

Schlussbericht Urban Green & Climate Bern - Die Rolle und Bewirtschaftung von Bäumen in einer klimaangepassten Stadtentwicklung

Bearbeitung: Jürgen Blaser, Oliver Gardi, Maren Kern, Sophie Mack, Martina Wiedemar (alle BFH-HAFL) und Jan Remund (Meteotest)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Stadtbäume im Klimawandel	7
1.2	Ziele und Adressaten des Projektes	7
1.3	Projektablauf	7
2	Ausgangslage und Problemstellung	9
2.1	Baumstandort Stadt	9
2.1.1	Projektgebiet Stadt Bern	9
2.1.2	Klimatische Bedingungen in Bern	10
2.1.3	Stressoren für Stadtbäume	11
2.2	Klimawandel und Städte	12
2.2.1	Beobachtete Klimaveränderung in der Schweiz	12
2.2.2	Klimaszenarien und erwartete Klimaveränderung in der Schweiz	12
2.2.3	Erwartete Klimaveränderung in Schweizer Städten	13
2.3	Ökosystemdienstleistungen des Baumbestandes	14
2.3.1	Einfluss des Baumbestandes aufs Stadtklima	14
2.3.2	Alternative Finanzierungsmittel	14
2.4	Baumarten im Klimawandel	14
2.4.1	Auswirkungen des Klimawandels auf den Baumbestand	14
2.4.2	Forschung in anderen Städten	16
3	Methodik	18
3.1	Urbanes Klima	18
3.2	Vitalitäts- und Schadensaufnahmen	19
3.3	Kohlenstoffspeicherung in Stadtbäumen	20
3.4	Baumartenwahl angesichts des Klimawandels - Klimafit Stadtbaum-Index (KSI)	21
4	Resultate und Synthese	23
4.1	Einfluss der Vegetation und Grünflächen auf das Stadtklima	23
4.2	Vitalität des Baumbestandes	25
4.3	Kohlenstoffmodell und Biomassekarte	27
4.4	Problem- und Potentialarten	31
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	34
6	Literaturverzeichnis	37
7	Anhang	42

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Projektleitung: Jürgen Blaser, BFH-HAFL

Projektteam: Jürgen Blaser, BFH-HAFL
Holger Czerwenka, Meteotest
Oliver Gardi, BFH-HAFL
Maren Kern, BFH-HAFL
Peter Kuhn, Stadtgrün Bern
Sophie Mack, BFH-HAFL
Fabienne Marti, RVR-CFC
Jan Remund, Meteotest
Armand Rudolf Von Rohr, RVR-CFC
Sabine Tschäppeler, Stadtgrün Bern
Martina Wiedemar, BFH-HAFL

Ein Projekt im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel, gefördert durch das Bundesamt für Umwelt BAFU. Für den Inhalt des Berichts sind allein die Autoren verantwortlich.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vorkommen in % der zwanzig häufigsten Baumarten in der Stadt Bern (Quelle Daten Stadtgrün Bern 2014). Laubbäume in blau, Nadelbäume in grün.	9
Abbildung 2 Städtische Umweltfaktoren die mit Trockenstress im Zusammenhang stehen und resultierende Auswirkungen für Stadtbäume (Roloff 2013).....	11
Abbildung 3 Abweichung der Jahrestemperatur in der Schweiz vom langjährigen Durchschnitt (Norm 1961–1990). Zu warme Jahrestemperaturen sind rot, zu kalte blau angegeben. Die schwarze Kurve zeigt den Temperaturverlauf gemittelt über 20 Jahre (MeteoSchweiz 2016).....	12
Abbildung 4 Verlauf der Temperatur und Niederschlagsanomalie vom Mittel 1981 bis 2010 (links) sowie der projizierten Änderungen 2060 für Schweizer Agglomerationen.	13
Abbildung 5 Die fünf Untersuchungsstandorte in und um Bern. Die fünf Standorte können drei Stadtklima-Klassen zugeordnet werden: Überbaut (Stadt: Bern-Bollwerk; Hallendach: Uni VonRoll) Park (Bremgartenfriedhof, Schosshaldefriedhof) und Umland (Bern-Zollikofen) (Remund 2016).....	18
Abbildung 6 Differenzen der Tagesgänge zwischen den Stadt-Standorten und dem Umland pro Monat und Stunde. Links: Innenstadt (Bollwerk); rechts: Stadtpark (Schosshalde) (Remund 2016).	23
Abbildung 7 Verlauf der mittleren Temperatur pro Dekade zwischen 1931 und 2100 für den Park-Standort Schosshalde. Daten ohne (ori) und mit (uhi) Korrektur des Stadteffekts. hist: Historische Periode 1931 – 2015; clm/regcm3/rca: trockene/mittlere/feuchte Variante der Klimaentwicklung (Remund 2016).....	24
Abbildung 8 Verlauf der Anzahl Tage mit ETa/ETp-Verhältnis unterhalb 0.6 pro Jahr (starke Trockenheit) zwischen 1931 und 2100 für den Standort Bollwerk. Daten ohne (ori) und mit (uhi) Korrektur des Stadteffekts. hist: Historische Periode 1931 – 2015; clm/regcm3/rca: trockene/mittlere/feuchte Variante der Klimaentwicklung. Der Verlauf der Kurve bei clm weist auf die erhöhte Variabilität hin (Remund 2016).	25
Abbildung 9 Der Einfluss des Standortes auf den Zustand der Bäume ist deutlich sichtbar: Gewöhnliche Rosskastanien in einem Berner Stadtpark, am zentral gelegenen Hirschengraben und im stark befahrenen Strassenraum mit Tramhaltestelle.....	25
Abbildung 10 Vergleich der Schadstufen an Park- und Strassenstandorten zwischen Kern (2014) oben und Haymoz (2015) unten.....	26
Abbildung 11 Untersuchung der Vitalität von 371 Bäumen in der Stadt Bern, anhand der Faktoren, Bodenversiegelung, Rückstrahlung/Überwärmung und Streusalz bei Laubbäumen (Neuner 2014)....	26
Abbildung 12 In oberirdischen Baumteilen gespeicherter Kohlenstoff: Biomassekarte der Stadt Bern, in einer Auflösung von 12.5 Metern. Die Karte basiert auf der Auswertung von LiDAR-Daten, mittels einem auf Bauminventuren im Berner Siedlungsgebiet kalibrierten Modell. Wie der Vergleich mit Aufnahmen des Landesforstinventars im Gemeindegebiet von Bern zeigt, erzielt das Modell auch genaue Schätzungen für das Waldareal ($R^2 = 0.92$)	28
Abbildung 13 Schematische Wachstumskurven verschiedener Baumarten. Die Fläche unter der Kurve entspricht der jeweiligen Kohlenstoffspeicherleistungen eines Baumes über seine gesamte Lebensdauer.	29
Abbildung 14 Bewertung der Klimafitness (Trockenheitstoleranz, Winterhärte, Stadtstresstoleranz); grün: Potentialbaumarten, grau: häufige Arten Berns, Ziffer: Vorkommen der Arten im Baumkataster Bern (Stadtgrün Bern 2014).	31
Abbildung 15 Klimaanalogien für Bern. Links: Das Klima in Bern 2045-2075 entspricht dem kontinentalen Klima von Kroatien/Bosnien-Herzegowina 1950-2000 (z.B. Zagreb).Rechts: Das Klima in Bern 2070-2100 entspricht in etwa dem Klima 1950-2000 in Norditalien (z.B. Mailand) blau: Szenario RCP3PD, orange: Szenario A1B/A2, rot: Szenario RCP3PD + A1B/A2.	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Abkürzung, Einheit und Beschreibung der untersuchten Messparameter (Remund 2016)..	18
Tabelle 2 Wertungskategorien des Klimafit-Stadtbaum-Index; für eine spezifische Baumart (Mack 2015).....	21
Tabelle 3 Mittlere Abweichungen der Stadt-Standorte gegenüber dem Umland (Bern/Zollikofen).). TT: Lufttemperatur 2 m über Grund, TD: Taupunkttemperatur, TMAX: Maximale Lufttemperatur, TMIN: Minimale Lufttemperatur (Remund 2016).	23
Tabelle 4 Wüchsigkeit und Lebensdauer häufiger Stadtbaumarten in Bern.....	30
Tabelle 5 Resultate aus dem Klimafit-Stadtbaum-Index (KSI) (Mack 2015).....	33

Glossar Baumarten

Deutscher Name	Lateinischer Name
Amerikanischer Amberbaum	<i>Liquidambar styraciflua</i>
Apfel	<i>Malus domestica</i>
Baum-Hasel	<i>Corylus colurna</i>
Berg-Ahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>
Blumen-Esche	<i>Fraxinus ornus</i>
Eibe	<i>Taxus baccata</i>
Gemeine Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>
Eschen-Ahorn	<i>Acer negundo</i>
Europäische Linde	<i>Tilia x europea</i>
Feld-Ahorn	<i>Acer campestre</i>
Fichte	<i>Picea abies</i>
Französischer Ahorn	<i>Acer monspessulanum</i>
Gewöhnliche Rosskastanie	<i>Aesculus hippocastanum</i>
Hainbuche	<i>Carpinus betulus</i>
Hängebirke	<i>Betula pendula</i>
Schwarzer Holunder	<i>Sambucus nigra</i>
Hopfen-Buche	<i>Ostrya carpinifolia</i>
Japanischer Schnurbaum	<i>Sophora japonica</i>
Kirschpflaume	<i>Prunus cerasifera</i>
Krim-Linde	<i>Tilia x euchlora</i>
Lärche	<i>Larix decidua</i>
Orientalische Hainbuche	<i>Carpinus orientalis</i>
Platane	<i>Platanus x hispanica</i>
Robinie	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Rot-Ahorn	<i>Acer rubrum</i>
Rot-Eiche	<i>Quercus rubra</i>
Schneeballblättriger Ahorn	<i>Acer opalus</i>
Schwarz-Föhre	<i>Pinus nigra</i>
Schwarz-Pappel	<i>Populus nigra</i>
Serbische Fichte	<i>Picea omorika</i>
Silber-Ahorn	<i>Acer saccharinum</i>
Silber-Linde	<i>Tilia tomentosa</i>
Sommer-Linde	<i>Tilia platyphyllos</i>
Spitz-Ahorn	<i>Acer platanoides</i>
Stiel-Eiche	<i>Quercus robur</i>
Tatarischer Steppen-Ahorn	<i>Acer tataricum</i>
Trauben-Eiche	<i>Quercus petraea</i>
Vogel-Kirsche	<i>Prunus avium</i>
Vogelbeere	<i>Sorbus aucuparia</i>
Wald-Föhre	<i>Pinus sylvestris</i>
Walnuss	<i>Juglans regia</i>
Weissdorn	<i>Crataegus sp.</i>
Winter-Linde	<i>Tilia cordata</i>
Zerr-Eiche	<i>Quercus cerris</i>
Zitter-Pappel	<i>Populus tremula</i>

1 Einleitung

1.1 Stadtbäume im Klimawandel

Die Möglichkeiten mit geeigneten Bewirtschaftungsmassnahmen unterstützend und zielgerichtet einzugreifen und so die Baumbestände und ihre Ökosystemdienstleistungen zu schützen, sind im städtischen Raum höher als in natürlichen Waldbeständen, wo die autonome Adaptation weit längere Zeiträume einnimmt. Im urbanen Raum bestehen zwischen verschiedenen Standorten extreme Kontraste. An einem Parkstandort mit guten Wachstumsbedingungen können Einzelbäume höhere Alter erreichen als in einem bewirtschafteten Wald. In der Stadt Bern beispielsweise erreichen Parkbäume durchschnittlich 100 Jahre, während Strassenbäume nur 50-60 Jahre alt werden

Baumbestände im urbanen Raum haben einen entscheidenden Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und erbringen wichtige Ökosystemdienstleistungen. Darunter sind beispielsweise ein für Menschen angenehmeres Mikroklima, die Reduktion von Schadstoffen, CO₂-Sequestration sowie die Aufnahme und Speicherung von Oberflächenwasser zu nennen. Bereits jetzt sind Bäume in städtischen Gebieten extremen Bedingungen ausgesetzt. Angesichts der schnellen klimatischen Änderungen und der zunehmenden Klimavariabilität ist anzunehmen, dass die Bäume im urbanen Kontext immer verletzbarer werden. Um mit geeigneten Bewirtschaftungsmassnahmen unterstützend und zielgerichtet eingreifen zu können, müssen Zusammenhänge zwischen klimatischer Veränderung und Baumvielfalt sowie die Bedeutung von Ökosystemdienstleistungen besser verstanden werden. Ziele und Adressaten des Projektes Das Projekt *Urban Green & Climate* wurde im Rahmen des *Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel* durchgeführt. Das Pilotprogramm hat zum Ziel, innovative und beispielhafte Projekte zur Anpassung an den Klimawandel in Kantonen, Regionen und Gemeinden anzustossen und mit Hilfe finanzieller Unterstützung des Bundes umzusetzen. Die Projekte leisten idealerweise einen lokalen Beitrag zur Verringerung der Klimarisiken und/oder zur Nutzung der Chancen, die durch den Klimawandel entstehen. Sie bewirken ausserdem eine Sensibilisierung der Betroffenen für die Anpassung an den Klimawandel und fördern die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren.

Mit dem Projekt *Urban Green & Climate – die Rolle und Bewirtschaftung von Bäumen in einer klimaangepassten Stadtentwicklung*, werden am Beispiel der Stadt Bern Wissenslücken bezüglich klimabedingter Vulnerabilität urbaner Baumbestände geschlossen und die Bedeutung der Ökosystemdienstleistungen von Bäumen – insbesondere deren Funktion als Kohlenstoffsenken – erforscht.

Die Besonderheiten des Stadtklimas werden durch die Erstellung von spezifischen Klimamodellen für den urbanen und ruralen Raum hervorgehoben und die Auswirkungen des Klimawandels aufgezeigt. Schliesslich werden Empfehlungen zur Erarbeitung von angemessenen Bepflanzungs- und Bewirtschaftungsstrategien für den urbanen Baumbestand in Städten angesichts des Klimawandels erarbeitet. Ziel des Projektes ist es zudem aufzuzeigen, mit welchen Herausforderungen die nachhaltige Bewirtschaftung von Bäumen in urbanen Gebieten im Zuge des Klimawandels konfrontiert ist.

Durch angewandte Forschung, das Entwickeln von Konzepten und Methoden, sowie durch Kommunikation und Transfer dieses Wissens im Bereich Vulnerabilität, Stabilität, Emissionsminderung und Finanzierung einer langfristigen Umsetzung der Resultate, werden Grundlagen für eine angemessene Bewirtschaftung geschaffen.

Die Studie richtet sich primär an die Ämter und Verwaltungsstellen, welche für die Bewirtschaftung der Grünflächen in der Stadt verantwortlich sind. Insbesondere Kapitel 4 und 5 sowie die Faktenblätter im Anhang helfen, eine Bepflanzungs- und Bewirtschaftungsstrategie unter Berücksichtigung der erwarteten Klimaänderung zu erarbeiten. Die Faktenblätter können schliesslich für die Kommunikation mit Gemeindevertretungen und Bevölkerung verwendet werden.

1.2 Projektablauf

Die BFH-HAFL war mit Mitarbeitern aus den *Forschungsgruppen Internationale Waldwissenschaften und Klimawandel* und *Wald und Gesellschaft* für die Gesamtkoordination des Projektes *Urban Green & Climate*

verantwortlich. Partner des Projektes waren Stadtgrün Bern (Fachstelle Natur und Ökologie sowie Baumkompetenzzentrum) und die Firmen Meteotest und RVR-CFC¹. Anfang 2014 fand eine erste Plenumsitzung mit den Projektpartnern statt, an welcher die geplanten Arbeiten vorgestellt wurden. Im April 2014 wurden im Rahmen des Projektes zwei temporäre Wetterstationen von Meteotest auf zwei Friedhöfen der Stadt Bern (Bremgartenfriedhof und Schosshaldenfriedhof) aufgestellt, welche bis April 2016 meteorologische Daten lieferten. Die verschiedenen Arbeitsschritte waren in insgesamt acht studentische Arbeiten aufgeteilt. Die studentischen Arbeiten wurden unter der Leitung der BFH-HAFL und gemeinsam mit den Projektpartnern durchgeführt. Um die verschiedenen Bachelor- und Masterarbeiten zu koordinieren und Überschneidungen zu vermeiden, fanden während der Projektdauer regelmässig BFH-HAFL interne Projektsitzungen mit den betreffenden Bachelor- und Masterstudierenden statt.

Anfang Juli 2014 wurde der Stand der Arbeiten im Rahmen eines Begleitgruppentreffens vor Projektpartnern sowie Experten aus BAFU und ARE vorgestellt und diskutiert. Ab Sommer 2015 wurden die Zwischenresultate in Form von Medienmitteilungen, einer wissenschaftlichen Publikation (Gardi et al. 2016) und Präsentationen an verschiedenen Sitzungen und Veranstaltungen kommuniziert. In bilateralen Treffen mit den jeweiligen Projektpartnern wurde jeweils der Stand der Arbeiten diskutiert und das weitere Vorgehen besprochen. Die studentischen Arbeiten begannen im Frühjahr 2014 und liefen teilweise parallel. In einem ersten Schritt wurden die massgebenden Baumarten erfasst und die klimatischen Ansprüche der häufigsten Baumarten Berns untersucht (Gouret 2014; Kern 2014). In einem zweiten Schritt wurde der Gesundheitszustand des Baumbestandes erhoben (Kern 2014; Neuner 2014; Haymoz 2015) und die Bedeutung von Ökosystemdienstleistungen von Bäumen im allgemeinen (Becker 2016) und spezifisch die Kohlenstoffspeicherung untersucht (Schaller 2014, Mack 2015). In einem weiteren Schritt wurden schliesslich mögliche Handlungsmassnahmen untersucht.

Am 8. Juni 2016 fand die Abschlussveranstaltung des Projektes in Bern statt, an welcher die Resultate des Projektes mit Teilnehmenden aus Forschung, Verwaltung und Praxis vorgestellt und diskutiert wurden. Teile dieser Diskussion wurden in das Unterkapitel „Ausblick“ aufgenommen. An einem gemeinsam mit Stadtgrün Bern organisierten Stadtspaziergang zum Thema „Stadtbäume im Klimawandel“ am gleichen Tag, wurden die Ergebnisse des Projektes schliesslich noch einem breiteren Publikum – den Teilnehmenden der internationalen Tagung „Anpassung an den Klimawandel in der Praxis“² - vorgestellt.

¹ Rudolf Von Rohr – Clean Forest Club (RVR-CFC)

² Resultate der Tagung unter: <http://www.naturwissenschaften.ch/organisations/proclim/77903-anpassung-an-den-klimawandel-in-der-praxis-wo-stehen-wir-heute-was-brauchen-wir-fuer-morgen->

2 Ausgangslage und Problemstellung

2.1 Baumstandort Stadt

2.1.1 Projektgebiet Stadt Bern

Bern ist mit rund 140'000 Einwohnern eine der grössten Städte in der Schweiz und ein wichtiges Wirtschaftszentrum im Schweizer Mittelland. Die Stadt liegt zwischen dem Hausberg Gurten im Süden und dem Bantiger im Osten an der Aare, auf durchschnittlich 540 Meter über Meer. Insgesamt bedeckt das Gemeindegebiet von Bern eine Fläche von fast 52 Quadratkilometern (Stadt Bern 2014). Die Innenstadt beschränkt sich mit 1.5% nur auf einen kleinen Teil der Stadt Bern, Parks und Industriegebiet haben beide einen Anteil um 5%, während Wohngebiete einen Viertel der Fläche in Anspruch nehmen. Die grosse Fläche des Restgebietes mit einem Anteil von über 62% zeigt, dass in der Stadt Bern ein grosser Anteil an landwirtschaftlicher Fläche und Wäldern - insbesondere im Westen der Stadt - anzutreffen ist.

Bäume und Gehölze auf öffentlichem Grund der Stadt Bern sind im städtischen Baumkataster registriert. Von den insgesamt 21'000 registrierten Bäumen und Gehölzen stehen rund 14'000 in Anlagen, 7'000 befinden sich in Alleen und im Strassenraum (Stadtgrün Bern 2014). Stadtgrün Bern kümmert sich um die Verwaltung sowie den Unterhalt der Bäume und Grünflächen auf öffentlichem Grund innerhalb der Stadt Bern. Vor allem Laubbäume prägen das öffentliche Stadtbild, wie eine Analyse des Baumkatasters zeigte (Abbildung 1). Von den insgesamt 21'328 Bäumen, die Stadtgrün Bern bewirtschaftet (Stadtgrün Bern 2014), sind 80% Laubbäume. Insgesamt herrscht eine Vielfalt von 77 Gattungen und 180 Spezies vor. Der

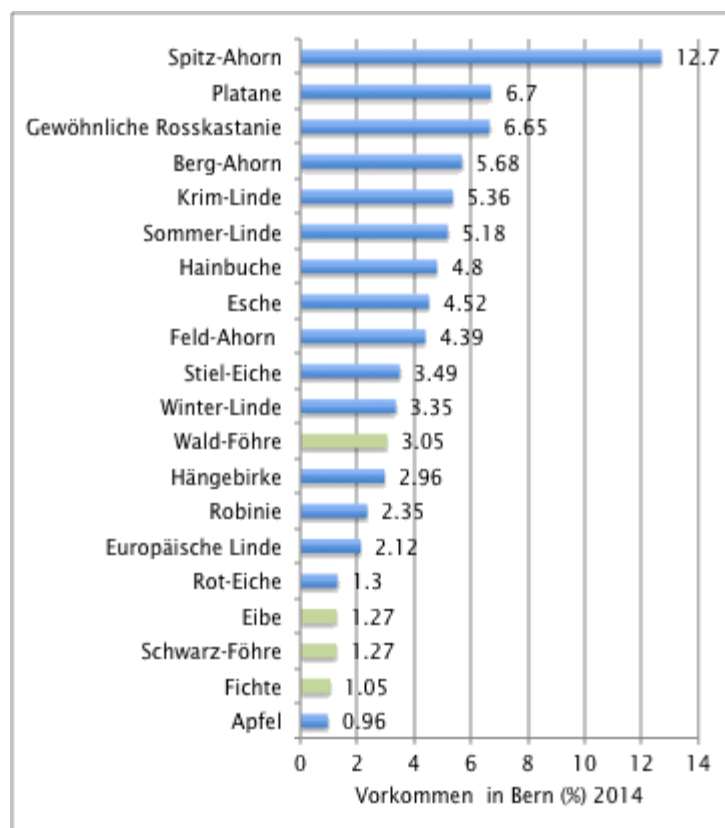


Abbildung 1 Vorkommen in % der zwanzig häufigsten Baumarten in der Stadt Bern (Quelle Daten Stadtgrün Bern 2014). Laubbäume in blau, Nadelbäume in grün.

städtische Baumbestand ist im Wesentlichen durch einheimische Arten (Ahornarten, Winter-Linde, Hängebirke etc.) geprägt. Die häufigste Stadtbaumart Berns ist der Spitz-Ahorn mit 12.7%. Nadelhölzer machen nur rund 11% der erfassten Baumarten aus. Von fremdländischen Baumarten sind insbesondere Gewöhnliche Rosskastanien und Platanen vertreten. Bereits im 18. Jahrhundert wurden vor allem in städtischen Parkanlagen fremdländische Baumarten angepflanzt (Schmidt 2014). In der Stadt Bern sind das neben der Platane auch Arten wie der Götterbaum, Gleditschie, Japanischer Schnurbaum oder die Silber-

Linde. Hervorzuheben ist, dass auch invasive Neophyten wie die Robinie unter den 20 häufigsten Arten vertreten sind. Als invasive Neophyten bezeichnet das Bundesamt für Umwelt BAFU (2015) Arten, die nach 1492 auf dem Europäischen Kontinent eingeführt wurden und ökologische, soziale sowie ökonomische Schäden verursachen können. Zusätzlich wird die Rot-Eiche mit mittlerem Invasionspotential eingestuft (Bachmann et al. 2009).

Neben den Bäumen auf öffentlichem Grund, sind in der Stadt Bern jedoch auch zahlreiche Bäume auf privatem Grund anzutreffen. Die Baumartenzusammensetzung der Gehölze auf privatem Grund unterscheidet sich stark von derjenigen auf öffentlichem Grund. Wie stichprobenartige Inventuren zeigten ist die häufigste Gehölzart auf privatem Grund der Baum-Hasel vor der Eibe anschliessend folgen Holunder, Hainbuche, Feld-Ahorn, und diverse Obstbäume (Neuner 2014). In Villen- und Reihenhaussiedlungen beispielsweise spielen unter anderem Nadelbäume, wie die serbische Fichte, Eibe und Schwarz-Föhre eine Rolle. Im Vergleich zu anderen europäischen Städten ist Bern eine sehr grüne Stadt. Mit ihren 15.5% Baumflächenanteil am Siedlungsgebiet übertrifft die Hauptstadt auch die übrigen Schweizer Städte, die mit durchschnittlich 7.9% baumbestockter Fläche fast nur „halb so grün“ wie Bern sind (Bundesamt für Statistik BFS 2013).

2.1.2 Klimatische Bedingungen in Bern

Das Klima des Grossraums Bern entspricht dem mitteleuropäischen, submontanen Typ mit einer durchschnittlichen monatlichen Niederschlagsmenge von etwa 85mm. Im ganzen Jahr ist mit Niederschlägen von etwa 1000 mm zu rechnen, wobei im Sommer deutlich mehr Niederschläge zu verzeichnen sind als im Winter. Die Jahresmitteltemperatur im Raum Bern beträgt circa 9°C. Der wärmste Monat ist der Juli mit einer Monatsmitteltemperatur von 18°C. In den Wintermonaten liegen die Tagesmitteltemperaturen um den Gefrierpunkt, wobei der Januar der kälteste Monat ist. An circa 92 Tagen muss mit Frost gerechnet werden. Im Vergleich zur Messperiode 1961-1990 sind die Temperaturen in der Periode 1990-2010 um 1°C angestiegen. Die Niederschlagsmenge blieb in dieser Zeit praktisch unverändert (MeteoSchweiz 2013). Durch die Topografie weist die Stadt Bern eine typische Beckenlage auf. Dies führt häufig zu Windstille und Inversionslagen, mit einer Temperaturumkehr in den tiefen Lagen der Stadt. Die Windverhältnisse sind durch die Beckenlage sehr komplex, im Grossraum der Stadt Bern herrschen aber Winde aus Nord-Nordost (Bise) und West-Südwest vor. Dass die Temperaturen an einem Tag nicht über den Gefrierpunkt klettern, kommt im langjährigen Mittel etwa 18 Mal pro Jahr vor. Mit durchschnittlich 1638 Sonnenstunden pro Jahr im Durchschnitt weist Bern im Vergleich zum Mittelland einen hohen Wert an Sonnenstunden auf.

Das Stadtklima zeichnet sich gegenüber den Verhältnissen auf unbebauten Flächen durch einige Besonderheiten auf. Durch die Bebauung kommt es zu einer Oberflächenvergrösserung, die zu erhöhter Einstrahlung tagsüber und verringerter Abstrahlung in der Nacht und damit zu einer höheren Durchschnittstemperatur führt (Helbig et al. 1999). Durch fehlende Vegetation und Veränderung der natürlichen Luftzusammensetzung in Form von Abgasen und Aerosolen wird der anthropogene Einfluss auf das Klima zusätzlich verstärkt. Schwache Winde zwischen den Gebäuden und die verminderte nächtliche Abstrahlung, vermögen die warme Luft weniger stark abzukühlen. Man spricht deshalb bei grösseren Städten oft auch von Wärmeinseln (MeteoSchweiz 2013).

Der Wärmeinseleffekt ist laut Mathys (1976) in Bern recht ausgeprägt vorhanden. Im Jahresdurchschnitt sind die Temperaturen während knapp der Hälfte der Zeit höher als in der umliegenden Landschaft auf gleicher Höhenlage. Im Winter ist dieser Gegensatz zeitlich viel ausgedehnter als im Sommer und am späten Abend und in der Nacht am deutlichsten. Auch die räumliche Ausdehnung des Wärmefeldes ist jahres- und tageszeitlichen Schwankungen unterworfen. Bei Bisenlagen driftet die Wärmeinsel der Stadt gegen Südwesten ab, sie existiert aber selbst bei sehr starken, anhaltenden Winden. Grössere Gebäude beeinflussen zudem die Windverhältnisse zusätzlich und können eine deutliche Abweichung vom Windregime der Umgebung bewirken (MeteoSchweiz 2013). In den Abendstunden kann der Unterschied zwischen den wärmsten Zonen der Stadt und der umliegenden Landschaft bis zu mehreren Grad Celsius betragen. Faktenblatt I im Anhang geht explizit auf die Besonderheiten des Stadtklimas und des Wärmeinseleffektes ein. Resultate der Untersuchungen des Stadtklimas in Bern im Rahmen des Projektes sind im Kapitel 4.3 aufgeführt.

2.1.3 Stressoren für Stadtbäume

Stadtbäume sind seit jeher einer Vielzahl von vitalitätshemmenden Stressfaktoren ausgesetzt. Sie leben in einem künstlichen Umfeld, in dem das Wurzelwachstum durch räumlich begrenzte Baumgruben eingeschränkt wird und Bodenverdichtung sowie Bodenversiegelung die Wasserversorgung und den Gasaustausch erschweren oder blockieren. Zwischen Häuserfassaden, Verkehrsraum und Fahrleitungen kann sich eine Baumkrone nur selten voll entwickeln. Ähnliches gilt für Wurzeln, die eingeeignet zwischen Kellerwänden, Leitungen und versiegelten Böden und in viel zu kleinen Baumscheiben wachsen müssen. Ausserdem werden die Bäume durch Verdichtung des Bodens, Bautätigkeiten, Streusalz, Vandalismus, Hunde-Urin, Bodenvibrationen und Unfallschäden zusätzlich gestresst. Hinzu kommen hohe Temperaturen in den Sommermonaten welche durch nächtliche Abstrahlung von Wärme aus der bebauten Umwelt verstärkt werden. Infolge zeigen Stadtbäume häufig Symptome von Trockenstress und ungenügender Nährstoffaufnahme. Aufgrund der Belastungsfaktoren (Abbildung 2) liegt die Lebenserwartung von Stadtbäumen gemäss Roloff (2013) bei nur 50% der potenziellen Altersspanne. Strassenbäumen erreichen hingegen nur 25% der Lebenserwartung in natürlichem Umfeld.

