18	0.22	0.00	1.2	N/A	N/A	N/A	N/A
17	Aesculus hippocastanum	3.2	127.6	29.2	52.3	2.4	214.7	0.00	1.26	0.29	0.35	0.01	1.9	N/A	N/A	N/A	N/A
18	Aesculus hippocastanum	2.2	87.9	20.1	36.0	1.7	147.9	0.00	0.87	0.20	0.24	0.00	1.3	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Aesculus hippocastanum	2.0	80.6	18.4	33.0	1.5	135.7	0.00	0.80	0.18	0.22	0.00	1.2	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Aesculus hippocastanum	1.5	58.5	13.4	24.0	1.1	98.5	0.00	0.58	0.13	0.16	0.00	0.9	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Aesculus hippocastanum	2.3	91.3	20.9	37.4	1.8	153.7	0.00	0.90	0.21	0.25	0.00	1.4	N/A	N/A	N/A	N/A
22	Aesculus hippocastanum	2.1	84.3	19.3	34.5	1.6	141.8	0.00	0.83	0.19	0.23	0.00	1.3	N/A	N/A	N/A	N/A
23	Aesculus hippocastanum	1.8	71.3	16.3	29.2	1.4	120.0	0.00	0.71	0.16	0.19	0.00	1.1	N/A	N/A	N/A	N/A
24	Aesculus hippocastanum	1.3	52.5	12.0	21.5	1.0	88.3	0.00	0.52	0.12	0.14	0.00	0.8	N/A	N/A	N/A	N/A
25	Aesculus hippocastanum	1.8	73.5	16.8	30.1	1.4	123.7	0.00	0.73	0.17	0.20	0.00	1.1	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	77.6	3086.4	706.1	1264.6	59.2	5193.9	0.11	30.57	6.99	8.36	0.14	46.2	N/A	N/A	N/A	N/A

