



## Abschlussbericht

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung – Teilprojekt 10

# Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München

Förderkennzeichen TEW01CO2P-75382

28. Juli 2023

### Projektkoordination

Prof. Dr. Thomas Rötzer (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde)

### Projektpartner

**Prof. Dr. Thomas Rötzer, Prof. Dr. Hans Pretzsch, Dr. Astrid Reischl, M.Sc. Vjosa Dervishi**

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde (WWK),

TU München, Hans-Carl-von-Carlowitz Platz 2, 85354 Freising

**Prof. Dr. Stephan Pauleit, M.Sc. Priscila Stark da Silva**

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung (SMLE),

TU München, Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising



finanziert durch  
**Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz**



# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Aufgabenstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Planung der Arbeiten und Methodik .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse sowie praktische Anwendbarkeit .....</b>	<b>12</b>
3.1 Auswahl der öffentlichen Plätze in München .....	12
3.2 Methodik der Aufnahme der Bäume, Sträucher und Rasenflächen.....	20
3.2.1 Bäume.....	20
3.2.2 Sträucher .....	20
3.2.3 Rasenflächen .....	23
3.3 Beschreibung der Bäume, Sträucher und Rasenflächen der 25 Plätze.....	24
3.3.1 Bäume.....	24
3.3.2 Sträucher .....	26
3.3.3 Rasenflächen .....	28
3.4 Klima und Klimaszenarien .....	29
3.4.1 Klimadaten des DWD.....	29
3.4.2 Klimafunktionskarten von München .....	31
3.4.3 RCP- Klimaszenarien .....	33
3.5 Kurzbeschreibung des Modells CityTree.....	35
3.6 Wachstum und Ökosystemleistungen des Grüns auf öffentlichen Plätzen.....	38
3.6.1 Simulation der Umweltleistungen von Bäumen.....	38
3.6.2 Biomassen, Photosynthese und Ökosystemleistungen von Sträuchern .....	51
3.6.3 Ökosystemleistungen von Rasenflächen.....	54
3.6.4 Vergleich des Kühlpotentials verschiedener Vegetationstypen .....	56
3.7 Einfluss des Grüns auf die Lufttemperatur ausgewählter Plätze.....	57
3.8 Modellierung der bioklimatischen Bedingungen ausgewählter Plätze .....	62
3.8.1 Modell-Validierung .....	64
3.8.2 Statistische Analyse .....	66
3.8.3 Ergebnisse.....	66
3.8.4 Auswirkungen auf die bioklimatischen Bedingungen .....	76
<b>4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>84</b>
4.1 Der Beitrag der grünen Infrastruktur zu den Ökosystemleistungen von Plätzen .....	84
4.2 Anpassungsmaßnahmen zum Erhalt und der Förderung der Ökosystemleistungen der grünen Infrastruktur von Plätzen im Klimawandel .....	85
4.3 Auswirkungen auf den thermischen Komfort des Menschen .....	86

<b>5.</b>	<b>Handlungsempfehlungen für die klimaangepasste Gestaltung von Stadtplätzen .....</b>	<b>88</b>
<b>6.</b>	<b>Fachliche Ergebnisse des Projekts .....</b>	<b>90</b>
6.1	Tagungsbeiträge und Veröffentlichungen .....	90
6.2	Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten .....	91
<b>Glossar.....</b>	<b>.....</b>	<b>92</b>
<b>Verwendete Literatur .....</b>	<b>.....</b>	<b>94</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Lage der ausgewählten 25 öffentlichen Plätze in München (Quelle der Karte: Bayernatlas) .....	13
Abbildung 2. Ausgewählte 25 öffentlichen Münchner Plätze. Platzgrenzen sind in Gelb markiert (Quellen: Platzgrenzen basierend auf das 100Places:M Datenbank, Karten: Google Earth, Fotos: Vjosa Dervishi, Thomas Rötzer, Genoveva-Schauer-Platz: Frederik Buchleitner, Pariser Platz: Romy Ebert-Adekis, Schäringerplatz, Weissenburger Platz: Wikimedia). Methodik der Aufnahme der Bäume, Sträucher und Rasenflächen.....	20
Abbildung 3. Schematische Darstellung wichtiger Parameter bei der Vermessung eines Strauches zur Bestimmung der Biomasse (Sonnweber, 2021).....	21
Abbildung 4. Probestrauch im Lehr- und Versuchsgarten in Freising, der zur Validierung der Messmethodik zur Biomassenbestimmung von Sträuchern diente. Der Strauch wurde hinsichtlich der Dimensionen Höhe- und BHD vermessen und anschließend geschnitten und getrocknet.....	21
Abbildung 5. Zusammenhang zwischen oberirdischer Biomasse aus Messung und Modellierung.....	22
Abbildung 6. Messung der Blatt-Gaswechselaktivität an ausgewählten Straucharten (links: Forsythie, rechts: Hainbuchenhecke) mithilfe eines mobilen Gaswechsellmessgeräts (Modell Licor LI-6400XT) zur Bestimmung der Kohlenstoffaufnahme und -freisetzung sowie der Wasserdampfabgabe und -aufnahme durch die Blätter. ....	22
Abbildung 7. Ausstechen der Grassoden (b), Plastischale mit Grassode (a) sowie Sonnenstandort und Schattenstandort (c und d) des Grasexperiments.....	23
Abbildung 8. Baumarten, deren Anteil (oben) und Individuenzahl an den 25 Plätzen in München (unten) .....	24
Abbildung 9. Straucharten an den untersuchten Münchner Plätzen und deren Anzahl (N) sowie ein Tortendiagramm der häufigsten Straucharten an den Münchner Plätzen (Andere = Crataegus monogyna, Hibiskus, Kolkwitzia amabilis, Pyrus communis, Ribes nigrum, Malus ssp., Forsythia x intermedia, Philadelphus, Viburnum tatana, Euonymus europeus, Sambucus nigra, Prunus laurocerasus, Corylus avellana, Lonicera xylosteum, Syringa vulgaris).....	27
Abbildung 10. Rasenflächen [m <sup>2</sup> ] und deren prozentualen Anteile der ausgewählten Plätze in München.....	29
Abbildung 11. Lage der fünf DWD-Wetterstationen (blau) in und um München über den Zeitraum 1984 bis 1991 und Lage der 25 ausgewählten Plätze (rot) in München .....	30
Abbildung 12. Abweichung der mittleren Monatstemperaturen (links) und der mittleren kumulierten Monatssummen des Niederschlags (rechts) der vier Wetterstationen München-Riem, München-Nymphenburg, Maisach-Gernlinden und Oberschleißheim im Großraum München von den Werten der Referenzstation München-Stadt im Mittel des Zeitraums 1984-1991 .....	30
Abbildung 13. 14 Uhr Temperaturen an den 25 ausgewählten Plätzen (Basis Klimafunktionskarten der Landeshauptstadt München).....	31
Abbildung 14. Jahresmitteltemperaturen für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090) .....	34
Abbildung 15. Mittlere Jahressummen des Niederschlags für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090) .....	35
Abbildung 16. Monatsmittelwerte der Temperatur (links) und kumulierte Niederschlagssummen (rechts) für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090).....	35

Abbildung 17. Schema und modulare Zusammensetzung des Wachstumsmodells CityTree .....	36
Abbildung 18. Trockenstressgefährdung der Bäume an ausgewählten Münchner Plätzen (1991-2020). .....	41
Abbildung 19. Bestandsbiomassen der Bäume an ausgewählten Plätzen in München .....	42
Abbildung 20. Mittlere jährliche CO <sub>2</sub> -Speicherung und Wasserverbrauch der Bäume an ausgewählten Plätzen in München (1991-2020). .....	43
Abbildung 21. Mittlerer Abfluss (links) und Verdunstungssumme der Bäume (rechts) unter den Bäumen an ausgewählten Plätzen in München (1991-2020).....	45
Abbildung 22. Schattendichte und Schattenfläche unter den Bäumen an Münchner Plätzen. ....	46
Abbildung 23. Vergleich der Kühlleistung der Plätze (Schäringerplatz = 100%). Kühlleistung ist aufgeteilt in Verdunstung und Beschattung in Prozent unter den Bäumen. ....	47
Abbildung 24. Zusammenhang zwischen Transpiration der Bäume, dem Biomassenzuwachs (links), dem Niederschlagsabfluss (Mitte) und der Kohlenstofffixierung (rechts) an 25 Plätzen in München für den Simulationszeitraum 1991-2020.....	48
Abbildung 25. Ökosystemleistungen der Bäume gemittelt für 25 Plätze und deren prozentuale Änderungen (1991-2020). Die Daten wurden über alle 25 Münchner Plätze im Vergleichszeitraum von 1991 bis 2020 unter den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 für die Zeiträume 2041-2050 und 2081-2090 gemittelt. ....	49
Abbildung 26. Einfluss der Versiegelung auf die Ökosystemleistungen von Bäumen für das gegenwärtige Klima (1991-2020) sowie unter den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 für die nahe Zukunft (2041-2050) und ferne Zukunft (2081-2090).....	51
Abbildung 27. Oberirdische Biomassen der Sträucher [kg] und deren prozentuale Anteile an der Gesamtbiomasse an den untersuchten öffentlichen Plätzen in München. ....	52
Abbildung 28. Mittlere Verdunstungsraten (oben) und Photosyntheseraten (unten) ausgewählter Straucharten. ....	53
Abbildung 29. Mittlere Verdunstungsraten (oben) und Photosyntheseraten (unten) der Sonnenblätter von Strauchkategorien (Großsträucher, Kleinsträucher und Hecken) sowie eines Baumes. ....	53
Abbildung 30. Mittlere Kühlungsleistung durch Verdunstung pro Tag verschiedener Strauchformen (Hecke, Kleinstrauch, Großstrauch; links) und eines Baumes (rechts). ....	54
Abbildung 31. Biomasse [kg] und prozentualer Anteil der einzelnen Straucharten an den untersuchten Plätzen in München.....	54
Abbildung 32. Verdunstung von Rasenflächen (ET <sub>a</sub> , mm Tag <sup>-1</sup> ) unter ganztägigen Baumschatten bzw. permanentem Sonnenschein, gemessen an 12 sonnigen und regenfreien Tagen mit Minimum, Mittelwert und Maximum der gemessenen Verdunstungsleistung. ....	54
Abbildung 33. Kühlungsleistung von Rasenflächen und Bäumen an den 25 Plätzen in München .....	55
Abbildung 34. Kühlleistung durch Verdunstung der Baumschicht und Rasenflächen an Münchner Plätzen unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen. ....	56
Abbildung 35. Kühlpotentiale [kWh/m <sup>2</sup> ] durch Verdunstung an einem sonnigen Sommertag durch Verdunstung für verschiedene Vegetationstypen.....	57
Abbildung 36. Oben: Plätze für die kontinuierliche Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit mittels i-Button-Sensoren. Unten: i-Button-Sensor im Baumschatten am Hohenzollernplatz.....	58
Abbildung 37. Kühlung (blaue Linie) in °C als Temperaturdifferenz zwischen sonnigen und von Bäumen beschatteten Bereichen von Juli bis November 2021 an vier ausgewählten Plätzen in München. ....	60
Abbildung 38. Einfluss der Versiegelung [%] und des Blattflächenindex (LAI) auf die Kühlung (Temperaturdifferenz zwischen Baumschatten und sonnigen Stellen) .....	61
Abbildung 39. Einfluss des Blattflächenindex (LAI) und der Versiegelung auf die Kühlung (Temperaturdifferenz zwischen Baumschatten und sonnigen Stellen) von Juli bis November 2021 .....	61

Abbildung 40. Typische Lufttemperatur (a) und relative Luftfeuchtigkeit (b) an ausgewählten Tagen. .....	63
Abbildung 41. Grafische 3D-Darstellung der untersuchten Platzmodelle. ....	63
Abbildung 42. iButton-Sensor-Kalibrierung. ....	65
Abbildung 43. Feldmessung im Sommer. Hohenzollernplatz (a); Bordeauxplatz (b). Quelle: Priscila W. Stark da Silva (mit geografischen Basisdaten von Google Maps). ....	65
Abbildung 44. Winterliche Feldmessung. Hohenzollernplatz (a); Bordeauxplatz (b); i-Button (c). ....	66
Abbildung 45. Veränderung des PET-Wertes am Alpenplatz während des heißen Tages (2 Uhr, 8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr). ....	67
Abbildung 46. Variation der Windgeschwindigkeit an dem heißen Tag. (8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr), von links nach rechts: Alpenplatz, Alter Hof, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz, Marstallplatz. .....	68
Abbildung 47. Veränderung der PET-Werte am Marstallplatz während eines heißen Tages (oben) und eines kalten Tages (unten) um 2 Uhr, 8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr. ....	69
Abbildung 48. Simulierte Lufttemperatur an dem heißen Tag. ....	69
Abbildung 49. PET-Werte für den heißen Tag zu den kritischen Stunden (12 Uhr und 16 Uhr). ....	70
Abbildung 50. PET-Werte für den warmen Tag in der Nacht (2 Uhr). ....	71
Abbildung 51. PET-Werte für den warmen Tag 4 Uhr nachmittags. ....	71
Abbildung 52. PET-Werte für den milden Tag 12 Uhr und 16 Uhr. ....	72
Abbildung 53. Luftbild und Windgeschwindigkeitssimulation des Marstallplatzes um 8 Uhr morgens (Quelle: Bayerische Vermessungsverwaltung). ....	73
Abbildung 54. PET-Werte für kalte Tage. ....	74
Abbildung 55. Vergleich der Windgeschwindigkeiten an einem kalten und feuchten Tag: 2 Uhr (a); 8 Uhr (b); 12 Uhr (c); 16 Uhr (d). ....	75
Abbildung 56. Ausgewählte Plätze: Alpenplatz (a); Marstallplatz (b). Quelle: Priscila W. Stark da Silva (mit geografischen Basisdaten von BayernAtlas). ....	76
Abbildung 57. Modellierungsansatz für grüne Infrastruktur-Szenarien. ....	77
Abbildung 58. Alpenplatz aktuelles Szenario (a) und Szenario ohne Vegetation (b). ....	78
Abbildung 59. Marstallplatz-Simulationsszenarien: kein Grün (a); Gras (b); Büsche (c); Bäume (d); Mischung (e). ....	78
Abbildung 60. PET-Werte des Alpenplatzes ohne Vegetation während der typischen Tage: mild, warm und heiß. ....	79
Abbildung 61. PET-Veränderung am Marstallplatz während des milden Tages. ....	80
Abbildung 62. PET-Werte am Marstallplatz während des heißen Tages. ....	81
Abbildung 63. PET-Werte am Marstallplatz während des warmen Tages. ....	82

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Arbeitspakete des Projekts (AP = Arbeitspaket, LAI = Blattflächenindex, BAI = Astflächenindex).....	11
Tabelle 2. Übersicht der ausgewählten Plätze in München mit Angabe der Platzcharakteristika und Grünausstattung (Quelle: 100Places:M, 2020). .....	12
Tabelle 3. Übersicht der Baumarten an den ausgewählten Plätzen in München mit Anzahl der Individuen (N), durchschnittlicher Stammdurchmesser (BHD), Höhe, Kronendurchmesser (KD) und Kronenvolumen (KVol) (MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung).....	25
Tabelle 4. Straucharten an den untersuchten Münchner Plätzen und deren Anzahl (N) sowie ein Tortendiagramm der häufigsten Straucharten an den Münchner Plätzen (Andere = <i>Crataegus monogyna</i> , <i>Hibiskus</i> , <i>Kolkwitzia amabilis</i> , <i>Pyrus communis</i> , <i>Ribes nigrum</i> , <i>Malus ssp.</i> , <i>Forsythia x intermedia</i> , <i>Philadelphus</i> , <i>Viburnum tatana</i> , <i>Euonymus europeus</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Prunus laurocerasus</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Lonicera xylosteum</i> , <i>Syringa vulgaris</i> ) .....	27
Tabelle 5. Bioklima und Temperaturen an den 25 Plätzen auf Basis der Klimafunktionskarte München nach der FITNAH-Modellierung (LH München 2014) (Bioklima: 1: sehr günstig, 2: günstig, 3 weniger günstig, 4: ungünstig) .....	32
Tabelle 6. CO <sub>2</sub> -Konzentrationen [ppm] für die einzelnen Klimaszenarien und Zeiträume (nach Nishina et al. 2014).....	34
Tabelle 7. Monatsmittelwerte der meteorologischen Parameter der Wetterstation München-Stadt für den Zeitraum 1991-2020 (DWD 2021) .....	39
Tabelle 8. Alter der Bäume, Übershirmungsflächen, Bestandsbiomassen, mittleres Wachstum und Ökosystemleistungen für den Zeitraum 1961-1990 des Baumbestandes an 25 Plätzen in München .....	39
Tabelle 9. Tagesmittel der Temperaturen an einen besonnten Standort und im Baumschatten an fünf Plätzen in München für den Sommer (Juli und August), den Herbst (September und Oktober) und Winter (Dezember, Januar) auf Basis der i-Button-Messungen .....	59
Tabelle 10: Auswahlparameter der Modellierung .....	62
Tabelle 11. ENVI-met Modellaufbau und meteorologische Inputdaten.....	64
Tabelle 12. Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996).....	66
Tabelle 13. Der durchschnittliche PET-Wert des Alpenplatzes .....	79
Tabelle 14. Durchschnittlicher PET des Marstallplatzes an einem milden Tag und Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996).....	80
Tabelle 15. Durchschnittlicher PET-Wert des Marstallplatzes an den heißen Tagen. ....	81
Tabelle 16. Durchschnittlicher PET-Wert des Marstallplatzes an warmen Tagen. ....	82
Tabelle 17. Durchschnittlicher PET des Marstallplatzes zur Nachtzeit .....	83

## Zusammenfassung

Vegetationsgeprägte Stadtplätze spielen im Klimawandel eine zunehmend wichtigere Rolle, vor allem in den dicht bebauten, grau dominierten Innenstädten, wo sie kühle Oasen darstellen. Sie erhöhen den menschlichen thermischen Komfort an heißen Tagen, fördern den natürlichen Wasserhaushalt, speichern Kohlenstoff und fördern die Biodiversität in der Stadt. Jedoch sind die Höhe dieser Ökosystemleistungen und deren Beziehung zu Merkmalen der Vegetation, wie z.B. der Größe und dem Wachstum der Bäume, bislang nur unzureichend untersucht. Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts "Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München" war, die Ökosystemleistungen von Bäumen, Sträuchern und Rasenflächen an ausgewählten öffentlichen Plätzen in München zu untersuchen. Dabei wurden die erbrachten Leistungen im Hinblick auf die Art der Vegetation, die Gestaltung des Platzes und die aktuelle sowie zukünftige Klimasituation analysiert. Insgesamt wurden 25 öffentliche Münchner Plätze mit unterschiedlichen Merkmalen wie die Platzgröße, den Versiegelungsgrad, die Platzgeometrie und die Grünausstattung ausgewählt und analysiert. Dabei wurden sowohl kleine, stark versiegelte Plätze wie der Alte Hof (3.500 m<sup>2</sup>, 100% Versiegelung und drei Bäume) im Zentrum Münchens als auch große, mit Bäumen bedeckte Plätze wie der Isartorplatz (21.500 m<sup>2</sup>, 79% Versiegelung und 55 Bäume sowie 4.580 m<sup>2</sup> Wechselflor) oder Hohenzollernplatz (10.150 m<sup>2</sup>, 89% Versiegelung und 92 Bäume) untersucht. Über 600 Bäume wurden vermessen und deren Ökosystemleistungen wie Abkühlungswirkung, Kohlenstofffixierung und Niederschlagsabfluss mithilfe des Stadtbaumwachstumsmodells CityTree Modell für das gegenwärtige und das künftige Klima unter zwei Klimaszenarien (RCP 2.6 und RCP 8.5) ermittelt. Im Rahmen dieser Studie wurde ebenfalls eine Methode zur Erfassung der oberirdischen, holzigen Biomasse von Sträuchern entwickelt.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass die Vegetation an Münchner Stadtplätzen deutlich Trockenstress gefährdet ist. 13 von 25 Plätzen weisen eine starke Trockenstressgefährdung auf und nur sechs Plätze zeigen eine geringe Trockenstressgefährdung. Die erbrachten Ökosystemleistungen der Vegetation variieren je nach Baumartenzusammensetzung, Baumalter, Zahl der Bäume sowie des Versiegelungsgrades stark. Die höchsten Ökosystemleistungen (Biomassezuwachs, CO<sub>2</sub>-Speicherungskapazität, Wasserverbrauch, Kühlung durch Verdunstung und Schattenfläche) wurden am Schäringerplatz gemessen. Der geringste Abfluss wurde für den Rundfunkplatz modelliert und die größten Schattenflächen am Rotkreuzplatz gemessen. Bäume weisen mit Wert um 9,4 kWh/m<sup>2</sup> das höchste Kühlpotenzial auf. Sie sind daher die effektivsten Kühlelemente in urbanen Raum. Großsträucher erzielen mit 7,0 kWh/m<sup>2</sup> ebenfalls ein beachtliches Kühlpotenzial, wodurch auch sie einen spürbaren Beitrag zur Temperaturreduzierung leisten können. Rasenflächen weisen mit 4,1 kWh/m<sup>2</sup> eine vergleichbare Kühlleistung wie Kleinsträucher (3,9 kWh/m<sup>2</sup>) auf. Aufgrund ihrer häufig großen Flächenbedeckung tragen Rasenflächen durch die Verdunstung des Grases zur Abkühlung der Umgebung bei. Insbesondere an heißen Tagen kann die Verdunstungskühlung durch Rasenflächen spürbar sein. Obwohl das Kühlungspotenzial von Rasenflächen geringfügig niedriger ist als das von Bäumen und Großsträuchern, sind sie dennoch eine wertvolle Ergänzung zur lokalen Abkühlung, insbesondere in Kombination mit Bäumen.

Hecken haben mit 3 kWh/m<sup>2</sup> das niedrigste Kühlungspotenzial unter den betrachteten Vegetationstypen. Dies kann Pflanzenart bedingt sein oder auf mikrometeorologischen Bedingungen zurückzuführen sein. Trotz ihres geringeren Kühlungspotenzials sind Hecken wertvoll, da sie als Sichtschutz dienen, Lebensraum und Nistmöglichkeiten für Tiere bieten und zur Erhöhung der Biodiversität beitragen. Bei der Planung von Grünflächen und Stadtlandschaften sollte sowohl das kühlende Potenzial als auch die

ökologische Bedeutung verschiedener Vegetationstypen berücksichtigt werden, um ein ausgewogenes und vielfältiges Mikroklima zu schaffen.

Zusammenfassen lässt sich sagen, dass die erbrachten Ökosystemleistungen, insbesondere die Kühlleistung der Plätze durch Verdunstung und ihre Abflussretention vor allem durch große, ältere Bäume und durch größere Grasflächen, am besten als Retentionsmulden gestaltet, gefördert werden können. Durch eine größere Anzahl von Bäumen auf den Plätzen, durch eine gezielte Baumartenauswahl, durch größere Rasen- und Strauchflächen können die Niederschlagsabflussmengen der Plätze deutlich reduziert, die Kühlleistung durch Verdunstung und Beschattung wie auch die C-Speicherung erhöht werden.

Hochauflösende Temperatur- und Luftfeuchtemessungen haben gezeigt, dass der Baumbestand eines Platzes einen signifikanten Einfluss auf die Lufttemperatur von öffentlichen Plätzen ausübt. Am Alpenplatz wurde ein maximaler Kühleffekt von bis zu 4,0 °C im Sommer gemessen. Die Kühlleistung wie auch die Abflussminderung können durch einen hohen Blattflächenindex (LAI), durch hohe Kronenprojektionsflächen (CPA) / Platzflächen-Verhältnisse und durch einen geringeren Anteil versiegelter Fläche gefördert werden. Eine Erhöhung des LAI um eine Einheit führt beispielsweise zu einer Erhöhung des Kühleffekts um 0,4°C. Das gesamte auf einem Platz vorhandene Grün (Bäume, Sträucher und Grasflächen) sowie seine räumliche Struktur (Anzahl der Bäume, Baumalter, Baum- und Strauch- und Grasverteilung eines Platzes) spielen eine wichtige Rolle für die Kühlwirkung durch das Grün, für die Abflussminderung und für die C-Speicherung. Die Effekte sind im Sommer am stärksten und nehmen zum Herbst hin ab.

Darüber hinaus stellt der Klimawandel eine große Herausforderung für Stadtbäume dar, da die Klimaszenarien in der Regel zu einer deutlichen Reduzierung der erbrachten Ökosystemleistungen führen. In Zukunft wird die Kühlleistung des Grüns an den Plätzen in München im Vergleich zu heute voraussichtlich deutlich zurückgehen. Der Biomassezuwachs wird bis zu 22% sinken, während für die Verdunstung eine Reduktion von maximal 40% erwartet werden kann. Der Abfluss verändert sich je nach Szenario um -10% zu +10%, dagegen wurde für die Kühlung ein signifikanter Rückgang von bis zu 38% errechnet.

Grund hierfür ist, dass aufgrund des geringeren Wasserangebots in den Sommermonaten die Kühlung durch Verdunstung deutlich reduziert wird. Zudem kann als Folge von häufigen Trockenheiten und hohen Temperaturen die Blattfläche der Bäume abnehmen, wodurch auch die Kühlung durch Beschattung langfristig reduziert wird. Diese Reaktionen sind jedoch stark von der Baumart und den Standortbedingungen geprägt. Um die negativen Folgen des Klimawandels für die Stadtbevölkerung zu minimieren, sollte der Grünanteil der öffentlichen Plätze - soweit möglich - erhöht werden. Alte Bäume, die gegenüber jungen Bäumen weitaus höhere Ökosystemleistungen erbringen sollten erhalten und deren Standortbedingungen optimiert werden. Bei Neupflanzungen sollte auf möglichst optimale Bodenbedingungen hinsichtlich der Größe der Pflanzgrube, des Bodensubstrats, der Bodenverdichtung und der Versiegelung geachtet werden. Zudem ist die Auswahl standortgerechter Baum- und Straucharten wichtig. Dabei ist sicherzustellen, dass auch unter zukünftigen Klimabedingungen gute Wachstumsbedingungen vorherrschen, um hohe Ökosystemleistungen sicherzustellen.

Anhand der Simulationsergebnisse mit ENVI-met konnte die Bedeutung der städtischen Morphologie und Vegetation für die physiologische Äquivalenttemperatur (PET-Index) analysiert werden. Grünanlagen können den menschlichen Wärmekomfort in verschiedenen Jahreszeiten beeinflussen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es wichtig ist, die Witterung des gesamten Jahres bei der Planung von Plätzen zu berücksichtigen, da dieselben Materialien und Gestaltungselemente je nach Jahreszeit

den menschlichen Wärmekomfort positiv oder negativ beeinflussen können. Trotz der Wärmespeicherkapazität von gepflasterten Flächen sind die simulierten Vorteile von Szenarien ohne Vegetation für den menschlichen Wärmekomfort an kalten und mittleren Tagen nicht groß genug, um gepflasterte Flächen ohne Vegetation auf städtischen Plätzen zu rechtfertigen, denn sie führen zu teilweise starkem Hitzestress an warmen und heißen Tagen (Simulierte PET-Werte von bis zu 63°C). Beschattung und Verdunstung von Bäumen sind die entscheidenden Größen für die Reduzierung des Hitzestresses an heißen Tagen. Ihr positiver Einfluss auf den menschlichen thermischen Komfort ist insbesondere an warmen und mittleren Tagen hoch.

Aus der Vielzahl der Messungen und Analysen sowie auf Basis der Simulationen mit dem Stadtbaumwachstumsmodell CityTree und dem mikrometeorologischen Modell ENVI-met konnten Handlungsempfehlungen für die zukünftige Entwicklung städtischer Plätze im Klimawandel abgeleitet werden.

# 1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Grünflächen an öffentlichen Freiräumen sind von großer Bedeutung, da sie zur Verschönerung des urbanen Umfelds beitragen, das Wohlbefinden der Menschen fördern, die Luftqualität verbessern, Biodiversität unterstützen, das Stadtklima regulieren und Lärm reduzieren. Die Gestaltung von öffentlichen Freiräumen ist eine zentrale Fragestellung der Stadtplanung. Insbesondere öffentliche Plätze sollten attraktiv gestaltet werden und das thermische Wohlbefinden des Menschen und der Stadtnatur fördern. Hierbei kann Stadtgrün einen wesentlichen Beitrag leisten. In diesem Projekt untersuchen wir die Leistungen von Stadtgrün an ausgewählten Plätzen in München und deren Auswirkungen auf das thermische Wohlbefinden des Menschen und der Stadtnatur. Das Projekt basiert auf einer Auswahl von 25 öffentlichen Plätzen aus der Datenbank des ZSK-Projekts "100Places:M", das öffentliche Plätze in München erfasste. Folgende Forschungsfragen wurden untersucht:

**F1:** Welchen Beitrag leistet das Grün (Bäume, Sträucher, Grasflächen) öffentlicher Plätze in München zur Abkühlung der Lufttemperatur, zur Verringerung des Regenwasserabflusses und zur Kohlenstoffspeicherung in Abhängigkeit von den Vegetationsstrukturen (Bäume – Sträucher, dicht belaubt – lückig belaubt, junge Bäume – alte Bäume)?

**F2:** Wie sind die klimatischen Bedingungen an ausgewählten Plätzen an bestimmten Tagen? Können Optimierungen des Standortklimas anhand der Vegetation (Bäume, Sträucher, Grasflächen) erfolgen?

**F3:** Wie verändern sich die Umweltleistungen des Grüns (Bäume, Sträucher, Grasflächen) öffentlicher Plätze in München unter veränderten Klimabedingungen (Erwärmung, veränderte Niederschlagsmuster)?

**F4:** Wie können die ausgewählten Plätze an die Folgen des Klimawandels angepasst werden (Abkühlung durch Transpiration, Minimierung Abflussmenge, Maximierung Kohlenstoffspeicherung), z. B. durch Änderung der Baumarten, Pflanzdichten, etc.?

## 2. Planung der Arbeiten und Methodik

Zur Beantwortung der Fragen und der Erreichung der Ziele dienen folgende Arbeitspakete, die in einzelne Arbeitsschritte aufgeteilt wurden (Tabelle 1).

*Tabelle 1. Arbeitspakete des Projekts (AP = Arbeitspaket, LAI = Blattflächenindex, BAI = Astflächenindex)*

AP	Kurzbeschreibung	Arbeitsschritte
1	Bestimmung der Baumdimensionen und -strukturen aller vorhandenen Bäume an ausgewählten Plätzen in München sowie Bestimmung und Klassifizierung von weiterem vorhandenem Stadtgrün (Sträucher, Grasflächen)	1.1 Vermessung von Baumdimensionen (BHD, Baumhöhe, Krone) 1.2 Ergänzende Aufnahme der Umgebungssituation (Bäume, Häuser, ...) 1.3 Bestimmung des LAI/BAI im Sommer und im Winter 1.4 Klassifizierung des vorhandenen Grüns 1.5 Bestimmung des LAI von Bäumen, Sträucher und Grasflächen
2	Aufbau von Klimadatensätzen für die einzelnen Plätze und Beschaffung von Klimaszenarien zur späteren Modellierung unter Klimaveränderungen	2.1 Beschaffung von Klimainformationen für die ausgewählten Plätze Bestimmen platzspezifischer mittlere monatliche Klimaparameter 2.2 Beschaffung von Klimaszenariendaten
3	Für ausgewählte Tage (Strahlungstage, heiße Tage, kalt-feuchte Tage): räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messungen von Boden-, Blatt- und Lufttemperatur (mit Thermalkamera und i-buttons) an einer Auswahl von Plätzen	3.1 Klimamesskampagnen an ausgewählten Strahlungstagen bzw. bewölkten Tagen, 3.2 Klimamesskampagnen an ausgewählten heißen bzw. kühlen Tagen 3.3 Klimamesskampagnen mittels i-Button über zwei Vegetationszeiten
4	Ableiten von mittleren Ökosystemleistungen des Grüns für jeden ausgewählten Platz aufgrund der Umweltbedingungen am Standort (unter Einbeziehung von spezifischen Klimadaten pro Platz, Versiegelung, Bodeninformation, etc. mittels CityTree-Modell	4.1 Simulation der Umweltleistungen 4.2 Skalieren auf Platzebene
5	Modellierung der bioklimatischen Bedingungen der Plätze mit ENVI-met und Entwicklung von Gestaltungsszenarien -> zur Untersuchung der mikroklimatischen Wirkung von Stadtgrün mit veränderten Grünanteilen auf den Plätzen	5.1 ENVI-met Simulation der Ist-Situation der ausgewählten Plätze an ausgewählten Tagen 5.2 Szenarienentwicklung für die Plätze mit veränderter Grünausstattung (in Absprache mit TP4) 5.3 ENVI-met Simulation der Szenarien
6	Modellierung des Einflusses von Klimaveränderungen auf die Umweltleistungen und das Wachstum der vorhandenen Vegetation auf den ausgewählten Plätzen und Verschneiden der Ergebnisse mit denen des Projekts 100Places:M	6.1 Modellierung mit CityTree 6.2 Modellierung mit ENVI-met unter zukünftigen Klimabedingungen 6.3 Synthese der Ergebnisse
7	Synthese der Ergebnisse und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die klimaangepasste Gestaltung von Stadtplätzen	7.1 Synthese der Ergebnisse 7.2 Handlungsempfehlungen

### 3. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse sowie praktische Anwendbarkeit

#### 3.1 Auswahl der öffentlichen Plätze in München

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München" wurden insgesamt 25 öffentliche Plätze für Untersuchungen ausgewählt. Die Auswahlkriterien für die Plätze waren:

- Sie sollten ein Teilkollektiv der Plätze des ZSK-Projektes „100Places:M“ sein
- Die Lage im Stadtgebiet sollte ein breites Spektrum der thermischen Bedingungen abdecken (basierend auf den Klimafunktionskarten der Stadt München (LH München, 2014))
- Die Versiegelung unter den Bäumen solle über eine breite Spanne reichen
- Die Baumarten sollten möglichst mit dem Modell CityTree zu simulieren sein
- Neben den Baumarten sollten an einzelnen Plätzen auch Rasenflächen und Strauchbestände vorhanden sein

Tabelle 2 gibt einen Überblick ausgewählten Plätze, deren Koordinaten, Größe, Versiegelungsgrad, die Fläche des Rasens bzw. Wechselflors und die Anzahl der Bäume. Die Plätze unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Grünausstattung deutlich. Der kleinste ausgewählte Platz ist der Geneveva-Schauer-Platz mit einer Größe von knapp 1.600 m<sup>2</sup>, während der größte Platz der Isartorplatz mit knapp 21.500 m<sup>2</sup> ist. Der Versiegelungsgrad der Plätze variiert von 63 % beim Schäringerplatz bis zu 100 % bei einigen Plätzen wie dem Alter Hof, Am Harras und Geneveva-Schauer-Platz. Im Durchschnitt sind die Plätze 7.000 m<sup>2</sup> groß und zu 86 % versiegelt. Einige Plätze weisen Rasenflächen auf, mehrere sind vollkommen versiegelt. Die Anzahl der Bäume reicht von 3 Individuen im Alten Hof bis zu 92 Individuen am Hohenzollernplatz.

Tabelle 2. Übersicht der ausgewählten Plätze in München mit Angabe der Platzcharakteristika und Grünausstattung (Quelle: 100Places:M, 2020).

Nr.	Platz	Größe [m <sup>2</sup> ]	Versiegelung [%]	Koordinaten Mittelpunkt		Rasen-Wechselflor [m <sup>2</sup> ]	Anzahl Bäume
				Länge	Breite		
1	Alpenplatz	3317	79	48,1182	11,5813	526	24
2	Alter Hof	3546	100	48,1382	11,5782	-	3
3	Am Harras	10444	100	48,1170	11,5396	-	15
4	Bordeauxplatz	14018	70	48,1302	11,6005	3.657	84
5	Edelweißplatz	2603	95	48,1176	11,5818	-	9
6	Erich-Mühsam-Platz	2100	87	48,1633	11,5840	29	6
7	Fischmarktbrunnen	3758	69	48,1504	11,5577	1.160	26
8	Genfer Platz	5853	67	48,0943	11,4903	1.031	11
9	Geneveva-Schauer-Platz	1601	100	48,1310	11,596	-	4
10	Habsburgerplatz	8940	93	48,1310	11,596	-	53
11	Hohenzollernplatz	10150	89	48,1616	11,5682	-	92
12	Holzplatz	3289	89	48,1299	11,5676	-	13
13	Isartorplatz	21570	79	48,1347	11,5828	4.581	55
14	Kurfürstenplatz	5951	98	48,1598	11,5751	-	9
15	Marstallplatz	9517	91	48,1400	11,5820	377	18
16	Nikolaipplatz	3149	88	48,1586	11,5865	-	11

17	Pariser Platz	3242	96	48,1283	11,6001	1.032	10
18	Pündterplatz	6416	89	48,1632	11,5773	558	32
19	Rotkreuzplatz	14788	96	48,1527	11,5330	176	31
20	Rudi-Hierl-Platz	5959	89	48,1486	11,5589	674	14
21	Rundfunkplatz	6820	77	48,1430	11,5545	1.526	22
22	Schäringerplatz	6523	63	48,1495	11,5274	2.393	54
23	Weissenburger Platz	5995	80	48,1285	11,5961	486	41
24	Wettersteinplatz	14155	75	48,1090	11,5751	3.493	43
25	Wiener Platz	4939	98	48,1342	11,5959	-	6
<b>Durchschnitt (Summe)</b>		<b>7177</b>	<b>86</b>	-	-	<b>1306 (23.507)</b>	<b>12 (686)</b>

Die Lage der ausgewählten Plätze im Münchner Stadtgebiet ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei der Auswahl der Plätze wurde darauf geachtet, eine gleichmäßige Verteilung über die Innenstadt zu gewährleisten. Dies ermöglicht eine repräsentative Stichprobe, die verschiedene städtebauliche Kontexte und Nutzungstypen berücksichtigt. Die 25 Münchner Plätze sowie deren Platzgrenzen sind in der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 2) dargestellt. Die genauen Platzgrenzen basieren auf den Informationen, die in der Datenbank "100Places:M" erfasst wurden.

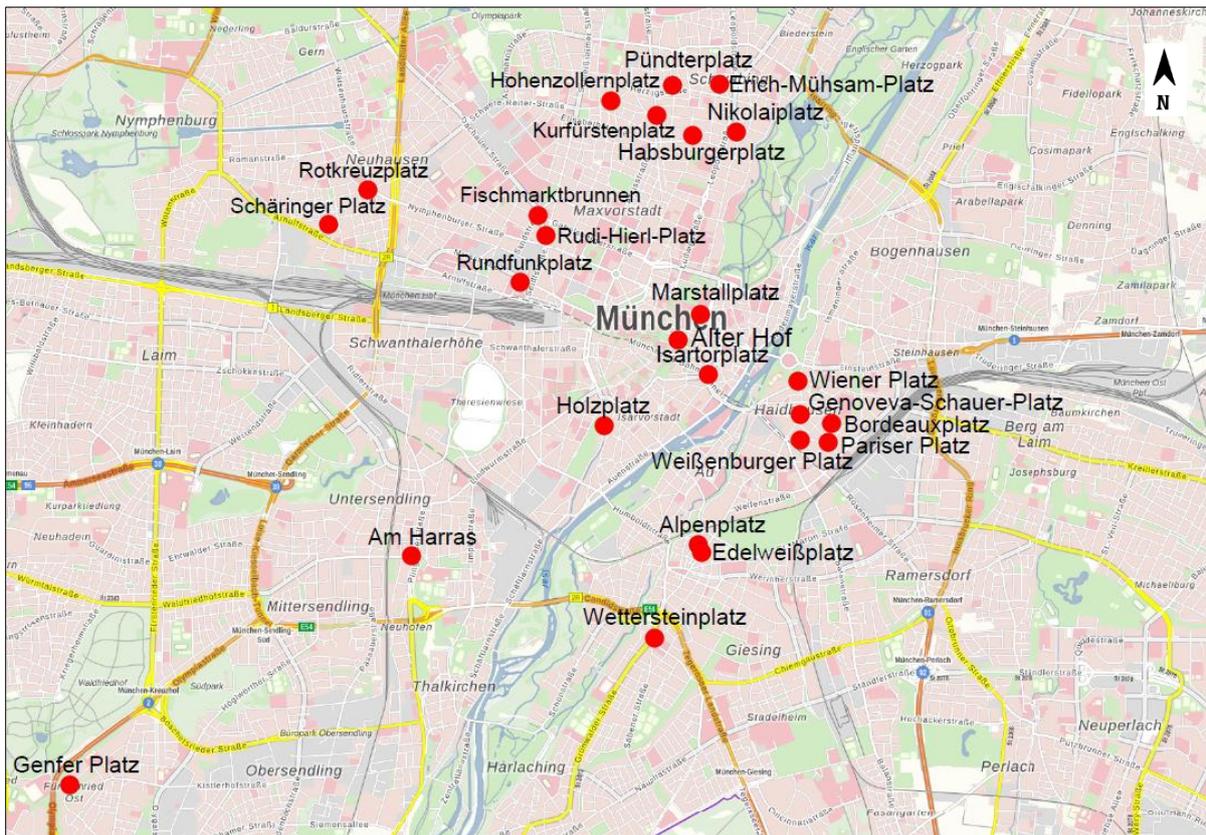
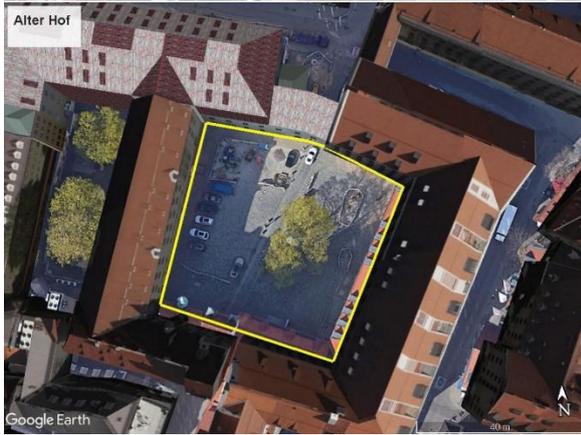
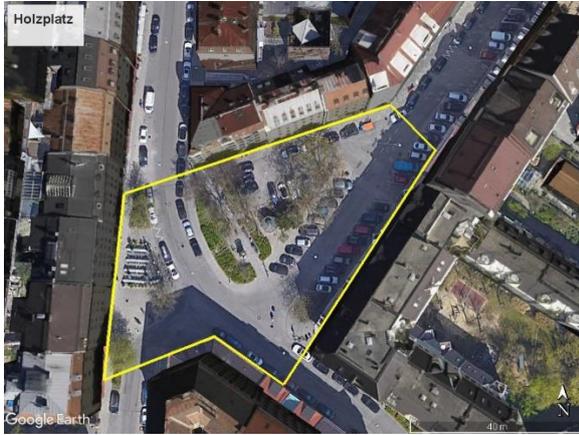


Abbildung 1. Lage der ausgewählten 25 öffentlichen Plätze in München (Quelle der Karte: BayernAtlas, 2020).

