

Baumsubstrate richtig einbauen - technische Möglichkeiten der Kontrolle

Dr. Katharina Weltecke

Zusammenfassung

Im Straßenbereich haben sich bei Baumpflanzungen weitestgehend standardisierte Baumsubstrate durchgesetzt. Diese müssen sowohl die statischen Erfordernisse des Straßen- und Wegebbaus als auch die Ansprüche der Bäume an ihren Wurzel Lebensraum erfüllen. Allerdings funktionieren Baumsubstrate nur, wenn der Einbau fachgerecht durchgeführt wird.

Dieser Beitrag stellt verschiedene Verfahren vor, mit denen der fachgerechte Einbau von Baumsubstraten geprüft werden kann. Dazu gehören der Verdichtungsgrad, der statische und dynamische Plattendruckversuch, die Rammsondierung, die Wasserleitfähigkeit und die Luftleitfähigkeit. Zusammenfassend werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren tabellarisch aufgeführt.

1 Einleitung

Im Straßenbereich, dort, wo Bäume sich den begrenzten Raum mit der ober- und unterirdischen Infrastruktur teilen müssen, haben sich bei der Baumpflanzung weitestgehend standardisierte Baumsubstrate gemäß der „Empfehlungen für Baumpflanzungen“ (FLL, 2010) und der „ZTV-Vegtra-Mü“ (Baureferat HA Gartenbau, 2016) durchgesetzt. Diese Substrate sind darauf ausgelegt, insbesondere eine ausreichende Luft- und Wasserversorgung der Bäume sicherzustellen. Die Notwendigkeit und der Erfolg solcher Substrate wurde durch verschiedene Versuche nachgewiesen (Schröder 1991, Liesecke 1995, Krieter und Malkus 1996, Liesecke und Heidger 2000, Schönfeld 2017). Warum Bäume teilweise trotz standardisiertem Baumsubstrat nicht zufriedenstellend wachsen, kann vielerlei Gründe haben, wie z. B.:

- Baumart und Substrat passen nicht zusammen (z. B. aufgrund des pH-Wertes),
- schlechte Baumschulware,
- zu Tiefe Pflanzung,
- mangelnde Bewässerung während der Anwuchsphase,
- Entmischung des Substrates durch Anlieferung
- falscher Einbau des Substrates.

Elementare Fehler bei der Pflanzung und Anwuchspflege kann der beste Boden bzw. das beste Baumsubstrat nicht ausgleichen.

Eine der Grundvoraussetzungen für ein gesundes Baumwachstum ist die Belüftung des Wurzelraumes, also die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff und die Entsorgung des entstandenen Kohlendioxids (Hildebrand 1983, Heidger 2002, Gaertig 2007, Weltecke und Gaertig 2012). Durch den hohen Anteil an Grobboden (Körnungsdurchmesser > 2 mm) und dem damit verbundenen hohen Anteil an Makroporen sind Baumsubstrate darauf ausgelegt, die Bodenbelüftung zu gewährleisten. Dennoch ist es mit heutigen Maschinen (z. B. Vibrationsplatten, Vibrationsstampfern) leicht möglich, selbst überbaubare Baumsubstrate zu dicht einzubauen, sodass der Bodenluftaustausch nicht mehr in ausreichendem Maße gewährleistet ist.

Die Pflanzung von Bäumen wird oftmals von Straßen- oder Garten- und Landschaftsbauern ausgeführt. Diese müssen die statischen Anforderungen für den Straßen- und Wegebau nach den aktuellen Normen und Richtlinien erfüllen, um Nachsackungen zu vermeiden. Aus Sicht des Straßen- und Wegebaus ist Verdichtung grundsätzlich etwas Positives (vgl. Streckenbach und Schröder 2017). Allerdings steht diese nachvollziehbare Denkweise den Anforderungen von Bäumen an ihren Wurzel Lebensraum diametral entgegen.

Dieser Beitrag widmet sich daher der Frage, wie der fachgerechte Einbau von Baumsubstraten geprüft werden kann, sodass sowohl die statischen Erfordernisse des Straßen- und Wegebaus als auch die Ansprüche der Bäume an ihren Wurzel Lebensraum erfüllt werden.

2 Einbauempfehlungen für Baumsubstrate

Bei Baumsubstraten wird im Regelfall zwischen den nicht überbaubaren Baumsubstraten und den überbaubaren Baumsubstraten unterschieden werden (FLL 2010, Baureferat Gartenbau 2016). Erstere kommen bei offenen, nicht oder nur geringfügig belasteten Baumscheiben zum Einsatz. Diese werden in diesem Beitrag nicht weiter thematisiert. Die überbaubaren Baumsubstrate sollen neben der Funktion als Lebensraum für Wurzeln gleichzeitig den Baugrund für die Verkehrsfläche bilden und müssen entsprechend tragfähig sein (FLL 2010).

Die Empfehlungen zum Einbau der Substrate sind relativ vage, was dem Umstand geschuldet ist, dass die verschiedenen Substrate unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, wie z. B. die Art und den Anteil an Gerüstkorn, sodass die Art des Einbaus variieren, das Ergebnis in Bezug auf die vegetationstechnischen Eigenschaften und die Tragfähigkeit aber gleich sein kann (FLL 2010, Baureferat Gartenbau 2016). So gibt die FLL (2010) lediglich vor, dass:

- die Pflanzgrubensohle mindestens 15 cm tief mit dem Substrat zu verzahnen ist und Verfestigungen der Pflanzgrubenwände zu beseitigen sind.
- entmischtes und verklumptes Material nicht eingebaut werden darf.