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m ²)	Tree Condition	Leaf Area (m ²)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (\$)	Street Tree	Native To State
1	<i>Aesculus hippocastanum</i>	39.5	14.00	50.30	Fair	299.83	20.97	5.96	362.46	17.62	0.0	YES	NO
2	<i>Aesculus hippocastanum</i>	43.0	11.00	50.30	Good	250.07	17.49	4.98	436.11	19.58	0.0	YES	NO
3	<i>Aesculus hippocastanum</i>	34.0	9.00	41.90	Good	146.86	10.27	3.51	245.37	13.97	0.0	YES	NO
4	<i>Aesculus hippocastanum</i>	55.0	13.00	95.00	Good	418.48	29.26	4.4	795.08	27.89	0.0	YES	NO
5	<i>Aesculus hippocastanum</i>	53.0	13.50	70.90	Good	324.51	22.69	4.58	729.38	26.52	0.0	YES	NO
6	<i>Aesculus hippocastanum</i>	74.0	15.00	113.10	Good	401.55	28.08	3.55	1'635.31	45.44	0.0	YES	NO
7	<i>Aesculus hippocastanum</i>	64.5	15.00	83.30	Good	357.48	25.00	4.29	1'175.90	37.43	0.0	YES	NO
8	<i>Aesculus hippocastanum</i>	48.0	12.00	60.80	Good	205.79	14.39	3.38	570.79	22.94	0.0	YES	NO
9	<i>Aesculus hippocastanum</i>	71.0	16.00	95.00	Good	392.67	27.46	4.13	1'486.70	42.98	0.0	YES	NO
10	<i>Aesculus hippocastanum</i>	64.0	16.00	91.60	Good	389.75	27.26	4.25	1'159.25	37.14	0.0	YES	NO
11	<i>Aesculus hippocastanum</i>	78.0	16.00	113.10	Good	401.55	28.08	3.55	1'863.17	55.09	0.0	YES	NO
12	<i>Aesculus hippocastanum</i>	55.0	13.50	78.50	Fair	335.55	23.47	4.27	797.05	27.94	0.0	YES	NO
13	<i>Aesculus hippocastanum</i>	53.0	14.00	95.00	Fair	395.74	27.67	4.16	731.21	26.57	0.0	YES	NO
14	<i>Aesculus hippocastanum</i>	54.0	15.00	78.50	Good	357.91	25.03	4.56	768.43	27.37	0.0	YES	NO
15	<i>Aesculus hippocastanum</i>	47.0	13.50	86.60	Good	342.90	23.98	3.96	547.18	22.41	0.0	YES	NO
16	<i>Aesculus x camea</i>	25.5	11.50	54.10	Excellent	325.52	23.82	6.02	125.97	10.76	0.0	YES	NO
17	<i>Aesculus x camea</i>	27.5	11.00	60.80	Good	269.04	19.69	4.42	150.11	11.90	0.0	YES	NO
18	<i>Aesculus x camea</i>	21.0	11.00	60.80	Good	244.91	17.92	4.03	79.22	8.23	0.0	YES	NO
19	<i>Aesculus x camea</i>	28.0	12.00	95.00	Excellent	368.31	26.95	3.88	157.86	12.27	0.0	YES	NO
20	<i>Aesculus x camea</i>	22.0	10.50	67.90	Good	284.08	20.79	4.18	88.04	8.74	0.0	YES	NO
21	<i>Aesculus x camea</i>	26.0	12.00	78.50	Good	328.54	24.04	4.18	132.42	11.08	0.0	YES	NO
22	<i>Aesculus x camea</i>	27.0	13.00	70.90	Excellent	459.43	33.62	6.48	145.91	11.74	0.0	YES	NO
23	<i>Aesculus x camea</i>	10.0	6.00	7.10	Excellent	22.73	1.66	3.22	12.96	3.35	0.0	YES	NO
24	<i>Aesculus x camea</i>	30.0	14.00	60.80	Good	335.46	24.55	5.52	188.60	13.63	0.0	YES	NO
25	<i>Aesculus x camea</i>	26.0	12.00	41.90	Fair	191.10	13.98	4.57	132.42	11.08	0.0	YES	NO
	TOTAL			1'802		7'850	558		14'517	554			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPRE NE	MONO TERP	OVOC	Total VOC
1	<i>Aesculus hippocastanum</i>	4.4	177.8	40.8	73.4	3.4	299.8	0.01	1.76	0.40	0.49	0.01	2.7	N/A	N/A	N/A	N/A
2	<i>Aesculus hippocastanum</i>	3.7	148.3	34.0	61.2	2.8	250.1	0.01	1.47	0.34	0.40	0.01	2.2	N/A	N/A	N/A	N/A
3	<i>Aesculus hippocastanum</i>	2.2	87.1	20.0	35.9	1.7	146.8	0.00	0.86	0.20	0.24	0.00	1.3	N/A	N/A	N/A	N/A
4	<i>Aesculus hippocastanum</i>	6.2	248.1	56.9	102.4	4.8	418.5	0.01	2.46	0.56	0.68	0.01	3.7	N/A	N/A	N/A	N/A
5	<i>Aesculus hippocastanum</i>	4.8	192.4	44.1	79.4	3.7	324.5	0.01	1.91	0.44	0.53	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
6	<i>Aesculus hippocastanum</i>	6.0	238.1	54.6	98.3	4.6	401.5	0.01	2.36	0.54	0.65	0.01	3.6	N/A	N/A	N/A	N/A
7	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.3	212.0	48.6	87.5	4.1	357.5	0.01	2.10	0.48	0.58	0.01	3.2	N/A	N/A	N/A	N/A
8	<i>Aesculus hippocastanum</i>	3.1	122.0	28.0	50.4	2.3	205.8	0.00	1.21	0.28	0.33	0.01	1.8	N/A	N/A	N/A	N/A
9	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.8	232.8	53.4	96.1	4.5	392.6	0.01	2.31	0.53	0.64	0.01	3.5	N/A	N/A	N/A	N/A
10	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.8	231.1	53.0	95.4	4.4	389.7	0.01	2.29	0.53	0.63	0.01	3.5	N/A	N/A	N/A	N/A
11	<i>Aesculus hippocastanum</i>	6.0	238.1	54.6	98.3	4.6	401.5	0.01	2.36	0.54	0.65	0.01	3.6	N/A	N/A	N/A	N/A
12	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.0	199.0	45.6	82.1	3.8	335.5	0.01	1.97	0.45	0.54	0.01	3.0	N/A	N/A	N/A	N/A
13	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.9	234.7	53.8	96.9	4.5	395.7	0.01	2.32	0.53	0.64	0.01	3.5	N/A	N/A	N/A	N/A
14	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.3	212.2	48.7	87.6	4.1	357.9	0.01	2.10	0.48	0.58	0.01	3.2	N/A	N/A	N/A	N/A
15	<i>Aesculus hippocastanum</i>	5.1	203.3	46.6	83.9	3.9	342.9	0.01	2.01	0.46	0.56	0.01	3.0	N/A	N/A	N/A	N/A
16	<i>Aesculus x carnea</i>	4.8	193.0	44.3	79.7	3.7	325.5	0.01	1.91	0.44	0.53	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
17	<i>Aesculus x carnea</i>	4.0	159.5	36.6	65.8	3.1	269.0	0.01	1.58	0.36	0.44	0.01	2.4	N/A	N/A	N/A	N/A
18	<i>Aesculus x carnea</i>	3.6	145.2	33.3	59.9	2.8	244.9	0.01	1.44	0.33	0.40	0.01	2.2	N/A	N/A	N/A	N/A
19	<i>Aesculus x carnea</i>	5.5	218.4	50.1	90.1	4.2	368.3	0.01	2.16	0.50	0.60	0.01	3.3	N/A	N/A	N/A	N/A
20	<i>Aesculus x carnea</i>	4.2	168.5	38.6	69.5	3.2	284.1	0.01	1.67	0.38	0.46	0.01	2.5	N/A	N/A	N/A	N/A
21	<i>Aesculus x carnea</i>	4.9	194.8	44.7	80.4	3.7	328.5	0.01	1.93	0.44	0.53	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
22	<i>Aesculus x carnea</i>	6.8	272.4	62.5	112.4	5.2	459.4	0.01	2.70	0.62	0.74	0.01	4.1	N/A	N/A	N/A	N/A
23	<i>Aesculus x carnea</i>	0.3	13.5	3.1	5.6	0.3	22.7	0.00	0.13	0.03	0.04	0.00	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A
24	<i>Aesculus x carnea</i>	5.0	198.9	45.6	82.1	3.8	335.4	0.01	1.97	0.45	0.54	0.01	3.0	N/A	N/A	N/A	N/A
25	<i>Aesculus x carnea</i>	2.8	113.3	26.0	46.8	2.2	191.1	0.00	1.12	0.26	0.31	0.01	1.7	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	116.4	4654.7	1'067.8	1'921.2	89.2	7'849.3	0.16	46.11	10.58	12.71	0.22	69.8	N/A	N/A	N/A	N/A

