Universität Zürich[UZH]

Abschlussarbeit

zur Erlangung des

Master of Advanced Studies in Real Estate

Quantitative Bewertung der Vorpflanzung von Hochstammbäumen: Vergleich von CO_2-Sequestrierung und kapitalisierten Gesamtkosten am Beispiel der Gebietsentwicklung Bahnhof Brugg/Windisch

Verfasser: Yannick Schibli

Eingereicht bei: Dr. Christian Tschumi

Abgabedatum: 01.09.2026

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis IV

Abbildungsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis VI

Executive Summary VII

1. Einleitung 1

1.1 Ausgangslage und Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage 1

1.3 Methodisches Vorgehen 2

1.4 Abgrenzung der Arbeit 3

2. Theoretische Grundlagen 4

2.1 Gebietsentwicklung und planerischer Kontext 4

2.1.1 Ausgangslage, Entwicklungsziele und Planungsperimeter 4

2.1.2 Testplanung als planerisches Verfahren 5

2.1.3 Testplanungsbeitrag als Arbeitsgrundlage 6

2.2 Klimaneutralität in der Gebietsentwicklung 7

2.3 Stadtbäume 9

2.3.1 Bedeutung von Stadtbäumen im urbanen Raum 9

2.3.2 Funktionen und Leistungen von Stadtbäumen 11

2.3.3 Herausforderungen urbaner Standorte 12

2.3.4 Anforderungen an zukünftige Stadtbäume 12

2.4 CO_2-Sequestrierung und Biomasseentwicklung 14

2.4.1 Grundlagen und Begriffe 14

2.4.2 Wachstum und Speicherleistung 15

2.4.3 Methodische Herausforderungen 16

2.5 Baumschulpraxis und Baumproduktion 17

2.5.1 Qualitätsdefinitionen und Sortierung 17

2.5.2 Produktionsverfahren und Flächenbedarf 19

2.6 Ökonomische Grundlagen und Kostenstrukturen 20
2.7 i-Tree 21
2.8 Treibhausgasemissionen von Gebäuden 22
2.9 CO_2-Lenkungsabgabe in der Schweiz 25
3. Modellbasierte Untersuchung der Vorpflanzungsstrategie 27
3.1 Auswahl Baumarten 27
3.2 Produktionsphasen und Ausfallraten 30
3.3 Übertragung der Grundlagen auf das Untersuchungsgebiet 32
3.4 Modellaufbau 35
3.5 Ergebnisse 41
4. Schlussbesprechung 47
4.1 Fazit 47
4.2 Diskussion 48
4.3 Ausblick 51
5. Literaturverzeichnis 53
6. Ehrenwörtliche Erklärung 59
7. Anhang 60

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2-eq	CO_2-Äquivalente
DCF	Discounted Cashflow
EBF	Energiebezugsfläche (A_e)
f.	forma (botanische Rangstufe unterhalb der Art)
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
GALK	Gartenamtsleiterkonferenz (Ständige Konferenz der Gartenamtsleiter beim Deutschen Städtetag)
GSBBW	Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg-Windisch
KLAM	KlimaArtenMatrix
KlG	Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit vom 30.9.2022, SR 730.1
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
MuKEn	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
PET	Physiologisch äquivalente Temperatur
PV	Present Value (Barwert)
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN EN	Schweizer Norm, übernommene Europäische Norm
SNKW	Salewski Nater Kretz Wagner (Testplanungsteam)
SR	Systematische Rechtssammlung des Bundesrechts
STU	Stammumfang
xv.	x-mal verpflanzt (Verschulungszählung der Baumschulpraxis)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtungs- und Bearbeitungsperimeter der Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg-Windisch (Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch, 2026) 4
Abbildung 2: Situationsplan mit Grundstruktur und Landschaftsarchitektur (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 14) 6
Abbildung 3: Intensive Bepflanzung mit Hochstammbäumen, Schnitt aus dem Testplanungsbeitrag (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 17) 7
Abbildung 4: Die 3-30-300-Regel im Überblick (Konijnendijk, 2023, S. 825) 10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Handelsübliche Sortierung von Alleebäumen nach Stammumfang in Zentimetern, gemessen 1 m ab Boden oder Wurzelwerk (JardinSuisse, 2025, S. 13) ... 18
Tabelle 2: Nicht abschliessender Vergleich von Grenz- und Richtwerten für die grauen Treibhausgasemissionen von Neubauten in kg CO_2-eq/m² EBF und Jahr (Schweizerischer Bundesrat, 2025, S. 6) ... 24
Tabelle 3: Absenkpfad der Richtwerte Erstellung für die Zielwerte A und B am Beispiel Wohnen (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 30) ... 24
Tabelle 4: Prioritätsgruppe A nach Rang 1 bis 15. Vollständige Bewertungsmatrix in Anhang 3 (Filippa & Heine, 2026; *GALK Strassenbaumliste*, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026; Gloor et al., 2021; Roloff et al., 2013) ... 29
Tabelle 5: Wachstum und Ausfallraten je Produktionsphase – Verschulungsschritte, Zeitdauer und Stammumfang vom Saatbeet bis zur Qualitätsstufe 35/40 ... 31
Tabelle 6: Grundlagen der Modellierung für das Untersuchungsgebiet ... 34
Tabelle 7: Vorpflanzungs- und Entwicklungsphase der Hochstammbäume mittels Anbauvertrag ... 35
Tabelle 8: Zeitliche Staffelung der Etappen ... 37
Tabelle 9: Auszug aus der Grössentabelle am Beispiel Quercus cerris. (Baumschule Lappen, 2015; Bruns Pflanzen Export GmbH & Co. KG, 2025) ... 37
Tabelle 10: Was die Vorpflanzung in zwölf Jahren aufbaut (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung) ... 39
Tabelle 11: Mehrwert der Betrachtung über 60 Jahre mit und ohne Vorpflanzung (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung) ... 40
Tabelle 12: Herkunft des Mehrwerts (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung) ... 40
Tabelle 13: CO_2-Bindung der Beschaffungsstrategien im Verhältnis zu den massgebenden Erstellungsemissionen (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung) ... 42
Tabelle 14: DCF Modellannahmen ... 43
Tabelle 15: DCF-Ergebnisse im Basisfall ... 43
Tabelle 16: DCF-Paarvergleiche (Basisfall) ... 43
Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse, Szenario 1: Jungbaum 12/14 ohne Vorpflanzung ... 44
Tabelle 18: Sensitivitätsanalyse, Szenario 2: Schattenbaum Brutto mit Vorpflanzung (ohne Anbauvertrag) ... 44
Tabelle 19: Sensitivitätsanalyse, Szenario 3: Schattenbaum Netto mit Vorpflanzung (Anbauvertrag, 70 % des Bruttopreises) ... 45

Executive Summary

Klimaneutral bauen gelingt nicht ohne Kompensation. Selbst mit optimierten Bauweisen lassen sich die Erstellungsemissionen einer Gebietsentwicklung nicht vollständig vermeiden. Die vorliegende Arbeit untersucht eine Strategie, die den langen Entwicklungszeitraum nicht als Wartezeit, sondern als Vorpflanzungszeitraum für Hochstammbäume nutzt. Am Beispiel der Gebietsentwicklung Bahnhof Brugg/Windisch wird sie einer konventionellen Baumbeschaffung gegenübergestellt.

Die Arbeit stützt sich auf Literatur und acht Experteninterviews. Darauf aufbauend wird die CO_2-Sequestrierung mit i-Tree Eco modelliert. Der ökonomische Vergleich erfolgt über eine Investitionsrechnung, die drei Beschaffungsszenarien im Barwert gegenüberstellt. Zwei Sensitivitätsanalysen zu Diskontsatz und Lenkungsabgabe prüfen deren Robustheit. Die zentralen Erkenntnisse umfassen folgende Ergebnisse.

1. Ökologie: Die Vorpflanzung steigert die Sequestrierungsleistung des Baumbestandes um 628 Tonnen CO_2 oder 38.6 Prozent, wovon 87 Prozent erst nach dem Versetzen aus dem Grössenvorsprung entstehen. Gemessen an den Erstellungsemissionen entspricht diese Mehrbindung 1.32 Prozent, ein messbarer, jedoch nicht massgebender Anteil.

2. Ökonomie: Über die Kosten der Vorpflanzung entscheidet die Beschaffungsform. Der Anbauvertrag senkt die Beschaffungskosten um rund 30 Prozent und überträgt das Kulturrisiko der Aufzucht auf die Baumschule. Gegenüber der Jungbaumbeschaffung verbleiben barwertige Mehrkosten von 1'642 Franken je Baum oder rund 5.60 Franken je Quadratmeter Energiebezugsfläche, was im Verhältnis zum Investitionsvolumen nicht ins Gewicht fällt.

3. Robustheit: Weder die Variation des Diskontsatzes noch eine Verfünffachung der CO_2-Lenkungsabgabe verändern die Rangfolge der Strategien.

4. Der eigentliche Nutzen: Die Strategie rechtfertigt sich über das Endprodukt. Etablierte Bäume wirken ab Nutzungsbeginn statt erst nach Jahren des Anwachsens. Indikator dieses Vorsprungs ist die Blattfläche, die von 1'410 auf 5'870 Quadratmeter zunimmt.

Ob solche Kompensationsmassnahmen künftig auch klimapolitisch honoriert werden, hängt von der offenen Anrechnung von Negativemissionen ab. Übertragbar ist die Strategie auf grosse Arealentwicklungen mit langem Planungsvorlauf und langfristiger Eigentümerschaft. Weiterführend zu erforschen wäre der Einfluss dichter Begrünung auf die Wertentwicklung von Immobilien.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der Stadtraum rund um den Bahnhof Brugg-Windisch stellt einen zentral gelegenen Entwicklungsbereich mit hoher verkehrlicher Bedeutung dar. Die südlich der Bahnanlagen gelegenen Flächen zählen zu den letzten grossflächigen, bahnhofsnahen Transformationsgebieten im Kanton Aargau. In diesem Raum treffen unterschiedliche Akteure mit eigenen Nutzungsinteressen aufeinander, namentlich der Kanton Aargau, die Stadt Brugg, die Gemeinde Windisch, die Schweizerische Bundesbahn (SBB) sowie das Unternehmen BRUGG Real Estate, deren Grundstücke einer abgestimmten Weiterentwicklung bedürfen. Die Projektpartner haben sich dazu in einer Absichtserklärung auf eine gemeinsame Gebietsentwicklung verständigt. (Kanton Aargau et al., 2020, S. 1) Ausgangslage, Planungsperimeter und Verfahren werden in Kapitel 2.1 vertieft.

Die Planungsvereinbarung hält sieben Entwicklungsziele fest, von denen für die vorliegende Arbeit eines massgebend ist: Die Gebietsentwicklung ist klimaneutral, gestützt auf das Pariser Abkommen, auszurichten (Planpartner, 2025, S. 10; swr+, 2021, S. 10–11). Zur Konkretisierung der Entwicklung wurde in der Zwischenzeit eine Testplanung durchgeführt.

Die Testplanung zeigt jedoch auch die Grenzen dieses Anspruchs auf. Die klimaneutrale Entwicklung wird von übergeordneten Faktoren wie grauer Energie, Energieversorgung und Mobilität beeinflusst, weshalb sie selbst bei optimierten Bauweisen innerhalb des Perimeters nur eingeschränkt erreichbar erscheint. Nach Einschätzung des Beurteilungsgremiums sind hierfür zusätzliche Kompensationsmassnahmen erforderlich (Planpartner, 2025, S. 119). Damit stellt sich die Frage, wie das Entwicklungsziel im weiteren Planungsverlauf verfolgt werden soll und welche Massnahmen innerhalb des Gebietes einen quantifizierbaren Beitrag zu leisten vermögen. Diese Problemstellung bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ausgehend von der dargestellten Problemstellung adressiert die vorliegende Arbeit eine Forschungslücke im Spannungsfeld zwischen ökologischer Wirkung und wirtschaftlicher Tragfähigkeit. Die ökologischen Leistungen urbaner Bäume und deren Kohlenstoffdioxid (CO_2) - Sequestrierung sind bislang nur lückenhaft erforscht, da bestehende Wachstums- und Biomassemodelle überwiegend auf Waldbäumen beruhen und sich nur eingeschränkt

auf Stadtbäume übertragen lassen. Vollständig fehlt darüber hinaus eine integrierte quantitative Betrachtung, welche ökologische und ökonomische Aspekte unterschiedlicher Beschaffungsstrategien systematisch gegenüberstellt.

Die Arbeit zielt darauf ab, einen klar abgegrenzten und quantifizierbaren Beitrag zur klimaneutralen Entwicklung von Arealentwicklungen zu untersuchen, nicht deren gesamtheitliche Erreichung. Den Ansatzpunkt bilden die langen Realisierungszeiträume grossflächiger Arealentwicklungen: Sie eröffnen zeitliche Spielräume, die für eine vorgelagerte Aufzucht der Bäume und damit für eine frühzeitige CO_2-Sequestrierung genutzt werden können. Untersucht wird deshalb die Vorpflanzung von Hochstammbäumen als alternative Strategie zur konventionellen Beschaffung zum Realisierungszeitpunkt. Verglichen werden die kumulierte CO_2-Sequestrierung sowie die kapitalisierten Gesamtkosten beider Strategien, verstanden als sämtliche der Beschaffung direkt zurechenbaren Zahlungen über den Realisierungszeitraum.

Daraus leitet sich die folgende Forschungsfrage ab: Wie unterscheiden sich Vorpflanzung und konventionelle Beschaffung von Hochstammbäumen hinsichtlich kumulierter CO_2-Sequestrierung und kapitalisierter Gesamtkosten über den Realisierungszeitraum einer Arealentwicklung am Beispiel der Gebietsentwicklung Stadtraum Brugg/Windisch?

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Untersuchung folgt einem quantitativen, szenariobasierten Forschungsdesign und verbindet einen theoretischen mit einem empirischen Teil.

Der theoretische Teil erarbeitet die Grundlagen entlang der relevanten Themenfelder, vom planerischen Kontext der Gebietsentwicklung über die Klimaneutralität, die Leistungen und Anforderungen von Stadtbäumen, die CO_2-Sequestrierung und die Baumschulpraxis bis zu den Treibhausgasemissionen von Gebäuden und der CO_2-Lenkungsabgabe. Er stützt sich auf wissenschaftliche Literatur, Normen und Richtlinien sowie auf die Planungsdokumente der Gebietsentwicklung.

Der empirische Teil überführt diese Grundlagen in die Vorpflanzungsstrategie für das Fallbeispiel. Produktionsphasen, Kostenparameter und praktische Machbarkeit werden durch acht leitfadengestützte Experteninterviews mit Fachpersonen aus Baumschulwesen, Landschaftsarchitektur und öffentlicher Grünraumverwaltung erhoben und plausibilisiert (vgl. Anhang 1 und 2). Die Baumartenauswahl erfolgt über eine kriteriengestützte Bewertungsmatrix, auf deren Grundlage die CO_2-Sequestrierung mit i-Tree Eco modelliert wird. Für den ökonomischen Vergleich werden drei Beschaffungsszenarien gebildet

und deren Zahlungsströme mittels Discounted-Cashflow-Methode kapitalisiert, wobei die Sequestrierungsleistung über den Satz der CO_2-Lenkungsabgabe monetarisiert wird. Zwei Sensitivitätsanalysen zum Diskontsatz und zur Höhe der Lenkungsabgabe sichern die Robustheit der Ergebnisse.

Die Arbeit gliedert sich entsprechend diesem Vorgehen: Kapitel 2 legt die theoretischen Grundlagen dar, Kapitel 3 entwickelt darauf aufbauend die Vorpflanzungsstrategie mit Modellierung, Kapitalisierung und Ergebnissen für das Fallbeispiel. Kapitel 4 fasst die Erkenntnisse im Fazit zusammen, diskutiert deren Aussagekraft und methodische Grenzen und schliesst mit einem Ausblick.

1.4 Abgrenzung der Arbeit

Die Untersuchung erfasst die CO_2-Sequestrierung in zwei Betrachtungshorizonten, einerseits über die zwölfjährige Vorpflanzung, andererseits über die anschliessende Referenz-Nutzungsdauer von sechzig Jahren. In die Barwertrechnung einbezogen und über die Lenkungsabgabe monetarisiert wird demgegenüber allein die während der Vorpflanzung aufgebaute Sequestrierungsleistung, da nur sie der Beschaffungsstrategie zeitlich zurechenbar ist. Auf der Kostenseite beschränkt sich die Arbeit auf die der Beschaffung direkt zurechenbaren Komponenten. Nicht Bestandteil der Analyse sind vollständige Lebenszyklusbetrachtungen von Bauprojekten sowie Biodiversitätsleistungen. Mikroklimatische Effekte werden nicht quantifiziert. Die Blattfläche wird als Indikator ausgewiesen, ohne dass daraus eine Kühl- oder Beschattungsleistung abgeleitet wird.

Die Ergebnisse gelten für grossflächige Arealentwicklungen mit einer Projektlaufzeit von mindestens zehn Jahren und einem grossen Bedarf von Hochstammbäumen. Als Fallbeispiel dient die Testplanung Brugg/Windisch.

Die Arbeit versteht sich als quantitative Einordnung der Grössenordnung und nicht als präzise Kostenkalkulation. Sie verbindet fundierte Datengrundlagen aus Literatur, Normen und Experteninterviews mit begründeten Annäherungen und Annahmen, die im empirischen Teil jeweils transparent ausgewiesen werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Gebietsentwicklung und planerischer Kontext

2.1.1 Ausgangslage, Entwicklungsziele und Planungsperimeter

Mit 34.3 ha Fläche erstreckt sich der Betrachtungsperimeter über den Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch. Das Grundeigentum verteilt sich überwiegend auf sechs Trägerschaften, nämlich die beiden Standortgemeinden Brugg und Windisch, den Kanton Aargau, die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), die SBB sowie die BRUGG Real Estate (swr+, 2021, S. 9).

Enger gefasst ist der Bearbeitungsperimeter. Er reicht vom Bahnhof Süd über die beidseits der Gleise anschliessenden Bahnhofsflächen und den Campusplatz bis zu den umliegenden Strassenräumen und den heute noch industriell genutzten Flächen (Planpartner, 2024, S. 23–24). Abbildung 1 zeigt beide Perimeter.

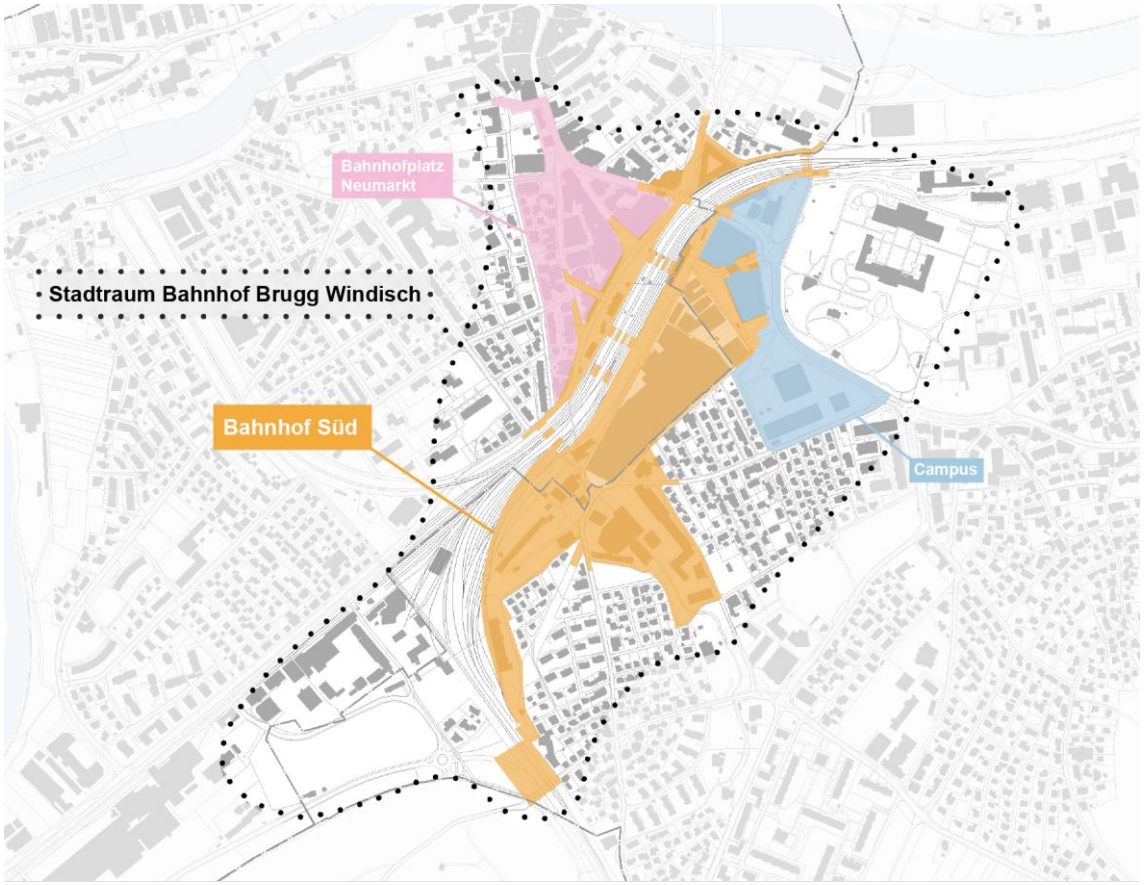


Abbildung 1: Betrachtungs- und Bearbeitungsperimeter der Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg-Windisch (Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch, 2026)

Das Schwergewicht der baulichen Veränderung liegt südlich der Gleisanlagen (gelb markiert). Dort liegt eines der wenigen verbliebenen, flächenmässig bedeutenden

Transformationsgebiete in Bahnhofsnähe im Kanton Aargau, dessen heute industriell dominierte Prägung über einen mittleren bis langen Zeithorizont einem neuen Quartier weichen wird (swr+, 2021, S. 5). Sowohl die BRUGG Real Estate als auch die SBB Immobilien haben für ihre Grundstücke entsprechende Absichten angemeldet (swr+, 2021, S. 15).