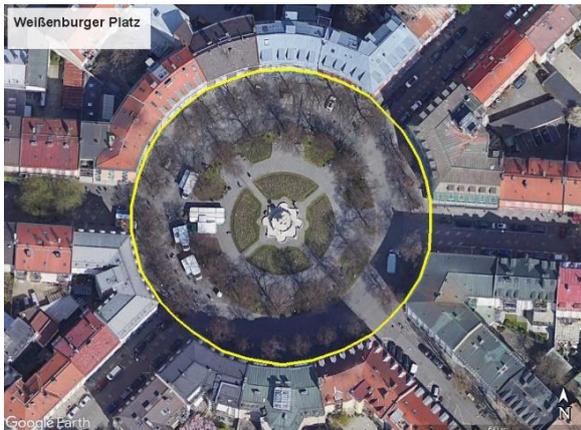












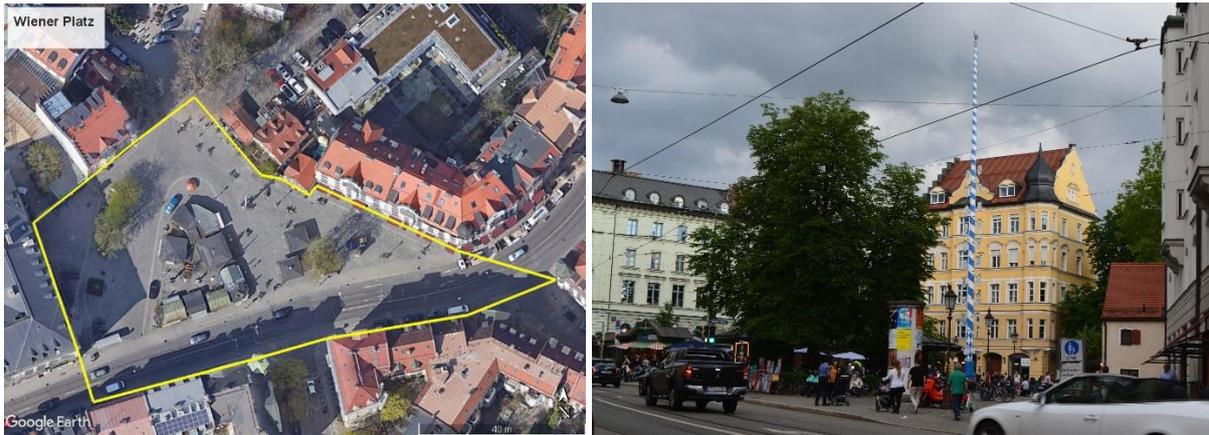


Abbildung 2. Ausgewählte 25 öffentlichen Münchner Plätze. Platzgrenzen sind in Gelb markiert (Quellen: Platzgrenzen basierend auf das 100Places:M Datenbank, Karten: Google Earth, Fotos: Vjosa Dervishi, Thomas Rötzer, Genoveva-Schauer-Platz: Frederik Buchleitner, Pariser Platz: Romy Ebert-Adekis, Schäringerplatz, Weissenburger Platz: Wikimedia).

## 3.2 Methodik der Aufnahme der Bäume, Sträucher und Rasenflächen

### 3.2.1 Bäume

Die Bäume auf den Plätzen wurden entsprechend den Vorgaben forstlicher Standardmethoden vermessen (Pretzsch, 2019, Moser et al., 2015). Folgende Parameter wurden erhoben: Stammdurchmesser auf Brusthöhe (BHD), Höhe, Kronenansatz, maximale Kronenausdehnung in acht Himmelsrichtungen (Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West, Nordwest), Umgebungssituation wie benachbarte Bäume und anstehende Gebäude, Bodenversiegelung in acht Himmelsrichtungen und Vitalität. Ebenso wurde der Blattflächenindex (LAI) mit Hilfe eines hemisphärischen Fotos jedes Baumes zum Zeitpunkt der maximalen Belaubung erhoben.

Auf Grundlage der gemessenen Variablen wurden weitere Kronendimensionen berechnet, so die Kronenlänge, der mittlere Kronenradius und das Kronenvolumen:

$$\text{Kronenlänge} = \text{Baumhöhe} - \text{Kronenansatz} \quad [\text{Gl. 1}]$$

Der mittlere Kronenradius ist als das quadratische Mittel der acht Kronenradien  $r$  definiert, wobei  $i$  für die acht Richtungen und  $r$  für den entsprechenden Kronenradiuswert steht:

$$\text{Kronenradius} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 r_i^2}{8}} \quad [\text{Gl. 2}]$$

$$\text{Kronenvolumen} = \pi \cdot \text{Kronenradius}^2 \cdot \text{Kronenlänge} \quad [\text{Gl. 3}]$$

### 3.2.2 Sträucher

#### *Ermittlung der Strauchbiomasse*

Die Biomasse zählt zu den wichtigsten Kenngrößen, um Ökosystemleistungen des Grüns wie beispielsweise die C-Fixierung der Pflanze zu ermitteln. Bisher gibt es keine Standardmethodik zur Bestimmung der oberirdischen Biomasse von Sträuchern, wie sie z.B. für Bäume vorliegt. Um die oberirdische Biomasse der Sträucher zu ermitteln, wurde daher im Rahmen des Teilprojekts zunächst eine Methode entwickelt und im Lehr- und Versuchsgarten in Freising getestet (Sonnweber, 2021). Entsprechend der neu entwickelten Methodik wird zunächst von jedem Strauch neben der Höhe, des Kronenanfangs,

der Länge und Breite des gesamten Strauchs, des Durchmessers des Strauchfußes und der Kronenprojektionsfläche in acht Himmelsrichtungen auch die Anzahl der Sprosse (n), deren basaler Durchmesser ( $d_b$ ) und Länge (l) erhoben (Abbildung 3). Aus den letzten drei Parametern kann das Volumen der holzigen Biomasse der Sträucher ermittelt werden, durch Multiplikation mit der Holzdicke der Strauchart ( $\rho$ ) erhält man deren gesamte oberirdische Biomasse:

$$Biomasse_{\text{oberirdisch}} = \sum_{1 \text{ bis } n} [(d_b/2)^2 * \pi * l / 3 * \rho] \quad [\text{Gl. 4, aus Sonnweber, 2021}]$$

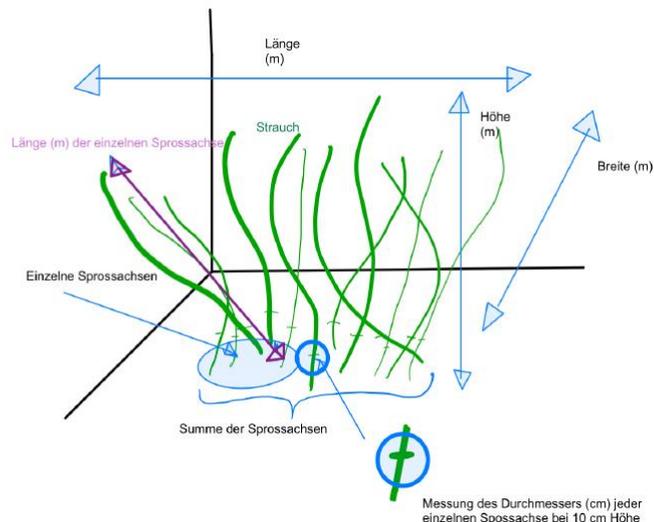


Abbildung 3. Schematische Darstellung wichtiger Parameter bei der Vermessung eines Strauches zur Bestimmung der Biomasse (Sonnweber, 2021).

Zur Validierung der Methodik wurde die holzige oberirdische Biomasse von 13 Strauchindividuen nach der Messung der oben beschriebenen Parameter abgeerntet. Die geernteten Sträucher (s. Abbildung 4) gehören zu den Gattungen *Chaenomeles* (Zierquitte) und *Weigela* (Weigelie), die ähnlich wie die meisten gängigen Straucharten in urbanen Bereichen eine basitone Wuchsform (= Förderung des Neuaustriebs direkt am Boden) bzw. mesotone Wuchsform (= Förderung der Verzweigung über die Triebe im mittleren Bereich) aufweisen. Beispielsweise zeigt die Strauchart Forsythie einen typisch mesotonen Wuchsform.



Abbildung 4. Probesträuch im Lehr- und Versuchsgarten in Freising, der zur Validierung der Messmethodik zur Biomassenbestimmung von Sträuchern diente. Der Strauch wurde hinsichtlich der Dimensionen Höhe- und BHD vermessen und anschließend geschnitten und getrocknet.

Bei der Ernte der Sträucher wurden die gesamten oberirdischen Strauchteile abgeschnitten, ins Labor gebracht, eingewogen und anschließend getrocknet. Auf Basis einzelner abgeernteter Äste wurde die Holzdicke der Sträucher ( $\rho$ ), die für Gleichung 4 benötigt wird, nach der Wasserverdrangungsmethode (Pohv, 2011) ermittelt. Die Wasserverdrangungsmethode, auch als das Archimedische Prinzip bekannt, ermöglicht die Bestimmung des Volumens eines Körpers, indem man den Anstieg des Wasserniveaus misst, wenn der Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht wird. Die dabei auftretende Auftriebskraft entspricht dem Gewicht des verdrängten Wassers. Diese Methode wird zur Volumenmessung von Objekten und zur Bestimmung der Dichte von Materialien verwendet.

Die Summe des Gewichts der getrockneten Strauchteile entspricht der oberirdischen Biomasse des Strauches. Die so bestimmte Biomasse kann mit der nach Gleichung 1 bestimmten Biomasse verglichen werden. Abbildung 5 zeigt diesen Zusammenhang der nach Gleichung 4 berechneten Werte (=MODELLIERUNG) mit den gewogenen Werten (=MESSUNG). Es ergibt sich ein enger Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,99 ( $r^2 = 0,97$ ) zwischen Modell und Messung. Damit erweist sich die Messmethode als geeignet, um die oberirdische Biomasse von Sträuchern zu bestimmen.

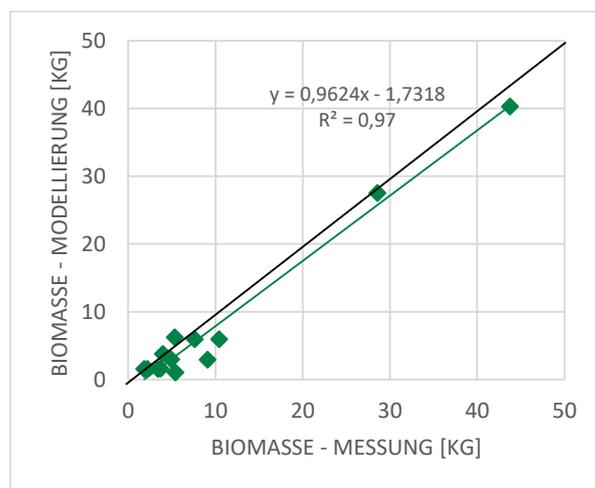


Abbildung 5. Zusammenhang zwischen oberirdischer Biomasse aus Messung und Modellierung.

### **Ermittlung der Photosynthese- und Transpirationsraten von Sträuchern**

Im August 2020 wurde die Photosynthese und Transpiration von Sträuchern an sonnigen Tagen mithilfe eines mobilen Messinstruments LI-6400XT auf dem Campus Weihenstephan der TU München an gängigen mitteleuropäischen Straucharten vermessen (Abbildung 6).



Abbildung 6. Messung der Blatt-Gaswechselaktivitat an ausgewählten Straucharten (links: Forsythie, rechts: Hainbuchenhecke) mithilfe eines mobilen Gaswechsellmessgerats (Modell Licor LI-6400XT) zur Bestimmung der Kohlenstoffaufnahme und -freisetzung sowie der Wasserdampfabgabe und -aufnahme durch die Blätter.

Die Messungen wurden an mehreren Tagen durchgeführt. Dabei wird der Austausch von Kohlendioxid und Wasserdampf zwischen einem Blatt und der Atmosphäre gemessen, um u.a. die Photosynthese- und Transpirationsraten zu bestimmen. Das System verwendet einen Infrarot-Gasanalysator (IRGA), um Gaskonzentrationen und Durchflussraten in einer abgedichteten Kammer mit kontrollierten Umgebungsbedingungen zu messen. Es bietet eine zerstörungsfreie und genaue Möglichkeit, die Pflanzenphysiologie zu untersuchen. Die resultierenden gemessenen Werte basieren auf den von von Caemmerer und Farquhar (1981) modellierten Funktionen.

### 3.2.3 Rasenflächen

#### ***Bestimmung der Ökosystemleistungen (Kühlleistung)***

Um die Kühlleistung der Rasenflächen zu bestimmen, wurde am Campus Weihenstephan eine Vorstudie durchgeführt. Zur Quantifizierung Kühlleistung von Rasenflächen für die Lufttemperatur wurde die Verdunstungsleistung von Grasflächen an sonnigen und schattigen Stellen gemessen. Dazu wurden zehn Grassoden aus Grünflächenrasen am Campus Freising ausgestochen und in Plastikschalen mit einer Fläche von 22 cm<sup>2</sup> (Maße der Plastikwannen: 53 cm (Länge) x 40 cm (Breite) x 9.5 cm (Tiefe)) gelegt. Fünf Schalen wurden an Stellen mit ganztägigem Sonnenschein und fünf andere unter ständiger Beschattung mittelgroßer Bäume platziert (Abbildung 7).

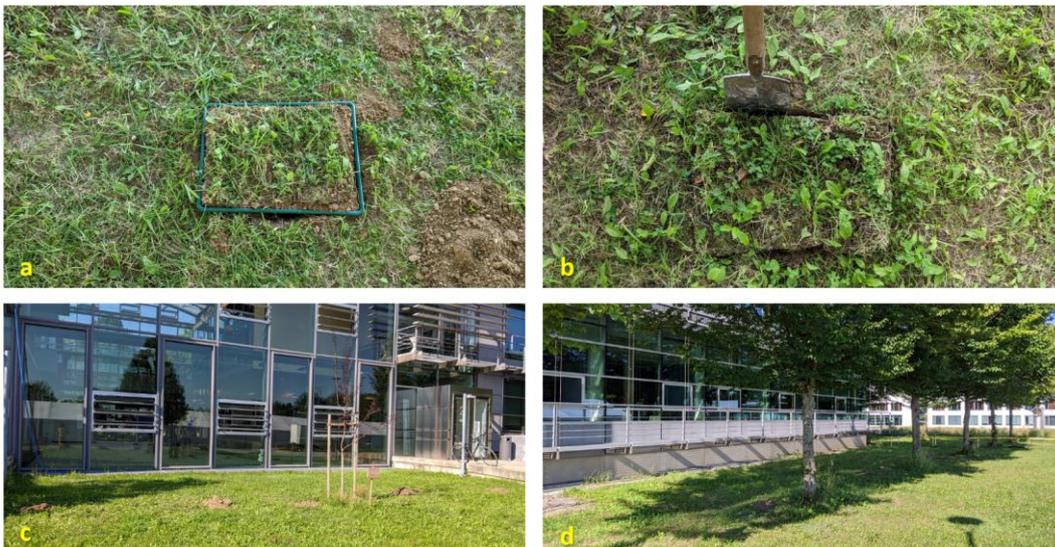


Abbildung 7. Ausstechen der Grassoden (b), Plastikschale mit Grassode (a) sowie Sonnenstandort und Schattenstandort (c und d) des Grasexperiments.

Die Schalen wurden täglich an regenfreien Tagen in der Zeit nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang gewogen, um den Wasserverlust durch Evapotranspiration zu bestimmen. Zusätzlich wurden die mikroklimatischen Bedingungen durch mobile Wetterstationen erfasst. Zur weiteren Analyse wurde die Verdunstung von Rasenflächen für die gegenwärtigen klimatischen Bedingungen sowie zukünftige Klimaszenarien anhand eines Penman-Wasserhaushaltsmodells ermittelt (Rötzer, 1996), das auf der Energiebilanz- und aerodynamischen Methode basiert (Allen et al., 2006). Dabei wurden für München die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung verwendet.

Die Penman-Formel ist ein Verfahren zur Berechnung der Verdunstung und wird in verschiedenen hydrologischen und umweltwissenschaftlichen Bereichen häufig verwendet. Die Formel wurde von Howard Penman an der Rothamsted Experimental Station in Harpenden, UK entwickelt. Die Formel für die Verdunstung lautet:

$$E = (Rn + G) + (6.43 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 + 0.34 \cdot u) \cdot (es - ea) / \lambda \cdot (s + \gamma) \quad [Gl. 5]$$

Hierbei steht  $Rn$  für die Nettostrahlung,  $G$  für den Bodenwärmestrom,  $u$  für die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe,  $es$  für den Sättigungsdampfdruck,  $ea$  für den Dampfdruck der Luft,  $s$  für die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve und  $\gamma$  für die Psychrometerkonstante.  $\lambda$  ist die latente Wärme des Wasserdampfes und beträgt 2.45 MJ/kg.

### 3.3 Beschreibung der Bäume, Sträucher und Rasenflächen der 25 Plätze

#### 3.3.1 Bäume

Auf den Münchner Plätzen finden sich typische Baumarten mitteleuropäischer Städte (Weller, 2021) (Abbildung 8). Am häufigsten ist die Winterlinde (*Tilia cordata*), gefolgt vom Spitzahorn (*Acer platanoides*), der Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*) und der Platane (*Platanus x acerifolia*). An großen Plätzen wie dem Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz, Schäringerplatz und Isartorplatz ist insbesondere die Winterlinde am meisten vertreten.

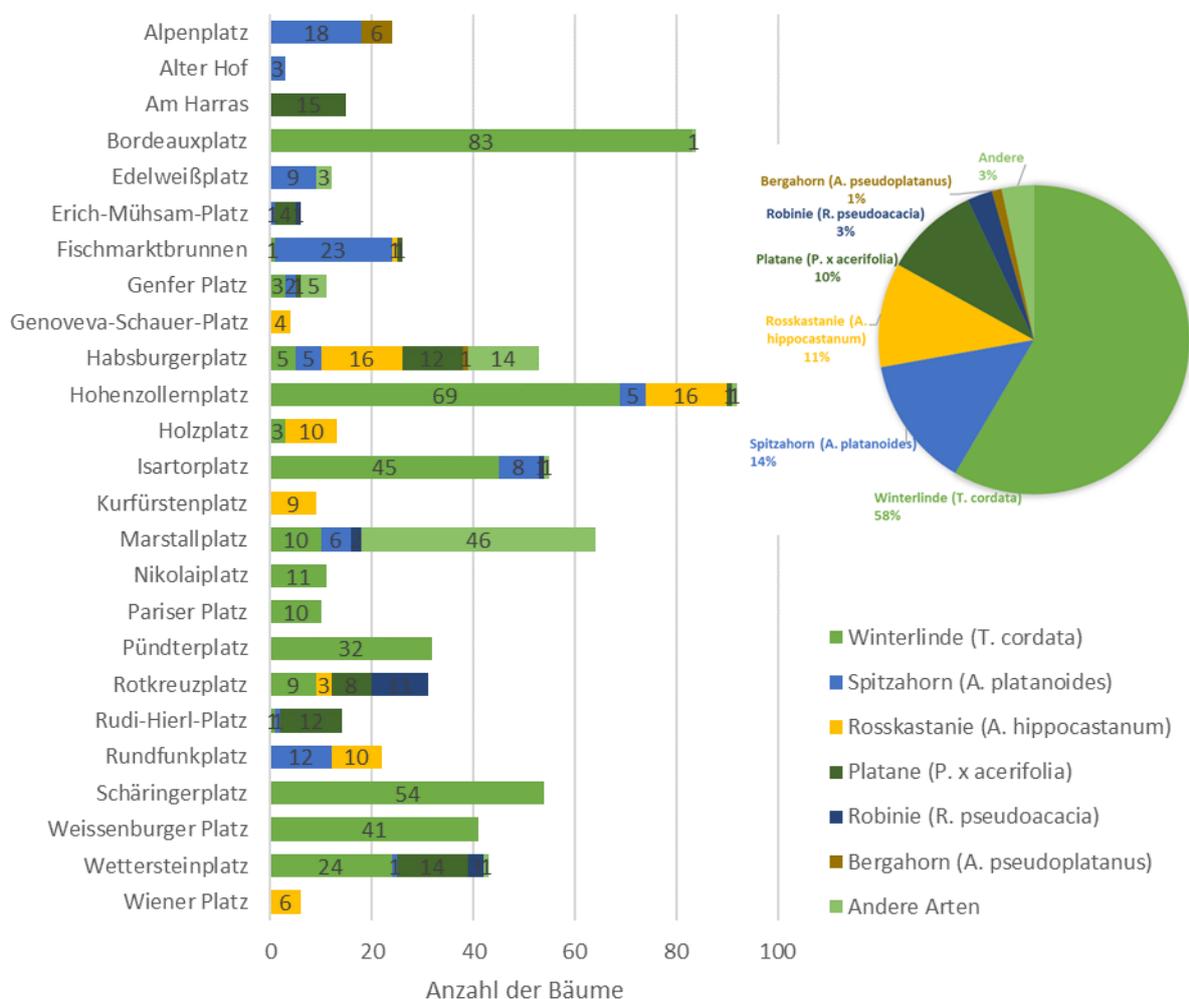


Abbildung 8. Baumarten, deren Anteil (oben) und Individuenzahl an den 25 Plätzen in München (unten)

Die vorliegende Tabelle (

Tabelle 3) enthält eine detaillierte Übersicht der Baumarten und deren Struktur an 25 Münchner Plätzen. Im Durchschnitt sind 12 Bäume auf jeden Platz vertreten. Der mittlere Brusthöhendurchmesser (BHD) variiert zwischen 12,8 cm bis 99,0 cm. Die durchschnittliche BHD für alle untersuchten Bäume beträgt 40,0 cm. Die mittlere Höhe der Bäume reicht von 2 m bis 28 m, wobei der Durchschnittswert

aller Bäume 15,4 m beträgt. Der mittlere Kronendurchmesser (KD) gibt an, wie weit sich die Äste und Zweige eines Baumes horizontal erstrecken und weist auf Schattenspende hin. Er liegt zwischen 4,4 m und 23,2 m. Der Durchschnittswert für alle Bäume beträgt 10,1 m. Das mittlere Kronenvolumen (KVol) gibt an, wieviel Raum die Baumkronen insgesamt einnehmen und erstreckt sich von 109 m<sup>3</sup> bis 10.315 m<sup>3</sup>. Der Durchschnittswert für alle Bäume beträgt 525 m<sup>3</sup>.

Zusammenfassend deuten die Angaben auf mittelgroße Bäume hin. Die Bäume haben bereits eine gewisse Reife erreicht, was auf ein etabliertes Baumwachstum hindeutet. Mit ihrem mittleren Kronendurchmesser und Kronenvolumen bieten sie potenziell eine angemessene Schattenspende. Diese Merkmale sind wichtige Faktoren, um in heißen Städten wie München eine Abkühlungswirkung zu erzielen. Durch ihre Präsenz können Bäume dazu beitragen, die Oberflächentemperatur zu senken, Schatten zu spenden und das städtische Mikroklima zu verbessern

*Tabelle 3. Übersicht der Baumarten an den ausgewählten Plätzen in München mit Anzahl der Individuen (N), durchschnittlicher Stammdurchmesser (BHD), Höhe, Kronendurchmesser (KD) und Kronenvolumen (KVol) (MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung).*

Platz	Baumart	N		BHD [cm]		Höhe[m]		KD [m]		KVol [m <sup>3</sup> ]	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD		
Alpenplatz	<i>A. platanoides</i>	18	32,7	10,6	15,3	1,7	10,0	1,6	985	375	
	<i>A. pseudoplatanus</i>	6	34,1	20,0	14,2	5,7	8,8	3,3	879	899	
Alter Hof	<i>A. platanoides</i>	3	54,0	3,8	2,01	1,0	13,4	1,1	2289	568	
Am Harras	<i>P. x acerifolia</i>	15	37,8	17,7	16,5	5,0	11,0	4,1	1734	1538	
Bordeauxplatz	<i>F. excelsior</i>	1	57,5		16,5		15,3		2270		
	<i>T. cordata</i>	83	30,6	4,6	16,3	1,8	7,6	1,4	549	232	
Edelweißplatz	<i>A. platanoides</i>	9	30,4	5,6	14,7	2,2	7,9	1,5	597	316	
	<i>A. platanoides</i>	1	27,9		12,0		8,7		476		
Erich-Mühsam-Platz	<i>F. excelsior</i>	4	46,7	5,3	19,2	1,3	14,9	0,5	2691	167	
	<i>P. x acerifolia</i>	1	34,8		13,0		8,7		416		
Fischmarktbrunnen	<i>A. platanoides</i>	23	30,8	6,8	10,6	3,1	7,0	1,8	321	212	
	<i>A. hippocastanum</i>	1	88,0		28,0		12,3		3030		
	<i>T. cordata</i>	1	52,5		16,9		11,5		1350		
	<i>P. x hispanica</i>	1	99,0		26,6		23,2		10315		
Genfer Platz	<i>A. platanoides</i>	2	49,0	15,5	15,7	3,8	8,8	2,0	874	669	
	<i>T. cordata</i>	8	38,6	20,6	13,2	3,3	8,7	3,6	822	718	
	<i>F. excelsior</i>	1	12,8		9,6		4,4		109		
Genoveva-Schauer-Platz	<i>A. hippocastanum</i>	4	24,6	3,3	11,2	0,5	9,9	0,6	575	29	
	<i>A. platanoides</i>	5	31,2	16,3	14,1	3,9	8,5	2,1	595	393	
	<i>A. pseudoplatanus</i>	1	34,0		17,1		7,9		643		
	<i>A. saccharinum</i>	1	20,7		10,8		5,3		129		
Habsburgerplatz	<i>A. carnea</i>	14	39,4	8,5	15,7	1,8	9,7	1,2	901	262	
	<i>A. hippocastanum</i>	16	40,5	5,9	16,6	1,5	9,1	1,6	891	433	
	<i>T. cordata</i>	4	43,3	1,7	20,1	0,3	11	0,9	1529	242	
	<i>F. excelsior</i>	12	61,6	9,2	25,0	2,9	12,6	2,0	2471	961	
Hohenzollernplatz	<i>A. platanoides</i>	5	44,5	15,2	17,4	2,1	10,9	3,9	1405	1091	
	<i>A. carnea</i>	1	18,7		11,4		6,8		281		
	<i>A. hippocastanum</i>	16	51,6	7,2	19,1	2,0	9,3	0,8	1047	154	

	<i>T. cordata</i>	69	35,0	6,3	16,8	2,2	8,6	1,2	777	274
	<i>F. excelsior</i>	1	40,3		19,2		12,6		1836	
Holzplatz	<i>A. hippocastanum</i>	10	34,9	18,3	14,2	5,8	9,2	3,4	975	832
	<i>T. cordata</i>	3	34,9	2,8	15,3	2,1	10,2	1,5	696	165
Isartorplatz	<i>A. platanoides</i>	8	34,8	7	13,5	3,2	7,9	1,6	560	401
	<i>T. cordata</i>	46	39,1	9,6	16,6	3,9	9,7	1,9	1047	549
	<i>P. x acerifolia</i>	1	57,3		14,9		12,1		1265	
Kurfürstenplatz	<i>A. hippocastanum</i>	9	45,5	13,5	13,7	2,7	10,8	2,3	1028	509
	<i>A. platanoides</i>	6	40,4	14,4	18,7	5,8	13,4	2,4	2346	1363
Marstallplatz	<i>T. cordata</i>	10	32,1	13,4	16,1	4,0	10,3	1,8	1183	669
	<i>P. x acerifolia</i>	2	78,4	4,9	22,0		15,0	1,6	3253	581
Nikolaiplatz	<i>T. cordata</i>	11	44,1	7,3	16,2	1,9	8,0	0,8	564	175
Pariser Platz	<i>T. cordata</i>	10	45,0	4,7	16,0	0,9	11,9	0,9	1403	246
Pündterplatz	<i>T. cordata</i>	32	36,6	12,3	16,0	4,3	8,8	2,0	792	468
	<i>A. hippocastanum</i>	3	36,5	3,5	6,7	0,6	6,8	1,4	162	108
Rotkreuzplatz	<i>T. cordata</i>	9	31,3	10,0	10,3	1,9	7,3	2,4	286	146
	<i>F. excelsior</i>	8	59,6	5,7	20,2	1,7	13,9	1,8	2596	837
	<i>P. x acerifolia</i>	11	37,8	8,1	12,4	2,4	7,8	2,4	488	381
	<i>A. platanoides</i>	1	47,6		13,0		11,0		950	
Rudi-Hierl-Platz	<i>T. cordata</i>	1	46,7		17,0		8,5		794	
	<i>F. excelsior</i>	12	39,9	23,7	14,2	3,2	12,1	3,8	1577	1363
	<i>A. platanoides</i>	12	21,9	1,6	10,6	1,2	7,4	0,5	367	72
Rundfunkplatz	<i>A. hippocastanum</i>	10	41,9	16,9	13,8	3	10,1	3,4	1087	808
Schäringerplatz	<i>T. cordata</i>	54	45,3	10,4	17,6	4,1	10,4	2,6	1161	627
Weissenburger Platz	<i>T. cordata</i>	41	42,0	7,7	16,5	1,8	10,5	1,6	1129	321
	<i>A. platanoides</i>	1	35,9		14,6		8,6		605	
Wettersteinplatz	<i>T. cordata</i>	25	34,6	18,0	14,3	4,2	8,6	3,0	827	852
	<i>F. excelsior</i>	14	29,0	6,6	13,3	1,9	9,9	1,3	764	303
	<i>P. x acerifolia</i>	3	30,0	3,4	15,6	1,1	7,5	0,5	470	115
Wiener Platz	<i>A. hippocastanum</i>	6	39,4	26,1	12,5	5,3	10,2	4,1	1109	1070
<b>Summe/Mittel</b>		<b>686</b>	<b>40,0</b>	<b>10,0</b>	<b>15,4</b>	<b>3,0</b>	<b>10,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1228</b>	<b>525</b>

### 3.3.2 Sträucher

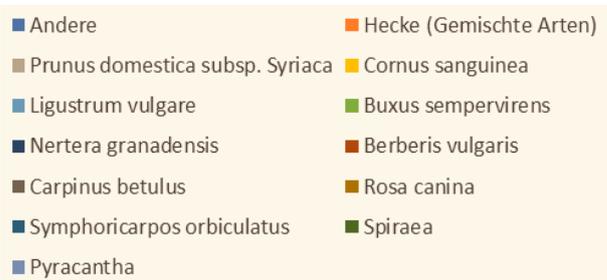
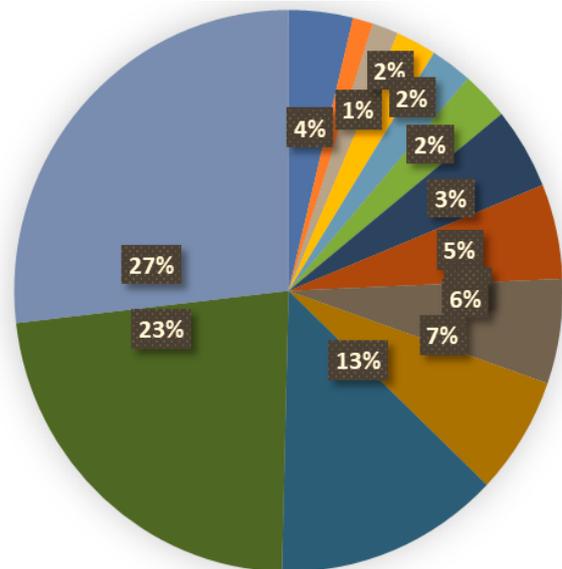
Die ausgewählten Münchner Plätze zeichnen sich durch eine vielfältige Strauchvegetation aus, die insgesamt 28 verschiedene Arten umfasst. Diese Arten treten sowohl als Einzelsträucher (Flieder, Hasel, Berberitze, Liguster, Hartriegel, Weißdorn, Schneeball) als auch in Heckenform (Hainbuche, Liguster, Heckenmyrte, Buchsbaum, oder gemischte Hecke) und als Bodendecker (Korallenbeere, Feuerdorn) auf. In Tabelle 4 sind die Straucharten aufgeführt, die an den Münchner Plätzen vorzufinden waren, sowie deren Anzahl. Der Platz mit den meisten Straucharten war der Pündterplatz mit 13 verschiedenen Arten, gefolgt vom Holzplatz mit 10 Arten. Arten, die auf mehreren Plätzen vorkommen, sind Liguster (*Ligustrum vulgare*), Hundsrose (*Rosa canina*) und Flieder (*Syringa vulgaris*). Am häufigsten zu finden sind die Gattungen bzw. Arten *Pyracantha*, *Spiraea*, *Symphoricarpos orbiculatus* und *Rosa canina* (siehe und Abbildung 9. Straucharten an den untersuchten Münchner Plätzen und deren Anzahl (N) sowie ein Tortendiagramm der häufigsten Straucharten an den Münchner Plätzen (Andere = *Crataegus monogyna*, *Hibiskus*, *Kolkwitzia amabilis*, *Pyrus communis*, *Ribes nigrum*, *Malus ssp.*, *Forsythia x*

*intermedia*, *Philadelphus*, *Viburnum tatana*, *Euonymus europaeus*, *Sambucus nigra*, *Prunus laurocerasus*, *Corylus avellana*, *Lonicera xylosteum*, *Syringa vulgaris*). Mit Ausnahme der Rosenart sind die häufigsten Sträucher der untersuchten Münchner Plätze nicht als häufige oder beliebte Straucharten in Städten bekannt (Birdlife, 2016; NABU, 2021). Dagegen gelten die ebenfalls gefundenen Arten Weißdorn, Wildrosen und Berberitze als wertvolle Sträucher und Vogelschutzgehölze (NABU, 2022).

Einheimische Sträucher sind aufgrund ihrer Anpassung an lokale Bedingungen und ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber Schädlingen und Krankheiten von hohem ökologischem Wert für die Stadtnatur. Sie bieten vielen Tieren als Lebensraum und Nahrungsquelle eine wichtige Grundlage für ihre Existenz (NABU, 2022). Beispiele für einheimische Sträucher, die für die Stadtnatur besonders wertvoll sind Hasel (*Corylus avellana*), Holunder (*Sambucus nigra*), Hundsrose (*Rosa canina*), Berberitze (*Berberis vulgaris*), Schlehe (*Prunus spinosa*), Weißdorn (*Crataegus spp.*), Kornelkirsche (*Cornus mas*), Liguster (*Ligustrum vulgare*), Roter Hartriegel (*Cornus sanguinea*), Feuerdorn (*Pyracantha coccinea*). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) empfiehlt, heimische standortgerechte Arten wie Wildblumen und -sträucher zu verwenden, um vielen Tieren Futter und Lebensraum zu bieten (BMUV, 2021). Eine Liste von Sträuchern, die auch ohne aufwändige Bodenbereitung gut gedeihen, findet sich in einem Handbuch der Wiener Umweltanwaltschaft (WUA, 2008). Die Auswahl der Straucharten sollte je nach den örtlichen Bedingungen und Zielen für den Naturschutz und die Biodiversität in der Stadt erfolgen.

Tabelle 4 und Abbildung 9. Straucharten an den untersuchten Münchner Plätzen und deren Anzahl (N) sowie ein Tortendiagramm der häufigsten Straucharten an den Münchner Plätzen (Andere = *Crataegus monogyna*, *Hibiskus*, *Kolkwitzia amabilis*, *Pyrus communis*, *Ribes nigrum*, *Malus ssp.*, *Forsythia x intermedia*, *Philadelphus*, *Viburnum tatana*, *Euonymus europaeus*, *Sambucus nigra*, *Prunus laurocerasus*, *Corylus avellana*, *Lonicera xylosteum*, *Syringa vulgaris*)

Platz	Strauchart	N
Alpenplatz	<i>Corylus avellana</i>	1
	<i>Ligustrum vulgare</i>	3
	<i>Lonicera xylosteum</i>	1
	<i>Rosa canina</i>	6
	<i>Syringa vulgaris</i>	6
Bordeauxplatz	<i>Carpinus betulus</i>	50
Edelweißplatz	<i>Nertera granadensis</i>	25
Erich Mühsam-Platz	<i>Berberis vulgaris</i>	59
	<i>Euonymus europaeus</i>	2
	<i>Prunus laurocerasus</i>	4
	<i>Rosa canina</i>	4
Fischmarktbrunnen	<i>Forsythia x intermedia</i>	2
	<i>Ligustrum vulgare</i>	36
	<i>Lonicera nitida</i>	4
	<i>Rosa canina</i>	1
	<i>Sambucus nigra</i>	3
Genfer Platz	Hecke (Gemischte Arten)	6
Hohenzollernplatz	<i>Nertera granadensis</i>	42
Holzplatz	<i>Berberis vulgaris</i>	17
	<i>Cornus sanguinea</i>	1
	<i>Hibiskus</i>	1
	<i>Ligustrum vulgare</i>	2
	<i>Philadelphus</i>	3
		27



	<i>Pyracantha</i>	29
	<i>Rosa canina</i>	80
	<i>Spiraea</i>	273
	<i>Symphoricarpos orbiculatus</i>	32
	<i>Viburnum latana</i>	1
Isartorplatz	<i>Syringa vulgaris</i>	2
Pündterplatz	<i>Berberis vulgaris</i>	1
	<i>Carpinus betulus</i>	36
	<i>Cornus sanguinea</i>	33
	<i>Corylus avellana</i>	6
	<i>Crataegus monogyna</i>	1
	<i>Forsythia x intermedia</i>	1
	<i>Kolkwitzia amabilis</i>	1
	<i>Ligustrum vulgare</i>	4
	<i>Lonicera xylosteum</i>	1
	<i>Ribes nigrum</i>	1
	<i>Rosa canina</i>	1
	<i>Spiraea</i>	40
	<i>Symphoricarpos orbiculatus</i>	10
Rotkreuzplatz	<i>Lonicera xylosteum</i>	1
	Hecke (Gemischte Arten)	11
	<i>Prunus domestica subsp.</i>	1
	<i>Syriaca</i>	
	<i>Prunus laurocerasus</i>	2
	<i>Pyracantha</i>	354
	<i>Rosa canina</i>	5
	<i>Sambucus nigra</i>	1
	<i>Symphoricarpos orbiculatus</i>	147
	<i>Viburnum latana</i>	2
Rundfunkplatz	<i>Berberis vulgaris</i>	1
	<i>Buxus sempervirens</i>	38
Weissenburgerplatz	<i>Prunus domestica subsp.</i>	21
	<i>Syriaca</i>	
	<i>Pyrus communis</i>	1
	<i>Spiraea</i>	12
Wettersteinplatz	<i>Buxus sempervirens</i>	2
	<i>Euonymus europaeus</i>	3
	<i>Malus ssp.</i>	2
	<i>Sambucus nigra</i>	1

### 3.3.3 Rasenflächen

Eine große Zahl der 25 untersuchten öffentlichen Plätze in München verfügt neben Bäumen und Sträuchern auch Rasenflächen. Abbildung 10 zeigt die Flächenanteile des Rasens (m<sup>2</sup>) an den einzelnen Plätzen sowie deren prozentuellen Anteil an der Gesamtplatzgröße. So haben beispielsweise Plätze wie Schäringerplatz mit 37% und Nikolaiplatz mit 36% die höchsten Rasenflächenanteile, gefolgt von Fischmarktbrunnen (31%), Wettersteinplatz (25%), und Bordeauxplatz (24%). Bei allen anderen Plätzen liegt der Rasenflächenanteil unter 20%.

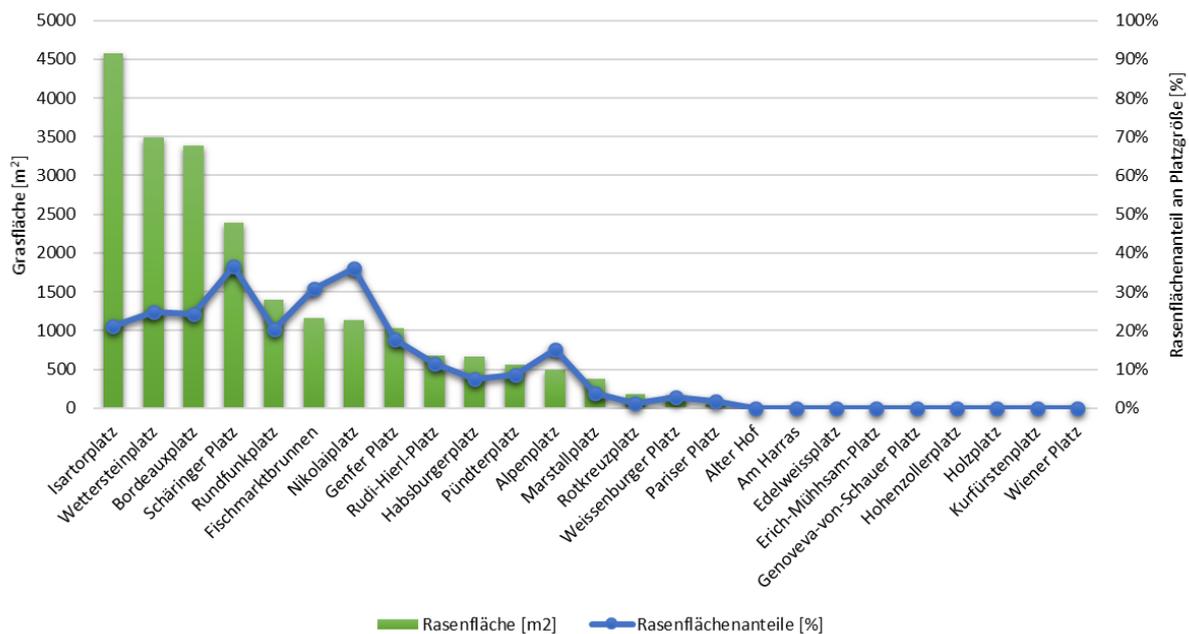


Abbildung 10. Rasenflächen [m<sup>2</sup>] und deren prozentualen Anteile der ausgewählten Plätze in München

Als Rasenarten vertreten sind gewöhnliche Stadtrassenarten (Weidelgrasmischung) wie Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*), Gewöhnlicher Löwenzahn (*Taraxacum sect. ruderalia*), Kriechender Klee (*Trifolium repens*), Kriechender Günsel (*Ajuga reptans*), Gänseblümchen (*Bellis perennis*), Schwingel (*Festuca spec.*), Deutsches Weidegras (*Lolium perenne*) und Einjähriges Rispengras (*Poa annua*).