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m2)	Tree Condition	Leaf Area (m2)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (\$)	Street Tree	Native To State
1	Sophora japonica	31.5	11.50	95.00	Good	254.55	28.93	2.68	208.10	12.72	0.0	YES	NO
2	Sophora japonica	22.0	9.50	50.30	Good	147.22	16.73	2.93	87.26	8.68	0.0	YES	NO
3	Sophora japonica	6.5	6.00	8.60	Excellent	21.20	2.41	2.48	4.71	1.56	0.0	YES	NO
4	Sophora japonica	24.0	10.00	60.80	Good	219.07	24.89	3.6	107.76	9.81	0.0	YES	NO
5	Sophora japonica	5.5	5.00	6.20	Excellent	12.69	1.44	2.06	3.12	1.24	0.0	YES	NO
6	Sophora japonica	10.0	7.00	14.50	Excellent	36.81	4.18	2.53	13.16	3.39	0.0	YES	NO
7	Sophora japonica	25.5	11.00	56.70	Good	204.45	23.23	3.6	125.47	10.73	0.0	YES	NO
8	Sophora japonica	5.0	4.00	4.90	Good	7.65	0.87	1.56	2.44	1.08	0.0	YES	NO
9	Sophora japonica	35.0	13.00	78.50	Good	247.43	28.12	3.15	270.11	14.83	0.0	YES	NO
10	Sophora japonica	36.0	12.00	63.60	Excellent	206.40	23.45	3.24	287.00	15.35	0.0	YES	NO
11	Sophora japonica	25.0	11.00	78.50	Good	237.93	27.04	3.03	119.71	10.44	0.0	YES	NO
12	Sophora japonica	33.0	14.00	86.60	Fair	171.62	19.50	1.98	236.41	13.74	0.0	YES	NO
13	Sophora japonica	39.0	14.00	56.70	Good	150.21	17.07	2.65	351.63	17.31	0.0	YES	NO
14	Sophora japonica	39.5	14.00	70.90	Good	173.26	19.69	2.44	362.46	17.62	0.0	YES	NO
15	Sophora japonica	41.5	13.50	109.40	Good	245.08	27.85	2.24	406.53	18.83	0.0	YES	NO
16	Sophora japonica	19.0	9.00	47.80	Good	135.77	15.43	2.84	61.35	7.08	0.0	YES	NO
17	Sophora japonica	48.0	12.00	86.60	Good	222.80	25.32	2.57	570.79	22.94	0.0	YES	NO
18	Sophora japonica	48.0	13.00	103.90	Good	239.76	27.25	2.31	573.88	23.03	0.0	YES	NO
19	Sophora japonica	41.0	13.00	113.10	Excellent	290.72	33.04	2.57	393.79	18.48	0.0	YES	NO
20	Sophora japonica	6.0	5.50	8.60	Fair	16.91	1.92	1.98	3.87	1.39	0.0	YES	NO
21	Sophora japonica	64.0	14.50	109.40	Good	251.93	28.63	2.3	1'151.61	36.96	0.0	YES	NO
22	Sophora japonica	42.0	16.00	103.90	Fair	234.30	26.63	2.26	424.29	19.35	0.0	YES	NO
23	Sophora japonica	13.0	7.00	33.20	Excellent	85.30	9.69	2.57	24.43	4.80	0.0	YES	NO
24	Sophora japonica	12.0	6.00	36.30	Excellent	80.04	9.10	2.2	19.94	4.27	0.0	YES	NO
25	Sophora japonica	44.0	12.00	63.60	Good	251.79	28.61	3.96	463.46	20.31	0.0	YES	NO
	TOTAL			1'548		4'145	471		6'273	316			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPRENE	MONOTERP	OVOC	Total VOC
1	Sophora japonica	6.0	203.4	43.6	72.3	4.0	329.3	0.01	2.02	0.43	0.48	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Sophora japonica	3.4	117.7	25.2	41.8	2.3	190.4	0.00	1.17	0.25	0.28	0.01	1.7	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Sophora japonica	0.5	16.9	3.6	6.0	0.3	27.4	0.00	0.17	0.04	0.04	0.00	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Sophora japonica	5.1	175.1	37.5	62.2	3.4	283.4	0.01	1.73	0.37	0.41	0.01	2.5	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Sophora japonica	0.3	10.1	2.2	3.6	0.2	16.4	0.00	0.10	0.02	0.02	0.00	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Sophora japonica	0.9	29.4	6.3	10.5	0.6	47.6	0.00	0.29	0.06	0.07	0.00	0.4	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Sophora japonica	4.8	163.4	35.0	58.1	3.2	264.4	0.01	1.62	0.35	0.38	0.01	2.4	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Sophora japonica	0.2	6.1	1.3	2.2	0.1	9.9	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Sophora japonica	5.8	197.7	42.4	70.3	3.9	320.0	0.01	1.96	0.42	0.46	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Sophora japonica	4.8	165.0	35.3	58.6	3.2	267.0	0.01	1.63	0.35	0.39	0.01	2.4	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Sophora japonica	5.6	190.2	40.7	67.6	3.7	307.8	0.01	1.88	0.40	0.45	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Sophora japonica	4.0	137.2	29.4	48.7	2.7	222.0	0.01	1.36	0.29	0.32	0.01	2.0	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Sophora japonica	3.5	120.1	25.7	42.7	2.4	194.3	0.00	1.19	0.25	0.28	0.01	1.7	N/A	N/A	N/A	N/A
14	Sophora japonica	4.1	138.5	29.7	49.2	2.7	224.1	0.01	1.37	0.29	0.33	0.01	2.0	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Sophora japonica	5.7	195.9	42.0	69.6	3.8	317.0	0.01	1.94	0.42	0.46	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Sophora japonica	3.2	108.5	23.2	38.6	2.1	175.6	0.00	1.07	0.23	0.25	0.01	1.6	N/A	N/A	N/A	N/A
17	Sophora japonica	5.2	178.1	38.1	63.3	3.5	288.2	0.01	1.76	0.38	0.42	0.01	2.6	N/A	N/A	N/A	N/A
18	Sophora japonica	5.6	191.6	41.1	68.1	3.8	310.1	0.01	1.90	0.41	0.45	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Sophora japonica	6.8	232.3	49.8	82.5	4.6	376.0	0.01	2.30	0.49	0.55	0.01	3.4	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Sophora japonica	0.4	13.5	2.9	4.8	0.3	21.9	0.00	0.13	0.03	0.03	0.00	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Sophora japonica	5.9	201.3	43.1	71.5	3.9	325.9	0.01	1.99	0.43	0.47	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
22	Sophora japonica	5.5	187.3	40.1	66.5	3.7	303.1	0.01	1.85	0.40	0.44	0.01	2.7	N/A	N/A	N/A	N/A
23	Sophora japonica	2.0	68.2	14.6	24.2	1.3	110.3	0.00	0.68	0.14	0.16	0.00	1.0	N/A	N/A	N/A	N/A
24	Sophora japonica	1.9	64.0	13.7	22.7	1.3	103.5	0.00	0.63	0.14	0.15	0.00	0.9	N/A	N/A	N/A	N/A
25	Sophora japonica	5.9	201.2	43.1	71.5	3.9	325.7	0.01	1.99	0.43	0.47	0.01	2.9	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	97.0	3312.7	709.7	1176.9	64.9	5361.3	0.14	32.82	7.03	7.78	0.16	47.9	N/A	N/A	N/A	N/A