- das Mischgut in erdfeuchter Konsistenz einzubauen ist. Hiermit ist der Wassergehalt gemeint, bei dem eine maximale Verdichtung erreicht werden kann (optimaler Wassergehalt W_{pr}). Dieser Wert ist substratspezifisch und wird in einem genormten Laborversuch bei der Bestimmung der Proctordichte ermittelt.
- der Einbau lagenweise zu erfolgen hat.
- auf der Oberfläche ein Verformungsmodul (= Elastizitätsmodul) von $E_{V2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ (MPa) erreicht sein muss. Das Substrat sollte nicht wesentlich darüber hinaus verdichtet werden, da sonst die bodenphysikalischen Eigenschaften beeinträchtigt werden können.
- der Verdichtungsgrad 95 % D_{pr} nicht überschritten werden darf, damit die vegetationstechnischen Eigenschaften erhalten bleiben.

Die ZTV-Vegtra-Mü (Baureferat Gartenbau 2016) gibt abweichend bzw. ergänzend vor, dass:

- dass Substrat in ca. 2 Lagen einzubauen und zu verdichten ist, wobei die unterste Lage mindestens 60 cm und die oberste Lage mindestens 40 cm stark sein muss.
- das Verformungsmodul auf dem Planum einen Wert zwischen 45 und 60 MN/m^2 (MPa) aufweisen soll.
- die Verdichtung vorzugsweise statisch oder mittels mittelgroßer Rüttelplatte erfolgen soll.

In diesen Empfehlungen werden lediglich Zielwerte angegeben, die erreicht werden müssen, aber es wird nicht geklärt, wie diese Werte erreicht werden können. Dies liegt darin begründet, dass die Substrate unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und daher Feuchtigkeit des Materials, Gewicht und Art des Verdichtungsgeräts sowie Stärke der Lagen substratspezifisch aufeinander abgestimmt sein müssen. Das heißt, Vorgaben zum optimalen Einbau-Wassergehalt, Stärke der Lagen und mit welchem Gerät jede Lage wie häufig überfahren werden sollte, müssen vom Hersteller kommen. Allerdings geben nur wenige Hersteller solche ganz konkreten Empfehlungen für den Einbau ihrer Produkte.

3 Möglichkeiten der Einbaukontrolle

Vorab sollte geprüft werden, ob das Substrat den Anforderungen gemäß der Empfehlungen für Baumpflanzungen (FLL 2010) bzw. der ZTV-Vegtra-Mü (Baureferat Gartenbau 2016) entspricht. Insbesondere ist hierbei auf die richtige Korngrößenverteilung (Sieblinie) und Feuchtigkeit des Substrates zu achten.

Die wichtigste Einbaukontrolle stellt die Anwesenheit einer unabhängigen baumfachlichen Baubegleitung dar. Diese kann auf den korrekten Einbau entsprechend der Herstellerempfehlungen was die Lagenstärke, Substratfeuchte und Verdichtungsarbeit angeht, achtgeben.

Um das Ergebnis der Verdichtungsarbeit zu überprüfen, stehen verschiedene Verfahren im Feld um im Labor zur Verfügung. Einige Prüfverfahren, wie die Messung des Elastizitätsmoduls, sind in erster Linie dafür geeignet, die Verdichtung des Bodens in Bezug auf dessen Tragfähigkeit, also aus Sicht des Straßenbaus, zu beurteilen. Andere Verfahren, wie z. B. die Messung der Wasser- und Luftleitfähigkeit stellen die baumphysiologisch relevanten Eigenschaften des Bodens in den Vordergrund und lassen daher eher eine Interpretation der Ergebnisse aus baumfachlicher Sicht zu. Das einzige direkte und nach derzeitigen Empfehlungen maßgebende Prüfverfahren ist die Messung des Verdichtungsgrades, die zum Teil im Feld und zum Teil im Labor durchgeführt wird.

Prüfmethoden, die die Aufnahme von ungestörten Bodenproben in natürlicher Lagerung mit Hilfe von Stechzylindern erfordern, wie z. B. die Messung des Porenvolumens, sind nicht geeignet, um den Einbau von Baumsubstraten zu überprüfen. Aufgrund ihres hohen Grobbodenanteils und ihrer geringen Bindigkeit ist hier eine Aufnahme von ungestörten Stechzylinderproben nicht möglich.

Um Bauverzögerungen zu vermeiden, sollte die Einbaukontrolle binnen kurzem Ergebnisse liefern. Alle langwierigen Untersuchungen und solche, die im Labor stattfinden, behindern den reibungslosen Ablauf an der Baustelle. Diese können lediglich im Zweifelsfall oder bei einer nachgestellten Kontrolle Anwendung finden. Im folgenden werden verschiedene Verfahren zur Überprüfung der Einbaudichte von Substraten vorgestellt.

