

BAUMWURZELEINWUCHS BEI GEH- UND RADWEGEN

**Wirkung von Baustoffeigenschaften und Bauweisen
auf die Durchwurzelbarkeit und Ansätze zur Schadenvorbeugung**

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades einer

DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. (FH) Verena Stengel, M.Eng.
geboren am 01.05.1980 in Georgsmarienhütte

2016

Referent: Prof. Dipl.-Ing. Gilbert Lösken

Korreferent: Prof. Dr. rer. hort. Jürgen Bouillon

Tag der Promotion: 07. März 2016

KURZFASSUNG

Stengel, Verena:

Baumwurzeleinwuchs bei Geh- und Radwegen Wirkung von Baustoffeigenschaften und Bauweisen auf die Durchwurzelbarkeit und Ansätze zur Schadenvorbeugung

Das Dickenwachstum von in den angrenzenden Schichten der Geh- und Radwege eingedrungenen Baumwurzeln kann unterschiedliche Schadbilder verursachen. Diese hängen von den verschiedenen Wegebauweisen ab. Die Schäden stellen insbesondere für Städte und Kommunen ein Problem dar, da diese in der Verkehrssicherungspflicht stehen und Schäden an Geh- und Radwegen meist kostenintensiv beseitigt werden müssen.

Das anwendungsorientierte **Ziel** der vorliegenden Arbeit ist es, die Wirkung von Baustoffeigenschaften und Bauweisen auf die Durchwurzelbarkeit zu untersuchen und daraus mögliche schadenvorbeugende Ansätze für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten abzuleiten. Grundlage der Untersuchung sind hierbei unterschiedlich angelegte **Feld- und Gefäßversuche**.

Als **Ergebnis** kann aufgezeigt werden, dass handelsübliche ungebundene Bettungstoffe ein Einwurzeln grundsätzlich ermöglichen. Der Einfluss von Modifikationen bodenphysikalischer und bodenchemischer Baustoffeigenschaften und ungebundener Bauweisen auf das Wurzelwachstum kann insgesamt als gering eingestuft werden. Eine deutliche Minimierung der Durchwurzelbarkeit kann durch zwei Ansätze aufgezeigt werden, bei denen unabhängig vom artspezifischen Wurzelwachstum vermutlich eine schadenvorbeugende Wirkung für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten gegeben ist. Zum einen ist eine Verminderung durch die Verwendung von Bettungstoffen mit **erhöhtem Schluffanteil** zu erzielen. Hinsichtlich der bautechnischen Eignung müssen jedoch weitere Untersuchungen folgen. Zum anderen weisen im Vergleich zu den ungebundenen Bauweisen die **hydraulisch gebunden Bauweisen** eine deutliche Verminderung in der Durchwurzelbarkeit auf. Bei beiden Bauweisen bestehen jedoch hinsichtlich der fachgerechten Anwendungen Risiken, die im Rahmen einer aufmerksamen Planung einer Abwägung bedürfen.

Gesamtheitlich sollte der Fokus der Schadenvorbeugung im **Fernhalten von Baumwurzeln** aus dem Oberbau des Wegebau durch geeignete Wurzelbarrieren und Randeinfassungen gesehen werden. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass der **Wegebau-Baumwurzel-Konflikt** interdisziplinär verstanden werden muss. Maßnahmen des Wegebau stehen immer im engen Zusammenhang zu guten Ausgangsbedingungen für den standortgerechten Baum und seinem Wurzelraum.

Weiterer **Forschungsbedarf** wird in der Untersuchung bodenchemischer Baustoffeigenschaften sowohl für die ungebundene als auch für die gebundene Bauweise gesehen. Zudem sollte untersucht werden, ob die **gebundene Bauweise** langfristig Schäden vorbeugen kann und inwieweit die Möglichkeit besteht, die Lösungsansätze ebenso zur **Schadenbehebung** einzusetzen.

Schlagworte: Wegebau, Baumwurzeln, Baustoffe

ABSTRACT

Stengel, Verena:

Route spread of tree roots in pavements and cycle paths Impact of building material quality and constructions on rooting and approaches of damage prevention

The spreading of root mass from the roots infiltrating to the adjoining pavements and cycle paths can cause varying damage. This damage depends on the different ways of road construction. The resulting damages are a problem, especially for cities and municipalities. It is their obligation to secure road safety and furthermore remove the damage on walkways and cycle paths mostly in a cost intensive way.

The implementation oriented **intent** of this thesis, is to analyse the impact of the building material and the construction methods. In addition, minimise root infiltration and deduce possible preventive approaches for the route construction at tree locations. Differently constructed field trials are the basis of this research project.

As a **result**, it can be pointed out that, general standard non-bonded construction materials enable rootage. The impact of the modification of soil physical and soil chemical quality of the construction materials and of non-bonded ways of construction on the root spread can be regarded as low. A considerable minimisation of infiltration can be reached by two different approaches. Irrespective of the species of the root, a damage preventing effect for pavements and cycle paths can be given. On one hand, a minimisation can be achieved by the usage of bedding material with a high percentage of silt. Concerning the structurally engineered suitability further research is necessary. On the other hand hydraulic bonded constructions show a decrease of infiltration compared to non-bonded constructions. Both cases involve risks to their professional application, which are in need of consideration in line with intent planning.

On the whole, the focus of the prevention of damage should be on **keeping away from roots** on the pavement surface. This can be achieved by using suitable root barriers and separations between cycle lane, pedestrian paths and tree plantations. Furthermore, it should be considered that the conflict between the path construction and the tree roots must be understood as interdisciplinary. There is always a close connection between route construction and the location of the tree.

Further need of research is necessary to study the material of the soil chemical quality for bonded as well as non-bonded construction. It should be tested whether the bonded way of construction can prevent long-term damage, and if there is a possibility to use the depicted methods for repair as well.

Keywords: construction of pavement and cycle path, tree roots, construction material

VORWORT

Basierend auf dem vom Europäischen Fond für Regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsprojekt „Wegebau an Baumstandorten – Bauweisen zur Minimierung von Schäden durch Baumwurzeln im Wegebereich“ (2011-2013), welches an der Hochschule Osnabrück in der Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur abgewickelt wurde, ist die vorliegende Arbeit an der Fakultät Architektur und Landschaft der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover in der Zeit von 2013 bis 2015 entstanden.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Betreuer und Begutachter Herrn Prof. Gilbert Lösken (Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover), der die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht hat. Zudem Herrn Prof. Dr. Jürgen Bouillon (Hochschule Osnabrück) für die Betreuung und Begutachtung sowie für die Motivation zur Verwirklichung der Arbeit. Für die Anregung zur Umsetzung dieser Arbeit danke ich ebenso Herrn Prof. Martin Thieme-Hack (Hochschule Osnabrück), der diese zugleich fachlich begleitet hat.

Für ihre fachlichen Ratschläge im Bereich der Statistik sowie der Pflanzenernährung gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Hans-Georg Schön und Herrn Prof. Dr. Diemo Daum (beide Hochschule Osnabrück).

Frau Vanessa Schlombs, Frau Sarah Kißler sowie Herrn Robert Kühn danke ich für das Absolvieren ihrer Abschlussarbeiten zur Problematik des Baumwurzeleinwuchses im Geh- und Radwegbau. Dadurch konnten weitere wertvolle Datengrundlagen für diese Arbeit geschaffen werden.

Darüber hinaus richtet sich mein herzlicher Dank an alle Personen, die mich beim Bau und bei der Auswertung der einzelnen Versuche unterstützt sowie an alle, die mich durch ihr Interesse an dieser Arbeit bei der Erstellung motiviert haben.

Mein tiefster herzlicher Dank für die beständige moralische Unterstützung liebe Familie, liebe Freunde und Kollegen!