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m ²)	Tree Condition	Leaf Area (m ²)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (\$)	Street Tree	Native To State
1	Acer platanoides	46.0	15.00	113.10	Fair	545.58	29.45	4.82	526.92	15.70	0.0	YES	NO
2	Acer platanoides	54.0	18.00	165.10	Good	708.31	38.23	4.29	772.40	19.54	0.0	YES	NO
3	Acer platanoides	43.5	13.00	201.10	Fair	705.11	38.06	3.51	454.76	14.40	0.0	YES	NO
4	Acer platanoides	35.0	14.00	70.90	Good	572.51	30.90	8.08	287.60	11.20	0.0	YES	NO
5	Acer platanoides	11.5	7.00	9.60	Excellent	35.50	1.92	3.69	22.63	2.70	0.0	YES	NO
6	Acer platanoides	15.0	8.00	15.90	Excellent	78.85	4.26	4.96	41.22	3.77	0.0	YES	NO
7	Acer platanoides	21.0	10.00	44.20	Good	172.33	9.30	3.9	89.16	5.80	0.0	YES	NO
8	Acer platanoides	20.5	8.00	44.20	Fair	144.04	7.77	3.26	81.06	5.46	0.0	YES	NO
9	Acer platanoides	19.0	9.00	44.20	Good	194.71	10.51	4.41	70.31	5.07	0.0	YES	NO
10	Acer platanoides	26.0	10.00	56.70	Good	238.58	12.88	4.2	141.54	7.47	0.0	YES	NO
11	Acer platanoides	14.0	7.00	28.30	Excellent	94.83	5.12	3.35	34.57	3.40	0.0	YES	NO
12	Acer platanoides	33.5	12.00	56.70	Good	353.18	19.06	6.22	253.87	10.39	0.0	YES	NO
13	Acer platanoides	16.0	6.00	38.50	Good	104.82	5.66	2.72	44.93	3.91	0.0	YES	NO
14	Acer platanoides	16.0	8.00	33.20	Good	128.71	6.95	3.88	47.38	4.06	0.0	YES	NO
15	Acer platanoides	20.5	8.00	38.50	Good	170.85	9.22	4.44	81.06	5.46	0.0	YES	NO
16	Acer platanoides	32.0	8.00	56.70	Good	222.81	12.03	3.93	214.85	9.36	0.0	YES	NO
17	Acer platanoides	17.5	10.00	28.30	Good	127.14	6.86	4.5	60.25	4.68	0.0	YES	NO
18	Acer platanoides	20.5	9.00	70.90	Excellent	298.56	16.11	4.21	82.87	5.54	0.0	YES	NO
19	Acer platanoides	31.0	10.00	50.30	Good	294.93	15.92	5.87	207.56	9.24	0.0	YES	NO
20	Acer platanoides	16.0	9.00	23.80	Excellent	121.94	6.58	5.13	48.57	4.14	0.0	YES	NO
21	Acer platanoides	17.5	10.00	23.80	Excellent	78.40	4.23	3.3	60.25	4.68	0.0	YES	NO
22	Acer platanoides	51.0	13.00	176.70	Good	619.73	33.45	3.51	643.91	17.49	0.0	YES	NO
23	Acer platanoides	37.5	12.00	103.90	Good	394.50	21.29	3.8	324.47	11.91	0.0	YES	NO
24	Acer platanoides	38.0	16.00	132.70	Good	449.79	24.28	3.39	353.02	12.61	0.0	YES	NO
25	Acer platanoides	16.0	9.00	23.80	Good	71.81	3.88	3.02	48.57	4.14	0.0	YES	NO
	TOTAL			1'651		6'928	374		4'994	202			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Street Trees, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPRENE	MONOTERP	OVOC	Total VOC
1	Acer platanoides	8.7	342.4	78.1	139.3	6.6	575.1	0.01	3.39	0.77	0.92	0.02	5.1	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Acer platanoides	11.2	444.6	101.4	180.8	8.5	746.6	0.02	4.40	1.00	1.20	0.02	6.6	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Acer platanoides	11.2	442.6	101.0	180.0	8.5	743.2	0.02	4.38	1.00	1.19	0.02	6.6	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Acer platanoides	9.1	359.3	82.0	146.2	6.9	603.5	0.01	3.56	0.81	0.97	0.02	5.4	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Acer platanoides	0.6	22.3	5.1	9.1	0.4	37.4	0.00	0.22	0.05	0.06	0.00	0.3	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Acer platanoides	1.3	49.5	11.3	20.1	0.9	83.1	0.00	0.49	0.11	0.13	0.00	0.7	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Acer platanoides	2.7	108.2	24.7	44.0	2.1	181.7	0.00	1.07	0.24	0.29	0.01	1.6	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Acer platanoides	2.3	90.4	20.6	36.8	1.7	151.8	0.00	0.90	0.20	0.24	0.00	1.4	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Acer platanoides	3.1	122.2	27.9	49.7	2.3	205.2	0.00	1.21	0.28	0.33	0.01	1.8	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Acer platanoides	3.8	149.7	34.2	60.9	2.9	251.5	0.01	1.48	0.34	0.40	0.01	2.2	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Acer platanoides	1.5	59.5	13.6	24.2	1.1	100.0	0.00	0.59	0.13	0.16	0.00	0.9	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Acer platanoides	5.6	221.7	50.6	90.2	4.3	372.3	0.01	2.20	0.50	0.60	0.01	3.3	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Acer platanoides	1.7	65.8	15.0	26.8	1.3	110.5	0.00	0.65	0.15	0.18	0.00	1.0	N/A	N/A	N/A	N/A
14	Acer platanoides	2.0	80.8	18.4	32.9	1.6	135.7	0.00	0.80	0.18	0.22	0.00	1.2	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Acer platanoides	2.7	107.2	24.5	43.6	2.1	180.1	0.00	1.06	0.24	0.29	0.00	1.6	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Acer platanoides	3.5	139.8	31.9	56.9	2.7	234.9	0.00	1.39	0.32	0.38	0.01	2.1	N/A	N/A	N/A	N/A
17	Acer platanoides	2.0	79.8	18.2	32.5	1.5	134.0	0.00	0.79	0.18	0.21	0.00	1.2	N/A	N/A	N/A	N/A
18	Acer platanoides	4.7	187.4	42.8	76.2	3.6	314.7	0.01	1.86	0.42	0.50	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Acer platanoides	4.7	185.1	42.2	75.3	3.6	310.9	0.01	1.83	0.42	0.50	0.01	2.8	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Acer platanoides	1.9	76.5	17.5	31.1	1.5	128.5	0.00	0.76	0.17	0.21	0.00	1.1	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Acer platanoides	1.2	49.2	11.2	20.0	0.9	82.6	0.00	0.49	0.11	0.13	0.00	0.7	N/A	N/A	N/A	N/A
22	Acer platanoides	9.8	389.0	88.7	158.2	7.5	653.3	0.01	3.85	0.88	1.05	0.02	5.8	N/A	N/A	N/A	N/A
23	Acer platanoides	6.3	247.6	56.5	100.7	4.8	415.8	0.01	2.45	0.56	0.67	0.01	3.7	N/A	N/A	N/A	N/A
24	Acer platanoides	7.1	282.3	64.4	114.8	5.4	474.1	0.01	2.80	0.64	0.76	0.01	4.2	N/A	N/A	N/A	N/A
25	Acer platanoides	1.1	45.1	10.3	18.3	0.9	75.7	0.00	0.45	0.10	0.12	0.00	0.7	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	109.9	4348.1	992.0	1768.7	83.5	7302.2	0.15	43.07	9.83	11.70	0.20	65.0	N/A	N/A	N/A	N/A