3.1 Verdichtungsgrad

Der Verdichtungsgrad ($\% D_{Pr}$) setzt die aktuelle Trockenrohddichte ins Verhältnis zur Proctordichte, ausgedrückt in Prozent. Die Trockenrohddichte, auch Lagerungsdichte oder Trockenraumddichte genannt, ist der Quotient aus der trockenen Bodenmasse und ihrem Volumen in gegebener Lagerung. Die Proctordichte ist die höchste erreichbare Dichte eines Bodens, die sich in einem genormten Laborversuch bei optimalem Wassergehalt und definierter Verdichtungsenergie einstellt (Proctorversuch nach DIN 18127). Sie ist allerdings nicht die grundsätzlich höchste Dichte, die ein Boden einnehmen kann, wie es oft fälschlicherweise angenommen wird. Für Bäume in überbauten Pflanzgruben sollte der Verdichtungsgrad $95 \% D_{Pr}$ nicht übersteigen (FLL 2010).

Zunächst muss zur Ermittlung des Verdichtungsgrades die Proctordichte bestimmt werden. Hierzu werden in einem Laborversuch von einer Substratprobe, die mit definiertem Lasteintrag verdichtet

wurde, die Trockendichte und der entsprechende Wassergehalt bestimmt. Der Versuch wird mit unterschiedlichen Wassergehalten der Probe mindestens 4-5 mal wiederholt. In einer Graphik werden die Wertepaare Trockendichte und Wassergehalt als Punkte eingetragen und zu einer Kurve, der Proctorkurve, verbunden. Bei einem bestimmten Wassergehalt hat die Probe die höchste Trockendichte erlangt. Diese wird als „Proctordichte“ und der dazugehörige Wassergehalt als „optimaler Wassergehalt“ bezeichnet.

In einem zweiten Schritt muss die Trockenrohddichte des Substrates im eingebauten Zustand bestimmt werden. Dazu wird eine Substratprobe bekannten Volumens entnommen, bei 105 °C getrocknet und durch Wiegen die Masse bestimmt. Aufgrund der Grobkörnigkeit der Substrate ist hierbei allerdings die Aufnahme der Proben mittels Stechzylinder mit bekanntem Volumen nicht durchführbar. Das heißt, es müssen sogenannte Volumenersatzmethoden zum Einsatz kommen, um das Volumen der entnommenen Bodenprobe zu bestimmen. Dabei gibt es verschiedene Verfahren, die in der DIN 18125-2 aufgezeigt werden.

Das Prinzip aller Volumenersatzmethoden ist, das Volumen des bei der Probennahme entstandenen Loches zu bestimmen. Dazu wird das Probenloch mit einem geeichten Material ausgefüllt, von dem das Volumen vor und nach der Messung bestimmt werden kann, sodass man durch Subtraktion der beiden Werte das Volumen des Probenloches und somit des Bodens in seiner natürlichen Lagerung erhält. Hier soll beispielhaft das sogenannte Ballon-Verfahren mittels Bodendensitometer vorgestellt werden (Abb. 1).

Bei dem Ballon-Verfahren wird auf die eben abgegliche Oberfläche eine Grundplatte mit kreisrunder Aussparung gelegt. Innerhalb des Ringes werden wenige Zentimeter Boden ausgehoben. Loser Boden wird sauber entfernt. Nun wird das Probenloch mit dem mit Flüssigkeit gefüllten Ballon des Bodendensitometers durch Herunterdrücken eines Kolbens ausgefüllt. Die Anfangshöhe der Flüssigkeit im Messgerät wird am Kolben abgelesen. Anschließend wird die eigentliche Bodenprobe entnommen, der Ballon wird zum zweiten Mal in das Loch eingelassen, bis er es komplett ausfüllt. Dann wird der Flüssigkeitsstand am Kolben erneut abgelesen. Durch Subtraktion der beiden aufgenommenen



Abbildung 1: Bodendensitometer zur Messung der Trockenrohddichte im Ballon-Verfahren.

Werte und Multiplikation mit der Kolbenfläche erhält man das Volumen der entnommenen Bodenprobe in seiner natürlichen Lagerung.

Bei grobkörnigen Substraten wird das Volumen des Probenloches mit diesem Verfahren tendenziell unterschätzt und damit die Lagerungsdichte überschätzt. Dies hängt damit zusammen, dass sich der Ballon bei Unebenheiten nicht so gut an die Oberfläche anpassen kann. Je elastischer der Ballon ist, desto geringer ist dieser Fehler, desto höher ist aber auch die Gefahr, dass der Ballon durch Steinspitzen kaputt geht.

Die Messung des Verdichtungsgrades ist die einzige direkte und nach den FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen (2010) und der ZTV-Vegtra-Mü (2016) bislang die maßgebende Methode zur Prüfung der Einbaudichte. Allerdings ist sie relativ zeit- und damit kostenaufwendig. Die Ergebnisse stehen somit nicht unmittelbar zur Verfügung. Außerdem ist Ihr Einsatz bei offenporigen Baumsubstraten strittig. Dies hängt mit dem spezifischen Verhalten der offenporigen mineralischen Mischkomponenten von Baumsubstraten während des Proctorversuches zusammen. Dadurch, dass sich im Gegensatz zu normalen Böden bei Baumsubstraten auch Wasser in den Poren innerhalb der Gesteinskörner befindet, ist der Wassergehalt der Proben schlecht einstellbar. Dieses Wasser tritt allerdings während der Verdichtungsarbeit teilweise heraus, wodurch die physikalischen Eigenschaften der Probe geändert werden. Dadurch sind die Ergebnisse fehlerhaft und nicht reproduzierbar. Da die Proctordichte als Bezugswert nicht belastbar ist, ist die Eignung des Verdichtungsgrades zur Überprüfung des Einbaus von Baumsubstraten mehr als fraglich (Roth-Kleyer und Hemker 2015).