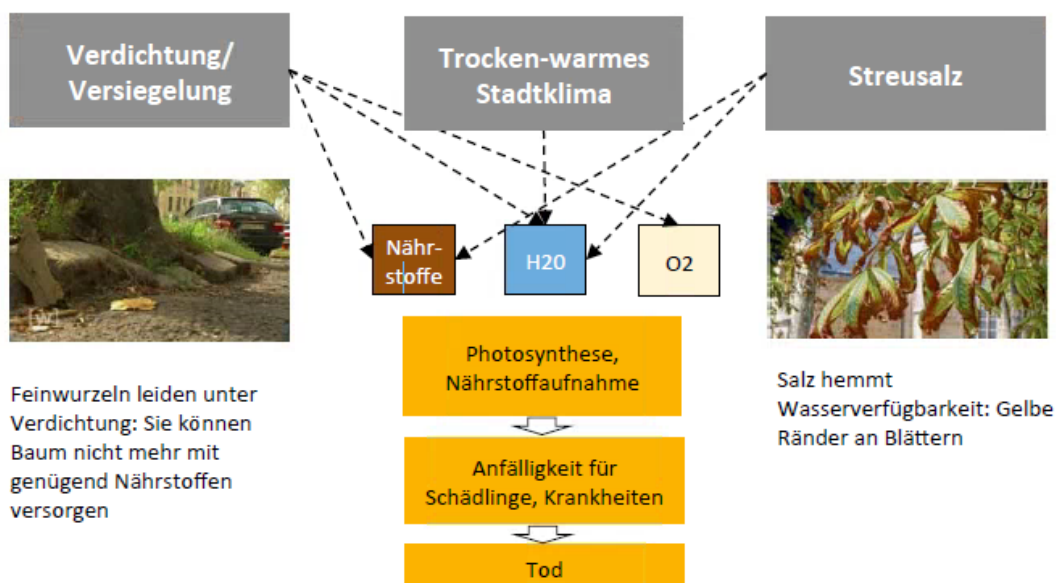


Abbildung 2 Städtische Umweltfaktoren die mit Trockenstress im Zusammenhang stehen und resultierende Auswirkungen für Stadtbäume (Roloff 2013).

Bäume in der Stadt brauchen dadurch wesentlich mehr Schutz und Pflege als Bäume, die in ihrer natürlichen Umgebung aufwachsen. Trotz aller Anstrengungen muss Stadtgrün Bern immer wieder kranke Stadtbäume fällen und sie durch junge Exemplare ersetzen. Im Durchschnitt werden gemäss Kuhn von Stadtgrün Bern jedes Jahr rund 200 widerstandsfähige Jungbäume angepflanzt. Pro Fällperiode (Herbst - Frühling) werden in Bern um die 200 Bäume gefällt. Hauptgründe für das Entfernen von Bäumen sind abgestorbene Bäume, abgestorbene Kronen, Bruchgefahr von Stämmen und grosse Ästen, Standsicherheit oder Schäden jeglicher Art (z.B. durch Unwetterereignisse, Verkehrsunfälle, Baustellen, Vandalismus). Grundsätzlich gilt für die Verwendung von Bäumen in der Stadt und insbesondere im Strassenraum; je anspruchsloser die Baumarten in Bezug auf Boden, Nährstoffe und Klima, desto besser eignen sie sich.

2.2 Klimawandel und Städte

2.2.1 Beobachtete Klimaveränderung in der Schweiz

Im 20. Jahrhundert hat die durchschnittliche globale Temperatur um rund 0.6°C zugenommen. In der Schweiz, wie in anderen kontinentalen Gebieten war die Erwärmung jedoch stärker als im globalen Mittel. Seit 1960 zeigt sich ein deutlicher Temperaturanstieg über alle Jahreszeiten und Regionen der Schweiz hinweg (Abbildung 3). In der Westschweiz betrug der Temperaturanstieg gemäss OcCC (2007) ungefähr 1.6°C in der Deutschschweiz um die 1.3°C und auf der Alpensüdseite 1.0°C . Auf der Alpennordseite hat die Häufigkeit abnormaler warmer Monate, welche über dem langjährigen Durchschnitt liegen um circa 70% zugenommen. Gleichzeitig kam es zu einer Abnahme der Frosttage. Auch das Niederschlagsregime hat sich verändert. Die Jahresniederschläge haben im 20. Jahrhundert um rund 8% zugenommen. Dieser Trend ist jedoch gemäss MeteoSchweiz (2014) nicht signifikant.

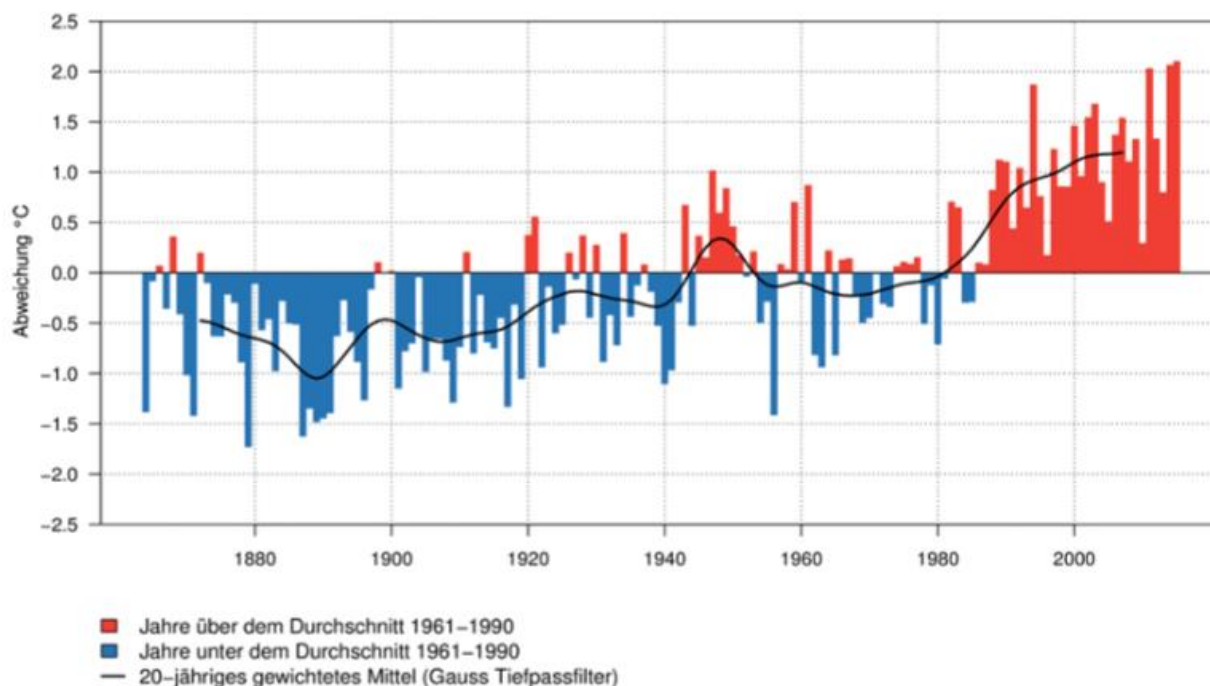


Abbildung 3 Abweichung der Jahrestemperatur in der Schweiz vom langjährigen Durchschnitt (Norm 1961–1990). Zu warme Jahrestemperaturen sind rot, zu kalte blau angegeben. Die schwarze Kurve zeigt den Temperaturverlauf gemittelt über 20 Jahre (MeteoSchweiz 2016).

Auch intensive Tagesniederschläge und langandauernde Niederschläge von 2-5 Tagen Dauer haben im Herbst und Winter in weiten Teilen des Mittellandes und des nördlichen Alpenrandes zugenommen. Durch die Erwärmung hat auch die Verdunstung zugenommen. Der Abfluss im Jahresmittel ist praktisch unverändert geblieben (OcCC 2007). Gegenüber der Messperiode von 1961–1990 sind die Durchschnittstemperaturen von 1981 - 2010 in Bern um etwa 1°C angestiegen, was auf die globale Klimaerwärmung zurückzuführen ist.

2.2.2 Klimaszenarien und erwartete Klimaveränderung in der Schweiz

Globale Klimaszenarien gehen davon aus, dass sich die Erwärmung in den nächsten Jahren mit grosser Wahrscheinlichkeit fortsetzen wird (IPCC 2014). Je nach Emissionsszenarien könnten die mittleren Temperaturerhöhungen in der Schweiz zwischen $0.5 - 3.6^{\circ}\text{C}$ für die Periode 2045-2074 gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 betragen. Die Niederschlagsänderungen sind noch nicht genau abzusehen, werden aber wohl eher gering ausfallen. Die Sommerniederschläge im Juni, Juli und August werden jedoch sehr wahrscheinlich abnehmen. MeteoSchweiz (2013) prognostiziert für das Sommer-Quartal verglichen mit den Referenzjahren 1981-2010 eine Reduktion von 20% in der Westschweiz und von 5-10% in den östlichen Regionen. Sommerliche Trockenperioden werden länger andauern und öfters auftreten. Gemäss MeteoSchweiz (2015) werden Hitzewellen in den Sommermonaten mit „hoher Wahrscheinlichkeit“ zunehmen; Kältewellen genauso wie starke Schneefälle im Flachland dürften hingegen zurückgehen.

Aufgrund der höheren Temperaturen wird sich auch die Vegetationsperiode verlängern. Beginnt die Vegetationsperiode im Mittelland heute im März und endet im Oktober, wird sie sich 2060 von Februar bis November erstrecken (MeteoSchweiz 2013). Problematisch wird diese Tatsache für Flora und Fauna durch den früheren Beginn der Vegetationsperiode. Denn Spätfröste können weiterhin auftreten und die Organismen schädigen (Gu et al. 2008b; Krehan, Steyrer 2008).

2.2.3 Erwartete Klimaveränderung in Schweizer Städten

In den grossen Agglomerationen der Schweiz, ist gemäss MeteoSchweiz (2013) mit dem A1B Szenario³ (gelber Balken in Abbildung 4) ein Temperaturanstieg um 1.2 bis 3°C bis 2060 wahrscheinlich. Die Erwärmung im Sommer dürfte dabei deutlich stärker ausfallen als im Frühling, Herbst und Winter. Die Niederschlagsänderungen sind – genauso wie in der Gesamtschweiz - ziemlich unsicher und werden als eher gering eingeschätzt. Dennoch ist für die Sommermonate mit einem deutlichen Niederschlagsrückgang zu rechnen. Für die Wintermonate sind keine eindeutigen Signale vorhanden.

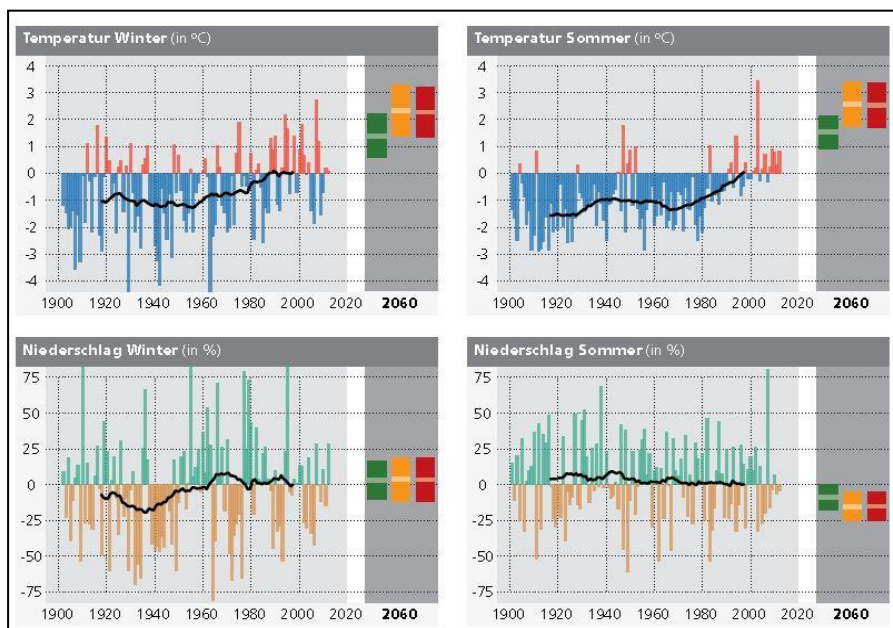


Abbildung 4 Verlauf der Temperatur und Niederschlagsanomalie vom Mittel 1981 bis 2010 (links) sowie der projizierten Änderungen 2060 für Schweizer Agglomerationen. Dicke Linie: 30-jähriges laufendes Mittel, farbige Säulen: Jahreswerte. Für 2060 werden jeweils die Bandbreiten der möglichen Änderungen sowie die mittlere Schätzung (heller Balken) gezeigt sowie die verschiedenen Szenarien (rot: A2; gelb: A1B; grün: RCP3PD) (MeteoSchweiz 2013).

Die Länge der Vegetationsperiode wird in Bern je nach Szenario eine Verlängerung von zwischen 20 bis 40 Tagen erfahren. Dies hätte zur Folge, dass die Vegetationsperiode im Februar beginnen und bis November dauern könnte. Je nach Szenario ist für Bern mit einer Abnahme von 25 bis knapp 40 Frosttagen bis 2060 zu rechnen (MeteoSchweiz 2013). Hitzewellen und warme Extreme werden gemäss CH2011 (2011) mit hoher bis sehr hoher Wahrscheinlichkeit stark zunehmen – Kältewellen und kalte Extreme mit hoher Wahrscheinlichkeit abnehmen – Starkniederschläge eher zunehmen, starke Schneefälle in tiefen Lagen eher abnehmen – Trockenperioden dürften vor allem im Sommer zunehmen, in den anderen Jahreszeiten gibt es kaum Hinweise auf grössere Veränderungen. Bezüglich Naturgefahren sind Teile von Bern entlang der Aare leicht bis stark hochwassergefährdet.

Die schweizweite Erhöhung der Lufttemperatur in den Sommermonaten Juni, Juli und August wird durch den Wärmeinseleffekt in den meisten Schweizer Agglomerationen zu einer mittleren Lufttemperatur von 21°C führen. Damit bewegt sich der Wert auf dem Niveau des Hitzesommers 2003 (im Mittelland ausserhalb der Städte). Die durchschnittlichen Temperaturen im Winter 2060 werden dagegen in allen Schweizer

³ Das A1B Szenario geht von einer Zunahme der Treibhausgasemissionen bis 2050 und dann mit einer leichten Abnahme der weltweiten Emissionen aus. Szenario A2 rechnet mit einer stetigen Zunahme der Treibhausgasemissionen. Im Szenario RCP3PD werden die globalen Emissionen bis 2050 um die Hälfte gesenkt und die globale Erwärmung kann auf 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau beschränkt werden (MeteoSchweiz 2013).

Städten mehrere Grad über dem Gefrierpunkt liegen. Über das gesamte Jahr erhöht sich die Temperatur in Schweizer Städten gemäss MeteoSchweiz (2013) „wahrscheinlich“ um 1.2 - 3°C (A1B Szenario, Referenzperiode 1981-2010).

2.3 Ökosystemdienstleistungen des Baumbestandes

2.3.1 Einfluss des Baumbestandes aufs Stadtklima

Die Vegetation übt eine grosse Wirkung auf das Stadtklima aus. So weisen beispielsweise innerstädtische Parkanlagen deutlich geringere Staubbelastungen auf als bebaute Gebiete (Matzarakis und Streiling 2004). Freiflächen reduzieren auch die Schadstoffbelastung in der Stadt. Insbesondere am Stadtrand und Grünzüge können die Zuführung von Frisch- und Kaltluft aus der Umgebung sowie den Luftaustausch verbessern. Flächen mit einem hohen Anteil an Vegetation und einem geringen Versiegelungsgrad sind gute Kaltluftproduzenten.

Die unterschiedlichen, mehrheitlich positiven Effekte der Bäume wurden in einer Vielzahl von Studien aufgezeigt. Durch Transpiration und Beschattung senken Bäume die Lufttemperatur. Dies ist insbesondere an heissen Tagen als positiv zu bewerten (Bruse 2003). Da Bäume bis zu 500 Liter Wasser pro Tag verdunsten können, haben sie einen Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit. Durch ihre Struktur und Form erhöhen Stadtbäume die Rauigkeit der Oberfläche und verringern die Windgeschwindigkeit (Matzarakis 2008). Kleine, isoliert liegende Grünflächen - wie beispielweise begrünte Innenhöfe - sind laut Ehmayer (2011) „Klimaoasen“ im dicht bebauten Stadtgebiet (siehe auch Oliveira et al. 2011). Sie zeigen jedoch keine über die Fläche hinausreichende, klimarelevante Wirkung. Dazu braucht es laut Ehmayer (2011) eine ausreichende Flächengrösse und eine qualitativ hochwertige Gestaltung (im ökologischen Sinne), um eine klimaregulierende Funktion der Grünflächen in der Stadt zu gewährleisten. Falls keine ausreichend grosse Fläche (über 50ha) vorhanden ist, können kleinere Grünflächen geschaffen, stadträumlich sinnvoll angeordnet und eine enge Vernetzung angestrebt werden, um eine Reduzierung des Wärmeinseleffekts erreichen zu können.

2.3.2 Alternative Finanzierungsmittel

Vor dem Hintergrund heutiger Herausforderungen durch den Klimawandel, gewinnen die vielfältigen Funktionen von Bäumen immer mehr an Bedeutung. Besonders die CO₂-Aufnahme und die Schadstofffilterung stellen im Kontext des Klimawandels und der Luftverschmutzung zwei wesentliche Leistungen dar. Obwohl Bäume die Lebensqualität massgeblich mitbestimmen, werden deren Ökosystemdienstleistungen gemäss einer Studie der ZHAW (2010) noch nicht genügend gewürdigt und nur unzureichend finanziert. Die monetäre Wertermittlung von Ökosystemdienstleistungen stellt eine mögliche Strategie dar, diesem Umstand entgegenzuwirken. Mit der ökonomischen Argumentationsbasis lassen sich politische und wirtschaftliche Entwicklungen beeinflussen und nachhaltige Planungskonzepte lancieren und festigen (Wälchli 2012). Als mögliche Methode gilt das vom USDA Forest Service entwickelte Computerprogramm i-Tree, das die Funktionen und Leistungen von urbanen Gehölzen beziffert und einen monetären Wert daraus ableitet. Durch die Zuschreibung eines monetären Werts könnten leichter Sponsoren für Grünflächen und Baumpatenschaften gefunden werden. Für „klimafitte Baumarten“ könnten „Klima-Baumpatenschaften“ verkauft werden. In San Francisco beispielsweise finanziert die Verkaufssteuer „Proposition K Sales Tax“ nicht nur die „graue“ Infrastruktur von Strassen und Ampeln, sondern auch die grüne Struktur der Stadt (Swae 2014).

2.4 Baumarten im Klimawandel

2.4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf den Baumbestand

Infolge der klimatischen Veränderungen ist anzunehmen, dass Bäume im urbanen Umfeld immer verletzbarer werden (Neuwirth 2015). Die Wasserverfügbarkeit und damit verbunden die Trockenstress-Toleranz ist gemäss Roloff (2013) unter dem Aspekt des Klimawandels von grossem Interesse, wenn neue Baumarten, Ökotypen oder Sorten hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bei sich änderndem Klima bewertet werden sollen. Angesichts des Klimawandels handle es sich bei der Trockenstress-Toleranz um den entscheidenden Faktor für die Verwendbarkeit von Baumarten in der Stadt.

Obwohl die Winterwitterung immer milder wird, sind Frostschäden zum Winterende bzw. Frühlingsbeginn zu befürchten. Denn dann reichen bereits Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt aus, um

Frostschäden zu verursachen (Krehan, Steyrer 2007; Körner et al. 2016; Lenz et al. 2013). Studien zeigen, dass mit dem zeitigen Beenden der Winterruhe Bäume frühzeitig ihre Frosthärte verlieren (Gu et al. 2008a). Die verlängerte Vegetationsperiode und das gleichzeitige Auftreten von klimawandelbedingten Extremereignissen, wie plötzliches Eintreten von Kaltluft- auf Warmluftwetterlagen, können zu Spätfrostschäden führen (ebd.). Eine einzige Frostnacht kann verheerende Folgen für die Vegetation haben (OcCC 2007).

Zunehmende Extremereignisse wie beispielsweise Stürme nach langen Trockenperioden bringen erhebliche Schäden durch Baumbrüche mit sich. Obwohl bei böigen Stürmen der ganze Baumbestand bruchgefährdet ist (solitäre Bäume genauso wie Baumgruppen), gibt es besonders bruchgefährdete Arten und Sorten, wie beispielsweise die Pappel (Ehmayer 2011). Nadelbäume sowie ausserordentlich grosse Bäume und Züchtungen, etwa mit ausladenden Kronenformen sind allgemein für Windbrüche prädestiniert (Drlik 2010). Stadtgrün Bern führt regelmässige Baumkontrollen zur Vorbeugung von Schäden und aus Sicherheitsmassnahmen durch.

Neben dem direkten Einfluss auf die Baumarten, hat der Klimawandel aber auch einen Einfluss auf die an ihnen vorkommenden Schadorganismen und Krankheiten (Kehr, Rust 2007). Das Ausbleiben von längeren Winterfrösten sowie die generell höheren Temperaturen begünstigen die Vermehrung von Schädlingspopulationen (z.B. Kastanienminiermotte, Eichenprozessionsspinner, Platanen-Netzwanze und Massaria) und ermöglichen eingeschleppten Schädlingsarten die Etablierung (Roloff 2013). Durch zunehmende extreme Witterungsverhältnisse wie Trockenperioden oder Stürme kann zudem die Vitalität der Bäume deutlich abnehmen und die Anfälligkeit auf Schadorganismen zunehmen (Petercord et al. 2009). Besonders bei Befall von durch Hitze- und Trockenstress geschwächtem Gehölze, können beträchtliche Schäden entstehen (Ehmayer 2011). Als besonders empfindlich und anfällig auf Schädlingsbefall und Krankheiten gelten laut Drlik (2010) Linden, Platanen, Kastanien (durch Kastanienminiermotten), Ahorne sowie Ulmen.

Durch die wärmeren Temperaturen können sich schliesslich auch neue Gehölzarten nördlich der Alpen etablieren und zur Konkurrenz von heimischen Arten werden. Die Ausbreitung von Neophyten und ihre Auswirkungen auf Natur und Landschaft stehen gerade vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung zunehmend im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Als Folgen einer dominanten Ausbreitung und möglichen Invasivität werden ein Rückgang der natürlichen Artenvielfalt, eine mögliche Reduktion gefährdeter Lebensgemeinschaften durch Flächenverluste sowie verschlechterte Lebensbedingungen für spezialisierte Arten und artenreiche Lebensgemeinschaften befürchtet. Aktuelle Entwicklungen zu invasiven Neophyten in der Schweiz werden im nationalen Daten- und Informationszentrum der Schweizer Flora (info flora) aufgeführt.⁴

⁴ <https://www.infoflora.ch/de/flora/neophyten>

2.4.2 Forschung in anderen Städten

In diesem Kapitel ist eine Auswahl an Projekten zu einer klimaangepassten Stadtentwicklung der Baumartenwahl und Versuchspflanzungen in anderen Städten aufgelistet (Siehe auch Faktenblätter im Anhang).

Klimaangepasste Stadtentwicklung

- Auf der *European Climate Adaptation Platform*⁵ geben digitale Karten eine Übersicht über die Vulnerabilität verschiedener grosser europäischer Städte angesichts des Klimawandels. Die Karten sind zu unterschiedlichen Themen, unter anderem auch zu Hitzeinseln verfügbar.
- Das Online Beratungswerkzeug *Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS)*⁶ des Deutschen Wetterdienstes bietet der Stadtplanung Entscheidungshilfen, um Klima-Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren, zu bewerten und in der Planung umzusetzen.
- Im Rahmen des *Modellvorhabens der Raumordnung (MORO) Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel*⁷ wurden im Zeitraum von 2009 – 2014 in acht Modellregionen Deutschlands regionale Klimaanpassungsstrategien erarbeitet. Die Ergebnisse werden nun weiter verbreitet, wobei Regionen bei ihren Aktivitäten zur Klimaanpassung unterstützt und ein Wissens- und Erfahrungsaustausch initiiert wird.
- In Berlin widmet sich der *Stadtentwicklungsplan Klima*⁸ den räumlichen und stadtplanerischen Aspekten des Klimas. Er rückt dabei die Anpassung an den Klimawandel in den Mittelpunkt. Anstrengungen im Klimaschutz sind ausserdem im Programm. Die Inhalte werden laufend durch weitere Planungen, Diskurs- und Vertiefungsprozesse aktualisiert, räumlich und sachlich konkretisiert und umgesetzt.
- Das Projekt *GRaBS – Green and Blue Space Adaptation for Urban Areas and Eco Towns*⁹ untersucht Möglichkeiten der Anpassung der „grünen Infrastruktur“ in Ballungszentren. Eine Datenbank mit Fallstudien zu Anpassungsmaßnahmen, ein Internet-Tool zur Bewertung der klimabedingten Risiken und Leitfäden sind verfügbar.
- Zwischen 2011 und 2013 wurde im Rahmen des Projektes *Grün, natürlich, gesund: Die Potenziale multifunktionaler städtischer Räume*¹⁰ Synergien und Konflikte zwischen Naturschutz und Gesundheitsvorsorge betreffend Qualität und Quantität städtischer Grünflächen untersucht.
- Das Projekt *Klimapark München*¹¹ sucht nach Gestaltungsansätzen, wie eine städtische Grünfläche sowohl als Ökosystem als auch als nutzbare Freifläche im öffentlichen Raum funktionieren kann. Der Bau des Klimaparks hat im März 2016 begonnen.
- In der Stadt Wien wurde eine *Checkliste nachhaltiger öffentlicher Raum*¹² erstellt, mit welcher den negativen Folgen urbaner Wärmeinseln entgegengewirkt werden soll.
- Das Projekt *Stadtbäume im Klimawandel SiK*¹³ der Universität Hamburg und der HafenCity entwickelt ein integrierendes Konzept zur Anpassung des Hamburger Baumbestandes an den Klimawandel. Zunächst wird die Verwundbarkeit der Bäume durch Klimaveränderungen langfristig beobachtet und dokumentiert. Anschliessend sollen Massnahmen und Instrumente entwickelt werden, um den Baumbestand in Zeiten des Klimawandels zu erhalten und weiterzuentwickeln.
- In der Schweiz untersuchte das *Projekt Klimaanalyse Stadt Zürich KLAZ*¹⁴ die Faktoren, welche das Stadtklima beeinflussen und leitete Handlungsfelder und -möglichkeiten ab, welche für die baulichen Weiterentwicklung der Stadt zu beachten sind. Die im Rahmen der KLAZ gewonnenen Erkenntnisse liefern einen Orientierungsrahmen für den Einbezug stadtklimatischer Aspekte in planerische, gestalterische und bauliche Entscheide. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zum Thema Anpassung an den Klimawandel und im Anschluss an das Projekt KLAZ untersuchte eine Fallstudie von Ernst Basler + Partner und dem Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt Zürich. Ziel der Fallstudie war eine Auslegeordnung über mögliche Folgen des Klimawandels für die Stadt Zürich zu erstellen. Dabei wurden für verschiedene Bereiche unter anderem auch „Freiräume und Grünflächen“. Die Fallstudie

⁵ <http://climate-adapt.eea.europa.eu/tools/urban-adaptation/introduction>

⁶ http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/inkas/inkas_node.html

⁷ <http://www.klimamoro.de/index.php?id=2>

⁸ <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/de/klima/>

⁹ <http://www.grabs-eu.org>

¹⁰ <https://www.bfn.de/12834.html>

¹¹ <http://lao.wzw.tum.de/index.php?id=224>

¹² <http://klimawandelanpassung.at/index.php?id=26977>

¹³ <http://www.hamburg.de/stadtbaeume-im-klimawandel/>

¹⁴ <https://www.stadt-zuerich.ch/klaz>

beschreibt möglichen kurz-, mittel- und langfristigen Handlungsbedarf für die Stadt Zürich. Dies dient dem UGZ als Grundlage, um das weitere Vorgehen betreffend der Anpassung an den Klimawandel zu diskutieren.¹⁵

- Zwischen 2009 und 2014 wurde im ExWoSt-Forschungsfeld "Urbane Strategien zum Klimawandel" in insgesamt neun Modellstädten in Deutschland untersucht. Einer der Forschungsschwerpunkte behandelte Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel.¹⁶
- Das Projekt *ACCLIMATASION - Eine klimaangepasste Stadtentwicklung für Sitten*¹⁷ realisierte im Rahmen des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel auf öffentlichen und privaten Grundstücken in der Stadt Sitten Pilotmassnahmen, die dem Wärmeinsel-Effekt entgegenwirken und das Risiko von Überschwemmungen reduzieren. Die Resultate werden im Sommer 2016 verfügbar sein.