Individual Tree Characteristics in Zurich

Series: Waldgarten, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	DBH (cm)	Height (m)	Ground Area (m2)	Tree Condition	Leaf Area (m2)	Leaf Biomass (kg)	Leaf Area Index	Carbon Storage (kg)	Gross Carbon Seq (kg/yr)	Tree Value (\$)	Street Tree	Native To State
1	<i>Acer platanoides</i>	73.0	18.00	240.50	Good	1'161.99	62.72	4.83	1'488.97	28.19	0.0	NO	NO
2	<i>Acer saccharinum</i>	73.0	22.00	176.70	Good	876.33	46.12	4.96	1'393.83	23.11	0.0	NO	NO
3	<i>Tilia species</i>	59.0	20.00	70.90	Good	407.79	18.97	5.75	601.18	14.75	0.0	NO	NO
4	<i>Tilia species</i>	92.0	22.00	165.10	Good	1'233.36	57.36	7.47	1'713.80	26.90	0.0	NO	NO
5	<i>Liriodendron tulipifera</i>	51.0	16.00	38.50	Excellent	203.62	12.00	5.29	545.03	15.74	0.0	NO	NO
6	<i>Liriodendron tulipifera</i>	51.0	15.00	165.10	Good	919.98	54.23	5.57	545.03	15.74	0.0	NO	NO
	TOTAL			857		4'803	251		6'288	124			

Individual Tree Pollution Effects in Zurich

Series: Waldgarten, Time Period: 2011

Tree ID	Scientific Name	Pollution Removed (g/yr)						Removal Value (\$/yr)						VOC Emission (g/yr)			
		CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	CO	O3	NO2	PM10	SO2	Total	ISOPRENE	MONO TERP	OVOC	Total VOC
1	<i>Acer platanoides</i>	14.1	604.8	143.8	278.2	11.5	1'052.4	0.02	5.99	1.42	1.84	0.03	9.3	N/A	N/A	N/A	N/A
2	<i>Acer saccharinum</i>	10.6	456.1	108.5	209.8	8.6	793.7	0.01	4.52	1.07	1.39	0.02	7.0	N/A	N/A	N/A	N/A
3	<i>Tilia species</i>	4.9	212.3	50.5	97.6	4.0	369.3	0.01	2.10	0.50	0.65	0.01	3.3	N/A	N/A	N/A	N/A
4	<i>Tilia species</i>	14.9	642.0	152.7	295.3	12.2	1'117.0	0.02	6.36	1.51	1.95	0.03	9.9	N/A	N/A	N/A	N/A
5	<i>Liriodendron tulipifera</i>	2.5	106.0	25.2	48.7	2.0	184.4	0.00	1.05	0.25	0.32	0.00	1.6	N/A	N/A	N/A	N/A
6	<i>Liriodendron tulipifera</i>	11.1	478.9	113.9	220.2	9.1	833.2	0.02	4.74	1.13	1.46	0.02	7.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	TOTAL	58.2	2500.1	594.5	1'149.9	47.4	4'350.0	0.08	24.77	5.89	7.61	0.11	38.5	N/A	N/A	N/A	N/A