3.2 Statischer Plattendruckversuch zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul E_v ist eine Kenngröße für die Verformbarkeit des Bodens und damit ein indirektes Maß für den Verdichtungszustand des Bodens und dessen Tragfähigkeit. Der Elastizitätsmodul wird durch einen statischen Plattendruckversuch bestimmt, bei dem das Planum (obere Abschlussfläche des Untergrunds) probeweise belastet wird. Als Gegengewicht wird ein schweres Fahrzeug verwendet (Abb. 2). Bei dem Versuch wird der Zusammenhang zwischen Druck und Einsenkung einer starren Lastplatte bei zwei aufeinander folgenden Belastungen gemessen und über ein numerisches Verfahren je ein Elastizitätsmodul E_{v1} (Erstbelastung) und E_{v2} (Wiederbelastung) berechnet (DIN 18134).

Da der Boden durch die starke Vibration der Verdichtungsgeräte noch lange Zeit nachvibriert, darf der Versuch erst 24 Stunden nach Einbau durchgeführt. Damit ist zwar eine zeitnahe aber keine sofortige Kontrolle der Einbaudichte möglich.

Entscheidend für die Beurteilung der Verdichtung ist sowohl der Wert E_{v2} als auch das Verhältnis der Werte E_{v2} / E_{v1} . Je höher die geforderte Belastbarkeit einer Fläche, desto geringer muss der Verhältniswert sein. Bei Pflanzgruben werden in Bezug auf den Verhältniswert E_{v2} / E_{v1} keine Vorgaben gemacht.

Der E_{v2} -Wert des Planums sollte bei Baumsubstraten $\geq 45 \text{ MN/m}^2$ (MPa) sein, um eine ausreichende Tragfähigkeit zu gewährleisten (FLL 2010). Im Gegensatz zur FLL wird in der ZTV-Vegtra-Mü zusätzlich noch ein Höchstwert von 60 MN/m^2 für das Planum angegeben. Weiterhin wird dort darauf hingewiesen, dass auf der Tragschicht ein Elastizitätsmodul von 120 MN/m^2 nicht überschritten werden darf. Sofern der



Abbildung 2: Durchführung eines statischen Lastplattendruckversuches.

Wurzelbereich unterhalb von Straßen erweitert werden soll, steht diese Vorgabe im Widerspruch zu den Vorgaben des Straßenbaus, die Elastizitätsmodule auf der Tragschicht je nach Art und Dicke der Tragschicht und Art der Straße von über 120 bis 180 MN/m^2 erreichen müssen (FGSV 2007). In solchen Fällen sind zur Entlastung der bauausführenden Firmen genaue Vorgaben seitens des Auftraggebers im Leistungsverzeichnis zu machen.

3.3 Dynamischer Plattendruckversuch

Zunehmend setzt sich zur Einbauüberwachung der dynamische Plattendruckversuch durch, der einen erheblich geringeren Versuchsaufwand bedeutet. Dabei wird mit einem Handgerät ein Gewicht von 10 kg aus etwa 70 cm Höhe an einer Stange in drei aufeinander folgenden Messstößen fallengelassen. Die Setzung des Bodens wird mit einem Beschleunigungssensor in der Platte aufgezeichnet und durch Integration der Geräteparameter der Elastizitätsmodul E_{vd} berechnet. Dieser Versuch benötigt keine schweren Gegenlasten und kann auch in beengten Verhältnissen angewandt werden (Abb. 3).



Abbildung 3: Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls mittels dynamischer Lastplatte.

Der dynamische Plattendruckversuch ist nicht in einer DIN geregelt, wird aber teilweise von Straßenbauverwaltungen in zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen wie der für Erdarbeiten (ZTV E-StB (FGSV 2017)) anerkannt. Er ist bei grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit einem Größtkorn bis 63 mm grundsätzlich geeignet (Lehner et al. 2012). Allerdings hat der dynamische Plattendruckversuch nicht dieselbe Zuverlässigkeit wie der statische Plattendruckversuch, da die Werte stärker streuen. Außerdem gilt für den dynamischen Lastplattendruckversuch das gleiche wie für den statischen: Da der Boden durch die starke Vibration der Verdichtungsgeräte noch lange Zeit nachvibriert, darf der Versuch erst 24 Stunden nach Einbau durchgeführt (vgl. Kap. 3.2).

Die ermittelten dynamischen Elastizitätsmodule E_{vd} können durch Umrechnungsfaktoren in E_{v2} -Werte umgerechnet werden. Jedoch ist die Korrelation sehr stark boden- und feuchteabhängig und muss für jeden Boden durch vergleichende statische Plattendruckversuche separat ermittelt werden. Die ZTV-Vegtra-Mü weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass bei Baumsubstraten bislang keine aussagekräftigen Umrechnungsfaktoren benannt werden können. Die im Straßenbau üblichen Umrechnungsfaktoren können für Baumsubstrate nicht verwendet werden, da diese aufgrund ihres hohen Porenanteils in der Steinfraktion deutlich elastischer reagieren als die im Straßenbau üblicherweise verwendeten Materialien. Das bedeutet, Referenzwerte müssen von Herstellerseite geliefert oder in aufwendigen Versuchen substratspezifisch festgelegt werden.