Georgsmarienhütte, November 2015

Verena Stengel

INHALT

KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
VORWORT	V
INHALT	VI
ABBILDUNGEN	IX
TABELLEN	XV

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Abgrenzung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Untersuchungsprogramm	2
2	Grundlagen	5
2.1	Pflasterbauweise im Geh- und Radwegebau	5
2.1.1	Aufbau und Baustoffe der ungebundenen Pflasterbauweise	5
2.1.2	Aufbau und Baustoffe der gebundenen Pflasterbauweise	10
2.2	Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen	15
2.2.1	Aufbau und Wachstum von Baumwurzeln	15
2.2.2	Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum	17
2.3	Lösungsansätze im Wegebau-Baumwurzel-Konflikt	22
2.3.1	Wegebaubezogene Maßnahmen	24
2.3.2	Baum- und wurzelraumbezogene Maßnahmen	25
2.3.3	Wurzelbarrieren und Randeinfassung	26
3	Versuchsanlagen	28
3.1	Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit unterschiedlicher Baustoffe und Bauweisen	28
3.1.1	Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe	28
3.1.2	Herstellung der Versuchsfläche	31
3.1.3	Versuchsflächenbetreuung	32
3.1.4	Öffnung der Versuchsflächen	33
3.1.5	Aufbereitung der Wurzelfrischmasse	34
3.2	Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung der Bettungsstoffe	35
3.2.1	Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe	35
3.2.2	Herstellung der Versuchskörper	37
3.2.3	Versuchsfeldebetreuung	39
3.2.4	Öffnung der Versuchskörper	40

3.3	Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit bodenchemischer Baustoffeigenschaften	41
3.3.1	Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe	41
3.3.2	Herstellung der Versuchskörper	42
3.3.3	Versuchsfeldebetreuung	43
3.3.4	Öffnung der Versuchskörper	44
3.4	Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit hydraulisch gebundener Bettungsstoffe	45
3.4.1	Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe	45
3.4.2	Herstellung der Versuchskörper	47
3.4.3	Versuchsfeldebetreuung	48
3.4.4	Öffnung der Versuchskörper	48
4	Ergebnisse zu den Feld- und Gefäßversuchen	50
4.1	Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit unterschiedlicher Baustoffe und Bauweisen	50
4.1.1	Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile	50
4.1.2	Ebenheitsüberprüfung der Pflasterflächen	51
4.1.3	Wurzelwachstum vor Versuchsbeginn	51
4.1.4	Wurzelentwicklung zu Versuchsende	52
4.1.5	Varianzanalytischer Vergleich der Varianten	61
4.1.6	Bodenchemische Eigenschaften der Bettungsstoffe	62
4.1.7	Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungsstoffe	63
4.1.8	Regressionsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren	64
4.1.9	Methodenbetrachtung	64
4.2	Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung der Bettungsstoffe	66
4.2.1	Entwicklung der Versuchspflanzen	66
4.2.2	Wurzelentwicklung zu Versuchsende	70
4.2.3	Varianzanalytischer Vergleich der Varianten	79
4.2.4	Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungsstoffe	81
4.2.5	Regressions- und korrelationsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren	86
4.2.6	Methodenbetrachtung	91
4.3	Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit bodenchemischer Baustoffeigenschaften	94
4.3.1	Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile	94
4.3.2	Wurzelentwicklung zu Versuchsende	97
4.3.3	Varianzanalytischer Vergleich der Varianten	100
4.3.4	Bodenchemische Eigenschaften der Bettungsstoffe	102
4.3.5	Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungsstoffe	105
4.3.6	Regressionsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren	106
4.3.7	Methodenbetrachtung	108

4.4	Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit hydraulisch gebundener Bettungsstoffe	109
4.4.1	Entwicklung der Gesamtpflanzen	109
4.4.2	Wurzelentwicklung zur Teilauswertung	112
4.4.3	Wurzelentwicklung zu Versuchsende	113
4.4.4	Varianzanalytischer Vergleich der Varianten	122
4.4.5	Eigenschaften der Mörtelbettungen	123
4.4.6	Wurzelwachstum in Abhängigkeit zum löslichem Calcium	124
4.4.7	Methodenbetrachtung	125

5	Einfluss untersuchter Faktoren auf die Durchwurzelbarkeit	128
----------	--	------------

5.1	Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe	128
5.2	Hydrophober Sand als ungebundener Bettungsstoff	141
5.3	Bodenreaktion ungebundener Bettungsstoffe	142
5.4	Calciumgehalt ungebundener Bettungsstoffe	145
5.5	Grenzzonenausbildung der Wegebauweisen	147
5.6	Hydraulisch gebundene Bettungsmörtel	148
5.7	Zusammenfassende Bewertung	150

6	Schadenvorbeugende Ansätze für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten	152
----------	---	------------

6.1	Modifikation der Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe	152
6.2	Einsatz hydraulisch gebundener Bauweisen	154

Quellenverzeichnis		157
--------------------	--	-----

ABBILDUNGEN

Abb. 1:	Untersuchungsprogramm	3
Abb. 2:	Querschnitt der ungebundenen Bauweise mit Pflasterdecke oder Plattenbelag (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 6)	7
Abb. 3:	Querschnitt der Mischbauweise mit gebundener Bettung (vgl. LAY et al., S. 487)	13
Abb. 4:	Grafische Darstellung einer Wurzel mit Wurzelspitze (vgl. RAVEN et al., S. 609)	16
Abb. 5:	Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum; dickumrandet sind die in dieser Arbeit untersuchten Bereiche	17
Abb. 6:	Wurzel Durchmesser im Vergleich zu Poren- und Partikeldurchmesser (nach GISI 1997, S. 51; Ausschnitt)	19
Abb. 7:	Versuchsanlage des Feldversuches zu Versuchsbeginn am 19.04.2011	28
Abb. 8:	Anordnung der Versuchsvarianten (V0 – V8) entlang der Bäume (B1 – B19) (schematisch) (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 7)	28
Abb. 9:	Schematischer Querschnitt des Versuchsflächenaufbaus	29
Abb. 10:	Verlegen des Betonsteins mit profilierter Unterseite (Variante 3) zur Verzahnung der Pflasterdecke mit der Bettungsschicht (links). Unterseite des profilierten Betonpflastersteins (rechts).	30
Abb. 11:	Freigelegte Wurzeln im vorgesehenem Wegebereich, Baum 17 Südseite, Wurzeln geweißt (Datum: 06.04.2011) (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 7)	31
Abb. 12:	Abgeschnittene Wurzeln vor Einbau der Tragschicht; Baum 17 Nordseite (Datum: 05.04.2011)	31
Abb. 13:	Verlegen des Betonrechtecksteins mit aufgetragener Haftschlämme auf der Steinunterseite auf die gebundene Bettungsschicht (Datum: 14.04.2011)	32
Abb. 14:	Verfugen der gebundenen Bauweise mit Fugenmörtel (Datum: 18.04.2011)	32
Abb. 15:	Laubfall auf der Versuchsfläche (Datum: 03.11.2011)	32
Abb. 16:	Mit Reifenabrieb verschmutzte Versuchsfläche; Baum 1 Nordseite (Datum: 18.05.2011)	32
Abb. 17:	Reinigung der von Sand überlagerten Versuchsfläche (Datum: 04.04.2012)	33
Abb. 18:	Aufgekommener Aufwuchs auf den Pflanzflächen (Datum: 06.06.2012)	33
Abb. 19:	Teilöffnung der Versuchsfläche (Südseite) im November 2012 (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 8)	33
Abb. 20:	Raster für die Teilöffnung der Versuchsfläche am Beispiel Baum 1; geöffnet wurden die Flächen A- F (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 8)	33
Abb. 21:	Versuchsanlage des Gefäßversuches zu Versuchsbeginn am 20.12.2012 (FOTO: KIBLER 2013)	35
Abb. 22:	Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) (vgl. KIBLER 2013, S. 56)	35
Abb. 23 :	Schematischer Querschnitt des Versuchskörpers (vgl. KIBLER 2013, S. 52)	36
Abb. 24:	Donau-Moos-Kies als gebrochenes (linkes Bild) und rundes (rechtes Bild) Material	37
Abb. 25:	Anhand einer Schablone eingekürzte Versuchspflanze <i>Salix purpurea</i> (Foto: KIBLER 2013)	38
Abb. 26:	Bemaßung des Versuchskörpers (in cm) (vgl. KIBLER 2013, S. 52)	38