Auftrag der Testplanung war es, Vorschläge dafür zu entwickeln, wie sich das Gebiet baulich und freiräumlich etappenweise wandeln lässt und wie seine verkehrliche Erschliessung und Nutzung auszugestalten sind. Das daraus abzuleitende Entwicklungskonzept sollte sich verbindlich zu vier Themen äussern, nämlich zur Bebauung und zum Freiraum, zur Ausgestaltung der Verkehrs- und Aufenthaltsflächen im öffentlichen Raum, zu Erschliessung und Mobilität sowie zur Verteilung der Nutzungen (Planpartner, 2024, S. 10, 24). Übergeordnet steht dabei die im Kapitel 2.2 näher betrachtete Vorgabe, die Siedlungsentwicklung nachhaltig und klimaneutral anzulegen (Planpartner, 2024, S. 5).

Ein besonderes Gewicht erhalten dabei die Frei-, Grün- und Aussenräume. Sie sollen nicht nachträglich ergänzt, sondern von Beginn als tragender Bestandteil des Konzepts mitentworfen werden, wobei sowohl konzeptionelle Lösungen als auch strategisch-typologische Überlegungen erwartet wurden und dem prozesshaften Charakter der Entwicklung eine Schlüsselrolle zukommt. Weil die Umsetzung schrittweise erfolgt, sind auch die Übergangszustände des Freiraumkonzepts durchgehend auf hohem Niveau zu halten, weshalb temporären Gestaltungen erhebliche Bedeutung zugemessen wird (Planpartner, 2024, S. 30, 49–50). Der Synthesebericht verlangt in der Folge, die Freiräume dicht zu begrünen und dabei namentlich einen Baumbestand aufzubauen, der alt werden kann (tbf Partner, 2026, S. 10).

2.1.2 Testplanung als planerisches Verfahren

Bei einer Testplanung handelt es sich um ein auf den Prozess ausgerichtetes Verfahren, das für planerisch besonders anspruchsvolle Aufgaben eingesetzt wird und Lösungen im Austausch aller Beteiligten entstehen lässt. Sie zählt zu den Studienaufträgen, sieht jedoch keinen wesentlichen Folgeauftrag vor, weshalb am Ende kein Siegerprojekt bestimmt wird (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018, S. 4). Was aus ihr hervorgeht, sind einerseits die Entwürfe der Bearbeitungsteams, andererseits das im Austausch gewonnene Wissen, festgehalten als räumliche Strategien und als Hinweise darauf, wie weiter vorzugehen ist. Üblicherweise bilden diese Resultate die Basis für die anschliessenden Planungsschritte und deren Instrumente (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018, S. 4). Zum Abschluss hält das Beurteilungsgremium in einem

Bericht fest, welche Schlüsse sich für die Aufgabenstellung ziehen lassen und welches Vorgehen es empfiehlt (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018, S. 14). Fasst dieser Bericht die Erkenntnisse der einzelnen Beiträge zusammen, trägt er auch die Bezeichnung Synthesebericht (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018, S. 15).

2.1.3 Testplanungsbeitrag als Arbeitsgrundlage

Weil das Verfahren ohne Siegerprojekt endet, muss für die weitere Bearbeitung eine Auswahl getroffen werden. Die vorliegende Arbeit stützt sich auf den Beitrag jenes Teams, das sich aus Salewski Nater Kretz, BÖE, TEAMverkehr, Cabane Partner und Michael Wagner zusammensetzt. Der landschaftsarchitektonische Teil stammt vom Studio BÖE. Grundstruktur und Landschaftsarchitektur werden im Situationsplan gemäss der Abbildung 2 zusammengeführt, der als Ausgangspunkt dient, um Zahl und Verteilung der Bäume im Entwicklungsgebiet zu bestimmen (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 14).



Abbildung 2: Situationsplan mit Grundstruktur und Landschaftsarchitektur (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 14)

Der in der Abbildung 3 dargestellte Schnitt durch den Aussenraum des Hallenareals veranschaulicht die Rolle der Bäume im Strassenraum (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 17).



Abbildung 3: Intensive Bepflanzung mit Hochstammbäumen, Schnitt aus dem Testplanungsbeitrag (*GSBBW - SNKW, Schlussworkshop*, 2026, S. 17)

2.2 Klimaneutralität in der Gebietsentwicklung

Für das Gebiet Bahnhof Süd hält die Testplanung als Entwicklungsziel fest, dass die Gebietsentwicklung klimaneutral erfolgen muss und sich dabei am Pariser Abkommen zu orientieren hat (Planpartner, 2024, S. 9). Inhaltlich zielt die Vision auf einen umgebauten Stadtteil mit attraktiver Nutzungsmischung und hoher Aufenthaltsqualität. Der Bahnhof bildet dabei den Kern eines belebten städtischen Umfelds, das räumlich mit den angrenzenden Quartieren verzahnt ist (Planpartner, 2024, S. 61).

Dem Begriff der Klimaneutralität liegt die Vorstellung eines ausgeglichenen Treibhausgashaushalts zugrunde. Eine Stabilisierung der globalen Temperatur setzt voraus, dass der Nettoausstoss an Treibhausgasen möglichst rasch auf null sinkt. Was weiterhin emittiert wird, muss über natürliche und technische Senken vollständig wieder gebunden werden, sodass rechnerisch kein Überschuss verbleibt. Erst wenn die vom Menschen verursachten Emissionen in diesem Sinn vollständig ausgeglichen sind, gilt das System als klimaneutral, womit sich die weltweite Erwärmung auf dem damalig erreichten Niveau einpendelt (Calvin et al., 2023, S. 61, 81, 85).

Im Gebäudebereich lässt sich jedoch die Klimaneutralität nicht mehr allein über einen effizienten Betrieb erreichen, sondern verlangt den Blick auf den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Während die Optimierung des Betriebs technisch weitgehend geklärt ist, liegt die eigentliche Schwierigkeit heute bei den grauen Emissionen aus Erstellung, Unterhalt und Rückbau der Gebäude. An Gewicht gewinnen deshalb Ansätze, die auf das

Vorhandene setzen, also Umbau, Umnutzung, Weiterbau und eine längere Nutzungsdauer bestehender Gebäude. Neu gebaut werden soll nur dort, wo sich die Bausubstanz nicht sinnvoll weiterverwenden lässt, zumal bei aktuellen Projekten die Erstellung häufig mehr Emissionen verursacht als die spätere Nutzung. Eine klimaneutrale Stadt- und Gebäudeentwicklung setzt darum einen sparsamen Materialeinsatz und eine konsequente Ausrichtung auf das Bestehende voraus (*GSBBW - SNKW, Workshop 1*, 2024, S. 34–36).

Aus dem Entwicklungsziel der Klimaneutralität leitete die Testplanung ihre Leitfrage ab: Auf welchen Wegen lassen sich eine emissionsarme Entwicklung und ein weitgehend klimaneutraler Betrieb über die Planungsstufen hinweg im Sinne des Pariser Abkommens dauerhaft verwirklichen (Planpartner, 2024, S. 61). Konkretisiert wurde dies durch die Vorgabe, auf jeder Planungsstufe Aussagen zu vier Themenkreisen zu machen: graue Energie, Stadtklima, Begrünung und Baumstandorte sowie induzierte Mobilität (Planpartner, 2024, S. 23). Baumstandorte werden damit von der Testplanung selbst als Handlungsfeld der Klimazielerreichung benannt.

Der Themenkreis Stadtklima reicht über die Verminderung von Emissionen hinaus, denn er betrifft die Anpassung an den bereits eingetretenen Klimawandel. Versiegelte, dicht bebaute Stadtgebiete erwärmen sich am Tag stärker als das Umland und kühlen nachts weniger ab. Dieser Effekt wird als Urban-Heat-Island bezeichnet. In den Innenstädten der Schweiz liegt die mittlere Lufttemperatur ein bis drei Grad Celsius höher als ausserhalb. In Zürich kann die Differenz in wolkenlosen, windstillen Sommernächten über zehn Grad Celsius erreichen. Sichtbar wird die Erwärmung an der wachsenden Zahl von Hitzetagen mit mindestens dreissig Grad Celsius und von Tropennächten, in denen die Temperatur nicht unter zwanzig Grad Celsius fällt. Für die Kernstadt Zürich rechnen die Klimaszenarien für die Periode 2021 bis 2040 mit 44 Hitzetagen und 50 Tropennächten, also einer Verdoppelung, während für die stärker durchgrünten Aussenquartiere unter zwanzig Hitzetage und rund zehn Tropennächte erwartet werden (Gloor et al., 2021, S. 13).

Zurückzuführen ist dies auf ein Stadtklima, das massgeblich von der Abwärme der Bauten geprägt wird. Mit zunehmender Bebauung wächst die Oberfläche, die tagsüber Strahlung aufnimmt. Nachts verringert die Gegenstrahlung der in der Luft enthaltenen Gase und Staubpartikel die Wärmeabgabe, weshalb die Tiefsttemperaturen über jenen des Umlands liegen. Hinzu kommt ein ungünstiges Niederschlagsregime: Sommerregen fällt vermehrt in kurzen, heftigen Ereignissen, viel Wasser fliesst oberflächlich ab und weniger gelangt in den Boden. Der künftig noch grösseren Bedeutung städtischer Bäume steht damit ein wachsendes Risiko durch Hitze und Trockenheit gegenüber (Roloff et al., 2013,

S. 169). Unklar ist deshalb, wie Bäume in Parks und Strassenräumen, deren Standorte schon heute teilweise an der Belastungsgrenze liegen, auf eine weitere Verschärfung dieser Bedingungen reagieren (Roloff et al., 2013, S. 168).

Das Beurteilungsgremium der Testplanung kommt zum Schluss, dass sich Klimaneutralität auch mit den fortschrittlichsten Bauweisen nicht allein über das Bauen selbst erreichen lässt, sondern ergänzend eine Kompensation voraussetzt (Planpartner, 2025, S. 119). Welche Rolle Stadtbäume dabei einnehmen können und wie sie selbst mit den sich verschärfenden Standortbedingungen zurechtkommen, wird nachfolgend erörtert.

2.3 Stadtbäume

2.3.1 Bedeutung von Stadtbäumen im urbanen Raum

Bei der Gestaltung städtischer Freiräume hat sich der Massstab verschoben, wurden früher Ästhetik und Funktion priorisiert, richtet sich die Aufmerksamkeit heute auf klimatische, soziale und ökologische Anliegen. Die Bevölkerung verlangt zunehmend nach Erholungsflächen, Parks, Stadtbäumen und siedlungsnahen Wäldern. Besonders die Ökosystemleistungen des Stadtgrüns, etwa das Filtern der Luft oder die Abkühlung über Schatten und Verdunstung, erfahren gesellschaftlich wachsende Wertschätzung. Urban Forestry bündelt diese Ansprüche als fachübergreifendes Handlungsfeld und befasst sich mit dem Zusammenleben der Menschen mit städtischen Ökosystemen, von Einzelbäumen über siedlungsnahe Wälder, Parks und Grünflächen bis zur Stadtlandschaft insgesamt. Angestrebt wird eine ökologisch dauerhaft tragfähige Bewirtschaftung, welche die Wechselbeziehungen zu Boden, Landschaft, Ressourcen und Lebewesen mitdenkt (Bühler & Saluz, 2024, S. 258). Wegen ihrer vielfältigen Ökosystemleistungen gelten Urban Forests zugleich als tragende Bausteine der Stadtentwicklung. Sie machen Städte widerstandsfähiger, stützen deren nachhaltige Entwicklung, geben Antworten auf Krisen wie das Schwinden der Artenvielfalt und die Klimaerwärmung und sind damit Teil der Baukultur (Wilkes-Allemann et al., 2024, S. 84).

Diesem Bedeutungsgewinn steht die bauliche Wirklichkeit entgegen. Wo die Planung vor allem auf Verdichtung und eine rege Bautätigkeit ausgerichtet ist, geraten Bäume erheblich unter Druck (Gloor et al., 2021, S. 6). Die Stadtreparatur als schonende Erneuerung, die vorhandene Qualitäten aufnimmt, statt sie zu ersetzen, eröffnet demgegenüber die Möglichkeit, versiegelte und dicht überbaute Zonen in durchgrünte Quartiere mit hochwertigen Aussenräumen umzuwandeln. Gefordert wird deshalb, dass Stadtbäume und die blau-grüne Infrastruktur, deren Teil sie sind, bei der Interessenabwägung im Bauwesen

sowohl auf strategischer als auch auf operativer Ebene stärker ins Gewicht fallen. Damit verbunden ist eine ganzheitliche und dauerhaft angelegte Bewirtschaftung, welche die Vegetation und städtische Umbauprozesse über die gesamte Lebensdauer betrachtet und die Bedürfnisse der Bevölkerung miteinbezieht (Bühler & Saluz, 2024, S. 260–261).

Die Abbildung 4 veranschaulicht die vorgeschlagene 3-30-300-Regel als evidenzbasierte Leitlinie für grünere, robustere und gesündere Städte, Ortschaften und Quartiere. Der erste Wert verlangt, dass von zu Hause, von der Schule oder vom Arbeitsplatz aus mindestens drei Bäume sichtbar sind, die idealerweise bereits gut eingewachsen sind. Dabei zeigte sich, dass wenige grosse Bäume der psychischen Gesundheit mehr nützen als viele kleine. Die Zahl drei ist wissenschaftlich nicht belegt, sondern wurde gewählt, weil sich die Regel so leichter merken lässt. Der zweite Wert setzt eine Kronenbedeckung von 30 % als Untergrenze fest, und zwar bewusst je Stadtteil und nicht für die Stadt als Ganzes. Eingeschlossen sind auch sämtliche neuen Wohnsiedlungen, bei denen sich Bäume von Beginn weg einplanen lassen. Der dritte Wert fordert, dass eine grössere öffentliche Grünfläche höchstens 300 m und damit rund fünf Gehminuten vom Wohnort entfernt liegt (Konijnendijk, 2023, S. 825–827).



Abbildung 4: Die 3-30-300-Regel im Überblick (Konijnendijk, 2023, S. 825)

Über die klimatischen und planerischen Aspekte hinaus erfüllen Stadtbäume soziale, gestalterische und ökonomische Funktionen. Baumreihen und Alleen entlang von Strassen und Wegen helfen seit Jahrhunderten bei der Orientierung und führen den Blick. Auf Plätzen gliedern Bäume den Raum, setzen Akzente und lassen ihn stärker als Raum spürbar werden. Die Landschaftsarchitektur nutzt sie, um Blicke zu lenken, Gebäude hervorzuheben oder Szenen einzurahmen (Roloff et al., 2013, S. 20–21). Dass Bäume altern, wird meist positiv wahrgenommen, und sie vermitteln ein Empfinden von Ruhe und Frieden, das der Entspannung dient und die Stimmung hebt (Roloff et al., 2013, S. 19). Gesellschaftlich fördern Bäume die Gesundheit und stärken die Identität einer Region, weil

begrünte Quartiere bei der Bevölkerung beliebter sind. Zusätzlich verknüpfen städtische Wälder und Parks kulturelle Vorgänge mit sozialen Netzwerken (Roloff et al., 2013, S. 24).

2.3.2 Funktionen und Leistungen von Stadtbäumen

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.2 beschriebenen Erwärmung gewinnen Bäume als Beitrag zum lokalen Klimaschutz stark an Gewicht, weil Schatten und die über die Transpiration erhöhten Luftfeuchtigkeit mit jeder weiteren Erwärmung wichtiger werden. Stadtbäume puffern klimatische Extreme ab und sorgen im Hochsommer für Abkühlung und beschattete Bereiche. Anders als beim Vergleich zwischen Stadt und Umland zeigen Messungen hier die Unterschiede innerhalb der Stadt, zwischen Parkanlagen und überbauten oder versiegelten Flächen liegen bis zu rund 5 °C. Weil unter Bäumen zugleich die Luftfeuchtigkeit höher ist, fällt der empfundene Unterschied, ausgedrückt als physiologisch äquivalente Temperatur (PET), meist deutlich stärker aus und erreicht mitunter mehr als 10 °C. Bei den Oberflächentemperaturen liegen zwischen Asphalt und baumbestandenem Grün sogar bis zu 15 °C. Ausschlaggebend für die Wirkung sind Umfang und Dichte des Laubes, steigt der Blattflächenindex (LAI) um eine Einheit, sinkt die Oberflächentemperatur von Boden und Belag an einem heissen Sommertag um rund 1 °C. Ein einzelner Baum leistet dabei weit weniger als eine Gruppe oder ein ganzer Bestand (Roloff et al., 2013, S. 21). Damit ist die klimatische Leistung eines Baumes unmittelbar an seinen Entwicklungsstand gebunden.

Begrünte Flächen und offene, nicht versiegelte Böden wirken den städtischen Wärmeinseln entgegen. Besonders grosskronige Bäume beeinflussen als raumbildendes Element das Klima von Strassen und Plätzen günstig. Bepflanzte Bereiche heizen sich langsamer auf, und das verdunstende Wasser kühlt die Luft ab. Solche Räume tragen die Artenvielfalt, reinigen die Luft, geben kühlere Luft an angrenzende Gebiete ab und lassen Niederschlag versickern, was das Grundwasser speist (Gloor et al., 2021, S. 14).

Auch beim Schutz vor Immissionen kommt Stadtbäumen eine grosse Rolle zu, weil sie die Belastung durch Ozon, Stickoxide, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid verringern. Deshalb werden Parks als die grüne Lunge einer Stadt bezeichnet (Roloff et al., 2013, S. 15). In dicht besiedelten Gebieten helfen Bäume ausserdem, das Trinkwasser zu schützen, Niederschlag zurückzuhalten und Hochwasser vorzubeugen (Roloff et al., 2013, S. 23). In der Klimadebatte schliesslich kommt ihnen zusätzliches Gewicht zu, weil sie CO_2 binden. Diese Bindung dient im kleinen Massstab der Kohlenstoffbilanz einer Parzelle oder

Stadt und fliesst weltweit in Szenarien zur künftigen Erwärmung ein (Roloff et al., 2013, S. 22). Die entsprechenden Grundlagen werden in Kapitel 2.4 vertieft.

2.3.3 Herausforderungen urbaner Standorte

Bäume in der Stadt sind einer Reihe besonderer Belastungen ausgesetzt und wachsen unter Verhältnissen, die in aller Regel weit rauer sind als jene im Wald. Wie stark die Belastung ausfällt, hängt erheblich vom einzelnen Standort ab. Ordnet man die Standorttypen nach ihrer Naturnähe, reicht die Spanne vom Stadtwald über Parks und Grünflächen, Wohngärten, Plätze und Fussverkehrszonen sowie den Strassenraum bis zu Dachflächen und Gebäudeinnenräumen. Aus den Bedingungen, die Roloff dafür aufführt, sind für die vorliegende Arbeit vor allem der verdichtete und versiegelte Boden, der knapp bemessene Wurzelraum, das geringe Nährstoffangebot, die erhöhte Temperatur und der Trockenstress massgebend (Roloff et al., 2013, S. 26–27).