### 3.4 Klima und Klimaszenarien

Als Grundlage der Beschreibung der klimatischen Bedingungen an den 25 Plätzen dienen zum einen die Klimafunktionskarten von München (LH München, 2014), zum anderen Daten der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes, die in München und deren Umgebung liegen, sowie eigene Messungen. Hinzu kommen Klimaszenarien für München auf Basis der „Representative Concentration Pathway“ – Emissionsszenarien (PIK, 2017).

#### 3.4.1 Klimadaten des DWD

Zeitreihen von Wetteraufzeichnungen für München liegen vom Deutschen Wetterdienst für mehrere unterschiedliche Standorte vor. Um eine räumliche Auflösung der klimatischen Bedingungen für München und seiner Umgebung zu erhalten und um eine Vergleichbarkeit zu garantieren, müssen Datenreihen für gleiche Zeitspannen vorliegen. Zunächst wurde untersucht, ob die Wetterstationen den Plätzen zugeordnet werden können, um räumlich differenzierte Witterungsdaten für die Simulationen verwenden zu können, bzw. ob die Zeitspannen der Wetterstationen einen genügend langen Überlappungszeitraum aufweisen. Die fünf DWD-Wetterstationen München-Stadt, München-Riem, München-Nymphenburg, Maisach-Gernlinden und Oberschleißheim decken einen 8-jährigen Zeitraum (1984-1991) ab. Abbildung 11 zeigt die Lage dieser Standorte im Vergleich zu den 25 Plätzen.

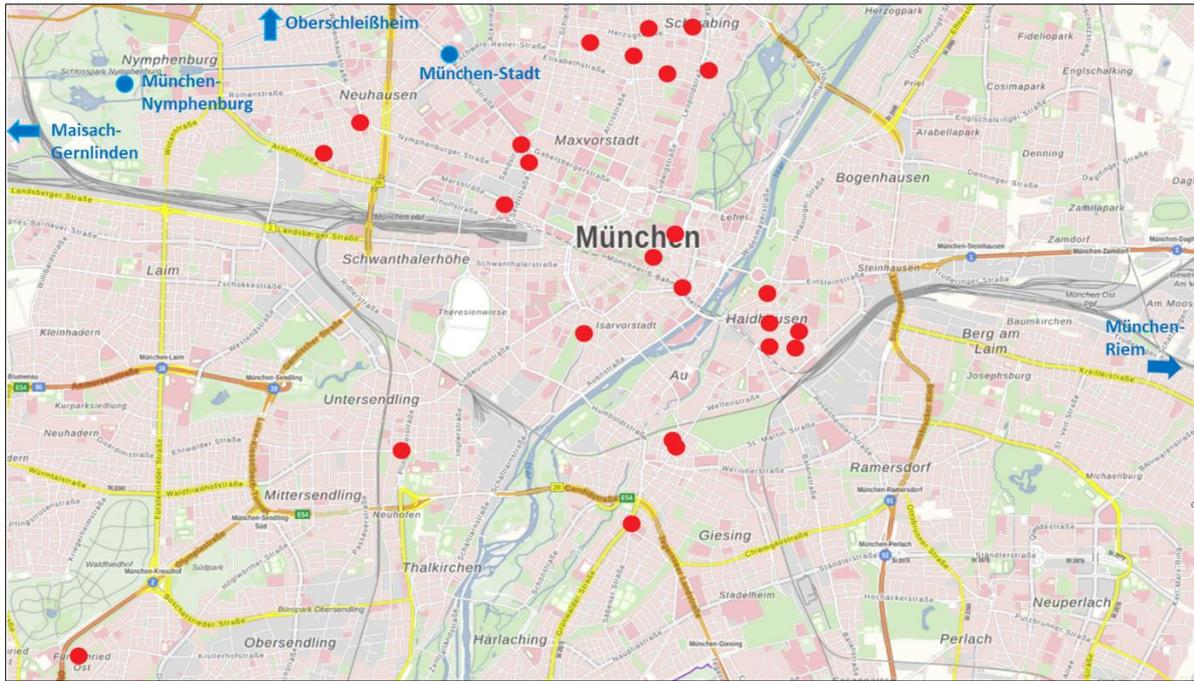


Abbildung 11. Lage der fünf DWD-Wetterstationen (blau) in und um München über den Zeitraum 1984 bis 1991 und Lage der 25 ausgewählten Plätze (rot) in München

Verwendet man die Station München-Stadt als Referenz, ergeben sich für die anderen vier Wetterstationen die in Abbildung 12 dargestellten Abweichungen der mittleren Monatstemperaturen und der kumulierten Monatssummen des Niederschlags.

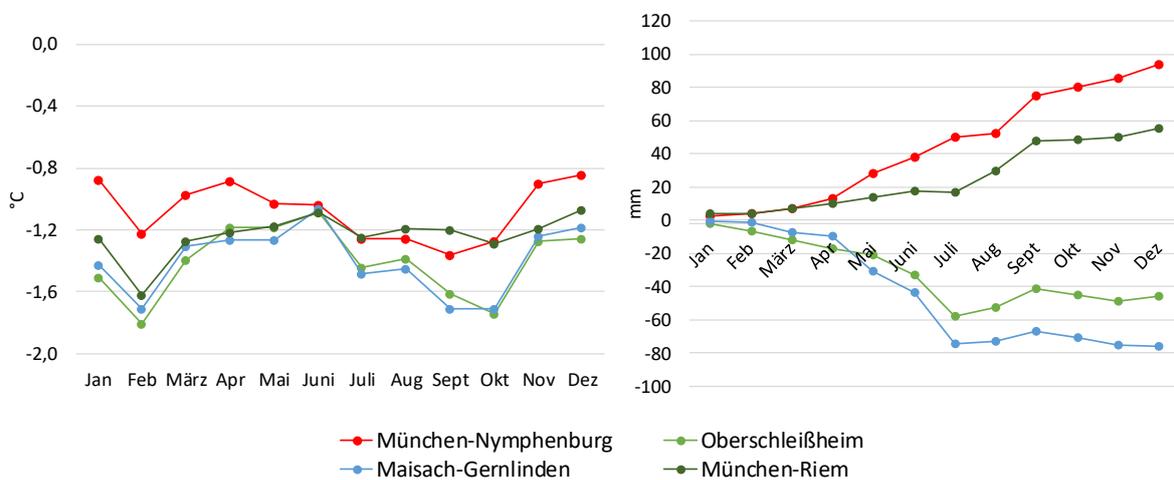


Abbildung 12. Abweichung der mittleren Monatstemperaturen (links) und der mittleren kumulierten Monatssummen des Niederschlags (rechts) der vier Wetterstationen München-Riem, München-Nymphenburg, Maisach-Gernlinden und Oberschleißheim im Großraum München von den Werten der Referenzstation München-Stadt im Mittel des Zeitraums 1984-1991

Klar erkennbar sind die negativen Abweichungen der Monatsmitteltemperaturen an allen Wetterstationen in Bezug auf die Wetterstation München-Stadt. Die höchsten Abweichungen mit bis zu 1,8 °C geringeren Temperaturen sind für die Monate Februar, September und Oktober zu erkennen, insbesondere für die Wetterstationen Oberschleißheim und Maisach-Gernlinden, die beide außerhalb des

Stadtgebietes liegen. Diese beiden Wetterstationen weisen auch deutlich geringere Niederschlagssummen als im Stadtzentrum auf, während die suburbanen Wetterstationen in München-Riem und München-Nymphenburg um in der Jahressumme bis zu 93 mm höhere Niederschläge zeigen.

Da jedoch die Entfernungen der Wetterstationen München-Riem, München-Nymphenburg, Maisach-Gernlinden und Oberschleißheim zu den einzelnen Plätzen zu groß und als nicht repräsentativ für das Standortklima der Plätze angesehen werden kann, wurde für die Simulationen einheitlich die Witterungsdaten der DWD-Station München-Stadt herangezogen. Dadurch konnte auch das klimatische Mittel über 30 Jahre von 1991-2020 verwendet werden.

### 3.4.2 Klimafunktionskarten von München

Auf Basis der Klimafunktionskarten der Stadt München (LH München, 2014) konnten für die 25 Plätze die Werte für das Bioklima, für die 04:00 Uhr, 14:00 Uhr und 21:00 Uhr Temperatur sowie für 04:00 Uhr und 22:00 Uhr Windgeschwindigkeit abgeleitet werden (Abbildung 13 und Tabelle 5).



Abbildung 13. 14 Uhr Temperaturen an den 25 ausgewählten Plätzen (Basis Klimafunktionskarten der Landeshauptstadt München (LH München, 2018))

Tabelle 5. Bioklima und Temperaturen an den 25 Plätzen auf Basis der Klimafunktionskarte München nach der FITNAH-Modellierung (LH München, 2014) (Bioklima: 1: sehr günstig, 2: günstig, 3 weniger günstig, 4: ungünstig)

Platz	Größe m <sup>2</sup>	Bioklima	Temperatur [°C]		
			4.00 Uhr	14 Uhr	21 Uhr
Alpenplatz	3317	3,4	19,0	35,0	23,0
Alter Hof	3546	4	20,0	36,0	23,0
Am Harras	10444	2,3	18,5	34,5	22,5
Bordeauxplatz	14018	3,4	19,0	35,0	23,0
Edelweißplatz	2603	4	19,0	35,0	23,0
Erich-Mühsam-Platz	2100	3	19,0	35,0	23,0
Fischmarktbrunnen	3758	4	19,0	35,0	23,0
Genfer Platz	5853	1,2	17,0	33,5	21,5
Genoveva-Schauer-Platz	1601	4	19,0	35,0	23,0
Habsburgerplatz	8940	3	19,0	35,0	23,0
Hohenzollernplatz	10150	3,4	19,0	35,5	23,0
Holzplatz	3289	3,4	18,5	34,5	22,5
Isartorplatz	21570	3,4	19,0	35,0	23,0
Kurfürstenplatz	5951	3,4	19,0	35,0	23,0
Marstallplatz	9517	4	19,5	35,5	23,0
Nikolaiplatz	3149	3,4	19,0	35,0	23,0
Pariser Platz	3242	4	19,0	35,0	23,0
Pündterplatz	6416	3,4	19,0	35,0	23,0
Rotkreuzplatz	14788	3,4	19,0	35,0	23,0
Rudi-Hierl-Platz	5959	4	19,0	35,5	23,0
Rundfunkplatz	6820	4	19,0	35,5	23,0
Schäringer Platz	6523	3	19,0	35,0	23,0
Weißbürger Platz	5995	4	19,0	35,0	23,0
Wettersteinplatz	14155	3	18,5	35,0	22,5
Wiener Platz	4939	3	18,5	34,0	22,5

Das Bioklima Münchens wurden in der Klimaanalyse der Landeshauptstadt München untersucht (LH München, 2014). Hierbei wurde die Stadt anhand ihrer Nutzungsstrukturen (z.B. Zentrumsbebauung, Freiland, Wald, Blockrandbebauung) kartiert. Mit dem FITNAH-Modell wurde nun die Geländehöhe, die kartierte Landnutzung und das großräumige Wetter verwendet, um die bioklimatische Situation an einem Standort zu beurteilen. Dies wurde für die gesamte Stadt München durchgeführt. Das Bioklima wurde in fünf Belastungsstufen klassifiziert:

- 1 – sehr günstig: dörflich geprägte Siedlungstypen
- 2 – günstig: Einzel und Reihenhausbebauung
- 3 – weniger günstig: Zeilen- und Blockrandbebauung
- 4 – ungünstig: verdichteter Siedlungsraum

Die Belastung ist in den dicht bebauten Bereichen mit ausgeprägtem Wärmeineffekt am stärksten ausgebildet. So liegt bei der Belastungsklasse 4 "Ungünstig" eine überdurchschnittliche Wärmebelastung vor. Anhand der exemplarischen Bewertung dieser Situation, in der sich thermische und lufthygienische Belastungen ausbilden, werden Planungshinweise aus stadtklimatischer Sicht abgeleitet (LH München, 2014).

Mit dieser Klassifikation des Bioklimas ist ersichtlich, dass nur zwei Plätze als sehr günstig bzw. weniger günstig eingestuft werden. Diese sind der Genfer Platz mit einer Einstufung von sehr günstig bis günstig

und Am Harras mit günstig bis weniger günstig. Die Mehrzahl der Plätze fällt unter die Kategorie weniger günstig bis ungünstig. Als ungünstig eingestuft wurden die Plätze Alter Hof, Edelweißplatz, Fischmarktbrunnen, Genoveva Schauer Platz, Marstallplatz, Pariser Platz, Rudi-Hierl-Platz, Rundfunkplatz und Weissenburger Platz.

Die Temperaturen der einzelnen Plätze variieren zwischen 17 °C (Genfer Platz) und 20 °C (Alter Hof) um 4 Uhr, zwischen 33,5 °C (Genfer Platz) und 36 °C (Alter Hof) um 24 Uhr und zwischen 21,5 °C (u.a. Alter Hof, Marstallplatz) und 23 °C (Genfer Platz) um 21 Uhr.

### 3.4.3 RCP- Klimaszenarien

Datengrundlage für die Klimaszenarien ist das Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP), das konsistente Sätze von Klimawirkungsdaten über Sektoren und Skalen hinweg zur Verfügung stellt. ISIMIP dient als Grundlage für Klimamodellevaluationen und ermöglicht verbesserte Abschätzungen der biophysikalischen und sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels für verschiedene Stufen der globalen Erwärmung. Zudem sind Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen des Klimawandels über verschiedene Sektoren hinweg durch konsistente Szenarien berücksichtigt. Die Szenarien decken die globale Landfläche auf einem 0,5° x 0,5°-Gitter ab und sind über [www.isimip.org](http://www.isimip.org) verfügbar (PIK, 2017).

Es gibt vier Szenario-Realisierungen basierend auf den *Representative Concentration Pathway* Emissionsszenarien *RCP*, durch den globalen Strahlungsantrieb im Jahr 2100 charakterisiert sind (Baek et al., 2013; Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2011):

- RCP 2.6: ein Spitzenwert von ca. 3 W m<sup>-2</sup> wird Mitte des Jahrhunderts erreicht, gefolgt von einem Rückgang auf 2,6 W m<sup>-2</sup> bis 2100
- RCP 4.5: Stabilisierungen des globalen Strahlungsantriebs ohne Überschwingungen bei 4,5 W m<sup>-2</sup> in 2100
- RCP 6.0: Stabilisierungen des globalen Strahlungsantriebs ohne Überschwingungen bei 6 W m<sup>-2</sup> in 2100
- RCP 8.5: Anstieg des globalen Strahlungsantriebs bis zu 8,5 W m<sup>-2</sup> in 2100

Die hier verwendeten Klimaszenarien beruhen auf den Simulationsläufen der HadGEM2-Modellfamilie, die eine aktualisierte Version des HadGEM1-Modells (Johns et al., 2006) und seiner Konfigurationen ist. Für die Simulationen wurden aus dem 0,5° x 0,5°-Gitter der Klimaszenarien die Klimazeitreihen verwendet, die die geringste Entfernung zur Stadt München besitzen. Da auch hier Differenzen bei den einzelnen Klimaparametern aufgrund des Entfernungs- und Höhenunterschieds auftraten, wurde eine zusätzliche 10-jährige Zeitreihe für das gegebene Klima – berechnet auf Basis der jeweiligen RCPs – beschafft. Durch einen Vergleich mit Werten der Wetterstation München für dieselbe Periode konnten die Zeitreihen der RCP-Klimaszenarien an den Standort München angepasst werden.

Für die Simulationen mit CityTree und ENVI-met wurden die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 ausgewählt. Simulationsläufe werden so für das aktuelle Klima, die nahe Zukunft (2041–2050) und für die ferne Zukunft (2091–2090) der Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 durchgeführt.

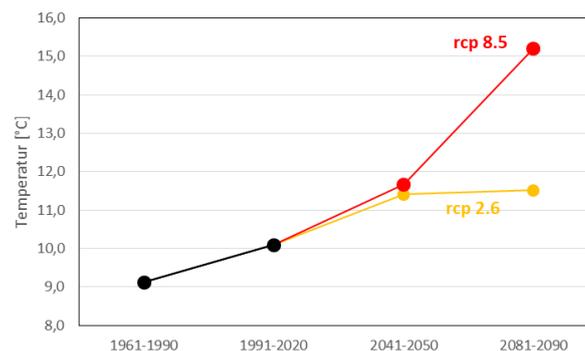
Neben den Klimaparametern Strahlung, Temperatur relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Niederschlag wird für die Simulationen auch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der einzelnen Klimaszenarien

benötigt. *Tabelle 6* zeigt die Werte für die einzelnen Zeitspannen und Klimaszenarien. Für die Simulationen der einzelnen Standorte wird die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen innerhalb jedes Szenariolaufs konstant gehalten.

*Tabelle 6. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen [ppm] für die einzelnen Klimaszenarien und Zeiträume (nach Nishina et al. 2014).*

Klima-szenarium	Gegenwart	nahe Zukunft	ferne Zukunft
		2041-2050	2081-2090
Ist-Klima	400	-	-
RCP 2.6	400	440	420
RCP 8.5	400	520	810

Die Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Jahresmitteltemperaturen und die mittleren Jahressummen des Niederschlags für die Stadt München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090). Bei der Jahresmitteltemperatur ist bereits bei einem Vergleich der Perioden 1961-1990 mit 1991 bis 2020 ein Anstieg der Temperatur um 1,0 °C zu erkennen. Diese steigt für die nahe Zukunft der Klimaszenarien RCP 2.6 und 8.5 nochmals um 1,3 °C bzw. 1,6 °C an. In der fernen Zukunft liegt die Jahresmitteltemperatur für das RCP 2.6 Szenarium nur etwas höher bei 11,5 °C gegenüber dem Wert der nahen Zukunft, während sie unter dem RCP 8.5 Szenarium nochmals deutlich auf 15,2 °C ansteigt.



*Abbildung 14. Jahresmitteltemperaturen für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090)*

Die Niederschläge nehmen ausgehend vom Zeitraum 1961-1990 über die Periode 1991-2020 (-35 mm) bis zu den Szenarien der nahen Zukunft ab (RCP 2.6: -164 mm, RCP 8.5: -70 mm beide gegenüber 1990-2020). Unter den Bedingungen der fernen Zukunft liegt die Niederschlagssumme für RCP 2.6 nur noch 75 mm unter dem Wert des Zeitraums 1991-2020, für RCP 8.5 dagegen 128 mm unter den Vergleichszeitraum (Abbildung 15).

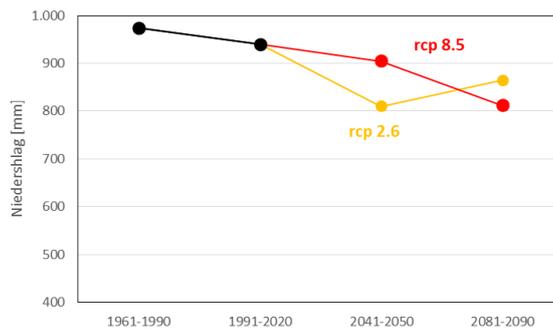


Abbildung 15. Mittlere Jahressummen des Niederschlags für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090)

Jedoch ist Jahresverlauf der Temperatur und insbesondere des Niederschlags, unter den zukünftigen Klimabedingungen teilweise klar verändert (Abbildung 16). So ist zum Beispiel der Niederschlag in den Monaten Juli und August des RCP 8.5 Szenarios der fernen Zukunft deutlich geringer gegenüber dem Werten des Ist-Klimas, während er in den Monaten Januar bis März darüber liegt.

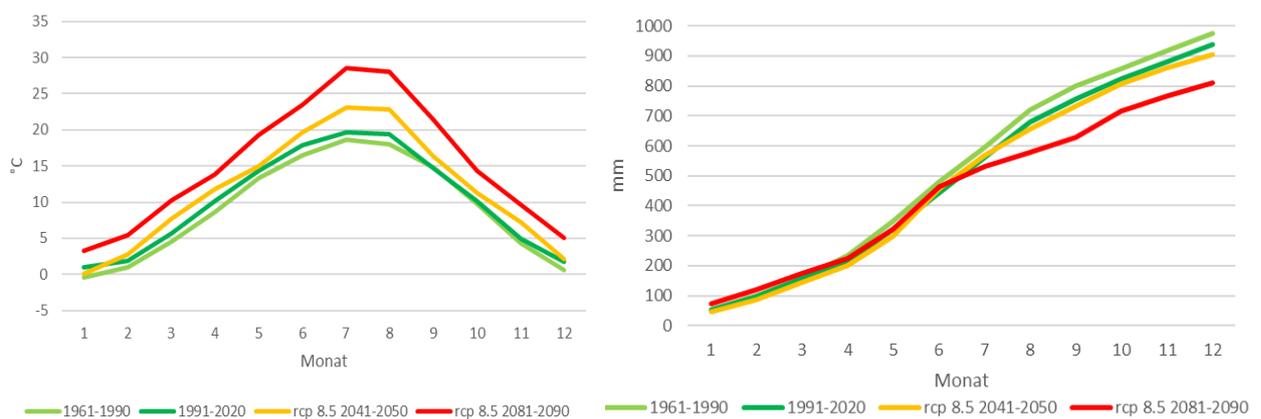


Abbildung 16. Monatsmittelwerte der Temperatur (links) und kumulierte Niederschlagssummen (rechts) für München für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 bzw. 2081-2090)

### 3.5 Kurzbeschreibung des Modells CityTree

Die Simulationen zum Wachstum und den Umweltleistungen des Grüns von Plätzen wurden unter Verwendung des Stadtbaumwachstumsmodells CityTree 3.3 (Rötzer et al., 2019) durchgeführt.

Die Basis des Wachstumsmodells für Stadtbäume „CityTree“ bilden Messungen von über 2.000 Stadtbäumen in sechs bayerischen Städten. Das Modell simuliert das Wachstum und die Ökosystemleistungen der vier Baumarten Winterlinde (*T. cordata*), Scheinakazie (*Robinia pseudoacacia*), Platane (*P. x acerifolia*) und Rosskastanie (*A. hippocastanum*) in Abhängigkeit des Klimas und der Umweltbedingungen. Eingangsparameter für das Modell sind das Alter, der Durchmesser und die Höhe des Baumes. Als Triebkräfte des Wachstums werden neben der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre monatliche Werte

der Strahlung, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags benötigt. Der Boden wird über die Feldkapazität, den permanenten Welkepunkt und die Durchwurzelungstiefe beschrieben.

Das Modell CityTree ist modular aufgebaut (Abbildung 17) und beinhaltet neben der Beschreibung der gesamten Wasserbilanz des Baumes auch Module zur Photosynthese, Respiration und Allokation. Somit können zusätzlich zu Simulationen des Wachstums und der Baumstruktur auch Ökosystemleistungen des Baumes abgeschätzt werden. Dies sind jährliche Verläufe und Summen der Kohlenstoffbindung, der Beschattung, der Abkühlung durch Verdunstung und des Wasserverbrauchs und des Abflusses.

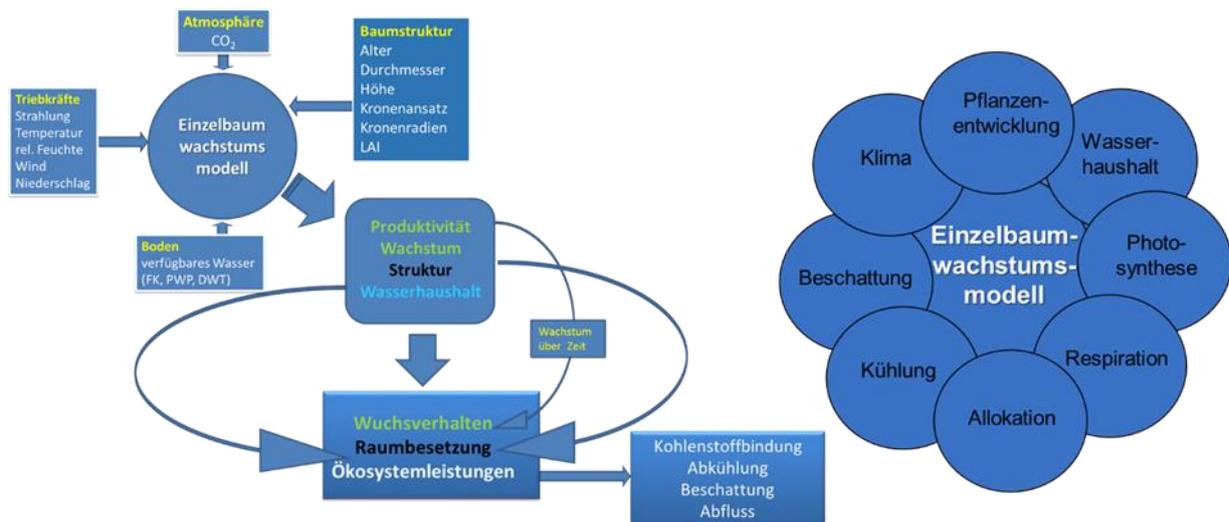


Abbildung 17. Schema und modulare Zusammensetzung des Wachstumsmodells CityTree

Das Modell CityTree ist aus 7 Modulen aufgebaut. Im Modul Klima werden die Monatsmittelwerte bzw. Monatssummen von Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer bereitgestellt. Diese können klimatische Mittelwerte, aber auch Werte einzelner Jahre sein. Im Modul Pflanze werden die Jahresverläufe wichtiger pflanzlicher Kenngrößen wie z.B. der Blattflächenindex berechnet. Dabei wird auch die Phänologie der einzelnen Baumarten, die sich von Stadt zu Stadt unterscheidet, mit einbezogen. So erfolgt zwischen Austrieb und Verfärbung der Blätter eine sinusförmige Interpolation der einzelnen Parameter.

Im Modul Wasser wird der Wasserhaushalt eines Einzelbaumes in Anlehnung an das Wasserhaushaltsmodell HYMO (Rötzer et al., 2004) bestimmt. Grundlage ist die allgemeine Wasserbilanzgleichung:

$$NS - INT - ET_t - RO - \Delta\Psi = 0 \quad [Gl. 6]$$

(mit: NS = Niederschlag [mm], INT = Interzeption [mm],  $ET_t$  = tatsächliche Evapotranspiration [mm], RO = Abfluss [mm],  $\Delta\Psi$  = Änderung des Bodenwassergehaltes [mm])

Mit Ausnahme der Messgröße Niederschlag müssen die Wasserbilanzelemente Interzeption, tatsächliche Evapotranspiration und Abfluss berechnet werden. Die monatliche Interzeptionsrate INT ist dabei eine Funktion des Blattflächenindex, der Interzeptionskapazität und des Niederschlags. Die tatsächliche Evapotranspiration  $ET_t$  wird in mehreren Teilschritten berechnet. Zunächst wird die potentielle Evapotranspiration nach Penman (DWA, 2018) ermittelt, die die maximal mögliche Verdunstung aufgrund der meteorologischen Verhältnisse darstellt, bei der der Boden mit Wasser gesättigt ist. Im

nächsten Schritt wird anhand eines baumarten- und zeitspezifischen Faktors die potentielle Verdunstung der jeweiligen Baumart eines Monats bestimmt werden. Im letzten Schritt wird die tatsächliche Evapotranspiration aus der potentiellen Evapotranspiration der Baumart mittels eines Reduktionsfaktors bestimmt, der sich aus dem Bodenwassergehalt des Vormonats, dem aktuellen Monatsniederschlag, der potentiellen Verdunstung der Baumart und der nutzbaren Feldkapazität berechnet.

Der Abfluss RO stellt die Summe aus Oberflächenabfluss und Abfluss unterhalb der Durchwurzelungstiefe dar. Der Oberflächenabfluss berechnet sich dabei aus dem Prozentsatz der versiegelten Fläche und dem auf die Oberfläche auftreffenden Niederschlagswassers. Der Abfluss unterhalb der Durchwurzelungstiefe ergibt sich aus der Differenz von aktuellem Bodenwassergehalt und maximalen Bodenwassergehalt, wenn bei der Bilanzierung der aktuelle Bodenwassergehalt den maximalen Bodenwassergehalt überschreiten würde. Zusätzlich wurde ein Hysterese-Effekt in das Wasserhaushaltsmodul eingebaut, der ein verzögertes Wiederbefeuchten des Bodens in Abhängigkeit der Stärke des vorhergehenden Austrocknens berücksichtigt.

Die Einschränkung der Photosynthese unter Wassermangel, die über das Öffnen und Schließen der Stomata reguliert wird, beschreibt ein Wasserstressfaktor, der auf diese Weise den internen CO<sub>2</sub>-Partialdruck unter Wasserstress reduziert.

Im Modul Photosynthese wird auf Grundlage der Arbeiten von Haxeltine und Prentice (1996) die Nettoassimilation berechnet. Zur Berechnung werden die monatlichen Mittelwerte bzw. Summen von Temperatur, Strahlung und Tageslänge sowie die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre sowie der Wasserstressfaktor benötigt. Die Bruttoassimilation A errechnet sich aus:

$$A = d * [(Jp + Jr - \sqrt{(Jp + Jr)^2 - 4 * \vartheta * Jp * Jr})] / 1,4 \quad [Gl. 7]$$

(mit: A = Bruttoassimilation [g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>], d = mittlere Tageslänge des Monats [h], Jp = Reaktion der Photosynthese auf absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung [g C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>], Jr = Rubisco limitierte Rate der Photosynthese [g C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>],

Aus der Bruttoassimilation ergibt sich nach Abzug der Dunkelatmung die Nettoassimilation, wobei die Dunkelatmung eine Funktion der maximalen katalytischen Rubisco-Kapazität ist. Die so berechnete Nettoassimilation ist die über den jeweiligen Monat gemittelte Tagessumme des Baumes und bezieht sich auf 1 m<sup>2</sup> Blattfläche. Multipliziert mit der Anzahl der Tage des Monats und der LAI des jeweiligen Monats ergibt sich die gesamte Nettoassimilation des Baumes für den Monat.

Im Modul Respiration wird der Anteil der Wachstums- und der Erhaltungsatmung von der Nettoassimilation (=Bruttoprimärproduktion) subtrahiert, woraus sich die Nettoprimärproduktion des Baumes ergibt. Hierbei wird ein fester Anteil von 50 % der Respiration an der Bruttoprimärproduktion angenommen (Pretzsch et al., 2012).

Im Modul Allokation wird der bis zum Ende des Jahres gewonnene Kohlenstoff in die einzelnen Kompartimente der Pflanze aufgeteilt und so der Zuwachs von Stamm, Ästen, Blättern und Fein- und Grobwurzeln bestimmt. Die Stammbiomasse ist dabei das Produkt von Stammvolumen und Holzdicke. Die Astbiomasse wird baumartenspezifisch als konstanter Anteil der Stammbiomasse für große Bäume und in Abhängigkeit des Durchmessers auf Brusthöhe für kleine Bäume abgeschätzt. Die Laubbiomasse ist eine Funktion der Blattfläche und des spezifischen Blattflächenindex. Stamm-, Ast- und Laubbiomasse ergeben zusammen die oberirdische Biomasse. Die unterirdische Biomasse setzt sich aus der Fein- und der Grobwurzelbiomasse zusammen. Im Modell CityTree wird sie als Funktion der oberirdischen Biomasse und des Baumalters bestimmt. Für die Allokation des neu aufgenommenen Kohlenstoffs am

Ende eines Jahres muss zunächst der Kohlenstoffpool basierend auf der aktualisierten Gesamtbio-  
masse (=initiale Biomasse plus Nettoprimärproduktion) aufgefüllt werden. Im nächsten Schritt kann  
die Feinwurzelbiomasse als konstanter Anteil der Laubbiomasse berechnet werden. Die verbleibende  
neu aufgenommene Kohlenstoffbiomasse stellt den Zuwachs der holzigen Biomasse dar. Dieser wird  
proportional auf die Ast- und Grobwurzelbiomasse aufgeteilt. Die aktualisierte Stammbiomasse ist  
dann die Summe der Stammbiomasse zu Beginn der Simulation plus die verbleibende neu aufgenom-  
mene Kohlenstoffbiomasse. Anhand der aktualisierten Biomassen können neue Baumdimensionen  
wie Stammvolumen, Kronenvolumen, CPA, Kronendurchmesser, BHD bestimmt werden

Im Modul Kühlung wird auf Basis der Jahressumme der Transpiration des Baumes und der latenten  
Energie des Phasenübergangs von flüssigen zu festem Wasser die Energie berechnet, die aufgrund der  
Verdunstung freigesetzt wird. Im Modul Beschattung wird die Schattenfläche und die Schattendichte  
quantifiziert. Die Schattenfläche ist eine Funktion der Baumhöhe und des Kronendurchmessers für den  
längsten Sommertag im Jahr, den 21. Juni. Als Vergleichswerte wurden die mittleren beschatteten Flä-  
chen zwischen 8:00 Uhr und 18:00 Uhr berechnet. Die Schattendichte wird anhand der Blattfläche pro  
Kronenvolumen im Juni bestimmt.

Das Modell CityTree 3.3 kann so das jährliche Wachstum und die Ökosystemleistungen wie Kohlen-  
stoffbindung, Beschattung, Abkühlung durch Verdunstung und Wasserverbrauch von fünf Baumarten  
unterschiedlicher Altersstufen in Abhängigkeit des Klimas und der Bodenbedingungen sowie der Um-  
gebungsbedingungen für bayerische Städte berechnen. Eine detaillierte Beschreibung des Modells Ci-  
tyTree findet man in Rötzer et al. (2019).

## **3.6 Wachstum und Ökosystemleistungen des Grüns auf öffentlichen Plätzen**

### **3.6.1 Simulation der Umweltleistungen von Bäumen**

Grundlage der Simulationen bilden mittlere meteorologische Parameter der Wetterstation München-  
Stadt für die aktuelle Klimaperiode 1991 bis 2020. Damit kann der Einfluss des Grüns eines Platzes und  
der kleinräumigen Umgebung des jeweiligen Baumes, wie z.B. dessen Bodenversiegelung, auf die Öko-  
systemleistungen analysiert werden. Die Monatsmittelwerte der benötigten meteorologischen Para-  
meter Tagesmitteltemperatur, der relativen Luftfeuchte, des Niederschlags, der Strahlung und der  
Windgeschwindigkeit sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7. Monatsmittelwerte der meteorologischen Parameter der Wetterstation München-Stadt für den Zeitraum 1991-2020 (DWD 2021)

Monat	Strahlung J/cm <sup>2</sup>	Temperatur °C	relative Feuchte %	Windgeschwindigkeit m/s	Niederschlag mm
1	371	0,9	80	2,7	52
2	614	1,9	76	2,7	46
3	962	5,7	71	2,9	61
4	1396	10,2	65	2,6	56
5	1674	14,3	67	2,5	107
6	1845	17,8	67	2,4	121
7	1855	19,6	66	2,5	119
8	1653	19,4	68	2,2	116
9	1177	14,7	75	2,2	78
10	744	10,1	80	2,3	67
11	417	4,9	83	2,4	58
12	311	1,8	82	2,7	59
<b>Mittel</b>	<b>1085</b>	<b>10,1</b>	<b>73</b>	<b>2,5</b>	<b>940</b>

Da Angaben zu den Böden der Plätze fehlen, wurde die Simulationen für alle Plätze mit einer einheitlichen Bodenart (sandiger Lehm mit einer Durchwurzelungstiefe 80 cm) durchgeführt. Sie stellt mittlere Bodenwasserspeicherbedingungen dar. Als CO<sub>2</sub>-Konzentration für den Zeitraum 1991-2020 wurde ein konstanter Wert von 400 ppm angenommen. Eingabeparameter für die Bäume waren Baumart, Baumalter, Stammdurchmesser auf 1,3 m, Baumhöhe, Kronenlänge und mittlerer Kronendurchmesser. Desweiteren wurde die gemessene Versiegelung des Bodens unter den Bäumen (in Prozent) für die individuellen Simulationen verwendet.

Zunächst wurden Simulationen für alle 25 Plätze unter Berücksichtigung des Klimas im Zeitraum von 1991 bis 2020 durchgeführt. Die aggregierten Wachstumswerte und Ökosystemleistungen wurden in Tabelle 8 dargestellt. Das durchschnittliche Alter der Bäume an den untersuchten Standorten reicht von 36 Jahren auf dem Genoveva Schauer Platz bis zu 73 Jahren am Alten Hof, während das durchschnittliche Alter der Baumbestände aller zehn Plätze bei 53 Jahren liegt. Es wurden beträchtliche Unterschiede zwischen den untersuchten Standorten hinsichtlich der Biomasse, des jährlichen Zuwachses und der Ökosystemleistungen festgestellt. Die Biomasse variiert zwischen 0,8 t auf dem Genoveva Schauer Platz und 62,1 t am Hohenzollernplatz.

Tabelle 8. Alter der Bäume, Übershirmungsflächen, Bestandsbiomassen, mittleres Wachstum und Ökosystemleistungen für den Zeitraum 1961-1990 des Baumbestandes an 25 Plätzen in München

Platz	Alter	Schirm	Bio- masse	Biomassen- zuwachs	C-Fixie- rung	Verduns- tung	Trockenheits- index	Ab- fluss	Kühl-leis- tung
	[Jahre]	[m <sup>2</sup> ]	[t]	[kg jr <sup>-1</sup> ]	[kg C jr <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]		[%]	[kWh]
Alpenplatz	60	1.863	14,2	143	133	381	0,26	88	260.204
Alter Hof	73	426	4,6	11	25	110	0,38	90	74.861
Am Harras	38	1.617	14,3	118	118	295	0,26	91	201.226
Bordeauxplatz	44	4.081	35,2	490	389	1.549	0,59	57	1.057.555
Edelweißplatz	53	456	3,9	20	26	123	0,38	85	83.782
Erich Mühsam Platz	46	815	5,7	70	59	149	0,26	91	101.510
Fischmarkt- brunnen	60	1579	21,4	141	159	410	0,41	72	280.127
Genfer Platz	52	688	7,7	137	101	278	0,66	55	189.704

Genoveva									
Schauer Platz	36	309	0,8	41	24	76	0,24	87	51.589
Habsburgerplatz	60	4.398	61,8	698	597	1.512	0,48	63	1.033.200
Hohenzollern-									
platz	55	5.851	62,1	212	362	1.372	0,25	85	937.324
Holzplatz	52	996	8,0	123	95	323	0,35	72	220.947
Isartorplatz	54	4.020	37,4	437	374	1.277	0,46	69	872.372
Kurfürstenplatz	59	852	7,1	76	68	245	0,25	80	167.031
Marstallplatz	57	2.087	19,1	389	275	722	0,55	62	492.886
Nikolaiplatz	58	558	9,7	34	55	186	0,44	66	127.025
Pariser Platz	59	1.121	8,3	53	62	243	0,24	88	165.971
Pündterplatz	50	2.058	22,4	248	216	760	0,54	60	518.997
Rotkreuzplatz	44	2.316	27,4	197	208	485	0,28	86	331.221
Rudi Hierl Platz	45	1.647	14,3	181	150	394	0,45	75	269.211
Rundfunkplatz	48	1.410	10,0	285	185	581	0,63	52	396.770
Schäringerplatz	61	4.821	55,3	769	613	1.862	0,58	57	1.271.661
Weissenburger									
Platz	56	3.610	31,5	156	210	834	0,28	84	569.938
Wettersteinplatz	40	2.921	25,3	534	371	974	0,50	68	664.780
Wiener Platz	55	559	4,9	75	59	174	0,35	71	118.879

Der Trockenheitsindex, der als Verhältnis von tatsächlicher zu potentieller Verdunstung angegeben werden kann, und die Gefährdung für Trockenstress im Mittel eines Jahres angibt, variiert zwischen 0,24 (Pariser Platz) und 0,66 (Genfer Platz) (

Abbildung 18). Niedrige Werte unter 0,4 deuten auf eine sehr hohe Trockenstressgefährdung hin, während höhere Werte auf eine geringere Trockenstressgefährdung anzeigen. Werte über 0,75 bedeuten sehr geringe Trockenstressgefährdungen.