Abb. 27:	Schichtenweiser Einbau der Stoffe mit Aussparung des Pflanzlochs (FOTO: KIBLER 2013)	39
Abb. 28:	Eingebauter Bettungsstoff mit definierter Proctordichte (FOTO: KIBLER 2013)	39
Abb. 29:	Versuchsanlage des Gefäßversuches zu Versuchsbeginn am 24.06.2011 (FOTO: V. SCHLOMBS)	41
Abb. 30:	Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 35)	41
Abb. 31:	Eingekürzte Versuchspflanzen <i>Salix purpurea</i> am 23.06.2011 (FOTO: SCHLOMBS 2012)	43
Abb. 32:	Einsetzen einer Versuchspflanze <i>Salix purpurea</i> in den Pflanzcontainer am 23.06.2011 (FOTO: SCHLOMBS 2012)	43
Abb. 33:	Versuchsanlage des Gefäßversuches am 14.07.2011 (vgl. KÜHN 2012, S. 28)	45
Abb. 34:	Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) Codierung: Nummer der Variante 0 – 4; Nummer der Wiederholung 1 – 4; Bezeichnung der Versuchspflanze A – T (vgl. KÜHN 2012, S. 24 f.)	45
Abb. 35:	Schematischer Querschnitt und Bemaßung des Versuchskörpers (vgl. KÜHN 2012, S. 25)	46
Abb. 36:	Markierung der vier Innenseiten (S1 – S4) eines vom Wurzelballen befreiten Mörtelbettungsblocks (vgl. KÜHN 2012, S.32)	49
Abb. 37:	Mit ROT markierte Rasterpunkte auf einer Innenseite eines Mörtelblocks und penetrierte Wurzel ca. 1,5 mm dick (vgl. KÜHN 2012, S.33)	49
Abb. 38:	Vergleich der Baumhöhen der Bäume 1 – 19 im Feldversuch am 15. August 2013	50
Abb. 39:	Mittlere Anzahl an Grobwurzeln (Wurzeldurchmesser 5 mm bis 20 mm) auf der Nordseite (Balken dunkel) und Südseite (Balken hell) der Bäume 1 - 19 zu Versuchsbeginn (Tiefe der Aufgrabung bis ca. 28 cm)	51
Abb. 40:	Durchschnittliche Wurzelintensitätsstufen (Wurzeldurchmesser < 5 mm) auf der Nord- und Südseite der in der Teilöffnung untersuchten Bäume vor Versuchsbeginn; n = 14 (Tiefe der Aufgrabung bis ca. 28 cm)	51
Abb. 41:	Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der ungebundenen Varianten (n = 4); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Feldversuches von 152,5 Gramm (vgl. Stengel et al. 2013, S. 4)	53
Abb. 42:	Nach Auflockerung der Bettungsschicht wenige ersichtliche Wurzeln bei der Variante V6 (HKS 2/5) auf der Südseite des Baumes B7; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite	54
Abb. 43:	Nach Auflockerung der Bettungsschicht vermehrt ersichtliche Wurzeln bei Variante V1 (Karbon Quarzit 0/5) auf der Südseite des Baumes B2; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite	54
Abb. 44:	Freigelegte fleischige Wurzeln im Bettungsstoff der Variante V2 (hydrophober Sand) auf der Südseite des Baumes B3; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite	55
Abb. 45:	Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) in den vier Wiederholungen (n = 7). Die vier Ausreißer sind die Werte der Variante 2 (hydrophober Sand). Wiederholung 1 und 2: Südseite; Wiederholung 3 und 4: Nordseite	55
Abb. 46:	Gewaschene Wurzelmasse der Variante 2, hydrophober Sand als Bettungsstoff, Wurzeldicke bis 3 mm; Baum 16, Südseite, Feld C	56
Abb. 47:	Gewaschene Wurzelmasse der Variante 5, Hart-Kalkstein 0/11 als Bettungsstoff, Wurzeldicke bis 1,6 mm; Baum 18, Nordseite, Feld F	56

Abb. 48:	Wurzelfrisch- und Wurzeltrockenmasse (g) der ungebundenen Varianten V1 – V6	56
Abb. 49:	Vermehrt ersichtliche Wurzeln in der Grenzschicht der Variante V0 (HKS 0/5) nach Abheben der Pflastersteine auf der Südseite des Baumes B1; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite	57
Abb. 50:	Wurzelbild nach Entfernen der Pflastersteine der Variante V0 auf der Nordseite des Baumes B10; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite. Wurzeln wachsen in die Pflasterfugen ein.	58
Abb. 51:	Weißer, feine Wurzeln nach Entfernen des Steins mit der profilierten Steinunterseite (Variante V3) auf der Südseite des Baumes B15 (links). Unterseite des profilierten Betonpflastersteins (rechts).	58
Abb. 52:	Wurzeln aus der Tragschicht heraus nach oben in die Bettungsschicht wachsend bei Variante V2 (hydrophober Sand) auf der Südseite des Baumes B3; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite	59
Abb. 53:	Wurzeln aus der aufgerauten Tragschicht heraus nach oben in die Bettungsschicht wachsend bei Variante V4 (HKS (0/5) auf der Südseite des Baumes B5; linke Seite Bild entspricht der Baumseite	60
Abb. 54:	Box Plot zum Vergleich des Pflanzengewichtes je Variante zu Versuchsbeginn	66
Abb. 55:	Korrelationsanalytische Auswertung der Beziehung zwischen Wurzelfrischmasse (g) zu Versuchsende und dem Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn (g)	67
Abb. 56:	Box Plot zum Vergleich des Zuwachses des Pflanzengewichtes je Variante zu Versuchsende	68
Abb. 57:	Gesamter Versuchskörper der Variante B1 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche) zu Versuchsende; Pflanze weist einen geringen Zuwachs auf. (Datum: 26.08.2013)	69
Abb. 58:	Gesamter Versuchskörper der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; mit 1,1 M.-% Tonanteil) zu Versuchsende. Pflanze weist einen starken Zuwachs auf. (Datum: 29.08.2013)	69
Abb. 59:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmasse der Varianten zu Versuchsende; rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Gefäßversuches von 221,42 Gramm	72
Abb. 60:	Gewaschener Wurzelballen der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; mit 1,1 M.-% Tonanteil); Wurzelwachstum in Substratkern, Grenzzone zum Rohr sowie kranzförmig im Rohdeckel	73
Abb. 61:	Gewaschener Wurzelballen der Variante B2 (Donau-Moos-Kies mit gebrochener Oberfläche); Wurzelwachstum vermehrt im Substratkern und sehr feine Durchwurzelung des gesamten Bettungsstoffkörpers	73
Abb. 62:	Entfernung des KG-Rohres bei der Variante B1 (Donau-Moos-Kies mit runder Oberfläche); sehr feine Durchwurzelung des gesamten Bettungsstoffkörpers	74
Abb. 63:	Gewaschener Wurzelballen der Variante A4 (Karbon Quarzit 2/5); Durchwurzelung des gesamten Bettungskörpers	74
Abb. 64:	Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.4 (Karbon Quarzit 0/11 mit 11,9 M.-% Schluffanteil); Wurzelwachstum in Substratkern und verstärkt in Grenzzone zum Rohr	75
Abb. 65:	Kompakter Versuchskörper der Variante C1.4 (Karbon Quarzit 0/11 mit 11,9 M.-% Schluffanteil) nach Entfernung des Rohres. Wurzeln wachsen vermehrt in der Grenzzone zum Rohr.	75
Abb. 66:	Entfernung der KG-Rohr-Kappe bei der Variante C1.5 (Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff); kein Wurzelwachstum im Bettungsstoffkörper, Wurzelwachstum in der Grenzzone zum Rohr	76
Abb. 67:	Waschung des Versuchskörpers der Variante C1.5 (Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff); Bettungskörper wird von den Wurzeln	76