3.4 Rammsondierung zur Bestimmung des Eindringwiderstandes

Bei einer leichten Rammsondierung (DPL, Dynamic Probing Light) wird in Schritten von 10 cm die Anzahl der Schläge aufgenommen, die benötigt wird, um eine Sondierstange 10 cm in den Boden zu treiben. Zu den leichten Sondierungsgeräten zählte früher die leichte Rammsonde DPL-5 mit einem Spitzenquerschnitt von 5 cm², die als Künzelstab bekannt war. Die aktuelle Norm, die DIN EN ISO 22476-2, sieht nur noch die leichte Rammsonde DPL-10 mit Spitzenquerschnitt 10 cm² vor (Abb.).



Abbildung 4: Leichte Rammsonde (DPL-10).

Bei einer Rammsondierung wird der Eindringwiderstand des Bodens gemessen. Dieser wird von diversen Bodeneigenschaften wie Bodenart, Dichte, Feuchte oder Grobbodenanteil bestimmt (DIN 19662:2012-07). Daher dürfen die erzielten Werte nicht als absolute Werte, sondern nur als Vergleichswerte interpretiert werden. Mindest- oder Höchstwerte lassen sich nur für konkrete, einheitliche Situationen durch Vergleichsmessungen mit anderen Verfahren, wie z. B. dem statischen Plattendruckversuch oder dem Verdichtungsgrad, definieren. Da Substrate aufgrund der Vorgaben der einschlägigen Regelwerke ein relativ einheitliches Korngefüge haben (sollten), gibt die ZTV-Vegtra-Mü Richtwerte für die Schlagzahl bei eingebauten, überbaubaren Substraten vor. Demnach sollen 13 bis 25 Schläge pro 10 cm Eindringtiefe erreicht werden. Diese Werte gelten nach dem Einbau der Tragschicht.

Wenn an den Messpunkten immer die gleichen äußeren Verhältnisse vorliegen, vor allem die gleiche Bodenfeuchtigkeit, erlauben Rammsondierungen Rückschlüsse auf bodenphysikalische Inhomogenitäten wie z. B. Verdichtungszone, Substratwechsel oder die Tragfähigkeit von Böden. Das heißt, im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Verfahren können relativ unaufwendig tieferliegende Bodenschichten unterschiedlicher Festigkeit identifiziert werden. Rammsondierungen erlauben eine schnelle Kontrolle an verschiedenen Stellen. Somit ist es möglich, Bereiche mit unterschiedlicher Verdichtung zeitnah zu erkennen und entsprechend der Zielvorgaben gezielt nachzuverdichten oder zu lockern.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass es insbesondere bei grobkörnigen Böden einen Oberflächeneinfluss gibt. So zeigt die DIN EN ISO 22476-2 in einem Beispiel, dass die Schlagzahl mit zunehmender Tiefe ansteigt, obwohl die Lagerungsdichte gleich bleibt. Dieser Oberflächeneinfluss kann bis in eine Tiefe von 1 bis 2 Metern reichen (Abb. 5).

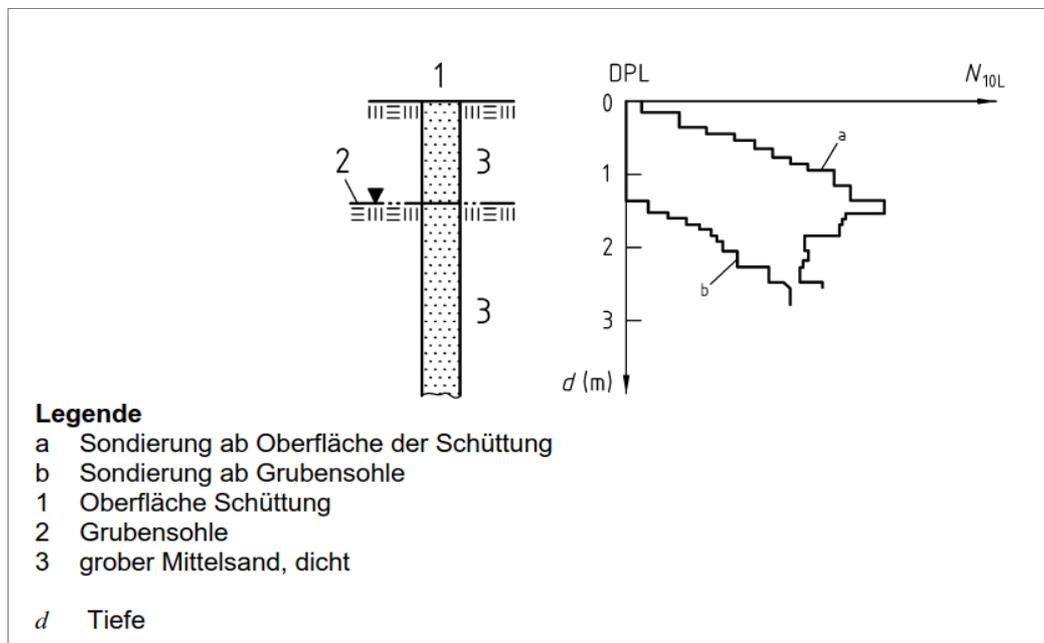


Abbildung 5: Geringer Eindringwiderstand im oberflächennahen Bereich eines einheitlich dichten Mittelsandes zeigt den Oberflächeneinfluss.