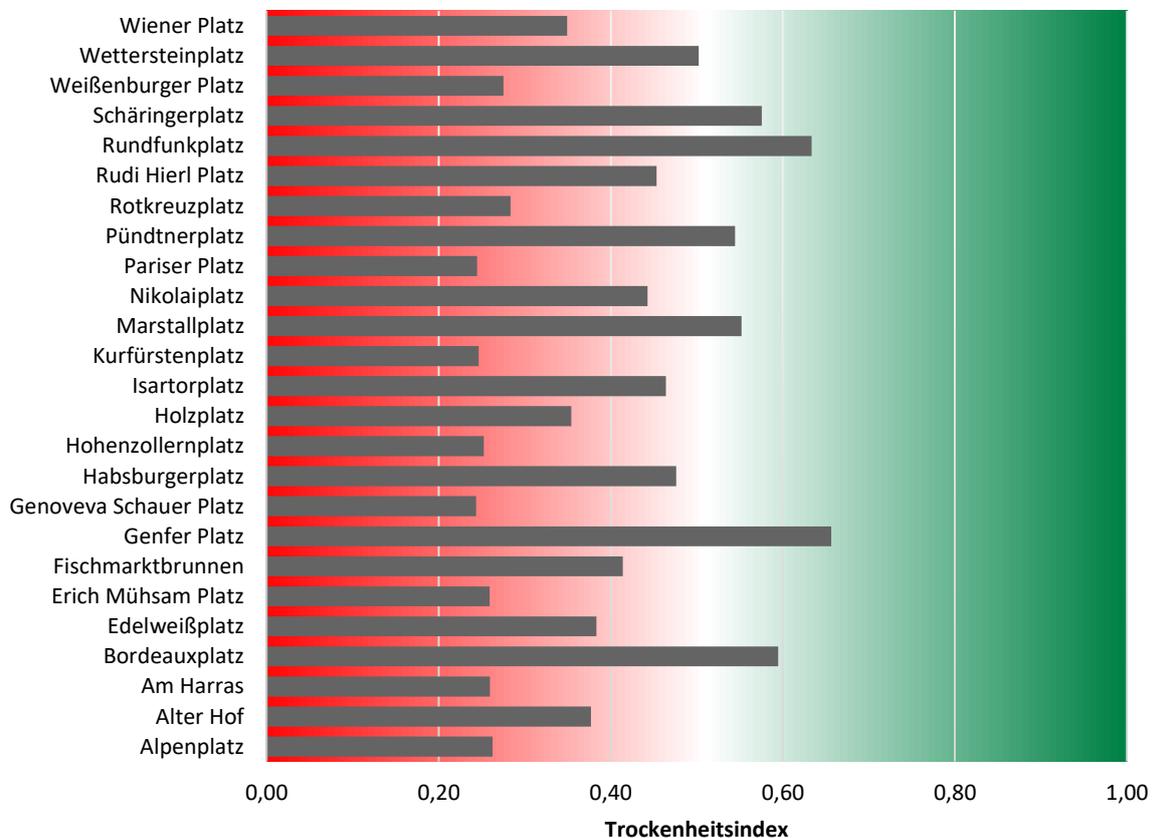
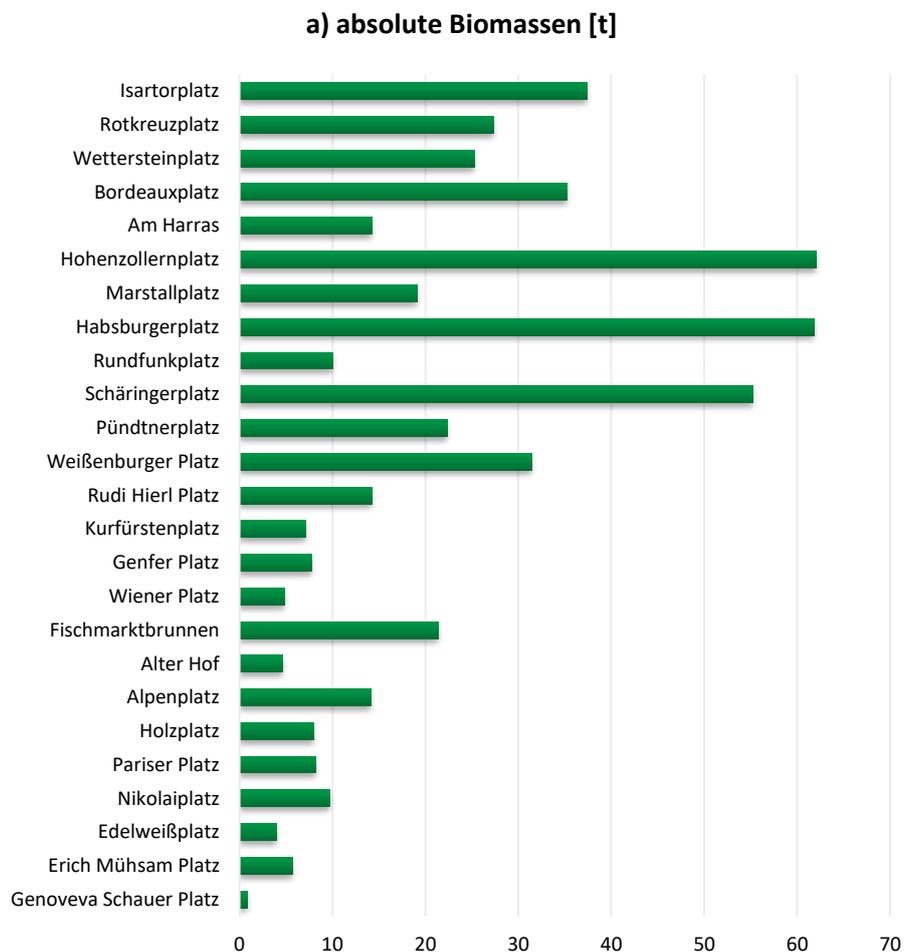


Abbildung 18. Trockenstressgefährdung der Bäume an ausgewählten Münchner Plätzen (1991-2020).

### Biomasse und Zuwachs

Um die Ökosystemleistungen der Bäume der verschiedenen Plätze vergleichen zu können, müssen sie auf die Platzfläche bezogen, d.h. standardisiert werden. Deswegen wurden die Ökosystemleistungen der einzelnen Plätze im Folgenden auf einen Hektar bezogen. Für den Baumbestand der Plätze Alter Hof, Am Harras, Geneveva Schauer Platz, Kurfürstenplatz und Wiener Platz ergaben sich Bestandsbiomassen von weniger als 14 t pro Hektar (Abbildung 19a). Hohe Bestandsbiomassen weisen der Schäringerplatz, Habsburgerplatz, Hohenzollernplatz und der Weissenburger Platz mit über 60 t pro Hektar auf, im Mittel liegt die Bestandsbiomasse der zehn Plätze bei 83,4 t ha<sup>-1</sup>. Der mittlere jährliche Biomassezuwachs variiert zwischen 30 kg ha<sup>-1</sup> für den Alten Hof und 1.871 kg ha<sup>-1</sup> für den Schäringerplatz (Abbildung 19c). Im Mittel der 25 Plätze beträgt der jährliche Zuwachs 383 kg ha<sup>-1</sup>.



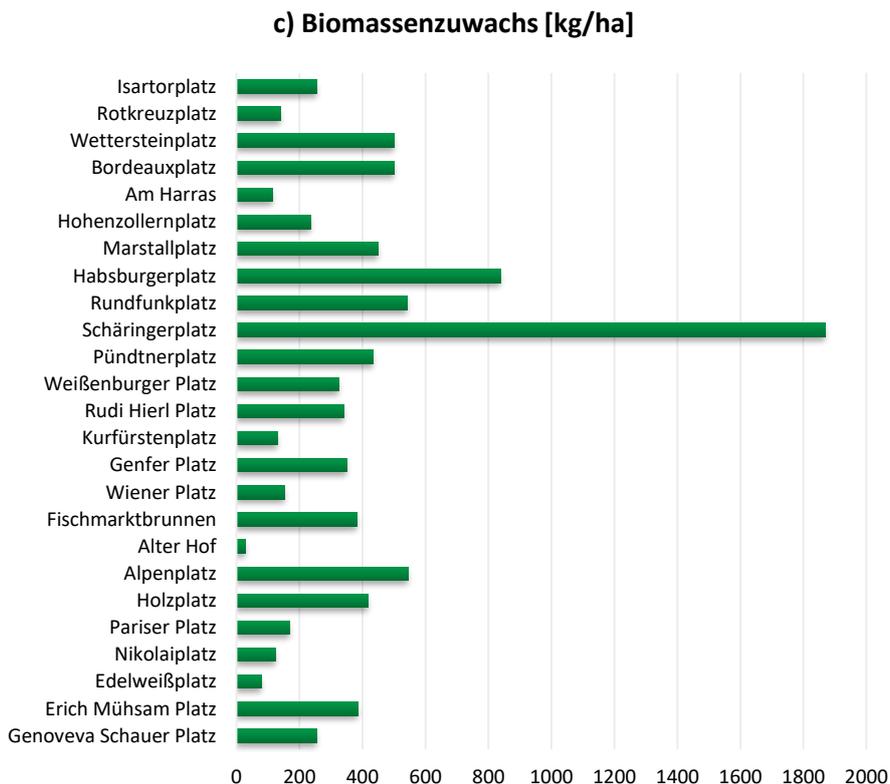
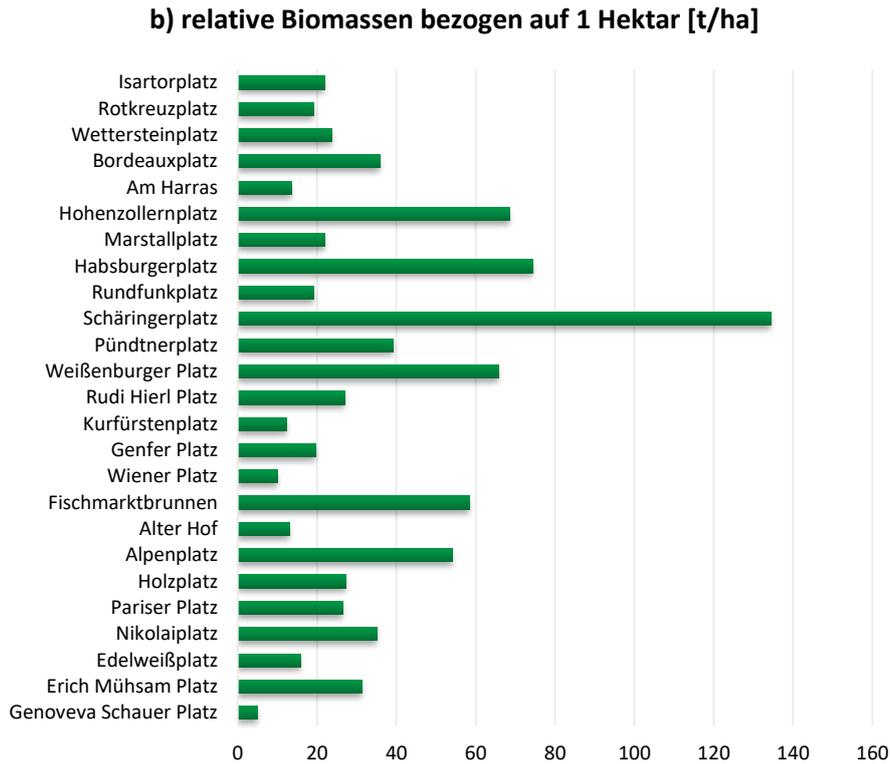


Abbildung 19. Bestandsbiomassen der Bäume an ausgewählten Plätzen in München

### CO<sub>2</sub>-Speicherung und Wasserverbrauch

Die mittlere jährliche CO<sub>2</sub>-Speicherung schwankt zwischen 0,1 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Alter Hof) und 3,4 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Schäringerplatz). Das sind im Mittel 0,7 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Abbildung 20a). Beim Wasserhaushalt weisen die Plätze Isartorplatz, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz, Habsburgerplatz und Schäringerplatz eine hohe

Verdunstungsleistung der Bäume von über  $1000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  auf (Abbildung 20b). Geringe Verdunstungssummen findet man für die Plätze Geneveva-Schauer-Platz mit  $76 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  und Am Harras mit  $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Im Durchschnitt verdunsten die Bäume  $613 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

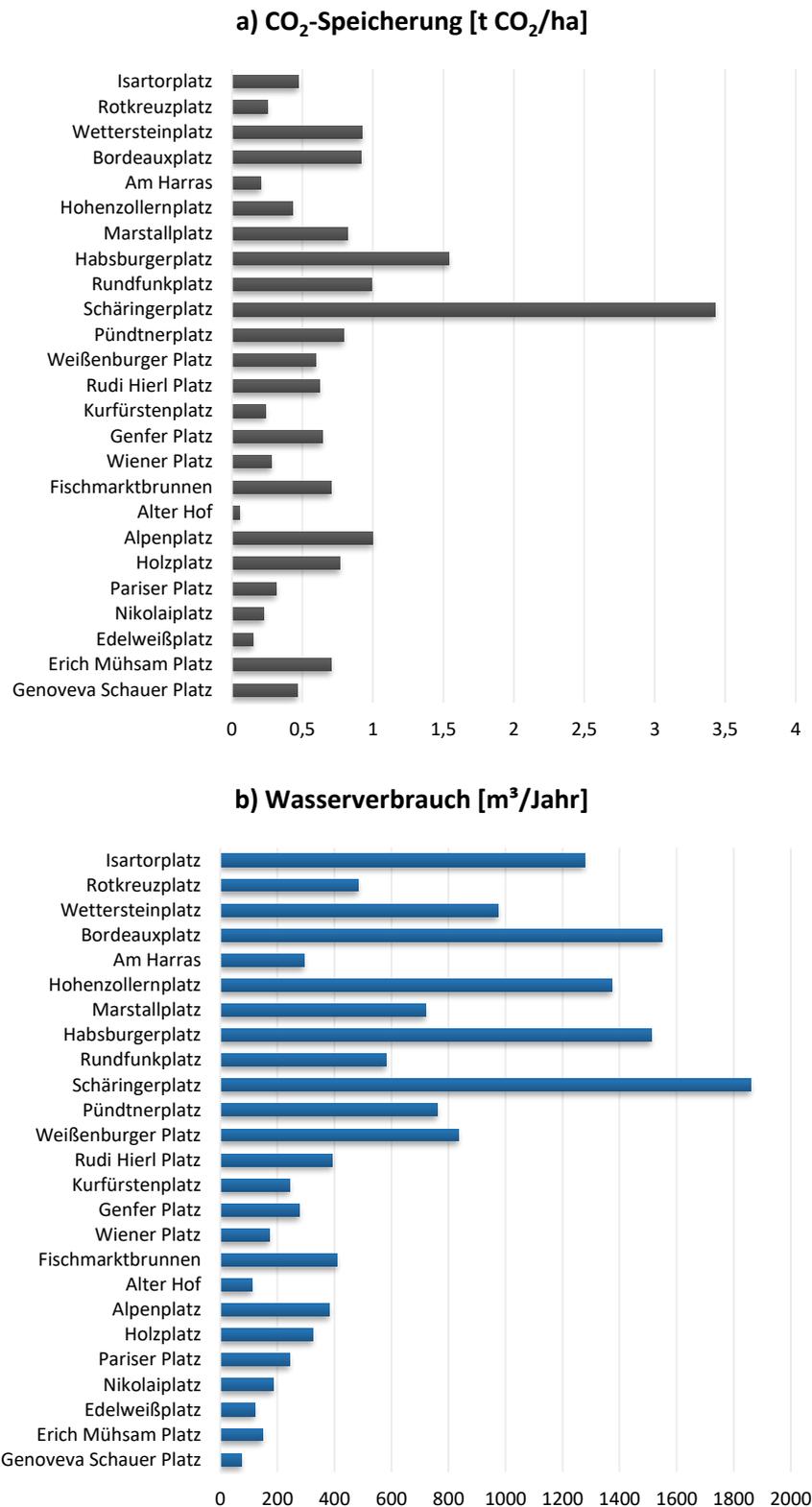
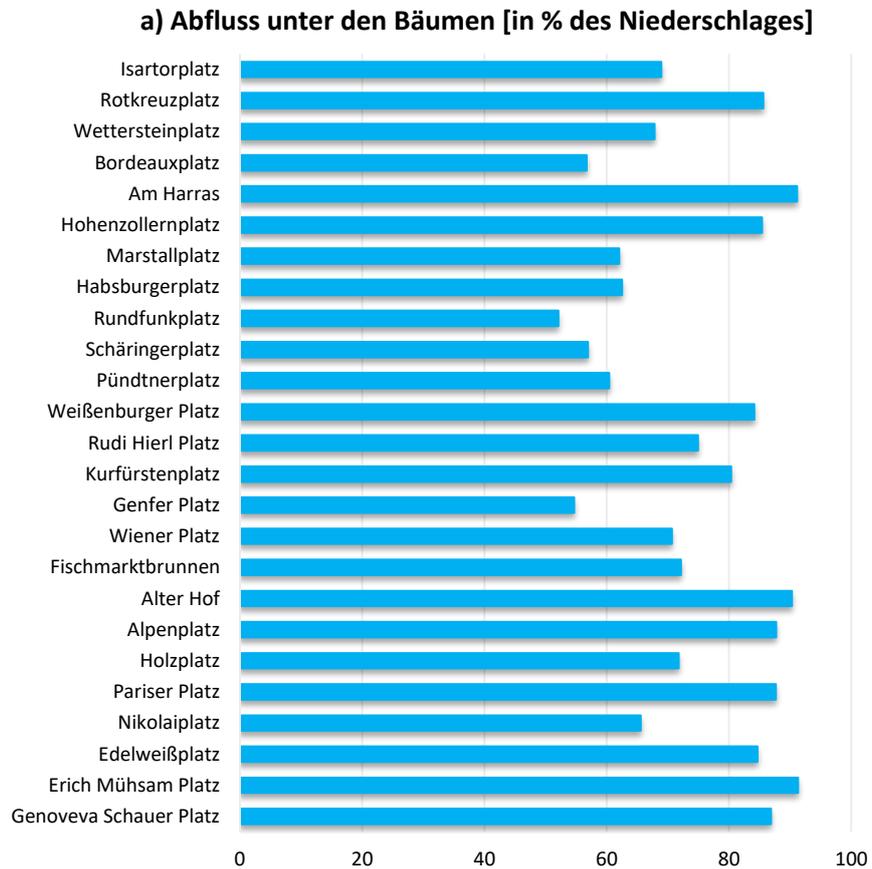


Abbildung 20. Mittlere jährliche CO<sub>2</sub>-Speicherung und Wasserverbrauch der Bäume an ausgewählten Plätzen in München (1991-2020).

## Abfluss und Kühlung

Der Niederschlagsabfluss unter den Bäumen ist an stark versiegelten Plätzen wie Alter Hof und Am Harras mit über 90% am höchsten. Der Rundfunkplatz zeigte den geringsten Abfluss (52%) (Abbildung 21a). Eine hohe Kühlung durch Verdunstung von über 800.000 kWh Jahr<sup>-1</sup> wurde an großen Plätzen wie Schäringerplatz, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz und Habsburgerplatz ermittelt. Im Mittel lag die Kühlung durch Verdunstung über alle Plätze bei ca. 420.000 kWh Jahr<sup>-1</sup> (Abbildung 21b).



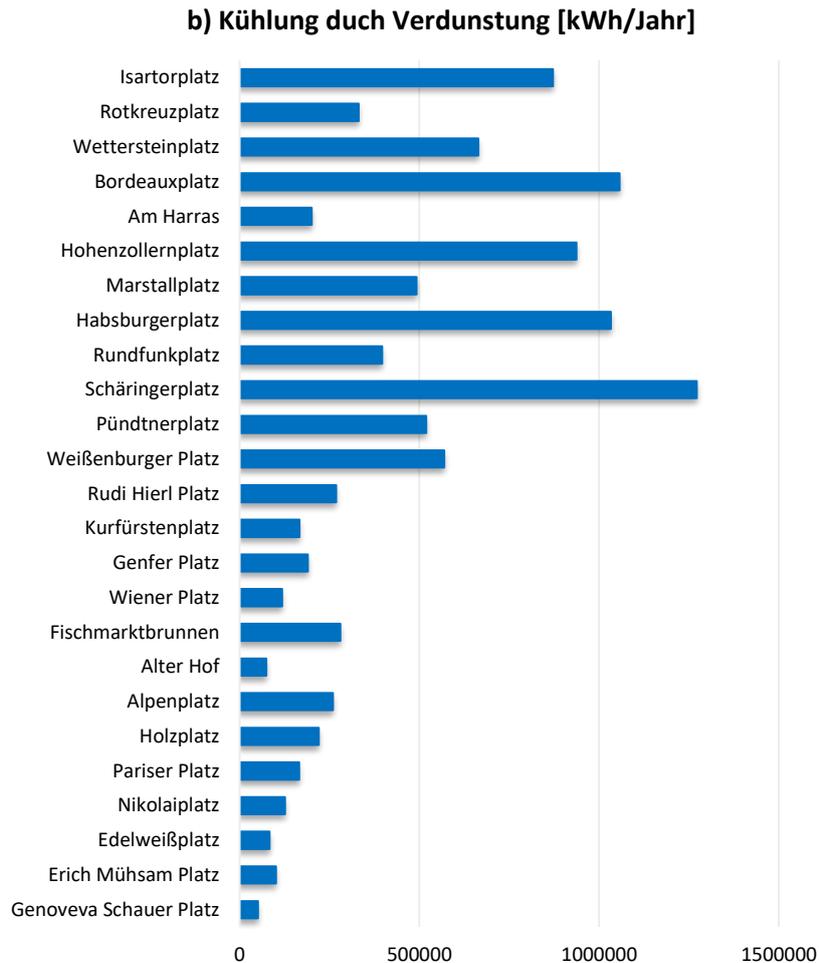


Abbildung 21. Mittlerer Abfluss (links) und Verdunstungssumme der Bäume (rechts) unter den Bäumen an ausgewählten Plätzen in München (1991-2020).

### Beschattung

Hinsichtlich der Schattendichte, hat Rotkreuzplatz mit  $0,51 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  die höchste Schattendichte, gefolgt von Fischmarktbrunnen ( $0,46 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ), Wiener Platz ( $0,44 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ), Kurfürstenplatz ( $0,43 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ). Im Mittel beträgt die Schattendichte über alle Plätze  $0,34 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  (

Abbildung 22a). Die Schattenflächen durch Bäume betragen am Schäringerplatz 74% und am Weissenburger Platz 60%. Die niedrigsten Schattenflächen wurden für den Wiener Platz (11%) und den Alter Hof (12%) (

Abbildung 22b) aufgezeichnet.

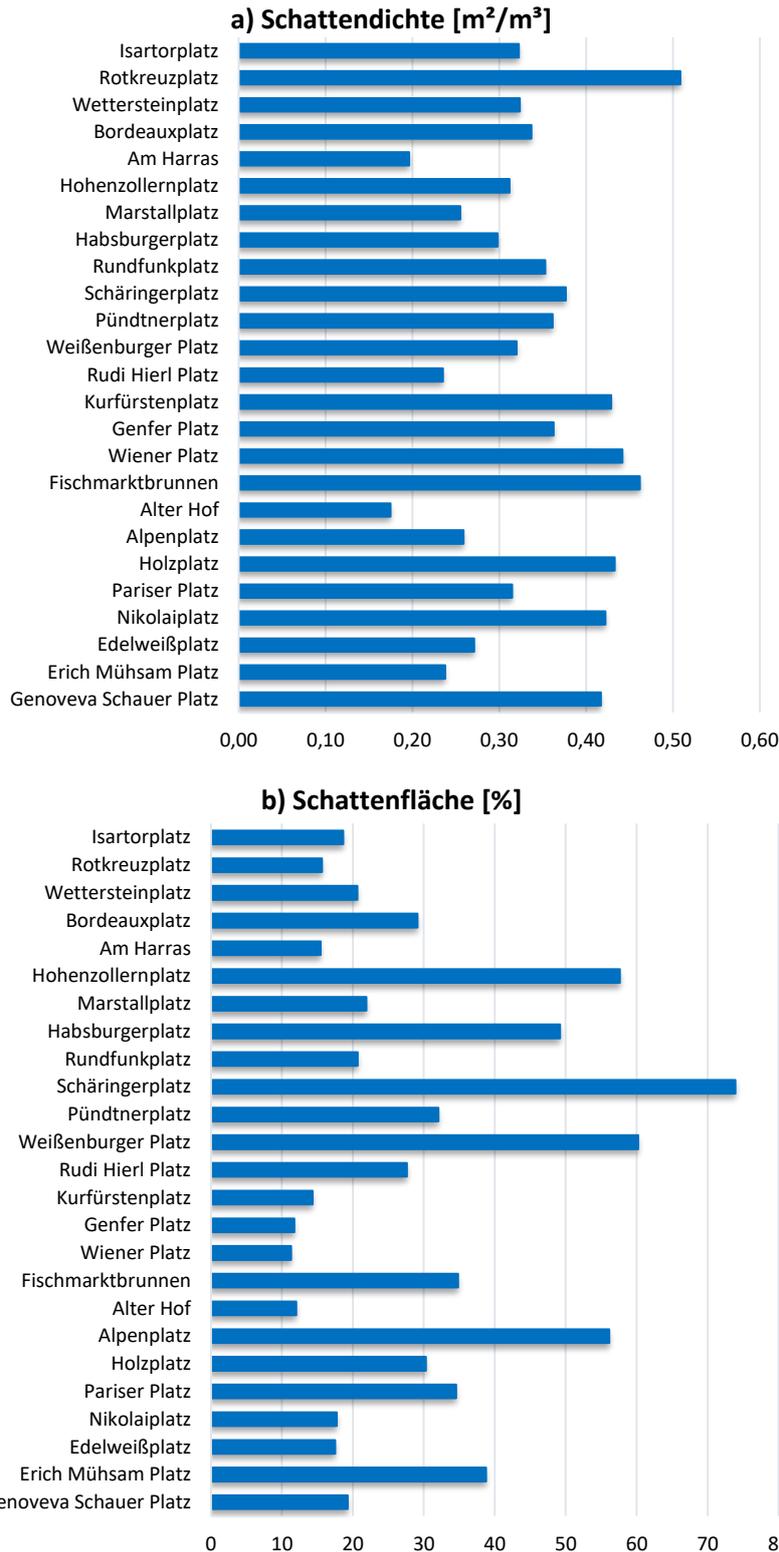


Abbildung 22. Schattendichte und Schattenfläche unter den Bäumen an Münchner Plätzen.

### Vergleich der Kühlleistungen

Abbildung 23 gibt Aufschluss über die Kühlleistung durch Beschattung und Verdunstung an den 25 Münchner Plätzen. Der Schäringerplatz zeigt die maximale Kühlleistung und wird als 100% festgelegt. Der Hohenzollernplatz erreicht bis zu 72% der Kühlleistung des Schäringerplatz, der Bordeauxplatz 61% und der Alter Hof lediglich 19%.

Betrachtet man die Anteile der Verdunstungskühlung und der Kühlung durch Beschattung an der Gesamtkühlleistung, weist der Schäringerplatz einen hohen Anteil von 47% an Verdunstungskühlung und 43% an Kühlung durch Beschattung auf. Der Bordeauxplatz zeigt hingegen einen Anteil von 40% an Verdunstungskühlung und lediglich 21% an Kühlung durch Beschattung. Der Alter Hof weist vergleichsweise geringe Anteile von 11% an Verdunstungskühlung und 7% an Kühlung durch Beschattung auf.

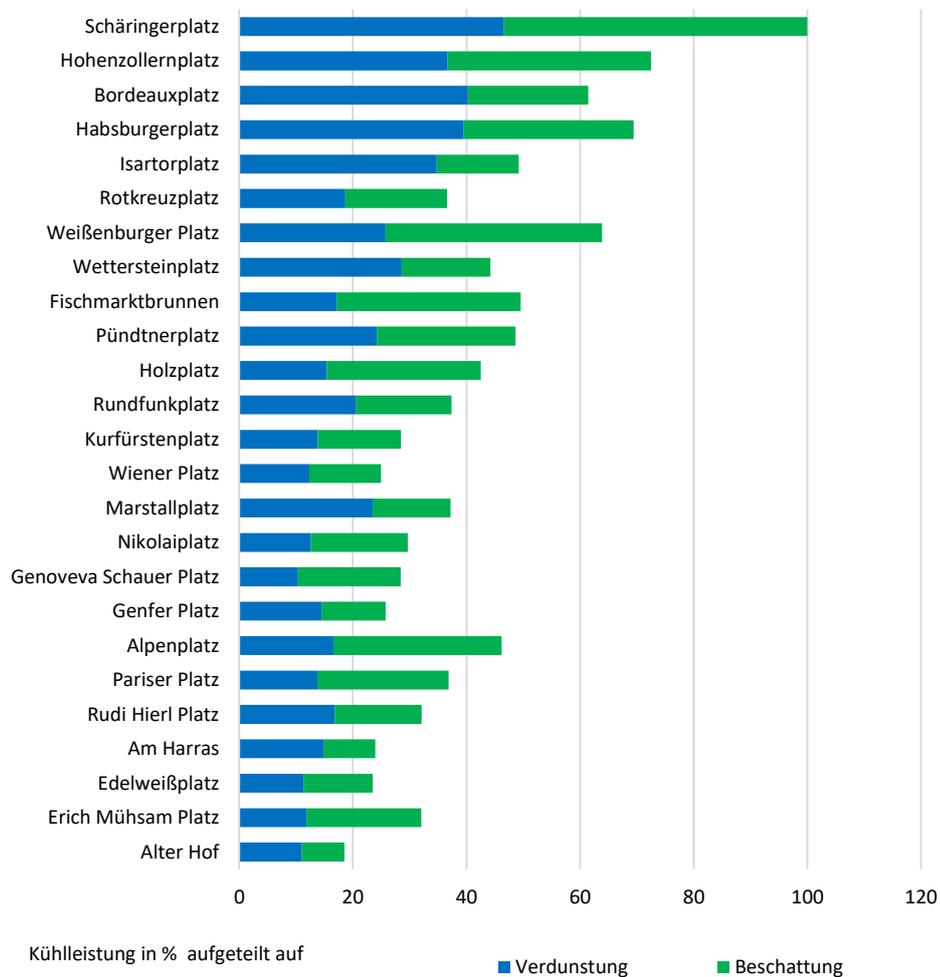


Abbildung 23. Vergleich der Kühlleistung der Plätze (Schäringerplatz = 100%). Kühlleistung ist aufgeteilt in Verdunstung und Beschattung in Prozent unter den Bäumen.

### Zusammenhang zwischen Zuwachs und Wasserhaushalt

Der Biomassezuwachs eines Platzes ist eng mit der Transpiration der Bäume eines Platzes verknüpft. Für jeden Kubikmeter Transpiration erhöht sich der Zuwachs um 0,51 kg (Abbildung 24 links). Auf der anderen Seite verringert sich der Abfluss unter den Bäumen mit zunehmender Transpiration um 0,17 mm pro Kubikmeter Transpiration (Abbildung 24, Mitte). Es besteht zudem ein starker Zusammenhang zwischen der C-Fixierung und dem Wasserverbrauch des Baumbestands eines Platzes (Abbildung 24, rechts). Die C-Fixierung erhöht sich pro Kubikmeter Transpiration um 0,42 kg C.

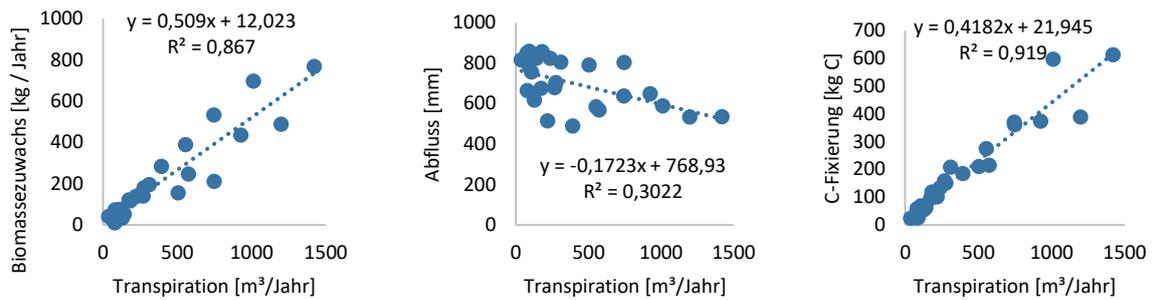


Abbildung 24. Zusammenhang zwischen Transpiration der Bäume, dem Biomassenzuwachs (links), dem Niederschlagsabfluss (Mitte) und der Kohlenstofffixierung (rechts) an 25 Plätzen in München für den Simulationszeitraum 1991-2020.

### Ökosystemleistungen heute und in Zukunft

Abbildung 25 veranschaulicht die Veränderungen der Ökosystemleistungen der Bäume im Mittel über alle 25 Plätze, das sind der Biomassenzuwachs (a), die Verdunstung (b), der Niederschlagsabfluss (c), die Abkühlung (d) und die Kohlenstofffixierung (e). Dargestellt sind die Ökosystemleistungen von der gegenwärtigen Periode (1991-2020) zur nahen Zukunft (2041-2050) und fernen Zukunft (2081-2090) sowie die prozentualen Änderungen der Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5. Hierbei wurden die Simulationen für den aktuellen Baumbestand durchgeführt, um den reinen Klimaeffekt auf das Wachstum abzubilden, das Altern der Bäume wurde nicht mit einbezogen.

Der **mittlere Biomassenzuwachs** der Bäume zeigt unter dem Klimaszenario RCP 2.6 eine Abnahme von 7% für die nahe Zukunft (2041-2050) und eine Abnahme von 8% für die ferne Zukunft (2081-2090). Im Gegensatz dazu wird unter dem Klimaszenario RCP 8.5 eine Zunahme um 2% in naher Zukunft erwartet, gefolgt von einer Abnahme um 24% in ferner Zukunft (Abbildung 25a).

Die **Verdunstung** des Baumbestands im Mittel der 25 Plätze weist unter dem Klimaszenario RCP 2.6 eine Abnahme von 17% in naher Zukunft auf. Unter dem Klimaszenario RCP 8.5 wird eine nahezu unveränderte Verdunstung in naher Zukunft erwartet, gefolgt von einer Abnahme um 8% in ferner Zukunft (Abbildung 25b).

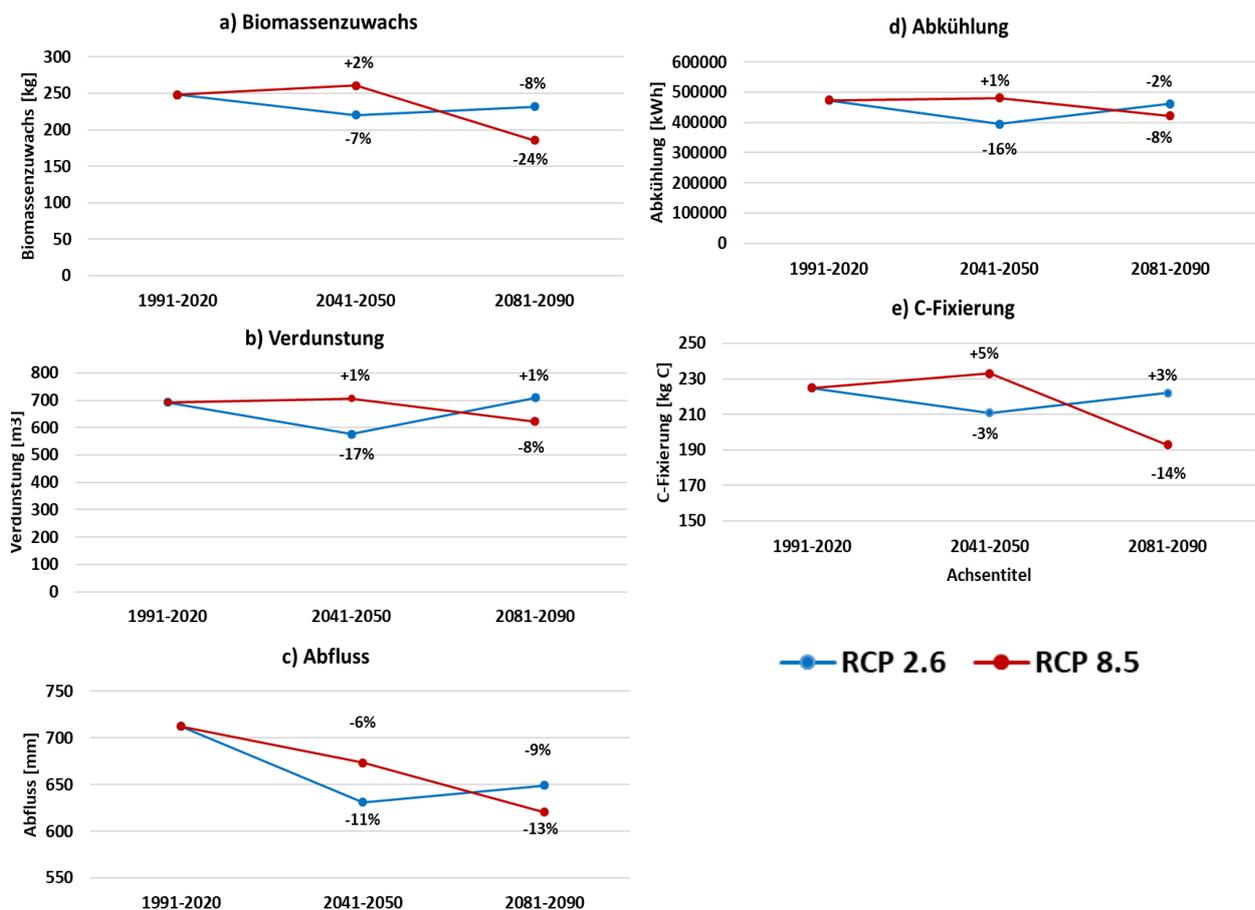


Abbildung 25. Ökosystemleistungen der Bäume gemittelt für 25 Plätze und deren prozentuale Änderungen (1991-2020). Die Daten wurden über alle 25 Münchner Plätze im Vergleichszeitraum von 1991 bis 2020 unter den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 für die Zeiträume 2041-2050 und 2081-2090 gemittelt.

Der **Niederschlagsabfluss** unter den Bäumen zeigt für den Durchschnitt der 25 Plätze eine Abnahme von 11% in naher Zukunft und 9% in ferner Zukunft unter dem Klimaszenario RCP 2.6. Unter dem Klimaszenario RCP 8.5 wird ein Rückgang des Niederschlagsabflusses um 6% in naher Zukunft und um 13% in ferner Zukunft erwartet (Abbildung 25c).

Die **Abkühlung** aufgrund von Verdunstung durch den Baumbestand der 25 Plätze wird unter dem Klimaszenario RCP 2.6 zeigt eine Abnahme von 16% in naher Zukunft, während eine Abnahme um 2% in ferner Zukunft zu erwarten ist. Unter dem Klimaszenario RCP 8.5 wird eine Zunahme um 1% in naher Zukunft erwartet, gefolgt von einer Abnahme um 8% in ferner Zukunft (Abbildung 25d).

Die **Kohlenstofffixierung** zeigt unter dem Klimaszenario RCP 2.6 eine Abnahme von 3% in naher Zukunft, während es in ferner Zukunft zu einer Zunahme um 3% im Vergleich zur aktuellen Kohlenstofffixierung kommt. Unter dem Klimaszenario RCP 8.5 wird eine Zunahme um 5% in naher Zukunft erwartet, gefolgt von einer Abnahme um 14% in ferner Zukunft (Abbildung 25e).

### Einfluss der Versiegelung auf die Ökosystemleistungen heute und in Zukunft

Abbildung 26 zeigt die Ökosystemleistungen der Bäume auf öffentlichen Plätzen in Abhängigkeit von ihrer Versiegelung. Die dargestellten Ergebnisse umfassen das gegenwärtige Klima (1991-2020) sowie Szenarien unter RCP 2.6 und 8.5 für die nahe Zukunft (2041-2050) und ferne Zukunft (2081-2090). Beispiele für Plätze mit geringer Versiegelung sind der Genfer Platz (67%), der Bordeauxplatz (70%) und der Alpenplatz (79%). Im Gegensatz dazu sind der Alter Hof (100%), der Kurfürstenplatz (98%) und

der Marstallplatz (91%) als stark versiegelte Plätze anzuführen, bei denen ein Großteil der Fläche bebaut oder versiegelt ist.

#### *Biomasse*

Die Ergebnisse zeigen, dass der **Biomassenzuwachs** auf stark versiegelten Plätzen sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen **signifikant abnimmt** (Abbildung 26a). Im Vergleich zur Referenzperiode von 1991-2020 wird erwartet, dass der **Biomassenzuwachs** um **8%** auf wenig versiegelten Plätzen und sogar um **15%** auf stark versiegelten Plätzen **abnimmt**. Für die Zukunft, gemittelt über beide Klimaszenarien RCP 2.6 und 8.5, wird eine **Reduktion des Biomassenzuwachses um 22%** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen erwartet.

#### *Verdunstung*

Im Hinblick auf die **Verdunstung** zeigt unsere Studie eine **deutliche Reduzierung** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen (Abbildung 26b). Im Vergleich zur Referenzperiode wird für die Zukunftsszenarien eine **Abnahme** der Verdunstung um **5%** auf wenig versiegelten Plätzen und um **8%** auf stark versiegelten Plätzen erwartet. Für die nahen und fernen Zukunftsszenarien, basierend auf den Klimaszenarien RCP 2.6 und 8.5, wird im Durchschnitt eine **Abnahme** der Verdunstung um **40%** erwartet.

#### *Abfluss*

Die Ergebnisse zeigen auch einen Einfluss der Versiegelung auf den **Abfluss** des Niederschlagswassers an den untersuchten Plätzen (Abbildung 26c). Im Vergleich zur Referenzperiode wird für die Zukunft eine **Abnahme** des Niederschlagsabflusses um **10%** sowohl auf wenig versiegelten Plätzen als auch auf stark versiegelten Plätzen erwartet. Für die Zukunftsszenarien wird im Durchschnitt eine **Zunahme** des Niederschlagsabflusses um **10%** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen erwartet.

#### *Kühlung*

Des Weiteren verdeutlichen die Ergebnisse einen signifikanten Rückgang der **Kühlung** durch Bäume auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen (Abbildung 26d). Im Vergleich zur Referenzperiode zeigt sich eine **5%ige Reduktion** der Kühlung auf wenig versiegelten Plätzen und eine **6%ige Reduktion** auf stark versiegelten Plätzen. Für die Zukunftsszenarien wird im Durchschnitt eine **Reduzierung** der Kühlung um **38%** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen erwartet.

#### *C-Fixierung*

Schließlich zeigen die Ergebnisse eine signifikante **Reduktion** der **Kohlenstoff-Fixierung** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen. Im Vergleich zur Referenzperiode zeigt sich eine **3%ige Verringerung** auf wenig versiegelten Plätzen und eine **6%ige Verringerung** auf stark versiegelten Plätzen. Für die Zukunftsszenarien wird eine durchschnittliche **Abnahme** von **25%** auf stark versiegelten Plätzen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen erwartet.

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse den erheblichen Einfluss der Versiegelung auf die betrachteten Ökosystemleistungen der Baumbestände auf öffentlichen Plätzen. Stark versiegelte Plätze zeigen im Vergleich zu wenig versiegelten Plätzen eine deutlich verringerte Biomasseproduktion, eine reduzierte Verdunstung, erhöhte Abflussraten sowie eine verringerte Kühlung und Kohlenstoff-Fixierung (Abbildung 25). Diese Erkenntnisse sind von großer Bedeutung, um geeignete Maßnahmen zur

Förderung der mikroklimatischen Bedingungen von öffentlichen Plätzen abzuleiten, wie die Reduzierung der Versiegelung und zum Erhalt gesunder Baumbestände in städtischen Umgebungen.