Baumartenwahl und Versuchspflanzungen:

- Die *Strassenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK)* zielt darauf ab, praktische Erfahrungen, sowie neue wissenschaftliche Daten über Wachstum, Resistenz, Grösse und Verwendbarkeit von Stadtbäumen zusammenzutragen. Dabei sollen die sich ändernden Rahmenbedingungen durch den Klimawandel und deren Folgen berücksichtigt werden.
- Die Stadt Zürich hat unter Berücksichtigung der speziellen Verhältnisse in der Stadt Zürich auf Basis der GALK-Strassenbaumliste entsprechende *Strassenbaumlisten*¹⁸ zu „Empfohlenen Baumarten“ und „Nicht empfohlenen Baumarten“ zusammengestellt.
- Die Datenbank *Citree*¹⁹ der Technischen Universität Dresden zeigt mögliche Bäume und Sträucher für städtische Standorte auf. Dabei kann der gewünschte Standort charakterisiert werden und zusätzliche Anforderungen (beispielsweise zum Erscheinungsbild oder dem Gefahrenpotential) gewählt werden.
- In Grossbritannien bietet eine ähnliche Datenbank *The Right Trees for Changing Climate*²⁰ Stadtplanern, Landschaftsarchitekten und anderen Praktikern Entscheidungshilfen bei der Baumartenwahl in urbanen Gebieten.
- Die Projekte *Stadtgrün 2021* und *Klimawandel und Baumsortimente der Zukunft*²¹ führen systematische Versuchspflanzungen von Potentialarten und -sorten hinsichtlich ihrer Klimatoleranz (z.B. Trockenstresstoleranz, (Spät-) Frosthärte etc.) bzw. Anfälligkeit gegenüber Krankheiten (Krankheits- und Schädlingsanfälligkeit) an verschiedenen Standorten in Deutschland durch (Böll et al. 2014).

¹⁵ <http://www.ebp.ch/forschung-entwicklung/projekte/fallstudie-stadt-zuerich-zur-anpassung-an-den-klimawandel.html>

¹⁶ http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ExWoSt/Forschungsfelder/2010/UrbaneStrategienKlimawandel/01_Start1.html

¹⁷ <http://www.sion.ch/particuliers/environnement-construction/architecture-batiments/acclimatasion.xhtml>

¹⁸ https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/angebote_u_beratung/beratung/strassenbaeume.html

¹⁹ <http://citree.ddns.net/index.php>

²⁰ <http://www.rightrightrees4cc.org.uk/default.aspx>

²¹ <http://www.lksh.de/gartenbau/baumschulversuche/klimawandel-und-gehoelzsortimente-der-zukunft/>

3 Methodik

Dieses Kapitel soll aufzeigen, welche Methoden zur Bearbeitung der Arbeitsschritte Messkampagne und Berechnung von Klimadaten (3.1), Erhebung des Gesundheitszustandes des Baumbestandes und Korrelation mit Klima (3.2), Untersuchungen der Ökosystemdienstleistungen (3.3) und Erfassung der massgeblichen Baumarten und Identifikation der klimatischen Ansprüche (3.4) angewendet wurden.

3.1 Urbanes Klima

Um den Einfluss von Bäumen und Grünanlagen auf das urbane Klima der Stadt Bern zu untersuchen, wurden im Rahmen des Projekts von Meteotest zwischen April 2014 und April 2016 zwei temporäre Wetterstationen an den Parkstandorten Schosshaldenfriedhof und Bremgartenfriedhof betrieben. Beide Standorte sind als städtische Grünflächen zu klassifizieren d.h. sie liegen im Stadtgebiet und haben einen Anteil begrünter und mit Bäumen durchsetzten Oberflächen. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten wurden die Wetterstationen strassennah und an besonderer Lage aufgestellt. Als

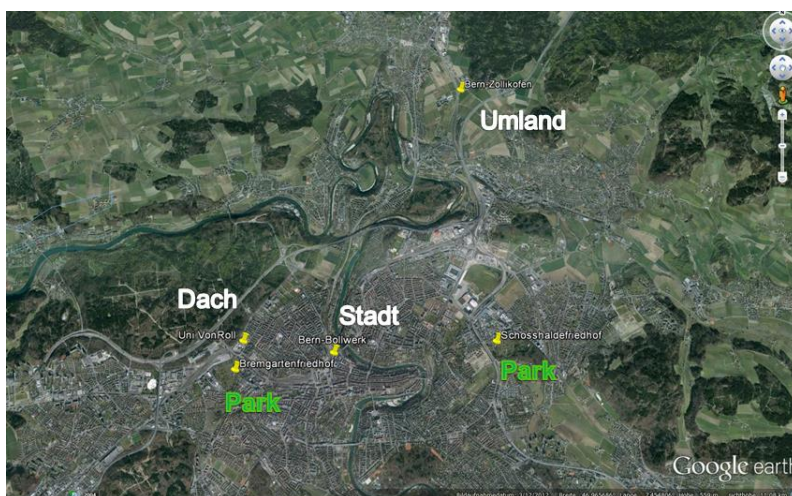


Abbildung 5 Die fünf Untersuchungsstandorte in und um Bern. Die fünf Standorte können drei Stadtklima-Klassen zugeordnet werden: Überbaut (Stadt: Bern-Bollwerk; Hallendach: Uni VonRoll) Park (Bremgartenfriedhof, Schosshaldenfriedhof) und Umland (Bern-Zollikofen) (Remund 2016).

Vergleichsdaten wurden Wetterdaten von Bern-Zollikofen (Swissmetnet, MeteoSchweiz) einen ländlichen Referenzstandort, sowie Bern-Bollwerk (NABEL-Station vom BAFU) und von der Dachstation der Universität VonRoll (Fabrikstrasse, Meteotest) als innerstädtische Referenzstandorte analysiert (Abbildung 5). Die mit den temporären Messstationen erfassten und abgeleiteten Parameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1 Abkürzung, Einheit und Beschreibung der untersuchten Messparameter (Remund 2016)

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
TT	[°C]	Lufttemperatur 2 m über Grund
TMIN	[°C]	Minimale Lufttemperatur (pro Tag)
TMAX	[°C]	Maximale Lufttemperatur (pro Tag)
DT	[°C]	Differenz maximale- minimale Lufttemperatur
TD	[°C]	Taupunkttemperatur
HI	[°C]	Hitzeindex ²²
TS	[°C]	Feuchtkugel-Temperatur ²³

²² Der Hitzeindex ist eine in Einheiten der Temperatur angegebene Grösse zur Beschreibung der gefühlten Temperatur auf Basis der gemessenen Lufttemperatur sowie vor allem der relativen Luftfeuchtigkeit.

²³ Die Kühlgrenztemperatur, gemessen als Feuchtkugeltemperatur, ist die tiefste Temperatur, die sich durch direkte Verdunstungskühlung erreichen lässt. Dabei steht die Wasserabgabe einer feuchten Oberfläche mit dem Wasseraufnahmevermögen der umgebenden Atmosphäre im Gleichgewicht. Aufgrund der Verdunstungskälte liegt die Kühlgrenztemperatur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte unterhalb der Lufttemperatur. Die

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
FF	[m/s]	Windgeschwindigkeit (10 m über Grund)
GH	[W/m ²]	Globalstrahlung
KT	[-]	Clearness Index: Verhältnis der Globalstrahlung zur extraterrestrischen Strahlung

Mit Hilfe der parallelen Messreihen an den fünf Standorten wurde der Stadteffekt analysiert und einfache Regressionsmodelle zur Beschreibung der Temperaturunterschiede zwischen den Standorten erstellt. Diese Modelle wurden danach auf die Klimazeitreihe des Standortes Bern-Zollikofen zwischen 1931 und 2100 angewendet, welche durch das Projekt " Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert" (Remund et al. 2014) aufbereitet worden waren, das im Rahmen des Projekts "Wald und Klimawandel" des BAFU und der WSL durchgeführt wurde. Die verwendeten Methoden und Daten sind unter Remund, Augustin (2015) beschrieben. Die historische Periode 1931 – 2015 basiert auf dem Messnetz der MeteoSchweiz. Die zukünftige Periode 1981 – 2100 basiert auf drei regionalen Klimamodellen, die interpoliert mit der change factor Methode nach Tabor, Williams (2010) wurden (sog. räumliches "Downscaling"²⁴). Alle drei Modelle (CLM, RegCM3 und RCA) basieren auf dem Szenario A1B und dem globalen Modell ECHAM5. Sie wurden so ausgewählt, dass sie eine eher trockene (CLM), mittlere (RegCM3) und feuchte (RCA) Variante der Entwicklung wiedergeben. Die lokal angepassten Zeitreihen wurden danach bezüglich Trends der Hitze- und Trockenheitsindizes untersucht (siehe 4.1).

3.2 Vitalitäts- und Schadensaufnahmen

Damit die Berner Stadtbäume möglichst gut mit den Herausforderungen des Klimawandels umgehen können, ist ihre Vitalität entscheidend. Der Begriff Vitalität beschreibt die Fähigkeit eines Baumes, mit seiner genetischen Ausstattung unter den gegebenen Umweltbedingungen zu gedeihen. Selbst sehr alte Bäume können bei optimalen Standortbedingungen als äusserst vital angesprochen werden. Da die Regenerations- und Anpassungsfähigkeit jeder Baumart unterschiedlich ist, können unterschiedliche Baumarten an ähnlichen Standorten unterschiedliche Vitalitätsmerkmale aufweisen.

Um die Vitalität von Stadtbäumen an verschiedenen Standorten und verschiedener Baumarten zu evaluieren, wurde ein Aufnahmeprotokoll mit 22 Vitalitäts- und Schadenskriterien zur Feldaufnahme entwickelt (Kern 2014). Die Aufnahmeprotokolle sind in den Anhängen (A) und (B) aufgeführt. Ziel der Arbeit war eine qualitative Beurteilung von Schäden und Vitalität von ausgewählten Stadtbäumen in Bern durchzuführen sowie die Eignung verschiedener Beurteilungskriterien aufzuzeigen. Es wurden Untersuchungsbäume an vorgängig als belastet identifizierten Standorten und zufällig ausgewählten Vergleichsflächen aufgenommen. Die Vitalität der Nadel- und Laubbäume wurde mittels visueller Kriterien im Stamm- und Kronenbereich eingestuft. Auch Kriterien in der unmittelbaren Umgebung, die einen Einfluss auf die Baumvitalität ausüben können wurden beschrieben und aufgenommen (z.B. Konflikte mit Bauten). Dabei erwiesen sich die Vitalitätskriterien Kronenverlichtung, Blattvergilbung, Verzweigungsstruktur der Kronenwipfel (nach Roloff 2001), Anteil toter und dürre Äste und die Gesamtvitalität als geeignete Kriterien bezüglich Objektivität, Aussagekraft und Anpassung auf Baumarten. Insgesamt wurden von Kern im Sommer 2014 130 Stadtbäume angesprochen (sog. Baseline Study). Dieselben Bäume wurden im Sommer 2015 erneut aufgesucht und beurteilt (Haymoz 2015).

Auch Neuner (2014) untersuchte während einer Stichprobeninventur im Sommer 2014 einen Teil der aufgenommenen Bäume auf ihre Vitalität. Ziel seiner Arbeit war es, den Gesundheitszustand des urbanen Baumbestandes quantitativ zu analysieren und Zusammenhänge zum klimabedingten Faktor Trockenstress zu untersuchen. Die Stichprobenfläche wurde auf Basis der Arealstatistik (BFS, 2013) ausgewählt, wobei nur urbane Räume ohne landwirtschaftliche Flächen und Wälder innerhalb der Stadt berücksichtigt wurden. Um die Baumartenzusammensetzung an verschiedenen Standorten zu untersuchen wurden die urbanen Räume der Stadt Bern in die Kategorien Innenstadt, Wohngebiet, Industriegebiet, Park unterteilt.

Temperaturabsenkung ist dabei umso grösser, je trockener die umgebende Luft ist. Umgekehrt kann aus der Temperaturdifferenz die Luftfeuchte bestimmt werden.

²⁴ Der Begriff „Downscaling“ bedeutet das Einbetten eines regionalen Klimamodells mit einer hohen räumlichen Auflösung in ein globales Klimamodell mit einer geringen räumlichen Auflösung.

Mittels Smartphone-App (ArcGIS Server 10.1 und Multi-User SDE Datenbank)²⁵ wurden Baummerkmale vor Ort erhoben und direkt via VPN in der zentralen Datenbank gespeichert. Insgesamt wurden während dieser Inventur der Brusthöhendurchmesser (BHD) von 1084 Bäumen und Sträuchern erhoben. Bei 371 ausgewachsenen Bäumen wurden ausserdem die Vitalität und mögliche Trockenstress-Indikatoren (Wurzelschäden, Bodenverdichtung, Bodenversiegelung, Wurzelraumbegrenzung, Kontakt mit Streusalz, Freistand, Rückstrahlung oder Überwärmung²⁶) aufgenommen. Dadurch sollte überprüft werden, inwieweit der Berner Baumbestand unter Ursachen für Trockenstress leidet. Friedli (2016) befragte schliesslich Verantwortliche von Schweizer Stadtgärtnereien (Basel, Bern, Biel, Luzern, Winterthur und Zürich) nach möglichen Massnahmen gegen den Trockenstress bei Strassenbäumen im urbanen Raum und den Einfluss von Stadtklima, Salzeintrag und Baumgruben²⁷.

3.3 Kohlenstoffspeicherung in Stadtbäumen

Die Untersuchung der oberirdischen Kohlenstoffspeicherung von Berner Stadtbäumen hatte die Ermittlung des in oberirdischer Biomasse städtischer Baumbestände gespeicherten Kohlenstoffes, sowie die Wuchs- bzw. CO₂-Senkenleistungen der häufigsten Baumarten im Siedlungsgebiet der Stadt Bern zum Ziel.

Die Ermittlung des in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoffes erfolgte mittels eines Modells, das auf Basis des aus LiDAR-Daten abgeleiteten Grünvolumens (Produkt aus Kronendeckung und mittlerer Höhe der Vegetation > 3 Meter) arbeitete. Die Untersuchungen in Bern haben ergeben, dass pro m³ Grünvolumen 1.012 ± 0.032 kg Kohlenstoff gespeichert werden (Gardi et al. 2016). Zur Kalibrierung dieses Modells waren vier Schritte erforderlich: 1) Messungen der oberirdischen Trockenmasse gefällter Einzelbäume, 2) Identifizierung geeigneter Funktionen zur Abschätzung der oberirdischen Biomasse von Einzelbäumen, 3) Stichprobeninventur des städtischen Baumbestandes sowie 4) Kalibrierung eines Regressionsmodells zur Abschätzung des von Stadtbaum-Beständen in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoffes auf Basis verfügbarer LiDAR-Daten. In Zusammenarbeit mit Stadtgrün Bern mass Schaller (2014) zunächst die Frischmasse der oberirdischen Teile von 21 regulär gefällten Stadtbäumen mit Durchmessern von 21.8 – 177.0 cm, ermittelte für jeden Baum den Wassergehalt auf Basis von Mischproben und bestimmte so deren Trockengewichte. Die gemessenen Biomassen verglich er mit publizierten Funktionen zur Abschätzung der oberirdischen Biomasse von Einzelbäumen auf Basis einfach zu erhebender Grössen wie Baumart, Durchmesser (BHD) und Höhe (Schweizer Waldtariffunktion, Funktion nach UFORE/IPCC, Generische Funktion von Chave et al. 2014).

Die genauesten Schätzungen wurden mit der Funktion von Chave et al. (2014) erzielt (R²=0.96). Diese Funktion wurde schlussendlich verwendet, um die oberirdische Biomasse der auf 179 Probeflächen im Berner Stadtgebiet von je 25x25m Fläche von Neuner (2015) aufgenommenen Bäume zu bestimmen. Mit einem Faktor von 0.47 Tonne Kohlenstoff pro Tonne Biomasse wurde der auf den Probeflächen in oberirdischer Biomasse gespeicherte Kohlenstoff ermittelt. Die resultierenden Werte wurden für die Kalibrierung des linearen Regression-Modells der Grünvolumen CO₂-Speicherung verwendet. Dieses wiederum wurde auf die LiDAR-Daten des gesamten Gemeindegebietes der Stadt Bern angewendet um den im Berner Stadtbaumbestand in oberirdischer Biomasse gespeicherten Kohlenstoff flächendeckend abzuschätzen (siehe in Kapitel 4.3).

Um die Wachstumskurven der 20 häufigsten Baumarten Berns und der damit verbundenen CO₂-Senkenleistung zu skizzieren, wurde eine weitere Feldaufnahme an 473 Bäumen verschiedenen Alters durchgeführt (Mack 2015). Die Bäume waren allesamt im Baumkataster der Stadt Bern inklusive Pflanzjahr aufgeführt. Die Biomassen der Bäume wurden ebenfalls mit der Funktion von Chave et al. (2014) abgeschätzt und mittels dem Faktor von 0.47 in Kohlenstoff umgerechnet.

²⁵ Eigens für das Projekt konfigurierte Smartphone App (YouTube Video zur Anleitung des Tools unter (https://www.youtube.com/watch?v=K8sSM91og_l&feature=youtu.be)²⁵

²⁶ Ermittelt wurden Anzeichen auf Rückstrahlung oder Überwärmung innerhalb der Fläche des 2. Umgebungsbereichs (Radius einer halben Baumlänge = halbe Baumhöhe).

²⁷ Für ein gesundes Wachstum benötigt ein Baum einen Wurzelraum, der etwa dem Volumen der Baumkrone entspricht. Es muss deshalb als Anwachshilfe eine ausreichend grosse Pflanzgrube sog. Baumgrube und die Möglichkeit zu ungehindertem seitlichen Wurzelwachstum gegeben werden.

3.4 Baumartenwahl angesichts des Klimawandels – Klimafit Stadtbaum-Index (KSI)

Mit dem Ziel die Klimafitness des Berner Baumbestandes zu beurteilen und eine Liste von Baumarten zu erstellen, die sich langfristig den klimatischen Veränderungen anpassen können und geringes Invasionspotential aufweisen wurde von Mack (2015) der Klimafit-Stadtbaum-Index (KSI) entwickelt. Dieser bildet qualitatives Wissen aus der Literatur über Winterhärte (WH), Trockenheitstoleranz (TT) und Stadtstresstoleranz (SST) von Stadtbäumen quantitativ ab. Ziel ist, dass in der Praxis mithilfe des KSI rasch die Eignung einer Baumart eingeordnet werden kann. Dabei können die verschiedenen Kategorien unterschiedlich gewichtet werden, je nachdem welche Kriterien für die Baumartenwahl am ausschlaggebendsten sind.

Der KSI wurde beispielhaft für die 20 häufigsten Berner Stadtbaumarten sowie 19 Potentialbaumarten aufbereitet. In der folgenden Tabelle 2 sind die Wertungsparameter detailliert aufgeführt. Dabei wurde jede Baumart gemäss den in Tabelle 2 dargestellten Kriterien bewertet, mit einheitlicher Gewichtung und Normierung (-1:1). Die Wertung auf Stufe Kategorie (TT, WH und SST) ergibt sich aus dem Mittelwert der Unterkategorien. Der Aufbau des Index orientierte sich dabei an Scharenbroch (2012) sowie an Roloff, Gillner (2013). Der Zahlenindex von minus Eins (wenig tolerant) bis plus Eins (sehr tolerant) gibt die Eignung einer Baumart als Stadtbaum an. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus Dirr (1990), Kiermeier, Bödecker (1996), Warda (2001), Schütt (2006) und Roloff et al. (2015) sind in den KSI eingeflossen. Wie jedes Messinstrument kann auch der KSI nur eine Annäherung an den Wert „geeignet als Stadtbaum“ bieten.

Beispielsweise erhält eine Baumart eine positive Wertung, wenn sie sich in „Artenarmen Wäldern und Gehölzgruppen“ wohlfühlt. Denn nach Kiermeier, Bödecker (1996) stellen diese Habitate ähnliche Anforderungen an die Pflanzen wie eine Stadtumgebung. Bezüglich der Winterhärte ist anzumerken, dass sich Bern im Zeitraum 2045-2074 in einem A1B Szenario aus Zone 7 (Temperaturen im Winter zwischen -17 bis -12°C) in Zone 8 (Temperaturen zwischen -12 bis -6°C) bewegen wird (Mack 2015). Das aus den USA stammende Konzept der Winterhärtezone markiert den Temperaturbereich des „mittleren jährlichen Minimums der Lufttemperatur“. In dieser Temperaturamplitude ist ein Überleben der Spezies zu 80% wahrscheinlich (Heinze, Schreiber 1984). Damit können Aussagen über die Frosthärte, nicht jedoch über Spätfrosttoleranz der Pflanzen getroffen werden. Der pH-Toleranzbereich des KSI wertet positiv, wenn einer Art eine weite Amplitude der pH-Werte zugeschrieben wird, in der sie sich wohlfühlt (Methode nach Scharenbroch 2012). So wies die Robinie den weitesten pH-Toleranzbereich aller untersuchten Baumarten auf, nämlich von 4.6 bis 8.2 (Roloff 2015) mit der Differenz 3.6. Die Fichte dagegen findet optimale Bodenverhältnisse nur zwischen pH-Werten von 4 bis 5 vor (Warda 2001, S. 775f) und hat folgend nur einen pH-Toleranzbereich von 1. Der KSI wertete nun mit minus Eins, wenn eine Spezies einen pH-Toleranzbereich von 1 bis 1.8 aufwies (1.8 als Medium von minimalem und maximalen Toleranzbereich der untersuchten Baumarten). Plus Eins vergab der KSI, wenn es sich um pH-Toleranzbereichswerte über 1.8 handelte.

Tabelle 2 Wertungskriterien des Klimafit-Stadtbaum-Index; für eine spezifische Baumart (Mack 2015).

Wertung/Unterkategorien		-1	0	1
1. Trocken-toleranz (TT)	1.1. Herkunft/Natürlicher Lebensbereich (Kiermeier 1995)	- Auen und Ufergehölze - Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen - Gehölze kühlfeuchter Wälder - Bergwälder	- Artenarme Wälder und Gehölzgruppen - Heiden und Dünen	- Steppengehölze und Trockenwälder
	1.2. Trockenheitstoleranz	- „nein“ - Mehrheit der Quellen „nein“	- keine Information	- „ja“ - Mehrheit der Quellen „ja“
2. Winterhärte (WH)	2.1. Herkunft/Winterhärtezone	≥9	/	≤8
	2.2. Spätfrosttoleranz	- „nein“ - Mehrheit der Quellen „nein“	- keine Information	- „ja“ - Mehrheit der Quellen „ja“
3. Städtische Stress Toleranz (SST)	3.1. Toleranz geg. Schadstoffen	- „nein“ - Mehrheit der Quellen „nein“	- keine Information	- „ja“ - Mehrheit der Quellen „ja“
	3.2. Toleranz geg. Verdichtung	- „nein“ - Mehrheit der Quellen	- keine Information	- „ja“ - Mehrheit der Quellen

		„nein“		„ja“
	3.3. Toleranz geg. Salz	- „nein“ - Mehrheit der Quellen „nein“	- keine Information	- „ja“ - Mehrheit der Quellen „ja“
	3.4 pH-Toleranz	(0: 1,8)	- keine Information	(1,8:3,6)
	3.5 Krankheiten	- verschiedene	/	- „kaum“ - „richten kaum Schäden an“

Mit dem Ansatz der Klimaanalogie wurden schliesslich Orte identifiziert, an welchen das Klima heute ähnlich (analog) des prognostizierten Klimas in Bern ist. Das Konzept vergleicht Standorte basierend auf Ähnlichkeiten in Niederschlag und Temperaturen, kann aber noch andere Variablen (z.B. Boden, Infrastruktur) einschliessen (Hallegatte et al. 2007). Anhand der Analogregionen kann studiert werden, welche der vorhandenen Baumarten auch unter einem anderen Klima noch gedeihen und welche Baumarten damit grössere Probleme bekommen. Gleichzeitig sollte gemäss Kölling (2007) auch erkennbar werden, welche zukunftsfähige Alternativen sog. Zukunftsbaumarten sein könnten (Siehe 4.4).

4 Resultate und Synthese

4.1 Einfluss der Vegetation und Grünflächen auf das Stadtklima

Die Messreihen von Wetterstationen im Stadtzentrum (Uni VonRoll, Bollwerk), in den Stadtparks (Schosshalde-Friedhof, Bremgarten-Friedhof) und Umland (Bern/Zollikofen) wurden verglichen. Um die Unterschiede deutlich zu machen, wurde mit mittleren Tagesgängen und mit Differenzen der vier Stadt-Standorte gegenüber dem Umlandstandort Bern/Zollikofen gearbeitet. Tabelle 3 zeigt die mittleren Differenzen zwischen den Standorten.

Tabelle 3 Mittlere Abweichungen der Stadt-Standorte gegenüber dem Umland (Bern/Zollikofen). TT: Lufttemperatur 2 m über Grund, TD: Taupunkttemperatur, TMAX: Maximale Lufttemperatur, TMIN: Minimale Lufttemperatur (Remund 2016).

	Schosshalde-Friedhof	Bremgarten-Friedhof	Uni VonRoll	Bollwerk
TT	0.5	0.4	1.1	2.0
TD	0.7	0.9	0.8	1.4
TMAX	1.1	1.3	1.1	1.0
TMIN	0.2	-0.0	1.3	2.0

Während an den Parkstandorten (Schosshalden- und Bremgartenfriedhof) vor allem die Maximalwerte (TMAX) höher liegen, liegen an den versiegelten Standorten (Uni VonRoll und Bollwerk) besonders die Minimaltemperaturen höher als im Umland. Im Schnitt und übers ganze Jahr ist es an den Parkstandorten rund 0.5°C und an überbauten Standorten 1.5°C wärmer als am Umlandstandort. Die Abweichungen der Stadt- und Parkstandorte vom Referenzstandort im Umland variieren stark nach Tages- und Jahreszeit. Im Winter sind die Unterschiede in den Tagesgängen wenig ausgeprägt. Park-Standorte sind v.a. tagsüber etwas wärmer, während die überbauten Standorte relativ konstant um 1-1.5°C höhere Temperaturen aufweisen als der Standort im Umland. Im Sommer weisen beide Standort-Typen deutliche Tagesgänge der Differenzen zum Umland auf. Die Stadtstandorte sind v.a. in der Nacht viel wärmer. Die Park-Standorte hingegen nur tagsüber (Abbildung 6).

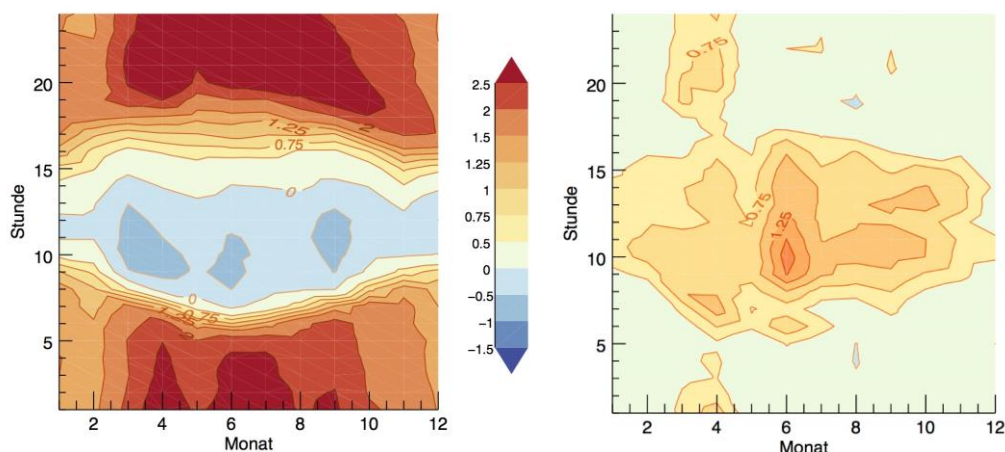


Abbildung 6 Differenzen der Tagesgänge zwischen den Stadt-Standorten und dem Umland pro Monat und Stunde. Links: Innenstadt (Bollwerk); rechts: Stadtpark (Schosshalde) (Remund 2016).

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde in der Folge ein einfaches Modell für die Differenzen zwischen den Stadt- und Park-Standorten erstellt. Das Modell wurde für die Tageswerte der Minimaltemperatur, der Maximaltemperatur, der Tagesmitteltemperatur und der Tagesmittel der Taupunkttemperatur erstellt. Für die anderen gemessenen Parameter Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurde kein Modell erstellt, da die Unterschiede generell kleiner sind und die Messeinrichtungen für detaillierte Analyse solcher Differenzen nicht ausgelegt waren.

Das Resultat der Berechnung sind Zeitreihen für die fünf Standorte zwischen 1931 und 2100 in einer zeitlichen Auflösung von Tageswerten (Remund 2016).

Die Zeitreihen wurden bezüglich temperaturbasierten Indizes und Trockenheitsindizes (ETa/Etp) basierend auf (Remund et al. 2014) untersucht. Die Temperatur und die temperaturbasierten Indizes zeigen alle eine starke Erwärmung des Klimas und grosse Unterschiede zwischen Umland und Stadtzentrum. Die Unterschiede zwischen Umland und Stadtzentrum sind grösser als die Unterschiede der drei unterschiedlichen regionalen Klimamodelle. Bei den Parkstandorten (Abbildung 7) sind die Unterschiede zwischen den Modellen grösser (da der Stadteffekt deutlich kleiner ist). Die Temperatur steigt im A1B Szenario in diesem Jahrhundert um rund 4°C an. Der Unterschied zwischen der Stadt und dem Umland beträgt rund 2°C und zwischen Park und Umland rund 0.5°C.