Welche Anforderungen und Auswahlkriterien daraus folgen, fällt je nach Lage unterschiedlich aus. Wo der Verkehr dicht rollt, grossflächig versiegelt wurde und der Boden verdichtet ist, kommen nur wenige besonders zähe und widerstandsfähige Arten in Frage. Ein grosser Teil der heimischen Arten scheidet somit aus. Solche Verhältnisse herrschen allerdings nicht im ganzen Siedlungsgebiet. Auch innerhalb der Stadt finden sich taugliche Plätze für Bäume, etwa in Park- und Friedhofanlagen, im Grün von Wohnsiedlungen, auf Schularealen, in Gärten oder entlang wenig befahrener Quartierstrassen (Gloor et al., 2021, S. 6).

2.3.4 Anforderungen an zukünftige Stadtbäume

Aus den geschilderten Standortbedingungen erwächst eine kaum mehr überblickbare Menge denkbarer Kriterien für die Wahl einer Baumart. Roloff fasst sie in sechs Gruppen: ästhetische Kriterien, gestalterische Aspekte, positive Wirkungen, mögliche Belästigungen, Ansprüche der jeweiligen Art und deren Toleranz zusammen. Weil sich nie alle Faktoren gleichzeitig erfüllen lassen, muss in jeder Situation neu priorisiert werden (Roloff et al., 2013, S. 27–29).

Mit dem Klimawandel und dem knappen Wasser im städtischen Umfeld wird die Trockenheitstoleranz zukünftig zum ausschlaggebenden Merkmal für das Fortbestehen einer Art. Junge Gehölze verfügen über eine gewisse Anpassungsfähigkeit gegenüber Wassermangel und Wärme. Nach einer ausgeprägten Trockenphase kann ihr Stoffwechsel wieder anlaufen, und sie verändern Grösse und Form der Blätter oder verschieben das Verhältnis von Trieb- zu Wurzelwachstum, um Wasser zu sparen (Bachmann, 2019, S. 7).

Trotz insgesamt abnehmender Frosttage drohen zu Frühlingsbeginn Schäden durch Spätfrost, weil die längere Vegetationszeit und das vorzeitige Ende der Winterruhe die Frosthärte mindern (Gu et al., 2008, S. 258–260). Bereits eine einzige Spätfrostnacht mit Temperaturen wenig unter 0 °C kann die Vegetation schwer schädigen (Körner et al., 2016, S. 1077–1079).

Für Verwendungsfragen hilft zudem die Unterscheidung zwischen Pionier- und Klimaxbaumarten. Pionierarten besiedeln offene Flächen, brauchen viel Licht und sind robust gegenüber Frost, Hitze sowie Wasser- und Nährstoffmangel. Das starke Wachstum zeichnet sich vor allem in der Jugend aus und lässt rasch nach. Insgesamt werden die Bäume kaum älter als hundert Jahre. Klimaxarten ertragen Schatten vor allem in den jungen Jahren gut, reagieren im Gegensatz zu den Pionierarten empfindlich auf klimatische Extreme und Störungen. Das Wachstum ist mässig dafür bis ins hohe Alter gleichbleibend. Auch werden diese Arten mit dreihundert Jahren und mehr deutlich älter. Da sich nie alle Eigenschaften zugleich berücksichtigen lassen, stellt Roloff für städtische Standorte eine Rangordnung auf. Ganz vorn steht die Stresstoleranz gegenüber Schatten, Hitze, Frost, Dürre und Salz, gefolgt vom Tempo des Jugendwachstums, der Lebensdauer und der Wurzelbrut. Dazu fallen Blühreife, Samenmerkmale, das Spross-Wurzel-Verhältnis und die Wurzeltiefe weniger ins Gewicht (Roloff et al., 2013, S. 35–37).

Zu den Anforderungen zählt schliesslich auch die Zeitdimension. Ältere Bäume bieten im Normalfall mehr Lebensraum für andere Arten und erbringen höhere Ökosystemleistungen. Bei Bauvorhaben entstehen Konflikte, und meist treten deutlich jüngere Exemplare an die Stelle der alten (Casanelles et al., 2021, S. 12). Empfohlen wird deshalb, alte Bäume durch Pflege möglichst lange zu bewahren und Pflanzungen so zu planen, dass Ersatz rechtzeitig heranwächst (Gloor & Göldi Hofbauer, 2018, S. 36–40).

Ob eine Pflanzung gelingt, hängt schliesslich massgeblich von den Bedingungen vor und nach dem Setzen ab, wobei das Risiko mit Alter und Grösse des Baumes wächst. Bei zahlreichen Arten und in vielen Lagen bleibt es vergleichsweise klein, solange die Pflanzhöhe zwei bis drei Meter nicht übersteigt und sorgfältig gepflanzt sowie gut gepflegt wird. Jenseits von fünf Meter treten dagegen häufig Probleme beim Anwachsen bis hin zu Rücksterbe-Erscheinungen auf. Eine intensivere Pflege, insbesondere die Bewässerung, mildert diese Risiken, hebt den Befund aber nicht auf (Roloff et al., 2013, S. 33–34). Ebenso entscheidend ist das Wetter der ersten fünf Jahre nach dem Setzen: Strenge Winterkälte oder ein dürrer Sommer können den Baum in dieser Phase eingehen lassen, während günstige Bedingungen Anwachsen und Anpassung dauerhaft erleichtern (Roloff et

al., 2013, S. 35). Nach fünf bis zehn Jahren haben die kleinen gesetzten Bäume die grösser gepflanzten im Wuchs vielfach eingeholt und sich zugleich nachhaltiger auf die örtlichen Verhältnisse eingestellt. Roloff hält deshalb ein Umdenken gegenüber dem verbreiteten Trend zu Grossbaumpflanzungen für angebracht (Roloff et al., 2013, S. 44). Damit rückt der Zeitpunkt der Pflanzung und die initiale Grösse des Baumes ins Zentrum. Welche CO_2-Menge mit der weiteren Entwicklung verbunden ist, wird im nachfolgenden Kapitel dargelegt.

2.4 CO_2-Sequestrierung und Biomasseentwicklung

2.4.1 Grundlagen und Begriffe

Bäume fungieren als Senke für CO_2, indem sie über die Photosynthese CO_2 aus der Luft aufnehmen und daraus die Kohlenhydrate, die sie für ihre Lebensvorgänge brauchen, erzeugen. Sauerstoff fällt als Nebenprodukt an und gelangt zurück in die Atmosphäre (Bachelet et al., 2003, S. 4–7). Von einer Senke spricht man allgemein dann, wenn ein Ökosystem CO_2 aufnimmt und im Gegensatz dazu von einer Quelle, wenn ein Ökosystem jenes an die Atmosphäre abgibt. Wie viel Kohlenstoff in einem Ökosystem vorrätig ist, hängt auch davon ab, was der Mensch damit macht, wie zum Beispiel aufforsten, roden oder Wald und Land bewirtschaften. Übersteigt die Aufnahme die Abgabe und bleibt der Kohlenstoff dauerhaft in der Biomasse, sinkt der CO_2 Anteil in der Atmosphäre (Fischlin et al., 2006, S. 5, 13). Wie lange der Kohlenstoff gebunden bleibt, richtet sich nach dem Baumteil. Während es im Laub nur Stunden bis Monate und in Ästen und Zweigen Jahre gebunden wird, kann der Stamm den Kohlenstoff Jahrzehnte bis Jahrhunderte und der Boden sogar bis tausende Jahre binden. (Fischlin et al., 2006, S. 14). Zu berücksichtigen ist ferner, dass Pflanzen atmen und einen erheblichen Teil des aufgenommenen Kohlenstoffs wieder als CO_2 abgeben, ebenso wird frei, was in abgestorbener Biomasse gebunden war.

Begrifflich sind zwei Unterscheidungen zentral. Erstens hält sich die fehlerhafte Vorstellung, es werde CO_2 eingelagert. Tatsächlich nutzen Bäume beim Aufbau ihrer Biomasse allein den Kohlenstoff und lassen den Sauerstoff wieder frei, weshalb sich die Klimawirkung zutreffend als Bindung von Kohlenstoff beschreiben lässt (Klein & Schulz, 2023, S. 1). Zweitens ist die Sequestrierung von der Speicherung zu trennen. Die Sequestrierung umfasst als Vorgang des Eintrags die gesamte Kette von der Aufnahme des CO_2 aus der Luft bis zu dessen Festlegung als Kohlenstoff in der lebenden Biomasse ober- und unterhalb des Bodens (Schweizerischer Bundesrat, 2023, S. 6). Die Speicherung bezeichnet dagegen allein die Menge, die zu einem gegebenen Zeitpunkt gebunden ist, ohne dass der

Atmosphäre dadurch zwingend netto CO_2 entzogen worden wäre (Schweizerischer Bundesrat, 2023, S. 6). Für die vorliegende Arbeit sind beide Grössen bedeutsam, jedoch in unterschiedlicher Rolle. Den Vergleich der Beschaffungsstrategien und die Monetarisierung bestimmt die Sequestrierung als der über die Zeit aufgebaute Zuwachs. Die Speicherung wird als Bestandesgrösse ausgewiesen und dient der Einordnung, namentlich zur Beschreibung des Grössenvorsprungs, den ein vorgepflanzter Baum im Zeitpunkt der Umpflanzung mitbringt.

Für die Quantifizierung sind zwei Umrechnungsschritte erforderlich. Im ersten Schritt wird der Kohlenstoffgehalt aus der Trockenmasse abgeleitet, wobei angenommen wird, dass Biomasse zur Hälfte aus Kohlenstoff besteht (Zell, 2008, S. 51). Im zweiten Schritt wird dieser Gehalt mit 3.67 multipliziert, um von Kohlenstoff auf CO_2 zu schliessen (Klein & Schulz, 2023, S. 1). Die Ergebnisse werden anschliessend in CO_2-Einheiten ausgewiesen, da im Regelfall die dem Luftraum entzogene CO_2-Menge die interessierende Grösse darstellt (Klein & Schulz, 2023, S. 1).

Dass dem Pflanzen von Bäumen auch politisch eine Sequestrierungswirkung zugeschrieben wird, zeigt der Bericht des Bundesrats zur Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Für Siedlungsböden nennt er neben begrünten Dächern, angepasster Grünflächenpflege und dem Ausbringen von Pflanzenkohle ausdrücklich das Pflanzen von Bäumen als Massnahme (Schweizerischer Bundesrat, 2023, S. 20).

2.4.2 Wachstum und Speicherleistung

Die Speicherleistung eines Baumes hängt unmittelbar von seiner Dimension ab. Ein kräftiges, gesundes Exemplar mit mehr als 77 cm Brusthöhendurchmesser bindet pro Jahr rund das Neunzigfache dessen, was ein gesunder Baum von unter 8 cm Durchmesser aufnimmt. Über die Lebenszeit fällt der Unterschied noch weit grösser aus. Im Bestand hält ein grosser Baum etwa tausendmal so viel Kohlenstoff fest wie ein kleiner. Die beiden Werte beziehen sich damit auf unterschiedliche Grössen, nämlich die jährliche Sequestrierung und die über die Lebenszeit aufgebaute Speicherung. Grosse und zugleich langlebige Bäume tragen zudem in der Gesamtbilanz am stärksten zur Entlastung bei, weil die fossilen Emissionen aus dem Setzen und Entfernen von Bäumen seltener anfallen (Nowak & Crane, 2002, S. 384–385). Für die kumulierte Sequestrierung ist damit nicht allein die Anzahl gepflanzter Bäume massgebend, sondern ebenso der Zeitpunkt, zu dem ein Baum eine bestimmte Dimension erreicht.

Bei grösseren Exemplaren entfällt der überwiegende Teil der oberirdischen Biomasse auf das Derbholz, also die Holzmasse von Stamm und Ästen ab sieben Zentimetern Durchmesser. Zwei Bäume mit gleichem Brusthöhendurchmesser und gleicher Höhe können in ihrer Biomasse dennoch deutlich voneinander abweichen. Worauf diese Streuung zurückgeht, ob auf den Schaft und dessen Form, auf die Länge der Krone oder auf innere Merkmale wie Dichte des Holzes und Alter, lässt sich erst anhand breit angelegter empirischer Biomasseerhebungen klären (Zell, 2008, S. 18).

Zu berücksichtigen ist schliesslich, dass die forstlichen Kennwerte am Waldbaum gewonnen wurden. Frei stehende Bäume in Parks und Gärten bilden häufig kräftigere Kronen und Wurzeln aus und erreichen deshalb in der Regel eine höhere Speicherleistung als ihre Artgenossen im Wald (Klein & Schulz, 2023, S. 2).

2.4.3 Methodische Herausforderungen

Zwischen Bäumen in der Stadt und im Wald bestehen erhebliche Unterschiede, vor allem beim verfügbaren Wuchsraum. Im städtischen Kontext zählen zudem in erster Linie Erscheinungsbild und Klimawirkung, während ein Forstbestand primär der Holzversorgung dient. Weil die Stadtbaumforschung noch jung ist, sind allometrische Wachstumsbeziehungen nur für wenige Arten dokumentiert. Aussagen zur Leistungsfähigkeit beruhen deshalb häufig auf groben Schätzwerten. Für Modellrechnungen greift man deshalb vielfach auf Erkenntnisse aus dem Wald zurück, was wegen der abweichenden Lebensbedingungen und Wuchsformen zu ungenauen Angaben über die Baumdimensionen führt (Moser et al., 2017, S. 95–96). Erschwerend besteht mittlerweile eine grosse Zahl von Rechenmodellen nebeneinander, die für Laien schwer zu überblicken und kaum praktisch nutzbar sind (Klein & Schulz, 2023, S. 1).

Die Biomasse wird überdies in aller Regel nicht direkt bestimmt, denn dafür müsste der Baum gefällt werden. Stattdessen leitet man sie aus gemessenen Hilfsgrössen ab. Den theoretischen Rahmen liefert die Allometrie, welche die Beziehung zwischen der durchschnittlichen Biomasse eines Baumes und seinem Brusthöhendurchmesser als Funktion abbildet (Zell, 2008, S. 17). Die gewonnenen Schätzwerte beruhen allerdings auf einer schmalen Datenbasis, und ihre Unsicherheit nimmt zu, je kleinräumiger sie aufgeschlüsselt werden (Nowak & Crane, 2002, S. 388).

Für den Schweizer Siedlungsraum liefert das Projekt «Urban Green and Climate» einen einschlägigen Befund. In Bern wurden 21 Bäume oberirdisch gewogen und die Ergebnisse mit mehreren bestehenden Biomassefunktionen abgeglichen. Die herkömmlichen

forstlichen Funktionen, die allein den Brusthöhendurchmesser voraussetzen, geben die oberirdische Biomasse freistehender Bäume nur unzureichend wieder. Brauchbare Werte lieferte dagegen eine Funktion, die auch die Höhe des Baumes berücksichtigt (Gardi et al., 2016, S. 90, 93).

Über solche Einzelgleichungen hinaus stehen Programme wie i-Tree zur Verfügung. Sie rechnen ausgehend von vermessenen Flächen auf den Kohlenstoffvorrat der städtischen Vegetation hoch und stützen sich dabei auf Daten aus dem Baumkataster (Moser et al., 2017, S. 98–99). Für die vorliegende Arbeit wird auf i-Tree zurückgegriffen, das in Kapitel 2.7 näher beschrieben wird.

Die Bestimmung der CO_2-Sequestrierung von Stadtbäumen ist damit ein mathematisch anspruchsvolles Themenfeld, dessen vollständige Durchdringung im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann. Es ist daher erforderlich, mit Annahmen und Vereinfachungen zu arbeiten und auf bestehende Werkzeuge zurückzugreifen. Für das Grundverständnis der weiteren Betrachtung ist zunächst zu klären, unter welchen Bedingungen Hochstammbäume überhaupt produziert werden können und welche Qualitäten dabei entstehen.

2.5 Baumschulpraxis und Baumproduktion

2.5.1 Qualitätsdefinitionen und Sortierung

In der Kategorie der Alleebäume lassen sich Laub- wie Nadelgehölze sämtlicher Arten und Sorten heranziehen. Gemeint sind Bäume, die auf einen hohen Stamm gezogen wurden und als typische Begleiter von Strassen und Plätzen vor allem über ihre Dimension und ihr Laub wirken (JardinSuisse, 2025, S. 12). Die deutsche Fachliteratur fasst den Begriff enger: Dort bezeichnet Alleebaum einen für die Strassenbepflanzung tauglichen Hochstamm mit besonders hoch ansetzender Krone, die sich am endgültigen Standort bei Bedarf weiter aufasten lässt. Als Hochstamm gilt ein wenigstens dreimal verpflanzter, in weitem Stand herangezogener Baum mit geradem Stamm, durchgehendem Leittrieb und einer trieblosen Stammhöhe von wenigstens 200 cm. Ein Solitär ist ein mindestens viermal verpflanzter Hochstamm, der so weit gestellt wurde, dass ihn Nachbarbäume in seiner Entwicklung nicht beeinträchtigen (Krüssmann et al., 1997, S. 522). Für die vorliegende Arbeit sind die Definitionen von JardinSuisse massgebend.

Im Handel erscheinen Alleebäume mit verschiedenen Stammhöhen. Beim Fussstamm liegt sie zwischen 40-80 cm, beim Halbstamm zwischen 80-160 cm und beim Hochstamm zwischen 160-250 cm. Innerhalb jeder Stammhöhe wird zusätzlich danach unterschieden,

wie die Wurzel verpackt ist, also wurzelnackt, mit Ballen oder im Container (JardinSuisse, 2025, S. 12).

Über die Stammhöhe hinaus richtet sich die Sortierung nach dem Stammumfang, der in Zentimetern angegeben und in einem Meter Höhe über Boden beziehungsweise Wurzelwerk gemessen wird (JardinSuisse, 2025, S. 13). Die in der Tabelle 1 dargestellten daraus resultierenden Grössenstufen bilden die massgebende Bezugsgrösse des Handels und werden im weiteren Verlauf der Arbeit durchgehend verwendet, sowohl für die Preise in Kapitel 3.4 als auch für die Produktions- und Verschulungsschritte. Die mit einem Stern gekennzeichneten Stufen sechs bis acht sind in der Sortierungstabelle der Quelle nicht enthalten. Sie werden dort jedoch bei den Anforderungen an die Anzahl Verpflanzungen aufgeführt und in der vorliegenden Arbeit mitgeführt.

6–8*	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–25
25–30	30–35	35–40	40–45	45–50	50–55	55–60	60–70

Tabelle 1: Handelsübliche Sortierung von Alleebäumen nach Stammumfang in Zentimetern, gemessen 1 m ab Boden oder Wurzelwerk (JardinSuisse, 2025, S. 13)

Für Stamm, Krone und Wurzeln gelten festgelegte Anforderungen. Der Stamm hat gerade zu verlaufen und dem Charakter der Art beziehungsweise Sorte zu entsprechen. Das Aufasten muss fachgerecht erfolgt sein, und die seitlichen Äste müssen deutlich hinter dem Leittrieb zurücktreten (JardinSuisse, 2025, S. 13). Bei Bäumen für Verkehrsflächen liegt der Kronenansatz je nach Gattung und Grösse oberhalb einer Mindesthöhe. Die Krone selbst muss gemäss der Definition von JardinSuisse (2025, S.13) «regelmässig, der Art und Sorte entsprechend aufgebaut sein und ein der Stammstärke entsprechendes Volumen aufweisen». Setzt sich der Stamm in die Krone hinein fort, muss dieser Fortsatz gerade verlaufen und sich in seiner Dicke stufenlos an den Stamm anschliessen, damit sich der Baum später auf die gewünschte Stammhöhe aufschneiden lässt (JardinSuisse, 2025, S. 13). Für die Wurzeln gilt allgemein, dass ein Gehölz über ein gut ausgebildetes, seiner Art angemessenes Wurzelwerk verfügen muss (JardinSuisse, 2025, S. 5).