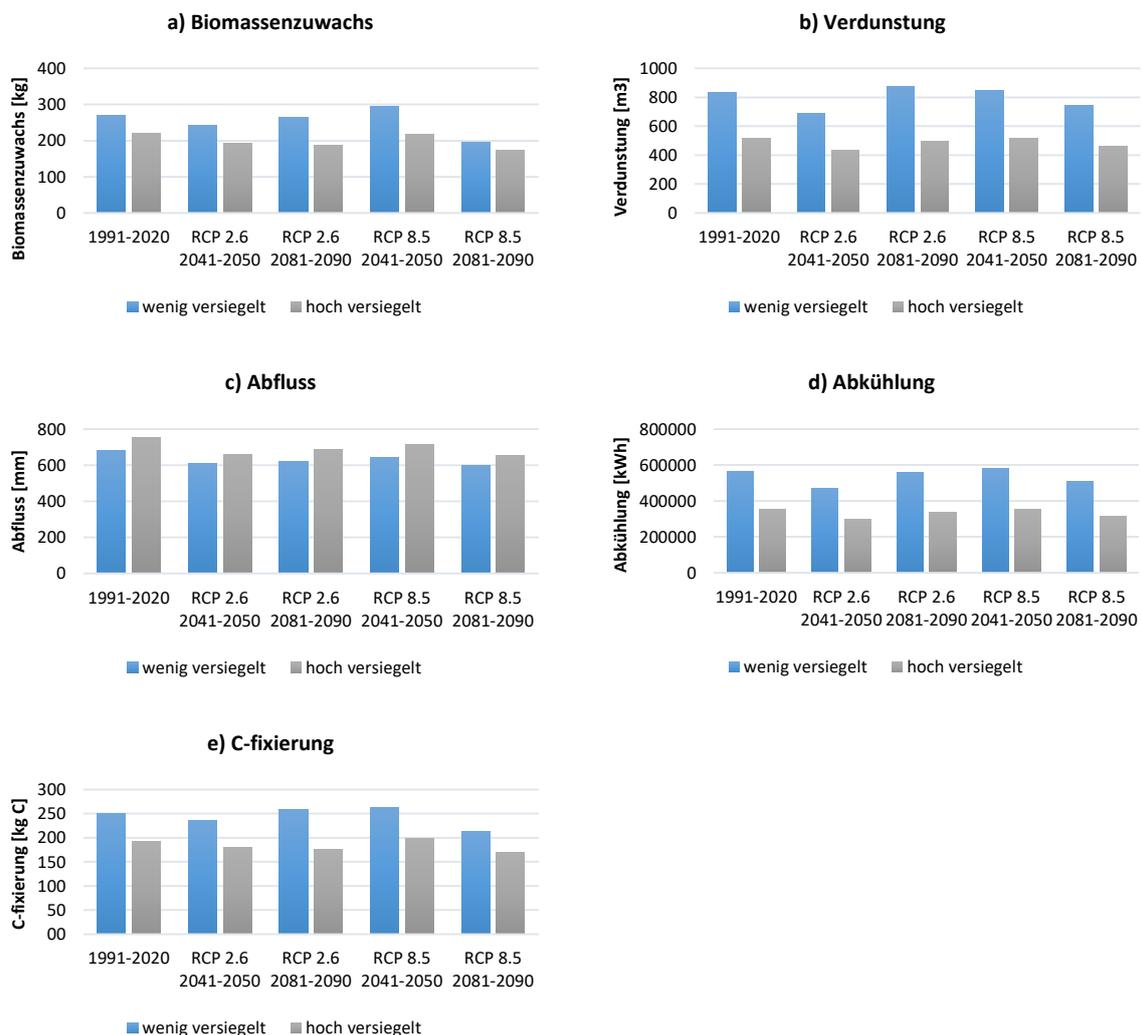


Abbildung 26. Einfluss der Versiegelung auf die Ökosystemleistungen von Bäumen für das gegenwärtige Klima (1991–2020) sowie unter den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 für die nahe Zukunft (2041–2050) und ferne Zukunft (2081–2090).

### 3.6.2 Biomassen, Photosynthese und Ökosystemleistungen von Sträuchern

#### Strauchbiomasse und der Anteil an der Gesamtbiomasse

Obwohl der größte Teil der Biomasse in den Bäumen gespeichert ist, können Sträucher ebenfalls einen bedeutenden Anteil zur Gesamtbilanz beitragen. Anhand der neu entwickelten Methodik (s. Kapitel 3.2.3), konnte die oberirdische Biomasse der Sträucher auf ausgewählten Plätzen in München vermessen und quantifiziert werden. Abbildung 27 zeigt die Strauchbiomassen sowie deren prozentualen Anteil an der Gesamtbiomasse der Plätze. Der Bordeauxplatz und der Rotkreuzplatz weisen mit 500 kg die höchste oberirdische Strauchbiomasse auf. Der Pündterplatz folgt mit einer Strauchbiomasse von etwa 240 kg. Auf dem Erich-Mühsam-Platz und dem Holzplatz wurden jeweils 62 kg und 74 kg an Strauchbiomasse gemessen, während der Rundfunkplatz eine Strauchbiomasse von etwa 100 kg aufweist.

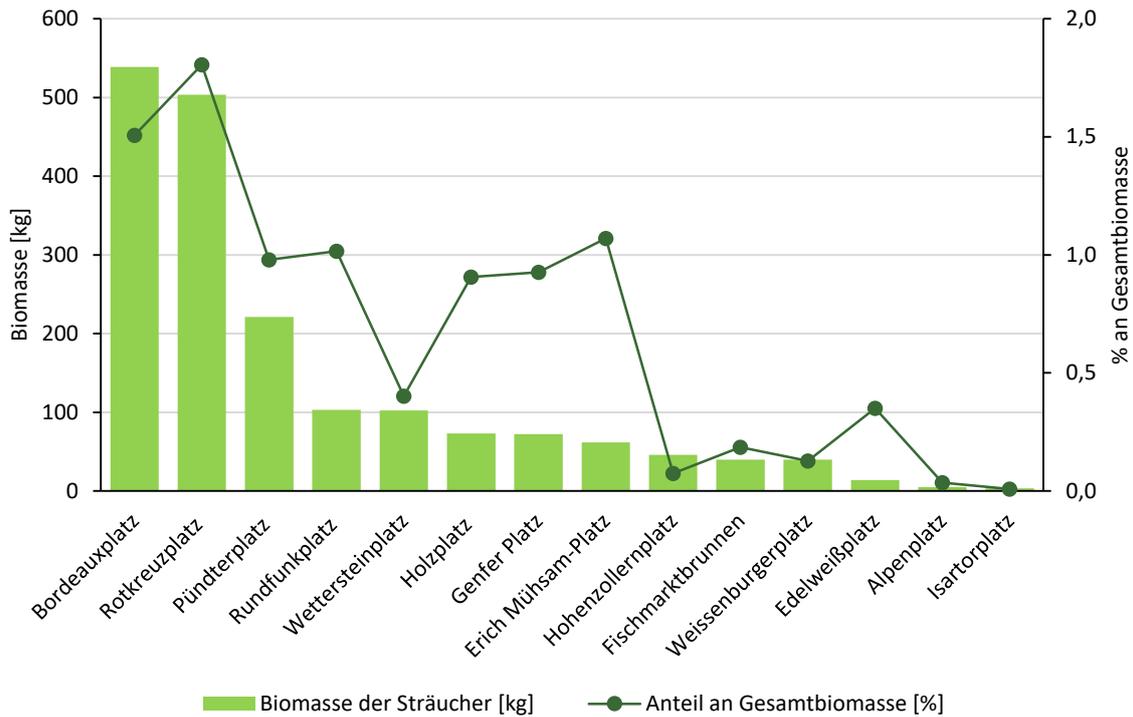
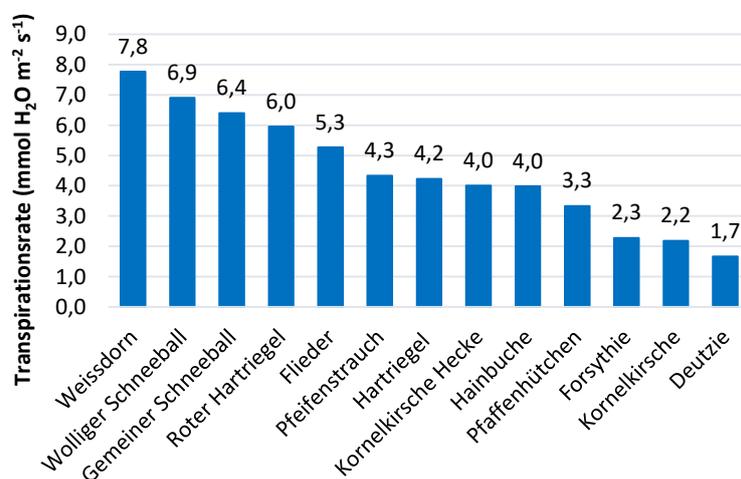


Abbildung 27. Oberirdische Biomassen der Sträucher [kg] und deren prozentuale Anteile an der Gesamtbio­masse an den untersuchten öffentlichen Plätzen in München.

### Verdunstungsrate und Photosyntheserate von Sträuchern

Die Ergebnisse zeigen, dass es Unterschiede in Bezug auf die mittlere Verdunstungsrate und Photosyntheserate zwischen den verschiedenen Straucharten gibt (Abbildung 28). An sonnigen Tagen verdunsteten die Sonnenblätter des wolligen Schneeballs (*Viburnum lantana*) mit einer Rate von  $6,9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , was mehr als 2,5-mal höher ist als die Verdunstungsrate der Forsythie (*Forsythia intermedia*) mit  $2,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Durchschnittlich lag die Verdunstungsrate über alle Straucharten bei  $4,7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Die Photosyntheserate, die für das Wachstum und die  $\text{CO}_2$ -Speicherung wichtig ist, zeigt ebenfalls Unterschiede zwischen den Straucharten. Beim wolligen Schneeball beträgt die Photosyntheserate  $12,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , während sie bei der Forsythie lediglich  $6,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  beträgt. Durchschnittlich lag die Photosyntheserate über alle Straucharten bei  $9,3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .



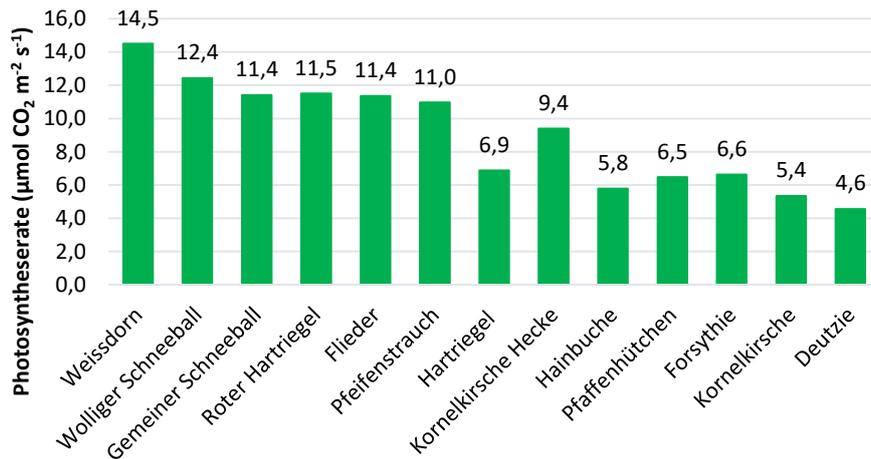


Abbildung 28. Mittlere Verdunstungsraten (oben) und Photosyntheseraten (unten) ausgewählter Straucharten.

### Verdunstungs- und Photosyntheseraten von unterschiedlichen Strauchformen und Bäumen

Abbildung 29 zeigt einen Vergleich der durchschnittlichen Verdunstungsleistung der Sonnenblätter von Sträuchern mit unterschiedlichen Wuchsformen (Hecken, Kleinsträucher und Großsträucher) im Vergleich zu einem Baum (Buche, *F. sylvatica*) dar. Die Messungen des Blatt-Gaswechsels der Bäume wurden unter gleichen Bedingungen und mit demselben Instrument durchgeführt (Dervishi, 2019). Große Sträucher weisen im Durchschnitt eine höhere Verdunstungsrate auf als Bäume, gefolgt von Kleinsträuchern und Hecken. In Bezug auf die Photosyntheserate zeigen große Sträucher und Bäume eine ähnliche durchschnittliche Leistung, während kleine Sträucher und Hecken eine geringere Leistung aufweisen.

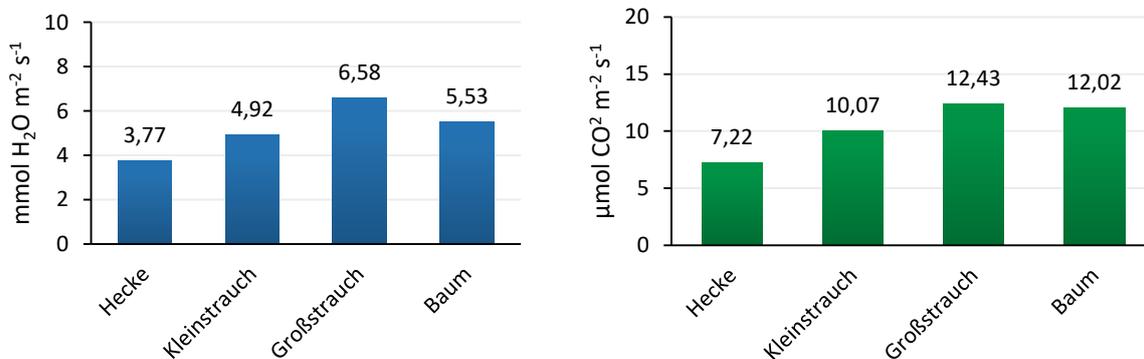


Abbildung 29. Mittlere Verdunstungsraten (oben) und Photosyntheseraten (unten) der Sonnenblätter von Strauchkategorien (Großsträucher, Kleinsträucher und Hecken) sowie eines Baumes.

### Vergleich der Kühlungsleistung eines Baumes mit denen von Strauchformen

Die ermittelten Werte für Verdunstungs- und Photosyntheseraten beziehen sich auf die Leistungen eines Blattes. Beim Vergleich der Kühlungsleistung von Individuen eines Baumes, Großstrauchs, Kleinstrauchs oder einer Hecke zeigt sich, dass Bäume im Durchschnitt eine um sieben Größenordnungen höhere Verdunstungsleistung von 360 kWh pro Tag erbringen als Sträucher, welche im Durchschnitt nur eine Verdunstungsleistung von 49 kWh pro Tag aufweisen (Abbildung 30).

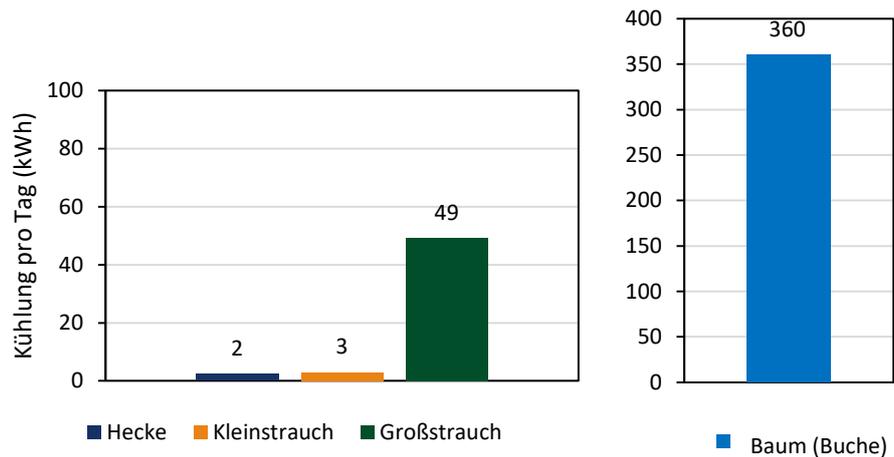


Abbildung 30. Mittlere Kühlungsleistung durch Verdunstung pro Tag verschiedener Strauchformen (Hecke, Kleinstrauch, Großstrauch; links) und eines Baumes (rechts).

### 3.6.3 Ökosystemleistungen von Rasenflächen

#### Kühlungsleistung der Rasenflächen

Die Ergebnisse der Untersuchung der Verdunstungsleistung von Rasenflächen an sonnigen und beschatteten Stellen sind in Abbildung 32 dargestellt. Sie zeigen, dass die Verdunstungsraten von Rasenflächen klar von der Beschattung abhängen. Der Wasserverlust fällt an sonnigen Standorten deutlich höher aus als an beschatteten Standorten. Der geringere Wasserverlust im Schatten wird durch eine Baumbeschattung stark beeinflusst. Zudem verhalten sich die minimalen und maximalen Wasserverluste der Grasschalen an beiden Standorten ähnlich, der durchschnittliche Wasserverlust bei voller Sonnenscheindauer betrug im Mittel 2,2 mm pro Tag, während der Wert im Schatten bei 1,1 mm lag. Der geringste an einem Tag gemessene Wasserverlust lag bei 0,8 mm und wurde im Baumschatten aufgezeichnet, während der Maximalwert eines Tages bei 2,7 mm lag und der Verdunstung bei vollem Sonnenschein entspricht.

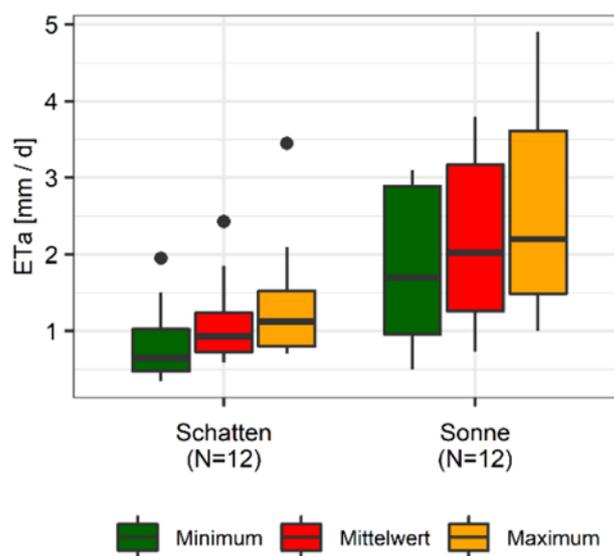


Abbildung 32. Verdunstung von Rasenflächen ( $ET_a$ , mm Tag<sup>-1</sup>) unter ganztägigen Baumschatten bzw. permanentem Sonnenschein, gemessen an 12 sonnigen und regenfreien Tagen mit Minimum, Mittelwert und Maximum der gemessenen Verdunstungsleistung.

### Kühlleistung von Bäumen und Rasenflächen an Münchner Plätzen

Abbildung 33 zeigt die Kühlleistung von Bäumen und Rasenflächen an den untersuchten öffentlichen Plätzen in München. Im Durchschnitt weisen die Rasenflächen eine um 40% höhere Abkühlungsleistung an den Plätzen im Vergleich zum Baumbestand auf. Dies liegt daran, dass z.T. große besonnte Rasenflächen an den Plätzen vorhanden sind wie. z.B. am Isartorplatz oder am Wettersteinplatz.

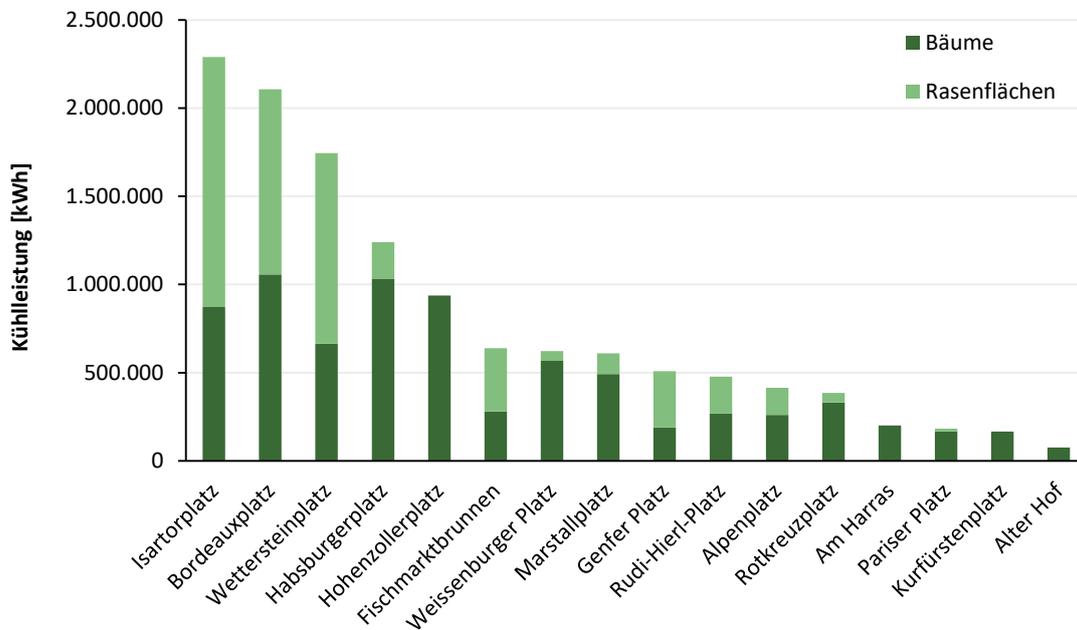


Abbildung 33. Kühlungsleistung von Rasenflächen und Bäumen an den 25 Plätzen in München

### Kühlleistung von Bäumen und Rasenflächen: Veränderungen unter künftigen Klimabedingungen

Abbildung 34 zeigt die Kühlleistung durch Verdunstung von Bäumen und Rasenflächen auf den Münchner Plätzen unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1991-2020) und ferner Zukunft (2081-2090) unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1991-2020) und in ferner Zukunft (2081-2090) unter Klimaszenario RCP 8.5. Die Ergebnisse zeigen eine durchschnittliche Abnahme der Kühlleistung um etwa 6,5% unter den zukünftigen Klimabedingungen im Vergleich zum aktuellen Klima (1991-2020). Starke prozentuale Veränderungen der Kühlleistung wurden an verschiedenen Plätzen beobachtet: Genfer Platz (-24%), Bordeauxplatz (-20%), Wettersteinplatz (-20%), Marstallplatz (-20%) und Isartorplatz (-15%).

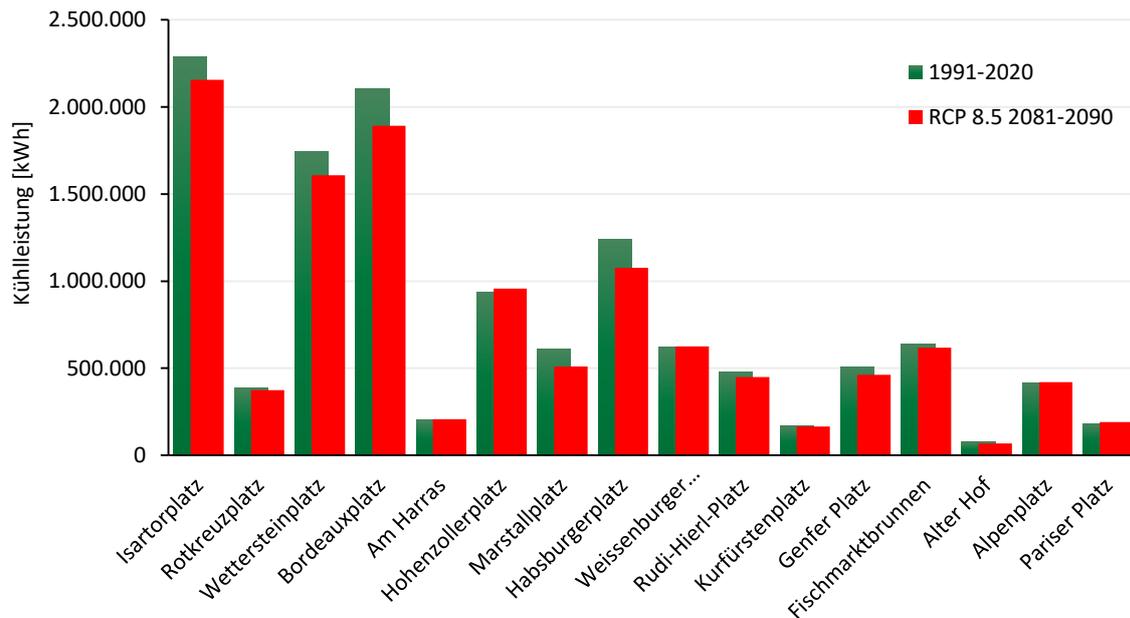


Abbildung 34. Kühlleistung durch Verdunstung der Baumschicht und Rasenflächen an Münchner Plätzen unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen.

### 3.6.4 Vergleich des Kühlpotentials verschiedener Vegetationstypen

In den vorherigen Kapiteln wurde bereits ausführlich auf das Kühlpotenzial des Grüns durch Verdunstung an den einzelnen Plätzen eingegangen. Angesichts der steigenden Temperaturen im städtischen Raum während des Sommers war das Kühlpotenzial der grünen Infrastruktur ein zentraler Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit. Die Kühlpotenziale durch Verdunstung der einzelnen Vegetationstypen zeigt Abbildung 35. Die Werte geben die Kühlpotenziale für einen sonnigen Sommertag, basierend auf Transpirationmessungen an verschiedenen Straucharten und Rasenflächen sowie an einer Buche als Repräsentant des Vegetationstyps Baum an.

**Bäume** weisen dabei mit einem Wert von  $9,4 \text{ kWh/m}^2$  das **höchste Kühlpotenzial** auf. Sie sind daher die effektivsten Kühlelemente in urbanen Raum. **Großsträucher** erzielen mit  $7,0 \text{ kWh/m}^2$  ebenfalls ein **beachtliches Kühlpotenzial**, wodurch auch sie einen spürbaren Beitrag zur Temperaturreduzierung leisten können. **Rasenflächen** weisen mit  $4,1 \text{ kWh/m}^2$  eine vergleichbare Kühlleistung wie Kleinsträucher ( $3,9 \text{ kWh/m}^2$ ) auf. Aufgrund ihrer häufig großen Flächenbedeckung **tragen Rasenflächen durch die Verdunstung des Grases zur Abkühlung der Umgebung** bei. Insbesondere an heißen Tagen kann die Verdunstungskühlung durch Rasenflächen **spürbar** sein. Obwohl das Kühlungspotenzial von Rasenflächen **geringfügig niedriger** ist als das von Bäumen und Großsträuchern, sind sie dennoch eine wertvolle Ergänzung zur lokalen Abkühlung, insbesondere in Kombination mit Bäumen.

**Hecken** haben mit  $3 \text{ kWh/m}^2$  das **niedrigste Kühlungspotenzial** unter den betrachteten Vegetationstypen. Dies kann Pflanzenart bedingt sein oder auf mikrometeorologischen Bedingungen zurückzuführen sein. Trotz ihres geringeren Kühlungspotenzials sind Hecken **wertvoll**, da sie als Sichtschutz dienen, **Lebensraum und Nistmöglichkeiten** für Tiere bieten und zur **Erhöhung der Biodiversität** beitragen. Bei der Planung von Grünflächen und Stadtlandschaften sollte sowohl das kühlende Potenzial als auch die ökologische Bedeutung verschiedener Vegetationstypen berücksichtigt werden, um ein ausgewogenes und vielfältiges Mikroklima zu schaffen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass **Bäume das höchste Kühlspotenzial** aufweisen, gefolgt von Großsträuchern. Rasenflächen und Kleinsträucher weisen eine vergleichbare Kühlleistung auf, während **Hecken das niedrigste Potenzial zur Temperaturreduzierung** haben. Diese Erkenntnisse sind von großer Bedeutung bei der Planung von Grünflächen und Stadtlandschaften, um das Kühlspotenzial der Vegetation gezielt zu nutzen und das lokale Mikroklima zu verbessern. Durch die gezielte Integration von Bäumen, Großsträuchern, Rasenflächen und Hecken kann ein ausgewogenes und effektives Kühlungssystem geschaffen werden, das sowohl das Wohlbefinden der Menschen und der Stadtnatur als auch die ökologische Nachhaltigkeit fördert.

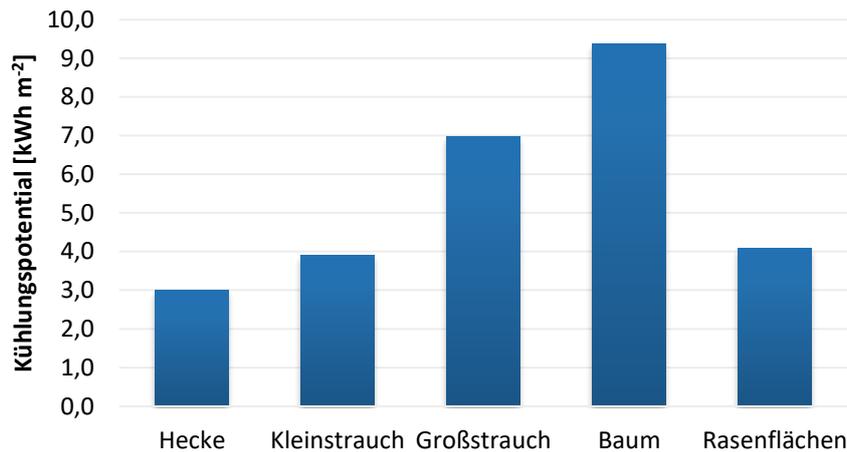


Abbildung 35. Kühlpotentiale [kWh/m<sup>2</sup>] durch Verdunstung an einem sonnigen Sommertag durch Verdunstung für verschiedene Vegetationstypen

### 3.7 Einfluss des Grüns auf die Lufttemperatur ausgewählter Plätze

Von Juli 2021 bis März 2023 wurden an den fünf Plätzen Alpenplatz, Alter Hof, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz und Marstallplatz zeitlich hochauflösende Messungen der Lufttemperatur (10 Minuten Takt) und der Luftfeuchte durchgeführt. Dabei wurden i-Button-Sensoren sowohl an schattigen Standorten unter Bäumen als auch an sonnenexponierten Stellen angebracht, um die Unterschiede der meteorologischen Parameter zu erfassen. Die Auswahl der Plätze erfolgte anhand von Kriterien wie Platzgröße, Bodenversiegelung und Baumbestand, um eine repräsentative Untersuchung zu gewährleisten. Im Schattenbereich wurden sie entweder unter der Baumkrone oder im Gebäudeschatten angebracht. Zudem wurde die Windkomponente berücksichtigt, indem die i-Button-Sensoren an windigen wie auch an windgeschützten Stellen installiert wurden (siehe Abbildung 36).

Im Folgenden wird der Kühleffekt an den Plätzen als Temperaturdifferenz zwischen sonnenexponierten Standorten und Standorten im Baumschatten für die Monate Juli bis November 2021 dargestellt. Zudem wird der Einfluss der Platzversiegelung und des Blattflächenindex (LAI) auf den Kühleffekt gezeigt.

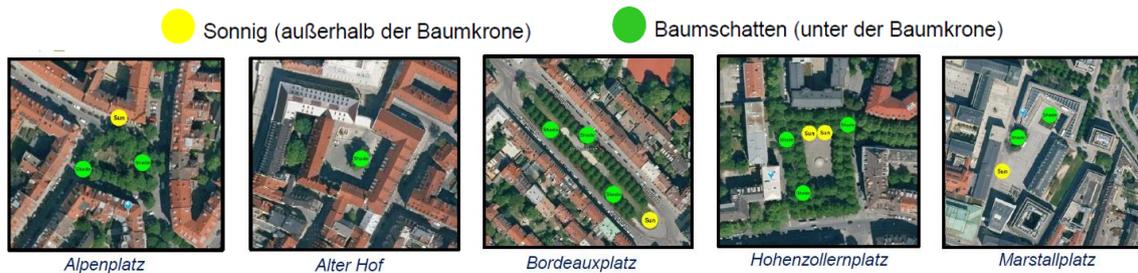


Abbildung 36. Oben: Plätze für die kontinuierliche Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit mittels i-Button-Sensoren. Unten: i-Button-Sensor im Baumschatten am Hohenzollernplatz

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht zur Lufttemperatur an sonnigen und von Bäumen beschatteten Standorten innerhalb der fünf untersuchten Plätze. Es wurden drei Jahreszeiten betrachtet: Sommer, Herbst und Winter. Im Sommer waren die Temperaturunterschiede zwischen sonnigen und schattigen Bereichen am größten, mit Werten zwischen  $0,2\text{ °C}$  -  $1,0\text{ °C}$ . Diese Unterschiede nahmen im Herbst und Winter ab, wobei sie im Winter nahezu gleich waren ( $0,1\text{ °C}$ ). Besonders hohe Temperaturunterschiede wurden am Alpenplatz und Marstallplatz im Sommer festgestellt, während der Alter Hof während aller Jahreszeiten den geringsten Unterschied aufwies. Konkret wies der Alpenplatz einen Temperaturunterschied von  $1,0\text{ °C}$  auf, während es am Marstallplatz  $0,8\text{ °C}$  waren. Der Alter Hof hingegen zeigte während des gesamten Jahres nur einen geringen Unterschied von  $0,1\text{ - }0,2\text{ °C}$ . Die geringen Unterschiede beim Standort Alter Hof sind nicht plausibel, was wahrscheinlich darauf beruht, dass die Messungen der Temperatur am besonnten Standort anhand eines anderen Sensortyps durchgeführt wurden, was zu Abweichungen führte. Aufgrund dessen wurden die Messungen für zum Standort Alter Hof für die weiteren Analysen ausgeschlossen.

Tabelle 9. Tagesmittel der Temperaturen an einen besonnten Standort und im Baumschatten an fünf Plätzen in München für den Sommer (Juli und August), den Herbst (September und Oktober) und Winter (Dezember, Januar) auf Basis der i-Button-Messungen

Platz	Temperatur [°C]					
	Sommer (JA)		Herbst (SON)		Winter (DJ)	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
	Baumbeschattung		Baumbeschattung		Baumbeschattung	
Alpenplatz	18,9	17,9	10,4	10,1	2,8	2,9
Alter Hof	17,5	17,3	7,4	7,3	3,3	3,2
Bordeauxplatz	18,9	18,4	10,8	10,4	3,6	3,3
Hohenzollernplatz	18,9	18,4	10,9	10,6	3,5	3,4
Marstallplatz	19,6	18,8	11,1	10,8	3,8	3,6
<b>Mittelwert</b>	<b>18,7</b>	<b>18,2</b>	<b>10,1</b>	<b>9,9</b>	<b>3,4</b>	<b>3,3</b>

Der Kühleffekt, d.h. die Temperaturunterschiede zwischen sonnigen und von Bäumen beschatteten Stellen sind im Sommer am größten, insbesondere im Juli und August.

Abbildung 37 zeigt die Kühlung als Temperaturdifferenz zwischen sonnigen und von Bäumen beschatteten Bereichen von Juli bis November 2021 an vier ausgewählten Plätzen in München. Im Juli beträgt beispielsweise die durchschnittliche Kühlung am Alpenplatz 3,0 °C, am Bordeauxplatz 1,6 °C und am Marstallplatz 1,2 °C. Im August sind die Unterschiede ähnlich, wobei der Alpenplatz die höchste Temperaturdifferenz mit 3,5 °C aufweist.

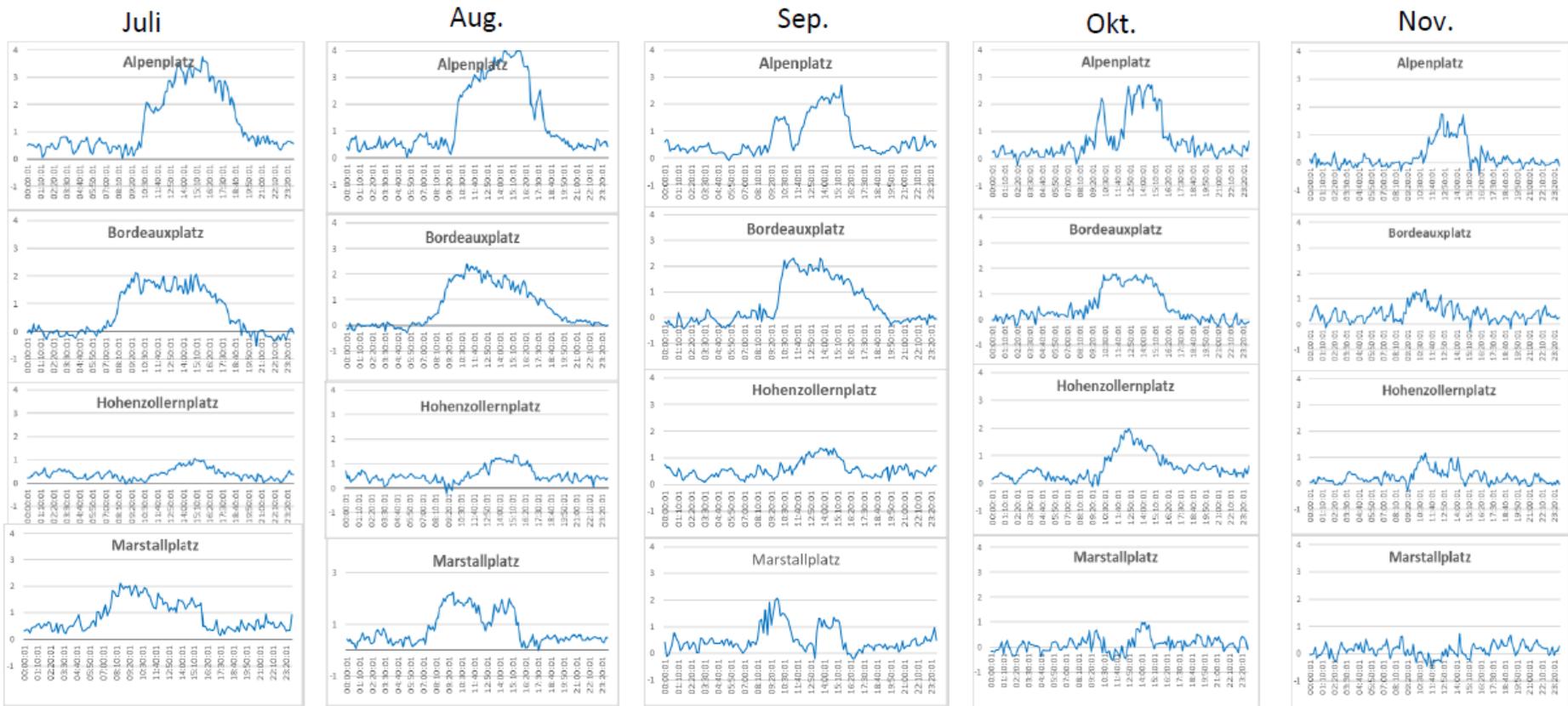


Abbildung 37. Kühlung (blaue Linie) in °C als Temperaturdifferenz zwischen sonnigen und von Bäumen beschatteten Bereichen von Juli bis November 2021 an vier ausgewählten Plätzen in München.

Anhand der Messungen an den ausgewählten Plätzen konnte ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen dem Kühleffekt und der Versiegelung sowie eine positive Korrelation mit dem Blattflächenindex (LAI) festgestellt werden. Abbildung 38 verdeutlicht den starken negativen Effekt des Versiegelungsgrads unter den Bäumen auf die Temperaturdifferenz. Je höher der Versiegelungsgrad ist, desto geringer ist der Kühleffekt. Eine Erhöhung der Versiegelung von z.B. 10% führt zu einer um 0,6°C niedrigeren Kühleffekt. Die Kühlung nimmt mit niedrigeren Blattflächenindex (LAI) deutlich ab. Eine Erhöhung des LAI um eine Einheit führt zu einer Erhöhung des Kühleffekts um 0,4°C.

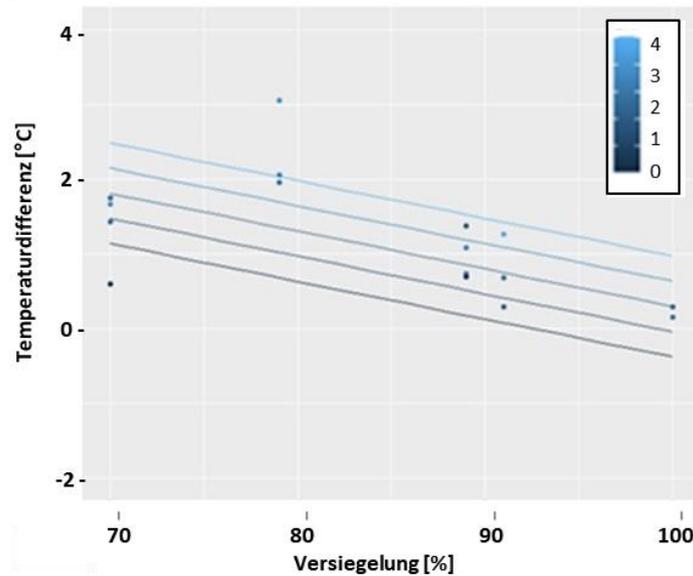


Abbildung 38. Einfluss der Versiegelung [%] und des Blattflächenindex (LAI) auf die Kühlung (Temperaturdifferenz zwischen Baumschatten und sonnigen Stellen)

Wie sich der Kühleffekt in Abhängigkeit der Versiegelung und des Blattflächenindex im Verlauf des Jahres, d.h. über die Monate Juli bis November 2021, ändert zeigt Abbildung 39. Gut zu erkennen ist, dass die Steigungen der Geraden immer flacher werden, d.h. dass der Einfluss der Versiegelung auf den Kühleffekt immer geringer wird, bis der Kühleffekt im November bei nahezu 0°C liegt. Auch der Einfluss des Blattflächenindex, der insbesondere im Juli und August groß ist, verschwindet im Verlauf der Monate.

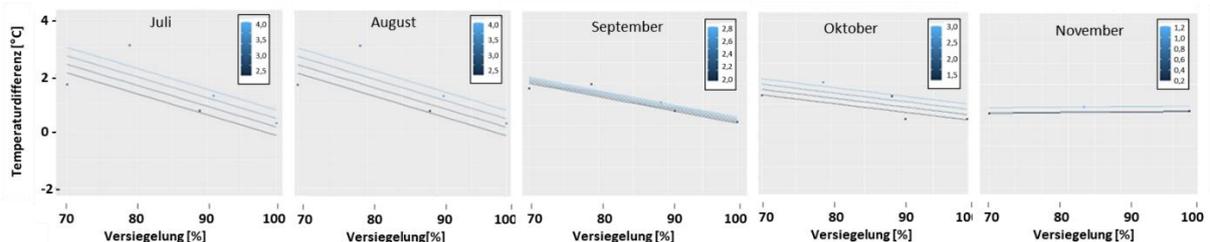


Abbildung 39. Einfluss des Blattflächenindex (LAI) und der Versiegelung auf die Kühlung (Temperaturdifferenz zwischen Baumschatten und sonnigen Stellen) von Juli bis November 2021

Es lässt sich festhalten, dass im Sommer Temperaturunterschiede zwischen sonnigen und von Bäumen beschatteten Bereichen der öffentlichen Plätze in München am größten sind. Die durchschnittliche Temperaturdifferenz für den Sommer betrug 0,7 °C im Tagesmittel und 1,4 °C in den Nachmittagsstunden (12-16 Uhr). Der maximale Temperaturunterschied wurde mit 4,0 °C am Alpenplatz im August gemessen. Der Alpenplatz zeigte auch die höchste durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen 12

und 16 Uhr mit 2,3 °C. Dies ist auf einen hohen Blattflächenindex und ein hohes Verhältnis von Kronenprojektionsfläche zur Fläche des Platzes zurückzuführen, sowie auf den geringen Anteil versiegelter Fläche.