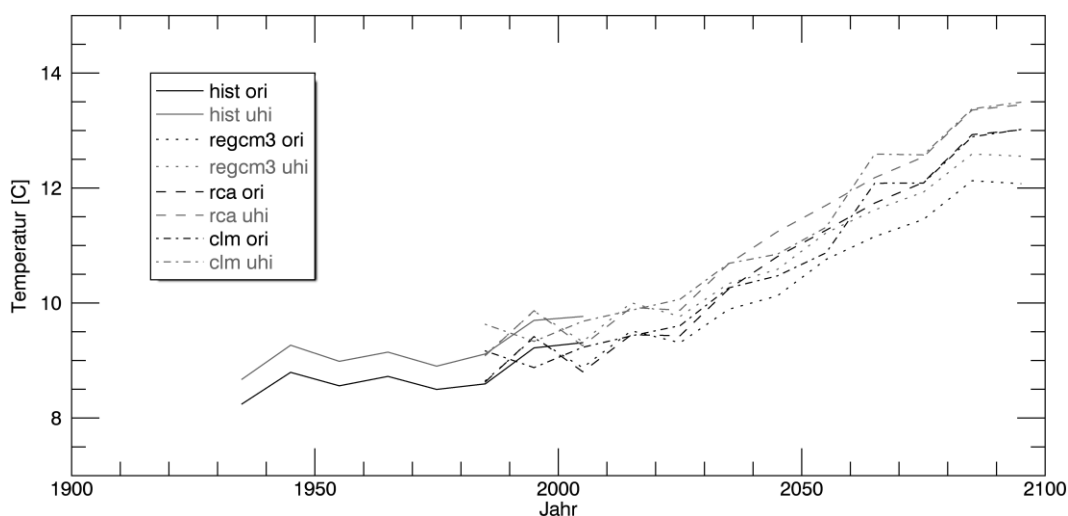


Abbildung 7 Verlauf der mittleren Temperatur pro Dekade zwischen 1931 und 2100 für den Park-Standort Schosshalde. Daten ohne (ori) und mit (uhi) Korrektur des Stadteffekts. hist: Historische Periode 1931 – 2015; clm/regcm3/rca: trockene/mittlere/feuchte Variante der Klimaentwicklung (Remund 2016).

Die Anzahl der Tropennächte²⁸ wird in Bern stark zunehmen. Während in der Vergangenheit an den Stationen ausserhalb Berns (Liebefeld bis 2006, danach Zollikofen) kaum Tropennächte auftraten, so dürften diese bis Ende des 21. Jahrhundert sowohl im Umland (auf ca. 20 pro Jahr) als auch für das Stadtzentrum deutlich zunehmen (auf ca. 40 pro Jahr). Während eine Zunahme der städtischen Tropennächte bereits in den kommenden Jahren erwartet wird, wird dieser Effekt im Umland wohl erst gegen Mitte des Jahrhunderts in Erscheinung treten. Die Anzahl Frosttage nahm in der Vergangenheit bereits deutlich ab. Aufgrund des Treibhauseffektes wird sich die Abnahme der Frosttage in Zukunft noch deutlich verstärken, wie auch die Modelle zeigen. In der Stadt nimmt die Anzahl Frosttage bis Ende des Jahrhunderts von 60 auf 20 Tage ab, im Umland von 80 auf 35 Tage.

Die Anzahl Tage mit einem Trockenheitsparameter ETa/Etp unter 0.6 (starke Trockenheit) zeigt ein erstes Maximum in den 40er Jahren, mit den Trockenjahren 1947 und 1949 (Abbildung 8). Seit 2000 steigen diese wieder an. Die Trockenheit nimmt in Zukunft v.a. ab 2030 stark zu. Die Unterschiede zwischen den drei Klimamodellen sind aber gross. Die Projektionen zeigen zudem, dass die Trockenheit nicht einfach linear zunimmt, sondern sprunghaft. Die Projektionen für Stadtstandorte unterscheiden sich nicht gross vom Umland. Das liegt daran, dass für den wichtigsten Parameter, den Niederschlag, kein Stadteffekt berücksichtigt wurde. Weiter wurde auch die spezielle Situation der Stadt bezüglich des Bodens (Wasserinfiltration und Speicherkapazität) nicht in den Modellen berücksichtigt. Insgesamt ist aber zu erwarten, dass sich die Trockenheit aufgrund reduzierter Wasserinfiltration und -speicherkapazität in der Stadt deutlich stärker bemerkbar machen wird als auf dem Land.

²⁸ Tropennacht: Nacht in der die Temperatur nicht unter 20°C fällt.

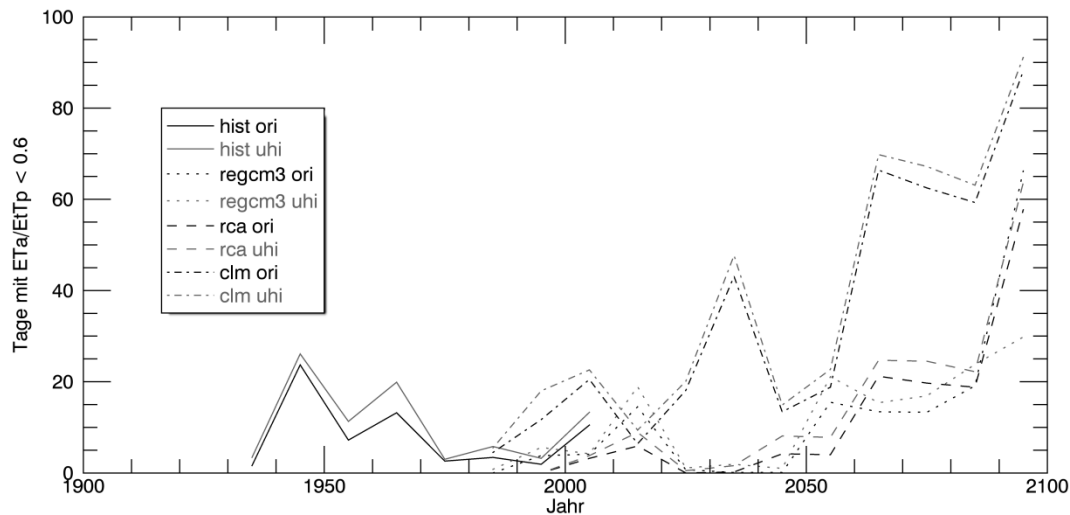


Abbildung 8 Verlauf der Anzahl Tage mit ETa/ETp -Verhältnis unterhalb 0.6 pro Jahr (starke Trockenheit) zwischen 1931 und 2100 für den Standort Bollwerk. Daten ohne (ori) und mit (uhi) Korrektur des Stadteffekts. hist: Historische Periode 1931 – 2015; clm/regcm3/rca: trockene/mittlere/feuchte Variante der Klimaentwicklung. Der Verlauf der Kurve bei clm weist auf die erhöhte Variabilität hin (Remund 2016).

4.2 Vitalität des Baumbestandes

Inadäquate Standortbedingungen führen zu einer erhöhten Schädigungsanfälligkeit. Besonders Strassenbäume, die bereits durch die schwierigen Bedingungen der Stadt geschwächt sind, reagieren auf zusätzliche Belastungen durch den Klimawandel mit einer Abnahme der Vitalität. Dass einige Bäume, Baumgruppen oder Baumarten in der Stadt deutlich schlechtere Vitalitätsmerkmale aufweisen, ist laut Kern (2014) und Haymoz (2015) meist auf spezifische Standortfaktoren zurückzuführen. So weisen Bäume an Strassenkreuzungen und Haltestellen des öffentlichen Verkehrs eine deutlich geringere Vitalität auf als Bäume an Parkstandorten, unabhängig von Art (siehe Abbildung 9). Dies ist auf die verringerte Umweltbelastung (z.B. durch Streusalz) und auf das ausgeglichene Klima zurückzuführen. Als weiteren Grund nennt Kern (ebd.) die guten Bodenverhältnisse und den guten Wasser- und Nährstoffhaushalt an den Parkstandorten. Auch Neuner (2014) konnte einen signifikanten Einfluss zwischen Standort von



Abbildung 9 Der Einfluss des Standortes auf den Zustand der Bäume ist deutlich sichtbar: Gewöhnliche Rosskastanien in einem Berner Stadtpark, am zentral gelegenen Hirschengraben und im stark befahrenen Strassenraum mit Tramhaltestelle.

Laubbäumen und Vitalität nachweisen. Dies insbesondere in Bezug auf die Lage der nach Mathys (1976) definierten Wärmeinseln der Stadt Bern. Von den insgesamt 287 Laubbäumen, die bei der Inventur im Sommer 2014 aufgenommen wurden, lagen 118 innerhalb einer Wärmeinsel. Bei den untersuchten Nadelbäumen (n=34) konnte kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Eine mögliche Erklärung für

die eingeschränkte Vitalität innerhalb der Wärmeinseln kann durch Rückstrahlung und den fehlenden nächtlichen Abkühlungseffekt erklärt werden (siehe auch Kapitel 4.1).

Die Untersuchungen von Haymoz (2015) zeigen, dass sich der Baumbestand nach wie vor in einem vitalen Zustand befindet, auch wenn viele Bäume Schäden irgendeiner Art zeigen. Die grossen Differenzen zwischen den Untersuchungen von Haymoz (2015) zu den Erstaufnahmen durch Kern (2014) deuten auf die Subjektivität der Beurteilungskriterien hin und die Schwierigkeit einer standardisierten Überwachung der Vitalität und des Schadenzustandes von Stadtbäumen (siehe Abbildung 10).

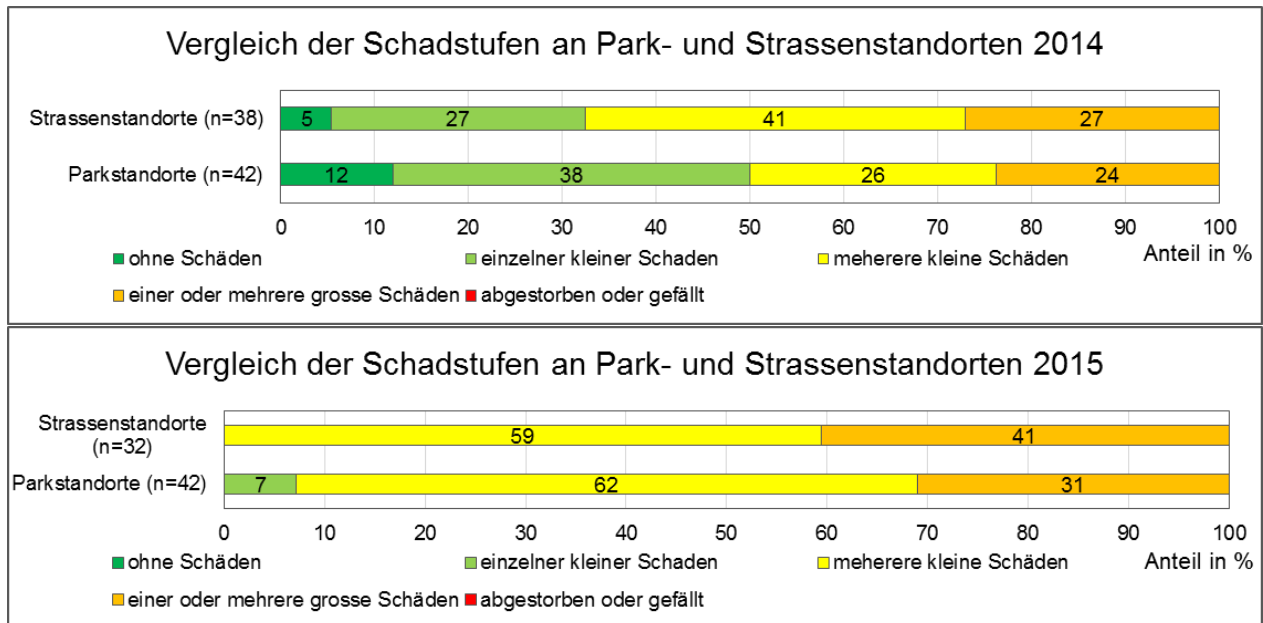


Abbildung 10 Vergleich der Schadstufen an Park- und Strassenstandorten zwischen Kern (2014) oben und Haymoz (2015) unten.

Die Korrelation zwischen Vitalität und Trockenstress konnte gemäss Neuner (2014) insbesondere für die Kriterien Bodenversiegelung²⁹ sowie Rückstrahlung und Überwärmung nachgewiesen werden (Abbildung 11). Dabei handelt es sich um städtebaulich hervorgerufene Probleme, wobei das Kriterium Bodenversiegelung gemäss Roloff (2013) durch Management positiv beeinflussbar ist. Bodenversiegelung war bei der Aufnahme gemäss Neuner (2014) insbesondere bei Laubbäumen sehr häufig feststellbar. Und auch das Kriterium Rückstrahlung konnte bei Laub und Nadelbäumen mit einer Häufigkeit von über 50% festgestellt werden. Insbesondere bei Nadelbäumen konnte ein signifikanter Einfluss der Rückstrahlung auf die Vitalität nachgewiesen werden. Positive Temperaturabweichungen wirken sich bei Laubbäumen

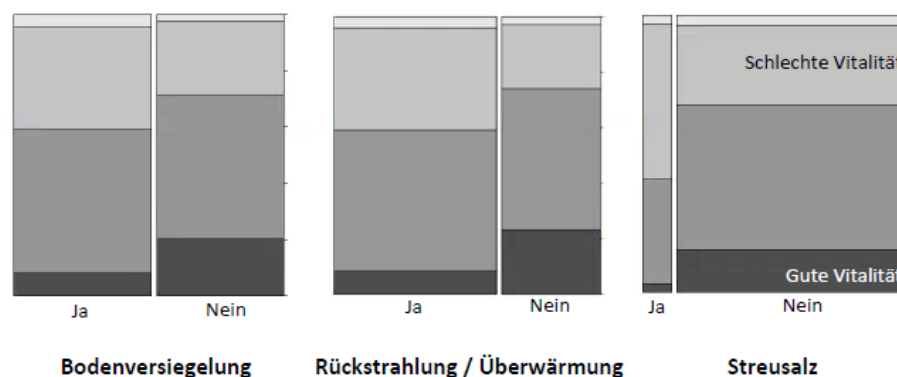


Abbildung 11 Untersuchung der Vitalität von 371 Bäumen in der Stadt Bern, anhand der Faktoren, Bodenversiegelung, Rückstrahlung/Überwärmung und Streusalz bei Laubbäumen (Neuner 2014).

²⁹ Anzeichen auf Bodenversiegelung innerhalb des Wurzelbodens durch Gebilde, die ein Eindringen von Niederschlag verhindern (z.B. Strassen, asphaltierte Wege und Plätze, Häuser, Gebäude, Gewerbe- und Industrieanlagen).

erkennbar negativ auf die Vitalität aus. Bei Nadelhölzern ist der Effekt gemäss Neuner (2014) weit weniger deutlich sichtbar. Insbesondere die nächtlichen Überwärmungs- und Rückstrahlungseffekte haben laut Remund (2014) einen wesentlichen Einfluss auf die Stadtbäume. Als vielversprechende Massnahme zur Entschärfung der Trockenstressproblematik und des Wassermangels von Strassenbäumen werden gemäss Friedli (2016) neben der Baumartenwahl planerische Massnahmen vorgeschlagen. Dabei geht es darum den Strassenbereich und unterirdische Leitungen zu entflechten und den Bäumen mehr Platz zu verschaffen. Das Verbinden von in Reihen ausgerichteter Baumgruben um den Raum zwischen den Bäumen auch für das Wurzelwachstum freizugeben könnte beispielsweise eine Massnahme sein. Als wichtigste Strategie wurde jedoch die Pflanzung von besser ans Stadtklima angepassten Baumarten genannt (siehe **Error! Reference source not found.**) und der Überprüfung ihrer Eignung in Form von Praxistests (Friedli 2016).

Bei den Inventuren im Sommer 2014 und 2015 konnten an den untersuchten Bäumen auch Schadorganismen nachgewiesen werden. Bei den Aufnahmen von Kern (2014) waren insbesondere die aktuellen Krankheiten wie das Eschentriebsterben und der Befall von Buchenspringrüsslern bei Buchen ausgeprägt vertreten. Knapp die Hälfte der untersuchten Eschen (insgesamt 17) zeigten eindeutige Anzeichen des Eschentriebsterbens und 35% der Eschen zeigten erste Anzeichen für einen Befall auf. Bei den Buchen war der Befall von Buchenspringrüsslern³⁰ bei 56% der untersuchten Bäume erkennbar. Bei den Gewöhnlichen Rosskastanien konnte der Befall von Kastanienminiermotte bei 50% der Kastanien nachgewiesen werden. Die Gewöhnlichen Rosskastanien wiesen gemäss Kern (ebd.) jedoch sehr gesunde Vitalitäts- und Schadensmerkmale auf. Dies liegt möglicherweise daran, dass ausgeprägte Blattverfärbungen und Blattverluste durch die Kastanienminiermotten vor allem im Spätsommer auftreten, während die Beurteilung im Frühsommer erfolgte. Nach der Expertise von Stadtgrün Bern leiden insbesondere die Eschen, und zwar unter dem Eschentriebsterben. In den letzten vier Jahren mussten über 20 mit diesem Pilz befallene Eschen gefällt werden. Neben der schon erwähnten Kastanienminiermotte ist ausserdem der Brandkrustenpilz und die Ulmenwelke von Bedeutung. Der Brandkrustenpilz kommt oftmals bei Alleebäumen vor und aufgrund der Krankheit und der dadurch entstandenen Bruchgefahr von Ästen und Stämmen müssen ein bis zwei Bäume pro Jahr gefällt werden. Im Gegensatz zum Wald verfügen die meisten Ulmenarten in der Stadt Bern über eine Resistenz gegenüber der Ulmenwelke, und sind kaum von der Krankheit betroffen (Kern 2014).

Eine Vorstudie zur Wichtigkeit von Stadtbäumen für die Berner Stadtbevölkerung zeigte, dass die Bäume in der Stadt von den befragten Personen (insgesamt 48) als wichtig bis sehr wichtig angesehen werden (Becker 2016). Trotz der grossen Wichtigkeit wird in den Berner Printmedien jedoch nur selten über Stadtbäume berichtet (Fällarbeiten oder bei Grossprojekten). Eine Umfrage zur Zahlungsbereitschaft bei 48 zufällig ausgewählten Personen der Berner Stadtbevölkerung, ergab einen jährlichen Betrag von 136.- CHF/Jahr, einen geringeren Betrag als die momentane Finanzierung durch Steuern, die gemäss Becker (ebd.) 225.- CHF/Jahr betragen. Auch konnten die befragten Personen kaum Vorteile von Stadtbäumen nennen (nur durchschnittlich zwei genannte Vorteile pro befragter Person), wobei am meisten die Ästhetik, Sauerstoffproduktion und Lebensraum für Tiere genannt wurden.

4.3. Kohlenstoffmodell und Biomassekarte

Während bei Waldstandorten ein starker Zusammenhang zwischen Durchmesser und Höhe der Bäume besteht, weichen Stadtbäumen in ihrer Wuchsform deutlich davon ab und sind bei gleichem Durchmesser in der Regel weniger hoch. Das trifft insbesondere für Bäume mit grossem Durchmesser zu, welche auch die grössten Biomassen aufweisen. Klassische forstwirtschaftliche Modelle sind deshalb nur beschränkt geeignet, um die oberirdische Biomasse von Stadtbäumen abzuschätzen. Die Funktion von Chave et al. (2014) erzielt die genauesten Schätzungen. Sie ist das einzige der getesteten Modelle für Stadtbäume, das die Baumhöhe explizit berücksichtigt. Ebenso zentral ist der Einbezug der Vegetationshöhe, wenn es um die Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Baumbeständen geht. Internationale Standardfaktoren, wie sie zurzeit auch im Schweizer Treibhausgasinventar für das Siedlungsgebiet Anwendung finden, schätzen die Kohlenstoffspeicherung in Baumbeständen lediglich über den Kronendeckungsgrad. Unsere Untersuchungen zeigen, dass wesentlich genauere Resultate erzielt werden, wenn zusätzlich die Vegetationshöhe berücksichtigt wird (Gardi et al., 2016). Mit den schweizweit verfügbaren LiDAR-Daten

³⁰ Der Buchenspringrüssler frisst sich durch das Blattinnere von Buchenarten. Bei starkem Befall zeigen die Buchenblätter deutliche Frassspuren und teilweise stark reduziertes Blattgrün. Bei sehr starkem Befall im Frühjahr treiben die Buchenblätter ein zweites Mal aus.

wäre die dafür notwendige Datenbasis vorhanden. Allerdings fehlen für eine schweizweite Auswertung repräsentative Daten zur Kalibrierung der Modelle, d.h. Messungen der oberirdischen Biomasse von Einzelbäumen zur Kalibrierung geeigneter allometrischer Funktionen und Bauminventuren ausserhalb des Waldes zur Kalibrierung der auf LiDAR-Daten basierten Modelle zur Abschätzung der oberirdischen Biomasse von Baumbeständen ausserhalb des Waldes.

Die Anwendung des mittels der von Neuner (2014) aufgenommenen Daten während der Inventur im Sommer 2014 kalibrierten LiDAR-Modells auf das gesamte Siedlungsgebiet der Stadt Bern resultiert in einem mittleren Vorrat von 14.9 ± 0.5 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare, der in der oberirdischen Biomasse von Stadtbäumen gespeichert ist (siehe Abbildung 12). Dieser Wert übertrifft die in anderen mitteleuropäischen Städten ermittelte Kohlenstoffdichte um rund 25%. Auch schweizweit dürfte in Bern mit einem Baumflächenanteil von 15.5% in Bäumen deutlich mehr Kohlenstoff pro Flächeneinheit gespeichert sein als im restlichen Schweizer Siedlungsgebiet, wo der Baumflächenanteil bei 7.9% liegt (BFS, 2013).

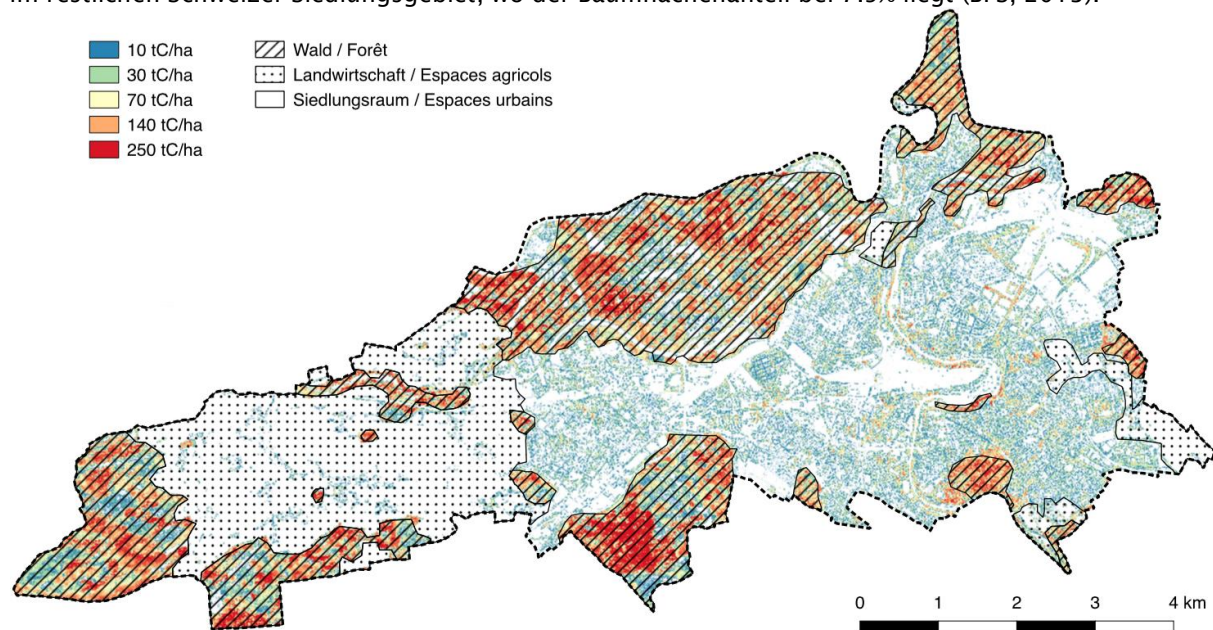


Abbildung 12 In oberirdischen Baumteilen gespeicherter Kohlenstoff: Biomassekarte der Stadt Bern, in einer Auflösung von 12.5 Metern. Die Karte basiert auf der Auswertung von LiDAR-Daten, mittels einem auf Bauminventuren im Berner Siedlungsgebiet kalibrierten Modell. Wie der Vergleich mit Aufnahmen des Landesforstinventars im Gemeindegebiet von Bern zeigt, erzielt das Modell auch genaue Schätzungen für das Waldareal ($R^2 = 0.92$)

Die derzeit im Schweizerischen Treibhausgasinventar verwendeten Kohlenstoffvorräte in Bäumen für verschiedene Landnutzungsklassen im Siedlungsraum basieren auf einem in den USA ermittelten Standardfaktor von 58 Tonne Kohlenstoff pro Hektare Kronenfläche (Mathys, Thürig 2013), 43 Tonnen davon in oberirdischer Biomasse. Werden diese Werte auf das Berner Siedlungsgebiet angewendet, resultiert ein Vorrat von durchschnittlich 8 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare in oberirdischer Baumbiomasse, was den von uns ermittelten Kohlenstoffvorrat um fast die Hälfte unterschätzt.

Für den Schweizer Wald wurde ein oberirdischer Kohlenstoffvorrat von durchschnittlich 93 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare ausgewiesen (Brändli, 2010), also rund sechsmal mehr als im Siedlungsgebiet der Stadt Bern. Für die Klimaleistung entscheidend ist aber weniger der absolute Vorrat, als dessen Veränderung über die Zeit. Während der Wald in der Schweiz in Fläche und Vorrat zunimmt (CO_2 -Senke der oberirdischen Biomasse von über 1 Million Tonnen CO_2 pro Jahr, über die Jahre 1999-2013 gemäss Schweizerischen Treibhausgasinventar), nahm der Anteil der als Baumflächen kategorisierten Flächen des Schweizer Siedlungsgebietes in der Zeit zwischen 1997 und 2009 um fast 15% ab (BFS, 2013). Auf Basis der in Bern ermittelten Werte entspricht das schweizweiten CO_2 -Emissionen in der Grössenordnung von 15'000 Tonnen CO_2 pro Jahr. Auf der anderen Seite hätte eine Verdoppelung der Bäume im Schweizer Siedlungsraum eine Senkenleistung von rund 150'000 Tonnen CO_2 pro Jahr über einen Zeitraum von 100

Jahren zur Folge. Einhergehende Veränderungen in der unterirdischen Biomasse und im Bodenkohlenstoff sind in den Schätzungen nicht enthalten.

Die oben stehenden Zahlen sind sehr grobe Schätzungen der aktuellen CO₂-Emissionen und des Potentials zur Sequestration von CO₂ aufgrund von Veränderungen des Baumbestandes im Siedlungsraum. Die Repräsentativität des entwickelten LiDAR-Modells kann mittels ergänzenden Inventuren im Nichtwald-Areal in weiteren Regionen der Schweiz verbessert werden. Für eine genaue Ermittlung der Veränderungen des Kohlenstoffvorrates über die Zeit bedarf es wiederholter LiDAR-Erhebungen.

In Bezug auf die Frage, inwiefern sich verschiedene Baumarten hinsichtlich CO₂-Aufnahme und Kohlenstoffspeicherung unterscheiden sind drei Faktoren von Bedeutung: die Geschwindigkeit mit welcher ein Baum CO₂ aufnehmen kann, die maximale Menge die ein Baum einlagert, sowie die Zeit, über welche der Kohlenstoff im Baum gespeichert bleibt. Die entsprechenden Eigenschaften sind Wachstum, Grösse und Lebensdauer eines Baumes. Die Kohlenstoffspeicherleistung eines Baumes entspricht der Menge eingelagertem CO₂ über seine gesamte Lebensdauer (Abbildung 13).

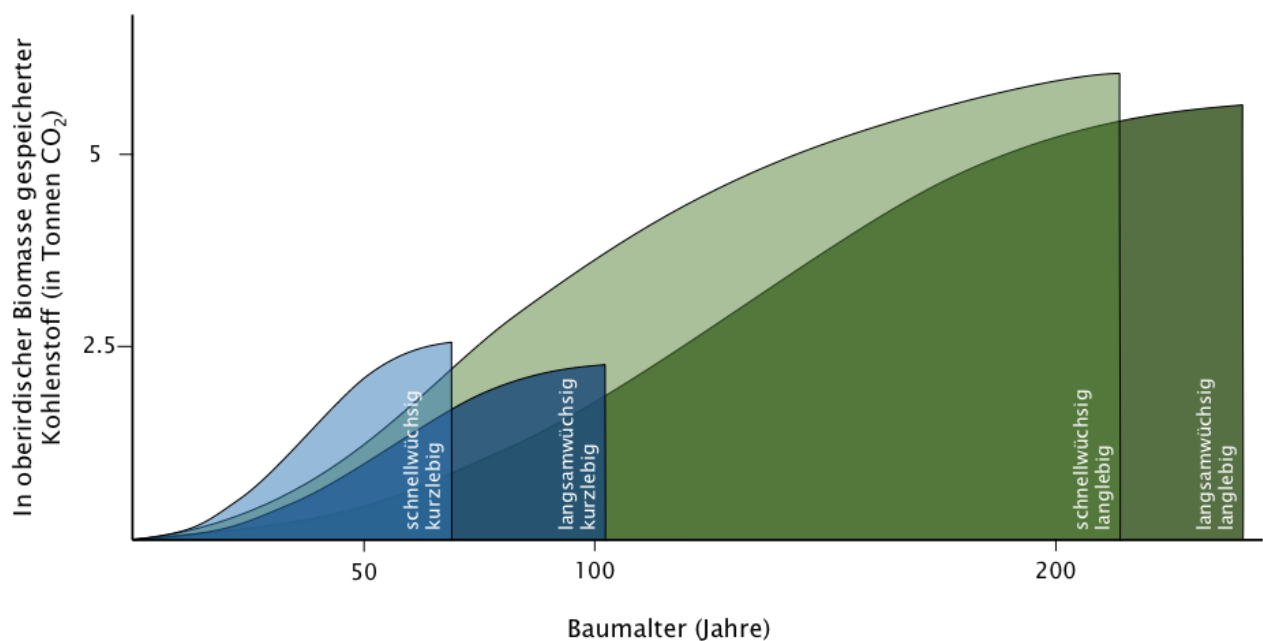


Abbildung 13 Schematische Wachstumskurven verschiedener Baumarten. Die Fläche unter der Kurve entspricht der jeweiligen Kohlenstoffspeicherleistungen eines Baumes über seine gesamte Lebensdauer.