	netzartig umgeben. Kein Wurzelwachstum innerhalb des Bettungskörpers.	
Abb. 68:	Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.1 (Karbon Quarzit 0/11; gewaschen mit 0,4 M.-% Schluffanteil)	77
Abb. 69:	Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.1 (Karbon Quarzit 0/11; gewaschen mit 0,4 M.-% Schluffanteil)	77
Abb. 70:	Entfernung der KG-Rohr-Kappe und Beginn des Ausspülens des Bettungsstoffes bei der Variante A1 (Karbon Quarzit 0/5). Wurzeln im Bereich des Bettungskörpers ersichtlich.	78
Abb. 71:	Gewaschener Wurzelballen der Variante A1 (Karbon Quarzit 0/5); gesamter Bettungskörper durchwurzelt, viele Wurzeln über 1 cm Durchmesser	78
Abb. 72:	Entfernung der KG-Rohr-Kappe und Beginn des Ausspülens des Bettungsstoffes bei der Variante A2 (Karbon Quarzit 0/8). Wurzeln im Bereich des Bettungskörpers ersichtlich.	78
Abb. 73:	Gewaschener Wurzelballen der Variante A2 (Karbon Quarzit 0/8); gesamter Bettungskörper durchwurzelt, viele Wurzeln über 1 cm Durchmesser	78
Abb. 74:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungsstoffe	87
Abb. 75:	Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte (g/cm^3) der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch	88
Abb. 76:	Streudiagramm zum Vergleich der Luftkapazität (Vol.-%) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte (g/cm^3) der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch	88
Abb. 77:	Streudiagramm zum Vergleich der nutzbaren Feldkapazität (Vol.-%) der Varianten in Abhängigkeit des Schluffanteils (M.-%) der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch	89
Abb. 78:	Streudiagramm zum Vergleich der Wasserdurchlässigkeit der Varianten in Abhängigkeit der Luftkapazität (Vol.-%) der Bettungsstoffe	90
Abb. 79:	Streudiagramm zum Vergleich der Wasserdurchlässigkeit der Varianten in Abhängigkeit der nutzbaren Feldkapazität (Vol.-%) der Bettungsstoffe	90
Abb. 80:	Box Plots zum Vergleich des Pflanzengewichts (g) der 132 verwendeten Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn ($n = 12$)	94
Abb. 81:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1; Varianten 1, 7, 11, 3 und 9 am 05.08.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012	95
Abb. 82:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 3; Varianten 11 und 10 am 12.08.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012	95
Abb. 83:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1/2; Varianten 6 und 7 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 7 sind verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012	95
Abb. 84:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 2; Varianten 3 und 10 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 10 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012	95
Abb. 85:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 2; Varianten 9 und 11 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der	96

	Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012	
Abb. 86:	Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1; Varianten 1, 7, 11 und 3 am 30.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Varianten 7 sind verkümmert ausgebildet. Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012	96
Abb. 87:	Box Plot zum Vergleich des Zuwachses des Pflanzengewichtes während der Versuchslaufzeit (n = 12)	96
Abb. 88:	Vergleich der Mittelwerte der Sprosslängen des längsten Sprosses (cm) zu Versuchsende (n = 12)	97
Abb. 89:	Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der unterschiedlichen Varianten (n = 12); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Gefäßversuches von 343,88 Gramm	98
Abb. 90:	Gewaschene Wurzelballen der Variante 1, Baumschulboden Bruns. Wurzelballen sind gut ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012	99
Abb. 91:	Gewaschene Wurzelballen der Variante 7, Ibbenbürener Sandstein. Wurzelballen sind stark verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012	99
Abb. 92:	Gewaschene Wurzelballen der Variante 10, Glasasche Granulat mit 0,5 g Al ₂ (SO ₄) ₃ /l. Wurzelballen sind verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012	99
Abb. 93:	Gewaschene Wurzelballen der Variante 11, Glasasche Granulat mit 2 g Al ₂ (SO ₄) ₃ /l. Wurzelballen sind stark verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012	99
Abb. 94:	Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des pH-Werts der Bettungsstoffe	106
Abb. 95:	Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des Calciumgehalts der Bettungsstoffe	107
Abb. 96:	Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des Salzgehalts der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch	107
Abb. 97:	Box Plot zum Vergleich des Zuwachses der Gesamtpflanzen je gebundener Variante zu Versuchsende September 2013; ohne Blattmasse (g); (n = 3)	111
Abb. 98:	(von links nach rechts) 1. Verdickte Wurzel an einer Penetrationsstelle; 2. Einwuchs von ca. 1 cm in den Mörtelblock hinein; 3. Anhaftende Wurzel mit mehreren Penetrationsstellen in den Mörtelblock (vgl. KÜHN 2012, S. 52)	112
Abb. 99:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) (im Substratkern) der unterschiedlichen gebundenen Varianten zu Versuchsende (n = 3); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert von 612,00 Gramm	114
Abb. 100:	Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen im Substratkern zu Versuchsende mit der Frischmasse der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn; (n = 3)	115
Abb. 101:	Freigrabung des Wurzelballens der ungebundenen Variante (Versuchskörper 00Q mit 553,4 g Wurzelfrischmasse); Wurzeln erstrecken sich aus dem Substratkern heraus im gesamten ungebundenem Bettungstoff.	115
Abb. 102:	Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen der ungebundenen Variante (Versuchskörper 00Q mit 553,4 g Wurzelfrischmasse)	116
Abb. 103:	Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen der ungebundenen Variante (Versuchskörper 02S mit 1.704,8 g Wurzelfrischmasse)	116