Anhang B: Rohdaten i-Tree Streets

Switzerland

Annual CO Benefits of Public Trees by Species

23.07.2011

Species	Sequestered (lb)	Sequestered (\$)	Decomposition Release (lb)	Maintenance Release (lb)	Total Released (\$)	Avoided (lb)	Avoided (\$)	Net Total (lb)	Total Standard (\$ Error)	% of Total Trees	% of Total \$	Avg. \$/tree
Horse-chestnut	12,735	96	-1,129	-89	-9	14,611	110	26,128	196 (N/A)	39.0	44.0	5.02
Norway maple	7,083	53	-305	-38	-3	6,387	48	13,128	98 (N/A)	25.0	22.1	3.94
Common lime	10,072	76	-378	-41	-3	5,930	44	15,583	117 (N/A)	25.0	26.2	4.67
Red Horse chestnut	2,580	19	-87	-14	-1	2,086	16	4,565	34 (N/A)	11.0	7.7	3.11
OTHER STREET TREES	0	0	0	0	0	0	0	0	0 (N/A)	0.0	0.0	0.00
Citywide total	32,469	244	-1,899	-181	-16	29,014	218	59,403	446 (N/A)	100.0	100.0	4.46

Switzerland

Stored CO2 Benefits of Public Trees by Species

23.07.2011

Species	Total Stored CO2 (lbs)	Total (\$)	Standard Error	% of Total Trees	% of Total \$	Avg. \$/tree
Horse-chestnut	235,068	1,763	(N/A)	39.0	59.5	45.21
Norway maple	63,069	473	(N/A)	25.0	16.0	18.92
Common lime	78,727	590	(N/A)	25.0	19.9	23.62
Red Horse chestnut	18,066	136	(N/A)	11.0	4.6	12.32
OTHER STREET TR	0	0	(N/A)	0.0	0.0	0.00
Citywide total	394,930	2,962	(N/A)	100.0	100.0	29.62

Switzerland

Annual Air Quality Benefits of Public Trees by Species

23.07.2011

Species	Deposition (lb)				Total Depos. (\$)	Avoided (lb)				Total Avoided (\$)	BVOC Emissions (lb)	BVOC Emissions (\$)	Total (lb)	Total Standard (\$) Error	% of Total Trees	Avg. \$/tree
	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂		NO ₂	PM ₁₀	VOC	SO ₂							
Horse-chestnut	14.2	2.4	7.1	0.6	77	42.1	6.1	5.8	39.5	261	-3.4	-13	114.5	325 (N/A)	39.0	8.34
Norway maple	3.7	0.6	2.0	0.2	21	18.4	2.7	2.5	17.3	114	-1.0	-4	46.5	131 (N/A)	25.0	5.24
Common lime	3.5	0.6	1.9	0.2	19	16.8	2.5	2.3	16.0	105	-1.8	-7	41.9	117 (N/A)	25.0	4.69
Red Horse chestnut	1.0	0.2	0.6	0.0	6	6.2	0.9	0.8	5.6	38	-0.3	-1	15.1	43 (N/A)	11.0	3.87
OTHER STREET TREES	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0 (N/A)	0.0	0.00
Citywide total	22.4	3.9	11.6	1.0	123	83.5	12.1	11.5	78.5	518	-6.5	-25	217.9	616 (N/A)	100.0	6.16

Switzerland

Annual Benefits of Public Trees by Species (\$/tree)

23.07.2011

Species	Energy	CO ₂	Air Quality	Stormwater	Aesthetic/Other	Total (\$)	Standard Error
Horse-chestnut	48.04	5.02	8.34	51.22	32.29	144.91	(N/A)
Norway maple	32.96	3.94	5.24	26.90	30.25	99.29	(N/A)
Common lime	29.28	4.67	4.69	27.77	45.58	111.99	(N/A)
Red Horse chestnut	26.16	3.11	3.87	19.49	26.53	79.16	(N/A)
OTHER STREET TRI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	(N/A)

Switzerland

Total Annual Benefits, Net Benefits, and Costs for Public Trees

23.07.2011

Benefits	Total (\$) Standard Error	\$/tree Standard Error	\$/capita Standard Error
Energy	3,717 (N/A)	37.17 (N/A)	0.00 (N/A)
CO2	446 (N/A)	4.46 (N/A)	0.00 (N/A)
Air Quality	616 (N/A)	6.16 (N/A)	0.00 (N/A)
Stormwater	3,579 (N/A)	35.79 (N/A)	0.00 (N/A)
Aesthetic/Other	3,447 (N/A)	34.47 (N/A)	0.00 (N/A)
Total Benefits	11,805 (N/A)	118.05 (N/A)	0.00 (N/A)
Costs			
Planting	0	0.00	0.00
Contract Pruning	0	0.00	0.00
Pest Management	0	0.00	0.00
Irrigation	0	0.00	0.00
Removal	0	0.00	0.00
Administration	0	0.00	0.00
Inspection/Service	0	0.00	0.00
Infrastructure Repairs	0	0.00	0.00
Litter Clean-up	0	0.00	0.00
Liability/Claims	0	0.00	0.00
Other Costs	0	0.00	0.00
Total Costs	0	0.00	0.00
Net Benefits	11,805 (N/A)	118.05 (N/A)	0.00 (N/A)
Benefit-cost ratio	0.00 (N/A)		