Als Ballen bezeichnet man die Erde, die beim Roden am Gehölz verbleibt und die Wurzeln zwischen Rodung und Wiederpflanzung schützt und stabilisiert, namentlich während Lagerung und Transport. Er entsteht durch das wiederholte Verschulen beziehungsweise Unterschneiden der Pflanze und ist damit kein Verpackungsdetail, sondern das Ergebnis des Produktionsverfahrens selbst (JardinSuisse, 2025, S. 6). Bei Alleebäumen mit Ballen oder im Container soll dessen Durchmesser rund dem dreifachen Stammumfang

entsprechen, gemessen am Boden, bei wurzelnackter Lieferung gilt für das Wurzelwerk etwa das Vierfache (JardinSuisse, 2025, S. 13).

Auch die verlangte Zahl der Verpflanzungen richtet sich nach der Grössenstufe, gefordert ist ein dem Alter und der Grösse angemessener, regelmässiger Rhythmus: zwei Vorgänge für die Stufen 6/8 bis 10/12, drei für 10/12 bis 20/25, vier für 20/25 bis 35/40 und fünf für 35/40 bis 45/50 (JardinSuisse, 2025, S. 13). Die Qualitätsstufe eines Baumes ist damit nicht allein eine Frage seiner Dimension, sondern zugleich eine der über die Produktionsdauer geleisteten Verpflanzungsvorgänge.

2.5.2 Produktionsverfahren und Flächenbedarf

Europas Baumschulen arbeiten überwiegend spezialisiert. Betriebe, die eine Art vom Saatgut bis zum fertigen Solitär durchkultivieren, sind selten geworden. Ein Solitär durchläuft deshalb häufig mehrere Stufen in unterschiedlichen Betrieben, vom zweijährig verschulten Sämling über den leichten Hochstamm bis zum Hochstamm (Krüssmann et al., 1997, S. 522). Ausgangsmaterial sind meist zwei-, teils auch ein- oder dreijährig verschulte Jungpflanzen, deren Qualität massgeblich darüber entscheidet, ob die Kultur später gelingt (Krüssmann et al., 1997, S. 521).

Das wiederholte Umpflanzen ist dabei nicht bloss eine logistische Massnahme, sondern der eigentliche Kern des Produktionsverfahrens. Wird ein Baum umgesetzt oder werden seine Wurzeln geschnitten, bildet sich nahe am Stamm ein dichtes Geflecht feiner Wurzeln, das später beim Kunden das Anwachsen sichert. Deshalb können zwei Bäume derselben Art mit identischem Stammumfang preislich weit auseinanderliegen. Dreimaliges Verpflanzen kostet spürbar mehr als zweimaliges, liefert dafür aber einen Baum mit deutlich besser entwickelter Krone und Wurzel (Krüssmann et al., 1997, S. 521). Die Anzahl der Verpflanzungen ist damit sowohl ein Qualitäts- als auch ein Preismerkmal.

Mit jedem Umpflanzen steigt zugleich der Flächenbedarf. Die Abstände richten sich in erster Linie nach der Grösse des Pflanzguts, wobei ausladende Kulturen mehr Raum beanspruchen als schmal aufstrebende (Krüssmann et al., 1997, S. 523). Für Solitärgehölze sowie drei- bis viermal verpflanzte Bäume müssen die Reihen wenigstens 150 cm auseinanderliegen, damit Schmalspurschlepper, Kleinraupen oder Radlader eingesetzt werden können. Bei kräftigeren Solitären und Starkbäumen hingegen wächst der Abstand auf über 250 cm für handelsübliche Traktoren (Krüssmann et al., 1997, S. 63). Entsprechend sinkt die Zahl der Hochstämme je Hektare mit jedem Umsetzen deutlich. Beim leichten Hochstamm mit zwei Verpflanzungen stehen rund 19'400 Bäume auf einer Hektare, beim

Hochstamm mit drei Verpflanzungen noch rund 5'000 und beim Solitär mit vier Verpflanzungen rund 2'000. Fahrgassen, Wege und Vorgewende sind dabei eingerechnet (Krüssmann et al., 1997, S. 523).

Für die Bewirtschaftung braucht es über die ackerbaulichen Schlepper und Bodenbearbeitungsgeräte hinaus Spezialmaschinen für Aussaat, Pflanzung, Pflege, Düngung und Pflanzenschutz. Weil deren Einsatz häufig auf bestimmte Jahreszeiten beschränkt ist, sind sie nur schwach ausgelastet. Investitionen wollen deshalb besonders gut abgewogen und auf die langfristige Planung der Kulturen abgestimmt sein (Krüssmann et al., 1997, S. 63).

Das für die Produktion von Hochstammbäumen nötige Wissen ist in sämtlichen Bereichen breit gefächert und teilweise nur schwer zugänglich (Krüssmann et al., 1997, S. 258). Dies gilt in besonderem Mass für die betriebswirtschaftlichen Grundlagen, die nachfolgend behandelt werden.

2.6 Ökonomische Grundlagen und Kostenstrukturen

Dass sich Stadtbäume ökonomisch bewerten lassen und ihr Nutzen die Kosten übersteigen kann, ist empirisch belegt. So wurde der Nutzen der Immissionsminderung durch Stadtbäume für die USA auf jährlich rund 3.1 Milliarden Dollar beziffert. Die Untersuchungen zweier kalifornischer Städte, die Aufwand und Wirkung vollständiger Baumbestände gegenüberstellten, ergaben Nutzen-Kosten-Verhältnisse von 1.8 beziehungsweise 1.5 (Roloff et al., 2013, S. 24). Die vorliegende Arbeit greift diesen Ansatz auf, beschränkt sich gemäss ihrer Abgrenzung jedoch auf die Beschaffungskosten und die CO_2-Sequestrierung.

Da die Zahlungen einer Beschaffungsstrategie über Jahrzehnte verteilt anfallen, werden sie zur Vergleichbarkeit auf einen einheitlichen Bezugszeitpunkt diskontiert. Zukünftige Ein- und Auszahlungen werden dazu mit dem Diskontierungsfaktor $(1 + i)^{-t}$ auf einen gemeinsamen Ausgangszeitpunkt diskontiert, wobei i den Diskontierungssatz und t die Anzahl Perioden bis zur Zahlung bezeichnet (Beckers et al., 2009, S. 7). Der Barwert eines künftigen Zahlungsstroms CF_t ergibt sich damit als:

$$PV = CF_t / (1 + i)^t$$

Die Summe der Barwerte aller Zahlungen einer Strategie bildet deren Gesamtbarwert zum Bewertungsstichtag und macht Zahlungsreihen mit unterschiedlichen Zeitpunkten und Laufzeiten direkt vergleichbar. Fallen die Zahlungen zu heutigen Preisen an, werden

sie zunächst mit der erwarteten Teuerung auf ihren nominalen Wert im Zahlungszeitpunkt aufgezinst und anschliessend mit dem nominalen Diskontierungssatz abgezinst.

Die zentrale Stellgrösse dieser Rechnung ist der Diskontierungssatz, der das eingesetzte Kapital risikogerecht verzinst. Seine Herleitung lässt sich methodisch begründen, kommt aber ohne Annahmen nicht aus, da die empirische Grundlage in Form detaillierter Transaktionsdaten begrenzt ist. Den Rahmen spannen zwei Pole auf, nämlich die als weitgehend sicher geltende Rendite einer Bundesobligation und die erfahrungsgemäss stark schwankende Rendite einer Aktie (Fahrländer & Kloess, 2024, S. 395). Die Festlegung des Satzes für die vorliegende Untersuchung sowie dessen Aufteilung in realen Anspruch und Teuerung erfolgt in Kapitel 3.4.

2.7 i-Tree

Zur Untersuchung von Ökosystemdienstleistungen hat sich die Software i-Tree etabliert. Hinter dem Namen steht eine Sammlung von Programmen, mit denen sich der Aufbau von Baumbeständen, deren Ökosystemleistungen, der Wert einzelner Bäume sowie die von Bäumen ausgehenden Gefahren untersuchen lassen. Weil die Programme kostenlos und leicht handhabbar sind, arbeiten weltweit sehr unterschiedliche Anwender damit, von Gemeinden über gemeinnützige Organisationen bis zu Studierenden, auf jeder Massstabsebene vom einzelnen Baum bis zur ganzen Stadt. Bereitgestellt werden die Basisdaten, um den Wert eines Bestands sichtbar zu machen und Entscheidungen nach Prioritäten zu ordnen (Nowak, 2021, S. 2). Für die vorliegende Arbeit wird daraus i-Tree Eco verwendet, das international als etabliertes Werkzeug zur Analyse urbaner Baumbestände und ihrer Umweltleistungen gilt.

Mit i-Tree Eco lässt sich der Baumbestand eines abgegrenzten Untersuchungsgebiets samt Ökosystemdienstleistungen im Detail untersuchen. Die Anwendung verarbeitet im Feld erhobene Daten entweder aus einer flächendeckenden Aufnahme aller Bäume oder aus zufällig ausgewählten Parzellen. Vor Ort werden zu jedem Baum die verlangten Angaben wie Art, Höhe und Stammdurchmesser festgehalten und um die Gemeinde sowie die passendsten Wetter- und Luftqualitätsstationen ergänzt. Aus diesen Eingaben und den hinterlegten artspezifischen Modellen schätzt i-Tree Eco ab, wie der Bestand aufgebaut ist und welche Leistungen er erbringt (Nowak, 2021, S. 4).

Entwickelt wurde i-Tree Eco vom Forest Service des US Department of Agriculture, um urbane Gehölzbestände strukturell zu erfassen. Das Programm beziffert über Strukturkennwerte wie Brusthöhendurchmesser und Blattfläche hinaus für jeden Baum auch

wohlfahrtsstiftende Grössen, die sich ökonomisch als Schadens-, Schadensvermeidungs- und Alternativkosten einordnen lassen. Für die vorliegende Arbeit sind davon insbesondere relevant (Ronchi et al., 2016, S. 463):

- Gesamtmenge des im gesamten Baumbestand gespeicherten Kohlenstoffs
- Nettomenge des jährlich sequestrierten Kohlenstoffs
- Strukturdaten des Bestandes, namentlich Biomasse, Bedeckungsgrad, Blattfläche und Artenzusammensetzung

Weitere Ausgaben, etwa zum Schadstoffabbau, zum Regenwasserrückhalt oder zur Schädlingsanfälligkeit, bleiben in dieser Arbeit ausser Betracht (Ronchi et al., 2016, S. 463). Zu beachten ist, dass die Software genau genommen nur auf die Klimazonen und die modellierten Arten der USA abgestimmt ist, gleichwohl aber immer häufiger Eingang in europäische Untersuchungen findet (Ronchi et al., 2016, S. 464).

2.8 Treibhausgasemissionen von Gebäuden

Als Referenzrahmen für die Beurteilung der Treibhausgasemissionen von Gebäuden dient in dieser Arbeit die Norm SIA 390/1 «Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden». Sie stellt in den Mittelpunkt, wie sich die Treibhausgase eines Gebäudes über dessen gesamte Lebensdauer hinweg bilanzieren lassen, zusammengefasst über die drei Bereiche Erstellung, Betrieb und Mobilität (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 19).

Zur Erstellung zählen Fertigung und Bau, der im Verlauf der Nutzungsdauer anfallende Ersatz einzelner Bauteile sowie die spätere Entsorgung. Die Phasenbezeichnungen folgen der Schweizer Norm (SN EN) 15804+A2 und SIA 2032. Unter Betrieb fällt der Energiebedarf für Wärme und Kälte, Lüftung, Beleuchtung, Geräte und Gebäudetechnik nach SIA 380. Der Bereich Mobilität erfasst die standortabhängige Alltagsmobilität samt zugehöriger Infrastruktur und ist in SIA 2039 geregelt (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 10).

Indem die Norm diese drei Bereiche gleichrangig einbezieht, entsteht eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus. Für die Bilanz wird, im Einklang mit SIA 2032, eine Lebens- beziehungsweise Referenz-Nutzungsdauer von sechzig Jahren unterstellt (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 19).

Für die weitere Betrachtung sind zwei Begriffe zentral. Die Energiebezugsfläche (A_e, nachfolgend EBF) fasst sämtliche Geschossflächen über und unter Terrain zusammen,

die sich innerhalb der thermischen Hülle befinden und deren Nutzung ein Konditionieren erfordert. Die genaue Abgrenzung regelt SIA 380 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 9). Treibhausgase, die nicht Kohlenstoffdioxid sind, werden nach ihrem Beitrag zur globalen Erwärmung in CO_2-Äquivalente (nachfolgend CO_2-eq) umgerechnet, damit sich die Mengen vergleichen lassen, wobei CO_2 selbst den Faktor 1 erhält (Umweltbundesamt Deutschland, 2026).

Neu erstellte Wohngebäude verursachen bei einer angenommenen Lebensdauer von sechzig Jahren im Mittel graue Treibhausgasemissionen von 10.5 bis 12.2 kg CO_2-eq je Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr, wobei der Wert von Studie zu Studie variiert (Schweizerischer Bundesrat, 2025, S. 4).

Die Norm formuliert zwei Anforderungsstufen. Der Basis-Zielwert (Zielwert B) bezeichnet die Obergrenze, welche die jährliche Summe aus den drei Bilanzbereichen nicht überschreiten darf, der ambitionierte Zielwert (Zielwert A) setzt dieselbe Obergrenze strenger an. Ergänzend legt die Norm je Bilanzbereich Richtwerte fest, aus denen sich die Zielwerte auf Ebene des Gebäudes zusammensetzen (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 14). Für einen Wohn-Neubau bei Standardpersonenfläche beträgt der Zielwert B 15.0 und der Zielwert A 10.0 kg CO_2-eq pro Quadratmeter EBF und Jahr, die zugehörigen Richtwerte der Erstellung liegen bei 9.0 (Zielwert B) beziehungsweise 6.0 kg (Zielwert A) (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 16).

Tabelle 2 ordnet die Werte der Norm in die übrigen schweizerischen Regelwerke ein. Für Mehrfamilienhäuser liegt der Basisrichtwert der Erstellung bei 9 kg, der ambitionierte bei 6 kg CO_2-eq pro Quadratmeter EBF und Jahr, während der Entwurf der Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn) 2025 und der Minergie-Standard 2024 mit zwölf beziehungsweise elf kg höhere Grenzwerte vorsehen. Die ambitionierten Richtwerte der Norm liegen damit rund 30 Prozent unter den Basisrichtwerten (Schweizerischer Bundesrat, 2025, S. 6).

Gebäudetyp	MuKEn 2025 (Vernehmlassung)	Minergie 2024	SIA 390/1 (Erstellung)	
			Basis	Ambitioniert
Wohnen MFH	12	11	9	6
Wohnen EFH	13	12	9	6
Verwaltung Büro	13	12	9	6
Schulen	12	11	9	6
Verkauf	18	17	9	6
Restaurants	15	14	9	6
Spitäler	18	17		
Industrie	16	15		

Tabelle 2: Nicht abschliessender Vergleich von Grenz- und Richtwerten für die grauen Treibhausgasemissionen von Neubauten in kg CO_2-eq/m² EBF und Jahr (Schweizerischer Bundesrat, 2025, S. 6)

Die Norm sieht vor, die Richt- und Zielwerte im Hinblick auf das Netto-Null-Ziel schrittweise zu senken. Tabelle 3 zeigt den Absenkpfad für den Bereich Erstellung am Beispiel Wohnen, orientiert an den Reduktionsrichtwerten des Bundesgesetzes über die Ziele im Klimaschutz für den Sektor Industrie. Der Richtwert für Zielwert B sinkt bei einem Neubau von 9.0 kg im Jahr 2025 auf 6.0 kg im Jahr 2040 und weiter auf 1.0 kg im Jahr 2050, jener für Zielwert A von 6.0 kg auf null bereits im Jahr 2040 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 30).

	2020	**2025**	2030	2035	2040	2045	2050
Industrie: Reduktion gem. KlG (Jahr 1990 = 100 %)	83%	75%	67%	58%	50%	30%	10%
Jährliche Treibhausgasemissionen in kg/m²							
Ø Erstellung Wohnen/Neubau mit Ist-Zustand 2020	12.2	11.0	9.8	8.6	7.3	4.4	1.5
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert B		**9.0**	8.0	7.0	6.0	3.5	1.0
Richtwert Erstellung Wohnen/Neubau für Zielwert A		**6.0**	3.8	1.5	± 0.0		
Ø Erstellung Wohnen/Umbau mit Istzustand 2020	7.5	6.8	6.0	5.3	4.5	2.7	0.9
Richtwert Erstellung Wohnen/Umbau für Zielwert B		**5.0**	4.0	3.5	3.0	1.5	0.5
Richtwert Erstellung Wohnen/Umbau für Zielwert A		**4.0**	2.5	1.0	± 0.0		

Tabelle 3: Absenkpfad der Richtwerte Erstellung für die Zielwerte A und B am Beispiel Wohnen (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 30)

Der entsprechende Absenkpfad für den Bereich Betrieb orientiert sich an den Reduktionsrichtwerten des Bundesgesetzes über die Ziele im Klimaschutz für den Sektor Gebäude. Der Richtwert für Zielwert B sinkt bei einem Neubau von 2.0 kg im Jahr 2025 auf 0.7 kg im Jahr 2040 und erreicht bis 2050 null (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 31).

Die dargestellten Emissionskennwerte bilden die quantitative Grundlage für die spätere Gegenüberstellung mit der CO_2-Sequestrierung der vorgepflanzten Hochstammbäume. In Kapitel 3.3 werden daraus ein Bezugsjahr festgelegt und die massgebenden Werte in eine Modellgrundlage überführt. Für die monetäre Bewertung dieser Emissionsmengen ist zusätzlich ein Preis je Tonne CO_2 erforderlich. Das folgende Kapitel ordnet hierzu die schweizerische CO_2-Lenkungsabgabe als möglichen finanziellen Referenzwert ein.

2.9 CO_2-Lenkungsabgabe in der Schweiz

Neben den normativen Zielwerten nach Kapitel 2.8 besteht mit der CO_2-Abgabe ein preisliches Instrument, das Treibhausgasemissionen in der Schweiz mit einem staatlich festgelegten Geldwert versieht. Da für die Bewertung von Kompensationsleistungen am Markt keine einheitliche und belastbare Herangehensweise besteht, dient der Abgabesatz in dieser Arbeit als Referenzgrösse für die Monetarisierung der Kompensationskosten.

Seit 2008 belastet der Bund fossile Brennstoffe wie Heizöl und Erdgas mit einer Lenkungsabgabe. Sie soll dazu anhalten, sparsamer zu heizen und stärker auf klimaschonende Energieträger auszuweichen (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2025b). Fiskalische Absichten verfolgt sie nicht, im Vordergrund steht vielmehr, das Verhalten der Wirtschaftssubjekte zu steuern (Ramer et al., 2017, S. 3). Als Eingriff des Staates in die Preise macht sie fossile Brennstoffe gegenüber anderen Energieträgern teurer. Über das veränderte Preisgefüge soll sich das Kalkül der Marktteilnehmer verschieben, woraus geändertes Verhalten und in der Folge eine andere Nachfrage nach Energie sowie geringere Emissionen resultieren sollen (Ramer et al., 2017, S. 7).

Belastet werden Herstellung, Gewinnung und Einfuhr fossiler Brennstoffe. Zu Beginn lag der Satz bei 36 Franken pro Tonne CO_2, mit der gesetzlichen Möglichkeit, ihn durch den Bundesrat auf maximal 120 Franken anzuheben, sofern die vorgesehenen Zwischenziele verfehlt werden (Art. 29 des Bundesgesetzes über die Reduktion der CO_2-Emissionen [CO_2-Gesetz] vom 23.12.2011, SR 641.71; Art. 94 der CO_2-Verordnung vom 30.11.2012, SR 641.711). Von dieser Möglichkeit wurde seit 2014 in mehreren Etappen Gebrauch gemacht, sodass der Satz von 36 auf die heute geltenden 120 Franken je Tonne CO_2 stieg.

Eine weitergehende Anhebung ist gesetzlich derzeit nicht vorgesehen (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2026, S. 4). Von den Einnahmen fliessen zwei Drittel an Bevölkerung und Wirtschaft zurück (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2025a).

Der heute geltende Satz von 120 Franken je Tonne CO_2 bildet damit die Grundlage für die monetäre Bewertung der Kompensationsleistung. In Kapitel 3 wird er auf die modellierte CO_2-Sequestrierung der vorgepflanzten Hochstammbäume angewendet und den kapitalisierten Gesamtkosten der beiden Beschaffungsstrategien gegenübergestellt.