Abb. 104:	Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen aus der ungebundenen Variante mit Hart-Kalkstein 0/5 (Versuchskörper 02S mit 1.704,8 g Wurzelfrischmasse)	116
Abb. 105:	Gewaschener Wurzelballen (aus Substratkern) der gebundene Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (Versuchskörper 20E mit 377,8 g Wurzelfrischmasse)	116
Abb. 106:	Teile des Mörtelblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (22G)	117
Abb. 107:	Teile des Mörtelblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat (31J) Blockinnenseiten mit Wurzeldeckungsgrad-Rang 3 (hoch) zeigen nach oben.	118
Abb. 108:	Grenzbereich zwischen Wurzelballen und Mörtelblockinnenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass (10A); Wurzelwachstum bis 1 cm in den Mörtelblock hinein.	118
Abb. 109:	Streudiagramm zum Vergleich der mittleren Wurzelfrischmassen im Substratkern zu Versuchsende mit dem visuell eingeschätzten Wurzeldeckungsgrad-Rang; (n = 3) Wurzeldeckungsgrad-Rang: 1: sehr gering; 2: gering; 3: hoch; 4: sehr hoch	119
Abb. 110:	Blockaußenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (20E); Wurzelwachstum aus den Pflastersteinfugen heraus	120
Abb. 111:	Blockaußenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas (43P); Wurzelwachstum zwischen Pflasterstein und Haftschlämme	120
Abb. 112:	Teil des Versuchsblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (23H) Draufsicht auf die Grenzschicht. Die feinen Wurzeln durchwachsen die komplette Grenzschichtentiefe	121
Abb. 113:	Blockinnenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass (10A); verstärktes Wurzelwachstum in den Ecken des Mörtelblocks	121
Abb. 114:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungsstoffe	129
Abb. 115:	Drei Bettungsstoffgruppen mit unterschiedlichen Luftkapazitäten und nutzbaren Feldkapazitäten; R^2 Linear = 0,930	131
Abb. 116:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungsstoffe	132
Abb. 117:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit der Bettungsstoffe	135
Abb. 118:	Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte der Bettungsstoffe	137
Abb. 119:	Schwach negative Korrelation zwischen der Wurzelfrischmasse und dem Anteil an abschlämmbaren Teilen im Variantenblock C	138
Abb. 120:	Wurzelfrischmasse je Pflanze (g) in Abhängigkeit zum pH-Wert (in CaCl_2) der untersuchten Stoffe zu Versuchsbeginn (Gefäßversuch nach SCHLOMBS 2012)	142
Abb. 121:	Wurzelfrischmasse je Pflanze (g) in Abhängigkeit zum Gehalt an löslichen Calciumionen der untersuchten Stoffe	145

TABELLEN

Tab. 1:	Übersicht der Feld- und Gefäßversuche	4
Tab. 2:	Schichtdicken und Tragfähigkeit für die Pflaster-(Platten)bauweise im Geh- und Radwegebau auf F2- und F3-Untergrund/Unterbau (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 25)	6
Tab. 3:	Regelwerke für die ungebundene Pflasterbauweise	7
Tab. 4:	Anforderungen an die Eigenschaften von Bettungstoffen für den Anwendungsbereich: Pflasterdecke für Geh- und Radwege (ungebundene Bauweise)	8
Tab. 5:	Regelwerke für die gebundene Pflasterbauweise	11
Tab. 6:	Belastungskategorien bestehender Regelwerke	12
Tab. 7:	Einteilung des Baumwurzelsystems nach Wurzeldurchmessern und Funktionen	16
Tab. 8:	Beeinflussung der Porosität durch die Eigenschaften der Kornform, Korngrößenabstufung und Lagerung (vgl. FLÜHLER unpubl. in GISI 1997, S. 27)	18
Tab. 9:	Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 182)	18
Tab. 10:	Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Äquivalentdurchmesser mit dem pF-Wert als Grenzwert zur Entwässerung kreiskapilarer Poren (vgl. Scheffer/Schachtschabel 2010, S. 181)	20
Tab. 11:	Einteilung der pH- Werte bei Böden (vgl. MENGEL 1991, S.194)	21
Tab. 12:	Strategien zur Reduzierung von Schäden durch Baumwurzeln an Wegebelägen. (vgl. COSTELLO & JONES 2003, S. 5)	23
Tab. 13:	Varianten des Feldversuches	28
Tab. 14:	Varianten des Gefäßversuches (vgl. KIBLER 2013, S. 26)	35
Tab. 15:	Varianten des Gefäßversuches (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 28)	41
Tab. 16:	Varianten des Gefäßversuches (vgl. KÜHN 2012, S. 21 f.)	45
Tab. 17:	Technische Eigenschaften der Bettungstoffe (vgl. KÜHN 2012, S. 22)	47
Tab. 18:	Wurzelmassen (g) der ungebundenen Varianten des Feldversuches	52
Tab. 19:	Test auf Normalverteilung der Residuen	61
Tab. 20:	Test auf Homogenität der Varianzen	61
Tab. 21:	Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse_logarithmiert	61
Tab. 22:	Bodenreaktion (pH-Wert) der ungebundenen Bettungstoffe	62
Tab. 23:	Gehalt an löslichen Calciumionen der ungebundenen Bettungstoffe	62
Tab. 24:	Salzgehalte der ungebundenen Bettungstoffe	63
Tab. 25:	Korngrößenzusammensetzung der ungebundenen Bettungstoffe aus dem Feldversuch	63
Tab. 26:	Wurzelmassen (g) der Varianten des Gefäßversuches zu Versuchsende	70
Tab. 27:	Test auf Normalverteilung der Residuen	79
Tab. 28:	Test auf Homogenität der Varianzen	79
Tab. 29:	Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse	79
Tab. 30:	Tukey-HSD ^{a,b,c} ; Wurzelfrischmasse (g)	80
Tab. 31:	Korngrößenzusammensetzung der Bettungstoffe (Messergebnisse nach KIBLER 2013)	81
Tab. 32:	Proctordichte (ρ_{Pr}) mit optimalem Wassergehalt (w_{Pr}) der Bettungstoffe (Messergebnisse nach KIBLER 2013)	83
Tab. 33:	pF-Werte zur Porenvolumenbestimmung der Varianten (Messergebnisse nach KIBLER 2013)	84
Tab. 34:	Porengrößenverteilung der Bettungstoffe bei definierter Proctordichte (Messergebnisse nach KIBLER 2013)	85

Tab. 35:	Errechneter Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Bettungsstoffe (Messergebnisse nach Kießler 2013)	86
Tab. 36:	Wurzelfrischmassen (g) der Varianten	97
Tab. 37:	Test auf Normalverteilung der Residuen	100
Tab. 38:	Test auf Homogenität der Varianzen	100
Tab. 39:	Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse	100
Tab. 40:	Tukey-HSD ^{a,b} Wurzelfrischmasse (g)	101
Tab. 41:	Volumengewichte der ungebundenen Bettungsstoffe	102
Tab. 42:	Bodenreaktion der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 47)	102
Tab. 43:	Entwicklung des pH-Werts bei Variante 10 und 11 (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 53)	103
Tab. 44:	Salzgehalt der ungebundenen Bettungsstoffe zu Versuchsbeginn	103
Tab. 45:	Calciumgehalt der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 46)	104
Tab. 46:	Nährstoffgehalte der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, Anhang 1.2)	104
Tab. 47:	Korngrößenzusammensetzung der Bettungsstoffe (Messergebnisse nach SCHLOMBS 2012, S.47)	105
Tab. 48:	Gesamtfrischmasse (g) der Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende mit Zuwachs (g); ohne Blattmasse	110
Tab. 49:	Summe der Penetrationsstellen bei den Varianten zur Teilauswertung (Oktober 2011)	112
Tab. 50:	Wurzelfrischmasse im Substratkern zu Versuchsende (g)	113
Tab. 51:	Wurzelmassen im Substratkern (g) der gebundenen Varianten des Gefäßversuches zu Versuchsende	113
Tab. 52:	Ränge der Wurzeldeckungsgrade	117
Tab. 53:	Visuelle Beobachtungen zum Wurzelwachstum bei den Versuchskörpern	119
Tab. 54:	Test auf Normalverteilung der Residuen	122
Tab. 55:	Test auf Homogenität der Varianzen	122
Tab. 56:	Tests der Zwischensubjekteffekte abhängige Variable: Wurzelfrischmasse im Substratkern (g)	122
Tab. 57:	Gesamtionenbilanz der Varianten (Messergebnisse nach KÜHN 2012, S. 54)	123
Tab. 58:	Gehalt an löslichem Calcium der Varianten zum Ende der ersten Versuchslaufzeit (Messergebnisse nach KÜHN 2012, S. 55)	124
Tab. 59:	Rohdichte der Varianten nach Mörtelherstellung (Messergebnisse nach Kühn 2012, S. 27)	124
Tab. 60:	Gehalt an löslichen Calciumionen der Bettungsmörtel in Zusammenhang zur Einwurzelungsintensität	124
Tab. 61:	Anforderungen an die Bodenreaktion von Baumsubstraten	144
Tab. 62:	Einfluss untersuchter Faktoren auf die Durchwurzelbarkeit und Einschätzung schadenvorbeugender Wirkung	150

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Abgrenzung

Im städtischen Raum führt das Nebeneinander von Bäumen und angrenzenden Verkehrswegen besonders bei gering belasteten Flächen wie den **Geh- und Radwegen**, häufig zum **Einwurzeln** der Baumwurzeln in die **Schichten des Wegebbaus** (vgl. HAMILTON 1984a; DAY 1991; KRISTOFFERSON 1999; REICHWEIN 2002). So wiesen die untersuchten Wegebaustoffe in vorrangegangenen Betrachtungen u.a. von REICHWEIN (2002) sowie STÜTZEL et al. (2009) insgesamt ausreichende **bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften** für das Eindringen der Wurzeln auf.