Switzerland

Annual Aesthetic/Other Benefits of Public Trees by Species

23.07.2011

Species	Total (\$)	Standard Error	% of Total Trees	% of Total \$	Avg. \$/tree
Horse-chestnut	1,259	(N/A)	39.0	36.5	32.29
Norway maple	756	(N/A)	25.0	21.9	30.25
Common lime	1,140	(N/A)	25.0	33.1	45.58
Red Horse chestnut	292	(N/A)	11.0	8.5	26.53
OTHER STREET TREES	0	(±n. def.)	0.0	0.0	0.00
Citywide total	3,447	(N/A)	100.0	100.0	34.47

Switzerland

Annual Energy Benefits of Public Trees By Species

23.07.2011

Species	Total Electricity (MWh)	Electricity (\$)	Total Natural Gas (Therms)	Natural Gas (\$)	Total (\$)	Standard Error	% of Total Trees	% of Total \$	Avg. \$/tree
Horse-chestnut	8.7	661	1,237.1	1,212	1,873	(N/A)	39.0	50.4	48.04
Norway maple	3.8	289	545.8	535	824	(N/A)	25.0	22.2	32.96
Common lime	3.5	268	473.0	464	732	(N/A)	25.0	19.7	29.28
Red Horse chestnut	1.2	94	197.3	193	288	(N/A)	11.0	7.7	26.16
OTHER STREET TREES	0.0	0	0.0	0	0	(N/A)	0.0	0.0	0.00
Citywide total	17.3	1,313	2,453.2	2,404	3,717	(N/A)	100.0	100.0	37.17

Switzerland

Annual Stormwater Benefits of Public Trees by Species

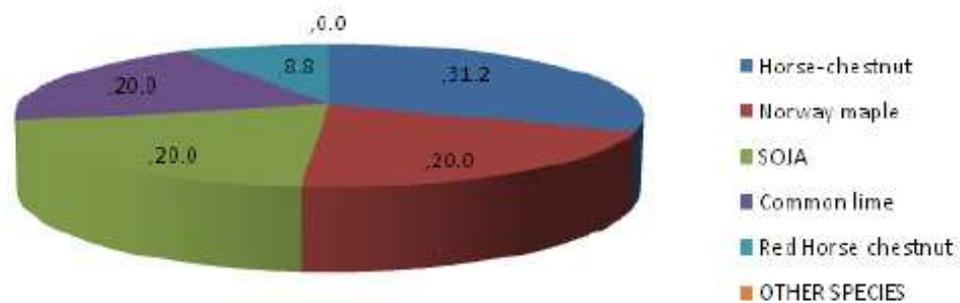
23.07.2011

Species	Total rainfall interception (Gal)	Total (\$)	Standard Error	% of Total Trees	% of Total \$	Avg. \$/tree
Horse-chestnut	73,701	1,997	(N/A)	39.0	55.8	51.22
Norway maple	24,816	673	(N/A)	25.0	18.8	26.90
Common lime	25,612	694	(N/A)	25.0	19.4	27.77
Red Horse chestnut	7,912	214	(N/A)	11.0	6.0	19.49
OTHER STREET TREES	0	0	(N/A)	0.0	0.0	0.00
Citywide total	132,041	3,579	(N/A)	100.0	100.0	35.79

Switzerland

Species Distribution of Public Trees (%)

23.07.2011

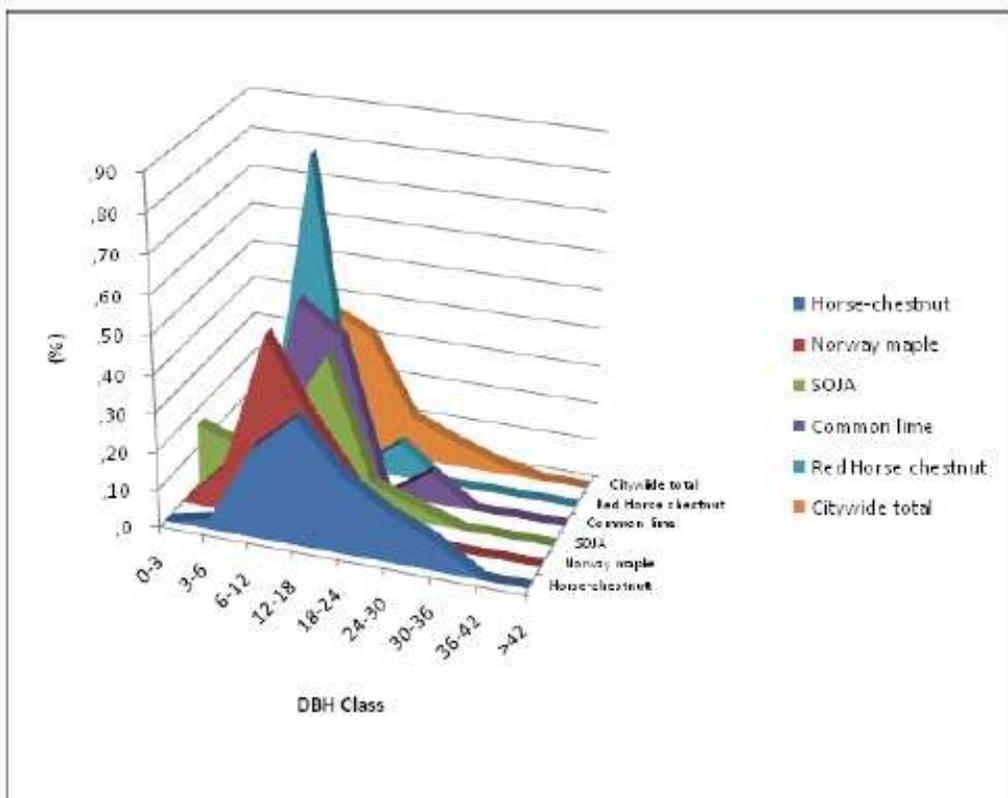


Species	Percent
Horse-chestnut	31.2
Norway maple	20.0
SOJA	20.0
Common lime	20.0
Red Horse chestnut	8.8
OTHER SPECIES	0.0
Total	100.0