Tabelle 4 zeigt Wüchsigkeit und Lebensdauer einiger häufiger Stadtbaumarten in Bern. Meist erreichen langlebige Baumarten auch eine bedeutendere Grösse. In die Beurteilung der Kriterien Wachstum und Grösse ist auch die Holzdicke miteinzubeziehen, da Bäume mit geringerer Holzdicke (z.B. Pappel und viele Nadelhölzer) weniger Kohlenstoff pro Volumeneinheit einlagern.

Dieser Sachverhalt wird im Grundsatz auch durch die in Bern gemachten Erhebungen bestätigt. Schnellwüchsige Arten wie Robinie oder Platane weisen über einen kurzen Zeitraum die grösste Speicherleistung aus, mit durchschnittlich 1.5 tCO₂ in oberirdischer Biomasse von 50 Jahren. Auf einer längeren Zeitachse dominieren hingegen grosskronige und langlebige Arten wie Stiel-Eiche und Fichte mit bis zu 3.5 tCO₂ nach 80 Jahren. Eher bescheiden ist die Speicherleistung von kleinkronigen Arten wie Apfel (Kultursorte), Eibe und Feldahorn, welche in der Regel unter 1 tCO₂ liegt, auch bei alten Exemplaren.

Tabelle 4 Wüchsigkeit und Lebensdauer häufiger Stadtbaumarten in Bern³¹

	Kurzlebig	Langlebig
Schnellwüchsig	<ul style="list-style-type: none"> • Feld-Ahorn • Hängebirke • Pappel 	<ul style="list-style-type: none"> • Robinie • Spitz-Ahorn • Vogel-Kirsche
Langsamwüchsig	<ul style="list-style-type: none"> • Hainbuche • Apfel • Vogelbeere 	<ul style="list-style-type: none"> • Weissdorn • Baumhasel

³¹ Nadelbäume haben in der Regel eine geringere Holzdichte als Laubbäume, sprich sie speichern weniger Kohlenstoff pro Kubikmeter Holz)

4.4. Problem- und Potentialarten

Die Auswahl von geeigneten Baumarten ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Mit dem Klimawandel gestalten sich diese Abwägungsaufgaben noch komplexer (Andrä 2013). Wie die Untersuchungen zur Vitalität des Berner Baumbestandes zeigen, sind bereits heute einige Baumarten vom Klimawandel betroffen (Vergleich Kapitel 3.2). Gemäss Mack weisen 18% der Spezies (Gewöhnliche Rosskastanie, Sommer-Linde und Berg-Ahorn) des Berner Baumbestandes nicht die für die Anpassung an den Klimawandel notwendige Trockenheits- und Stadtstresstoleranz und Winterhärte auf (siehe Abbildung 14).

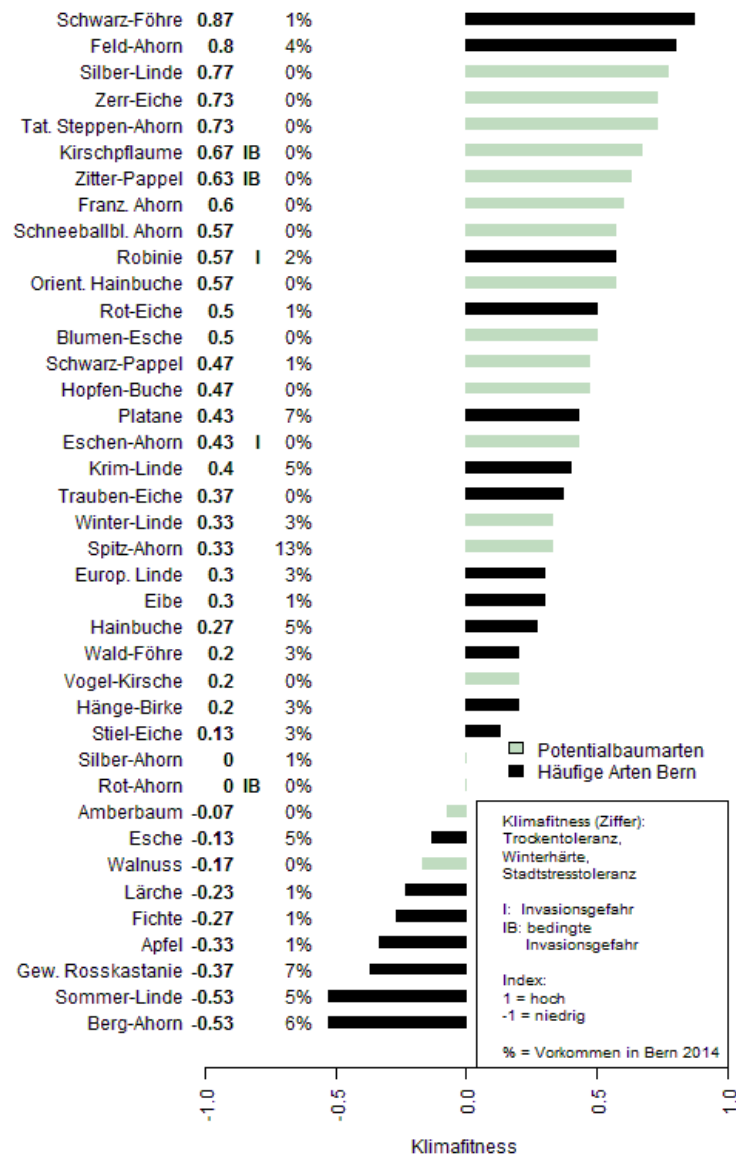


Abbildung 14 : Bewertung der Klimafitness (Trockenheitstoleranz, Winterhärte, Stadtstresstoleranz) von Potentialbaumarten (grün) und häufigen Arten Bern (schwarz)

Ausserdem sind Gewöhnliche Rosskastanie und Esche von Pathogenen wie der Kastanienminiermotte bzw. dem Pilz des Eschentriebsterbens besonders geschwächt, dass es vor allem bei den Eschen zum Absterben der Bäume kommt. Als ernst zunehmendes Problem schätzt Mack (2015) die geringe Trockenheitstoleranz der Gewöhnlichen Rosskastanie, Berg-Ahorne, Sommer-Linden, Fichten und Apfelbäume ein, allesamt Arten, welche im öffentlichen, von der Berner Stadtgärtnerei gepflegten Baumbestand einen bedeutenden Anteil

von jeweils 1% bis 7% ausmachen. Bei diesen wenig klimafitten Spezies, die aber zu den häufigsten Berner Stadtbaumarten auf öffentlichen Grund zählen, ist mit erhöhtem Pflegeaufwand für die Stadtgärtnerei zu rechnen. Möglicherweise muss man Neuanpflanzungen überdenken. Eine insgesamt sehr gute Wertung erhielten Feld-Ahorn und Schwarz-Föhre. Bis auf eine geringere Toleranz gegenüber städtischen Stressoren schnitten sie am besten aller 39 von Mack (2015) untersuchten Spezies ab.

Um das existierende Repertoire der Berner Stadtbäume zu erweitern, wurde im Projekt *Urban Green & Climate* mithilfe des Konzeptes der Klimaanalogie Hallegatte et al. (2007) nach möglichen Zukunftsbaumarten gesucht. Baumarten, die dem zukünftigen Klima um 2060 gewachsen sein könnten, finden sich in der kontinentalen Balkanregion um Zagreb. Hier herrscht schon heute ein Klima vor, wie es die Klimaszenarien für Bern 2060 prognostizieren (Abbildung 15). Viele der im Mittelmeerraum heimischen Baumarten sind zwar trockenheitsresistent, jedoch nicht winterhart. Aus diesem Grund eignen sich gemäss André (2013) Bäume aus kontinentalen Gebieten mit sommerlicher Hitze- und Trockenheitsphasen sowie starker Winterkälte besser für Siedlungsstandorte, wie denjenigen der Stadt Bern. Bei Potentialarten für das zukünftige Klima von Bern schnitten in der Auswertung der Klimafitness am besten Silber-Linde und Zerr-Eiche ab. Doch Vor- und Nachteile der Spezies müssen abgewogen werden. So gedeiht beispielsweise die Silber-Linde in einem städtischen Umfeld mit ähnlichen klimatischen Bedingungen wie die Berns sehr gut, doch weist die Spezies Astbruchgefahr auf (Kuhn 2015). Damit steigt wiederum das Risiko für erhöhten Pflegeaufwand.

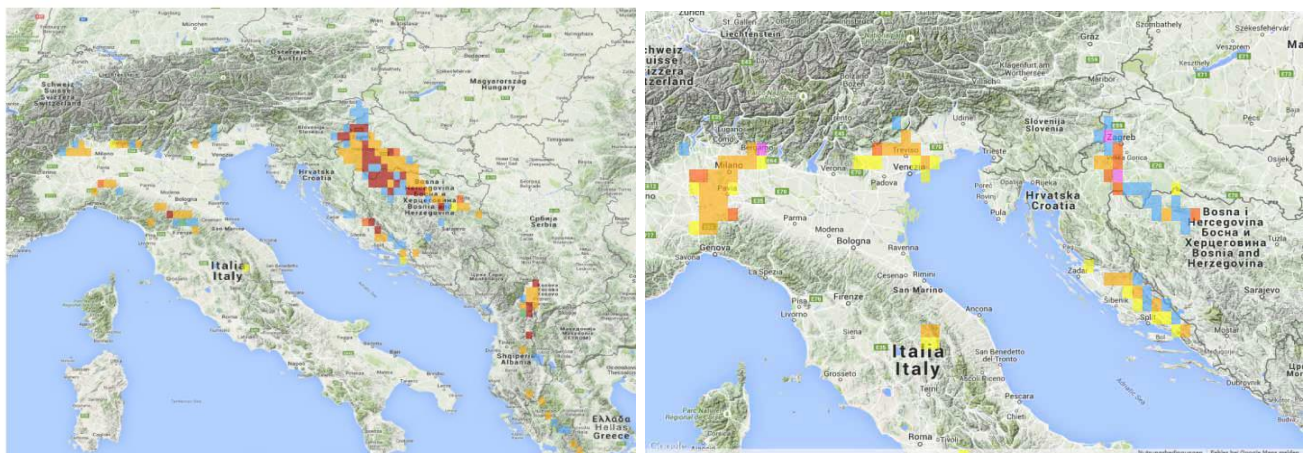


Abbildung 15 Klimaanalogien für Bern. Links: Das Klima in Bern 2045-2075 entspricht dem kontinentalen Klima von Kroatien/Bosnien-Herzegowina 1950-2000 (z.B. Zagreb). Rechts: Das Klima in Bern 2070-2100 entspricht in etwa dem Klima 1950-2000 in Norditalien (z.B. Mailand) blau: Szenario RCP3PD, orange: Szenario A1B/A2, rot: Szenario RCP3PD + A1B/A2.

Die Resultate der Klimafitness der zwanzig häufigsten Baumarten Berns und möglicher Potentialarten sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Liste der klimafitten Baumarten zeigt auch Chancen auf: Von 10 Arten, die einen Klimafit-Wert grösser 0.5 aufweisen, sind nur drei Spezies häufig, also mit mindestens einem Prozent in der Stadt vertreten (Vergleich Abbildung 14). Ohne die Baumartenvielfalt in Bern zu gefährden oder Invasionsgefahr wie bei der Robinie fürchten zu müssen, könnten die Potentialarten Silber-Linde (Klimafit-Wert 0.77), Zerr-Eiche (Klimafit-Wert 0.73), Französischer Ahorn (Klimafit-Wert 0.6), Schneeballblättriger Ahorn oder Orientalische Hainbuche (beide Klimafit-Wert 0.57) vermehrt in Bern gepflanzt werden.

Tabelle 5 Resultate aus dem Klimafit-Stadtbaum-Index (KSI). Der Klimafitness-Wert (KF) ist der Durchschnitt aus Trockenheitstoleranz (TT), Winterhärte (WH) und Stadtstresstoleranz (SST). TS setzt sich zusammen aus natürlichem Habitat und genereller Trockenempfindlichkeit der Baumart. WH schliesst Winterhärtezone und Spätfrostgefährdung ein. SST beinhaltet die Toleranz gegenüber Verdichtung, Salz, Schadstoffen, Krankheiten sowie einem hohen pH-Toleranzbereich. Bei den kursiv gedruckten Baumarten handelt es sich um eine der zwanzig häufigsten Baumarten Berns, die anderen sind mögliche Potentialarten. Die Baumarten wurden mit Werten von 1 bis -1 eingestuft, wobei 1 als am klimafittesten eingestuft werden kann (Mack 2015).

Baumart	KF	TS	WH	SST	Weiteres
<i>Schwarz-Föhre</i>	0.9	1	1	0.6	Als Flachwurzler wirft sie Strassenbelag auf, sehr gut geeignet aber auf Grünflächen; gelegentliches Auftreten der Scleroderris-Krankheit
<i>Feld-Ahorn</i>	0.8	1	1	0.4	Sehr guter Strassenbaum, wenn geringe Wuchshöhe von 10-20m akzeptiert wird; wichtige Nektarquelle für Wild-Bienen; mehltauanfällig; geringe Salzverträglichkeit
Silber-Linde	0.8	1	0.5	0.8	Neigt zur Zwieselbildung und damit zur Astbruchgefahr; kaum Krankheiten; mittlere Spätfrosttoleranz
Zerr-Eiche	0.7	1	1	0.2	Kann auch im Strassenraum Mykorrhiza-Wurzeln bilden, welche für eine gute Nährstoffversorgung wichtig sind; hoher Wert für die urbane Biodiversität; Probleme mit Verdichtung, u.a.
Tatarischer Steppen-Ahorn	0.7	1	1	0.2	Sehr trocken tolerant, in Steppengehölzen heimisch; verträgt Verdichtung nur schlecht; kleinwüchsig
Kirschpflaume	0.7	1	1	0	Sehr trocken tolerant, da natürliches Habitat in Trockenwäldern. Allerdings nur mittlere Salz-, Verdichtungs- und Schadstofftoleranz. Der bedingten Trockentoleranz kann durch sterile Sorten vorgebeugt werden.
Zitter-Pappel	0.6	0.5	1	0.4	Pioniergehölz; bedingte Invasionsgefahr; trocken tolerant, aber nicht in Trockenwäldern heimisch; Astbruchgefahr
Französischer Ahorn	0.6	1	1	0.2	Geringe Salz- und Verdichtungstoleranz führt zu eingeschränkter Stadtstresstoleranz
Schneeballblättriger Ahorn	0.6	1	0.5	0.2	Im Schweizer Jura heimisch; wichtige Nektarquelle für Wild-Bienen; mittlere Spätfrosttoleranz; kommt mit Stadtklima zurecht
<i>Robinie</i>	0.6	1	0.5	0.2	Astbruchgefahr; auf Schwarzer Liste von Inofflora als invasiver Neophyt geführt → nicht mehr pflanzen
Orientalische Hainbuche	0.6	1	0.5	0.6	Nur mittlere Spätfrosttoleranz; Stadtstresstoleranz durch Salzunverträglichkeit verringert
<i>Rot-Eiche</i>	0.5	0	0.5	1	Trocken tolerant, aber nicht in Trockenwäldern heimisch; aus Nordamerika stammend; bedingtes Invasionspotential (Eichelhäher transportiert Eicheln über weite Strecken, gutes Keimvermögen); nur mittlere Spätfrosttoleranz
Blumen-Esche	0.5	1	0.5	0	Sehr trocken tolerant, aber schwache Spätfrost- und Verdichtungstoleranz; kommt mit Schadstoffen zurecht
Schwarz-Pappel	0.5	0	1	0.4	Trocken tolerant, fühlt sich aber in Auengebieten am wohlsten; Bruchgefahr; verträgt Salz, Verdichtung und Schadstoffe mittelmässig; sehr gute Spätfrosttoleranz
Hopfen-Buche	0.5	1	1	-0.6	Da natürliches Vorkommen in Trockenwäldern sehr trockenresistent; erwies sich in Bern als abstrahlungstolerant; sehr gute Spätfrosttoleranz; eine schlechte Salz-, Verdichtungs- und Schadstofftoleranz wie in der Literatur angegeben wurde in Bern nicht beobachtet
<i>Platane</i>	0.4	1	0.5	-0.2	Sehr trockenresistent; sehr gut als Strassenbaum geeignet, braucht jedoch viel Raum zum Wachsen; fehlende Salztoleranz wie in Literatur angegeben wurde in Bern nicht beobachtet
Eschen-Ahorn	0.4	1	0.5	-0.2	Invasiver Neophyt; schwach bei Verdichtung und Salz
<i>Krim-Linde</i>	0.4	0	1	0.2	Sehr gute Spätfrosttoleranz; trocken tolerant aber nicht in Trockenwäldern heimisch; verträgt Salz nur schlecht
Trauben-Eiche	0.4	0.5	0	0.6	Trocken tolerant; eher geringere Spätfrostresistenz; kommt mit Verdichtung, Salz und Schadstoffen gut zurecht
<i>Winter-Linde</i>	0.3	0	1	0	Trocken tolerant aber nicht in Trockenwäldern heimisch; verträgt Spätfrost; schlechte Salzverträglichkeit, in Bern macht man aber generell gute Erfahrungen mit der Winter-Linde; hoher Biodiversitätsfaktor

5 Empfohlene Massnahmen und Ausblick

Grünflächenmanagement und klimaangepasste Stadtentwicklung

Unter Hitzestress leiden nicht nur Bäume in der Stadt, sondern auch Menschen. Neben maximalen Tagestemperaturen sind es die Tropennächte, die vor allem älteren Menschen, Babys und Kleinkindern sowie Kranken in Städten zu schaffen machen. Im Hitzesommer 2003 war die Mortalität gemäss Grize et al. (2005) in der Schweiz um 7% erhöht und gemäss einer Studie in Berlin korrelieren 5% der Todesfälle zwischen 2001 und 2010 in den Sommermonaten mit erhöhten Temperaturen (Scherer et al. 2013). Wie im Rahmen des Projektes *Urban Green & Climate* aufgezeigt werden konnte, leisten Grünflächen einen wichtigen Beitrag zur nächtlichen Abkühlung. Die Modelle weisen darauf hin, dass die Temperaturen in den nächsten hundert Jahren in der Stadt Bern um rund 4°C ansteigen werden und die Anzahl Tropennächte im städtischen Umfeld von ein paar einzelnen Nächten auf etwa 40 pro Jahr zunehmen wird. Die Ökosystemdienstleistung „Kühlung“ durch Grünräume und Bäume in der Stadt wird demnach noch weiter an Bedeutung gewinnen. Damit die Luftzirkulation möglich ist, sollten gemäss Grünraumverantwortlichen die Bäume über eine hohe Astung verfügen und ein geschlossenes Kronendach möglichst vermieden werden. Sog. Savannentyp-Parks dürften den grössten Kühlungseffekt erbringen. Damit die Bäume auch tatsächlich diese wichtigen Funktionen erbringen können, müssen sie möglichst gut mit den Stressfaktoren in Städten (siehe 2.1.3) sowie zunehmender Hitze und Trockenheit klarkommen.

Neben der Baumartenwahl ist es notwendig mithilfe von strategischen Massnahmen für eine klimaangepasste Stadtplanung zu einer Reduktion der Hitzebelastung in der Stadt beizutragen. Eine klimaangepasste Stadtentwicklung erfordert übergreifende Konzepte und Strategien. Neben ökologischen Aspekten ist das Zusammenwirken der unterschiedlichen Grünräume einer Stadt für die Kaltluftproduktion und deren Verteilung wichtig. Die Verbindung von Kaltluftproduktionsflächen mit der dicht bebauten Innenstadt, insbesondere die Vernetzung entlang der Windhauptrichtungen fördert die innerstädtische Durchlüftung. Mittels zusätzlicher Kaltluftschneisen kann zu einer Verbesserung der städtischen Durchlüftung beigetragen werden. Gewässerbegleitende Grünräume sowie Grün- und Freiräume müssen dazu gesichert und erweitert werden. Um diese Massnahmen umzusetzen empfiehlt es sich, Netzwerke aufzubauen, in denen die Akteure bzw. Entscheidungsträger der Grünflächen, der Raum- und Regionalplanung, des Bauwesens, der Siedlungswasserwirtschaft, des Hochwasserschutzes sowie der Verkehrsinfrastrukturplanung zusammenarbeiten können. Zusätzlich sind langfristig gültige Absprachen zwischen benachbarten Gemeinden notwendig beispielsweise für das Freihalten von Frischluftschneisen oder Kaltluftentstehungsgebieten von regionaler Bedeutung. In allen Fällen sollte die Öffentlichkeit intensiv beteiligt werden.

Erhalt und Monitoring der Vitalität des Baumbestandes

Die Untersuchungen in Bern zeigen, dass der städtische Baumbestand insgesamt eine geschwächte bis leicht geschädigte Vitalität aufweist. Einige Baumarten wie beispielsweise Gewöhnliche Rosskastanie, Sommer-Linde, Stiel-Eiche sowie Spitz- und Berg-Ahorn sind bereits jetzt geschwächt und werden mit den Auswirkungen des Klimawandels zunehmend Probleme haben. Für die verminderte Vitalität der Stadtbäume sind kleinräumige „städtebauliche“ Einflussfaktoren, wie Versiegelung und baunaher Bauten sowie Streusalzbelastungen entscheidend. Mit Bewirtschaftungsmassnahmen wie Liegenlassen von Laub (Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit), Verwendung von geeignetem Baumgrubenssubstrat (Reduktion von Verdichtung und Überhitzung) und allenfalls Bewässerung (Reduktion der Trockenheit) können negative Stadteffekte ausgeglichen werden.

Da die Hitzebelastung und Trockenheit dem Klimawandel zunehmen werden, empfiehlt es sich, den Zustand und die Entwicklung des Baumbestandes zu beobachten. Die im Projekt *Urban Green & Climate* angewandten visuellen Baumansprachen haben mehrere Nachteile. Sie sind einerseits sehr zeitaufwendig und andererseits sehr subjektiv. Bis anhin werden in der Stadt Bern aus Kostengründen keine systematischen Einzelbaumbewertungen des gesamten Baumbestandes durchgeführt. Empfehlenswert wäre eine periodische Erfassung von Bäumen an Problemstandorten oder von definierten Stichprobenflächen. Ein jährliches Monitoring von Vitalitätskriterien an Einzelbäumen an Idealstandorten, wie beispielsweise in Parks oder Grünflächen, könnte Korrelationen zwischen den Wetterbedingungen im Frühjahr bzw. im Sommer und der Vitalität des Baumbestandes herstellen. Um die Subjektivität der Baumbewertungen zu minimieren sollten diese regelmässig zwischen den städtischen Baumpflegerinnen abgeglichen werden. Die Indikatoren „Verzweigungsstruktur der Kronenwipfel“, „abgestorbene Äste“ (v.a.

Laubholz, mittel-langfristige Aussage) und „Kronenverlichtung“ (kurzfristige Aussage) erwiesen sich bei den Untersuchungen in Bern als besonders geeignet für eine robuste Vitalitätsbeurteilung. Neben visuellen „Feldaufnahmen“ könnte die Vitalität von Bäumen mittels Infrarotluftbildauswertung ermittelt werden. Diese Methode wird bereits in mehreren deutschen Städten (z.B. Stuttgart, Berlin) erfolgreich angewendet.

Anwendung von Kohlenstoffmodellen und Biomassekarten

Verglichen mit dem Schweizer Wald, der sechsmal mehr Kohlenstoff pro Flächeneinheit speichert (Referenz Siedlungsfläche Bern) und mit einer Sequestration von rund einer Million Tonnen Kohlenstoff pro Jahr eine bedeutende CO₂-Senke darstellt, fällt die Bedeutung von Stadtbäumen als Kohlenstoffspeicher eher bescheiden aus. Angesichts der vielen gewichtigen Ökosystemdienstleistungen von Stadtbäumen ist deren Kohlenstoffspeicherung im Schweizer Kontext als positiver Nebeneffekt zu beurteilen. Vor dem globalen Hintergrund abnehmender Waldflächen und der weltweiten Zunahme der Siedlungsräume, kommt den Bäumen in Siedlungsgebieten eine zunehmend gewichtigere Rolle zu, auch als Kohlenstoffspeicher.

Um quantitative Aussagen zur Entwicklung der grünen Infrastruktur und ihrer Ökosystemdienstleistungen wie der Kohlenstoffspeicherung machen zu können, bedarf es weiterer Monitoring-Systeme. Gemäss Schweizerischer Arealstatistik ist der Anteil Baumflächen im Schweizer Siedlungsgebiet von 8.8% im Jahr 1985 auf 7.9% im Jahr 2009 zurückgegangen, vor allem zu Gunsten von Grasflächen und versiegelten Flächen. Im Siedlungsgebiet der Stadt Bern hat der Anteil Baumflächen im selben Zeitraum von 13.1% auf 15.5% zugenommen, hier vor allem zu Lasten von Grasflächen. Für detailliertere Auswertungen der Entwicklung auf Stufen von Beständen und Einzelbäumen stehen seit 2001 schweizweit luftgestützte Laserscanning Daten (LiDAR) zur Verfügung, aus welchen sich hochpräzise und flächendeckende Kronenhöhenmodelle oder auch abstraktere Charakteristika wie Kronendeckungsgrad, Vegetationshöhe und Grünvolumen ableiten lassen. Mittels LiDAR-Daten wurde der in Stadtbäumen Berns in oberirdischer Biomasse gespeicherte Kohlenstoff auf 14.9 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare geschätzt. Der Wert fällt im Vergleich mit anderen europäischen Städten relativ hoch aus und dürfte aufgrund des hohen Baumbestandes in Bern nicht repräsentativ sein für den Schweizer Siedlungsraum. Eine weitere schweizweite Erhebung von LiDAR Daten ist geplant und würde es ermöglichen eine Veränderung des Grünvolumens und der darin gespeicherten Biomasse abzuleiten.

Identifikation von Problem- und Potentialarten

Entscheidende Kriterien für die Baumartenwahl in einer klimaangepassten Stadtentwicklung sind eine gute Anpassung an die Standortbedingungen von heute und in Zukunft, eine gute Nutzung des zur Verfügung stehenden Platzes langlebig und nicht invasiv zu sein. Die Wichtigkeit der Baumartenwahl angesichts des Klimawandels wurde in einer Umfrage bei Grünraumverantwortlichen sechs grosser Schweizer Städte hervorgehoben. Für einen nachhaltigen Stadtbaumbestand braucht es an den Mikrostandort angepasste Baumarten, den Erfahrungsaustausch zwischen Städten und einen Fokus auf städtebauliche Massnahmen. Es ist nicht möglich *den* klimafitten Baum ausfindig zu machen. Der erfolgversprechendste Ansatz mit Blick in die Zukunft ist eine situativ optimierte Artenwahl. Der aufgrund des Klimawandels zunehmende Trockenstress ist eines der wichtigsten Auswahlkriterien. Die weniger klimafitten Baumarten sollten im Laufe der Zeit durch Ersatzbaumarten ersetzt werden. Wie die Untersuchungen im Rahmen des Projektes zeigen, scheinen kontinentalen Kroatien, wie Zerr-Eiche, Tatarischer Steppen-Ahorn, Schneeballblättriger Ahorn und Orientalische Hainbuche geeignete Kandidaten. Eine breite Palette an Arten verteilt die Risiken und reduziert somit die Verletzlichkeit des Baumbestandes. Auch bietet ein diverser Stadtbaumbestand, zu einem Grossteil bestehend aus einheimischen Arten und Arten aus den benachbarten Florengebiets, die beste Basis für eine vielfältige städtische Tierwelt. Bäume entfalten ihren grössten Wert für die städtische Artenvielfalt in ihrer Altersphase. Vor diesem Hintergrund ist es bei der Artenwahl wichtig, die natürliche Lebensdauer der Standortdynamik Baumarten aus dem anzupassen. Zur Optimierung der Kohlenstoffspeicherung sollten die Bäume möglichst schnellwüchsig und/oder langlebig sein.

Mithilfe von Praxistests sollten Potentialarten aus benachbarten Florengebiets empirisch überprüft werden, um aufzuzeigen, welche Baumarten unter welchen Bedingungen am geeignetsten sind. Ein koordiniertes Vorgehen und ein reger Informationsaustausch sind dabei sehr wichtig, um auf effiziente Weise von den Erfahrungen anderer Städte profitieren zu können. Eine Erweiterung des Klimafit-Stadtbaum-Indexes KSI sollte den Wertungs-Parameter „Abstrahlungstoleranz“ berücksichtigen. Auch Parameter, die zu einem Kühlungseffekt beitragen (z.B. „Evapotranspirationsleistung“, „Kronenarchitektur“ und „Blattflächenindex“)

oder negative Effekte wie „Pollenbildung“ könnten hinzugefügt werden. Eine Unterteilung in Strassen- und Park-Stadtbäume sollte zusätzlich in den Index integriert werden. Dadurch könnten Wertungsparameter, die je nach Standort wichtig oder weniger wichtig sind, wie beispielsweise „Oberflächenwurf durch Wurzeln“, „Astbruchgefahr“, „Mykorrhizabildung bei Teer Belag“ in die Beurteilung aufgenommen werden. Ausserdem sollte das Invasionspotenzial bzw. der Beitrag zur Förderung der Biodiversität von möglichen Potentialarten noch näher untersucht werden und in den KSI einfließen. Um die Zugänglichkeit des KSI auch in anderen Städten zu ermöglichen, sollte eine Internet-Version verfügbar gemacht werden.