In den Beobachtungen von REICHWEIN (2002) wurzeln angrenzende Baumwurzeln insbesondere in die **Fugen** der Pflaster- und Plattenbeläge, in die **Grenzschichten** direkt unter dem Belag sowie in die **Pflasterbettung** (vgl. REICHWEIN 2002, S. 189). Durch das Dickenwachstum der eingedrungenen Wurzeln kommt es sodann sowohl bei **ungebundenen** als auch bei **gebundenen Bauweisen** zu Schäden am Belag (vgl. KOPINGA 1992; REICHWEIN 2002). Die verursachten **Schadbilder** hängen dabei von den verschiedenen Wegebauweisen ab. So erfolgt bei Pflasterflächen das Anheben der Pflastersteine, die Aufweitung von Fugen oder, bei dickeren Wurzeln, die Beschädigung der schweren Randeinfassungen, bei Plattenbelägen kommt es zu Aufkantungen oder bei Asphaltbelägen werden Wölbungen und Risse hervorgerufen, (vgl. REICHWEIN 2002, S. 199 ff.).

Die Schäden stellen insbesondere für Städte und Kommunen ein Problem dar, da diese in der Verkehrssicherungspflicht stehen und Schäden an Geh- und Radwegen kostenintensiv beseitigt werden müssen. Reparaturen von Schäden in den Verkehrsflächen, die durch oberflächennahes Wurzelwachstum entstanden sind, gestalten sich sowohl bautechnisch als auch hinsichtlich des Baumschutzes jedoch meistens schwierig. Deshalb ist der **Schadenprävention** zum Zeitpunkt des Neubaus eines Baumstandortes angrenzend an Geh- und Radwegen ein hoher Stellenwert einzuräumen (vgl. REICHWEIN 2002, S. 231). Im Falle einer **Sanierung** des Wegebelages an bestehenden Baumstandorten kann es ansonsten zur Schädigung der Baumwurzeln und somit ggf. zur Beeinträchtigung der Baumvitalität und -statik oder zur Verkürzung der Lebensdauer des Baumes kommen (vgl. REICHWEIN 2002, S. 218 f.). Eine Verletzung bzw. Kappung der Wurzeln kann zudem auch zu einer Anregung des Wurzelwachstums führen und das Problem der Wegeschädigung nach einigen Jahren erneut hervorrufen.

Um Schäden vorzubeugen, reicht es laut den Erkenntnissen verschiedener Untersuchungen nicht aus, ausreichend große Wurzelräume für die Baumwurzeln zu schaffen. Hiernach müssen Deck- und Tragschichten der Wege so ausgebildet werden, dass Wurzeln nicht in diese eindringen können (vgl. REICHWEIN 2002; KÄPPELI 2006). Das weite Untersuchungsgebiet „Baumwurzel-Wegebau-Konflikt“ ist somit interdisziplinär zu behandeln, um zum einen optimale Bedingungen für den Straßenbaum zu schaffen (vgl. u.a. LIESECKE u. HEIDGER 1994; GRABOSKI u. BASSUK 1996; FLL 2010; SCHÖNFELD u. BÖLL 2013) und zum anderen das Eindringen der Baumwurzeln in die Schichten des Wegebbaus zu vermindern oder bestenfalls gänzlich zu vermeiden (vgl. REICHWEIN 2002; STRECKENBACH 2009; COSTELLO u. JONES 2003).

Die vorliegende Arbeit legt den Schwerpunkt auf den **Wegebau** und untersucht anhand von **Feld- und Gefäßversuchen** die Durchwurzelbarkeit **ungebundener und gebundener Bauweisen** mit dem übergeordneten Ziel mögliche **schadenvorbeugende Lösungsansätze** für den **Geh- und Radwegebau an Baumstandorten** abzuleiten.

1.2 Zielsetzung

Das anwendungsorientierte Ziel dieser Arbeit ist es, die Wirkung von Baustoffeigenschaften und Bauweisen auf die Durchwurzelbarkeit zu untersuchen und daraus mögliche **schadenvorbeugende Lösungsansätze** für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten abzuleiten.

Als Grundlage für die Lösungsansätze sollen die Ergebnisse aus den durchgeführten Feld- und Gefäßversuchen

- mit bereits bestehenden Forschungsergebnissen diskutiert werden;
- Erkenntnislücken zur Wirkung ausgewählter Parameter von Baustoffen und Bauweisen auf den Wurzeleinwuchs schließen und damit
- die Neu- und Weiterentwicklung von geeigneten Baustoffen für Trag-, Bettungsschichten sowie von Belägen aus Pflastersteinen in verschiedenartigen ungebundenen und gebundenen Bauweisen fördern.

Die abzuleitenden schadenvorbeugenden Ansätze sollen einen Beitrag leisten

- zur Minimierung des Einwurzeln in die Schichten des Geh- und Radwegebaus und somit zur Verringerung der Eingriffe im Wurzelbereich von Bäumen im Rahmen von Wegereparaturen
- zur Entwicklung von Maßnahmen zur Schadenbehebung
- zur Weiterentwicklung bestehender Regelwerke
- zur Senkung der Instandhaltungskosten für die Kommunen durch Verlängerung von Reparaturintervallen von Geh- und Radwegen
- zur Einhaltung der Verkehrssicherungspflicht der Kommunen
- zur Ermittlung weiteren Forschungsbedarfs.

1.3 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm der vorliegenden Arbeit wird in Abbildung 1 dargestellt. Zu Beginn werden mittels Literaturrecherche die **Grundlagen** aufgezeigt. Hiermit werden zum einen die Bauweisen und Baustoffe im Bereich der Geh- und Radwege, also die bautechnische Seite, dargestellt. Zum anderen wird die vegetationstechnische Betrachtung hinsichtlich des Baumwurzelswachstums beschrieben. Des Weiteren werden bestehende Lösungsansätze im Wegebau-Baumwurzels-Konflikt aufgezeigt.

Um weitere Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Wegebauweisen/Bauweisen für Geh- und Radwege und das Wurzelwachstum in die Wegebauweisen zu gewinnen, werden **Feld- und Gefäßversuche** durchgeführt. Hierbei wird die **Wurzelentwicklung** erfasst, dokumentiert und ausgewertet.