Switzerland

Relative Age Distribution of Top 10 Public Tree Species (%)

23.07.2011



Species	DBH class (in)								
	0-3	3-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36	36-42	>42
Horse-chestnut	0.00	2.56	23.08	33.33	20.51	12.82	7.69	0.00	0.00
Norway maple	0.00	12.00	48.00	28.00	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOJA	16.00	12.00	20.00	40.00	8.00	4.00	0.00	0.00	0.00
Common lime	4.00	0.00	48.00	40.00	0.00	8.00	0.00	0.00	0.00
Red Horse chestnut	0.00	9.09	81.82	0.00	9.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Citywide total	4.00	6.40	37.60	32.00	11.20	6.40	2.40	0.00	0.00

Switzerland

Page 1 of 1

Tree Height for Public Trees by Species

23.07.2011

Species	Tree Height	Tree Count	Standard Error	% of Species	% of Public Trees
Common lime	0-5 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	6-7 m	1 (N/A)		4.00	0.80
	8-9 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	10-11 m	5 (N/A)		20.00	4.00
	12-13 m	11 (N/A)		44.00	8.80
	14-15 m	7 (N/A)		28.00	5.60
	16-17 m	1 (N/A)		4.00	0.80
	18+	0 (N/A)		0.00	0.00
	Total		25 (N/A)		100.00
Horse-chestnut	0-5 m	1 (N/A)		2.56	0.80
	6-7 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	8-9 m	2 (N/A)		5.13	1.60
	10-11 m	13 (N/A)		33.33	10.40
	12-13 m	9 (N/A)		23.08	7.20
	14-15 m	8 (N/A)		20.51	6.40
	16-17 m	5 (N/A)		12.82	4.00
	18+	1 (N/A)		2.56	0.80
	Total		39 (N/A)		100.00
Norway maple	0-5 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	6-7 m	3 (N/A)		12.00	2.40
	8-9 m	9 (N/A)		36.00	7.20
	10-11 m	5 (N/A)		20.00	4.00
	12-13 m	4 (N/A)		16.00	3.20
	14-15 m	2 (N/A)		8.00	1.60
	16-17 m	2 (N/A)		8.00	1.60
	18+	0 (N/A)		0.00	0.00
	Total		25 (N/A)		100.00
Red Horse chestnut	0-5 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	6-7 m	1 (N/A)		9.09	0.80
	8-9 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	10-11 m	4 (N/A)		36.36	3.20
	12-13 m	5 (N/A)		45.45	4.00
	14-15 m	1 (N/A)		9.09	0.80
	16-17 m	0 (N/A)		0.00	0.00
	18+	0 (N/A)		0.00	0.00
	Total		11 (N/A)		100.00
SOJA	0-5 m	3 (N/A)		12.00	2.40
	6-7 m	4 (N/A)		16.00	3.20
	8-9 m	2 (N/A)		8.00	1.60
	10-11 m	4 (N/A)		16.00	3.20
	12-13 m	8 (N/A)		32.00	6.40
	14-15 m	3 (N/A)		12.00	2.40
	16-17 m	1 (N/A)		4.00	0.80
	18+	0 (N/A)		0.00	0.00
	Total		25 (N/A)		100.00

Switzerland

Replacement Value for Public Trees by Species

23.07.2011

Species	DBH Class (in)									Total Standard Error	% of Total
	0-3	3-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36	36-42	>42		
Horse-chestnut	0	392	3,263	8,509	12,142	12,138	10,816	0	0	47,260 (±0)	45.46
Norway maple	0	1,175	6,266	7,665	4,929	0	0	0	0	20,035 (±0)	19.27
Common lime	317	0	8,128	13,368	0	7,291	0	0	0	29,104 (±0)	28.00
Red Horse chestnut	0	392	5,116	0	2,044	0	0	0	0	7,552 (±0)	7.26
Citywide total	317	1,959	22,773	29,543	19,114	19,430	10,816	0	0	103,951 (±0)	100.00

Switzerland

Relative Performance Index for Public Trees

23.07.2011

Species	Dead or Dying	Poor	Fair	Good	RPI	# of Standard Trees Error	% of Public
Horse-chestnut	12.82	20.51	38.46	28.21	0.78	39 (N/A)	31.20
Norway maple	0.00	12.00	20.00	68.00	1.03	25 (N/A)	20.00
SOJA	0.00	4.00	20.00	76.00	1.09	25 (N/A)	20.00
Common lime	0.00	0.00	0.00	100.00	1.19	25 (N/A)	20.00
Red Horse chestnut	0.00	0.00	27.27	72.73	1.09	11 (N/A)	8.80
Citywide	4.00	9.60	22.40	64.00	1.00	125 (N/A)	100.00

Switzerland

Importance Values for Public Most Abundant Trees

23.07.2011

Species	Number of Trees	% of Total Trees	Leaf Area (ft ²)	% of Total Leaf Area	Canopy Cover (ft ²)	% of Total Canopy Cover	Importance Value
Horse-chestnut	39	39.0	107,675	57.9	36,940	53.3	50.1
Norway maple	25	25.0	31,369	16.9	14,645	21.1	21.0
Common lime	25	25.0	37,640	20.2	12,622	18.2	21.2
Red Horse chestnut	11	11.0	9,264	5.0	5,042	7.3	7.8
OTHER TREES	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0
Total	100	100.0	185,948	100.0	69,249	100.0	100.0