3.5 Vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (= hydraulische Leitfähigkeit) (k_f) kennzeichnet, wie schnell Wasser durch einen Boden im wassergesättigten Zustand fließt. Mathematisch-physikalisch kann die Wasserleitfähigkeit durch die Darcy-Gleichung ausgedrückt werden. Das Darcy-Gesetz besagt, dass die Wassermenge (Durchflussrate in m^3/s), die eine Querschnittsfläche eines porösen Mediums (z. B. Boden) laminar durchströmt, direkt proportional ist zum hydraulischen Gradienten.

Die Wasserleitfähigkeit wird durch die Porengrößenverteilung und die Kontinuität der Bodenporen bestimmt. Der k_f -Wert nimmt proportional mit dem Quadrat des Porenradius zu. Sandige Böden, mit ihrem hohen Anteil an großen Bodenporen besitzen größere k_f -Werte als bindigere Böden. Die FLL (2010) empfiehlt für Baumpflanzungen einen Wasserdurchlässigkeitswert $k_f > 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (entspricht $> 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ bzw. $0,3 \text{ mm/min}$).

Im Anhang der FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen (2010) wird ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Substraten vorgestellt. Dafür werden pro Pflanzgrube 2 Löcher mit einer Fläche von 50 x 50 cm und 40 cm Tiefe ausgehoben. Um Verschlammungen zu vermeiden wird der Grund des Loches mit Kies oder groben Sand bedeckt. Das Loch wird mit ca. 10 Litern Wasser befüllt. Mit einem Gliedermaßstab und einer Stoppuhr wird die infiltrierte Wassermenge pro Zeiteinheit gemessen. Dies wird solange wiederholt, bis die Infiltrationsrate konstant ist, also annähernd eine wassergesättigte Wasserleitfähigkeit erreicht ist.

„Die benötigte Durchlässigkeit von mindestens $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ gilt als erreicht, wenn der nach diesem Verfahren gemessene Wert $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (Sicherheitsfaktor 10) entspricht und die gemessene Zeit für das Absinken des Wasserspiegels 15 Minuten nicht übersteigt“ (FLL 2010).

Da bei diesem Verfahren ein seitliches Abfließen des Wassers sowohl in der Grube als auch im Versickerungshorizont möglich ist, wird die Wasserleitfähigkeit tendenziell überschätzt. Das DIN-genormte Verfahren mit Doppelringinfiltrometern, bei dem diese Randeffekte weitestgehend ausgeschaltet werden, ist in Substraten allerdings nicht durchführbar, da die Ringe nicht in das grobe Substrat ohne Störung der Struktur eingedrückt werden können.

3.6 Luftleitfähigkeit

Die Luftleitfähigkeit oder Luftdurchlässigkeit bestimmt den Austausch von Luft zwischen Boden und Atmosphäre. Das heißt, sie ist Ausdruck dafür, wie gut Sauerstoff in den Boden gelangen und Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben werden kann. Der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre kann nur in den luftgefüllten Poren stattfinden. Somit ist die Luftleitfähigkeit von der Anzahl, Größe und Kontinuität der luftgefüllten Poren abhängig. Beeinflusst werden die luftgefüllten Poren von der Bodenart, der Dichte und dem Wassergehalt im Boden. Verdichtung, Verschlammung und Feuchtigkeit reduzieren die Luftleitfähigkeit.



Abbildung 6: Messung der Wasserleitfähigkeit mittels des vereinfachten Verfahrens gemäß der FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen (2010).

Bei der Messung der Luftleitfähigkeit wird der PL-Wert, also die **pneumatische Leitfähigkeit** eines Porensystems bei Durchströmung mit (Druck-)Luft, bestimmt. Analog zur Wasserleitfähigkeit k_f wird der PL-Wert als Proportionalitätsfaktor zwischen der Fließgeschwindigkeit der Luft in dem Porensystem und dem Druckgradienten über der Fließstrecke definiert. Das entsprechende Messsystem besteht aus einer Messkammer, die eine bestimmte Strömungsform im untersuchten Bodenvolumen realisiert, und einem Messgerät, das die Messgrößen für Fließgeschwindigkeit und Druckgradient ermittelt (Abb. 7). Eine Oberflächenmesskammer, die auf den Boden aufgesetzt wird, ermöglicht die Messung der Luftleitfähigkeit auf steinig und harten Böden, wie z. B. Baumsubstraten (Abb. 8).

Analog zur Ermittlung der Wasserleitfähigkeit kann auch der PL-Wert mit Hilfe des Darcy-Gesetzes ermittelt werden. Die Luftdurchlässigkeit wird in einer Längeneinheit je Zeit angegeben, z. B. cm/s oder cm/d (DIN 19682-9, 2011). Bislang gibt es für die Luftleitfähigkeit keine Standardanalytik und damit auch keine festen Grenzwerte. In der Praxis werden häufige Vergleichsmessungen und die Erfassung zusätzlicher Bodenparameter benötigt, um die gewonnenen Messwerte richtig einzuordnen (UGT 2018).