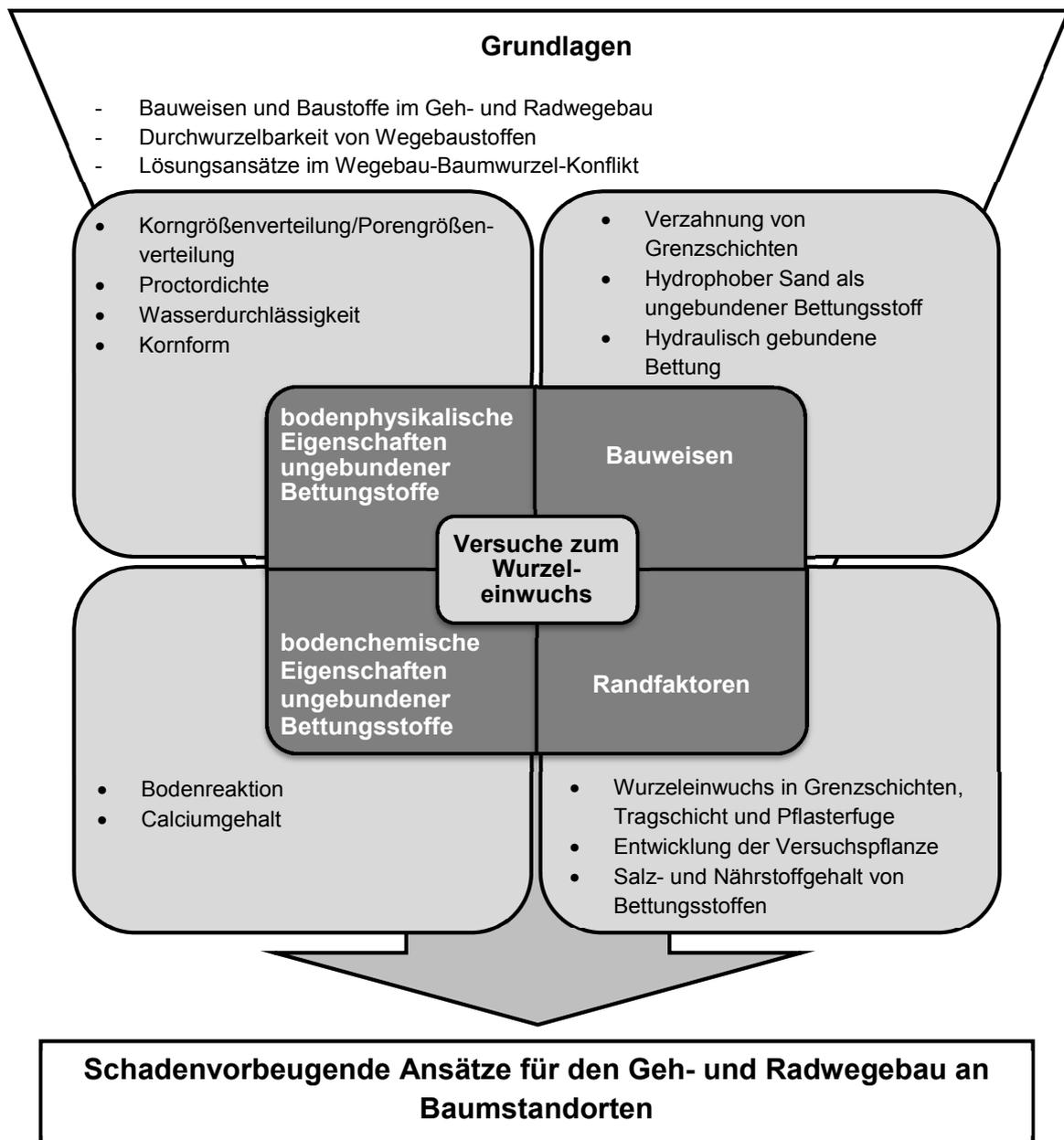


Abb. 1: Untersuchungsprogramm

Die zu untersuchende **Kernfrage** lautet:

Können bestimmte bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften von Bettungsstoffen oder unterschiedliche Bauweisen das Einwurzeln von Baumwurzeln in die oberen Schichten des Geh- und Radwegebaus verhindern?

Der Fokus liegt dabei in der Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen **Bettungsstoffen** auf den Wurzeinwuchs, da diese dünne, oberflächennahe Wegebauweise bezüglich des Versuchszeitraums am aussagekräftigsten untersucht werden kann. Zu den **übergeordneten Untersuchungsfaktoren** gehören:

- die **Korngrößenverteilung** ungebundener Bettungsstoffe,
- ein **hydrophober Sand** als ungebundener Bettungsstoff,
- die **Bodenreaktion** ungebundener Bettungsstoffe,
- der **Calciumgehalt** ungebundener Bettungsstoffe,
- die **Grenzschichtbildung** der Wegebauweise,
- **hydraulisch gebundene Bettungsmörtel**.

Zur tieferen Charakterisierung der verwendeten Stoffe werden weitere Stoffeigenschaften aufgezeigt, welche im Zusammenhang mit den Untersuchungsfaktoren stehen. Zudem werden neben dem Wurzelwachstum in die Bettungsschicht als **Randfaktoren** die beobachtete Durchwurzelbarkeit der Tragschicht, Pflasterfugen und Grenzschichten sowie die Entwicklung der Versuchspflanzen beschrieben.

Eine Übersicht der **Feld- und Gefäßversuche** gibt die nachstehende Tabelle 1.

Tab. 1: Übersicht der Feld- und Gefäßversuche

Feldversuch		Gefäßversuche		
nach:	STENGEL et al. 2013	KIBLER 2013 (Versuchsaufbau)	SCHLOMBS 2012	KÜHN 2012 (1. Auswertung)
Laufzeit:	Apr. 2011 – Nov. 2012 (18 Monate)	20.12.2012 – 2.09.2013 (8 Monate)	24.06.2011 – 24.10.2011 (4 Monate)	24.06.2011 – 31.10.2011 (4 Monate) => 1. Auswertung 24.06.2011 – 18.09.2013 (27 Monate) => 2. Auswertung
Bauweisen:	ungebunden/gebunden	ungebunden	ungebunden	ungebunden/gebunden

Gesamtheitlich ist der praxisnahe **Feldversuch** in den Ablauf des vom Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsvorhabens einzuordnen.

Der **Gefäßversuch** nach KIBLER (2013) betrachtet insbesondere den Einfluss der Korngrößenverteilung und der damit verbundenen Porengrößenverteilung von ungebundenen Bettungsstoffen auf das Eindringverhalten von Baumwurzeln. KIBLER (2013) erstellte in Anlehnung an MÜLLER (2011) den Versuchsaufbau. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der von KIBLER (2013) aufgebaute Versuch weiterbetreut, ausgewertet und interpretiert.

Ein weiterer **Gefäßversuch** wurde 2012 durch SCHLOMBS durchgeführt. Er untersucht insbesondere den Einfluss ausgewählter bodenchemischer Baustoffeigenschaften. Die weiterführende Auswertung im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt auf den nach SCHLOMBS (2012) erhobenen Rohdaten.

Ein dritter **Gefäßversuch** zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit hydraulisch gebundener Bettungsstoffe untersucht unterschiedliche Rezepturen von Mörtel auf ihre Durchwurzelbarkeit. Der Versuchsaufbau sowie eine Teilauswertung erfolgten durch KÜHN (2012). Im Anschluss erfolgte mit der vorliegenden Arbeit eine weiterführende Versuchsbetreuung sowie nach insgesamt 27 Monaten Versuchslaufzeit eine abschließende Auswertung.

Nach der differenzierten Analyse der Ergebnisse zu den einzelnen untersuchten Faktoren werden die gewonnenen Ergebnisse herangezogen, um mögliche **Lösungsansätze für den Geh- und Radwegbau** hinsichtlich des Wegebau-Baumwurzel-Konflikts abzuleiten.

2 Grundlagen

2.1 Pflasterbauweise im Geh- und Radwegbau

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der Betrachtung der Durchwurzelbarkeit einer ungebundenen Pflasterbauweise. Hier liegt der Fokus zudem auf den Bettungstoffen. Des Weiteren werden hydraulisch gebundene Bettungsmörtel auf ihre Durchwurzelbarkeit hin untersucht. Folglich wird auf die Darstellung der ungebundenen und gebundenen Pflasterbauweisen eingegangen.