Ausblick

Im interdisziplinär gekennzeichneten Aufgabenfeld Urban Forestry gibt es bis anhin nur wenig Erfahrung in integrierter Forschung und Verwaltungsmechanismen für städtische Planer. Das Thema dürfte im Hinblick auf die stark zunehmende Urbanisierung, sowohl in der Schweiz als auch weltweit, in Zukunft von grossem Interesse sein. Die Stadt Bern verfügt über ein ausgeprägtes System an Grün- und Freiraumflächen, die durch die unterschiedliche Bebauungsdichte und Stadtstrukturen ungleich verteilt sind. Um die Auswirkungen der Grün- und Freiräume unter Berücksichtigung deren Anordnung, Vegetationsausstattung und Grösse auf das städtische Klima zu untersuchen und um flächendeckende Aussagen für das gesamte Gebiet der Stadt Bern zu treffen, müssten zusätzliche Messungen durchgeführt und mit Simulationsmodellen kombiniert werden. Heutzutage stehen ausgereifte Modelle zur Beschreibung und Simulation von Stadtklima-Effekten auf verschiedenen Skalen zur Verfügung. Eine Klimaanalyse, in Kombination mit einer Analyse der Betroffenheit in der Bevölkerung (Bevölkerungsdichte, Altersstruktur), würde es erlauben Defizitgebiete zu identifizieren und städtebauliche Strukturen zu ermitteln, die von grosser Bedeutung für ein ausgeglichenes Stadtklima sind.

Aus der Diskussion mit Fachleuten aus der Stadtplanung und der städtischen Grünraumbewirtschaftung entstand die Vision einer lebendigen Stadt mit zahlreichen und qualitativ hochwertigen Grünräumen, reduzierter Versiegelung, welche zusammen mit ihrem Umland als Landschaft betrachtet wird und einen Teil zur klimaneutralen Schweiz beiträgt. Diese Stadt der Zukunft müsste massvoll verdichtet sein und die städtebauliche Planung müsste dem Stadtklima Rechnung tragen. Herausforderungen bestehen in der sektorübergreifenden Problembehandlung und den Zielkonflikten zwischen Bevölkerungszuwachs, Verdichtung und Stadtklima, sowie Energieversorgung und Mobilität. Ein möglicher Lösungsansatz wäre, diese Problemkreise sachbezogen zu diskutieren und auf Quartierebene „Bottom-up“ Lösungen zu finden. Grundsätzlich ist es wünschenswert, dass die Bevölkerung für die Thematik „Stadtklima“ sensibilisiert wird. Mutige Pilot-oder Leuchtturmprojekte sollten als Vorbilder publik gemacht werden und die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis gefördert werden. Die grosse Aufmerksamkeit, die dem *Projekt Urban Green & Climate* im Hitzesommer 2015 von Seiten Medien zukam, zeigt, dass ein grosses Interesse an der Thematik besteht.

Das Bewusstsein um die Schutzwürdigkeit eines guten Stadtklimas und die Bedeutung von Grünflächen und Stadtbäumen ist jedoch immer noch beschränkt. Bezüglich Sensibilisierung und Wertschätzung von städtischen Grünflächen und Bäumen besteht noch grosser Handlungsbedarf, wie eine Umfrage bei der Berner Stadtbevölkerung im Rahmen des Projektes zeigte (Becker 2016). Durch vermehrte Sensibilisierungsmassnahmen könnte die Stadtbevölkerung auf die Wichtigkeit der Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume aufmerksam gemacht werden. Durch die Zuschreibung eines monetären Werts könnten leichter Sponsoren für Grünflächen und Baumpatenschaften gefunden werden. Unter dem Titel „klimafitte Baumarten“ könnten in Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft „Klima-Baumpatenschaften“ verkauft werden. Eine Möglichkeit, die Stadtbevölkerung stärker in die Verantwortung miteinzubeziehen wäre auch, jedem Bewohner und jeder Bewohnerin einen Baum zu schenken, für den sie sorgen müssten. Um den städtischen Grünraum optimal schützen und weiterentwickeln zu können, bräuchte es auch neue Verordnungen auf tiefen Gemeindeebenen.

6 Literaturverzeichnis

Andrä, Helmut (2013): Klima im Wandel - Grün im Wandel. Klimaanpassung in Kommunen am Beispiel der Bäume. Edited by Regionalverband Nordschwarzwald. Available online at http://www.klimamoro.de/fileadmin/Dateien/VerÃ¶ffentlichungen/VerÃ¶ffentlichungen_Phase_II/Moro_Ãff_GrÃ¼n_3.pdf, checked on 5/19/2016.

Bachmann, Martin; Konnerth, Monika; Schmiedinger, Andreas (2009): Vielfalt schaffen, Risiko verringern. Gastbaumarten als Alternativen zur Fichte. In *LWF Wissen* (63), checked on 3/14/2016.

Becker, Lucas (2016): Sind Stadtbäume wichtig für die Berner Stadtbevölkerung? Semesterarbeit, Zollikofen. HAFL.

Böll, Susanne (2015): Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. Projekt "Stadtgrün 2021". Veitshöchheim, checked on 4/16/2016.

Böll, Susanne; Schönfeld, Philipp; Körber, Klaus (2014): Stadtbäume unter Stress. Projekt »Stadtgrün 2021« untersucht Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. Edited by Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Veitshöchheim (LWF aktuell, 98), checked on 7/17/2015.

Bongardt, Benjamin (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen. Dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Hohenwarsleben: Westarp Wissenschaften (Essener Oekologische Schriften, Bd. 24).

Brändli U-B (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern: Bundesamt für Umwelt, BAFU. 312 p.

Bruse, M. (2003): Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken (1), pp. 66–70, checked on 12/2/2014.

Bundesamt für Statistik BFS (2013): Die Bodennutzung in der Schweiz. Resultate der Arealstatistik. Bundesamt für Statistik BFS. Neuchâtel.

Bundesamt für Umwelt BAFU (2015): Invasive gebietsfremde Arten: Anhörung zur nationalen Strategie eröffnet - Bundesamt für Umwelt BAFU. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern. Available online at <http://www.bafu.admin.ch/biodiversitaet/09475/12682/index.html?lang=de&msg-id=58350>, checked on 9/30/2015.

CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Edited by C2SM, Meteoswiss, NCCR Climate, OCCC. Zürich.

Dirr, M. A. (1990): Manual of Woody Landscape Plants: Their Identification, Ornamental Characteristics, Propagation and Uses. Champaign, IL: Stipes Publishing.

Drlik, S. (2010): Klimawandelanpassung der Pflege und Erhaltung öffentlicher Grünanlagen in Großstädten unter Berücksichtigung des Konzepts der Nachhaltigen Entwicklung. untersucht am Fallbeispiel Wien. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Ehmayer, Cornelia (2011): Leitfaden zum nachhaltigen Urbanen Platz. Der Leitfaden bildet den Wissenspool für die "CHECKLISTE zum nachhaltigen Platz". Im Auftrag der Magisterabteilung 22 - Wiener Umweltschutzabteilung. Wien. Available online at <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/nup/pdf/leitfaden.pdf>, checked on 4/15/2015.

EPPO (2016): EPPO Global Database. Switzerland. Available online at <https://gd.eppo.int/country/CH/regulated>.

Friedli, Lukas (2016): Trockenstress bei Stadtbäumen im urbanen Raum. Einfluss von Faktoren wie Stadtklima, Salzeintrag & Baumgruben. Semesterarbeit. Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, checked on 4/13/2016.

Gardi, Oliver; Schaller, Guillaume; Neuner, Matthias; Mack, Sophia (2016): Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern. In *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 167 (2), pp. 90–97. DOI: 10.3188/szf.2016.0090.

- GEO-NET (2012): Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald. Available online at http://www.klimamoro.de/fileadmin/Dateien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Publikatione_aus_den_Modellregionen/Mittlerer_Oberrhein_Norschwarzwald_Leitfaden.pdf, checked on 6/17/2016.
- Gouret, Elise (2014): Recensement des arbres de Berne et leur vulnérabilité aux changements climatiques. Travail de Bachelor. HAFL, Zollikofen. Forsterie, Dangers naturels et forêts de montagne, checked on 10/22/2014.
- Grize, L.; Huss, A.; Thommen, O.; Schindler, C.; Braun-Fahrländer, C. (2005): Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. In *Swiss Med. Wkly.* (135), pp. 200–205, checked on 6/20/2016.
- Gu, L.; Hanson, Paul J.; Mac Post, W.; Yang, Bai; Nemani, Ramakrishna; Pallardy, Stephen G.; Meyers, Tilden (2008a): The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased cold damage in a warming world? In *BioScience* 58 (3), pp. 253–262. Available online at <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/58/3/253.full.pdf>, checked on 6/10/2015.
- Gu, Lianhong; Hanson, Paul J.; Post, W. Mac; Kaiser, Dale P.; Yang, Bai; Nemani, Ramakrishna et al. (2008b): The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased Cold Damage in a Warming World. In *BioScience* 58 (3), p. 253. DOI: 10.1641/B580311.
- Hallegatte, Stéphane; Hourcade, Jean-Charles; Ambrosi, Philippe (2007): Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas. In *Climatic Change* 82 (1-2), pp. 47–60. DOI: 10.1007/s10584-006-9161-z.
- Haymoz, Yves (2015): Visuelle Vitalitäts- und Schadenskontrolle an Berner Stadt-Bäumen. Semesterarbeit. Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, checked on 4/18/2016.
- Heinze, Woldemar; Schreiber, Detlef (1984): Eine neue Kartierung der Winterhärtezonen für Gehölze in Europa. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (75).
- Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M. J. (Eds.) (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014): Climate Change 2014. Synthesis Report. Genf. Available online at http://www.de-ipcc.de/_media/ar5_syr_headlines_en.pdf, checked on 2/27/2015.
- Kehr, R.; Rust, S. (2007): Auswirkungen der Klima-Erwärmung auf die Baumphysiologie und das Auftreten von Krankheiten und Schädlingen. In *Pro Baum* (4), pp. 2–10.
- Kern, Rafael (2014): Vitalitäts- und Schadensmerkmale des Baumbestandes der Stadt Bern. Bachelorarbeit. Berner Fachhochschule BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, checked on 10/29/2014.
- Kiermeier, P.; Bödecker, Nils (Composers) (1996): Die Lebensbereiche der Gehölze. Eingeteilt nach dem Kennziffernsystem. Bund Deutscher Baumschulen. 1 CD-ROM [Windows 3.1, Windows 95, NT] + 1 Booklet. Pinneberg etc: Verlagsgesellschaft Grün ist Leben [etc.].
- Kölling, Christian (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. In *AFZ Der Wald* 23, pp. 1242–1245.
- Körner, Christian; Basler, David; Hoch, Günter; Kollas, Chris; Lenz, Armando; Randin, Christophe F. et al. (2016): Where, why and how? Explaining the low temperature range limits of temperate tree species. In *J Ecol*, pp. n/a-n/a. DOI: 10.1111/1365-2745.12574.
- Krehan, Hannes; Steyrer, Gottfried (2007): Trotz mildem Winter Frostschäden an Bäumen. In *Forstschutz aktuell* (40), pp. 24–25. Available online at http://bfw.ac.at/400/pdf/fsaktuell_40_8.pdf, checked on 5/5/2015.
- Krehan, Hannes; Steyrer, Gottfried (2008): Trotz mildem Winter Frostschäden an Bäumen. In *Forstschutz aktuell* (40), pp. 24–25.
- Kuhn, Peter (03.09.15): Vitalität Stadtbäume. Interview to Sophie Mack. Bern, 03.09.15.

Lenz, Armando; Hoch, Gunter; Vitasse, Yann; Korner, Christian (2013): European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. In *The New phytologist* 200 (4), pp. 1166–1175. DOI: 10.1111/nph.12452.

Mack, Sophie (3.12.13): Carbon sequestration by urban trees. Master thesis advisement. Interview with Oliver Gardi. Zollikofen.

Mack, Sophie (2015): Klimaangepasste Stadtentwicklung: Klimafitte Bäume für Schweizer Städte. Master's Thesis. Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HAFL, checked on 4/13/2016.

Mathys, Hans (Ed.) (1976): Die Temperaturverhältnisse in der Region Bern. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern (Beiträge zum Klima der Region Bern, 3).

Mathys, L.; Thürig, Esther (2013): Baumbiomasse in der Landschaft. Available online at http://www.bafu.admin.ch/climatereporting/00545/01913/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1ad1lZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpjCGen17e2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--, updated on 11/14/2013.

Matzarakis, A. (2008): Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Stadtbäumen. Osnabrücker Baumpflegetage- Aktiv für Bäume. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Osnabrück, 2008, checked on 2/27/2014.

Matzarakis, A.; Streiling, S. (2004): Stadtklimatische Eigenschaften von Bäumen. Falluntersuchungen in Freiburg im Breisgau. In *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 64 (6), pp. 307–310, checked on 2/27/2014.

MeteoSchweiz (2013): Klimaszenarien Schweiz - eine regionale Übersicht. Fachbericht Meteoschweiz (243), checked on 2/27/2014.

MeteoSchweiz (2014): Klima-Trends.

MeteoSchweiz (2015): Klimaszenarien. Zürich. Available online at <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/zukunft/klimaszenarien.html?ort=3063>, checked on 9/11/2015.

Neuner, Matthias Stephan (2014): Vitalität des urbanen Baumbestandes von Bern in Korrelation zum Klima. Master Thesis. Berner Fachhochschule BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, checked on 10/29/2014.

Neuwirth, Carina (2015): Auswirkungen des Klimas auf die Stadtbäume in Wien. (3., 15., 18. und 20. Wiener Gemeindebezirk). Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien, Wien. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau.

OcCC (Ed.) (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Available online at <http://proclimweb.scnat.ch/portal/ressources/291.pdf>, checked on 4/18/2016.

OcCC, (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung) (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. Bern: OcCC.

Oliveira, Sandra; Andrade, Henrique; Vaz, Teresa (2011): The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. In *Building and Environment* 46 (11), pp. 2186–2194. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.04.034.

Petercord, R.; Leonhard, S.; Muck, M.; Lemme, H.; Lobinger, G.; Immler, T.; Konnert, M. (2009) (2009): Klimaänderung und Forstschädlinge. Waldschutz-Klimaprojekt rüstet die Waldwirtschaft für die anstehenden Aufgaben. In *LWF aktuell* (72), pp. 4–7. Available online at <http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldschutz/dateien/a72-klimaerwaermung.pdf>, checked on 4/21/2015.

Remund, Jan (2016): Urban Green & Climate Bern. Modellierung des Stadtklimaeffektes für fünf Standorte in und um die Stadt Bern. Meteotest.

Remund, Jan; Augustin, Sabine (2015): Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. In *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen SZF* 166 (6), pp. 352–360.

- Remund, Jan; Rihm, Beat; Huguenin-Landl, Barbara (2014): Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Schlussbericht des Projektes. Edited by Meteotest, checked on 2/27/2014.
- Reuter, Ulrich; Kapp, Rainer (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Edited by Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur. Available online at <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>, checked on 4/14/2016.
- Roloff, Andreas (Ed.) (2013): Bäume in der Stadt: Ulmer.
- Roloff, Andreas; Gillner, Sten (2013): Klimawandel und Stadtbaumarten. In Andreas Roloff (Ed.): Bäume in der Stadt: Ulmer, pp. 168–179.
- Roloff, Andreas; Gillner, Sten; Vogt, Juliane; Hofman, Mathias (2015): Citree. Edited by TU Dresden, Professur für Forstbotanik. Tharandt. Available online at <https://141.30.134.137/citree/index.php>.
- Rößler, Stefanie (2015): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung durch grüne Infrastruktur. In *Raumforsch Raumordn* 73 (2), pp. 123–132. DOI: 10.1007/s13147-014-0310-y.
- Schaller, Guillaume (2014): Fonctions pour déterminer la biomasse d'arbres urbains à Berne et analyse de la croissance. Travail de bachelor. Berner Fachhochschule BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, checked on 10/29/2014.
- Scharenbroch, B. C. (2012): Urban Trees for Carbon Sequestration. In Rattan Lal, Bruce Augustin (Eds.): Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 121–138.
- Scherer, Dieter (2007): Besseres Stadtklima durch viele Parks. Pressemitteilung Informationsdienst Wissenschaft. Technische Universität Berlin.
- Scherer, Dieter; Fehrenbach, Ute; Lakes, Tobia; Lauf, Steffen; Meier, Fred; Schuster, Christian (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In *Die Erde* 144 (No. 3-4), pp. 238–259, checked on 6/20/2016.
- Schmidt, Olaf (2014): »Urban Forestry« – Chance für die Forstwirtschaft. In *LWF aktuell* (98), pp. 9–11. Available online at http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/wissenstransfer/dateien/a98_urban_forestry_bf_gesch.pdf, checked on 5/5/2015.
- Schütt, Peter (2006): Enzyklopädie der Laubbäume. Sonderausgabe. Hamburg: Nikol.
- Stadt Bern (2014): Das Stadtportal Leben in Bern.
- Stadtgrün Bern (2014): Baumkataster Bern.
- Swae, Jon (2014): San Francisco Urban forest Plan. Planning Department San Francisco. San Francisco. Available online at <http://www.sf-planning.org/index.aspx?page=3166>, checked on 7/18/2015.
- Tabor, Karyn; Williams, John W. (2010): Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. In *Ecological Applications* 20 (2), pp. 554–565. DOI: 10.1890/09-0173.1.
- Wälchli, Geraldine (2012): Ökosystemdienstleistungen als ökonomische Strategie? i-Tree: ein Instrument für die Wertermittlung von Stadtbäumen. Bachelorarbeit. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil. Studienrichtung Umweltingenieurwesen, checked on 10/14/2014.
- Warda, Hans-Dieter (2001): Das grosse Buch der Garten- und Landschaftsgehölze. 2., erw. Aufl. Bad Zwischenahn: Bruns Pflanzen Export.
- Wittig, Stefan; Schuchart, Bastian (2013): Anpassung an den Klimawandel. Natur in der Stadt. Städtische Grünflächen und -Räume. Edited by Umweltbundesamt, KomPass Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (Themenblatt: Anpassung an die Klimaänderung in Deutschland). Available online at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/kompass_themenblatt_natur_in_der_stadt.pdf, checked on 5/3/2016.

ZHAW (2010): Wert und Nutzen von Grünräumen. Edited by Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften im Auftrag der Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnereien und Gartenbauämter VSSG. Available online at http://www.vssg.ch/documents/WN-OeG_Broschuere_kurz_D_2010.pdf, checked on 5/2/2016.

7 Anhang

A) Aufnahmeprotokoll zur Beurteilung der Vitalität

Aufnahmeprotokoll
Tabelle 7: Aufnahmeprotokoll

Flächennummer: _____	Baumnummer: _____	Datum: _____
----------------------	-------------------	--------------

Nr.	Kriterium	Vitalitätsstufe/Schadensstufe					Angabe	Bemerkungen
<i>Allgemeine Angaben</i>								
1	Baumart	-						
2	Umfang in 1 Meter Höhe	-					[cm]	
3	Baumhöhe	-					[m]	
4	Baumalter	-					<input type="checkbox"/> Jugendphase <input type="checkbox"/> Reifephase <input type="checkbox"/> Alterungsphase	
<i>Biotische und abiotische Schäden → separates Protokoll</i>								
5	Schadensprotokoll	-					-	
<i>Standort und Umgebung</i>								
6	Konflikte mit Bauten	1	2	3	-	-		
7	Konflikte mit anderen Bäumen	1	2	3	-	-		
8	Belastungen durch die Umwelt	1	2	3	-	-		
9	Vegetation am Stammfuss	1	2	3	4	5	-	
<i>Vitalitätskriterien, welche eine Vitalitätsminderung des Baumes vermuten lassen</i>								
10	Form des Stammfusses	1	2	3	4	-	-	
11	Anteil von Stammschäden	1	2	3	-	-	-	
12	Neigung des Stammes in Grad [°]	1	2	3	-	-	-	
13	Kronensymmetrie	1	2	3	4	-	-	
<i>Vitalitätskriterien, welche in direktem Zusammenhang mit der Vitalität des Baumes stehen</i>								
14	Stammrisse (Zuwachsindikator)	1	2	3	-	-	-	
15	Anteil von Wurzelschäden	1	2	3	-	-	-	
16	Reduzierte Krone	1	2	3	4	-	-	
17	Kronenverlichtung (Blattverlust)	1	2	3	4	5	-	
18	Vergilbungsgrad (Blattverfärbung)	1	2	3	4	-	-	
19	Verzweigung der Kronenwipfel	1	2	3	4	-	-	
20	Anteil toter und dürre Äste	1	2	3	4	-	-	
21	Blattmasse	1	2	3	-	-	-	
<i>Gesamtbeurteilung</i>								
22	Gesamtbeurteilung Vitalität	1	2	3	4	5	-	

B) Formular zur Schadensaufnahme

Flächennummer: _____	Baumnummer: _____	Datum: _____
----------------------	-------------------	--------------

	kleiner Schaden	grosser Schaden	absterbend oder tot	biologischer Schaden	mechanischer Schaden
Einzeläste					
Krone					
Stamm					
Stammfuss					
Wurzelteller					
Standort					

weitere Bemerkungen:

Stadtklima und Klimawandel

Pilotprojekt Urban Green & Climate – Faktenblatt I



Stadtklima und Klimawandel

Städte und Siedlungsgebiete sind vom Klimawandel besonders betroffen. Einerseits werden klimatische Effekte durch stadtspezifische Gegebenheiten wie beispielsweise die eingeschränkte Windzirkulation, fehlende Beschattung und Grünflächen oder die Absorption der Sonneneinstrahlung durch versiegelte Flächen verstärkt. Andererseits sind Städte wegen der hohen Bevölkerungsdichte besonders empfindlich gegenüber einer klimabedingten Zunahme von Extremereignissen. Wie sich diese Effekte im Detail ausprägen ist stark von Art und Ausmass der baulichen Nutzung, der Stadtstruktur sowie standörtlicher und lokalklimatischer Besonderheiten abhängig. Die Ausprägung eines typischen Stadtklimas ist in erster Linie abhängig von der Stadtgrösse, aber auch von der Geländeform, der Bebauungsstruktur und dem Freiflächenanteil. Die in der Stadt Bern gemessenen Jahres Durchschnittstemperaturen liegen 1 – 2°C über den Temperaturen im ländlichen Umland. In Folge des Klimawandels ist in der Region Bern bis Ende des Jahrhunderts mit einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 4°C zu rechnen.

Folgende Einflussfaktoren sind für das Stadtklima von Bedeutung:

1) Bebauung

Gegenüber der freien Landschaft ist in einer Stadt die Energiebilanz, die im Wesentlichen durch die kurzweilige Einstrahlung der Sonne und die langweilige Abstrahlung von Wärme bestimmt wird, stark verändert. Ein wesentlicher temperaturerhöhender Faktor ist die dichte Bebauung, denn das Baumaterial der Städte hat eine höhere Wärmekapazität, als der Boden oder die Vegetation des Freilandes. Diese Eigenschaft ruft den so genannten Wärmeinsel-Effekt hervor, der zu einer Überwärmung der Stadt gegenüber dem Freiland führt (siehe Abbildung 1). So wird die Wärme während des Tages gespeichert und abends und nachts langsam an die Umgebungsluft abgegeben, was zu einer Verringerung der Abkühlungsrate führt.

Die erheblich grössere Bodenrauigkeit³² einer Stadt im Vergleich zum Umland hat auch stärkere Auswirkungen auf das Windfeld. Die erhöhte Reibung führt einerseits zu einer Abbremsung der Strömung und damit zu geringeren Windgeschwindigkeiten innerhalb der Stadt, was eine Verringerung der Frischluftzufuhr zur Folge hat. Andererseits wird die Luft beim Überströmen der Gebäude zum Aufsteigen gezwungen. Die vielfältigen Strömungshindernisse führen schliesslich auch zu einer erhöhten Luftturbulenz im Stadtgebiet.

³² Bezeichnung für die Unebenheit der Erdoberfläche und der damit verbundenen Reibungswirkung auf die Luftströmung.

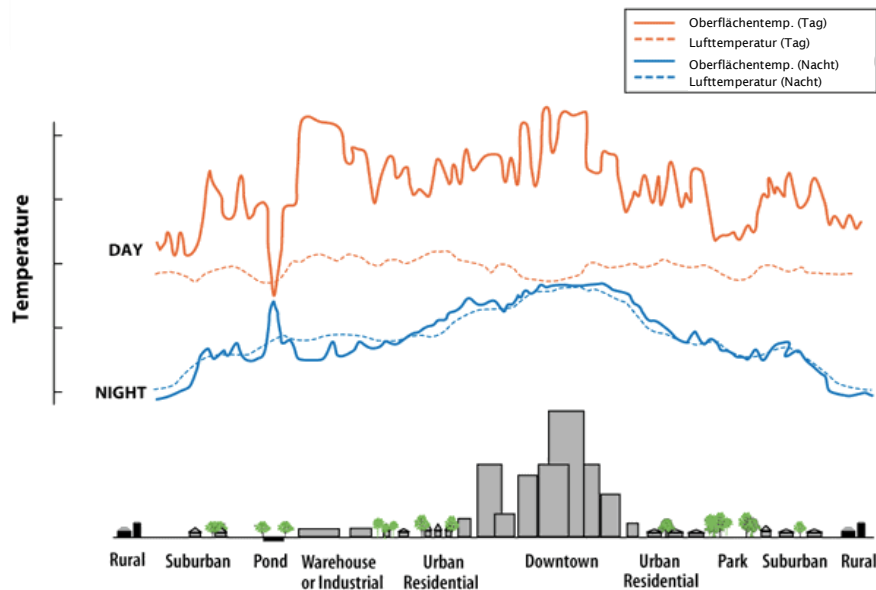


Abbildung 1 Wärmeinseleffekt. Während des Tages äussert sich der Stadteffekt vor allem in einer verstärkten Erwärmung versiegelter Oberflächen. Die Lufttemperatur dahingegen unterscheidet sich nicht gross vom Umland. In der Nacht führt die von den Oberflächen abgegebene Wärme zu einer Erwärmung der bodennahen Luftschichten und verhindert so, zusammen mit einer reduzierten Durchlüftung, die nächtliche Abkühlung (EPA 2016).

2) Versiegelung und fehlende Vegetation

Ein sehr hoher Anteil der Fläche in Stadtzentren ist in der Regel bebaut, asphaltiert oder anderweitig verfestigt. Es sind die Freiflächen, die am Versickerungsprozess beteiligt sind und den Grundwasserspiegel regulieren. Während bei den versiegelten Flächen die Verdunstung auf die Zeit unmittelbar nach den Niederschlägen beschränkt ist, tritt in den Freiflächen eine kontinuierliche Verdunstung auf, bei welcher der Umgebung Energie entzogen wird und somit eine Abkühlung eintritt.

3) Luftverunreinigungen und Abwärme

Die in den Städten ausgestossenen Luftverunreinigungen entstehen hauptsächlich durch motorisierten Verkehr, Heizungen, Gewerbe und Industrie. Zu den wichtigsten Emissionen zählen Stickstoffoxide, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Staub. Neben gesundheitlichen Auswirkungen für die Menschen, trübt die Luftverschmutzung die Atmosphäre und verändert dadurch den örtlichen Strahlungshaushalt. Die hohe Anzahl an Aerosolen unterstützt schliesslich die Niederschlagsbildung und die Nebelhäufigkeit. Durch die Produktion von Abwärme, die im Winter durch das Heizen und im Sommer durch die Nutzung von Klimaanlage entsteht, kommt es zu einer zusätzlichen Erwärmung der Stadtluft.

Klimatope

Mit dem Ansatz der Klimatope werden Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen beschrieben. Diese unterscheiden sich vornehmlich nach dem thermischen Tagesgang, der vertikalen Rauigkeit (Windfeldstörung), der topographischen Lage bzw. Exposition und vor allem nach der Art der realen Flächennutzung. Als zusätzliches Kriterium spezieller Klimatope wird das Emissionsaufkommen herangezogen. Da in besiedelten Räumen die mikroklimatischen Ausprägungen im Wesentlichen durch die reale Flächennutzung und insbesondere durch die Art der Bebauung bestimmt werden, sind die Klimatope nach den dominanten Flächennutzungsarten bzw. baulichen Nutzungen benannt. Tabelle 1 listet verschiedene städtische Klimatope auf.