3. Modellbasierte Untersuchung der Vorpflanzungsstrategie

3.1 Auswahl Baumarten

Ausgehend von den in Kapitel 2.3 erläuterten Herausforderungen, Funktionen und Anforderungen wird eine Auswahl an Baumarten getroffen, die den künftigen Bedingungen voraussichtlich gewachsen ist. Die Vielzahl an Belastungsfaktoren und Anforderungen macht eine solche Auswahl ohne vertieftes Fachwissen schwierig, weshalb die Erarbeitung mehrstufig und unter Beizug von Fachexperten erfolgte.

Für die Eruierung der Baumauswahl standen folgende Grundlagen zur Verfügung:

- GALK-Strassenbaumliste 2026 (*GALK Strassenbaumliste*, 2026)
- «Bäume in der Stadt» (Roloff et al., 2013), namentlich:
    - Tabelle 4.1: mögliche Ausschluss- und Hinderungsgründe für die Baumartenverwendung auf urbanen Standorten
    - Tabelle 6.5: Einstufung wichtiger Gehölzarten nach der KlimaArten-Matrix (KLAM) hinsichtlich ihrer Eignung im Stadtbereich bei prognostiziertem Klimawandel
    - Tabelle 6.6: Favoriten unter den im Hinblick auf den Klimawandel geeigneten Strassenbäumen
- Biodiversitätsindex 2021 für Stadtbäume im Klimawandel (Gloor et al., 2021), namentlich:
    - Tabelle 5: Baumartenliste für den Biodiversitätsindex 2021
- Angaben zu passenden Bäumen aus einem Experteninterview mit einer Baumschule (Interview G)
- Vorauswahl der Bäume und Qualitäten aus dem Beitrag der Landschaftsarchitektur (Filippa & Heine, 2026)

Der Fokus liegt auf wenigen, dafür repräsentativen Baumarten. Das erleichtert die Gegenüberstellung der Strategien und grenzt die Komplexität ein. Angestrebt wird keine abschliessende wissenschaftliche Bewertung der besten Stadtbäume, sondern eine fachlich abgestützte Auswahl bewährter und zukunftsfähiger Arten. Sie bildet die Grundlage für die nachfolgende Untersuchung der Biomasseentwicklung, der CO_2-Sequestrierung und der Kostenperspektiven.

Ausgangspunkt bildete die Zusammenführung der Fachgrundlagen, Tabellen und Experteneinschätzungen in einer gemeinsamen Bewertungsmatrix. Weil die einzelnen

Grundlagen unterschiedliche Schwerpunkte setzen, wurden sie zunächst separat erfasst und bewertet. In einem ersten Schritt wurden die genannten Baumarten einander zugeordnet, wobei botanische Namen, Sorten, Synonyme und abweichende Schreibweisen abgeglichen wurden. Liess sich eine Sorte nicht explizit genannter Art eindeutig zuordnen, wurde dies vermerkt. Nicht eindeutig zuordenbare Angaben blieben als fehlend ausgewiesen.

In einem zweiten Schritt wurden die Grundlagen in vergleichbare Teilbewertungen auf einer Skala von 1 (sehr geringe Eignung beziehungsweise kritische Beurteilung) bis 5 (sehr gute Eignung) in Halbschritten überführt. Jede Teilbewertung blieb an die Aussage ihrer Quelle gebunden. Die Ausschluss- und Hinderungsgründe wurden getrennt von der klimatischen Eignung, der Strassenbaumverwendbarkeit, der Biodiversitätsrelevanz und der projektbezogenen Vorauswahl betrachtet, damit keine Grundlage mehrfach oder unscharf in die Bewertung einfliesst.

In einem dritten Schritt wurden die sechs Teilbewertungen gewichtet und zu einer Gesamtnote zusammengeführt: die Ausschluss- und Hinderungsgründe nach Tabelle 4.1 mit 15 Prozent, die klimatische Eignung gemäss KLAM mit 20 Prozent, die Favoritenliste klimawandelgeeigneter Strassenbäume mit 15 Prozent, die GALK-Verwendbarkeit mit 20 Prozent, die Biodiversitätsbewertung mit 15 Prozent und die projektbezogene Vorauswahl der Landschaftsarchitektur mit 15 Prozent. Die Gewichtungen sind in der Matrix ausgewiesen (vgl. Anhang 3) und lassen sich bei Bedarf anpassen. Fehlende Angaben wurden nicht als negative Bewertung gewertet, sondern je Grundlage mit einem definierten neutralen Ersatzwert eingesetzt. Die Regeln sind in der Matrix ausgewiesen.

Aus der gewichteten Gesamtnote wurde je Baumart eine Prioritätsstufe abgeleitet. Die höchste Stufe A beginnt bei einer Gesamtnote von 4.2 und umfasst Arten, die als sehr gut geeignet beziehungsweise prioritär zu prüfen eingestuft wurden. Die Stufen B bis D stufen über gut geeignet mit leichten Einschränkungen und bedingt geeignet, standortabhängig, bis kritisch mit Vorbehalt ab. Für die weitere Bearbeitung werden ausschliesslich die fünfzehn Arten der Stufe A verwendet, womit sich die breite Ausgangsliste auf die in der Gesamtschau stärksten Arten reduziert. Tabelle 4 zeigt diese Auswahl, die vollständige Bewertungsmatrix findet sich in Anhang 3.

Rang	Botanischer Name	Deutscher Name
1	Quercus cerris	Zerreiche
2	Gleditsia triacanthos 'Skyline'	Schmalkronige Gleditschie
3	Quercus frainetto	Ungarische Eiche
4	Liquidambar styraciflua	Amerikanischer Amberbaum
4	Ostrya carpinifolia	Hopfenbuche
6	Platanus hispanica	Ahornblättrige Platane
6	Tilia cordata	Winterlinde
8	Gleditsia triacanthos f. inermis	Dornenlose Gleditschie
9	Quercus robur	Stieleiche
10	Magnolia kobus	Kobushi-Magnolie
10	Parrotia persica	Persischer Eisenholzbaum
10	Ulmus 'Rebona'	Rebona-Ulme
13	Acer campestre	Feldahorn
13	Morus alba	Weisser Maulbeerbaum
15	Quercus petraea	Traubeneiche

Tabelle 4: Prioritätsgruppe A nach Rang 1 bis 15. Vollständige Bewertungsmatrix in Anhang 3 (Filippa & Heine, 2026; *GALK Strassenbaumliste*, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026; Gloor et al., 2021; Roloff et al., 2013)

Die getroffene Auswahl wurde mit einer kommunalen Fachstelle für Stadtbäume sowie mit zwei Schweizer Baumschulen besprochen. Alle drei befragten Fachpersonen bestätigten die Auswahl. Einwände gegen einzelne Arten wurden nicht vorgebracht. Die Rückmeldungen fielen durchwegs positiv aus. Die ausgewählten Bäume entsprechen nach heutigem Wissensstand den Anforderungen des urbanen Entwicklungsgebiets und sind für den Detaillierungsgrad dieser Arbeit angemessen (*Interview A*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026).

Ergänzend wurde die Bewertung mit dem Landschaftsarchitekturteam der Testplanung gespiegelt. Das Vorgehen wurde als nachvollziehbar und methodisch ausführlich beurteilt. Angemerkt wurde, dass die Baumauswahl in der Praxis nicht allein über eine Gesamtbewertung erfolgt. Die Fachgrundlagen seien gestalterisch und standortbezogen zu interpretieren und je nach Freiraumtyp unterschiedlich zu gewichten. Die optimale Artenzusammensetzung entstehe aus einer Mischung von Arten mit je eigenen Funktionen. Die Prioritätsgruppen seien deshalb als Eignungseinstufung innerhalb der angewandten Methodik und nicht als absolute Prioritäten zu verstehen (D. Filippa, persönliche Kommunikation, 5. Juni 2026). Da diese Arbeit eine methodisch einheitliche, nachvollziehbar hergeleitete Auswahl erfordert, wird an der Bewertungsmatrix festgehalten. Eine nach Freiraumtypen differenzierte Gewichtung bleibt der weiteren Projektbearbeitung vorbehalten.

3.2 Produktionsphasen und Ausfallraten

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen wurden leitfadengestützte Interviews mit Fachpersonen aus Baumschulwesen und Landschaftsarchitektur geführt. Als Ausgangsszenario diente eine neu anzulegende Baumschule in unmittelbarer Nähe zum Entwicklungsgebiet, in der zweijährige Sämlinge ausgepflanzt und bis zur Fertigstellung der jeweiligen Entwicklungsetappe aufgezogen werden. Im Zentrum standen Fragen zu Aufzucht, Kostenstruktur und praktischer Machbarkeit. Die Ergebnisse wurden aufbereitet, teilweise den Interviewpartnern zur Verifizierung erneut vorgelegt und nachfolgend nach Themenbereichen zusammengefasst (vgl. Anhang 1 und 2).

Die Produktion von Hochstammbäumen folgt in Baumschulen einer standardisierten Abfolge von Kultur- und Verschulungsschritten, deren Dauer je nach Art variiert. Ausgangspunkt ist das Saatbeet (Jahr 0–1), aus dem die Sämlinge in das Verschulbeet versetzt werden (Jahr 1–2). Nach dem ersten Verschulen spricht die Baumschulpraxis von einmal verpflanzten Bäumen (1 x v.). Bis zum fünften Jahr erreicht der Baum die Qualitätsstufe 6/8. Im zweiten Zyklus (2 x v., Jahre 5 bis 9) wächst er auf 12/14 heran (*Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026). Diese Etappe vom Sämling bis zum Jungbaum der Qualitätsstufe 12/14 wird in der vorliegenden Arbeit als «Phase 1: Vorproduktion Jungbaum» bezeichnet und dauert rund neun Jahre. «Phase 2: Aufzucht» umfasst einen einzelnen Verschulungszyklus (3xv., Jahr 9–13), in dem der Baum von 12/14 auf 18/20 zulegt. «Phase 3: Wachstum zum Schattenbaum» beinhaltet zwei Zyklen: 4xv. (Jahr 13–17) von 18/20 auf 25/30 sowie 5xv. (Jahr 17–21) von 25/30 auf 35/40 (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026). Tabelle 5 stellt die Phasen, Verschulungsschritte und Zeiträume im Überblick dar.

Wichtig zu unterscheiden sind die folgenden zwei Begriffe. Die Zählung «1x, 2x, … verpflanzt» bezeichnet ausschliesslich das wiederholte Versetzen innerhalb der Baumschule und wird nachfolgend als Verschulen bezeichnet (*Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026). Als Umpflanzung wird demgegenüber das einmalige Versetzen des vorgepflanzten Baumes vom Vorproduktionsstandort an den definitiven Standort im Entwicklungsareal verstanden. Verschulungen zählen zu den Produktions- und Pflegekosten. Die Umpflanzung an den definitiven Standort fällt in beiden Beschaffungsstrategien gleichermassen an und ist für den Vergleich nicht ergebnisrelevant (vgl. Kapitel 3.4).

Vereinfachend wird angenommen, dass die Bäume jährlich etwa eine Qualitätsstufe zulegen, bis eine artabhängige Schwelle im Bereich der Stufen 18/20 bis 25/30 erreicht ist.

Danach verlangsamt sich der Zuwachs auf rund zwei Jahre je Stufe (*Interview A*, persönliche Kommunikation, 2026). Diese bewusst stark vereinfachte Betrachtung mittelt über die unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten der unter Kapitel 3.1 ausgewählten schnell-, mittel- und langsam wachsenden Arten. Für die Modellierung wird ab Phase 2 ein Verschulungszyklus von vier Jahren unterstellt (*Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026).

Zur artspezifischen Ausfallrate liessen sich in der ausgewerteten Literatur keine belastbaren Angaben finden. Sie ist stark sorten- und standortabhängig. Zudem lassen sich Witterungsextreme, klimatische Veränderungen und weitere äussere Einflüsse nicht zuverlässig prognostizieren (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026). Die befragten Baumschulfachpersonen ordnen die Ausfallrate wie folgt ein: im Saat- und Verschulbeet rund 40 Prozent, in der übrigen Phase 1 rund 20 Prozent sowie in den Phasen 2 und 3 noch 5 bis maximal 10 Prozent (*Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026). Mit zunehmender Grösse und zunehmendem Alter sinkt das Ausfallrisiko, da etablierte Bäume aussergewöhnliche Ereignisse besser überstehen (*Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026). Die Einordnung der Ausfallraten je Phase ist ebenfalls in Tabelle 5 dargestellt.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Phase 1: Vorproduktion Jungbaum	Vorproduktion Jungbaum																				
0xv.: Saatbeet																					
0xv.: Verschulbeet																					
1xv.: 2-jähriger Sämling bis 6/8																					
2xv.: 6/8 – 12/14																					
Phase 2: Aufzucht										Aufzucht											
3xv.: 12/14 – 18/20																					
Phase 3: Wachstum zum Schattenbaum														Wachstum zum Schattenbaum							
4xv.: 18/20 - 25/30																					
5xv.: 25/30 - 35/40																					
Ausfallrate																					
Phase 1: bis 1xv	40%																				
Phase 1: 1xv bis 3xv			20%																		
Phase 2,3: 3xv bis 5xv										5 - max. 10 %											

Tabelle 5: Wachstum und Ausfallraten je Produktionsphase – Verschulungsschritte, Zeitdauer und Stammumfang vom Saatbeet bis zur Qualitätsstufe 35/40

Operativ erfordern die unterschiedlichen Ansprüche der einzelnen Baumarten eine intensive Pflege und, insbesondere bei einer grossen Stückzahl, eine regelmässige Präsenz vor Ort (*Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026). Hinzu kommt, dass der Ausnutzungsgrad der benötigten Spezialgeräte vergleichsweise gering ist (Krüssmann et al., 1997). Entsprechende Investitionen sind daher sorgfältig abzuwägen und auf die langfristige Kulturplanung abzustimmen.

An einer neu angelegten Baumschule nahe dem Entwicklungsgebiet wären die Spezialgeräte nach Einschätzung der befragten Fachpersonen nur begrenzt ausgelastet. Eine eigene Anschaffung liesse sich wirtschaftlich kaum rechtfertigen. Die Geräte müssten für jeden Arbeitsgang zugeführt und wieder abtransportiert werden. Der ursprünglich angenommene Vorteil der standortnahen Eigenproduktion, kürzere Transportwege in monetärer wie ökologischer Hinsicht, wird durch diesen wiederkehrenden Aufwand relativiert (*Interview A*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview C*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026). Welche Konsequenzen sich daraus für die Wahl der Beschaffungsstrategie ergeben, wird unter Kapitel 3.4 erörtert.

3.3 Übertragung der Grundlagen auf das Untersuchungsgebiet

Die im Theorieteil erarbeiteten Erkenntnisse werden nachfolgend auf den Untersuchungsgegenstand übertragen. Dabei sind verschiedene Annahmen und Annäherungen erforderlich, die in diesem Kapitel offengelegt und begründet werden. Als Plangrundlage dient erneut der Testplanungsbeitrag des Teams Salewski Nater Kretz (vgl. Kapitel 2.1). Festzulegen sind die verfügbare Fläche, die Etappierung, die Anzahl Bäume, die Energiebezugsfläche sowie der massgebende Emissionskennwert.

Vom Betrachtungsperimeter mit 34.3 ha (343'000 m²) entfallen 18.5 ha (184'800 m²) auf den Bearbeitungsperimeter. Davon halten die Gemeinde Windisch 16'000 m², die Stadt Brugg 6'300 m², der Kanton Aargau 18'600 m², die Schweizerischen Bundesbahnen 40'100 m² und die BRUGG Real Estate AG 67'400 m², die restlichen 36'400 m² verteilen sich auf weitere Eigentümer (Planpartner, 2025, S. 17). Nicht alle diese Flächen sind Entwicklungsgebiet, da auf Gemeinde- und Kantonsland die öffentliche Erschliessung liegt und zu den weiteren Eigentümern die Fachhochschule Nordwestschweiz mit dem Campusareal zählt. Als eigentliche Entwicklungsflächen gelten die Grundstücke der SBB und der BRUGG Real Estate AG, einzelne Flächen Dritter sowie der umgestaltungsbedürftige Teil der öffentlichen Flächen, wobei sich die genaue Abgrenzung erst in den weiteren Projektschritten zeigen wird. Näherungsweise wird angenommen, dass rund 13 ha

(130'000 m²) als Bebauungs- und Umgebungsfläche und damit zugleich als Fläche für künftige Hochstammpflanzungen zur Verfügung stehen. Auf die mit dieser Flächenbeanspruchung verbundenen Flächen- und Opportunitätskosten wird in Kapitel 3.4 eingegangen, wo deren Behandlung im gewählten Beschaffungsmodell begründet wird.

Auch die effektive Etappierung bedarf weiterer Vertiefung. Für die vorliegende Arbeit wird von zehn Etappen ausgegangen, wobei die tatsächliche Etappierung im weiteren Verlauf voraussichtlich feingliedriger und damit zahlenmässig höher ausfallen wird.

Die Anzahl Bäume stützt sich auf die Plangrundlage des Studios BÖE, in der knapp 700 Elemente gezählt wurden, die sich als Bäume interpretieren lassen. Da der Plan neben Hochstammbäumen weitere Bepflanzungen wie Sträucher, Büsche, Mehrstammgehölze und Hecken enthält, wird angenommen, dass rund 65 Prozent dieser Elemente Hochstammbäume sind. Daraus ergeben sich 455 und damit gerundet 450 Hochstammbäume.

Für die Gegenüberstellung der Treibhausgasbilanz der Gebäude mit der CO_2-Sequestrierung der Vorpflanzungsstrategie ist die Energiebezugsfläche zu bestimmen. Die Testplanung geht von einer baulichen Dichte von etwa 150'000 bis 180'000 m² oberirdischer Geschossfläche aus, während sich die Treibhausgasemissionen nach Kapitel 2.8 auf die Energiebezugsfläche beziehen (Planpartner, 2025, S. 137; tbf Partner, 2026, S. 3). Die beiden Grössen decken sich nicht, weil die Geschossfläche auch unbeheizte Bereiche wie Abstellräume einschliessen kann, weshalb eine Annäherung nötig ist. Überschlägig lässt sich die Energiebezugsfläche mit dem Faktor 0.8 aus der Bruttogeschossfläche ableiten, wobei dieser Näherungswert nur grob zutrifft und nicht für alle Gebäudetypen in gleichem Mass gilt (Senn & Gsteiger, 2016, S. 25). Ausgehend vom Mittelwert von 165'000 m² oberirdischer Geschossfläche resultiert eine Energiebezugsfläche von rund 132'000 m².

Für den Emissionskennwert ist ein Bezugsjahr festzulegen. Da die Gebietsentwicklung voraussichtlich in den kommenden fünfundzwanzig Jahren stattfindet, werden die Kennwerte für das Jahr 2040 herangezogen. Damit wird zugleich unterstellt, dass sich die normativen Anforderungen bis zur Fertigstellung entsprechend dem Absenkpfad der Norm verschärfen. Vereinfachend wird durchgehend die Gebäudekategorie «Wohnen im Neubau» verwendet, obwohl für das Gebiet ein Nutzungsmix vorgesehen ist. Der Richtwert Erstellung für Zielwert B beträgt im Jahr 2040 6.0 kg CO_2-eq pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr, jener für den Betrieb 0.7 kg (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2025, S. 31).

Für die Gegenüberstellung mit der CO_2-Sequestrierung wird ausschliesslich der Bereich Erstellung berücksichtigt. Der Bereich Betrieb wird zur Einordnung der Grössenordnung ausgewiesen, aber nicht verrechnet, da ihn die untersuchte Vorpflanzungsstrategie nicht beeinflusst und er einer eigenen Absenkdynamik folgt. Der Bereich Mobilität bleibt vollständig unberücksichtigt. Massgebend für diese Abgrenzung ist, dass die Erstellungsemissionen im Wesentlichen zum Zeitpunkt des Baus anfallen und damit demselben Zeitpunkt zuzuordnen sind, zu dem die vorgepflanzten Bäume ihre Biomasse einbringen. Die Gegenüberstellung versteht sich als Einordnung der Grössenordnung und nicht als Kompensationsrechnung, zumal die Kohlenstoffspeicherung in Biomasse im Unterschied zur vermiedenen Emission zeitlich begrenzt ist und für deren Anrechenbarkeit derzeit kein einheitlicher Ansatz besteht (Schweizerischer Bundesrat, 2025, S. 9).