Abbildung 7: Messung der Luftleitfähigkeit einer wassergebundenen Wegedecke mit dem PL300 und Oberflächenmesskammer (UGT, Müncheberg).

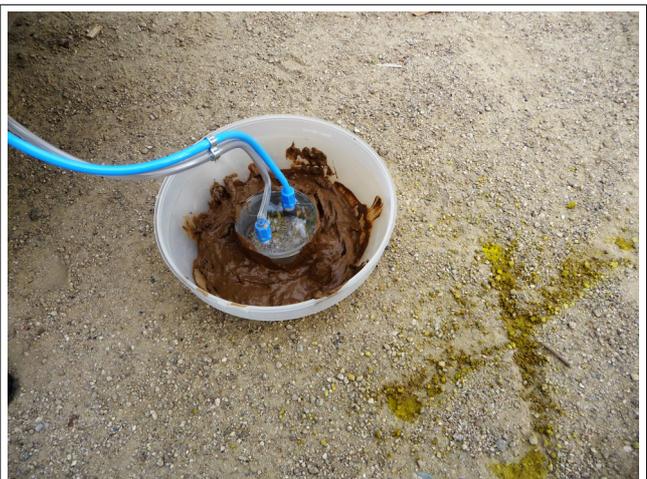


Abbildung 8: Die Oberflächenmesskammer wird auf den Boden drauf gestellt und für die Messung seitlich mit einer Tonpaste luftdicht abgeschlossen.

4 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Verfahren zur Überprüfung der Einbaudichte von Substraten machen deutlich, dass es nicht eine bestimmte Messmethode gibt, mit dem das bestmögliche Ergebnis erzielt wird. Jedes Verfahren hat seine Vor- und Nachteile (Tab. 1). Im Regelfall erlaubt erst eine

Kombination verschiedener Untersuchungsmethoden eine ausreichende Bewertung der Einbauqualität.

Tabelle 1: Vorteile und Nachteile der verschiedenen Verfahren zur Überprüfung der Einbaudichte von Baumsubstraten

Prüfverfahren	Vorteile	Nachteile
Verdichtungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> • Einzige direkte Prüfmethode 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr aufwändig und damit teuer • Ergebnisse liegen erst nach einigen Tagen vor • Die Eignung des zugrunde liegenden Proctorversuches ist für Baumsubstrate mehr als fraglich.
Statischer Lastplattendruckversuch	<ul style="list-style-type: none"> • Werte liegen sofort nach der Messung vor. • Meist eindeutige Vorgaben in Ausschreibungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Benötigt Gegengewicht, was bei engen Baustellen nicht möglich ist • Liefert keine Werte über tieferliegende Verdichtungshorizonte • Liefert keine direkte Aussage zur Wasser- und Luftleitfähigkeit • Messung darf erst 24 Stunden nach Einbau erfolgen
Dynamischer Lastplattendruckversuch	<ul style="list-style-type: none"> • Werte liegen sofort nach der Messung vor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Umrechnungsfaktor für E_{V2}-Wert muss substratabhängig ermittelt werden • Nicht alle Substrate liefern eine sinnvolle Korrelation zwischen den E_{V2}- und E_{vd}-Werten • Liefert keine Werte über tieferliegende Verdichtungshorizonte • Liefert keine direkte Aussage zur Wasser- und Luftleitfähigkeit • Messung darf erst 24 Stunden nach Einbau erfolgen
Rammsondierung	<ul style="list-style-type: none"> • Werte liegen sofort nach der Messung vor. • Schnell und einfach durchführbar • Liefert Werte über tieferliegende Verdichtungshorizonte 	<ul style="list-style-type: none"> • Werte sind substratabhängig • Oberflächeneinfluss muss beachtet werden • Liefert keine direkte Aussage zur Wasser- und Luftleitfähigkeit
Wasserleitfähigkeit, vereinfachtes Verfahren nach FLL (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Werte können zeitnah nach der Messung berechnet werden • liefert direkt einen baumphysiologisch relevanten Parameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Liefert keine Werte über oberflächennahe Verdichtung • sehr zeitaufwändig • benötigt große Mengen Wasser • Überschätzung der Wasserleitfähigkeit, da Wasser seitlich entweichen kann.
Luftleitfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Werte liegen sofort nach der Messung vor. • Schnell und einfach zu erhebende Messung 	<ul style="list-style-type: none"> • Referenzwerte müssen für Substrate durch Vergleich mit anderen Parametern erhoben werden

Da die Funktionsfähigkeit von Baumsubstraten häufig am richtigen Einbau scheitert, setzen sich alternativ zu den überbaubaren Baumsubstraten nach FLL (2010) in der Praxis vermehrt nicht überverdichtbare Baumsubstrate durch. Diese haben einen größeren Anteil an Stützkorn und weisen teilweise deutlich größere Fraktionen auf, als die FLL (2010) in ihren Sieblinien vorgeben (vgl. Streckenbach und Schröder 2017). In den Niederlanden werden beispielsweise auf Flächen mit starker Belastung Baumsubstrate mit einer 16-40 mm Bruchsteinfraktion verwendet (Norminstitut Bomen 2014). Noch extremer ist das Stockholmer Modell, welches den Einbau einer Skeletterde vorsieht, bei der grober Schotter (100-150 mm) als Gerüstbaustoff eingebaut wird und in dessen Hohlräume Pflanzerde eingespült wird (Embrém 2009).