Tabelle 1 Legende und Beschreibungen der verschiedenen Klimatop-Typen der Stadt (Reuter, Kapp 2012)

Klimatop	Beschreibung
Bahnanlagen-Klimatop	Extremer Temperaturtagesgang, trocken, windoffen, Luftleitbahn
Industrie-Klimatop	Intensiver Wärmeinseleffekt, z.T. starke Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch, hohe Luftschadbelastung (grossräumig bedeutend)
Gewerbe-Klimatop	Starke Veränderung aller Klimaelemente, Ausbildung des Wärmeinseleffektes, teilweise hohe Luftschadbelastung
Stadtkern-Klimatop	Intensiver Wärmeinseleffekt, geringe Feuchte, starke Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch, Luftschadbelastung
Stadt-Klimatop	Starke Veränderung aller Klimaelemente gegenüber dem Freiland, Ausbildung einer Wärmeinsel, Luftschadbelastung
Stadtrand- Klimatop	Wesentliche Beeinflussung von Temperatur, Feuchte und Wind; Störung lokaler Windsysteme
Gartenstadt-Klimatop	Geringer Einfluss auf Temperatur, Feuchte und Wind
Grünanlagen-Klimatop	Ausgeprägter Tagesgang der Temperatur und Feuchte, klimatische Ausgleichsfläche in der Bebauung
Wald-Klimatop	Stark gedämpfter Tagesgang von Temperatur und Feuchte, Frisch-/Kaltluftproduktion, Filterproduktion
Freiland-Klimatop	Ungestörter stark ausgeprägter Tagesgang von Temperatur und Feuchte, windoffen, starke Frisch-/Kaltluftproduktion
Gewässer-Klimatop	Thermisch ausgleichend, hohe Feuchtigkeit, windoffen

Klimaangepasste Stadtentwicklung

Mit dem Ziel eine klimaangepasste Stadtentwicklung zu fördern, sollten bei Stadtplanungsvorhaben lokalklimatische Verhältnisse festgestellt und beim Bau von Siedlungen, Gewerbe- und Industriegebieten, Infrastrukturen und Grünflächen berücksichtigt werden. Um beispielsweise das Zubauen von wichtigen Freiluftschnitten zu verhindern, können die lokalklimatischen Bedingungen mit dem oben beschriebenen Ansatz der Klimatope untersucht werden. Nebst der Sicherstellung der Durchlüftung, spielen Grünflächen und Begrünungen versiegelter Flächen eine zentrale Rolle in einer klimaangepassten Stadtplanung (siehe dazu Faktenblatt II). Eine Schaffung zusätzlicher Grünflächen ist aufgrund des Platzmangels in Städten in den wenigsten Fällen möglich. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger bestehende Freiflächen im städtischen Raum gezielt zu erhalten und als klimatische Ausgleichsflächen aufzuwerten.

Um eine klimaangepasste Stadtentwicklung umzusetzen sind übergreifende Konzepte und Strategien notwendig. Es empfiehlt sich, Netzwerke aufzubauen, in denen die Akteure bzw. Entscheidungsträger der Grünflächenbewirtschaftung, der Stadt- und Regionalplanung, des Bauwesens, der Siedlungswasserwirtschaft, des Hochwasserschutzes sowie der Verkehrsinfrastrukturplanung zusammenarbeiten können. Zusätzlich sind langfristig gültige Absprachen zwischen benachbarten Gemeinden notwendig beispielsweise für das Freihalten von Frischluftschnitten oder Kaltluftentstehungsgebieten auf regionaler Ebene. In allen Fällen sollte die Öffentlichkeit beteiligt werden.

Empfehlungen

- > Verbesserung der Siedlungsdurchlüftung;
- > Grün- und Freiflächen gezielt erhalten und aufwerten, um die Kaltluftzufuhr und -entstehung zu sichern und weiter zu steigern;
- > Reduzierung des Versiegelungsgrades, zur Erhöhung der Bodenwasser-Infiltration und Evapotranspiration;
- > Parkanlagen als Erholungsflächen schaffen, um das lokale Klima in Stadtquartieren zu verbessern;
- > in verdichteten Quartieren baumbestandene Strassenzüge zur Vernetzung der innerstädtischen Grünräume einrichten (situativ optimierte Baumartenwahl, siehe Faktenblatt III);

- > Schaffen von planungsrechtlichen Voraussetzungen für Investitions- und initiieren von Beratungsprogrammen zur Förderung von Dach- und Fassadenbegrünungen;
- > unbefestigte Stadtbahntrassen als Rasengleise anlegen

Best-Practice Beispiele

- > In der Schweiz untersuchte das *Projekt Klimaanalyse Stadt Zürich KLAZ* die Faktoren, welche das Stadtklima beeinflussen und leitete Handlungsfelder und -möglichkeiten ab, welche für die baulichen Weiterentwicklung der Stadt zu beachten sind. Die im Rahmen der KLAZ gewonnenen Erkenntnisse liefern einen Orientierungsrahmen für den Einbezug stadtklimatischer Aspekte in planerische, gestalterische und bauliche Entscheide (<https://www.stadt-zuerich.ch/klaz>).
- > Das Online Beratungswerkzeug *Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS)* des Deutschen Wetterdienstes bietet der Stadtplanung Entscheidungshilfen, um Klimaanpassungsmassnahmen zu identifizieren, zu bewerten und in der Planung umzusetzen (http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/inkas/inkas_node.html).
- > In der *KlimaMORO-Region Mittel- und Südhessen* wurde eine Evaluierung der klimarelevanten Aussagen der Regionalpläne durchgeführt und Konsequenzen für die Weiterentwicklung des regionalplanerischen Instrumentariums abgeleitet sowie ein Handlungsleitfaden Siedlungsklima erarbeitet (<http://www.klimamoro.de/index.php?id=26>).
- > In der *KlimaMORO-Region Mittlerer Oberrhein/Nordschwarzwald* stand der Aufbau eines regionalen Netzwerks zum Klimawandel im Vordergrund unter anderem für den Themenbereich Siedlungsklima. Dazu wurde ein Gutachten zu klimatischen Ausgleichsfunktionen und ein Leitfaden Klimaökologie entwickelt (GEO-NET 2012) (<http://www.klimamoro.de/index.php?id=27>).
- > In der *KlimaMORO-Region Stuttgart* wurde aufbauend auf einer Vulnerabilitätsanalyse und einem regionalen Klimainformationssystem Empfehlungen und Massnahmenvorschläge erarbeitet, einer der Forschungsschwerpunkte war Siedlungsklima (<http://www.klimamoro.de/index.php?id=28>).
- > Unter dem Motto „Stadt begegnet Klimawandel“ wurde ein integriertes Massnahmenkonzept zur klimaangepassten Stadtentwicklung im *KlimaExWoSt-Modellprojekt* Essen entwickelt (https://www.essen.de/leben/umwelt/klima/bundesmodellvorhaben_des_experimentellen_wohnungs_und_staedtebaus_exwost_de.html).
- > In Berlin widmet sich der *Stadtentwicklungsplan Klima* den räumlichen und stadtplanerischen Aspekten des Klimas. Er rückt dabei die Anpassung an dem Klimawandel in den Mittelpunkt, ergänzt aber auch die Anstrengungen im Klimaschutz. Die Inhalte werden laufend durch weitere Planungen, Diskurs- und Vertiefungsprozesse abgestimmt, räumlich und sachlich konkretisiert und umgesetzt (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/de/klima/>).
- > Integrierte Strategien und Massnahmen zur Klimaanpassung für die Verbesserung des klimatischen Komforts der Stadt Essen. Umnutzung von altindustriellen Brachflächen der Stadt zu Kaltluftentstehungsgebieten und Frischluftkorridoren (http://www.klimastadtraum.de/DE/Pilotprojekte/StadtKlimaExWoSt/Essen/essen_node.html).

Weiterführende Literatur und Dokumente

Ehmayer, Cornelia (2011): Leitfaden zum nachhaltigen Urbanen Platz. Der Leitfaden bildet den Wissenspool für die "CHECKLISTE zum nachhaltigen Platz". Im Auftrag der Magisterabteilung 22 - Wiener Umweltschutzabteilung. Wien. Available online at <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/nup/pdf/leitfaden.pdf>, checked on 4/15/2015.

GEO-NET (2012): Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald. Online verfügbar unter http://www.klimamoro.de/fileadmin/Dateien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Publikatione_aus_den_

Modellregionen/Mittlerer_Oberrhein_Norschwarzwald_Leitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 17.06.2016.

Kuttler, Wilhelm (2011a): Climate change in urban areas. Part 2, Measures. In *Environ Sci Eur* 23 (1), p. 21. DOI: 10.1186/2190-4715-23-21.

Kuttler, Wilhelm (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In *Environ Sci Eur* 23 (1), p. 11. DOI: 10.1186/2190-4715-23-11.

Parlow, E.; Vogt, R.; Feigenwinter, C. (2014): The urban heat island of Basel - seen from different perspectives. In *Die Erde* 145 (1-2), pp. 96–110.

Reuter, Ulrich; Kapp, Rainer (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Hg. v. Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur. Online verfügbar unter <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>, zuletzt geprüft am 14.04.2016.

Rubin, Andreas (2015): Einfluss von Vegetation und Gebäuden auf die Windströmung und den Komfort in urbanen Gebieten. Literaturrecherche. im Auftrag von Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich. EMPA. Bern, checked on 5/9/2016.

Das Projekt Urban Green & Climate der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Stadtgrün Bern, Meteotest und RVR-CFC untersuchte die Ökosystemdienstleistungen und die klimabedingte Vulnerabilität des Berner Baumbestandes. Das Projekt wurde im Rahmen des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel durchgeführt.

Städtische Grünflächen im Klimawandel Pilotprojekt Urban Green & Climate – Faktenblatt II



Einfluss von Grünflächen aufs Mikroklima

Städtische Gebiete werden von den Auswirkungen des Klimawandels besonders betroffen (siehe Faktenblatt I). Grünflächen und Bäume können diese Effekte lokal abschwächen und die Lebensqualität in Städten erhöhen. Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, dass Bäume unterschiedliche und überwiegend positive Eigenschaften auf das Mikroklima haben. Die temperatursenkenden Wirkungen ergeben sich aus Verdunstungskühle und Verschattungseffekten. Die Effektivität eines Baumes bezüglich Kühlung ist von der Grösse seines Kronendachs abhängig. Die Bäume sollten jedoch keinen gemeinsamen Kronenschluss aufweisen, welcher die Belüftung behindert. Im Vergleich zu versiegelten Flächen absorbieren Grünflächen einen geringeren Anteil des tagsüber einfallenden Sonnenlichts und geben daher während der Nacht weniger Wärme ab. Ein Park mit hohen und grossen über die Fläche verstreuten Bäumen (sog. Savannentyp) bietet den grössten Effekt, da sich die Fläche tagsüber dank des Schattens nur wenig erwärmt und nachts genügend offen ist, damit die Wärme zurück in die Atmosphäre emittiert werden kann. Dieser nächtliche Abkühlungseffekt von Grünflächen zeigte sich auch bei Untersuchungen in Bern.

Im Winter sind die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland wenig ausgeprägt. Die städtischen Park-Standorte sind tagsüber um etwa 0.5°C wärmer als das Umland, während die Temperaturen der überbauten Standorte in der Innenstadt während der Nacht um 1-1.5°C höher liegen. Im Sommer weisen beide städtischen Standort-Typen in ihren Tagesgängen deutliche Differenzen zum Umland auf (siehe Abbildung 1). Im Vergleich zum Umland sind die Innenstadtstandorte in der Nacht um 2.5°C wärmer, während sie den Tag hindurch sogar um 0.5°C kühler sind. In den Park-Standorten verhält es sich gerade umgekehrt. Dort ist die Lufttemperatur zwar tagsüber um bis zu 1.5°C wärmer als im Umland, dafür findet in der Nacht derselbe Abkühlungseffekt statt.

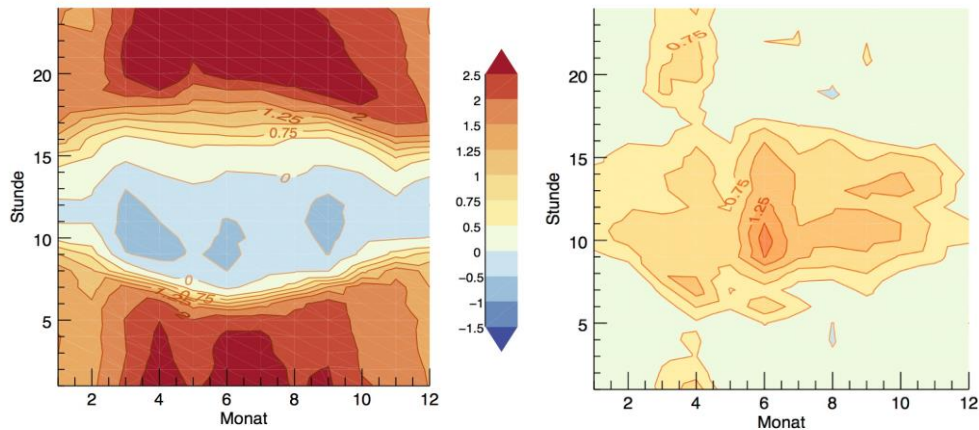


Abbildung 1 Tagesgänge der Temperaturdifferenzen zwischen den Stadt-Standorten und dem Umland am Beispiel von Bern über den Jahresverlauf zeigen den deutlichen mikroklimatischen Unterschied von Parkstandorten im Vergleich zu überbauten Standorten in der Innenstadt. Links: Innenstadt (Bollwerk); rechts: Park (Schosshalde) (Remund 2016).

Insbesondere Freiflächen am Stadtrand können die Zuführung von Frisch- und Kaltluft aus der Umgebung und den Luftaustausch verbessern. Innerhalb der Stadt lässt sich die Luft mittels Grünzügen und dem Vernetzen von Frischluftschneisen verbessern. Freiflächen wird ebenfalls ein positiver Effekt zugeschrieben, um die Schadstoffbelastung in der Stadt zu reduzieren. Flächen mit einem hohen Anteil an Vegetation und einem geringen Versiegelungsgrad bieten sich als gute Kaltluftproduzenten an. Freiflächen speichern 5% der eintreffenden Energie, während versiegelte Flächen 50% aufnehmen und am Morgen danach noch über 25-30% verfügen. Um eine Temperaturdifferenz von 1° K zu kompensieren zu können, brauchen Grünflächen eine Größe zwischen fünf bis zehn Hektaren. In Bern erfüllen insgesamt 19 Grünflächen dieses Kriterium (z.B. Elfenaupark mit 38 ha, Bremgarten-Wald mit circa 150 ha).

Falls keine grossen Flächen vorhanden sind, können kleinere Grünflächen geschaffen, stadträumlich sinnvoll angeordnet und eine enge Vernetzung angestrebt werden, um eine Reduzierung des Wärmeinseleffekts erreichen zu können. Studien zeigen, dass auch kleine Parks über eine Stadt verteilt, eine abkühlende Wirkung über ihre Grünfläche hinaus haben (Oliveira et al. 2011; Bongardt 2006; Scherer 2007). Im Normalfall sind es um die 100m, in einem Stadtpark in Lissabon beträgt die Reichweite bis zu 300m, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

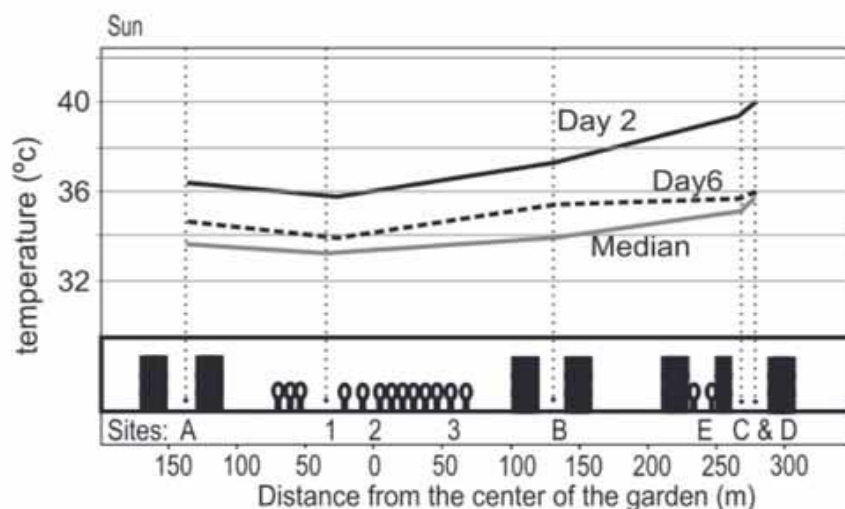


Abbildung 2 Auswirkungen eines Stadtparks in Lissabon auf die Umgebungstemperatur sog. „Park Cooling Effekt“ (Oliveira et al. 2011)

Auswirkungen des Klimawandels auf Grünflächen

Mit der in der Schweiz erwarteten Temperaturzunahme zwischen 0.5 bis 3.6°C bis 2060 werden die Wachstumsbedingungen der Bäume verändert, was sich während der Vegetationsperiode direkt auf die oben beschriebenen Funktionen von Grünflächen auswirkt. Eine verlängerte Vegetationszeit führt zu früherer Blüte im Jahr und einem verspäteten Laubfall. Ersteres kann vermehrte Frühfrostschäden nach sich ziehen. Die höheren Temperaturen ermöglichen zudem Schädlingen eine stärkere Vermehrung sowie bessere Überwinterungsmöglichkeiten. Mit der Temperaturerhöhung wird auch die Zuwanderung von Arten verstärkt, die bisher in unserem Klima nicht existieren konnten. Neobiota (nichtheimische Arten) wie beispielsweise der Götterbaum oder die Kastanienminiermotte werden sehr wahrscheinlich zunehmen.

Schliesslich verändert sich bei höheren Temperaturen und reduziertem Niederschlag in den Sommermonaten auch die Wasserverfügbarkeit der Vegetation und es muss mit einer Zunahme des Trockenstresses für Grünflächen und Strassenbäume gerechnet werden, was sie wiederum anfälliger macht für Krankheiten und Schädlingsbefall. Mittelfristig dürften sich einige Pflanzen und Bäume für die Verwendung im urbanen Raum als klimatisch nicht mehr geeignet erweisen (siehe Faktenblatt III). Indirekte Klimawirkungen betreffen insbesondere den Unterhaltsbedarf bzw. Pflegebedarf für städtische Grünflächen. So wird der Pflegebedarf für Grünflächen im urbanen Raum zunehmen. Denn durch die abnehmenden sommerlichen Niederschläge wird der Bewässerungsbedarf steigen und häufigere Nachpflanzungen nötig werden. Die Veränderung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse wirkt sich dadurch auch auf die Artenzusammensetzung städtischer Grünflächen aus.

Empfehlungen

- > Grün- und Freiflächen bezüglich ihrer lokalklimatischen Bedeutung bewerten, sowie Defizite identifizieren;
- > Lokalklimatisch wichtige Flächen erhalten und gezielt erweitern, um die Kaltluftzufuhr und -entstehung zu sichern und weiter zu steigern;
- > Netzwerk von Parkanlagen als Erholungsflächen schaffen, um das lokale Klima in Stadtquartieren zu verbessern und den Bewohnern zu ermöglichen in kurzen Distanzen Abkühlung zu finden;
- > auf versiegelten Flächen Entsiegelungen und Begrünungen prüfen und umsetzen;
- > in verdichteten Quartieren baumbestandene Strassenzüge zur Vernetzung der innerstädtischen Grünräume einrichten;
- > Schaffen von planungsrechtlichen Voraussetzungen für Investitions- und initiieren von Beratungsprogrammen zur Förderung von Dach- und Fassadenbegrünungen;
- > Unbefestigte Stadtbahntrassen als Rasengleise anlegen;
- > verbinden von in Reihen ausgerichteten Baumgruben, um den Raum zwischen den Bäumen in Baumreihen auch für das Wurzelwachstum freizugeben;
- > situativ optimierte Artenwahl (siehe Faktenblatt III);
- > effiziente Bewässerung an Problemstandorten;

Eine klimaangepasste Stadtentwicklung erfordert übergreifende Konzepte und Strategien. Es empfiehlt sich, Netzwerke aufzubauen, in denen die Akteure bzw. Entscheidungsträger der Grünflächen, der Raum- und Regionalplanung, des Bauwesens, der Siedlungswasserwirtschaft, des Hochwasserschutzes sowie der Verkehrsinfrastrukturplanung zusammenarbeiten können. Zusätzlich sind langfristig gültige Absprachen zwischen benachbarten Gemeinden notwendig beispielsweise für das Freihalten von Frischluftschneisen oder Kaltluftentstehungsgebieten. In allen Fällen sollte die Öffentlichkeit intensiv beteiligt werden.

Best-Practice Beispiele

- > GRaBS – Green and Blue Space Adaptation for Urban Areas and Eco Towns untersucht Möglichkeiten der Anpassung der „grünen Infrastruktur“ in Ballungszentren. Datenbank mit Fallstudien zu Anpassungsmassnahmen, Internet-Tool zur Bewertung der Risiken durch Klimawandel und Leitfaden (<http://www.grabs-eu.org>).
- > StadtKlimaWandel – Projekt für besseres Klima und mehr Lebensqualität in Städten. Ziel originelle und ökologische Massnahmen zu entwerfen mit denen verschiedene Akteure

(Einzelpersonen, Gemeinden und Stadtplaner) auf den Klimawandel reagieren können (https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/Stadtklimawandel/nabu_broschuere_s_tadtklimawandel_finalweb.pdf).

- > Das Modellvorhaben Ex-Wo-St in Bad Liebenwerda gliedert sich in mehrere Projektbausteine, wie mit der Funktion von Stadtgrün in den Siedlungszusammenhängen, der Sensibilisierung der Bevölkerung für Fragen der Wirkungen des Klimawandels und der klimawandelgerechten Umsetzung der Erkenntnisse in den Landschaftsplan (<http://www.badliebenwerda.de/stadtentwicklung/exwost-projekt/arbeitsfelder/>).

Weiterführende Literatur und Dokumente

Bongardt, Benjamin (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen. Dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Hohenwarsleben: Westarp Wissenschaften (Essener Oekologische Schriften, Bd. 24).

Oliveira, Sandra; Andrade, Henrique; Vaz, Teresa (2011): The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. In *Building and Environment* 46 (11), pp. 2186–2194. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.04.034.

Remund, Jan (2016): Urban Green & Climate Bern. Modellierung des Stadtklimaeffektes für fünf Standorte in und um die Stadt Bern. Meteotest.

Rößler, Stefanie (2015): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung durch grüne Infrastruktur. In *Raumforsch Raumordn* 73 (2), pp. 123–132. DOI: 10.1007/s13147-014-0310-y.

Rubin, Andreas (2015): Einfluss von Vegetation und Gebäuden auf die Windströmung und den Komfort in urbanen Gebieten. Literaturrecherche. im Auftrag von Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich. EMPA. Bern, checked on 5/9/2016.

Scherer, Dieter (2007): Besseres Stadtklima durch viele Parks. Pressemitteilung Informationsdienst Wissenschaft. Technische Universität Berlin.

Wittig, Stefan; Schuchart, Bastian (2013): Anpassung an den Klimawandel. Natur in der Stadt. Städtische Grünflächen und -Räume. Edited by Umweltbundesamt, KomPass Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (Themenblatt: Anpassung an die Klimaänderung in Deutschland). Available online at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/kompass_the_menblatt_natur_in_der_stadt.pdf, checked on 5/3/2016.

Das Projekt Urban Green & Climate der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Stadtgrün Bern, Meteotest und RVR-CFC untersuchte die Ökosystemdienstleistungen und die klimabedingte Vulnerabilität des Berner Baumbestandes. Das Projekt wurde im Rahmen des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel durchgeführt.

Urbane Baumarten und Klimawandel Pilotprojekt Urban Green & Climate – Faktenblatt III



Geeignete Baumarten für extreme Stadtstandorte

Stadtbäume sind seit jeher einer Vielzahl von vitalitätshemmenden Stressfaktoren ausgesetzt. Sie leben in einem künstlichen Umfeld, in dem das Wurzelwachstum durch räumlich begrenzte Baumgruben eingeschränkt wird und Bodenverdichtung sowie Bodenversiegelung die Wasserversorgung sowie den Gasaustausch erschweren. Hinzu kommen hohe Temperaturen in den Sommermonaten welche durch nächtliche Abstrahlung von Wärme aus der bebauten Umwelt verstärkt werden (siehe Faktenblatt I). Infolge zeigen Stadtbäume häufig Symptome von Trockenstress und ungenügender Nährstoffaufnahme (siehe Abbildung 1). Hinzu kommen Schadstoffemissionen, Urin- und Salzbelastungen sowie Beschädigungen im Wurzel-, Stamm- und Kronenbereich. Aufgrund der zum Teil sehr schwierigen Standortbedingungen gilt grundsätzlich für die Verwendung von Bäumen in der Stadt und insbesondere im Strassenraum: je anspruchsloser die Baumarten in Bezug auf Boden, Nährstoffe und Klima sind, desto besser eignen sie sich.

Aus Gründen der Sicherheit für Verkehr und Fussgänger gibt es in Städten zusätzliche Anforderungen an Strassenbäume, die unabhängig von den pflanzenbaulichen Aspekten für oder gegen eine Verwendung sprechen. Beispiele sind Wuchsverhalten, Astbrüchigkeit, Art des Laubes oder der Blüten und Früchte. Für die Auswahl spielen ausserdem ästhetische Erwartungen, denen Bäume in der Stadt entsprechen sollten und die für Abwechslung im Strassenbild sorgen, sowie kulturelle und historische Bedeutungen von einzelnen Baumarten- und Sorten eine Rolle. Deshalb ist es wichtig, dass die Baumschulen ein breites Sortiment unterschiedlichster Arten und Sorten, aber auch Wuchsformen und Grössen produzieren, denn erst ein breites und tiefes Sortiment macht es möglich, den jeweils besten Baum für den richtigen Standort auswählen zu können. Auch aus ökologischen Gründen empfiehlt es sich, möglichst viele unterschiedliche Bäume zu pflanzen. Eine hohe Artenvielfalt bietet das grösste Potenzial für die Widerstandsfähigkeit des städtischen Baumbestandes gegenüber Krankheiten und Schädlingen. Darüber hinaus ist eine hohe pflanzliche Artenvielfalt die Voraussetzung, um Lebensräume für Insekten und wild lebende Tiere in Städten zu schaffen bzw. zu erhalten. Ein besonderer Augenmerk bei der Artenwahl muss auf das

Ausbreitungsverhalten der Bäume gelegt werden: Bäume mit einem invasiven Potential können problematisch werden.

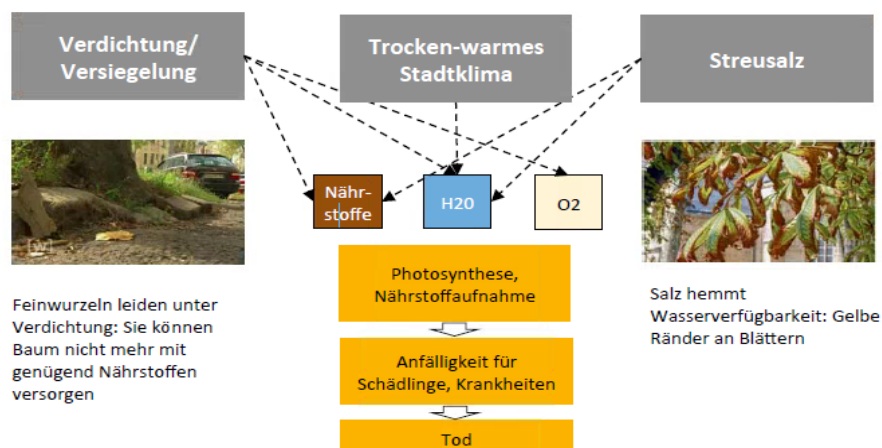


Abbildung 1 Städtische Umweltfaktoren die mit Trockenstress im Zusammenhang stehen und resultierende Auswirkungen für Stadtbäume (Roloff 2013)

Baumvitalität und Klimawandel

Vor dem Hintergrund des bereits stattfindenden Klimawandels stellt sich die Frage, wie Park- und Strassenbäume, die schon jetzt teilweise extremen Bedingungen ausgesetzt sind, mit weiteren Verschlechterungen ihrer Standortbedingungen zurecht kommen werden. Durch die sich bereits abzeichnenden klimatischen Veränderungen mit zunehmenden Trockenperioden im Sommer und insgesamt steigenden Durchschnittstemperaturen und Extremwetterereignissen wird die Stresssituation der Stadtbäume noch verstärkt. Neben direkten Auswirkungen auf die Vitalität steigt mit zunehmendem Stress auch die Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen. Mit zunehmenden Witterungsextremen steigt zudem das Risiko für schwere Sturmschäden. Es zeichnet sich jetzt schon ab, dass eine Reihe von klassischen Stadtbaumarten in unseren Breiten den zukünftigen Anforderungen nicht mehr gewachsen sein oder gänzlich ausfallen wird (Bsp. Eschentriebsterben).

Was ist Vitalität?

Vitalität ist die Lebenskraft eines Baumes. Wie gut schafft er es, sich an seine Umgebung anzupassen, bzw. diese möglichst optimal zu nutzen? Wie widerstandsfähig ist er gegenüber Krankheiten und Schädlingen? Wie steht es um seine Regenerationsfähigkeit? Ein robuster Indikator für die Vitalität ist die Kronen- und Verzweigungsstruktur. Sie spiegelt die Kurztriebbildung als eine Reaktion auf ungünstige Umweltbedingungen, Stress oder Alter wider.

Im Pilotprojekt *Urban Green & Climate* konnte für den Berner Baumbestand anhand einer Stichprobeninventur insgesamt eine geschwächte bis leicht geschädigte Vitalität ermittelt werden. Nadelhölzer schlossen etwas besser ab als Laubhölzer. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Vitalität grundsätzlich von kleinstandörtlichen Faktoren abhängt. Die Naturnähe des Standorts? hatte einen höheren Einfluss auf die Vitalität als die Baumart. Bäume an Strassenkreuzungen und ÖV-Haltestellen weisen insgesamt die schlechteste Vitalität auf. Faktoren die in signifikanter Weise zu Trockenstresssymptomen führen sind Bodenversiegelung innerhalb des Wurzelbereiches und sich innerhalb einer halben Baumlänge befindliche Objekte die rückstrahlen und zur Überwärmung führen können.