Der angenommene Richtwert für die Erstellung im Jahr 2040 von 6 kg CO_2-Äquivalenten pro Quadratmeter Energiebezugsfläche entspricht dem heute ambitionierten Anforderungsniveau der Norm. Er liegt deutlich unter den in Kapitel 2.8 ausgewiesenen, vom Ist-Zustand 2020 auf 2025 fortgeschriebenen Durchschnittswerten von zusammen 13.9 kg (11.0 kg Erstellung, 2.9 kg Betrieb). Der Arbeit liegt damit ein ambitionierter Absenkpfad zugrunde. Ob eine Absenkung in diesem Ausmass im Durchschnitt des Gebäudeparks erreicht wird, ist derzeit weder gesichert noch absehbar.

Für die Modellierung werden die Erstellungsemissionen als einmalig anfallender Gesamtwert geführt, indem der auf die Referenz-Nutzungsdauer bezogene Jahreswert der Norm mit sechzig multipliziert wird. Die CO_2-Sequestrierung wird diesem Wert in zwei Betrachtungshorizonten gegenübergestellt, einerseits über die zwölfjährige Vorpflanzungsdauer und andererseits über die gesamte Referenz-Nutzungsdauer von sechzig Jahren. Daraus ergeben sich die in der Tabelle 6 dargestellten Grundlagen.

Grösse	Wert
Energiebezugsfläche	132'000 m²
Richtwert Erstellung 2040	6.0 kg CO_2-eq/m² EBF und Jahr
Erstellung über 60 Jahre	360 kg CO_2-eq/m² EBF
Erstellungsemissionen pro Jahr (massgebend)	792 t CO_2-eq
Erstellungsemissionen total (massgebend)	47'520 t CO_2-eq
Richtwert Betrieb 2040 (zur Einordnung)	0.7 kg CO_2-eq/m² EBF und Jahr
Betrieb pro Jahr (zur Einordnung)	92.4 t CO_2-eq
Betrieb über 60 Jahre (zur Einordnung)	5'544 t CO_2-eq

Tabelle 6: Grundlagen der Modellierung für das Untersuchungsgebiet

3.4 Modellaufbau

Festlegung der Vorpflanzungsstrategie

Die ursprüngliche Grundidee der Arbeit sah vor, die Bäume auf Landwirtschaftsland in der Nähe der Entwicklung in einer eigens anzulegenden Baumschule aufzuziehen. Die Experteninterviews relativierten diesen Ansatz. Die Eigenproduktion bedingt Infrastruktur, Fachwissen und eine permanente Pflegepräsenz und trägt das volle Kulturrisiko. Gegenüber spezialisierten Betrieben ist sie zudem in der Regel teurer, zumal die Auslastung der erforderlichen Spezialgeräte gering bliebe und der Transportvorteil der Standortnähe teilweise wieder aufgehoben würde (vgl. Kapitel 3.2). Als gängigste Form der Vorproduktion wurde übereinstimmend der Anbauvertrag mit einer etablierten Baumschule empfohlen (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026). Die Arbeit folgt dieser Empfehlung.

Die Vorpflanzung setzt nicht am Sämling an, sondern am bereits etablierten Jungbaum. Massgebend dafür ist der in Kapitel 3.2 hergeleitete Verlauf der Ausfallraten. Während im Saat- und Verschulbeet mit erheblichen Verlusten zu rechnen ist, sinkt das Risiko ab der Qualitätsstufe 12/14 auf wenige Prozent. Die Strategie umfasst deshalb die Phasen 2 und 3, also die Wachstumsjahre neun bis einundzwanzig. Sie beginnt beim dreimal verschulten Baum mit einem Stammumfang von 12/14 und endet beim fünfmal verschulten Schattenbaum mit rund 35/40 (vgl. Tabelle 7). Weil sich Bäume in jeder Stufe erwerben lassen, ist die Qualitätsstufe 12/14 eine Annahme und keine normierte Einkaufsgrösse. Sie markiert gemäss Phasenmodell mit der dritten Verschulung den Abschluss der Vorproduktion und wurde in den Interviews als sinnvolle Ausgangsgrösse empfohlen (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026). Daraus ergibt sich ein Vorpflanzungshorizont von zwölf Jahren, der zugleich den ersten der drei Auswertungszeitpunkte der Modellierung bestimmt.

Phase Verschulung	Stamm-umfang (STU)	Jahre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Phase 2:			Phase 2: Aufzucht											
3xv.	12/14 - 18/20	1-4	3xv., 12/14-18/20											
Phase 3:							Phase 3: Wachstum zum Schattenbaum							
4xv.	18/20 - 25/30	4-8					4xv., 18/20-25/30							
5xv.	25/30 - 35/40	8-12									5xv., 25/30 - 35/40			

Tabelle 7: Vorpflanzungs- und Entwicklungsphase der Hochstammbäume mittels Anbauvertrag

Die Vorproduktion wird deshalb an eine bestehende Baumschule verlagert. Als vertragliche Form dient der Anbauvertrag, der in der Branche verbreitet ist und von den befragten Fachexperten als gangbarer Weg bezeichnet wird (*Interview D*, persönliche

Kommunikation, 2026; *Interview G*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026). Die Baumschule zieht die Bäume über die vereinbarte Dauer auf und liefert sie zum festgelegten Zeitpunkt in der vereinbarten Qualität. Damit verbleibt das Kulturrisiko dort, wo Erfahrung und Infrastruktur vorhanden sind. Diese Verteilung entspricht jener beim herkömmlichen Zukauf, denn auch dort trägt die Baumschule das Risiko der vorangegangenen Kulturjahre. Der Unterschied liegt allein in der Verbindlichkeit der Abnahme.

Mit der Verlagerung der Vorproduktion entfallen der Flächenbedarf und die damit verbundenen Opportunitätskosten der Flächennutzung, die andernfalls als eigenständige Kostenkomponente anfielen. Diese Kosten verschwinden ökonomisch nicht, sie werden jedoch nicht mehr von der Entwicklerin getragen, sondern sind über den Listenpreis der Baumschule und den vereinbarten Rabatt in den Einheitspreisen enthalten.

Der Zahlungszeitpunkt wird auf das Ende der Vertragsdauer gelegt, also auf den Moment des Versetzens am Bestimmungsort. Abgestufte Modelle mit Teilzahlungen während der Kulturdauer sind möglich und in der Praxis teilweise gebräuchlich (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026). Dies würde hier jedoch nur die zeitliche Verteilung innerhalb einer Variante verändern und nicht den Vergleich zwischen den Strategien.

Die in Kapitel 3.3 eingeführten zehn Etappen bilden schliesslich die zeitliche Achse des Modells. Die erste Etappe wird voraussichtlich im Jahr 2037 fertiggestellt. Für die erste Etappe stünde bei Vertragsabschluss im Jahr 2026 ein Vorlauf von elf statt zwölf Jahren zur Verfügung. Diese Verkürzung bleibt im Modell unberücksichtigt, da sie nur eine Etappe betrifft und die Bäume alternativ mit einjähriger Verzögerung geliefert werden könnten. Die weiteren folgen im Zweijahresrhythmus bis 2055. Über alle Etappen hinweg erstreckt sich die Strategie damit auf einen Zeitraum von rund dreissig Jahren, innerhalb dessen sich Kosten und Sequestrierungsleistung gestaffelt aufbauen (vgl. Tabelle 8).

Etappe	Einpflanzung am Objekt	2037	2039	2041	2043	2045	2047	2049	2051	2053	2055
Etappe 1	2037	x									
Etappe 2	2039		x								
Etappe 3	2041			x							
Etappe 4	2043				x						
Etappe 5	2045					x					
Etappe 6	2047						x				
Etappe 7	2049							x			
Etappe 8	2051								x		
Etappe 9	2053									x	
Etappe 10	2055										x

Tabelle 8: Zeitliche Staffelung der Etappen

Datengrundlage: Grössen- und Preistabelle

Sowohl die Modellierung mit i-Tree Eco als auch die Kapitalisierung setzen voraus, dass für jede der fünfzehn ausgewählten Baumarten bekannt ist, welche Qualitätsstufen sie in welchem Jahr erreicht und was sie in der jeweiligen Grösse kostet. Beides wird in einer gemeinsamen Tabelle geführt, die als Bindeglied zwischen der ökologischen und der ökonomischen Betrachtung dient.

Die Masse stammen aus den Sortimentskatalogen der Baumschulen Bruns und Lappen (Baumschule Lappen, 2015; Bruns Pflanzen Export GmbH & Co. KG, 2025), da Schweizer Preislisten zwar den Stammumfang ausweisen, jedoch selten Höhe und Kronenbreite benennen (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026). Erfasst wurden je Art der Verschulungszyklus sowie Kronenbreite, Höhe, Stammdurchmesser und Stammumfang. Wo einzelne Angaben in den Katalogen fehlten, mussten sie interpoliert werden, diese Werte sind in der Tabelle hellblau gekennzeichnet. Tabelle 9 zeigt einen Auszug am Beispiel Quercus cerris, die vollständige Tabelle findet sich in Anhang 4.

Rang	Botanischer Name	Deutscher Name	Verschulungs-zyklus	Breite (cm)	Hoehe (cm)	Ø (cm)	Umfang (cm)
1	Quercus cerris	Zerreiche	3 x verpfl.	100-150	300-350	4-4,5	12-14
1	Quercus cerris	Zerreiche	3 x verpfl.	100-150	300-350	4,5-5	14-16
1	Quercus cerris	Zerreiche	3 x verpfl.	100-150	300-350	5-5,5	16-18
1	Quercus cerris	Zerreiche	4 x verpfl.	150-200	350-400	5,5-6	18-20
1	Quercus cerris	Zerreiche	4 x verpfl.	150-200	350-400	6-8	20-25
1	Quercus cerris	Zerreiche	4 x verpfl.	150-200	400-500	6-8	20-25
1	Quercus cerris	Zerreiche	4 x verpfl.	150-200	400-500	8-10	25-30
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	200-300	500-700	8-10	25-30
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	200-300	500-700	10-12	30-35
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	200-300	500-700	12-14	35-40
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	300-400	500-700	10-12	30-35
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	300-400	500-700	12-14	35-40
1	Quercus cerris	Zerreiche	5 x verpfl.	300-400	500-700	14-16	40-45
1	Quercus cerris	Zerreiche	6 x verpfl.	300-400	700-900	14-16	40-45
1	Quercus cerris	Zerreiche	6 x verpfl.	300-400	700-900	16-18	45-50
1	Quercus cerris	Zerreiche	6 x verpfl.	300-400	700-900	18-20	50-60
1	Quercus cerris	Zerreiche	6 x verpfl.	300-400	700-900	20-22	60-70
1	Quercus cerris	Zerreiche	7 x verpfl.	400-600	900-1200	20-22	60-70
1	Quercus cerris	Zerreiche	7 x verpfl.	400-600	900-1200	22-25	70-80
1	Quercus cerris	Zerreiche	7 x verpfl.	400-600	900-1200	25-29	80-90
1	Quercus cerris	Zerreiche	7 x verpfl.	400-600	900-1200	29-32	90-100

Tabelle 9: Auszug aus der Grössentabelle am Beispiel Quercus cerris. (Baumschule Lappen, 2015; Bruns Pflanzen Export GmbH & Co. KG, 2025)

Für die Preise wurden die Bruttolistenpreise von vier Schweizer Baumschulen erhoben, nämlich Hauenstein, Lüscher, Ingold und Roth, jeweils für die Handelsbezeichnung Hochstamm mit Ballen. Daraus wurde je Art und Qualitätsstufe der Mittelwert gebildet. Dieses Vorgehen entspricht der Empfehlung der befragten Fachpersonen, den Marktpreis als Ausgangspunkt zu nehmen. Dafür spricht auch, dass branchenweite Kennzahlen zu den Unterhaltskosten während der Kultur nicht vorliegen (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026).

Über alle fünfzehn Arten ergibt sich für den Jungbaum der Stufe 12/14 ein mittlerer Listenpreis von 450 Franken, für den Schattenbaum im Bereich 35/40 bis 40/45 ein solcher von 4'160 Franken. Unter Berücksichtigung des über den Anbauvertrag erzielbaren Rabatts von dreissig Prozent liegt der massgebende Einheitspreis für denselben Schattenbaum bei 2'912 Franken. Der Rabatt beruht auf der Empfehlung der befragten Fachpersonen (*Interview D*, persönliche Kommunikation, 2026; *Interview H*, persönliche Kommunikation, 2026). Massgebend für die Gewährung ist die verbindliche Abnahme der bestellten Ware, wie sie der Anbauvertrag vorsieht. Ob ein vergleichbarer Ansatz auch bei anderen Beschaffungsformen erhältlich wäre, wird hier nicht weiterverfolgt.

Modellierung der CO_2-Sequestrierung mit i-Tree Eco

Die Grössen- und Preistabelle bildet zugleich die Eingabebasis für i-Tree Eco. Modelliert wird eine einzelne Etappe mit drei Individuen je Art, insgesamt also 45 Bäume. Die in Kapitel 3.3 festgelegten zehn Etappen werden über einen Skalierungsfaktor von zehn auf den Gesamtbestand von 450 Bäumen hochgerechnet. Abweichend von den Qualitätsstufen nach JardinSuisse arbeitet i-Tree Eco mit dem Stammdurchmesser. Weitere Eingabeparameter wie Standort, Wetter- und Luftmessstation waren zu ergänzen, auf deren Aufzählung wird verzichtet.

Mit dem Forecast-Modul lassen sich Wachstum und Sequestrierung über die Zeit simulieren. Berechnet wurden drei Auswertungszeitpunkte: die zwölfjährige Vorpflanzungsdauer, die Referenz-Nutzungsdauer des Gebäudes von sechzig Jahren sowie deren Summe von zweiundsiebzig Jahren (vgl. Anhang 5 und 6). Die Ergebnisse weist i-Tree Eco in Kilogramm Kohlenstoff aus. Für die weitere Verwendung werden sie gemäss Kapitel 2.4.1 mit dem Faktor 3.67 in Kohlenstoffdioxid überführt. Da Kohlenstoffdioxid nach Kapitel 2.8 den Treibhauspotenzialfaktor eins aufweist, entsprechen die Mengen unmittelbar CO_2-eq.

Während der zwölf Jahre der Vorpflanzung wächst der Kohlenstoffspeicher des Bestandes von 2.0 auf 24.9 Tonnen, die jährliche Sequestrierung steigt von 0.8 auf 3.1 Tonnen Kohlenstoff. Kumuliert werden in dieser Zeit 22.9 Tonnen Kohlenstoff oder 84 Tonnen CO_2-eq gebunden. Die Blattfläche nimmt von 1'410 auf 5'870 Quadratmeter zu. Tabelle 10 fasst zusammen, was die Vorpflanzung in zwölf Jahren aufbaut.

Grösse	Einheit	Jahr 0	Jahr 12	Faktor
Kohlenstoffspeicher im Bestand	t C	2.0	24.9	12.5
entspricht CO_2	t CO_2	7.3	91.3	12.5
Sequestrierung, jährlicher Fluss	t C/Jahr	0.8	3.1	3.8
entspricht CO_2	t CO_2/Jahr	3.0	11.4	3.8
Baumbiomasse, Trockenmasse	t	4.1	50	12.2
Blattbiomasse	kg	104	428	4.1
Blattfläche	m²	1’410	5’870	4.2
Blattfläche je Baum	m²	3.1	13.0	4.2
Kumuliert gebundener Kohlenstoff, Jahre 1–12	t C		22.9	
entspricht CO_2-eq	t CO_2		84	

Tabelle 10: Was die Vorpflanzung in zwölf Jahren aufbaut (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung)

Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt sich der zentrale Befund der Modellierung. Ein Bestand aus Jungbäumen bindet über sechzig Jahre 1'626 Tonnen CO_2, ein vorgepflanzter Bestand über zweiundsiebzig Jahre 2'254 Tonnen. Die Differenz von 628 Tonnen entspricht einer Zunahme um 38.6 Prozent (Tabelle 11). Aufschlussreich ist deren Herkunft (Tabelle 12): Lediglich 84 Tonnen oder dreizehn Prozent entfallen auf die Bindung während der Aufzucht. Die verbleibenden 544 Tonnen oder siebenundachtzig Prozent entstehen daraus, dass der Baum die Nutzungsphase in einem produktiveren Abschnitt seiner Wachstumskurve durchläuft. Der ökologische Hebel liegt damit nicht in der zusätzlichen Aufzuchtzeit, sondern in der Grösse des Baumes im Zeitpunkt der Pflanzung. Daraus folgt zugleich eine Abgrenzung. Ein zugekaufter Schattenbaum derselben Dimension erbringt dieselbe Sequestrierungsleistung, denn er ist andernorts durch dieselbe Wachstumsphase gegangen. Die Vorpflanzung erzeugt den ökologischen Vorteil somit nicht selbst, sie ist der Weg, die dafür massgebende Pflanzgrösse zu günstigeren Konditionen und mit gesicherter Artenwahl verfügbar zu machen. Die eigentliche Unterscheidung zwischen den beiden Beschaffungsformen verlagert sich damit auf die ökonomische Ebene, die in der nachfolgenden Kapitalisierung untersucht wird.

Kennwert	Einheit	60 Jahre ohne Vorpflanzung	60 Jahre mit Vorpflanzung	Differenz
Kumulierte CO_2-Sequestrierung	t CO_2	1’626	2’254	628
Kohlenstoffspeicher am Ende	t C	446	617	171
CO_2-Speicher am Ende	t CO_2	1’634	2’261	627
Baumbiomasse am Ende	t	891	1’233	342
Blattfläche am Ende	m²	71’990	90’990	19’000
Relative Zunahme der Sequestrierung	%			38.6%

Tabelle 11: Mehrwert der Betrachtung über 60 Jahre mit und ohne Vorpflanzung (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung)

Bestandteil	**Einheit**	**t CO_2**	**Anteil**
Sequestrierung während der Vorpflanzung, Jahre 1–12	t CO_2	84	13 %
Vorsprung auf der Wachstumskurve, Jahre 13–72	t CO_2	544	87 %
Total Mehrwert	t CO_2	628	100 %

Tabelle 12: Herkunft des Mehrwerts (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung)

Kapitalisierung mittels DCF

Die bisher hergeleiteten Grundlagen, namentlich die Baumartenauswahl, die Grössen- und Preistabelle, die Entscheide zur Vorpflanzungsstrategie und zum Anbauvertrag sowie die modellierte Sequestrierungsleistung, werden in einer Barwertrechnung zusammengeführt. Verwendet wird dafür eine aus der Immobilienbewertung stammende Discounted-Cashflow-Tabelle, die für den vorliegenden Zweck an mehreren Stellen angepasst werden musste.

Als Zeitachse dienen nicht die drei Auswertungszeitpunkte der Sequestrierungsmodellierung, sondern die zehn Etappen der Vorpflanzungsstrategie. Je Etappe werden zwei Grössen ermittelt. Die Beschaffungskosten ergeben sich aus dem mittleren Einheitspreis multipliziert mit der Anzahl Bäume der Etappe. Die während der zwölfjährigen Vorpflanzung aufgebaute Sequestrierungsleistung wird mit dem Satz der Lenkungsabgabe bewertet und als vermiedener Aufwand geführt, da jede gebundene Tonne CO_2 nicht anderweitig kompensiert werden muss. Die Differenz beider Grössen wird über alle Etappen hinweg auf den heutigen Zeitpunkt diskontiert und ergibt den Barwert der jeweiligen Strategie.

Der Rechnung liegt eine konstante Teuerung von einem Prozent zugrunde. Diskontiert wird mit drei Prozent, zusammengesetzt aus einem Kapitalisierungssatz von zwei Prozent und der genannten Teuerung. Da es sich um einen nominalen Satz handelt, werden auch die Zahlungsströme nominal geführt, also mit Teuerung fortgeschrieben.

Um die Wirkung der zentralen Annahmen zu prüfen, werden zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die sich ausschliesslich auf die Barwertrechnung beziehen. Die erste variiert den Diskontsatz um jeweils einen Prozentpunkt nach oben und unten. Die zweite betrifft die Höhe der Lenkungsabgabe. Zwischen 2014 und 2022 stieg diese von 36 auf 120 Franken je Tonne CO_2 und damit um 233 Prozent, eine weitere Erhöhung sieht die Gesetzgebung derzeit nicht vor (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2026, S. 4). Angesichts sich verschärfender Klimaregulierung wird diese Steigerung linear auf die vierzehn Jahre bis zum Bezugsjahr 2040 übertragen, woraus sich ein Satz von rund 600 Franken je Tonne ergibt. Analog zum Vorgehen bei den Erstellungsemissionen, bei denen der Richtwert des Bezugsjahres 2040 einheitlich für sämtliche Etappen massgebend ist, wird auch dieser Satz als durchschnittliche Bezugsgrösse konstant über alle Etappen angesetzt und wie die übrigen Zahlungsströme nominal mit der Teuerung fortgeschrieben.