Das Vorhandensein von Grün auf einem Platz sowie seine Struktur, einschließlich der Anzahl der Bäume, ihrer Anordnung und ihres Alters, haben einen hohen Einfluss auf den Kühleffekt. Eine Reduzierung der Versiegelung unter den Bäumen trägt zu einer verstärkten Kühlung der Plätze bei. Ein hoher Blattflächenindex geht mit einem gesteigerten Kühleffekt einher, da er eine größere Verdunstung sowie einen dichteren Schatten ermöglicht. Da der Blattflächenindex in hohem Maße von der Baumart abhängig ist, spielt auch sie eine wichtige Rolle für den Kühleffekt des Grüns eines Platzes.

Auch die Luftfeuchte wird durch den Baumbestand eines Platzes beeinflusst. In unseren Analysen ergaben sich allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen besonnten Standorten und Standorten im Baumschatten. Die durchschnittlichen Abweichungen betragen 3-4% für alle Plätze.

### 3.8 Modellierung der bioklimatischen Bedingungen ausgewählter Plätze

Die bioklimatischen Verhältnisse in der Stadt haben einen wesentlichen Einfluss auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen. Vegetation kann dabei eine wesentliche Rolle zur Verbesserung der bioklimatischen Verhältnisse spielen, gleichzeitig die Biodiversität fördern und so insgesamt zur Lebensqualität in der Stadt beitragen.

Ziel dieser Teiluntersuchung ist es, herauszufinden, wie der thermische Komfort des Menschen durch die Gestaltung und die Zusammensetzung der Vegetation von Freiräumen in München im Jahresverlauf beeinflusst wird. Während es eine zunehmende Anzahl von Erkenntnissen zu der Kühlfunktion von grünen Stadtplätzen an Hitzetagen gibt, die speziell die Rolle der Bäume hervorheben, liegen für andere Jahreszeiten nur wenige Ergebnisse vor. Die Untersuchungsgebiete wurden nach ihrer Größe, der Art des Belags und der Anzahl der Bäume ausgewählt. Mikrometeorologische Simulationen wurden mit dem dreidimensionalen Mikroskalenmodell ENVI-met (Bruse and Fler, 1998), Version 4.4.6, durchgeführt, um zu ermitteln, wie verschiedene Aspekte die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) an typischen Münchner Tagen beeinflussen.

Tabelle 10 zeigt die Parameter, die bei der Auswahl der untersuchten Plätze in dieser Untersuchung berücksichtigt wurden.

*Tabelle 10: Auswahlparameter der Modellierung*

Platz	Fläche (m <sup>2</sup> )	Undurchlässiger Prozentsatz	Bäume Anzahl	Begrenzungen
Alter Hof	3546	100%	3	Gebäude
Alpenplatz	3317	20%	30	Straßen
Bordeauxplatz	14,018	30%	84	Straßen
Hohenzollernplatz	10,150	89%	90	Gebäude und Straßen
Marstallplatz	9517	91%	18	Gebäude

#### 3.6.1. Auswahl der Modelltage

Um die in dieser Studie beabsichtigten meteorologischen Simulationen durchführen zu können, war es notwendig, Tage zu identifizieren, die extreme und typische Wettersituationen im Jahresverlauf repräsentieren. Aus diesem Grund wurden die DWD-Daten der Station 3379-München-Stadt (WST) aus

dem Jahr 2020 ausgewertet. Analysiert wurden längere Perioden mit stabiler Wetterlage und mindestens vier regenfreien Tagen. Tage mit ähnlichen Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitskurven wurden jeweils einer Gruppe zugeordnet (Abbildung 40). So wurden fünf typische Tage definiert, die im Folgenden als kalt, kalt und feucht, mild, warm und heiß bezeichnet werden.

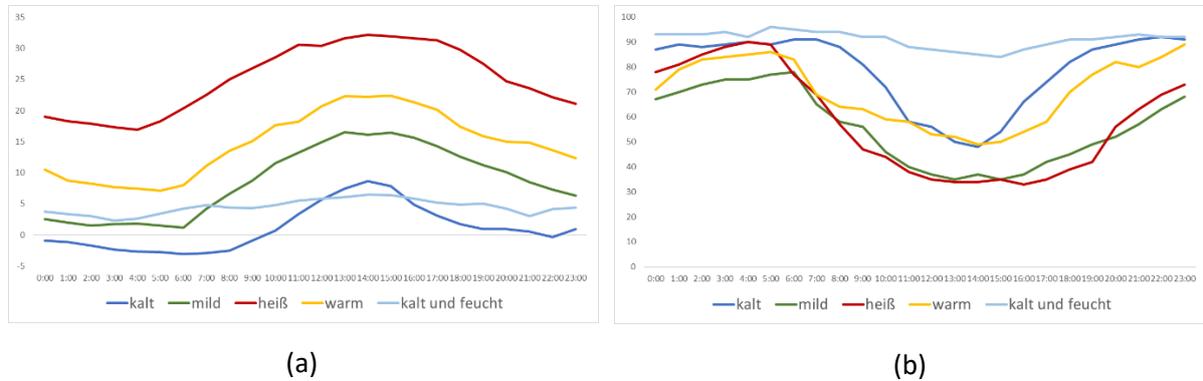


Abbildung 40. Typische Lufttemperatur (a) und relative Luftfeuchtigkeit (b) an ausgewählten Tagen.

Die Platzmodelle des Alten Hofes, des Alpenplatzes, des Bordeauxplatzes und des Hohenzollernplatzes hatten eine Größe von 300 × 300 m. Wegen der Größe des Marstallplatzes wurde sein Modell auf 350 × 350 m verkleinert. Die horizontale Auflösung betrug 2 × 2 m ohne Verschachtelungsgitter. Die vertikale Auflösung betrug 3 m mit einem äquidistanten Raster. Die Gebäudehöhen und -abmessungen wurden aus den von der Stadt München bereitgestellten GIS-Daten abgeleitet. Die Baumarten wurden vom Projekt 100 Places:M (2020) übernommen, die LAD-Werte wurden entsprechend den vordefinierten Arten in ENVI-met verwendet, während die Art der Bodenmaterialien, Asphalt und Granit, durch Ortsbesichtigungen ermittelt wurden (Abbildung 41).

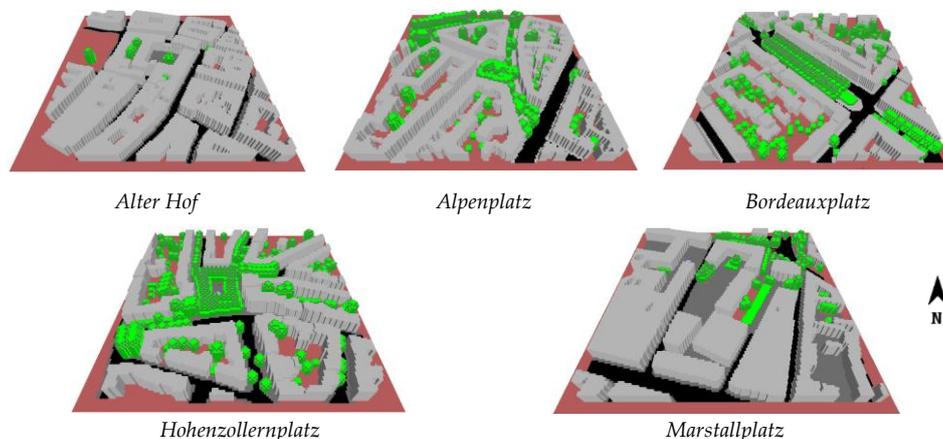


Abbildung 41. Grafische 3D-Darstellung der untersuchten Platzmodelle.

Die Simulationen begannen um 2 Uhr morgens für eine Gesamtzeit von 48 Stunden. Die ersten 22 Stunden der Analyse wurden ausgeschlossen, um die anfänglichen instationären Bedingungen zu überwinden. Die Simulationsergebnisse wurden für vier verschiedene Zeiten (2 Uhr, 8 Uhr, 12 Uhr und 16 Uhr) analysiert. Die Ergebnisse für den menschlichen thermischen Komfort wurden in einer Höhe von 1,5 m auf Fußgängerniveau extrahiert. Die für die ENVI-met-Simulation benötigten meteorologischen Daten wurden von der Wetterstation des DWD, City-Station ID 3379, bezogen (Tabelle 11).

Tabelle 11. ENVI-met Modellaufbau und meteorologische Inputdaten.

Tag Klassifikation	Kalt	Mild	Heiß	Warm	Kalt und feucht
Beginn der Simulation	23 Januar 2020	26 März 2020	30 Juli 2020	18 September 2020	5 November 2020
Dauer der Simulationen	48 h				
Min/Max Ta	-3.9/8.6 °C	-2.0/16.5 °C	17.6/33.7 °C	7.1/22.4 °C	2.3/11.3 °C
Min/Max RH	48/95%	35/80%	33/91%	49/91%	84/97%
Tägliche Summe der einfallenden Sonnenstrahlung	287 J/cm <sup>2</sup>	1770 J/cm <sup>2</sup>	2676 J/cm <sup>2</sup>	1786 J/m <sup>2</sup>	636 J/cm <sup>2</sup>
Größe/Auflösung des Modellnetzes	Alter Hof, Alpenplatz, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz 150 × 150 × 25 (x, y, z) / Vertikales äquidistantes Raster Marstallplatz 172 × 172 × 25 (x, y, z) / Vertikales äquidistantes Raster				
Gebäudematerial	Standardwand - mäßige Isolierung				
Bodenmaterial	Sandiger Lehm, Granit, Asphalt mit Kies				
Relative Bodenfeuchte	Obere Schicht: 70%, mittlere und tiefe Schichten: 75%				
Laterale Grenzbedingungen	Full forcing				

Für die Simulationen wurden Standardbaumarten verwendet, die die auf den Plätzen vorkommenden Bäume repräsentieren, nämlich die Laubbäume *T. cordata* und *A. platanoides*, zwei der häufigsten Baumarten auf den Plätzen und Straßen in München. Für Gras wählten wir die Standardoption: Gras, 25 cm durchschnittliche Höhe.

Es wurde die Option "Full Forcing" verwendet, um die Auswirkungen mehrerer Variablen, wie z. B. der Windgeschwindigkeit, auf die PET-Werte zu beobachten. Die Option Forcing Manager des ENVI-met-Modells ermöglicht die Erstellung eigener Full-Forcing-Dateien. Full Forcing ermöglicht das Forcing aller vordefinierten Profile des Hauptmodells, einschließlich Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, Strahlung oder Wolkenbedeckung und Niederschlag.

### 3.8.1 Modell-Validierung

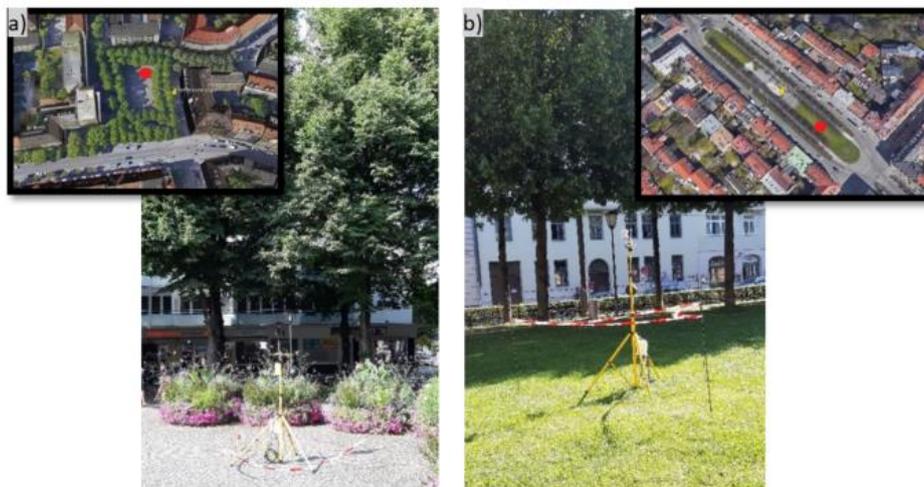
Wie in vorangegangenen Studien (Elraouf et al., 2022; Gusson und Duarte, 2016; Shinzato et al., 2019; Stark da Silva und Duarte, 2018) erwähnt, werden vorläufige Sensitivitätstests empfohlen, um die Reaktion des Modells auf die Eingabeparameter zu überprüfen. Unter Verwendung von Messdaten vom 16. August 2020 und 12. Dezember 2021 wurde die Modellkalibrierung durchgeführt, um die bestehenden Bedingungen am Hohenzollernplatz und am Bordeauxplatz durch eine Punkt-zu-Punkt-Überprüfung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit unter den extremsten Wetterbedingungen zu vergleichen.

Im August 2020 und Dezember 2021 wurden Feldmesskampagnen mit zwei ähnlichen, selbstgebauten Wetterstationen durchgeführt, die mit HOBO- und Ecomatik-Sensoren und i-Button Hygrochron Temperatur-/Feuchte-Logger ausgestattet waren. Die Sensoren der mobilen Wetterstationen zeichneten tagsüber die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit (in 2 m Höhe), die Temperatur der schwarzen Kugel (in 1,4 m Höhe) und die Oberflächentemperatur mit einem Abtast- und Aufzeichnungsintervall von 10 s und 5 min auf. Die hochauflösenden i-Button-Temperatur- und Luftfeuchtemessungen zeichneten Daten während des Tages und der Nacht nach den vorangegangenen 24 Stunden der Kalibrierungszeit auf (Abbildung 42).



*Abbildung 42. iButton-Sensor-Kalibrierung.*

Die Wetterstationen wurden auf dem Hohenzollernplatz und dem Bordeauxplatz aufgestellt, die sich durch ihre Form und die Art des Straßenbelags unterscheiden. An beiden Standorten wurden die Stationen in offenen, unbeschatteten Flächen platziert, umgeben von Vegetation und weit entfernt von Straßen und Gebäudefassaden (Abbildung 43). Der gemessene Sommertag war repräsentativ für einen heißen Tag mit einer maximalen Lufttemperatur von über 29 °C, keiner Bewölkung und einer Windgeschwindigkeit unter 2 m/s. Der gemessene Wintertag war repräsentativ für einen typischen kalten Tag mit einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 0,6 °C und einer Windgeschwindigkeit von etwa 1 m/s (Abbildung 44).



*Abbildung 43. Feldmessung im Sommer. Hohenzollernplatz (a); Bordeauxplatz (b). Quelle: Priscila W. Stark da Silva (mit geografischen Basisdaten von Google Maps).*



Abbildung 44. Winterliche Feldmessung. Hohenzollernplatz (a); Bordeauxplatz (b); i-Button (c).

### 3.8.2 Statistische Analyse

Zur Ergänzung der Analyse der Simulationsergebnisse wurde eine multivariate Regression durchgeführt, um festzustellen, wie sich die Variablen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Oberflächentemperatur und relative Luftfeuchtigkeit auf den menschlichen Wärmekomfort auswirken. Diese Variablen wurden analysiert, um zu quantifizieren, wie die individuellen Merkmale der Plätze, d. h. die Art des Belags, die Anzahl der Bäume und die Begrenzungen, die PET-Werte aufgrund ihrer Auswirkungen auf die mikrometeorologischen Variablen während der Tages- und Nachtbedingungen beeinflussen.

### 3.8.3 Ergebnisse

Zur Standardisierung der Ergebnisse und für die anschließenden Vergleiche wurden alle Simulationen mit denselben Eingabedaten aus der DWD-Datenbank für die festgelegten Tage durchgeführt. Die Simulationsergebnisse wurden dann verglichen, um herauszufinden, wie sich die verschiedenen Designs der Plätze auf den menschlichen Wärmekomfort auswirken. Die thermische Behaglichkeit des Menschen wurde anhand der von Matzarakis und Mayer (1996) vorgeschlagenen PET-Interpretationsskala analysiert (Tabelle 12).

Tabelle 12. Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996).

	PET (°C)				
	<4	4-8	8-13	13-18	18-23
Grad der physiologischen Belastung	Extreme Kältebelastung	Starke Kältebelastung	Moderate Kältebelastung	Leichte Kältebelastung	Keine thermische Belastung
	PET (°C)				
	23-29	29-35	35-41	>41	
	Leichter Hitzestress	Mäßige Hitzebelastung	Starke Hitzebelastung	Extreme Hitzebelastung	

### Heißer Tag

An dem heißen Tag im Alten Hof zeigten die Simulationsergebnisse starke thermische Stressbedingungen (mittlerer PET-Wert 43,8 °C) während des Tages für den Zeitraum von 12 Uhr bis 16 Uhr. Das Simulationsergebnis zeigt auch, dass nachts der höchste PET-Wert um 2 Uhr unter den Bäumen beobachtet wurde (16,7 °C). Die Erwärmung tagsüber wurde durch die Baumkronen nachts durch die verminderte langwellige Rückstrahlung aufrechterhalten, so dass der PET-Wert im Vergleich zu den offenen Flächen höher war. Um 12 Uhr und um 16 Uhr wurden die niedrigsten PET-Werte (34,9 °C) in den

beschatteten Bereichen der Gebäude beobachtet, während die höchsten PET-Werte in den unbeschatteten Bereichen (62,3 °C) festgestellt wurden. Im Gegensatz dazu zeigten die Simulationsergebnisse am Alpenplatz leichte thermische Stressbedingungen (mittlerer PET-Wert 26,6 °C) während des analysierten kritischen Zeitraums (12 Uhr und 16 Uhr). An dem heißen Tag verringern Bäume und Rasenflächen die PET gegenüber befestigten Flächen. Es bestehen auch Unterschiede von bis zu 23,6 °C PET zwischen den beschatteten und den unbeschatteten Bereichen, wo die maximalen PET-Werte um 12 Uhr 46,0 °C erreichten (Abbildung 45).

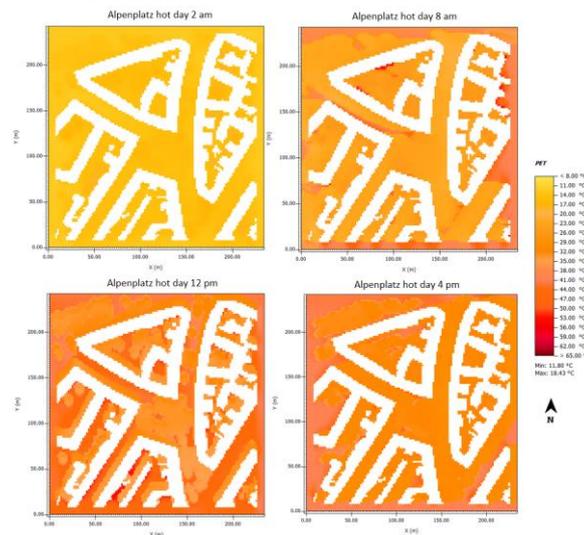


Abbildung 45. Veränderung des PET-Wertes am Alpenplatz während des heißen Tages (2 Uhr, 8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr).

Am heißen Tag zeigten die Simulationsergebnisse trotz des hohen Vegetationsanteils am Bordeauxplatz starke thermische Stressbedingungen (mittlerer PET-Wert 40,3 °C) während des kritischen Analysezeitraums (12 Uhr, 16 Uhr). Wie auch am Alter Hof wurde der höchste PET-Wert (20,5 °C) in der Nacht unter den Bäumen beobachtet. Der gemeinsame Effekt der Beschattung durch die Bäume und der Gebäude reduzierte die PET-Werte um 16 Uhr fast auf dem gesamten Platz (mittlerer PET-Wert 38,0 °C). Am Hohenzollernplatz war der Schatteneffekt trotz des hohen Anteils an gepflasterter Fläche den ganzen heißen Tag über für einen leichten Hitzestress verantwortlich (mittlerer PET 28,5 °C).

Die städtische Morphologie spielt auch eine wesentliche Rolle für die Windgeschwindigkeit. Obwohl alle Plätze von Gebäuden umgeben sind, wirken sich die unterschiedlichen Verhältnisse zwischen den Plätzen und der Höhe der Gebäude direkt auf die Windgeschwindigkeit auf den verschiedenen Plätzen aus. Abbildung 46 zeigt, dass die größeren Plätze bessere Bedingungen bieten, um die Windgeschwindigkeit an heißen Tagen zu erhöhen und damit die Hitzebelastungen zu verringern. Dieser Effekt ist tagsüber insgesamt gering, da die Windgeschwindigkeit an den ausgewählten Hitzetagen niedrig ist.

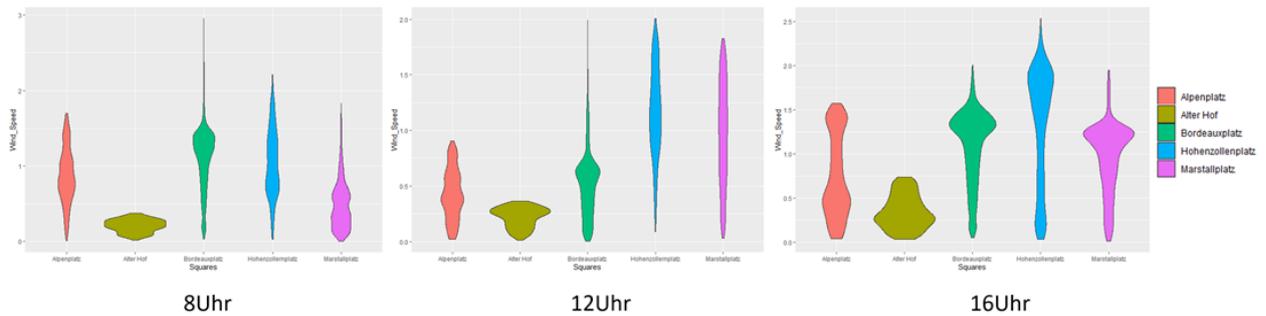
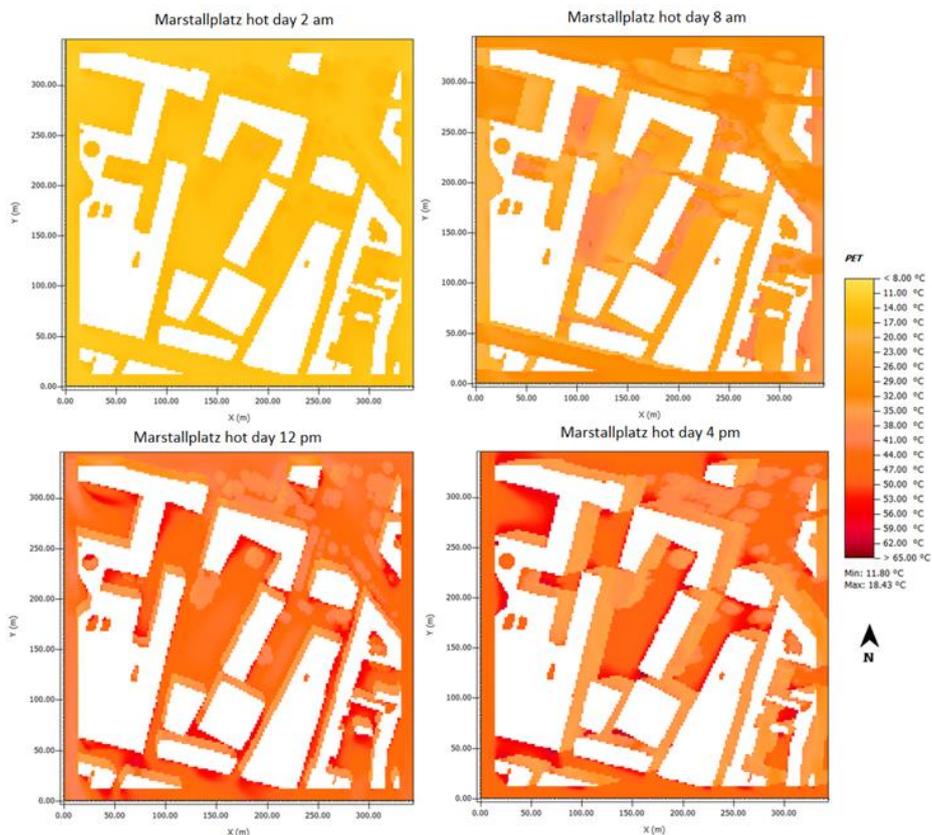


Abbildung 46. Variation der Windgeschwindigkeit an dem heißen Tag. (8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr), von links nach rechts: Alpenplatz, Alter Hof, Bordeauxplatz, Hohenzollernplatz, Marstallplatz.

Nachts wurde der niedrigste PET-Wert (13,4 °C) in der Platzmitte beobachtet, was die Rolle des Himmelsichtfaktors für die Abgabe der langwelligen Strahlung in der Nacht unterstreicht. Aus demselben Grund wurde auch der höchste PET-Wert (35,9 °C) um 8 Uhr morgens unter den Bäumen beobachtet. Der offene, durch turbulente Luftbewegungen geprägte Marstallplatz zeigte nachts die niedrigsten PET-Werte sowohl am heißen Tag (12,8 °C) (Abbildung 47oben) als auch am kalten Tag (-1,0 °C) (Abbildung 47 unten). Aufgrund der stark befestigten Fläche des Marstallplatzes und der geringen Anzahl von Bäumen zeigten die Simulationsergebnisse am heißen Tag zwischen 12 und 16 Uhr extreme Hitzestressbedingungen (mittlerer PET 61,1 °C). An diesem Tag wurden auch im nördlichen Bereich zwischen den Bäumen und dem Gebäude um 8 Uhr morgens höhere PET-Werte beobachtet (39,3 °C), während um 16 Uhr im überlappenden Schattenbereich zwischen dem Gebäude und den Bäumen niedrigere PET-Werte beobachtet wurden (34,3 °C).



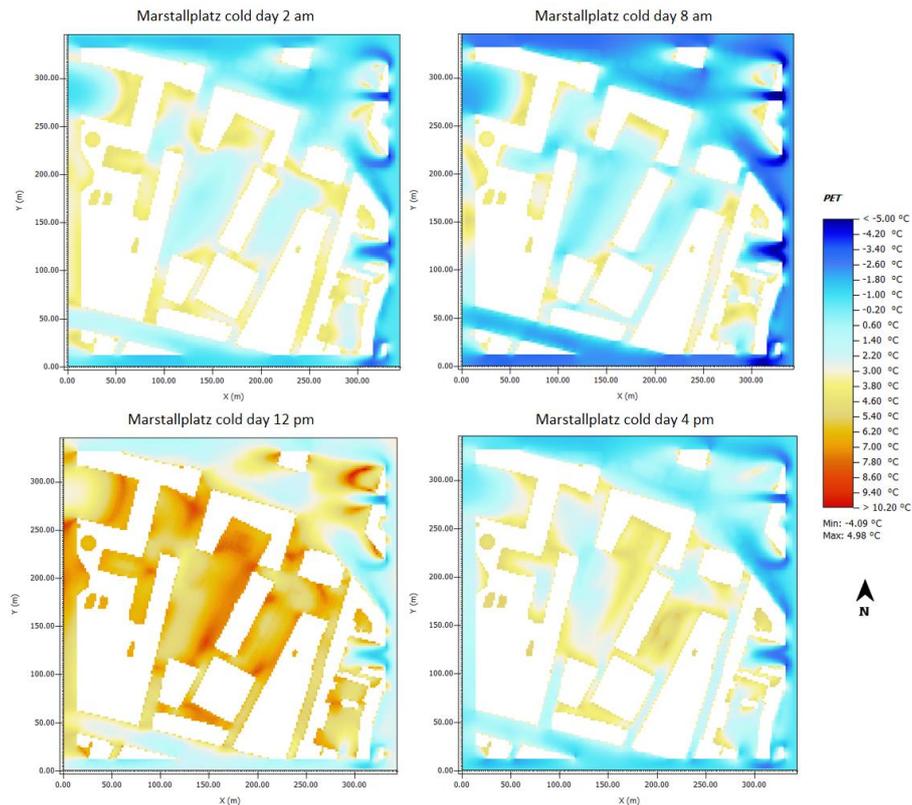


Abbildung 47. Veränderung der PET-Werte am Marstallplatz während eines heißen Tages (oben) und eines kalten Tages (unten) um 2 Uhr, 8 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr.

Abbildung 48 stellt die Lufttemperatur an den fünf Plätzen an einem heißen Tag dar. Die Regressionsanalysen zeigen, dass die Windgeschwindigkeit während des für den thermischen Komfort besonders kritischen Zeitraums (12 und 16 Uhr) am Alten Hof (>77 %), am Bordeauxplatz (>88 %), am Hohenzollernplatz (>86 %) und am Marstallplatz (>79 %) den größten Einfluss auf die PET-Werte hatte, während die Oberflächentemperatur am Alpenplatz (>62 %) den größten Einfluss auf den PET-Wert hatte.

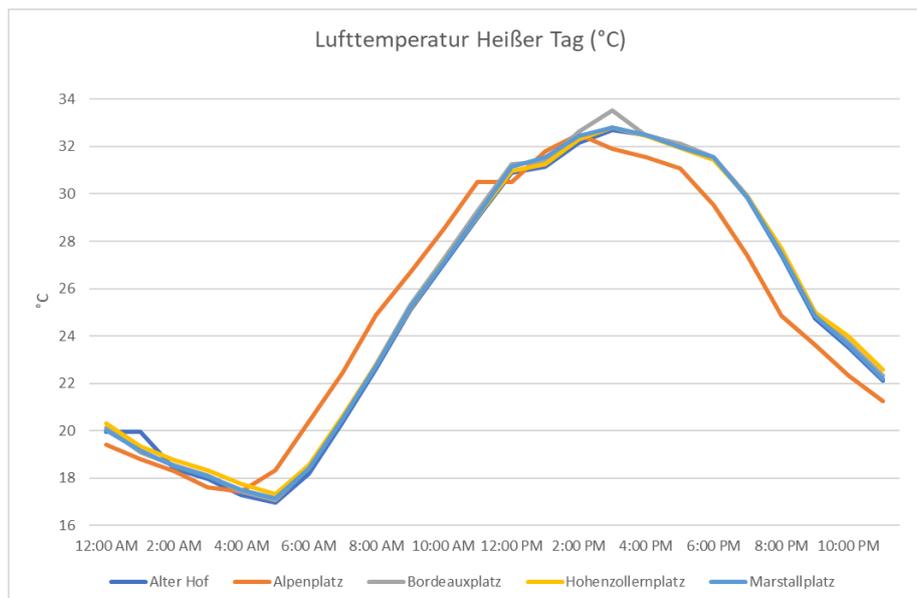


Abbildung 48. Simulierte Lufttemperatur an dem heißen Tag.

Nachts besteht auf allen Plätzen leichter Kältestress (<15 °C), wobei der Marstallplatz den niedrigsten durchschnittlichen PET (14,6 °C) aufweist. Das Ergebnis unterstreicht die Wirkung eines hohen Sky

View Factors (SVF, Anteil an offenem Himmel) bei der Reduzierung des PET in der Nacht. Die Regressionsanalysen ergaben, dass die Windgeschwindigkeit die Variable mit dem größten Einfluss auf den nächtlichen PET am Alpenplatz, am Hohenzollernplatz und am Marstallplatz war. Die geringere Albedo des Granits war für die tagsüber beobachteten höheren Oberflächentemperaturen (mittlere Oberflächentemperatur 32,5 °C) und die nachts abgegebene langwellige Strahlung verantwortlich. Auf dem Hohenzollernplatz, einem stark gepflasterten und begrünten Platz, waren die nächtlichen PET-Werte durch den vergleichsweise kleineren SVF deutlich höher (15,2 °C), trotz des Einflusses der Windgeschwindigkeit in der Nacht.

Während der kritischen Stunden (12 und 16 Uhr) sind an heißen Tagen die Benutzer auf allen Plätzen, mit Ausnahme des Alpenplatzes, extremem Wärmestress ausgesetzt (mittlerer PET 41,2 °C). Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der Alpenplatz eine gemeinsame Beschattung durch die Bäume und die Gebäude aufweist. Die fehlende Beschattung durch die Gebäude beeinflusste die PET-Werte am Bordeauxplatz zu den kritischen Zeiten am Tag. Im Vergleich zum Hohenzollernplatz, einem Platz mit einer ähnlichen Anzahl von Bäumen, der jedoch stark gepflastert ist, weist der Bordeauxplatz höhere PET-Werte auf, insbesondere um 12 Uhr, wie in Abbildung 49 zu sehen ist.

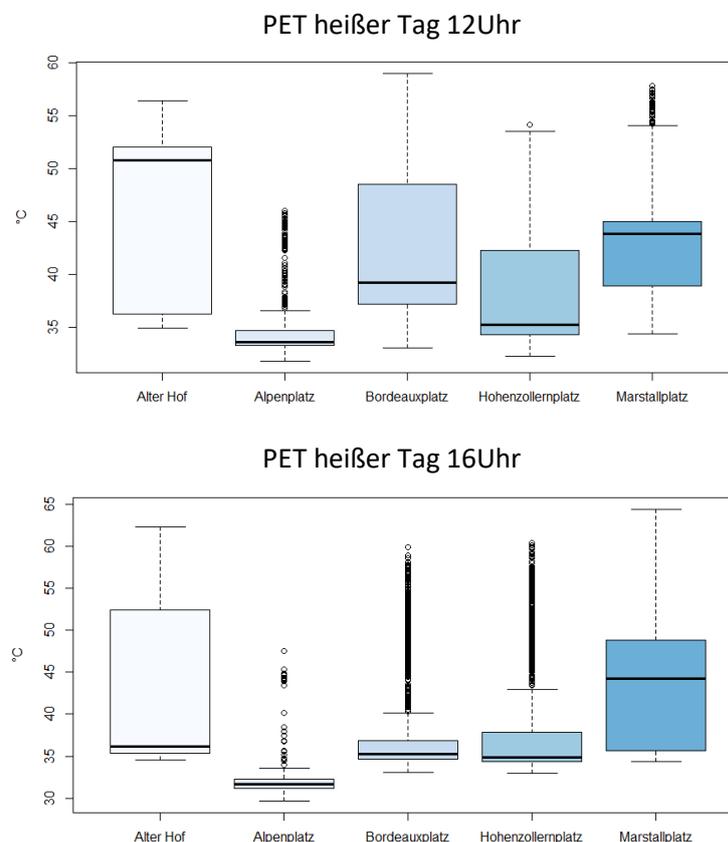


Abbildung 49. PET-Werte für den heißen Tag zu den kritischen Stunden (12 Uhr und 16 Uhr).

Auf dem Alpenplatz bieten Gras und Bäume in Kombination mit einem niedrigen Himmelsichtfaktor einen Schutz vor kurzweiliger Einstrahlung und profitieren gleichzeitig vom Wind. All diese Faktoren sorgen dafür, dass der Alpenplatz während der kritischen Stunden des Tages einer mäßigen thermischen Belastung ausgesetzt ist (durchschnittliche PET 33,5 °C).

## Warmer Tag

Nachts und um 8 Uhr morgens liegt der thermische Komfort auf allen Plätzen im Bereich von mäßigem Kältestress, wobei der Alpenplatz um 2 Uhr morgens den höchsten PET-Wert aufweist (Abbildung 50). Während der Alpenplatz, der Bordeauxplatz und der Hohenzollernplatz während der kritischsten Stunden (12 bis 16 Uhr) zu keinem thermischen Stress führen, weisen der Alte Hof und der Marstallplatz um 12 Uhr Bereiche mit leichtem Hitzestress auf (PET 23-29 °C), was die Bedeutung des Schattens und der Kronenüberschirmung durch Bäume für den thermischen Komfort der Menschen unterstreicht.

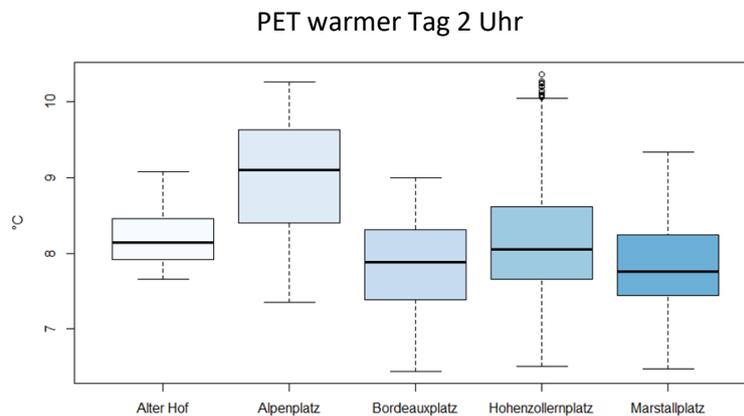


Abbildung 50. PET-Werte für den warmen Tag in der Nacht (2 Uhr).

Um 16 Uhr ist der Gebäudeschatten der wichtigste Faktor zur Erhöhung des thermischen Komforts im Alten Hof (Abbildung 51). Die Gebäudebeschattung reduziert die Oberflächentemperatur und ist laut Regressionsanalyse die Variable, die den stärksten Einfluss (80 %) auf den PET um 16 Uhr hat.

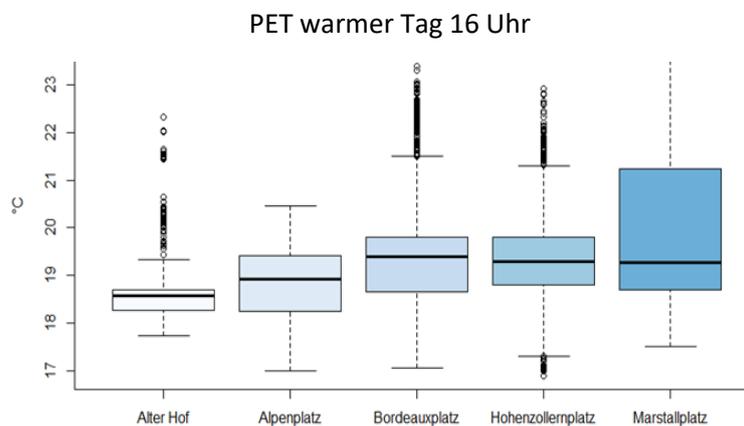


Abbildung 51. PET-Werte für den warmen Tag 4 Uhr nachmittags.

## Milder Tag

Nachts und um 8 Uhr morgens zeigen die Simulationsergebnisse mäßigen Kältestress für alle Plätze (PET 8~13 °C), wobei der Marstallplatz um 2 Uhr und 8 Uhr morgens den niedrigsten durchschnittlichen PET-Wert aufweist. Tagsüber unterscheidet sich nur der PET-Wert für den Marstallplatz um 12 Uhr mit dem höchsten Durchschnittswert von 23,8 °C von allen anderen Fällen. Die Simulation zeigt auch, dass zwischen 12 Uhr und 16 Uhr alle Plätze im Komfortbereich liegen (PET 18~23 °C). Um 8 Uhr morgens sind die Plätze mäßig bis kalt (PET 8~13 °C), wobei die Oberflächentemperatur die Variable mit dem

stärksten Einfluss auf die PET-Werte am Bordeauxplatz ist, während an den anderen Plätzen die Lufttemperatur die Variable mit dem stärksten Einfluss ist. Um 12 Uhr mittags, während der PET der anderen Plätze leichten Kältestress anzeigt (mittlerer PET 13~18 °C), ist der Marstallplatz im Bereich von leichtem Wärmestress (mittlerer PET 23,0 °C). Das Maximum des PET am Marstallplatz, 34,6 °C, wird in der Nähe der Gebäude beobachtet, was den deutlichen Einfluss der langwelligen Strahlung zeigt. Um 16 Uhr herrscht auf allen Plätzen mäßiger Kältestress (PET 8-13 °C) (Abbildung 52), und gemäß der Regressionsanalyse ist die Lufttemperatur die Variable, die den PET auf dem Alpenplatz, dem Bordeauxplatz und dem Marstallplatz am stärksten beeinflusst. Am Alten Hof wird der PET am stärksten von der Oberflächentemperatur beeinflusst, und am Hohenzollernplatz von der Windgeschwindigkeit.

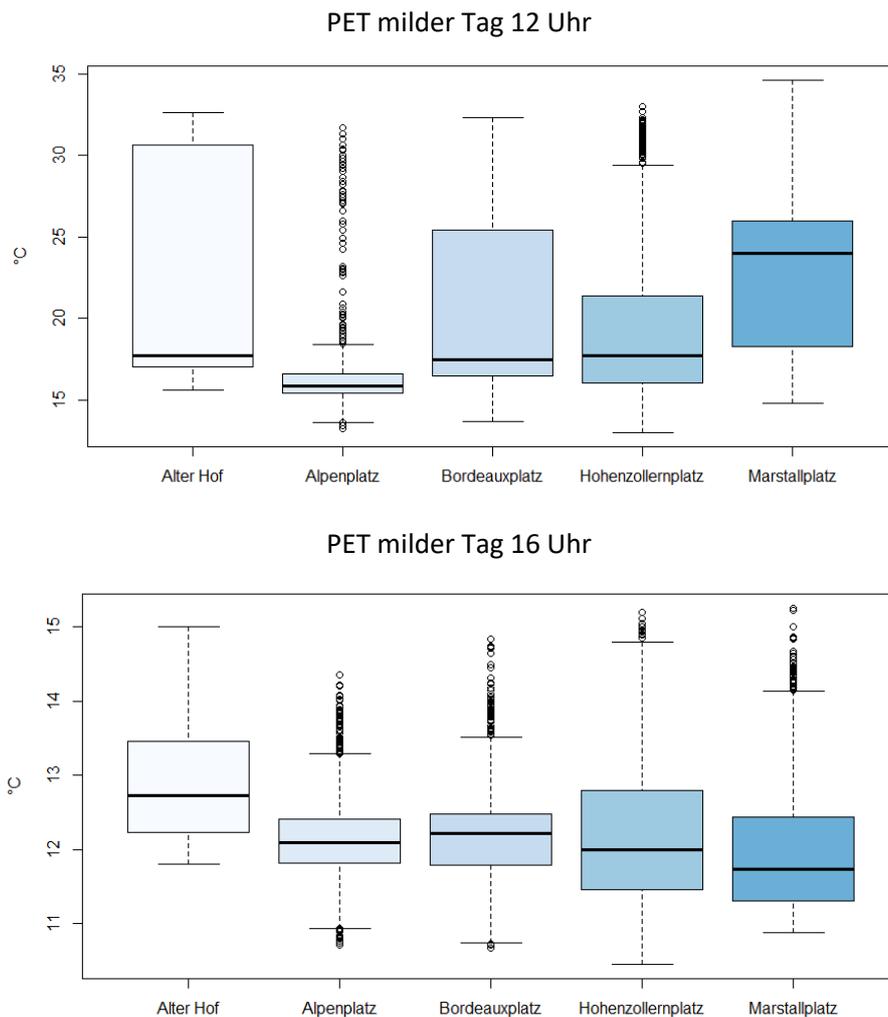


Abbildung 52. PET-Werte für den milden Tag 12 Uhr und 16 Uhr.