Geeignete Baumarten für die Herausforderungen der Zukunft

Wie die Untersuchungen zur Vitalität des Berner Baumbestandes zeigen, sind bereits heute einige Baumarten vom Klimawandel betroffen. Gemäss Mack (2015) weisen 18% der Spezies (Gewöhnliche Rosskastanie *Aesculus hippocastanum*, Sommer-Linde *Tilia platyphyllos* und Berg-Ahorn *Acer pseudoplatanus*) des Berner Baumbestandes nicht die für die Anpassung an den Klimawandel notwendige Trockenheits-, Stadtstress-, und Spätfrosttoleranz auf. Um das existierende Repertoire der Berner Stadtbäume zu erweitern, wurde im Projekt Urban Green &

Climate mithilfe des Konzeptes der Klimaanalogue nach möglichen Zukunftsbaumarten gesucht. Bei der Klimaanalogue nach Hallegatte et al. (2007) wurde unter Berücksichtigung der Klimaszenarien für Bern das Baumvorkommen an Standorten untersucht, an welchen Klimabedingungen herrschen die mit den für Bern projizierten vergleichbar sind. Auf Basis von Durchschnittstemperatur, Niederschlag und jeweiliger Saisonalität scheint, dass Standorte im kontinentalen Kroatien (z.B. Zagreb) / Bosnien-Herzegowina am ehesten dem für 2060 projizierten Klima in Bern entsprechen. Bei Potentialarten für das zukünftige Klima von Bern schnitten in der Auswertung der Klimafitness am besten Silber-Linde *Tilia tomentosa* und Zerr-Eiche *Quercus cerris* ab. Doch Vor- und Nachteile der Spezies müssen abgewogen werden. So gedeiht beispielsweise die Silber-Linde in einem städtischen Umfeld mit ähnlichen klimatischen Bedingungen wie in Bern sehr gut, doch weist die Spezies Astbruchgefahr auf, wodurch sich der Pflegeaufwand erhöht. Die Klimafitness der zwanzig häufigsten Baumarten Berns und möglicher Potentialarten sind in Tabelle 1 am Ende des Faktenblatts zusammengefasst.

Empfehlungen

- > Artenwahl an Standort und Zielvorstellungen anpassen und Klimafitness berücksichtigen;
- > auf versiegelten Flächen Entsiegelungen und Begrünungen prüfen und umsetzen;
- > Breites Sortiment unterschiedlichster Baumarten und Sorten, von Wuchsformen und Grössen in Baumschulen;
- > Gezielte Zucht trockenheitsresistenter Sorten;
- > Diversifizierung städtischer Baumbestände (Arten / Sortenvielfalt)
- > Erhöhung genetischer Vielfalt durch Sämlinge anstelle von Veredelungen
- > Durchführen koordinierter Strassenbaumtests
- > Erfahrungsaustausch zwischen verschiedenen Städten und Akteuren,
- > Monitoring Baumvitalität (Früherkennung),
- > Monitoring Ausbreitungsverhalten / Invasionspotential.

Strassenbaumlisten, Datenbanken und Versuchspflanzungen

- > Die *Strassenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK)* zielt darauf ab, Erfahrungen, neue wissenschaftliche Daten über Wachstum, Resistenz, Grösse und Verwendbarkeit von Stadtbäumen zusammenzutragen. Dabei sollen die sich ändernden Rahmenbedingungen durch den Klimawandel und deren Folgen berücksichtigt werden
- > Die Stadt Zürich hat unter Berücksichtigung der speziellen Verhältnisse in der Stadt Zürich auf Basis der GALK-Strassenbaumliste entsprechende *Strassenbaumlisten* zu „Empfohlenen Baumarten“ und „Nicht empfohlenen Baumarten“ zusammengestellt (https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/angebote_u_beratung/beratung/strassenbaeume.html).
- > Die Datenbank *Citree* der Technischen Universität München zeigt mögliche Bäume und Sträucher für städtische Standorte auf. Dabei kann der gewünschte Standort charakterisiert werden und zusätzliche Anforderungen (beispielsweise zum Erscheinungsbild) gewählt werden (<http://citree.ddns.net/index.php>).
- > In Grossbritannien bietet eine ähnliche Datenbank *The Right Trees for Changing Climate* Stadtplanern, Landschaftsarchitekten und anderen Praktikern Entscheidungshilfen bei der Baumartenwahl in urbanen Gebieten (<http://www.righttrees4cc.org.uk/default.aspx>).
- > Die Projekte *Stadtgrün 2021* und *Klimawandel und Baumsortimente der Zukunft* führen systematische Versuchspflanzungen von Potentialarten und -sorten hinsichtlich ihrer Klimatoleranz (z.B. Trockenstresstoleranz, (Spät-) Frosthärte etc.) bzw. Anfälligkeit gegenüber Krankheiten (Krankheits- und Schädlingsanfälligkeit) an verschiedenen Standorten in Deutschland durch. Weitere Informationen zu den Projekten bei Böll (2015) und unter (<http://www.lksh.de/gartenbau/baumschulversuche/klimawandel-und-gehoelzsortimente-der-zukunft/>).

Weiterführende Literatur und Dokumente

Böll, Susanne (2015): Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. Projekt "Stadtgrün 2021". Veitshöchheim, zuletzt geprüft am 16.04.2016.

GALK, (Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz) (2015): GALK Straßenbaumliste. Arbeitskreis Stadtbäume. Online verfügbar unter http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/.

Hallegatte, Stéphane; Hourcade, Jean-Charles; Ambrosi, Philippe (2007): Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas. In: *Climatic Change* 82 (1-2), S. 47–60. DOI: 10.1007/s10584-006-9161-z.

Haymoz, Yves (2015): Visuelle Vitalitäts- und Schadenskontrolle an Berner Stadt-Bäumen. Semesterarbeit. Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, zuletzt geprüft am 18.04.2016.

Kern, Rafael (2014): Vitalitäts- und Schadensmerkmale des Baumbestandes der Stadt Bern. Bachelorarbeit. Berner Fachhochschule BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, zuletzt geprüft am 29.10.2014.

Mack, Sophie (2015): Klimaangepasste Stadtentwicklung: Klimafitte Bäume für Schweizer Städte. Master's Thesis. Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HAFL, zuletzt geprüft am 13.04.2016.

Neuner, Matthias Stephan (2014): Vitalität des urbanen Baumbestandes von Bern in Korrelation zum Klima. Master Thesis. Berner Fachhochschule BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, zuletzt geprüft am 29.10.2014.

Roloff, Andreas (Hg.) (2013): Bäume in der Stadt: Ulmer.

Das Projekt Urban Green & Climate der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Stadtgrün Bern, Meteotest und RVR-CFC untersuchte die Ökosystemdienstleistungen und die klimabedingte Vulnerabilität des Berner Baumbestandes. Das Projekt wurde im Rahmen des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel durchgeführt.

Tabelle 1 Potentialarten für das künftige Klima von Bern. Die Klimafitness (KF), setzt sich aus dem gemittelten Wert der Indizes für Trockenheitstoleranz (TS), Winterhärte (WH) und Stadtstresstoleranz (SST) zusammen. SST beinhaltet die Toleranz gegenüber Verdichtung, Salz, Schadstoffen, Krankheiten sowie pH-Toleranz. Bei den fett gedruckten Baumarten handelt es sich um eine der zwanzig häufigsten Baumarten Berns, die anderen sind mögliche Potentialarten. Die Baumarten wurden literaturbasiert Werte von -1 bis 1 zugeteilt, wobei 1 als am klimafittesten eingestuft werden kann (Mack 2015).

Baumart	KF	TS	WH	SST	Weiteres
<i>Schwarz-Föhre - Pinus nigra</i>	0.9	1	1	0.6	Als Flachwurzler wirft sie Strassenbelag auf, sehr gut geeignet aber auf Grünflächen; gelegentliches Auftreten der Sclerodermis-Krankheit
<i>Feld-Ahorn - Acer campestre</i>	0.8	1	1	0.4	Sehr guter Strassenbaum, wenn geringe Wuchshöhe von 10-20m akzeptiert wird; wichtige Nektarquelle für Wild-Bienen; mehltauanfällig; geringe Salzverträglichkeit
<i>Silber-Linde - Tilia tomentosa</i>	0.8	1	0.5	0.8	Neigt zur Zwieselbildung und damit zur Astbruchgefahr; kaum Krankheiten; mittlere Spätfrosttoleranz
<i>Zerr-Eiche - Quercus cerris</i>	0.7	1	1	0.2	Kann auch im Strassenraum Mykorrhiza-Wurzeln bilden, welche für eine gute Nährstoffversorgung wichtig sind; hoher Wert für die urbane Biodiversität; Probleme mit Verdichtung, u.a.
<i>Tatarischer Steppen-Ahorn - Acer tataricum</i>	0.7	1	1	0.2	Sehr trocken tolerant, in Steppengehölzen heimisch; verträgt Verdichtung nur schlecht; kleinwüchsig
<i>Kirschkpflaume - Prunus cerasifera</i>	0.7	1	1	0	Sehr trocken tolerant, da natürliches Habitat in Trockenwäldern. Allerdings nur mittlere Salz-, Verdichtungs- und Schadstofftoleranz. Der bedingten Trocken toleranz kann durch sterile Sorten vorgebeugt werden.
<i>Zitter-Pappel - Populus tremula</i>	0.6	0.5	1	0.4	Pioniergehölz; bedingte Invasionsgefahr; trocken tolerant, aber nicht in Trockenwäldern heimisch; Astbruchgefahr
<i>Französischer Ahorn - Acer monosperulatum</i>	0.6	1	1	0.2	Geringe Salz- und Verdichtungstoleranz führt zu eingeschränkter Stadtstresstoleranz
<i>Schneeballblättriger Ahorn - Acer opalus</i>	0.6	1	0.5	0.2	Im Schweizer Jura heimisch; wichtige Nektarquelle für Wild-Bienen; mittlere Spätfrosttoleranz; kommt mit Stadtklima zurecht
<i>Robinie - Robinia pseudoacacia</i>	0.6	1	0.5	0.2	Astbruchgefahr; auf Schwarzer Liste von Inflorea als invasiver Neophyt geführt → nicht mehr pflanzen
<i>Orientalische Hainbuche - Carpinus orientalis</i>	0.6	1	0.5	0.6	Nur mittlere Spätfrosttoleranz; Stadtstresstoleranz durch Salzunverträglichkeit verringert
<i>Rot-Eiche - Quercus rubra</i>	0.5	0	0.5	1	Trocken tolerant, aber nicht in Trockenwäldern heimisch; aus Nordamerika stammend; bedingtes Invasionspotential (Eichelhäher transportiert Eicheln über weite Strecken, gutes Keimvermögen); nur mittlere Spätfrosttoleranz
<i>Blumen-Esche - Fraxinus ornus</i>	0.5	1	0.5	0	Sehr trocken tolerant, aber schwache Spätfrost- und Verdichtungstoleranz; kommt mit Schadstoffen zurecht
<i>Schwarz-Pappel - Populus nigra</i>	0.5	0	1	0.4	Trocken tolerant, fühlt sich aber in Auengebieten am wohlsten; Bruchgefahr; verträgt Salz, Verdichtung und Schadstoffe mittelmässig; sehr gute Spätfrosttoleranz
<i>Hopfen-Buche - Ostrya carpinifolia</i>	0.5	1	1	-0.6	Da natürliches Vorkommen in Trockenwäldern sehr trockenresistent; erwies sich in Bern als abstrahlungstolerant; sehr gute Spätfrosttoleranz; eine schlechte Salz-, Verdichtungs- und Schadstofftoleranz wie in der Literatur angegeben wurde in Bern nicht beobachtet
<i>Platane - Platanus x hispanica</i>	0.4	1	0.5	-0.2	Sehr trockenresistent; sehr gut als Strassenbaum geeignet, braucht jedoch viel Raum zum Wachsen; fehlende Salztoleranz wie in Literatur angegeben wurde in Bern nicht

					beobachtet
Eschen-Ahorn - <i>Acer negundo</i>	0.4	1	0.5	-0.2	Invasiver Neophyt; schwach bei Verdichtung und Salz
Krim-Linde - <i>Tilia x euchlora</i>	0.4	0	1	0.2	Sehr gute Spätfrosttoleranz; trocken tolerant aber nicht in Trockenwäldern heimisch; verträgt Salz nur schlecht
Trauben-Eiche - <i>Quercus petraea</i>	0.4	0.5	0	0.6	Trockentolerant; eher geringere Spätfrostresistenz; kommt mit Verdichtung, Salz und Schadstoffen gut zurecht
Winter-Linde - <i>Tilia cordata</i>	0.3	0	1	0	Trockentolerant aber nicht in Trockenwäldern heimisch; verträgt Spätfröste; schlechte Salzverträglichkeit, in Bern macht man aber generell gute Erfahrungen mit der Winter-Linde; hoher Biodiversitätsfaktor

Stadtbäume für den Klimaschutz Pilotprojekt Urban Green & Climate – Faktenblatt IV



CO₂-Aufnahme und -Speicherung durch Bäume

Bäume spielen in Städten als Schattenspender und Luftfilter eine wichtige Rolle zur Verbesserung des innerstädtischen Klimas. Zudem entziehen Bäume während des Wachstums der Luft das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) und wandeln dieses über die Photosynthese in Biomasse um. Ein grosser Baum kann so über seine Lebensdauer an die 30 Tonnen CO₂ der Atmosphäre entziehen und in seiner Biomasse speichern. Die Wachstumsleistung von Bäumen ist sehr variabel und wird in erster Linie von Baumart und Standort bestimmt. Im Schnitt entzieht ein wachsender Baum der Atmosphäre etwa 50 kg CO₂ pro Jahr. Es bräuchte um die 100 solcher Bäume pro Person um die Emissionen von fünf Tonnen CO₂ zu absorbieren, die jede Schweizerin und jeder Schweizer gemäss Treibhausgasinventar im Mittel übers Jahr verursacht. Durch die Einlagerung von CO₂ in der Biomasse leistet jeder einzelne Baum einen bescheidenen Beitrag zum Klimaschutz. Relevant wird dieser Beitrag jedoch erst in der Summe der Bäume. Welche Rolle spielen Stadtbaum-Bestände in dieser Hinsicht?

Wissenslücke ausserhalb des Waldes

Die Schweiz hat sich gegenüber der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) verpflichtet, die Quellen und Senken von CO₂ im Bereich Landnutzung und Landnutzungsänderungen zu quantifizieren und jährlich in einem Treibhausgasinventar zu rapportieren. Mit dem Schweizerischen Landesforstinventar ist eine gute Datenbasis für den Schweizer Wald vorhanden. Im Nichtwaldareal besteht jedoch eine markante Informationslücke hinsichtlich des in Baumbiomassen gespeicherten Kohlenstoffes und dessen Veränderung über die Zeit. In der Schweiz befinden sich 6% der Bäume ausserhalb des Waldes, ein grosser Teil davon im Siedlungsgebiet. Bisher konnte ihre Biomasse nur grob auf Basis von Standardwerten abgeschätzt werden. Wie die Pilotstudie „Urban Green & Climate“ in Bern zeigt, erlauben schweizweit verfügbare Laser-Scanning Daten (LiDAR) die Ermittlung des Grünvolumens städtischer Baumbestände, woraus sich die Biomasse und der darin eingelagerte Kohlenstoff mit grosser Genauigkeit ableiten lassen. Der in Bern gefundene Wert für den in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoff beträgt 1 kg C pro m³ Grünvolumen. Wiederholte LiDAR-Erhebungen sowie für die Schweiz repräsentative Referenzdaten würden es erlauben, die Veränderung des Grünvolumens über die Zeit, also die Zu- bzw. Abnahme des Kohlenstoffspeichers und entsprechende CO₂-Quellen und -Senken schweizweit zu beziffern.

Bedeutung von Stadtbaumbeständen für den Klimaschutz

Untersuchungen im Bern haben gezeigt, dass im Siedlungsraum pro Hektare durchschnittlich 15 Tonnen Kohlenstoff in oberirdischen Baumteilen gespeichert ist (siehe auch Abbildung 1), also sechsmal weniger als in Schweizer Waldflächen. Der im Mittel in Berner Stadtbäumen auf einer Hektare gespeicherte Kohlenstoff entspricht den jährlichen CO₂-Emissionen von 11 Personen.

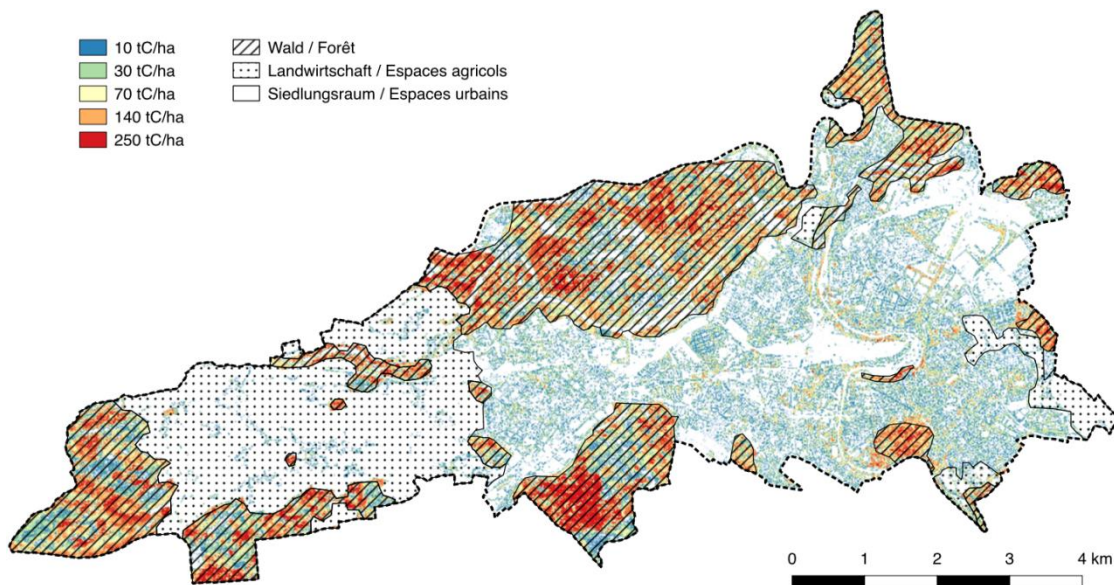


Abbildung 1: In oberirdischen Baumteilen gespeicherter Kohlenstoff: Biomassekarte der Stadt Bern, in einer Auflösung von 12.5 Metern.

Rolle der Baumartenwahl

Für die CO₂-Aufnahme und -Speicherung ist die Wahl der Baumart in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Schnell wachsende Baumarten entziehen der Atmosphäre höhere Mengen an CO₂ pro Jahr. Solche Pionierbaumarten haben jedoch meist eine kürzere Lebensdauer und geben den gespeicherten Kohlenstoff daher schneller wieder in Form von CO₂ an die Atmosphäre ab. Langlebige Baumarten wachsen in der Regel etwas langsamer, sind aber meist in der Lage grössere Mengen an CO₂ zu binden und behalten den Kohlenstoff über einen längeren Zeitraum in der Biomasse gespeichert (Tabelle 1 und Abbildung 2). In Städten ist die Lebensdauer von Bäumen oft unnatürlich kurz und beträgt im Mittel lediglich 40 – 50 Jahre. Wo von vornherein klar ist, dass ein Baum nur über einen relativ kurzen Zeitraum stehen bleibt (z.B. Strassenbäume) sind schnellwüchsige Arten vorzuziehen. Wo hingegen die Möglichkeit besteht, dass ein Baum seine natürliche Lebensdauer erreichen kann und genügend Platz zu dessen Entfaltung zur Verfügung steht (z.B. in Parks), sollte die Wahl auf langlebige Baumarten fallen. In allen Fällen steht bei der Artenwahl aber im Vordergrund, dass der Baum gut an die heutigen und künftigen Standortbedingungen angepasst sein muss. Nur ein gesunder Baum kann sich entfalten und seine vielfältigen Leistungen vollbringen. Die Kohlenstoffspeicherung spielt hier eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 1: Wüchsigkeit und Lebensdauer einiger häufiger Stadtbaumarten (* Nadelbäume haben in der Regel eine geringere Holzdichte als Laubbäume, sprich sie speichern weniger Kohlenstoff pro Kubikmeter Holz)

	Kurzlebig	Langlebig
Schnellwüchsig	<ul style="list-style-type: none"> Feld-Ahorn - <i>Acer campestre</i> Hängebirke - <i>Betula pendula</i> Pappel - <i>Populus spec.</i> Robinie - <i>Robinia pseudoacacia</i> Spitz-Ahorn - <i>Acer platanoides</i> Vogel-Kirsche - <i>Prunus avium</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Berg-Ahorn - <i>Acer pseudoplatanus</i> Platane - <i>Platanus x hispanica</i> Lärche - <i>Larix decidua</i> Walnuss - <i>Juglans regia</i> Fichte - <i>Picea abies</i>
Langsamwüchsig	<ul style="list-style-type: none"> Hainbuche - <i>Carpinus betulus</i> Apfel - <i>Malus domestica</i> Vogelbeere - <i>Sorbus aucuparia</i> Weissdorn - <i>Crataegus spec.</i> Baumhasel - <i>Corylus colurna</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Roskastanie - <i>Aesculus hippocastanum</i> Gemeine Esche - <i>Fraxinus excelsior</i> Stiel-Eiche - <i>Quercus robur</i> Linden - <i>Tilia spec.</i> Buchen - <i>Fagus spec.</i> Wald-Föhre - <i>Pinus sylvestris</i>

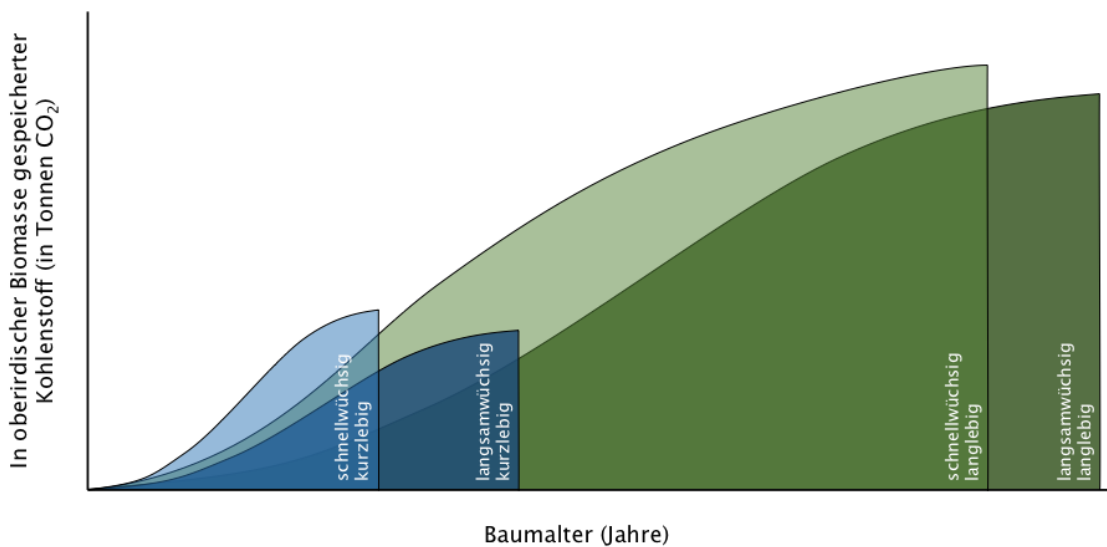


Abbildung 2: Schematische Wachstumskurven verschiedener Baumarten. Die Fläche unter der Kurve entspricht den jeweiligen Kohlenstoffspeicherleistungen eines Baumes über seine gesamte Lebensdauer.

Mehr als nur Kohlenstoff: Weitere Klimaschutz-Aspekte von Stadtbäumen

Nebst dem Entzug des Treibhausgases CO₂ aus der Atmosphäre können Bäume im Siedlungsraum weitere indirekte Leistungen zum Klimaschutz erbringen. Durch Beschattung und Verdunstung kann ein einzelner Baum dieselbe Kühlleistung wie 10 mittlere Klimaanlage erbringen (20 - 30 kW). Das reduziert den sommerlichen Energiebedarf und somit die mit der Bereitstellung der Energie verbundenen Treibhausgasemissionen. In dieser Hinsicht ist die sorgfältige Platzierung der Bäume von zentraler Bedeutung. Bäume sollten einerseits im Sommer Schatten spenden und gleichzeitig im Winterhalbjahr die Sonneneinstrahlung nicht behindern, um nicht den Heizenergieverbrauch zu erhöhen (siehe Abbildung 3). Auch reduziert sich die Mobilität der Stadtbewohnerinnen und -bewohner - und somit ihre CO₂-Emissionen - wenn ihre nächste Umgebung Erholungsraum bietet. Nach Ableben des Baumes bewirkt eine energetische Nutzung der Biomasse die Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe und erbringt so einen langfristigen Klimaschutz-Effekt.

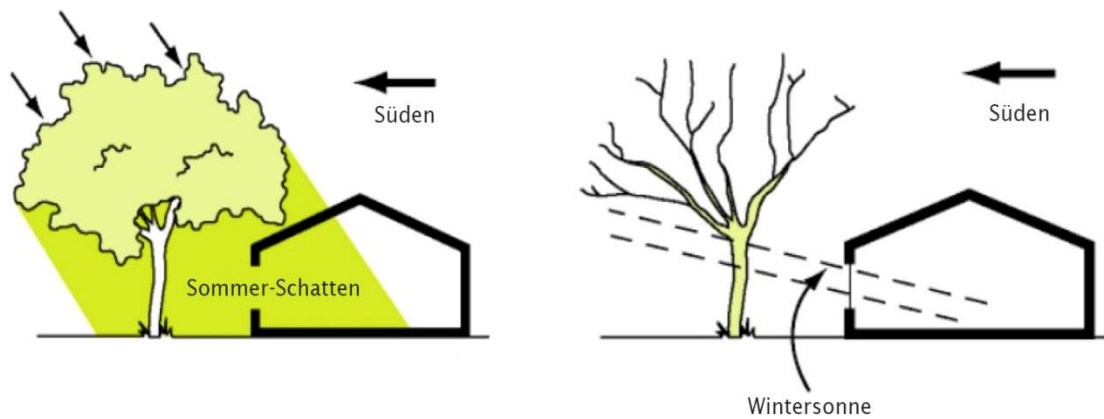


Abbildung 3: Schattenspendende Bäume auf West-, Süd- und Ostseite des Gebäudes können die maximalen Raumtemperaturen an heißen Sommertagen um bis zu 10 °C reduzieren. Hochstämmige Laubbäume auf der Südseite behindern die winterliche Sonneneinstrahlung nur minimal.

Fazit zur Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsraum

- Jeder Baum entzieht der Atmosphäre CO_2 und speichert den Kohlenstoff in seiner Biomasse. Verglichen mit unseren Pro-Kopf Emissionen sind es aber bescheidene Mengen. Eine Inwertsetzung der CO_2 -Speicherleistung von Bäumen, z.B. über den Verkauf von CO_2 -Zertifikaten, könnte dennoch Anreize schaffen zur vermehrten Pflanzung von Bäumen und Mittel bereitstellen für deren Unterhalt.
- Verglichen mit der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern ist die Menge des in Stadtbaum-Beständen pro Hektare gespeicherten Kohlenstoffes relativ gering. Jedoch dürften die zeitlichen Veränderungen und die damit verbundenen CO_2 -Quellen- bzw. -Senkeneffekte umso stärker ausfallen. In den Jahren 1997 – 2009 ist der Anteil der Baumflächen im Schweizer Siedlungsgebiet um 15% zurückgegangen.
- Damit ein Baum seine CO_2 -Senkenleistung erbringen kann und der Kohlenstoff auch möglichst lange in seiner Biomasse gespeichert bleibt, muss der Baum gut mit den Standortbedingungen zurechtkommen. Wo von vornherein klar ist, dass der Baum eine limitierte Lebensdauer hat, sollte die Wahl eher auf schnellwüchsige Arten fallen. Wo aber Zeit und Platz zur Verfügung stehen sollte die Wahl auf langlebige Arten fallen. Bei langlebigen Arten sind künftige, durch den Klimawandel hervorgerufene Veränderungen der Standortbedingungen, zu berücksichtigen.
- Im Siedlungsraum ist die gezielte Anordnung von Bäumen von zentraler Bedeutung und sollte frühzeitig in der Planung berücksichtigt werden. Geschickt platzierte Bäume regulieren das städtische Mikroklima und können den Energieverbrauch für Kühlung und Heizung reduzieren. Grünflächen im näheren Umkreis erhöhen die Lebensqualität und reduzieren die Mobilität der Stadt-Bewohnerinnen und Bewohner.
- In der Schweiz besteht ein beträchtliches Potential zur vermehrten energetischen Nutzung von Flurholz. Während der in Biomasse gespeicherte Kohlenstoff in einem ständigen Kreislauf mit der Atmosphäre steht, bewirkt die Substitution fossiler Brennstoffen eine permanente Reduktion des CO_2 Ausstosses.

Empfehlungen

- Strategisch ausgerichtete Freiraumplanung;
- auf versiegelten Flächen Entsiegelungen und Begrünungen prüfen und umsetzen;
- in verdichteten Quartieren baumbestandene Strassenzüge zur Vernetzung der innerstädtischen Grünräume einrichten,
- Beachtung des Planungshorizontes bei der Baumartenwahl,
- situativ optimierte Artenwahl (Siehe Faktenblatt III)

Weiterführende Literatur

Gardi O, Schaller G, Neuner M und Mack S (2015) Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern. Schweiz Z Forstwes 167 (2016) 2: 90 – 97

Mack S (2015) Klimaangepasste Stadtentwicklung: Klimafitte Bäume für Schweizer Städte. Master's Thesis. Berner Fachhochschule BFH. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HAFL

BAFU (2016) Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2014, (www.climatereporting.ch)

Mathys L und Thürig E (2013) Baumbiomasse in der Landschaft. Studie im Auftrag des BAFU

Roloff A (2013) Bäume in der Stadt. Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken: Verlag Eugen Ulmer

Scharenbroch BC (2011) Urban Trees for Carbon Sequestration. In Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Springer Verlag

USDA Forest Service: i-Tree Eco. User's Manual, (www.itreetools.org).

Das Projekt Urban Green & Climate der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Stadtgrün Bern, Meteotest und RVR-CFC untersuchte die Ökosystemdienstleistungen und die klimabedingte Vulnerabilität des Berner Baumbestandes. Das Projekt wurde im Rahmen des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel durchgeführt.