Mit dem so aufgebauten Modell lässt sich die eingangs formulierte Frage beantworten, nämlich ob die CO_2-Sequestrierung einen Beitrag zur Verringerung der Erstellungsemissionen leistet, wie sich die kapitalisierten Gesamtkosten gegenüber der herkömmlichen Beschaffung von Jungbäumen verhalten und welche weiteren Wirkungen sich aus einer Vorpflanzungsstrategie ergeben.

Grenzen des Modells

Die im Verlauf dieses Kapitels an Ort und Stelle offengelegten Vereinfachungen werden hier nicht wiederholt. Darüber hinaus bestehen folgende Einschränkungen. Beim Wachstums- und Sequestrierungsmodell starten sämtliche Bäume mit identischen Ausgangswerten, die artspezifische Differenzierung entsteht erst über die im i-Tree Eco Programm hinterlegten Modelle. Standortfaktoren wie Wurzelraum, Bauten im Untergrund, Konkurrenz innerhalb von Baumgruppen sowie die Pflegequalität bleiben unberücksichtigt.

Beim Kostenmodell bilden die erhobenen Preise eine Momentaufnahme ab, Pflege und Ersatzpflanzungen nach dem Versetzen sind nicht Bestandteil der Rechnung.

3.5 Ergebnisse

Ökologisches Ergebnis: Beitrag der Sequestrierung

Den Ausgangspunkt bildet der in Kapitel 3.4 hergeleitete Kernbefund der Modellierung. Die Vorpflanzung steigert die Sequestrierungsleistung des Bestandes von 1'626 auf 2'254 Tonnen CO_2 und damit um 628 Tonnen oder 38.6 Prozent, wobei siebenundachtzig Prozent dieser Mehrbindung nicht aus der Aufzucht selbst, sondern aus dem produktiveren

Wachstumsabschnitt nach dem Versetzen stammen. Das Verhältnis dieser Mengen zu den Erstellungsemissionen des Gebietes zeigt Tabelle 13.

Kennwert	Einheit	Wert	Anteil an Erstellungsemissionen
Erstellungsemissionen Areal, 60 Jahre	t CO_2-eq	47’520	
Ohne Vorpflanzung, 60 Jahre	t CO_2	1’626	3.42 %
Mit Vorpflanzung, 60 Jahre + 12 Jahre	t CO_2	2’254	4.74 %
Beitrag der Vorpflanzung	t CO_2	628	1.32 %
davon während der Vorpflanzungsphase selbst	t CO_2	84	0.18 %

Tabelle 13: CO_2-Bindung der Beschaffungsstrategien im Verhältnis zu den massgebenden Erstellungsemissionen (Daten: i-Tree Eco; eigene Berechnung)

Gemessen an den Erstellungsemissionen von 47'520 Tonnen CO_2-eq entsprechen die während der zwölfjährigen Vorpflanzung gebundenen 84 Tonnen einem Anteil von 0.18 Prozent, die gesamte Mehrbindung von 628 Tonnen über zweiundsiebzig Jahre erreicht 1.32 Prozent. Der Beitrag der CO_2-Sequestrierung zur Verringerung der Erstellungsemissionen ist damit messbar, aber marginal.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der zugrunde gelegte Richtwert Erstellung 2040 von 6 Kilogramm CO_2-eq je Quadratmeter Energiebezugsfläche nach Kapitel 3.3 dem heute ambitionierten Anforderungsniveau entspricht, während der fortgeschriebene Durchschnittswert des Gebäudeparks für die Erstellung bei 11 Kilogramm liegt. Bei Emissionen auf diesem Niveau reduzierte sich der relative Anteil der Sequestrierung nochmals auf rund 0.10 beziehungsweise 0.72 Prozent. Der geringe Beitrag erweist sich damit als unabhängig vom unterstellten Emissionsniveau.

Ökonomisches Ergebnis: Kapitalisierte Kosten

Der Barwert der herkömmlichen Beschaffung von Jungbäumen beträgt 136'313 Franken oder 303 Franken pro Baum. Die Vorpflanzung führt zum Bruttolistenpreis zu einem Barwert von 1'253'347 Franken, mit dem Anbauvertrag zu 875'305 Franken, was 2'785 beziehungsweise 1'945 Franken pro Baum entspricht. Tabellen 14, 15 und 16 stellen die drei Szenarien einander gegenüber, die vollständigen Rechnungen sind in Anhang 7 bis 9 abgelegt.

	Jungbaum 12/14 ohne Vorpflanzung	Schattenbaum Brutto mit Vorpflanzung	Schattenbaum Netto (Anbauvertrag)
Einheitspreis je Baum (CHF)	450	4’160	2’912
Bäume total / je Etappe (Stk.)	450 / 45	450 / 45	450 / 45
CO_2-Sequestrierung Vorpflanzung je Etappe (t)	0.00	8.4	8.4
CO_2-Sequestrierung Bestand, 10 Etappen (t)	0.0	84	84
Lenkungsabgabe (CHF/t CO_2)	–	120	120

Tabelle 14: DCF Modellannahmen

	Jungbaum 12/14	Schattenbaum Brutto	Schattenbaum Netto
Beschaffungskosten zu Preisen 2026 (CHF)	202’500	1’872’000	1’310’400
Beschaffungskosten nominal, mit Teuerung (CHF)	245’042	2’265’276	1’585’693
Barwert Beschaffungskosten (CHF)	136’313	1’260’141	882’099
Barwert Sequestrierungsleistung (CHF)	0	-6’793	-6’793
Barwert der Beschaffungsstrategie (CHF)	136’313	1’253’347	875’305
Barwert je Baum (CHF)	302.92	2’785.22	1’945.12
Anteil Sequestrierung am Kosten-Barwert	–	-0.54%	-0.78%

Tabelle 15: DCF-Ergebnisse im Basisfall

Mehr-Barwert Vorpflanzung Netto vs. Jungbaum (CHF)	738’992
Mehr-Barwert je Baum (CHF)	1’642
Faktor Netto / Jungbaum	6.42
Anbauvertragseffekt: Barwert-Entlastung Brutto − Netto (CHF)	378’042
Anbauvertragseffekt in % des Barwerts der Beschaffungskosten	30%

Tabelle 16: DCF-Paarvergleiche (Basisfall)

Massgebend für den Vergleich ist das Netto-Szenario, da der Anbauvertrag gemäss Kapitel 3.4 die gängigste und gewählte Beschaffungsform darstellt. Gegenüber der Jungbaumbeschaffung ergibt sich ein Mehr-Barwert von 738'992 Franken oder 1'642 Franken pro Baum. Geliefert wird dafür nicht ein dreimal verschulter Jungbaum der Qualitätsstufe 12/14, sondern ein fünfmal verschulter Baum der Qualitätsstufe 35/40 bis 40/45, der bereits als Schattenbaum bezeichnet werden kann. Er ist dem konventionell beschafften Baum um zwölf Wachstumsjahre voraus, und dies unter Baumschulbedingungen und nicht unter den erschwerten Standortbedingungen des urbanen Raums. Bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebietes von 132'000 Quadratmetern entspricht der Mehr-Barwert rund 5.60 Franken pro Quadratmeter.

Der Anbauvertrag schlägt unmittelbar auf den Barwert durch. Da der Rabatt von dreissig Prozent auf sämtliche Etappenzahlungen wirkt, sinkt der Barwert im gleichen Verhältnis, nämlich um 378'042 Franken gegenüber dem Bruttoszenario. Nicht im Barwert

abgebildet ist eine weitere Wirkung des Vertrags. Das Kulturrisiko der zwölfjährigen Aufzucht verbleibt gemäss Kapitel 3.4 bei der Baumschule und nicht bei der Entwicklerin.

Die monetarisierte Sequestrierungsleistung trägt demgegenüber wenig zum Ergebnis bei. Mit einem Barwert von 6'793 Franken entlastet sie die Beschaffungskosten um 0.54 Prozent im Brutto- beziehungsweise 0.78 Prozent im Netto-Szenario.

Sensitivitätsanalysen: Robustheit

Die Variation des Diskontsatzes um einen Prozentpunkt verschiebt die Barwerte aller drei Szenarien um rund plus 21 Prozent bei 2.0 beziehungsweise minus 17 Prozent bei 4.0 Prozent. Der Diskontsatz ist damit der einflussreichste Parameter der Rechnung. Dies lässt sich aus der langen Vorlaufzeit erklären. Die erste Zahlung fällt erst in Periode elf an, wodurch sich Zinseffekte stärker entfalten als in einer Immobilienbewertung mit laufenden Erträgen ab der ersten Periode. Auf den Vergleich der Strategien bleibt dies ohne Einfluss. Da die Zahlungszeitpunkte in allen Szenarien identisch sind, verändert der Diskontsatz nur die Niveaus, während die Rangfolge und das Verhältnis der Szenarien, namentlich der Faktor von 6.42 zwischen Netto- und Jungbaumszenario, in jeder Variante bestehen bleiben. Tabellen 17 bis 19 fassen die Ergebnisse beider Sensitivitätsanalysen zusammen.

	Basis (Diskont 3.0 %, Abgabe 120 CHF/t)	SA Diskont +1.0 %-Pkt. (4.0 %)	SA Diskont −1.0 %-Pkt. (2.0 %)	SA Lenkungsabgabe (600 CHF/t)
Barwert (CHF)	136’313	113’236	164’901	136’313
Barwert je Baum (CHF, 450 Stk.)	303	252	366	303
Δ zur Basis (CHF)	-	-23’077	28’588	0
Δ zur Basis (%)	-	-16.9%	21.0%	-

Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse, Szenario 1: Jungbaum 12/14 ohne Vorpflanzung

	Basis (Diskont 3.0 %, Abgabe 120 CHF/t)	SA Diskont +1.0 %-Pkt. (4.0 %)	SA Diskont −1.0 %-Pkt. (2.0 %)	SA Lenkungsabgabe (600 CHF/t)
Barwert (CHF)	1’253’347	1’041’164	1’516’199	1’226’174
Barwert je Baum (CHF, 450 Stk.)	2’785	2’314	3’369	2’725
Δ zur Basis (CHF)	-	-212’183	262’852	-27’174
Δ zur Basis (%)	-	-16.9%	21.0%	-2.2%

Tabelle 18: Sensitivitätsanalyse, Szenario 2: Schattenbaum Brutto mit Vorpflanzung (ohne Anbauvertrag)

	Basis (Diskont 3.0 %, Abgabe 120 CHF/t)	SA Diskont +1.0 %-Pkt. (4.0 %)	SA Diskont −1.0 %-Pkt. (2.0 %)	SA Lenkungsabgabe (600 CHF/t)
Barwert (CHF)	875’305	727’122	1’058’874	848’131
Barwert je Baum (CHF, 450 Stk.)	1’945	1’616	2’353	1’885
Δ zur Basis (CHF)	-	-148’183	183’569	-27’174
Δ zur Basis (%)	-	-16.9%	21.0%	-3.1%

Tabelle 19: Sensitivitätsanalyse, Szenario 3: Schattenbaum Netto mit Vorpflanzung (Anbauvertrag, 70 % des Bruttopreises)

Die Sensitivität der Lenkungsabgabe wirkt asymmetrisch, da das Jungbaumszenario mangels anrechenbarer Sequestrierungsleistung von der Abgabenhöhe unabhängig ist. Auch für die Vorpflanzung bleibt die Wirkung begrenzt. Die Verfünffachung des Satzes auf 600 Franken pro Tonne senkt den Barwert des Netto-Szenarios um 27'174 Franken oder 3.1 Prozent. Die Barwert-Entlastung durch den Anbauvertrag von 378'042 Franken übersteigt die Wirkung dieser Abgabenerhöhung damit um rund das Vierzehnfache. Innerhalb der untersuchten Bandbreiten verändert keiner der beiden Parameter das Verhältnis der Beschaffungsstrategien zueinander.

Synthese: Verschiebung der Aussage

Die Verbindung der ökologischen und der ökonomischen Ergebnisse ergibt eine weitere Kennzahl. Setzt man den Mehr-Barwert von 738'992 Franken ins Verhältnis zu den während der Vorpflanzung gebundenen 84 Tonnen, resultieren implizite Vermeidungskosten von rund 8'800 Franken pro Tonne CO_2. Dies entspricht rund dem Dreiundsiebzigfachen der geltenden Lenkungsabgabe von 120 Franken pro Tonne.

Die Mehrkosten von 1'642 Franken pro Baum stehen damit nicht in erster Linie der Kohlenstoffbindung während der Aufzucht gegenüber, sondern dem gelieferten Grössenvorsprung. Siebenundachtzig Prozent der gesamten Mehrbindung entstehen erst aus diesem Vorsprung während der Nutzungsphase, und die Blattfläche des auf 450 Bäume hochgerechneten Bestandes wächst während der Vorpflanzung von 1'410 auf 5'870 Quadratmeter. Am Tag der Umpflanzung steht dem Entwicklungsgebiet somit eine Beschattungs- und Anpassungsleistung zur Verfügung, die bei konventioneller Beschaffung erst nach zwölf Jahren unter erschwerten urbanen Standortbedingungen erreicht würde.

Die Ergebnisse verschieben damit die Begründung der Vorpflanzungsstrategie. Ihr quantifizierbarer Nutzen liegt weniger in der monetarisierten Sequestrierungsleistung während der Aufzucht als in der Baumqualität, der Sofortwirkung und darin, was der etablierte

Bestand künftig sequestriert. Die Bewertung dieser über das Kapitalisierungsmodell hinausreichenden Wirkungen erfolgt in Kapitel 4.

4. Schlussbesprechung

4.1 Fazit

Ausgangspunkt der Arbeit bildete das Entwicklungsziel, die Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg-Windisch klimaneutral auszurichten, sowie die Einschätzung des Beurteilungsgremiums, dass dieses Ziel selbst mit optimierten Bauweisen nur durch zusätzliche Kompensationsmassnahmen erreichbar ist. Vor diesem Hintergrund untersuchte die Arbeit die Forschungsfrage, wie sich Vorpflanzung und konventionelle Beschaffung von Hochstammbäumen hinsichtlich kumulierter CO_2-Sequestrierung und kapitalisierter Gesamtkosten über den Entwicklungs- und Realisierungszeitraum einer Arealentwicklung am Beispiel der Testplanung Brugg/Windisch unterscheiden. Die Antwort gliedert sich entlang der ökologischen und der ökonomischen Dimension der Forschungsfrage.

In der ökologischen Dimension steigert die Vorpflanzung die Sequestrierungsleistung des Bestandes von 450 Bäumen von 1'626 auf 2'254 Tonnen CO_2 und damit um 628 Tonnen oder 38.6 Prozent. Die Werte umfassen beim konventionell beschafften Bestand die sechzigjährige Nutzungsphase, beim vorgepflanzten Bestand zusätzlich die zwölfjährige Vorpflanzung. Von der Mehrbindung entfallen dreizehn Prozent auf die Aufzucht selbst, 87 Prozent entstehen aus dem Grössenvorsprung während der Nutzungsphase. Gemessen an den massgebenden Erstellungsemissionen von 47'520 Tonnen CO_2-Äquivalenten entsprechen die während der Vorpflanzung gebundenen 84 Tonnen einem Anteil von 0.18 Prozent, die gesamte Mehrbindung erreicht 1.32 Prozent. Die CO_2-Sequestrierung des Baumbestandes leistet damit einen messbaren, jedoch marginalen Beitrag zur Verringerung der Erstellungsemissionen und vermag die vom Beurteilungsgremium festgestellte Kompensationslücke nicht zu schliessen.

In der ökonomischen Dimension beträgt der Barwert der konventionellen Beschaffung von Jungbäumen der Qualitätsstufe 12/14 insgesamt 136'313 Franken oder 303 Franken je Baum. Die Vorpflanzung führt zum Bruttolistenpreis zu 1'253'347 Franken, mit dem Anbauvertrag zu 875'305 Franken, was dem 9.2-fachen beziehungsweise 6.4-fachen der Jungbaumbeschaffung entspricht. Der massgebende Mehr-Barwert des Netto-Szenarios beläuft sich auf 738'992 Franken, was 1'642 Franken je Baum oder rund 5.60 Franken je Quadratmeter Energiebezugsfläche entspricht.

Als wirksamster Hebel zur Kostensenkung erweist sich der Anbauvertrag. Er reduziert den Barwert der Vorpflanzung gegenüber dem Bruttoszenario um 378'042 Franken oder rund dreissig Prozent und macht die Strategie damit erst wirtschaftlich tragfähig. Zugleich

überträgt er das Kulturrisiko der zwölfjährigen Aufzucht auf die Baumschule und vermeidet eine Kapitalbindung während der Vorproduktion, da die Zahlung erst bei Lieferung erfolgt. Die Wahl der Beschaffungsform beeinflusst das Ergebnis damit wesentlich stärker als die monetarisierte Sequestrierungsleistung, welche die Beschaffungskosten um lediglich 0.54 Prozent im Brutto- beziehungsweise 0.78 Prozent im Netto-Szenario entlastet.

Die ökonomischen Befunde erweisen sich in beiden Sensitivitätsanalysen als robust. Die Variation des Diskontsatzes um einen Prozentpunkt verschiebt die Barwerte um plus 21 beziehungsweise minus 17 Prozent, lässt Rangfolge und Verhältnis der Szenarien jedoch unverändert. Selbst eine Verfünffachung der Lenkungsabgabe auf 600 Franken pro Tonne verändert den Barwert der Netto-Strategie nur um 3.1 Prozent. Beim geltenden Abgabesatz ist die Sequestrierungsleistung für den Beschaffungsentscheid nicht ausschlaggebend.

Die Ergebnisse lassen sich auf grossflächige Arealentwicklungen mit einer Projektlaufzeit von mindestens zehn Jahren und einem entsprechend grossen Bedarf an Hochstammbäumen übertragen. Vorausgesetzt sind eine langfristig orientierte Eigentümerschaft, ein ausreichender Planungsvorlauf für die Vertragsvergabe sowie Baumschulen, die als Vertragspartner für eine mehrjährige Vorproduktion zur Verfügung stehen. Die absoluten Werte bleiben projektspezifisch, die Grössenordnungen und Verhältnisse der Strategien sind übertragbar.

Die ursprüngliche Grundidee, die Bäume auf entwicklungsnahem Landwirtschaftsland in einer eigens anzulegenden Baumschule aufzuziehen, wurde aufgrund der Interviewergebnisse zugunsten des Anbauvertrags verworfen. Damit entfallen die Flächen- und Opportunitätskosten, und die Pflanzungs-, Pflege- und Kapitalbindungskosten der Aufzucht gehen im vertraglich vereinbarten Nettopreis auf. Die Umpflanzung an den definitiven Standort fällt in beiden Strategien gleichermassen an und ist für den Vergleich deshalb nicht ergebnisrelevant.

4.2 Diskussion

Die Ergebnisse stellen die Begründung der Vorpflanzungsstrategie auf eine andere Grundlage. Angetreten als Beitrag zur Klimabilanz der Gebietsentwicklung, rechtfertigt sie sich in der Gesamtschau nicht über die CO_2-Bindung, sondern über die gesicherte Verfügbarkeit und die sofortige Wirkung für Nutzende und Stadtklima, zu überschaubaren Mehrkosten. Deren Gewicht ist gering: 87 Prozent der Mehrbindung entstehen erst

nach dem Versetzen, und die Mehrkosten pro gebundene Tonne CO_2 übersteigen die geltende Lenkungsabgabe um ein Vielfaches. Als reines Klimaschutzinstrument wäre die Vorpflanzung ineffizient. Die massgebenden Effekte liegen an anderen als den untersuchten Orten, nämlich in der Qualität der Vorzucht, in der Wertentwicklung für die Immobilien sowie in Kühlung und Beschattung. Kenngrösse dieser Leistungen ist nicht der gebundene Kohlenstoff, sondern die Blattfläche, die während der Vorpflanzung von 1'410 auf 5'870 Quadratmeter anwächst. Der ökologische Nutzen dürfte damit weniger in der Klimabilanz als in der Anpassungsleistung liegen, deren Quantifizierung ausserhalb der Abgrenzung dieser Arbeit lag.