### Kalter Tag

Der beobachtete PET an allen Plätzen am kalten Tag reicht von starkem Kältestress um 12 Uhr bis zu extremem Kältestress in den anderen untersuchten Stunden. Am Alten Hof wurde starker Kältestress beobachtet (mittlerer PET 4,3 °C), während die höchsten PET-Werte in der Nähe der Gebäudewände beobachtet wurden (7,6 °C um 12 Uhr mittags), was die Wirkung der langwelligen Strahlung und des Windschutzes bestätigt, den die Gestaltung des Alten Hofes, eines kleinen und stark gepflasterten Platzes, der auf allen Seiten von Gebäuden umgeben ist, bietet. Während der Alpenplatz Bedingungen von

extremem thermischem Stress zeigte (mittlerer PET 2,7 °C), lag der niedrigste beobachtete PET-Wert bei -1,0 °C um 8 Uhr morgens, was auf die fehlende Sonneneinstrahlung in der Nacht zurückzuführen ist. Im Vergleich zu den Ergebnissen für den Alten Hof ist der Wind am Alpenplatz nicht blockiert, was die PET-Werte während des gesamten Tages senkt.

Am Bordeauxplatz zeigen die Simulationsergebnisse extremen Kältestress (mittlerer PET 2,3 °C) während des gesamten untersuchten Zeitraums. Wie am Alten Hof wurden am kalten Tag die höchsten PET-Werte in der Nähe der Wände beobachtet, was die Wirkung der langwelligen Strahlung bestätigt. Am Hohenzollernplatz zeigten die Simulationsergebnisse extreme Kältestressbedingungen während des gesamten kalten Tages (mittlerer PET 2,1 °C). Auch der Marstallplatz wies extremen Kältestress auf (mittlerer PET 3,3 °C). Der Platz hat eine besondere Gestaltung mit einer zweiten Freifläche im Nordwesten des Geländes, die Teile des Hauptzugangs der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ist (Abbildung 53). Die Verbindung zwischen den beiden Freiflächen sorgt für einen Bereich mit Windturbulenzen, die sich auf die PET-Werte in diesem Bereich auswirken.

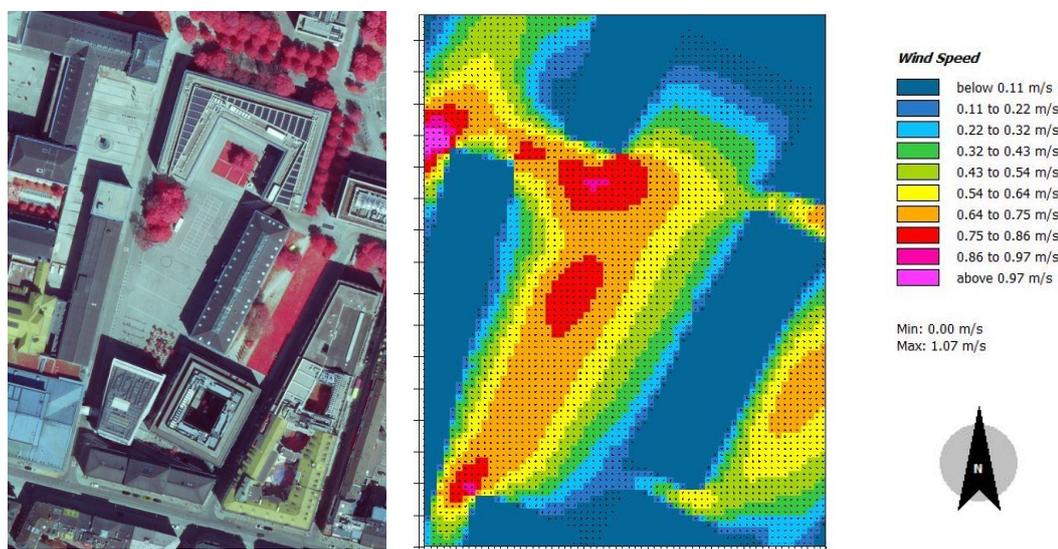


Abbildung 53. Luftbild und Windgeschwindigkeitssimulation des Marstallplatzes um 8 Uhr morgens (Quelle: BayernAtlas, 2020).

Die Lufttemperatur ist die Variable, die sich am stärksten auf den PET an kalten Tagen auswirkt, und die zweite Variable, die sich stark auf den PET auswirkt, ist die Windgeschwindigkeit. Die Bedeutung des Windschutzes an kalten Tagen wird im Alten Hof deutlich, der während der gesamten untersuchten Kälteperiode die höchsten Werte des PET aufweist (Abbildung 54).

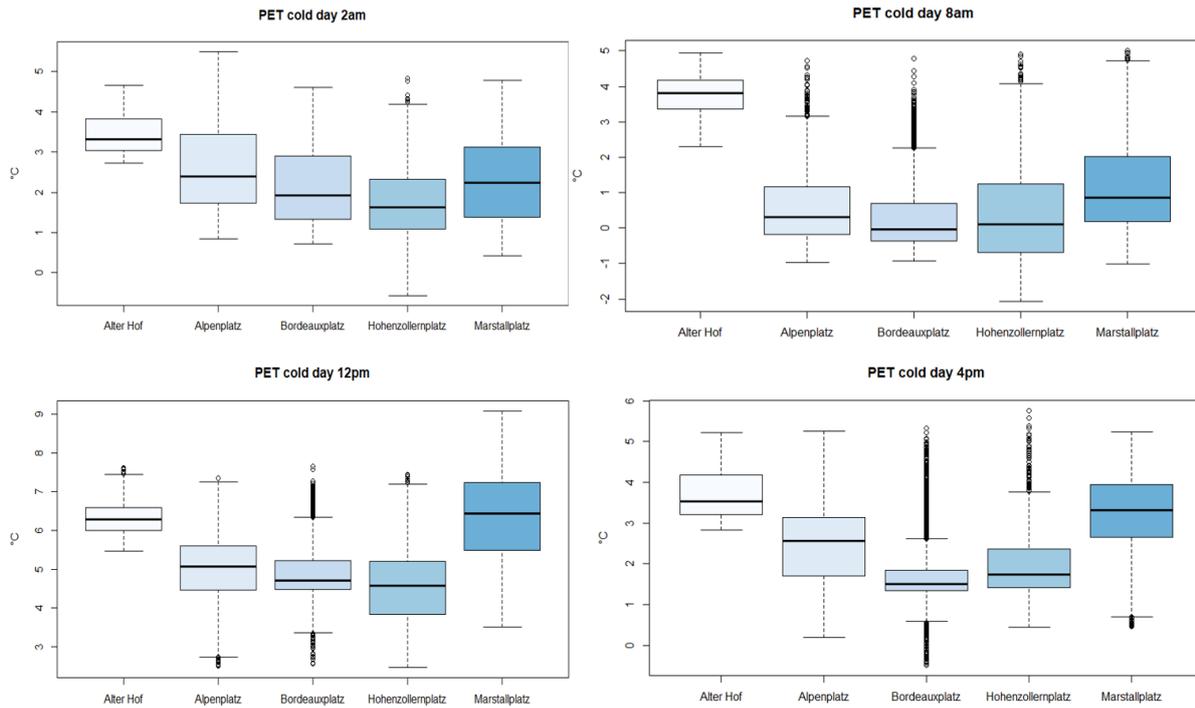


Abbildung 54. PET-Werte für kalte Tage.

### Kalter und feuchter Tag

Trotz der niedrigen Temperaturen ist der kalte und feuchte Tag nicht direkt mit dem kalten Tag vergleichbar. Der Eingangslufttemperaturbereich der Simulation ist unterschiedlich und reicht von  $-3,9\text{ °C}$  bis  $8,6\text{ °C}$  am kalten Tag und von  $2,3\text{ °C}$  bis  $11,3\text{ °C}$  am kalten und feuchten Tag. Der PET um 2 Uhr, 8 Uhr und 16 Uhr befindet sich auf den meisten Plätzen im Bereich von starkem Kältestress, wobei der Marstallplatz nur um 2 Uhr mit einem durchschnittlichen PET von  $3,6\text{ °C}$  extremen Kältestress aufweist. Um 12 Uhr befinden sich alle Plätze im mäßigen bis kalten Stressbereich, wobei der höchste Mittelwert am Marstallplatz ( $13,5\text{ °C}$ ) beobachtet wird (Abbildung 55).

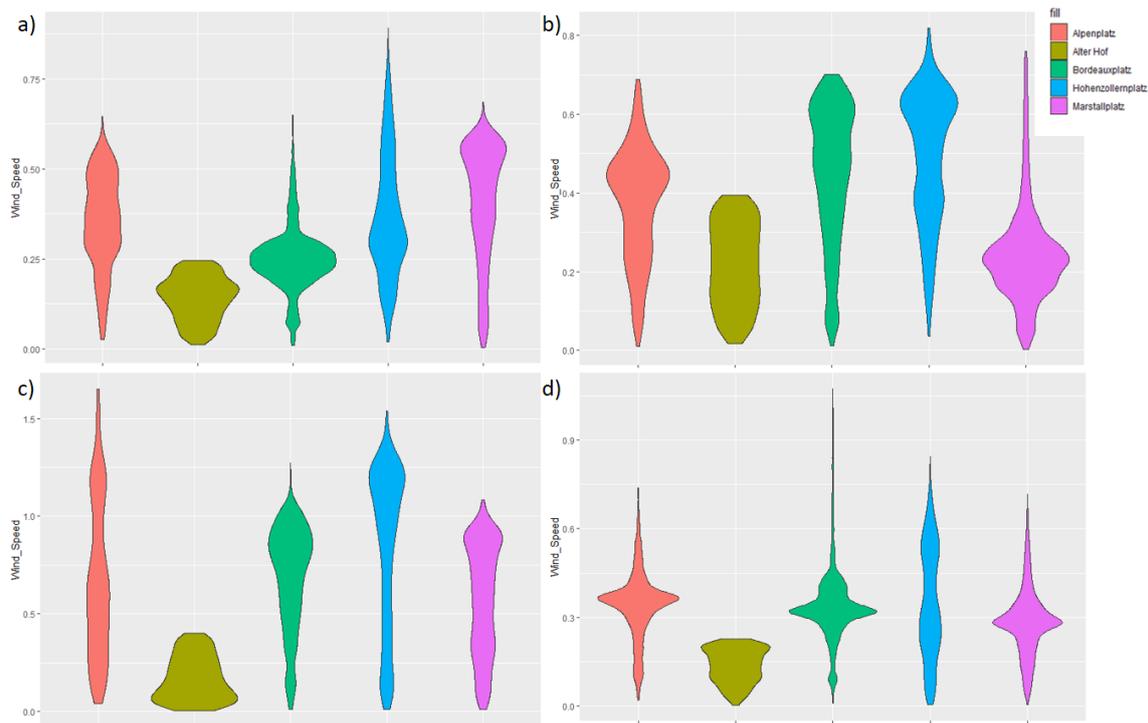


Abbildung 55. Vergleich der Windgeschwindigkeiten an einem kalten und feuchten Tag: 2 Uhr (a); 8 Uhr (b); 12 Uhr (c); 16 Uhr (d).

Die Windgeschwindigkeit ist laut Regressionsanalyse die Variable, die den PET um 2 Uhr, 8 Uhr und 16 Uhr (niedrigste Strahlungszeiten) am stärksten beeinflusst, selbst bei den in Abbildung 55 beobachteten niedrigen Windgeschwindigkeitswerten.

### Zusammenfassung

Um zu verstehen, wie der menschliche WärmeKomfort durch die verschiedenen Elemente von Plätzen im Jahresverlauf beeinflusst wird, wurden in dieser Teiluntersuchung fünf Plätze betrachtet. Sie wurden durch Feldforschung und mikrometeorologische Simulationen analysiert, ergänzt durch multivariate Regressionen, um die Auswirkungen der einzelnen Variablen auf die physiologisch äquivalente Temperatur (PET-Index) als Maß für den menschlichen thermischen Komfort zu verstehen. Die Studie ergab, dass die städtische Morphologie in allen untersuchten Fällen der Faktor mit dem größten Einfluss auf den PET als einem Maß für den menschlichen thermischen Komfort ist.

Alle untersuchten Variablen werden von der Stadtmorphologie beeinflusst (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Strahlung) und wirken sich auf den PET aus, indem sie die thermische Belastung je nach Tag und Tageszeit erhöhen oder verringern. So erhöht beispielsweise die Windbarriere von Gebäuden den PET an kalten Tagen um bis zu 4 °C, während die kühlende Wirkung des Windstroms den thermischen Komfort an heißen und warmen Tagen verbessert, was die Bedeutung der Berücksichtigung der Auswirkungen der einzelnen Gestaltungselemente in verschiedenen Jahreszeiten unterstreicht.

Diese Studie leistet einen Beitrag zur Stadtplanung, indem sie die Notwendigkeit aufzeigt, alle umgebenden Elemente eines Platzes und ihre Dimensionen zu berücksichtigen, um die Eigenschaften neuer städtischer Plätze zu definieren. Um in gemäßigten Klimazonen über die Jahreszeiten hinweg menschlichen WärmeKomfort zu erreichen, kann es notwendig sein, Lösungen zu kombinieren, wie z. B. die Verschattung eines Gebäudes zur Maximierung des Strahlungsschutzes an heißen Tagen mit dem Windschutz an kalten Tagen. Darüber hinaus wird gezeigt, wie wichtig es ist, die Höhe von Gebäuden



auf zwei Münchner Plätze, um die Rechenzeit und die Menge der zu analysierenden Daten zu reduzieren. Die ausgewählten Plätze sollen verschiedene Merkmale der Münchner Plätze repräsentieren, wie z.B. die große und kleine Dimension und das Vorhandensein oder Fehlen von Vegetation.

Um die unterschiedlichen Beiträge der einzelnen Vegetationstypen zu verstehen, war es notwendig, Szenarien ohne Vegetation zu entwickeln und jede Art von Vegetation nach und nach hinzuzufügen. Dadurch konnten die von jedem Vegetationstyp ausgehenden Veränderungen beobachtet werden.

In diesem Abschnitt wird eine Extremsituation ohne Grün als Ausgangslage untersucht, um zu analysieren, wie sich die verschiedenen hinzugefügten Vegetationselemente wie Gras, Sträucher und Bäume auf den menschlichen Wärmekomfort auf den beiden Plätzen auswirken (Abbildung 57).

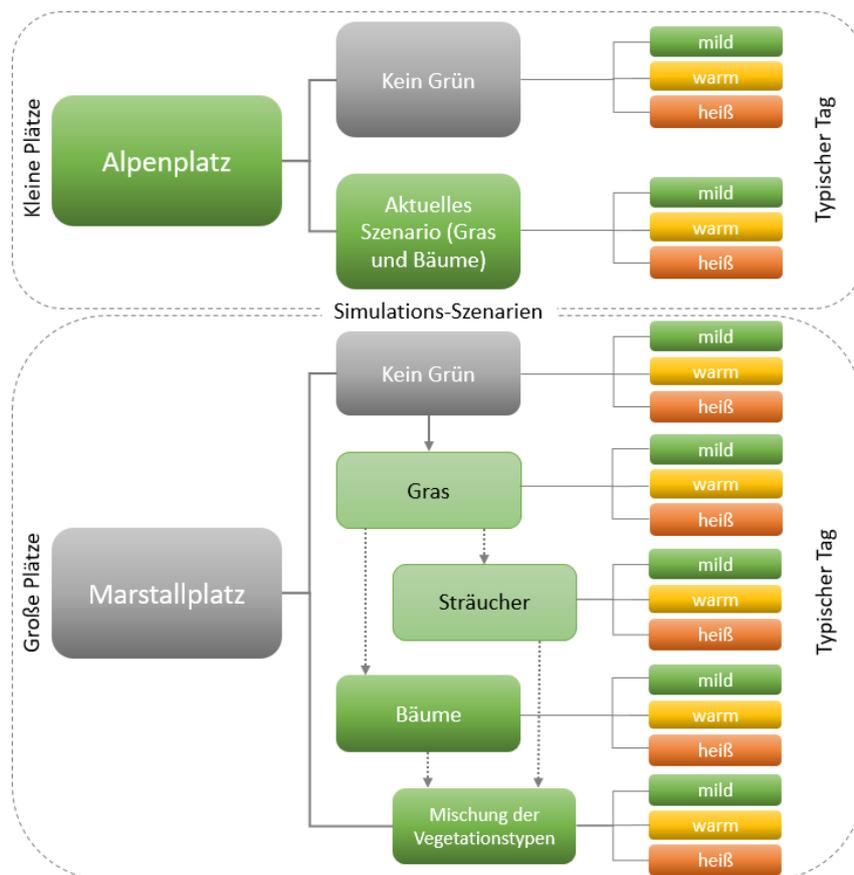


Abbildung 57. Modellierungsansatz für grüne Infrastruktur-Szenarien.

Das Modell des Alpenplatzes hatte eine räumliche Ausdehnung von 300x300 m, das Modell des Marstallplatzes hatte eine Fläche von 350 x 350 m groß. Die horizontale Auflösung betrug wiederum 2x2m, ohne Verschachtelungsgitter. Die vertikale Auflösung betrug 3 m mit äquidistantem Raster. Die Gebäudehöhen und -abmessungen wurden aus den von der Stadt München zur Verfügung gestellten GIS-Daten abgeleitet. Abbildung 58 zeigt die Simulationsszenarien für den Alpenplatz. Die aktuelle Situation und ohne Grün.

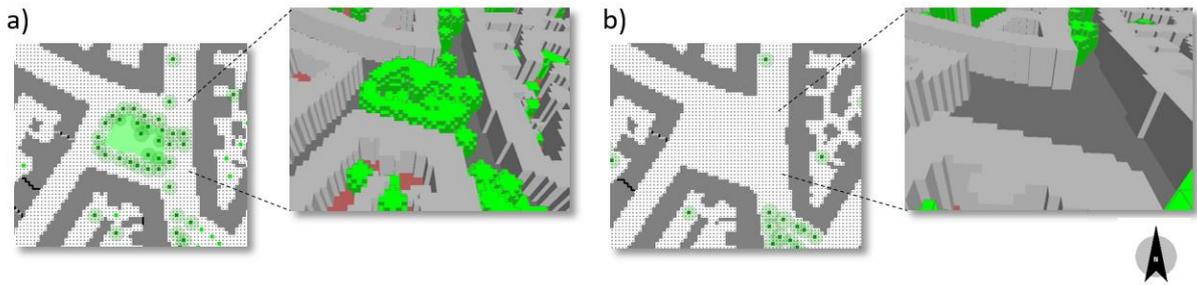


Abbildung 58. Alpenplatz aktuelles Szenario (a) und Szenario ohne Vegetation (b).

Während für den Alpenplatz zwei verschiedene Szenarien entwickelt wurden, wurden für den Marstallplatz fünf verschiedene Szenarien modelliert: kein Grün, Gras, Sträucher, Bäume und eine Mischung aus Gras, Sträuchern und Bäumen (Abbildung 59). Für beide Plätze begannen die Simulationen um 2 Uhr morgens für eine Gesamtzeit von 48 Stunden. Um die anfänglichen instationären Bedingungen zu überwinden, wurden die ersten 22 Stunden der Analyse ausgeschlossen. Die Ergebnisse für die thermische Behaglichkeit des Menschen wurden in einer Höhe von 1,5 m auf Fußgängerniveau extrahiert. Die für die ENVI-met-Simulation erforderlichen meteorologischen Daten wurden von der Wetterstation des DWD, City-Station ID 3379, bezogen (Tabelle 12Tabelle 12. Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996).).

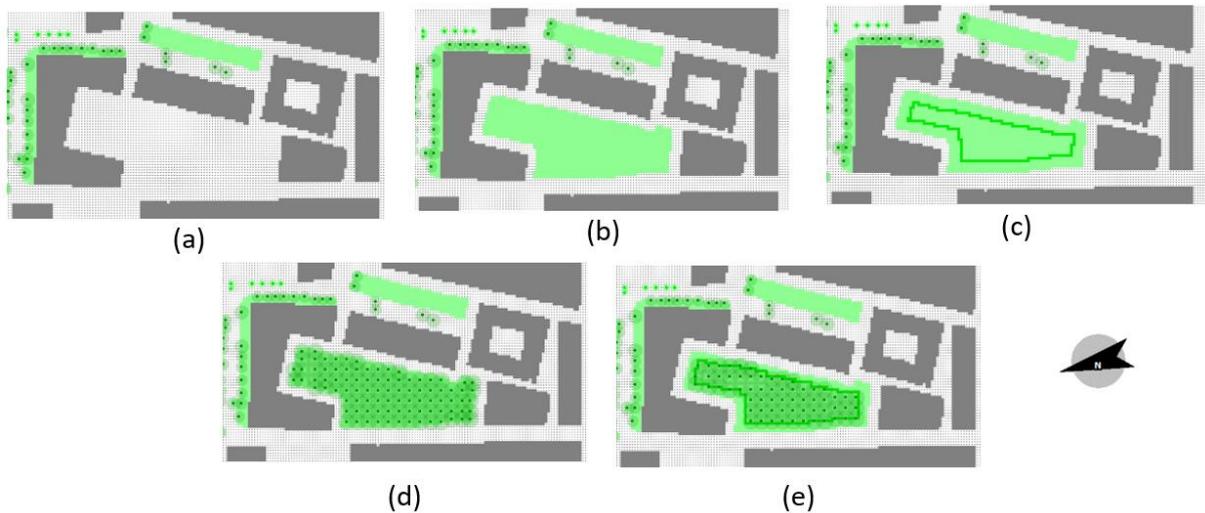


Abbildung 59. Marstallplatz-Simulationsszenarien: kein Grün (a); Gras (b); Büsche (c); Bäume (d); Mischung (e).

Die in den Modellen verwendete Vegetation wurde aus den ENVI-met-Standardwerten ausgewählt: Gras mit einer durchschnittlichen Höhe von 25 cm und Sträucher bzw. Hecken mit einer Höhe von 2 m. Die verwendete Baumart war die Winterlinde (*T. cordata*) in einem Raster von 6x6 m. *T. cordata* wurde aufgrund ihrer Eigenschaften ausgewählt, da es sich um eine laubabwerfende Baumart handelt, die häufig auf städtischen Plätzen in München zu finden ist.

## Ergebnisse

### Alpenplatz

Das Szenario ohne Begrünung zeigt die Wirkung der städtischen Morphologie. In allen untersuchten Zeiträumen wurde der niedrigste PET-Wert in der Nähe der Gebäudewände beobachtet (Abbildung

60). Im Vergleich zum aktuellen Szenario und zum Szenario ohne Begrünung wird der durchschnittliche PET nur an heißen Tagen erheblich von der Vegetation beeinflusst.

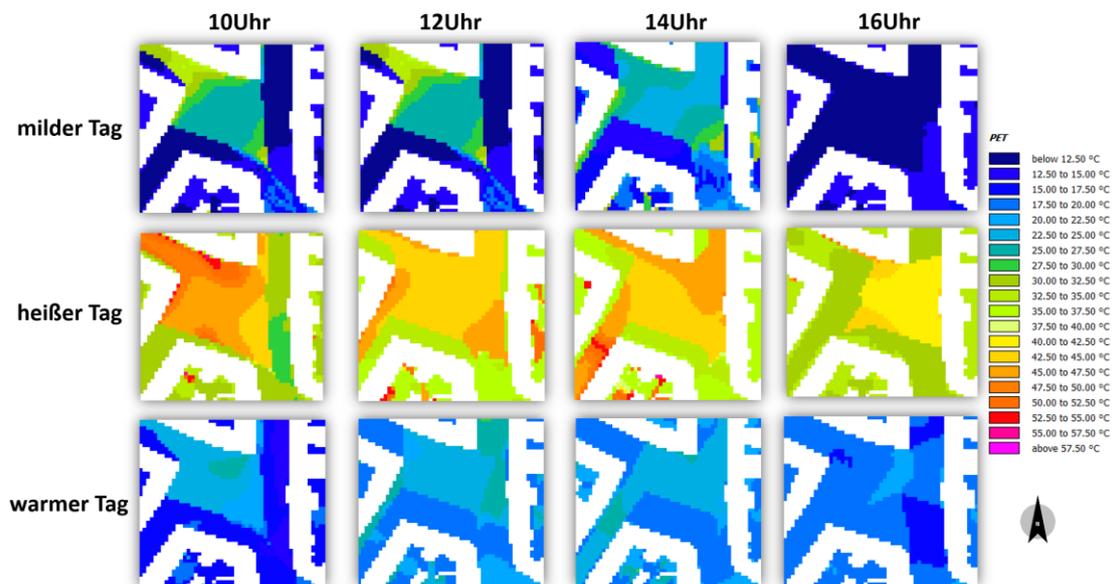


Abbildung 60. PET-Werte des Alpenplatzes ohne Vegetation während der typischen Tage: mild, warm und heiß.

Nach der Interpretation des PET von Matzarakis und Mayer (1996) kann der durchschnittliche PET-Wert (zwischen 10 und 16 Uhr) an dem heißen Tag im aktuellen Szenario (mit Vegetation) als mäßiger Hitzestress (34,0 °C) eingestuft werden. Im Szenario ohne Grün besteht dagegen starker Hitzestress (41,0 °C PET).

In Tabelle 13 ist jedoch für beide Szenarien ein leichter Kältestress (zwischen 13 und 18°C -Tabelle 11) an dem milden Tag zu beobachten, und am warmen Tag zeigen beide Szenarien keinen Hitzestress. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Begrünung von kleinen Plätzen an heißen Tagen in der Stadt München und bekräftigen die Bedeutung der städtischen Morphologie auf Münchner Plätzen mit niedrigem Himmelsichtfaktor.

Tabelle 13. Der durchschnittliche PET-Wert des Alpenplatzes

Durchschnittliches PET zwischen 10 Uhr und 16 Uhr		
Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996)		
Typischer Tag	Aktuelles Szenario	Nicht-grün
	13.98°C	18.00°C
Milder Tag	(leichte Kältebelastung)	(leichte Kältebelastung)
	33.97°C	40.96°C
Heißer Tag	(mäßiger Hitzestress)	(starker Hitzestress)
	19.46°C	20.48°C
Warmer Tag	(keine thermische Belastung)	(keine thermische Belastung)

Da der Alpenplatz derzeit stark begrünt ist und stark von der städtischen Morphologie beeinflusst wird, gingen wir davon aus, dass er an heißen Tagen bereits den optimalen PET-Wert erreicht. Diese Annahme veranlasste uns, unsere Studie auf den Marstallplatz zu konzentrieren, da der Marstallplatz ein großer Platz ist und die städtische Morphologie sich nicht so stark auf den PET auswirkt wie am Alpenplatz, insbesondere an mittleren und warmen Tagen.

### Marstallplatz - Mittlerer Tag

Am Vormittag (10 Uhr) war der PET in den Szenarien ohne Bäume zwar erhöht, ohne den Bereich von thermischem Stress zu erreichen, während die Szenarien mit Bäumen und Vegetationsmischungen sich im Bereich von leichtem Kältestress befanden. In Abbildung 61 ist um 16 Uhr der Einfluss der Verschattung durch die Gebäude auf den PET des Marstallplatzes zu erkennen. Alle untersuchten Szenarien zeigten mäßigen Kältestress aufgrund der Verschattung durch die Gebäude.

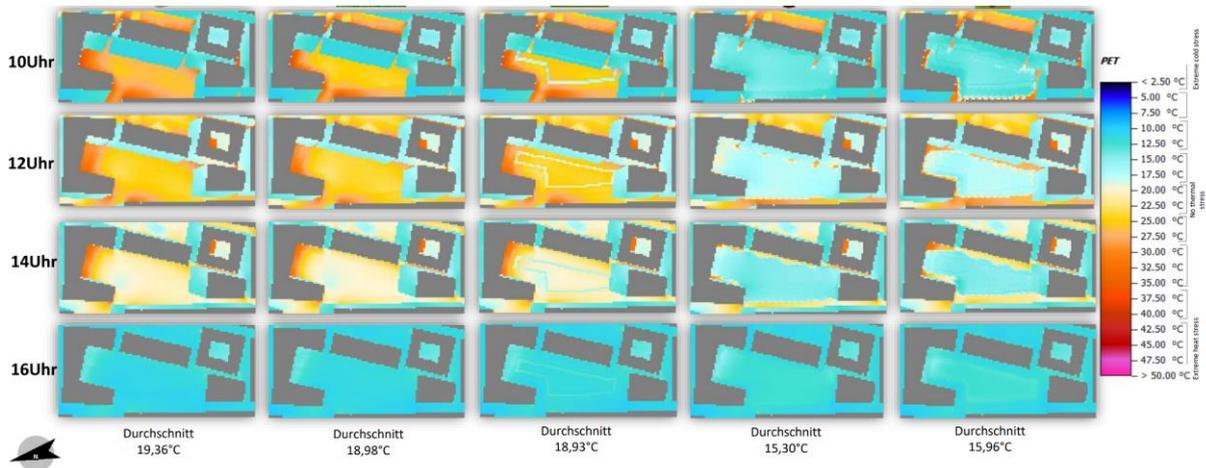


Abbildung 61. PET-Veränderung am Marstallplatz während des milden Tages.

In Tabelle 14 sind die durchschnittlichen PET-Werte am milden Tag zu sehen. Die im Szenario "Bäume" verwendeten Laubbäume waren ausschlaggebend dafür, dass in den Szenarien mit Bäumen zur Mittagszeit kein thermischer Stress auftrat. Durch das Fehlen der Belaubung im Winterhalbjahr erhöhen sich die PET-Werte. Das Vorhandensein von Baumstämmen und Ästen und ihr Schatten verringerten jedoch den PET am Morgen und sorgten für dann leichten Kältestress in den Baum- und Mischszenarien.

Tabelle 14. Durchschnittlicher PET des Marstallplatzes an einem milden Tag und Interpretation des PET-Bereichs nach Matzarakis und Mayer (1996)

Durchschnittlicher PET an einem milden Tag (10 Uhr bis 16 Uhr)					
Mittlerer Tag	Nicht-grün	Gras	Büsche	Bäume	Mix
10 Uhr	21,69°C	20,89°C	20,63°C	14,07°C	14,79°C
12 Uhr	23,65°C	23,13°C	23,05°C	18,57°C	19,59°C
14 Uhr	20,50°C	20,13°C	20,04°C	16,12°C	17,09°C
16 Uhr	11,60°C	11,78°C	11,98°C	12,46°C	12,37°C
<b>Tagesdurchschnitt</b>	<b>19,36°C</b>	<b>18,98°C</b>	<b>18,93°C</b>	<b>15,30°C</b>	<b>15,96°C</b>

Das Vorhandensein von Sträuchern verringert in Kombination mit Bäumen die Windgeschwindigkeit, und bewirkte einen leichten Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur von 31,9 °C im Szenario mit Bäumen auf 32,4 °C. Das Vorhandensein von Sträuchern allein hatte allerdings keinen signifikanten Einfluss auf die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Vergleich zu den Szenarien ohne Grün und Gras.

### Marstallplatz - Heißer Tag

In Abbildung 62 ist der Einfluss von Bäumen auf die PET-Werte eindeutig zu erkennen. Während die durchschnittliche PET in den Szenarien ohne Bäume extremem Hitzestress anzeigt, ist der Hitzestress

in den Szenarien mit Bäumen und bei Vegetationsmischung gering. Die Oberflächentemperatur ist die Variable, die am stärksten durch das Fehlen von Bäumen beeinflusst wird. Sie schwankt zwischen 29,1°C und 29,3°C in den Szenarien ohne Bäume, Gras und Sträucher. Beim Vergleich der Szenarien mit Bäumen und Gras war ein maximaler Unterschied von etwa 4 °C festzustellen.

Die Auswirkung von Sträuchern auf den PET an heißen Tagen wird nur innerhalb der Vegetation beobachtet, was bedeutet, dass sie keinen Nutzen für den Menschen haben, wie in Abbildung 62 dargestellt. Die Wirkung von Sträuchern ist besonders deutlich um 10, 12 und 16 Uhr, wo der PET im Vergleich zu den umgebenden Gras- und Pflasterflächen abnimmt, während um 14 Uhr die positiven Auswirkungen nicht so deutlich sind.

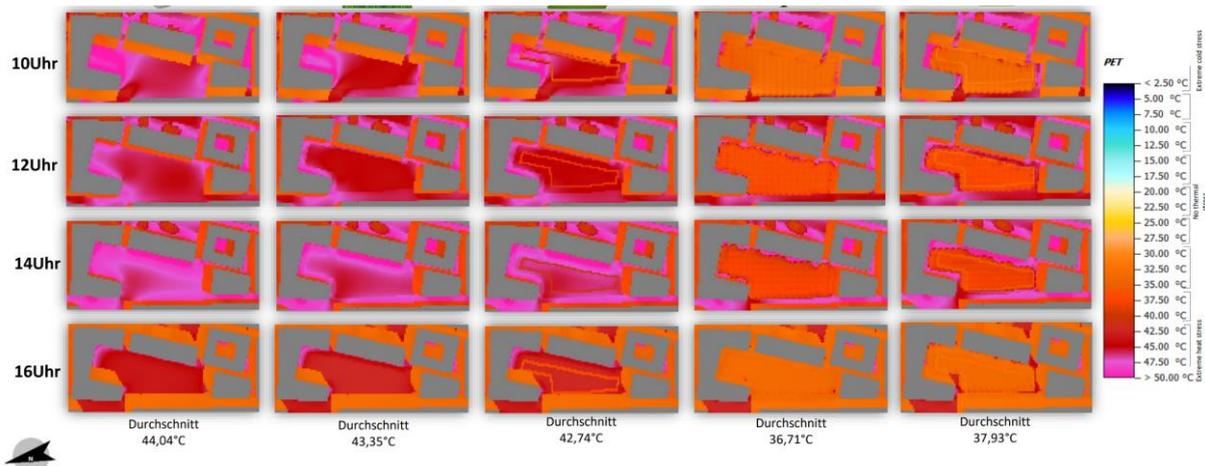


Abbildung 62. PET-Werte am Marstallplatz während des heißen Tages.

Tabelle 15 verdeutlicht die Bedeutung des Baumschattens für die Verringerung der PET an heißen Tagen aufgrund der Evapotranspiration in Kombination mit der Schutzwirkung vor kurzweiliger Strahlung. Es ist auch zu beobachten, dass Sträucher die PET an heißen Tagen aufgrund ihrer windhemmenden Wirkung negativ beeinflussen, insbesondere in Kombination mit Bäumen im Mischszenario, wenn die Stämme der Bäume auch den Windstrom blockieren.

Tabelle 15. Durchschnittlicher PET-Wert des Marstallplatzes an den heißen Tagen.

Durchschnittlicher PET an heißen Tagen (10 bis 16 Uhr)					
heißer Tag	Nicht-grün	Gras	Büsche	Bäume	Mix
10 Uhr	43.93°C	43.15°C	42.32°C	34.75°C	36.28°C
12 Uhr	45.11°C	44.45°C	44.02°C	38.60°C	39.99°C
14 Uhr	46.60°C	46.04°C	45.62°C	39.64°C	41.09°C
16 Uhr	40.54°C	39.76°C	39.02°C	33.86°C	34.38°C
<b>Tagesdurchschnitt</b>	<b>44.04°C</b>	<b>43.35°C</b>	<b>42.74°C</b>	<b>36.71°C</b>	<b>37.93°C</b>

### Marstallplatz - Warmer Tag

Der warme Tag ist ein Münchner Herbsttag, was bedeutet, dass die Bäume noch immer Blätter haben, die Schatten spenden und die PET-Werte beeinflussen. Um 10 Uhr und um 16 Uhr ist jedoch der Schatten der Gebäude der Faktor, der den PET-Wert am stärksten beeinflusst, und die Werte im Vergleich zu den sonnenexponierten Bereichen auf 12 °C senkt, wie in Abbildung 63 zu sehen ist. Dies führt dazu, dass die PET unter dem Schatten der Gebäude um 10 Uhr und um 16 Uhr in allen Szenarien unter leichtem Kältestress steht. Der beobachtete durchschnittliche PET-Wert zeigt jedoch keinen thermischen Stress für Benutzer des Platzes an.

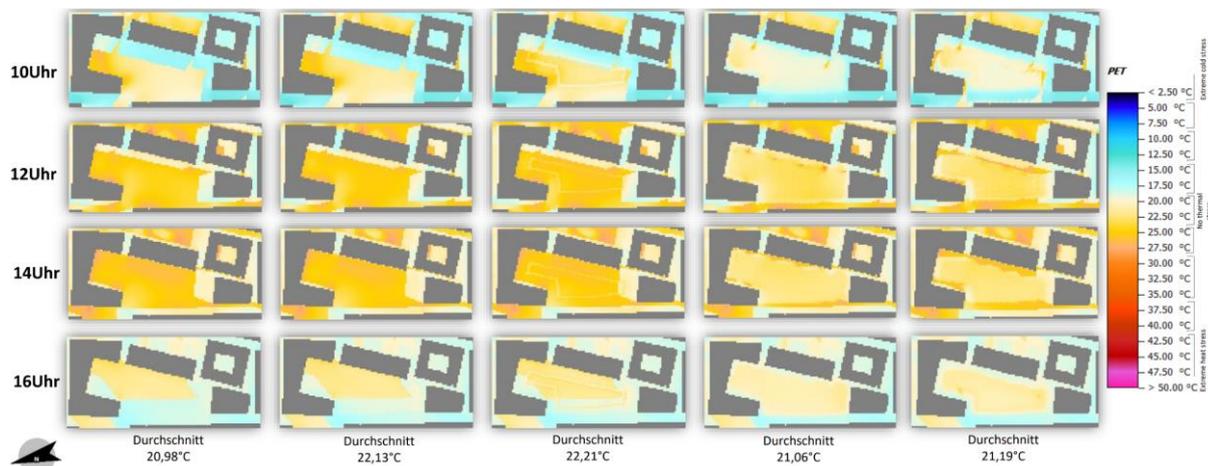


Abbildung 63. PET-Werte am Marstallplatz während des warmen Tages.

Um 14 Uhr ist der Einfluss des Baumschattens auf den PET an diesem warmen Tag am deutlichsten. Zu diesem Zeitpunkt zeigt die durchschnittliche PET der Szenarien ohne Bäume leichte Hitzestress an (Tabelle 16). Im Gegensatz dazu zeigen die Szenarien mit Baum und Mischung keine Situationen mit Hitzestress. In den Szenarien mit Sträuchern kann ein leichter Anstieg des PET beobachtet werden, und zwar in fast allen untersuchten Stunden, was wahrscheinlich auf die windhemmende Wirkung in Verbindung mit der Sonneneinstrahlung zwischen 12 und 14 Uhr zurückzuführen ist. Die Auswirkungen der Kurzwellenstrahlung auf den PET werden auch in den Szenarien ohne Grün und mit Gras beobachtet. Allerdings ist die geringere Albedo von Herbstgras im Vergleich zu Granit wahrscheinlich dafür verantwortlich, dass der höhere PET-Wert länger anhält.

Tabelle 16. Durchschnittlicher PET-Wert des Marstallplatzes an warmen Tagen.

Durchschnittlicher PET an warmen Tagen (10 bis 16 Uhr)					
Warmer Tag	Nicht-grün	Gras	Büsche	Bäume	Mix
10Uhr	19.97°C	20.22°C	20.41°C	18.93°C	19.15°C
12Uhr	23.69°C	23.87°C	23.98°C	22.66°C	22.80°C
14Uhr	20.11°C	24.17°C	24.08°C	22.38°C	22.72°C
16Uhr	20.13°C	20.28°C	20.36°C	20.27°C	20.10°C
<b>Tagesdurchschnitt</b>	<b>20.98°C</b>	<b>22.13°C</b>	<b>22.21°C</b>	<b>21.06°C</b>	<b>21.19°C</b>

### Marstallplatz - Nacht

Die nächtlichen PET-Werte wurden analysiert, um zu verstehen, wie die Vegetation zur Verringerung des städtischen Wärmeinseleffekts beiträgt. Tabelle 17 zeigt die Variation der PET-Werte in allen simulierten Szenarien um 2 Uhr morgens. Der Einfluss des Himmelsichtfaktors auf den PET ist zu erkennen, wobei in fast allen Fällen die Szenarien ohne Bäume und folglich mit einem höheren Himmelsichtfaktor den niedrigsten PET aufweisen. Nur an dem milden Tag war der PET in den Szenarien mit Bäumen niedriger. Die höhere Windgeschwindigkeit und die fehlende Belaubung verursachten den niedrigeren PET unter den Bäumen, trotz der höheren Oberflächentemperatur im Szenario ohne Bäume (7,3 °C) im Vergleich zur Grasfläche der anderen Szenarien (Durchschnittswert 4,2 °C).

Andererseits weisen an den kritischsten Tagen (heiß und warm) die Szenarien ohne Grün, Gras und Sträucher einen niedrigeren PET auf, was zur Verringerung des Wärmeinseleffekts beiträgt. Das Vorhandensein von Laub hingegen erschwert den Wärmeverlust an die Atmosphäre während der Nacht.