5 Literaturverzeichnis

Baureferat HA Gartenbau (2016): Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. ZTV-Vegetationstragschichten (ZTV-Vegtra-Mü). Landeshauptstadt München, Baureferat HA Gartenbau, München, 34 S.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. In: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchung. Beuth Verlag, Berlin und Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): DIN 18134:2012-07: Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch. In: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchung. Beuth Verlag, Berlin und Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): DIN 19662:2012-07: Bestimmung des Eindringwiderstandes mit dem Handpenetrometer. In: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchung. Beuth Verlag, Berlin und Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN 19682 – 9:2011-04: Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit. In: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchung. Beuth Verlag GmbH, Berlin und Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN ISO 22476-2:2005-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen.

Embrém, B.; Alvim, B.-M.; Ståhl, Ö. (2009): Pflanzgruben in der Stadt Stockholm – Ein Handbuch. Online unter: <http://www.urbanevegetation.de/handbuecher.html>. Zuletzt aufgerufen am: 05.02.2020.

FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB 04), Ausgabe 2004 / Fassung 2007.

FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2017): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 17), Ausgabe 2017, 120 S.

FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. FLL, Bonn, 62 S.

Gaertig, T. (2007): Atemnot im Wurzelraum – Der Einfluss der Gasdurchlässigkeit des Bodens auf die Feinwurzelschließung und Vitalität von Bäumen. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2007. Haymarket Media, Braunschweig, S. 182 – 192.

Heidger, C. (2002): Wurzeln sind lenkbar! Optimierungsmöglichkeiten im Wurzelraum von Straßenbäumen. Tagungsband Osnabrücker Baumpflege 2002.

Hildebrand, E. E. (1983): Der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. Forstwissenschaftliches Centralblatt 102, S. 111 – 125.

Krieter, M.; Malkus, A. (1996): Untersuchungen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn, 136 S.

Lehner, M.; Binder, G.; Peksaglam, C. (2012): Grundlagen der Bodenverdichtung. Wacker Neuson SE, München, 122 S.

Liesecke, H.-J. (1995): Maßnahmen zur Erweiterung des durchwurzelbaren Standraumes von Stadtbäumen – Möglichkeiten, Ausführung, Wirkung. In: Arbeitsgemeinschaft Augsburger Baumpflege (Hrsg.): Tagungsband Augsburger Baumpflege 1995. Zeitdruck VervielfältigungsGmbH, Augsburg, 19 S.

Liesecke, H.-J.; Heidger, C. (2000): Substrate für Bäume in Stadtstraßen. Darstellung und Beurteilung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben des BMV „Bäume in Stadtstraßen“. Stadt und Grün (7, 9), S. 463 – 470 und S. 620 – 624.

Norminstitut Bomen (2014): Handboek Bomen 2014. Norminsitut Bomen, AD Capelle aan den Ijssel, 232 S.

Roth-Kleyer, S.; Hemker, O. (2015): Der Proctorversuch als Grundlage für Prüfungen von Vegetationssubstraten? Neue Landschaft 10|2015, S. 45-49.

Schönfeld, P. (2017): Baumsubstrate – Spektrum der Substrate in der Stadtgrünpraxis. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2007, Haymarket Media, Braunschweig, S. 41-56.

Schröder, K.; Bittner, K.; Grimm-Wetzel, P.; Maag, T.; Schmidt, S.; Schröder, S.; Strohm, M.; Weiß, S. (1991): Untersuchungen zum Einfluss standardisierter Substrate auf das Wachstum von Laubbäumen – 1987 bis 1991; Ein Beitrag zur Optimierung von Straßenbaumstandorten im urbanen Bereich. Herausgegeben anlässlich der 9. Osnabrücker Baumpflegetage – 24. und 25. September 1991, 47 S.

Streckenbach, M.; Schröder, K. (2017): Alternative Bauweisen für Pflanzgruben mit unverdichtbaren Baumsubstraten. Tagungsband Osnabrücker Baumpflegetage 2017, 10 S.

UGT, Umwelt - Geräte – Technik (2018): Bedienungsanleitung – PL 300. Version 25/07/18. Umwelt-Geräte-Technik-GmbH, Müncheberg. 31 S.

Weltecke, K.; Gaertig, T. (2012): Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel, Germany. Urban Forestry & Urban Greening 11, 329-338.

Autorenangaben:

Dr. Katharina Weltecke
Boden & Baum

Tätigkeitsschwerpunkte:

- Bodenkundliche Gutachten bei Vitalitätsstörungen von Bäumen
- Gutachten bei Gebäudeschäden in Verbindung mit Bäumen
- Prüfung von Substraten
- Baumfachliche Baubegleitung

Kontakt:

Am Schlossteich 5
34454 Bad Arolsen
Tel: 05691 – 877 33 33
weltecke@bodenundbaum.de
www.bodenundbaum.de