Zu präzisieren ist, was der Kostenvergleich misst. Die beiden Strategien liefern zum Zeitpunkt des Einbaus nicht dasselbe Produkt. Der konventionellen Beschaffung eines Jungbaums der Stufe 12/14 steht die Lieferung eines Schattenbaums der Stufe 35/40 gegenüber, der dem Jungbaum um zwölf Wachstumsjahre voraus ist. Der Mehr-Barwert von 1'642 Franken pro Baum ist deshalb nicht als Mehrpreis für dieselbe Leistung zu lesen, sondern als Preis dafür, dass die Beschattungs- und Aufenthaltsqualität nicht erst nach Jahren des Anwachsens unter erschwerten urbanen Standortbedingungen entsteht, sondern bereits ab Nutzungsbeginn zur Verfügung steht.

Damit steht die Strategie in einem Zielkonflikt mit der Literatur, die kleineren Pflanzgrössen geringere Anwachsrisiken und eine nachhaltigere Standortanpassung attestiert und ein Umdenken gegenüber Grossbaumpflanzungen fordert. Dieser Konflikt lässt sich nicht auflösen, sondern nur bewusst eingehen. Wer die sofortige Beschattungs- und Aufenthaltsqualität des Schattenbaums will, akzeptiert das erhöhte Anwachsrisiko der grossen Pflanzgrösse. Massgebend für dessen Begrenzung ist gemäss Literatur und Expertenmeinung die Pflege nach dem Versetzen. Insbesondere ist eine gesicherte Bewässerung in den ersten Standjahren entscheidend, wobei durch die Witterung in diesen Jahren ein Restrisiko bleibt. Diese Anwachspflege ist in beiden Strategien nicht Teil der Barwertrechnung. Sie fällt jedoch bei der grösseren Pflanzgrösse intensiver aus und relativiert den ausgewiesenen Vorsprung der Vorpflanzung zusätzlich zum Mehrpreis in geringem Mass.

In der Bewertung sind die Wirkungen des Anbauvertrags, die über den kapitalisierten Preisvorteil hinausreichen, zu würdigen. Das Kulturrisiko der zwölfjährigen Aufzucht liegt bei der Baumschule, und die Verfügbarkeit von 450 Bäumen in definierter Art und Qualität ist gesichert. Der heute fixierte Preis schafft Sicherheit über den langen Beschaffungszeitraum, und das Kapital des Entwicklers bleibt bis zur Lieferung frei, da die

Zahlung erst dann erfolgt. Diese Wirkungen sind im Barwert nicht abgebildet, sprechen jedoch zusätzlich für die gewählte Beschaffungsform. Dasselbe gilt für die Wertwirkung des etablierten Baumbestandes auf die Immobilien selbst. Die 3-30-300-Regel verknüpft sichtbares, nutzbares Grün mit Gesundheit und Standortattraktivität. Zusätzlich gilt ein durchgrüntes Umfeld als verkaufs- und vermietungsrelevant, auch wenn sich dieser Wert bislang kaum belastbar beziffern lässt.

Kritisch zu reflektieren ist die Bewertungsgrundlage der Sequestrierung. Die Norm bilanziert Erstellung, Betrieb und Mobilität über die Referenz-Nutzungsdauer von 60 Jahren. Für die vorliegende Untersuchung gilt konsequenterweise derselbe Betrachtungsrahmen der Kompensationsmassnahmen. Beim vorgepflanzten Bestand kommt die während der zwölfjährigen Aufzucht erbrachte Bindung hinzu. Ob eine solche der Nutzungsphase vorgelagerte Leistung in einer Arealbilanz angerechnet werden dürfte, ist jedoch ebenso ungeregelt wie die Anrechnung biogener Speicherung insgesamt. Die Bewertung über den Satz der Lenkungsabgabe ist vor diesem Hintergrund eine Behelfskonstruktion mangels Marktbewertung, eine kalkulatorische Anrechnung ohne Zahlungsstrom, da die Abgabe kein handelbares Zertifikat darstellt. Die Gegenüberstellung mit den Erstellungsemissionen bleibt entsprechend eine Einordnung der Grössenordnung und keine Kompensationsrechnung.

Auch das methodische Vorgehen weist Grenzen auf. Die Preisentwicklung beider Szenarien ist an die allgemeine Teuerung von einem Prozent gekoppelt. Reale Baumpreise schwanken jedoch mit Angebot und Nachfrage, weshalb die künftigen Marktpreise der bis 2055 gestaffelten Jungbaumkäufe von dieser Indexannahme abweichen können. Die Preisbasis beruht auf gemittelten Listenpreisen von vier Baumschulen, und die Referenzgrösse 12/14 des Jungbaumszenarios ist eine gesetzte Annahme, keine Marktkonvention. Würde ein grösserer und damit teurerer Baum als Referenz gewählt, verringerte sich der Kostenunterschied zur Vorpflanzung, die ausgewiesenen Faktoren beschreiben mit der günstigsten sinnvollen Referenz somit den grösstmöglichen Abstand. Schliesslich beruht die Untersuchung auf einem einzelnen Fallbeispiel, weshalb die absoluten Werte projektspezifisch bleiben.

Diesen Einschränkungen stehen drei Beobachtungen gegenüber, welche die Belastbarkeit der Ergebnisse stützen. Erstens sind die zentralen Annahmen so gesetzt, dass sie die Befunde eher unter- als überzeichnen. Dass der Beitrag gering ausfällt, zeigt sich bereits beim ambitionierten Richtwert von sechs Kilogramm. Bei höheren Emissionswerten wäre er noch kleiner. Der Kostenvergleich stützt sich zudem auf die günstigste Jungbaum-

Variante als Referenz, womit der Abstand so gross wie möglich ausgewiesen wird. Die zentralen Aussagen halten damit auch unter abweichenden Annahmen. Zweitens stellen Mehrkosten von rund 5.60 Franken pro Quadratmeter Energiebezugsfläche die Machbarkeit im Massstab der Gesamtentwicklung nicht in Frage, die Umsetzungshürde ist nicht ökonomischer, sondern organisatorischer Natur. Drittens konvergieren die beiden unabhängig voneinander hergeleiteten Wachstumspfade. Die aus der i-Tree-Biomasseentwicklung zurückgerechnete Grösse nach zwölf Jahren entspricht mit der Stufe 35/40 exakt dem Ergebnis des interviewbasierten Phasenmodells für dieselbe Dauer. Richtung und Grössenordnung der Befunde erweisen sich damit als belastbar.

4.3 Ausblick

Aus den Grenzen der Untersuchung ergeben sich Ansatzpunkte für die weitere Forschung. Am naheliegendsten ist die Monetarisierung jener Leistungen, die diese Arbeit bewusst ausgeklammert hat. Kühlung, Beschattung und Aufenthaltsqualität liessen sich über Ansätze der Ökosystemleistungsbewertung quantifizieren und würden das ökonomische Bild der Vorpflanzung voraussichtlich zu deren Gunsten verschieben. In dieselbe Richtung weist die Wertwirkung durchgrünter Quartiere auf die Immobilien. Ob sich die Versorgungsrichtwerte der 3-30-300-Regel in Miet- und Kaufpreisen niederschlagen, wäre empirisch zu prüfen, etwa über hedonische Preisansätze. Auf der ökologischen Seite würde die Entwicklung stadtbaumspezifischer Wachstums- und Biomassemodelle die eingeschränkte Übertragbarkeit waldbasierter Modelle überwinden.

Auf regulatorischer Ebene stellt sich die Anrechnungsfrage in einem grösseren Rahmen. Die vorliegende Arbeit hat die Sequestrierungsleistung mangels Marktbewertung mit dem Satz der Lenkungsabgabe bewertet, einer Behelfskonstruktion. Grundsätzlich zu klären ist, welchen Platz biogene Senken in der Bilanzierung von Negativemissionen einnehmen sollen, die für das Netto-Null-Ziel unabdingbar sind. Für die Arealebene bedingt dies ein Anrechnungsregime, das den Betrachtungsrahmen analog zur Referenz-Nutzungsdauer festlegt und die zeitliche Begrenztheit der Speicherung regelt. Erst ein solches Regime würde aus der kalkulatorischen Einordnung dieser Arbeit eine anerkannte Bilanzposition machen.

Für die Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg-Windisch weisen die Ergebnisse den Weg zur Umsetzung. Standort, Anzahl und Baumartenauswahl sind frühzeitig mit den entsprechenden Fachexpert:innen zu klären, um im Rahmen eines Anbauvertrags genügend Vorlauf für das Wachstum zu erhalten. Die der Arbeit zugrunde liegende Annahme von 450 Hochstammbäumen sowie die über die Bewertungsmatrix getroffene

Artenauswahl sind dabei mit den projekt- und ortsbezogenen Anforderungen zu präzisieren. Ergänzend kann eine Mischung verschiedener Grössenstufen zur Risikostreuung geprüft werden.

Die Vorpflanzung von Hochstammbäumen ist kein Instrument der Klimabilanz, ihr Wert liegt im Doppelnutzen. Sie leistet einen kleinen Beitrag an die Klimaneutralität und einen grossen an die Klimaanpassung, indem etablierte Bäume mit entwickelter Blattfläche bereits ab Nutzungsbeginn wirksam sind. Für eine langfristig orientierte Eigentümerschaft ist sie damit weniger eine Kompensationsmassnahme als eine Investition in die Qualität und Resilienz des künftigen Stadtraums, zu Kosten, die im Massstab der Gesamtentwicklung nicht ins Gewicht fallen.

5. Literaturverzeichnis

Bachelet, D., Neilson, R. P., Hickler, T., Drapek, R. J., Lenihan, J. M., Sykes, M. T., Smith, B., Sitch, S., & Thonicke, K. (2003). Simulating past and future dynamics of natural ecosystems in the United States. *Global Biogeochemical Cycles*, *17*(2), 2001GB001508. https://doi.org/10.1029/2001GB001508

Bachmann, O. A. (2019). *Sind Eichen Klimawandel gerecht?* ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. https://doi.org/10.21256/zhaw-19211

Baumschule Lappen. (2015). *Der Katalog* (1. Aufl.). Baumschule Lappen.

Beckers, T., Klatt, J. P., Corneo, G., & Mühlenkamp, H. (2009). *Zeitliche Homogenisierung und Berücksichtigung von Risiko im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen*. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP). https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/bauing/professuren_institute/Infrastrukturwirtschaft_und-management/Forschung/Publikationen/2009/zeitliche_homogenisierung_und_beruecksichtigung_von_risiko_im_rahmen_von_wirtschaftlichkeitsuntersuchungen---v09.00_2009nov.pdf

Bruns Pflanzen Export GmbH & Co. KG. (2025). *Sortimentskatalog 2025/2026*. Bruns Pflanzen Export GmbH & Co. KG.

Bühler, S., & Saluz, A. G. (2024). Urban Forests in der Stadt von morgen. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen*, *175*(5), 256–261. https://doi.org/10.3188/szf.2024.0256

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2025a, September 22). *CO2-Abgabe: Für Unternehmen*. Bundesamt für Umwelt BAFU. https://www.bafu.admin.ch/de/co2-abgabe-unternehmen

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2025b, Oktober 1). *CO2-Abgabe*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). https://www.bafu.admin.ch/de/co2-abgabe-verteilung

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2026). *Emissionen von Treibhausgasen nach CO2-Gesetz und Übereinkommen von Paris*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).

https://www.bafu.admin.ch/dam/en/sd-web/YR0e2qmzJAZL/CO2_Publikation_2026-07_DE.pdf

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Ha, M. (mit Lee, H.). (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, … C. Péan, Hrsg.; First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Casanelles, J., Müller, S., Moretti, M., Tobias, S., Saluz, A. G., Heinrich, A., Tausendpfund, D., Krieger, M., & Schindler, A. (2021, Oktober 14). *Stadtbäume der Zukunft. Forschungsbericht des Vorprojekts zH Grün Stadt Zürich*. WSL Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ites-dam/MoKo/2024/22JAN2024_06_AndreaSaluz.pdf

Fahrländer, S., & Kloess, S. (2024). *Angewandte Immobilienökonomie* (2. erweiterte Auflage, Vols. 1–2). Schweizer Immobilienschätzer-Verband SIV.

Filippa, D., & Heine, J. (2026, Mai 15). *Vorauswahl Baum Qualität*.

Fischlin, A., Buchter, B., Matile, L., & Hofer, P. (2006). *CO2-Senken und -Quellen in der Waldwirtschaft – Anrechnung im Rahmen des Kyoto-Protokolls*.

https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/k6S6pvMnP818/co2-senken_und_-quelleninderwaldwirtschaft.pdf

GALK Strassenbaumliste. (2026, Mai 15). https://strassenbaumliste.galk.de/

Gardi, O., Schaller, G., Neuner, M., & Mack, S. (2016). Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen*, *167*(2), 90–97. https://doi.org/10.3188/szf.2016.0090

Gloor, S., & Göldi Hofbauer, M. (2018). Der ökologische Wert von Stadtbäumen bezüglich der Biodiversität. *Jahrbuch der Baumpflege*, 33–48.

Gloor, S., Taucher, A., & Rauchenstein, K. (2021). *Biodiversitätsindex 2021 für Stadtbäume im Klimawandel*. https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/web/de/umwelt-energie/natur/dokumente/stadtbaeume/biodiversitaetsindex-2021-fuer-stadtbaeume-im-klimawandel.pdf

GSBBW - SNKW, Schlussworkshop. (2026, Mai 12).

GSBBW - SNKW, Workshop 1. (2024, Oktober 23).

Gu, L., Hanson, P. J., Post, W. M., Kaiser, D. P., Yang, B., Nemani, R., Pallardy, S. G., & Meyers, T. (2008). The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased Cold Damage in a Warming World? *BioScience*, *58*(3), 253–262. https://doi.org/10.1641/B580311

JardinSuisse. (2025, Oktober 16). *Schweizer Qualitätsbestimmungen für Baumschulpflanzen und Stauden*. https://jardinsuisse.ch/de/fachbereiche/produktion-baumschule/angebote-und-projekte/qualitaetsbestimmungen/

Kanton Aargau, Stadt Brugg, Gemeinde Windisch, SBB AG, & BRUGG Real Estate. (2020). *Absichtserklärung zur gemeinsamen Gebietsentwicklung «Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch»*. https://www.stadtraumbahnhof.ch/assets/uploads/files/files/Beilage_2_Absichtserklaerung.pdf

Klein, D., & Schulz, C. (2023, Dezember). *Kohlenstoffspeicherung von Bäumen*. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb27_kohlenstoff_2023_rz_web_bf.pdf

Konijnendijk, C. C. (2023). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research*, *34*(3), 821–830. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z

Körner, C., Basler, D., Hoch, G., Kollas, C., Lenz, A., Randin, C. F., Vitasse, Y., & Zimmermann, N. E. (2016). *Where, why and how? Explaining the low-temperature range limits of temperate tree species*. https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1365-2745.12574

Krüssmann, G., Thon, Heinz. E., Wennemuth, G., Behren, V., Beitz, E., & Brückner, U. (1997). *Die Baumschule: Ein praktisches Handbuch für Anzucht, Vermehrung, Kultur und Absatz der Baumschulpflanzen* (6. Auflage). Parey bei Blackwell Wissenschafts-Verlag.

Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., & Pretzsch, H. (2017). *Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven*. https://doi.org/10.23765/afjz0002006

Nowak, D. J. (2021). *Understanding i-Tree: 2021 Summary of programs and methods*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. https://doi.org/10.2737/nrs-gtr-200-2021

Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, *116*(3), 381–389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

Planpartner. (2024, Juni 27). *GSBBW - Testplanung Programm*. https://www.stadtraumbahnhof.ch/assets/uploads/files/files/32508_13A_240627_Programm_TP.pdf

Planpartner. (2025, September 10). *GSBBW - Testplanung—Schlussbericht*. https://www.stadtraumbahnhof.ch/assets/uploads/files/files/32508_13A_250916_Bericht_inkl_A3_lq.pdf

Ramer, R., Aerni, S., Burkard, R., & Von Felten Küttel, S. (2017). *Wirkungsabschätzung zur CO2-Abgabe. Aktualisierung bis 2015* [Kurzbericht]. Ecoplan, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/qS4rKo7o3-kO/wirkungsabschaetzung-zur-co2-abgabe.pdf

Roloff, A., Gillner, S., Grundmann, B., Korn, S., & Pietzarka, U. (2013). *Bäume in der Stadt: Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken*. Verlag Eugen Ulmer.

Ronchi, S., Scholz, T., & Hof, A. (2016). Ökosystemdienstleistungen von Stadtbäumen in urban-industriellen Stadtlandschaften—Analyse, Bewertung und Kartierung mit Baumkatastern. *AGIT 2-2016: Journal für Angewandte Geoinformatik*, *2*, 462–471.

Schweizerischer Bundesrat. (2023, März 29). *Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 19.3639 Bourgeois vom 18. Juni 2019*. https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/76407.pdf

Schweizerischer Bundesrat. (2025). *Was heisst netto null für den Hochbau, und wie kann dieses Ziel erreicht werden? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 20.4135 Schaffner vom 24. September 2020*. https://cms.news.admin.ch/fileservice/sdweb-docs-prod-nsbcch-files/files/2025/08/19/a7de03a9-c4e3-4605-92b2-8476dd4fa37b.pdf

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. (2018). *SIA 142-604d—Testplanung: Wegleitung zur Ordnung*.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. (2025). *SIA 390-1_2025_Klimapfad Treibhausbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden*.

Senn, M., & Gsteiger, P. (2016). *Kantonale Beispiele zur Erhebung der CO2-Emissionen aus Gebäuden*. geo7 AG, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU). https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=49273&Load=true

Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch. (2026, August 2). *Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch—Entwicklung*. Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch. https://www.stadtraumbahnhof.ch/entwicklung

swr+. (2021). *Projektplan Gebietsentwicklung Stadtraum Bahnhof Brugg Windisch. Verständigungsdokument und Prozessplanung* (Version 1.4). https://www.stadtraumbahnhof.ch/dokumente

tbf Partner. (2026, Februar 26). *GSBBW - Synthese der Projektpartner*.

Umweltbundesamt Deutschland. (2026, Juli 31). *CO2-Äquivalent*. CO2-Äquivalent. https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/co2-aequivalent

Wilkes-Allemann, J., Bühler, S., & Kleinschroth, F. (2024). Urban Forestry als Teil der Baukultur: Utopie oder Realität? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, *175*(2), 84–86. https://doi.org/10.3188/szf.2024.0084

Zell, J. (2008). *Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren* [Freiburg im Breisgau]. https://www.researchgate.net/publication/29758000_Methoden_fur_die_Ermittlung_Modellierung_und_Prognose_der_Kohlenstoffspeicherung_in_Waldern_auf_Grundlage_permanenter_Grossrauminventuren

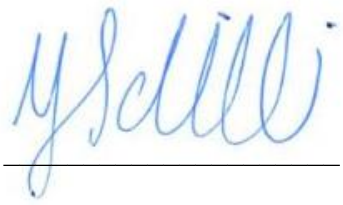
6. Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Mir ist bekannt, dass ich die volle Verantwortung für die Wissenschaftlichkeit des vorgelegten Textes selbst übernehme, auch wenn KI-Hilfsmittel eingesetzt und deklariert wurden. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Stellungnahme zu künstlicher Intelligenz

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurde Künstliche Intelligenz (KI) unterstützend eingesetzt. Konkret unterstützte KI bei der Recherche relevanter Literatur, bei der Überprüfung der Berechnungen und Auswertungen sowie bei der Strukturierung und Überarbeitung von Textentwürfen. Die inhaltliche Verantwortung sowie die wissenschaftliche Argumentation liegen vollständig beim Verfasser dieser Arbeit.

Niederrohrdorf, den 01.09.2026



Yannick Schibli

7. Anhang

Anhang 1	Übersicht Experteninterviews	S. 61
Anhang 2	Experteninterviews Transkription (A-H)	S. 62-95
Anhang 3	Bewertungsmatrix Baumartenauswahl	S. 96-97
Anhang 4	Grössen- und Preistabelle	S. 98-99
Anhang 5	i-Tree Eco Forecast Simulationen (15 Stück)	S.100-151
Anhang 6	Auswertung i-Tree Forecast Simulationen	S. 152
Anhang 7	DCF-Rechnungen (3 Stück)	S. 153-155
Anhang 8	DCF-Sensitivitätsanalysen (9 Stück)	S. 156-164
Anhang 9	Hauptvergleich Beschaffungsstrategien	S. 165