Tabelle 17. Durchschnittlicher PET des Marstallplatzes zur Nachtzeit

Durchschnittlicher PET 2 Uhr					
Typischer Tag	Nicht-grün	Gras	Büsche	Bäume	Mix
Milder Tag	3.22°C	3.13°C	3.08°C	2.41°C	2.63°C
Heißer Tag	13.57°C	14.02°C	14.39°C	15.28°C	15.17°C
Warmer Tag	7.55°C	7.80°C	7.95°C	8.49°C	8.32°C

## Fazit

In diesem Abschnitt wurden zwei urbane Plätze in München untersucht, um zu verstehen, wie verschiedene städtische Grünanlagen den menschlichen Wärmekomfort in verschiedenen Jahreszeiten beeinflussen. Sie wurden durch mikrometeorologische Simulationen analysiert, um die Auswirkungen der verschiedenen Variablen, wie z. B. der städtischen Morphologie und der unterschiedlichen Anordnung von Grün auf die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) im Jahresverlauf zu verstehen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass:

- Trotz der Wärmespeicherkapazität von Granitpflaster, die den PET an milden und warmen Tagen erhöhen kann, sind die beobachteten Vorteile von Szenarien ohne Vegetation auf den PET an mittleren und warmen Tagen nicht groß genug, um befestigte Flächen ohne Vegetation auf städtischen Plätzen zu rechtfertigen.
- Sträucher haben in den untersuchten Szenarien bei starkem Windschutz durch die umgebenden Gebäude ebenfalls keinen nennenswerten Einfluss auf die PET. Die Verwendung von Sträuchern auf städtischen Plätzen in München kann aber die Biodiversität erhöhen und weitere Ökosystemleistungen fördern, etwa durch das Abhalten von Luftschadstoffen von benachbarten Straßen.
- Die städtische Morphologie aufgrund des Schattenwurfs der Gebäude und des Windschutzeffekts einen erheblichen Einfluss auf die PET auf den kleinen städtischen Plätzen Münchens hat. Dieser Effekt wurde auch schon in anderen Klimazonen beobachtet (He et al., 2020; Zhang et al., 2022).
- Der Schatten der Bäume und der Evapotranspirationseffekt die größten Einflussfaktoren auf die Reduzierung der PET an heißen Tagen sind. Außerdem ist ihr Einfluss an warmen und mittleren Tagen relativ hoch.
- Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es für den menschlichen Wärmekomfort auf städtischen Plätzen in gemäßigten Klimazonen besser ist, sich auf die Notwendigkeit zur Verminderung von Hitzestress an heißen Tagen zu konzentrieren, die Anzahl der Laubbäume zu erhöhen, die die PET aufgrund der Schatten- und Evapotranspirationswirkung reduzieren, ohne den Strahlungszugang an milden Tagen zu blockieren, und die Fläche der Rasen zu erhöhen, um einen höheren SVF zu bieten und damit den nächtlichen Wärmeinseleffekt zu reduzieren.

## 4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die steigenden Temperaturen und zunehmenden Hitzewellen, die für die Zukunft erwartet werden, stellen eine große Herausforderung für die Städte dar. In diesem Zusammenhang gewinnt die Rolle grüner Infrastruktur – Bäume, Sträucher und Grasflächen - als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel immer mehr an Bedeutung. Das Projekt "Leistungen von Stadtgrün auf öffentlichen Plätzen" untersuchte die Ökosystemleistungen von Bäumen, Sträuchern und Grasflächen auf 25 öffentlichen Plätzen in München. Ziel war, die Bedeutung von grüner Infrastruktur als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel und die thermischen Bedingungen vor allem an heißen Sommertagen zu analysieren.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind vor allem in den dicht bebauten, grau dominierten Innenstädten spürbar. Hier spielen grüne Plätze eine zentrale Rolle als kühle Oasen, die von der Bevölkerung in fußläufiger Entfernung leicht zu erreichen sind. In dieser Studie wurde daher untersucht, welche Ökosystemleistungen, insbesondere Kühlleistungen verschiedene Stadtplätze in München erbringen, welche Zusammenhänge mit der jeweiligen grünen Infrastruktur bestehen, wie sich diese im Klimawandel verändern werden, welche Auswirkungen dies auf den thermischen Komfort des Menschen hat und welche Anpassungsmaßnahmen es gibt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Projekts zusammengefasst. Daraus werden Handlungsempfehlungen für die zukünftige Entwicklung städtischer Räume im Klimawandel abgeleitet.

### 4.1 Der Beitrag der grünen Infrastruktur zu den Ökosystemleistungen von Plätzen

Bäume an öffentlichen Plätzen sind nicht nur ästhetisch ansprechend, sondern erbringen auch eine Vielzahl von Ökosystemleistungen. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von Ökosystemleistungen wie Abkühlung, Speicherung von Kohlenstoff, Verbesserung der Luftqualität, Reduzierung von Lärm und Erhöhung der biologischen Vielfalt (Moser et al., 2018). Dieser Bericht zeigt, dass öffentliche Plätze oft grüne Oasen darstellen, die solche Ökosystemleistungen erbringen und somit von großer Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Stadtbevölkerung sein können (z.B. [Kondo et al., 2018](#)). Die Vegetation, d.h. Bäume, Sträucher und Grasflächen, leistet einen großen Beitrag zur thermischen Regulation von städtischen Plätzen und damit zur Verbesserung des Bioklimas für den Menschen. Insbesondere Bäume sind in der Lage, durch ihre hohen Verdunstungsraten aber auch durch ihre Beschattung, die von der Baumgröße und der Blattdichte der Baumkrone wesentlich beeinflusst wird, signifikante kühlende Effekte zu erzielen (Rahman et al., 2017). Die Kühlleistung an den einzelnen Plätzen hängt dabei stark von der Anzahl der Bäume, den Baumarten und der Altersstruktur der Bäume ab, ebenso wie die anderen untersuchten Ökosystemleistungen Abflussminderung und CO<sub>2</sub>-Speicherung. Ferner spielen das Standortklima eines Platzes sowie die Versiegelung, insbesondere unter den Bäumen eine tragende Rolle für die Höhe der Ökosystemleistungen, die das Grün eines Platzes erbringt (s.a. Rötzer et al., 2020).

In unserer Untersuchung lag die Kühlleistung der Sträucher im Durchschnitt bei 4,6 kWh pro m<sup>2</sup>, während sie bei Bäumen bei 9,4 kWh pro m<sup>2</sup> lag. Pro Individuum fallen Kühlleistung, CO<sub>2</sub>-Speicherung und Abflussminderung von Sträuchern gegenüber Bäumen um das Siebenfache geringer aus. Dies ist auf die geringere Größe und auf die reduzierte Gesamtblattfläche der Sträucher zurückzuführen. Auch die Bestandsbiomassen von Sträuchern an den untersuchten 25 Münchner Plätzen sind mit 0,016 kg/m<sup>2</sup> deutlich geringer als die der Bäume (2,9 kg/m<sup>2</sup>). Allerdings können durch Sträucher aufgrund ihrer geringeren Größe und der dadurch flexibleren Pflanzmöglichkeiten im urbanen Raum zusätzliche Flächen

genutzt werden, die räumliche Strukturvielfalt erhöhen und so die Biodiversität fördern (English et al., 2022; Su et al., 2021). Die Wahl der Straucharten ist bei der Planung und Gestaltung öffentlicher Plätze für eine klimaangepasste Zukunft von großer Bedeutung, da sich die Verdunstungsrate zwischen den verschiedenen Arten deutlich unterscheidet. So war die Verdunstungsrate beim wolligen Schneeball (*Viburnum lantana*) mit einer durchschnittlichen Verdunstungsrate von  $6,9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  um 72% höher als bei der Kornelkirsche (*Cornus mas*) mit  $4,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Bei Sträuchern ist jedoch wie bei Bäumen auf ausreichende Trockenheitsverträglichkeit vor allem an exponierten Standorten zu achten, etwa wenn die unmittelbare Umgebung versiegelt ist. Großsträucher mit schirmförmigem Wuchs wie etwa die Steinweichsel (*Prunus mahaleb*) oder die Kornelkirsche (*Cornus mas*) können zudem durch Verschattung beachtlich zum thermischen Komfort auf Stadtplätzen beitragen (Duthweiler et al., 2017; LWG, 2019).

Grasflächen tragen ebenfalls zur Abkühlung von Plätzen und zur Abflussminderung weniger jedoch zur CO<sub>2</sub>-Speicherung bei. Für München konnten in dieser Studie keine Zahlen zur Kohlenstoffspeicherung von Grasflächen erhoben werden. Die Speicherung in den oberirdischen Pflanzenteilen kann aber als vernachlässigbar gegenüber der Speicherung im Holz der Bäume gelten. Für Berlin wurde geschätzt, dass etwa 95 % des oberirdisch gespeicherten organischen Kohlenstoffs in Bäumen zu finden ist (Richter et al., 2020). Der weitaus größere Teil des organischen Kohlenstoffs befindet sich allerdings im Boden. Die Verdunstung der Grasflächen wird in hohem Maße von der Beschattung durch Bäume und andere Objekte beeinflusst (Rahman et al., 2021). Sie kann jedoch den natürlichen Wasserhaushalt von Plätzen wesentlich fördern. Aufgrund von erhöhter Verdunstung durch mehr und vor allem durch große, ältere Bäume und durch größere Grasflächen, am besten als Retentionsmulden gestaltet, können die Abflussmengen der Plätze deutlich reduziert und die Kühlleistung der Plätze durch Verdunstung gefördert werden.

Die Kühlleistung wie auch die Abflussminderung können durch einen hohen Blattflächenindex (LAI), einen hohen Kronenüberschirmungsgrad und einen geringeren Anteil versiegelter Fläche gefördert werden. Literaturangaben (Rahman et al., 2023) zeigen, dass mit jeder Zunahme des Blattflächenindex um eine Stufe etwa 5% der Niederschlagsmenge mehr durch Interzeption zurückgehalten werden oder im Boden versickern. Das gesamte auf einem Platz vorhandene Grün (Bäume, Sträucher und Grasflächen) sowie seine räumliche Struktur (Anzahl der Bäume, Baumalter, Baum- und Strauch- und Grasverteilung auf einem Platz) spielen daher eine wichtige Rolle für die Kühlwirkung durch das Grün, für die Abflussminderung und für die CO<sub>2</sub>-Speicherung. Die Effekte sind im Sommer am stärksten und nehmen zum Herbst hin ab.

## **4.2 Anpassungsmaßnahmen zum Erhalt und der Förderung der Ökosystemleistungen der grünen Infrastruktur von Plätzen im Klimawandel**

Der Klimawandel stellt das urbane Grün und insbesondere den städtischen Baumbestand vor große Herausforderungen. Klimaszenarien zeigen für das Grün der Münchner Plätze eine in der Regel deutliche Reduzierung der Ökosystemleistungen. Der Erhalt des öffentlichen Grüns, insbesondere des Stadtbaubestandes der Plätze, ist deswegen von außerordentlicher Wichtigkeit für die Klimaanpassung der Stadt. Der Schutz und die Pflege von Stadtbäumen sind wichtige Maßnahmen für eine nachhaltige Stadtentwicklung. Von entscheidender Bedeutung ist, die Standortverhältnisse so zu optimieren, dass eine langfristig gesunde und leistungsfähige grüne Infrastruktur an Bäumen, Sträuchern und Grasflächen erhalten bleibt.

Im Hinblick auf die Zukunft wird die Kühlleistung des Grüns an den Plätzen in München im Vergleich zu heute voraussichtlich deutlich zurückgehen. Grund hierfür ist zum einen, dass aufgrund des geringeren Wasserangebots in den Sommermonaten die Kühlung durch Verdunstung deutlich reduziert wird. Zum anderen kann als Folge von häufigen Trockenheiten und hohen Temperaturen die Blattfläche der Bäume abnehmen, wodurch auch die Kühlung durch Beschattung langfristig reduziert wird. Diese Reaktionen sind jedoch stark von der Baumart und den Standortbedingungen geprägt. Trocken-tolerante Arten wie Robinien oder Platanen zeigen auch in Trockenjahren noch hohe Transpirationssummen und damit hohe Kühlleistungen durch Verdunstung. Neben der Wahl der passenden Baumart kann auch die Optimierung der Standortbedingungen wie eine verbesserte Bodenwasserspeicherkapazität, eine geringe Bodenversiegelung oder durch gezielte Bewässerung dem Rückgang der Kühlleistung in Zukunft entgegengewirkt oder diese sogar erhöht werden.

Dazu beitragen kann auch ein hoher Anteil an Grasflächen, dessen mittlere Kühlleistung sich unter den Klimaszenarien an den Münchner Plätzen nur wenig ändert, da sich im Mittel die Wasserversorgung nicht allzu sehr verändert (der Einfluss von Trockenjahren wurde hier aus modeltechnischen Gründen noch nicht berücksichtigt) und da die Kühlleistung vornehmlich auf der nachts weiterhin starken Ausstrahlung beruht.

Eine hohe Kühlwirkung kann besonders durch die Kombination von Grasflächen und Bäumen erzielt werden. Durch eine größere Anzahl von Bäumen und durch größere Grasflächen auf den Plätzen kann die Verdunstung unter heutigen Bedingungen und unter den Bedingungen der Klimaszenarien – soweit auch die Standortbedingungen angepasst werden - erhöht und damit die Abflussmengen der Plätze deutlich reduziert werden. Auch die CO<sub>2</sub>-Speicherung kann so gesteigert werden.

An öffentlichen Plätzen sollte die Versiegelung unter den Bäumen soweit wie möglich verringert werden, um den Wasserhaushalt der Pflanzen unter künftigen wärmeren und trockenen Klimabedingungen zu verbessern. Auch eine Optimierung der Bodenbedingungen (Erdaustausch, Düngung, Erhöhung der Wasserspeicherkapazität.) kann helfen, die Vitalität und das Wachstum der Bäume, Sträucher und Grasflächen zu erhalten bzw. zu erhöhen und damit auch die Ökosystemleistungen. Eine weitere Steigerung der Ökosystemleistungen ist durch gezielte Bewässerung möglich. Hierfür sind lokale Lösungen des Regenwassermanagements sinnvoll, von der Regenwasserrückhaltung und -speicherung im Boden bis zu Zisternenlösungen.

Um die negativen Folgen des Klimawandels für die Stadtbevölkerung und die Stadtnatur zu minimieren, sollte der Grünanteil der öffentlichen Plätze - soweit möglich - erhöht werden. Alte Bäume, die gegenüber jungen Bäumen weitaus höhere Ökosystemleistungen erbringen (Rötzer et al., 2020), sollten erhalten und deren Standortbedingungen optimiert werden. Bei Neupflanzungen sollte auf möglichst optimale Bodenbedingungen hinsichtlich der Größe der Pflanzgrube, des Bodensubstrats, der Bodenverdichtung und der Versiegelung geachtet werden, wie sie etwa Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL, 2010) und die zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen für Vegetationstragschichten der Landeshauptstadt München definieren (LH München, 2018). Zudem ist die Auswahl standortgerechter Baum- und Straucharten wichtig. Dabei ist sicherzustellen, dass auch unter zukünftigen Klimabedingungen gute Wachstumsbedingungen und damit hohe Ökosystemleistungen bestehen.

### **4.3 Auswirkungen auf den thermischen Komfort des Menschen**

Grünanlagen können den menschlichen Wärmekomfort in verschiedenen Jahreszeiten beeinflussen. Ausgewählte Plätze in München wurden analysiert, um die Auswirkungen von Variablen wie z. B. der

städtischen Morphologie und der unterschiedlichen Anordnung der Grünflächen auf das menschliche thermische Wohlbefinden im Jahresverlauf zu analysieren.

Szenarien ohne Vegetation erhöhen zwar aufgrund der Wärmespeicherkapazität von gepflasterten Flächen den menschlichen Wärmekomfort an kalten und mittleren Tagen leicht, sie führen aber zu teilweise starkem Hitzestress an warmen und heißen Tagen. Demgegenüber sind die Effekte von Beschattung und Verdunstung von Bäumen die entscheidenden Größen für die Reduzierung des Hitzestresses an heißen Tagen. Ihr positiver Einfluss auf den menschlichen thermischen Komfort ist vor allem an warmen Tagen hoch. Der Hitzestress kann für Menschen auf Grasflächen tagsüber an heißen Tagen durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung sehr groß sein. Nachts sind Grasflächen aber besonders wichtig, weil sich die Luft über ihnen stark abkühlen und so zur Verminderung des Wärmeinseleffekts beitragen kann. Sträucher haben in den untersuchten bioklimatischen Szenarien bei starkem Windschutz durch die Gebäude keinen nennenswerten Einfluss auf den menschlichen thermischen Komfort.

Die Simulationen verdeutlichen auch den großen Einfluss der Platzmorphologie auf die Wärmebehaglichkeit der Menschen auf den Plätzen Münchens aufgrund der Schatten- und Windschutzwirkung der Gebäude.

Für den menschlichen thermischen Komfort auf städtischen Plätzen in München mit einem gemäßigten Klima ist es besser, sich auf die Notwendigkeiten an heißen Tagen zu konzentrieren, die Anzahl der (Laub)bäume zu erhöhen, die den Wärmekomfort für den Menschen aufgrund des Schattens und des Verdunstungseffekts reduzieren, ohne den Strahlungszugang an milden Tagen zu blockieren, und die Grasflächen zu vergrößern, um die nächtliche Abkühlung zu verstärken sowie einen naturnahen Wasserhaushalt durch Regenwasserspeicherung und -versickerung in der Stadt zu fördern.

## 5. Handlungsempfehlungen für die klimaangepasste Gestaltung von Stadtplätzen

Aus den Ergebnissen des Projekts können folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um städtische Plätze klimaangepasst zu gestalten:

- 1) Baumart, Baumalter und Baumvitalität bestimmen zusammen mit der Größe von Grasflächen und der Anzahl, Art und Zusammensetzung von Bäumen und Sträuchern die Höhe der Ökosystemleistungen eines Platzes: Auf ihren Erhalt und Förderung, sowie ihre Standorteignung (bei Neu- und Ersatzpflanzungen) sollte geachtet werden.
- 2) Wachstumsraten und Quantität der Ökosystemleistungen werden in hohem Maße von den Standortbedingungen wie Bodenversiegelung, Bodenart oder Strahlungsangebot geprägt: Für eine gesunde und leistungsfähige grüne Infrastruktur (Bäume, Sträucher, Grasflächen) müssen die jeweiligen Standortverhältnisse optimiert werden, etwa durch Flächenentsiegelungen, Verbesserung der Bodenverhältnisse und Regenwassermanagement.
- 3) Alte Bäume sollten möglichst erhalten werden, da sie deutlich höhere Wachstumsraten und Ökosystemleistungen als junge Bäume erbringen. Bei der unvermeidlichen Entfernung alter Bäume sollte nach Möglichkeit nicht im Verhältnis 1:1 sondern, je nach Größe des entfernten Baums, in einem höheren Verhältnis nachgepflanzt werden (3-10:1).
- 4) Die Baum- und Strauchartenwahl für einen Standort sollte so erfolgen, dass Ökosystemleistungen dauerhaft gefördert werden, insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel. Besonders an Standorten mit erschwerten Wuchsbedingungen sind trockenheitsangepasste Baum- und Straucharten zu wählen, wie sie in Versuchen, etwa der Gartenamtsleiterkonferenz im Deutschen Städtetag (GALK) und durch die Bayerische Landesanstalt für Gartenbau und Weinbau (LWG) als Klimabäume erprobt werden.
- 5) In Zukunft werden das Wachstum und die Ökosystemleistungen des städtischen Grüns in mitteleuropäischen Stadtplätzen geringer ausfallen, Extremereignisse wie Trockenjahre könnten weitere Rückgänge verursachen: Negativen Einflüssen des Klimawandels kann durch diese Maßnahmen der Artenauswahl, der Standortverbesserung und durch gezielte Bewässerung entgegengewirkt werden
- 6) Eine Erhöhung des Baum-, Strauch-, und Grasanteils der Plätze sowie eine geringere Versiegelung können die Ökosystemleistungen des Grüns an den Plätzen und somit auch den thermischen Komfort an den Plätzen an Hitzetagen deutlich erhöhen
- 7) Öffentlich zugängliche Plätze spielen als kühlende „Oasen“ eine entscheidende Rolle im Klimawandel, um den Menschen in dicht bebauten Stadtquartieren thermischen Komfort auch während der immer häufigen auftretenden und stärker ausgeprägten Hitzewellen zu ermöglichen. Der thermische Komfort in der kalten Jahreszeit, etwa durch die Schaffung von windgeschützten Aufenthaltsbereichen ist auch zu beachten, spielt aber für die Vermeidung von Gesundheitsrisiken durch thermische Belastungen eine geringe Rolle.
- 8) In den dichter bebauten Stadtquartieren, in denen der Zugang zu privatem und halböffentlichem Grün eingeschränkt ist, sollte ein möglichst dichtes Netzwerk von grünen Plätzen entwickelt und durch baumbestandene Straßen miteinander verbunden werden, um den Zugang zu kühlen „Oasen“ in fußläufiger Entfernung von der Wohnung zu ermöglichen.

- 9) Der Hitzestress wird an heißen Tagen vor allem durch die direkte Sonneneinstrahlung bestimmt. Selbst in kleineren Städten wird es daher zukünftig immer wichtiger werden, verschattete Plätze für den Aufenthalt im Freien an heißen Sommertagen anzubieten.
- 10) Die Handlungsempfehlungen wurden auf der Grundlage von Untersuchungen in der Großstadt München entwickelt. Sie können aber auch für die weiteren bayerischen Großstädte und mittelgroße Städte angewendet werden.

## 6. Fachliche Ergebnisse des Projekts

### 6.1 Tagungsbeiträge und Veröffentlichungen

Das Projekt „Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München“ wurde im Rahmen diverser Veranstaltungen, ebenso wie in Zeitschriften vorgestellt.

#### Tagungsbeiträge

- European Forum on Urban Forestry / EFUF 2022 zum Thema “Green Infrastructure as a tool to achieve seasonal outdoor thermal comfort in Munich urban squares”
- Workshop “Green Squares in Munich” in Kooperation mit Proffesur für Urbane Produktive Ökosysteme im Juli 2022: Vorträge “Ecosystem Services of Urban Green at public squares in Munich” und “Squares as urban oasis. Maintaining the human thermal comfort in current and also future climates”.
- Kongress „Third Sure World Conference 2020/21 - Cities as social ecological systems“ zum Thema “Quantifying thermal comfort on five urban squares in a temperate climate in contrasting climatic conditions”. 7 – 9 Juli 2021.
- Kongress „Constructing Our Future. Planen. Bauen. Leben. Arbeiten“ – Online Kongress des Zukunftsrates der Bayerischen Wirtschaft am 27. Juli 2021. Digitale Ausstellung des Projektes von 13 bis 19 Uhr.
- Ausrichtung und Workshop ZSK-Symposium „Grüne Klimaarchitektur: Bayerische Städte klimaresilient gestalten“. Digitaler Workshop am 22. September 2021. Poster zum Projekt sowie Workshop-Gestaltung.
- FOWITA Konferenz – Digitale Forstwissenschaftliche Tagung vom 13-15 September 2021 der TU München, TU Dresden, Uni Freiburg, Georg-August-Universität Göttingen und der DVFFA (Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten). Vorstellung der Ergebnisse in der Session „Urban Forestry“ zum Thema „Wachstumsreaktionen von Stadtbaumarten auf Trockenheiten in Großstädten“.

#### Publikationen

- **Dervishi, V., Rahman, M. A., Moser-Reischl, A., Stark da Silva, P., Pauleit, S., Pretzsch, H., Rötzer, T. (2023, in prep).** Quantifying the cooling impact of urban trees in Munich’s public squares.
- **Stark da Silva, P. W., Duarte, D., & Pauleit, S. (2023).** The Role of the Design of Public Squares and Vegetation Composition on Human Thermal Comfort in Different Seasons a Quantitative Assessment. *Land*, 12 (2), 427.
- **Rötzer, T. (2021).** Stadtbäume im Klimawandel: Wuchsverhalten, Ökosystemleistungen und Perspektiven. Kommunen klimafit machen: Mikroklima, Hitzestau und Starkniederschläge Anpassungsstrategien für die Praxis einer klimaangepassten Stadtentwicklung. Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg, Band 57. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart; ISBN: 978-3-8047-4071-6.
- **Rahman, M. A., Dervishi, V., Moser-Reischl, A., F. Ludwig, Pretzsch, H., Rötzer, T., Pauleit, S. (2021).** Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. *Urban Forestry and Urban Greening* 10.1016/j.ufug.2021.127223

- **Rötzer, T., Reischl, A., Dervishi, V., Pretzsch, H, Pauleit. S., Stark, P. (2021).** Kühle Bäume - Leistungen von Stadtgrün an öffentlichen Plätzen in München. *Landschaftsarchitekten* 3.
- **Rötzer, T. (2021).** Stadtbäume im Klimawandel - Simulationsstudien zum Wachstum und den Ökosystemleistungen von Bäumen in der Stadt. *Nodium* 13: 78-81.

## 6.2 Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten

Folgende Bachelor und Masterarbeiten bzw. Studienarbeiten, die dem Projekt "Leistungen von Stadtgrün" zugeordnet werden können, wurden bisher begonnen bzw. durchgeführt:

Name	Thema
Vjosa Dervishi (Promotion)	Einfluss der Wasserversorgung auf das Kühlungspotential des Stadtgrüns
Priscila Stark (Promotion)	Squares as urban oases. Maintaining the human thermal comfort in current and also future climates
Patricia Schlote (Projekt)	LAI-Entwicklung verschiedener Baumarten in der Stadt München im Jahresverlauf
Josef Deischl (Master)	Strukturmerkmale von Stadtbäumen auf Basis von terrestrischen Laserscans
Maria Nißl (Projekt)	Wachstum und Ökosystemleistungen von Gras und Sträuchern
Verena Styrnik (Projekt)	Stadtbäume in München. Zuwachs und Regeneration von <i>Acer platanoides</i> , <i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>Platanus acerifolia</i> und <i>Tilia cordata</i>
Viktoria Sonnweber (Bachelor)	Wachstum und Leistungen von Sträuchern an verschiedenen Plätzen in München
Verena Styrnik (Master)	Wachstum und Holzdichte von <i>Tilia cordata</i> in München in Abhängigkeit von Standort und Klima
Wiebke Feldmann (Master)	Seneszenz der Belaubung verschiedener Stadtbaumarten an einem urbanen-ruralen Gradienten
Leila Parhizgar (Master)	Einfluss der Blattfläche verschiedener Baumarten auf den Mikrometeorologie von Plätzen
Sara Rieger (Bachelor)	Simulationsstudie zum Wachstum von Straßenbäumen im Klimawandel
Stefan Geus-Pohl (Bachelor)	Kühlungseffekt durch Transpiration und physiologische Reaktion von Bäumen auf verschiedenen Plätzen in München
Gu Yin (Master)	Wachstumsmerkmale und CO <sub>2</sub> -Speicherung von <i>Betula pendula</i> und <i>Quercus robur</i> in München, und Vergleich zu anderen Baumarten.
Tim Horsch (Bachelor)	Vergleich der Ausgabeergebnisse von WinSCANOPY und Hemisfer für die hemisphärische Bildanalyse von sieben Baumarten
Gerald Eckstein (Master)	Integrating drought reactions into numerical modeling of urban forest ecosystem services. A comparative study of two process-based models

## Glossar

Bezeichnung	Erklärung
<b>Albedo</b>	Anteil der reflektierten kurzwelligen Strahlung
<b>Allometrie</b>	Beziehungen zwischen Größe, Form, Anatomie und Physiologie
<b>Basitionie</b>	Förderung des Wachstums durch Verzweigung vom Boden her. Charakteristische Verzweigung für die Sträucher
<b>Bioklima</b>	Die Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus
<b>Blattflächenindex (LAI)</b>	Blattfläche pro Bodenoberfläche $m^2/m^2$
<b>Brusthöhendurchmesser</b>	Stammdurchmesser gemessen auf Brusthöhe (1,3 m)
<b>C-Fixierung</b>	Kohlenstofffixierung durch Pflanzen
<b>Evaporation</b>	Verdunstung von Wasser von unbewachsenen Oberflächen
<b>Evapotranspiration</b>	Prozess, bei dem Wasser von Oberflächen wie Boden und Pflanzen verdunstet und in die Atmosphäre abgegeben wird, Übergang des Wassers von der flüssigen in die Gasphase
<b>Feldkapazität</b>	Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft halten kann
<b>Freiraumtyp</b>	Nicht durch Gebäude bebaute Flächen, z. B. Park, Platz, Straße
<b>Gasaustausch</b>	Austausch gasförmiger Stoffe zwischen einem Organismus und dem ihn umgebenden Medium
<b>Hemisphärische Bilder</b>	Mit einem Fisheye-Objektiv erzeugte Bilder
<b>Horizontüberhöhung</b>	Die städtische Morphologie ist für die Horizontüberhöhung (Himmelsichtfaktor) verantwortlich, der von der lokalen Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur beeinflusst wird (Chen et al., 2012; Oke, 1982, 1973). Ein begrenzter Himmelsichtfaktor führt zu einer Wärmespeicherung und erhöht den PET, da die langwellige Wiedereinstrahlung in die Atmosphäre erschwert wird.
<b>Hysterese</b>	Verhalten eines Systems, bei dem der Ausgangsparameter nicht allein von den veränderlichen Eingangsparametern abhängt; auch der vorherige Zustand der Ausgangsparameter ist entscheidend
<b>Interzeption</b>	Zurückhalten von Niederschlägen auf der Oberfläche von Pflanzen (Blätter, Äste, etc.)
<b>Kronenanteil</b>	der Anteil der Kronen bezogen auf die Gesamthöhe des Baumes
<b>Kronenablotung</b>	Vermessung der maximalen Ausdehnung der Baumäste in vier oder acht Himmelsrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) durch Projektion des längsten Hauptastes in der jeweiligen Himmelsrichtung nach unten.

<b>Kronenprojektionsfläche (CPA)</b>	Abdeckung einer Fläche durch die Baumkrone, bzw. deren Projektion auf die Erdoberfläche
<b>Kühlungsleistung</b>	Abkühlung der Lufttemperatur durch Blatttranspiration oder Schatten der Bäume
<b>Mesotonie</b>	Förderung und Verzweigung über die Triebe im mittleren Bereich. Charakteristische Verzweigung für die Sträucher.
<b>Ökosystemleistungen</b>	Vorteile bzw. Nutzen eines Ökosystems für den Menschen
<b>Openness</b>	Prozent der Offenheit eines bebauten oder unbebauten Standorts
<b>permanenter Welkepunkt</b>	Austrocknungsgrad des Bodens, unter dem es zur irreversiblen Welke der Pflanze kommt
<b>pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt</b>	Bodenwassergehalt, der von den Pflanzen aufgenommen werden kann
<b>Photosynthese</b>	die Umwandlung der Lichtenergie der Sonne von höheren Pflanzen und photosynthetischen Bakterien in chemisch gebundene Energie
<b>potentielle Evapotranspiration</b>	die unter meteorologischen Gegebenheiten mögliche Verdunstung einer Oberfläche, unabhängig von der zur Verfügung stehenden Wassermenge
<b>Rubisco limitierte Rate der Photosynthese</b>	das Enzym Ribulose-1,5-bisphosphat-carboxylase/-oxygenase (RuBisCO) ist in den Chloroplasten und reguliert die Photosynthese
<b>Sky View Factor</b>	Verhältnis zwischen der Strahlung auf einer ebenen Fläche und der gesamten hemisphärischen strahlenden Umgebung, berechnet als Anteil sichtbaren Himmels vom Boden aus betrachtet, äquivalent zur Openness verwendbar
<b>Standardabweichung</b>	Maß für die Streubreite der Werte eines Merkmals rund um dessen Mittelwert
<b>Strauchfuß</b>	Der Untere Teil des Stammes, der unmittelbar über der Erde liegt.
<b>Strukturdimensionen</b>	Baumparameter wie Höhe, Durchmesser, Kronengröße
<b>tatsächliche Evapotranspiration</b>	Verdunstung einer Oberfläche basierend auf den meteorologischen Bedingungen in Abhängigkeit der Wasserversorgung
<b>Transpiration</b>	Verdunstung von Wasser durch Organismen
<b>Verdunstung</b>	Transpiration von Wasser durch Organismen

## Verwendete Literatur

- 100Places:M, 2020. Abschlussbericht TP4: 100 Places Munich. Untersuchung der Auswirkungen des Wärmeinseleffektes auf den öffentlichen Raum am Beispiel Münchens. Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. Technische Universität München. URL: [https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/TP4/TP4\\_Abschlussbericht\\_FINAL\\_2020\\_barrierearm.pdf](https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/TP4/TP4_Abschlussbericht_FINAL_2020_barrierearm.pdf) (Zugriff am: 7.6.21).
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J.B., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., Elliott, R., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manag.* 81, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- Baek, H.-J., Lee, Johan, Lee, H.-S., Hyun, Y.-K., Cho, C., Kwon, W.-T., Marzin, C., Gan, S.-Y., Kim, M.-J., Choi, D.-H., Lee, Jonghwa, Lee, Jaeho, Boo, K.-O., Kang, H.-S., Byun, Y.-H., 2013. Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 49, 603–618. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0053-7>
- BayernAtlas, 2020. Bayerische Vermessungsverwaltung. BayernAtlas. URL: <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/?topic=ba&lang=de&catalogNodes=11,122&bgLayer=atkis>. (Zugriff am: 2.2.20).
- Birdlife, 2016. Birdlife Schweiz. Bäume und Sträucher im Siedlungsraum. URL: [https://www.birdlife.ch/sites/default/files/documents/Praxishilfe\\_Baeume\\_Staeucher.pdf](https://www.birdlife.ch/sites/default/files/documents/Praxishilfe_Baeume_Staeucher.pdf). (Zugriff am: 4.3.23).
- BMUV, 2021. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Stadtnatur am Haus und im Garten. URL: <https://www.bmuv.de/stadtnatur/stadtnatur-am-haus-und-im-garten> (Zugriff am: 6.2.23).
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 13, 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *Int. J. Climatol.* 32, 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Dervishi, V., 2019. Response of European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) to drought - stomatal conductance, photosynthesis and d-13-C of assimilates and tree rings. Technische Universität München (Masterarbeit).
- Duthweiler, A., Pauleit, S., Rötzer, T., Moser, A., Rahman, M.A., Stratopoulos, L., Zölch, T., 2017. Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Stadtbäumen. *Jahrbuch der Baumpflege*. ISBN 978-3.
- DWA, 2018. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Ermittlung der Verdunstung von Land-und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 1996; 238:1-35. s.142.
- DWD, 2021. Deutscher Wetterdienst (DWD) URL: [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/monthly/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/monthly/)

(Zugriff am: 5.5.22).

- Elraouf, R.A., ELMokadem, A., Megahed, N., Eleinen, O.A., Eltarabily, S., 2022. Evaluating urban outdoor thermal comfort: a validation of ENVI-met simulation through field measurement. *J. Build. Perform. Simul.* 15, 268–286. <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2046165>
- English, J., Barry, K.E., Wood, E.M., Wright, A.J., 2022. The effect of urban environments on the diversity of plants in unmanaged grasslands in Los Angeles, United States. *Front. Ecol. Evol.* 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.921472>
- FLL, 2010. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate.
- Gusson, C.S., Duarte, D.H.S., 2016. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Eng.* 169, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.001>
- Haxeltine, A., Prentice, I.C., 1996. A general model for the light-use efficiency of primary production. *Functional Ecology.* Oct 1:551-61.
- He, B.-J., Ding, L., Prasad, D., 2020. Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustain. Cities Soc.* 60, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
- Johns, T.C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J., Cusack, S., Ingram, W.J., Crucifix, M., Sexton, D.M.H., Joshi, M.M., Dong, B.-W., Spencer, H., Hill, R.S.R., Gregory, J.M., Keen, A.B., Pardaens, A.K., Lowe, J.A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., Searl, Y., 2006. The New Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of Coupled Simulations. *J. Clim.* 19, 1327–1353. <https://doi.org/10.1175/JCLI3712.1>
- Kondo, M., Fluehr, J., McKeon, T., Branas, C., 2018. Urban Green Space and Its Impact on Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 445. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030445>
- LH München, 2018. Landeshauptstadt München - Baureferat. Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. ZTV-Vegetationstragschichten. URL: [https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:deb40776-3ab9-4754-acfb-53ba817e441f/ZTV-Vegtra-Mue-2018\\_Download\\_5\\_2022.pdf](https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:deb40776-3ab9-4754-acfb-53ba817e441f/ZTV-Vegtra-Mue-2018_Download_5_2022.pdf) (Zugriff am: 7.7.23).
- LH München, 2014. Landeshauptstadt München. Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München. Referat für Gesundheit und Umwelt München. 66 Seiten.
- LWG, 2019. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG). Bäume und Sträucher für Bienen und Insekten. Eine Empfehlungsliste der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) Veitshöchheim in Zusammenarbeit mit der bayerischen Baumschulwirtsch URL: [https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenbau/dateien/bf\\_gesamt\\_bienengehoelze\\_in.pdf](https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenbau/dateien/bf_gesamt_bienengehoelze_in.pdf) (Zugriff am: 7.7.23).
- Matzarakis, A., Mayer, H., 1996. Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO newsletter* 18. January 1996: 7-10.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H., 2018. Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 188 (5/6): 94-111. <https://doi.org/10.23765/afjz0002006>.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H., 2015. Structure and ecosystem services of small-leaved lime

- (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban For. Urban Green*. 14, 1110–1121. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2015.10.005>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- NABU, 2022. Naturschutzbund Hamburg (NABU). Geeignete Wildsträucher für Ihren Garten. URL: <https://hamburg.nabu.de/tiere-und-pflanzen/garten/gartentipps/05228.html> (Zugriff am: 6.7.23).
- NABU, 2021. Naturschutzbund Leipzig (NABU). Bäume und Sträucher in der Stadt. URL: <https://www.nabu-leipzig.de/ratgeber/baumschutz/> (Zugriff am: 5.5.23).
- Nishina, K., Ito, A., Beerling, D.J., Cadule, P., Ciais, P., Clark, D.B., Falloon, P., Friend, A.D., Kahana, R., Kato, E., Keribin, R., Lucht, W., Lomas, M., Rademacher, T.T., Pavlick, R., Schaphoff, S., Vuichard, N., Warszawski, L., Yokohata, T., 2014. Quantifying uncertainties in soil carbon responses to changes in global mean temperature and precipitation. *Earth Syst. Dyn.* 5, 197–209. <https://doi.org/10.5194/esd-5-197-2014>
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- PIK, 2017. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). ISIMIP2a Simulation Protocol. URL: <https://isimip.org/protocol/#isimip2a>. (Zugriff am: 2.7.22).
- Pohv, B., 2011. *Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler*. 1. Auflage. Springer Berlin Heidelberg.
- Pretzsch, H., 2019. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58155-1>
- Pretzsch, H., Dieler, J., T. Seifert, T. Rötzer, 2012. Climate effects on productivity and resource-use efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in stands with different spatial mixing patterns. 2012 Aug; 26:1343-60. *Trees*.
- Rahman, M.A., Dervishi, V., Moser-Reischl, A., Ludwig, F., Pretzsch, H., Rötzer, T., Pauleit, S., 2021. Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. *Urban For. Urban Green*. 63, 127223. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127223>
- Rahman, M.A., Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., 2017. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Build. Environ.* 114, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.013>
- Rahman, M.A., Pawijit, Y., Xu, C., Moser-Reischl, A., Pretzsch, H., Rötzer, T., Pauleit, S., 2023. A comparative analysis of urban forests for storm-water management. *Sci. Rep.* 13, 1451. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28629-6>
- Richter, S., Haase, D., Thestorf, K., Makki, M., 2020. Carbon Pools of Berlin, Germany: Organic Carbon in Soils and Aboveground in Trees. *Urban For. Urban Green*. 54, 126777. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126777>
- Rötzer, T., 1996. *Neuartige Karten der Phänologie und des Wasserhaushalts von Bayern unter Berücksichtigung möglicher künftiger Klimaverhältnisse*. Dissertation an der TU München, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau. Dissertation an der TU München, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau.

- Rötzer, T., Dittmar, C., Elling, W., 2004. A model for site specific estimation of the actual soil water content and the evapotranspiration in forest ecosystems. *Journal of Environmental Hydrology* 12/7: 1-14.
- Rötzer, T., Rahman, M.A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., Pretzsch, H., 2019. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Sci. Total Environ.* 676, 651–664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>
- Rötzer, T., Reischl, A., Rahman, M.A., Pretzsch, H., Pauleit, S., 2020. Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume – Wachstum, Umweltleistungen und Klimawandel. Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. URL: [https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaeden/leitfaden\\_stadtbaeume\\_in\\_bayern\\_einzelseiten\\_web.pdf](https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaeden/leitfaden_stadtbaeume_in_bayern_einzelseiten_web.pdf) (Zugriff am: 7.7.23).
- Shinzato, P., Simon, H., Silva Duarte, D.H., Bruse, M., 2019. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4 – Sao Paulo case study. *Archit. Sci. Rev.* 62, 112–125. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1563522>
- Sonnweber, V., 2021. Bestimmung der Biomasse von Sträuchern in Städten. DVFFA: MWW - BA 281. Technische Universität München (Bachelorarbeit).
- Stark da Silva, P., Duarte, D., 2018. Green walls simulation for subtropical climates: Sensitivity tests with ENVI-met V4. *Proc. Smart Heal. within two-degree limit.*
- Su, Y., Gong, C., Cui, B., Guo, P., Ouyang, Z., Wang, X., 2021. Spatial Heterogeneity of Plant Diversity within and between Neighborhoods and Its Implications for a Plant Diversity Survey in Urban Areas. *Forests* 12, 416. <https://doi.org/10.3390/f12040416>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change* 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- von Caemmerer, S., Farquhar, G.D., 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153, 376–387. <https://doi.org/10.1007/BF00384257>
- Weller, M., 2021. Tree Inventory Data of Central European Cities—Studies on the Composition and Structure of Urban Tree Populations and Derivation of Ecosystem Services. Technische Universität München (Masterarbeit).
- WUA, 2008. Wiener Umweltschutz (WUA). Handbuch Stadtnatur - Arbeitsanleitung. URL: [https://wua-wien.at/images/stories/naturschutz\\_stadtoekologie/handbuch/gehoeelpflanzungen.pdf](https://wua-wien.at/images/stories/naturschutz_stadtoekologie/handbuch/gehoeelpflanzungen.pdf) (Zugriff am: 6.7.23).
- Zhang, J., Li, Z., Hu, D., 2022. Effects of urban morphology on thermal comfort at the micro-scale. *Sustain. Cities Soc.* 86, 104150. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104150>