Im Allgemeinen werden für Verkehrsflächen in Deutschland nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO 12) verschiedene Schichtenaufbauten unterschieden. Dabei richtet sich die **Dimensionierung der Schichten** insgesamt nach der Verkehrsflächenfunktion, der Belastungsklasse, der Lage der Verkehrsfläche im Gelände, den Bodenverhältnissen und der Bauweise der geplanten Fläche (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 7).

Hinsichtlich der Bauweise wird unterschieden in Asphalt-, Beton- oder Pflasterdecke. Die **Wahl der Bauweise** ist unter Berücksichtigung von örtlichen Gegebenheiten, regionalen Erfahrungen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten und Umweltbedingungen (wie zum Beispiel: Verwendung örtlicher Baustoffe, Verwendung von industriell hergestellten Gesteinskörnungen und Recycling-Baustoffen, nutzungsbedingten Besonderheiten) zu treffen (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 10).

Neubau und Erneuerung von **Geh- und Radwegen** werden nach der RStO 12 gesondert betrachtet. Diese werden nicht den sogenannten Belastungsklassen, sondern den „sonstigen Verkehrsflächen“ zugeordnet. Zu den standardisierten Bauweisen gehören hier die Asphalt-, Beton- und die Pflaster- (Platten)bauweise sowie die Bauweise ohne Bindemittel.

Aussagen zur **gebundenen bzw. teilgebundenen Pflasterbauweise** von Geh- und Radwegen werden in der RStO 12 nicht getroffen. Zu Pflasterbauweisen unter Verwendung hydraulisch gebundener Baustoffe werden in 2.1.2 die derzeit existierenden Regelwerke dargestellt.

2.1.1 Aufbau und Baustoffe der ungebundenen Pflasterbauweise

Schichtdicken und Tragfähigkeiten

In Tabelle 2 werden die nach der RStO 12 geforderten **Schichtdicken** sowie **Tragfähigkeiten** (als E_{v2} -Mindestwert) für die in dieser Arbeit betrachtete Pflaster- (Platten)bauweise aufgezeigt. Alle Bauweisen sind so konzipiert, dass diese von Fahrzeugen des Unterhaltungsdienstes befahren werden können. Jedoch ist eine „auch nur gelegentliche Nutzung durch andere Kraftfahrzeuge [...] nicht berücksichtigt“ (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 25).

Tab. 2: Schichtdicken und Tragfähigkeit für die Pflaster-(Platten)bauweise im Geh- und Radwegebau auf F2- und F3-Untergrund/Unterbau (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 25)

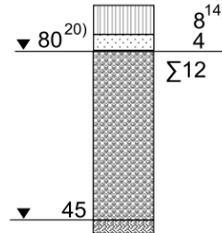
Bauweise: Pflaster (Plattenbelag)

Dicke des frostsicheren Oberbaus (cm)	30	40
---------------------------------------	-----------	-----------

Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) auf Planum

Decke

Schotter-, Kiestragschicht oder Frostschutzschicht



Dicke der Schotter-, Kiestragschicht oder Frostschutzschicht (cm)	18	28
---	-----------	-----------

14) Auch geringere Dicke möglich

20) Bei Belastung durch Fahrzeuge (Wartung und Unterhaltung) $E_{v2} \geq 100$ MPa

▼ E_{v2} -Mindestwerte in MPa (E_{v2} : Verformungsmodul)

Bei der Dimensionierung der Schichtdicken wird die Frostempfindlichkeitsklasse der anstehenden Böden einbezogen, damit der Oberbau frostsicher ist, d.h. keine Schäden durch Frost entstehen können. Treten Böden mit einer **Frostempfindlichkeitsklasse F1** auf, sind keine Frostschutzmaßnahmen notwendig und die Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) wird direkt auf diese aufgetragen. In diesem Fall gibt die RStO 12 Anhaltswerte für erforderliche Schichtdicken der ToB gemäß den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ (ZTV SoB-StB) in Abhängigkeit von den E_{v2} -Werten der Unterlage und der Art der Tragschicht (vgl. FGSV 2012; RStO 12, S. 17). Bei Böden der **Frostempfindlichkeitsklassen F2 und F3** beträgt die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus 30 cm. Aus dieser Vorgabe richtet sich dann die Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material bzw. der Schotter-, Kiestragschicht oder Frostschutzschicht.

Mit der Angabe des Verformungsmoduls E_{v2} legt die RStO 12 Anforderungen an die **Tragfähigkeit** der unterschiedlichen Schichten fest. Der Mindestwert des Verformungsmoduls soll auf dem anstehenden Boden (Untergrund) 45 MPa sowie auf der Unterlage 80 MPa betragen.

Schichtenaufbau

Der Aufbau einer Verkehrsfläche, wie auch der der Geh- und Radwege, wird unterteilt in die Bereiche Oberbau, Unterbau sowie dem Untergrund (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 9).

Oberbau: alle Schichten oberhalb des Planums

Planum: unter dem Oberbau befindliche plangerechte Oberfläche des Untergrunds bzw. des Unterbaus

Unterbau: Bodenschüttung

Untergrund: natürlich anstehender Boden

Innerhalb des **Oberbaus** werden verschiedene Schichten unterschieden, die am Beispiel der Pflaster- bzw. Plattenbauweise in der Abbildung 2 dargestellt werden.

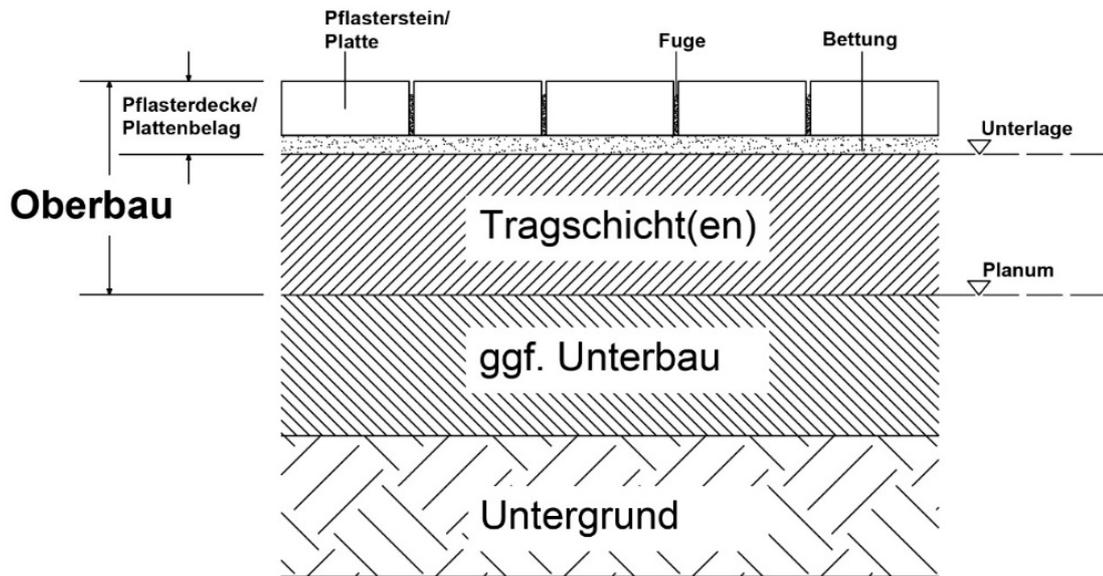


Abb. 2: Querschnitt der ungebundenen Bauweise mit Pflasterdecke oder Plattenbelag (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 6)

Nachfolgend wird auf die für diese Arbeit relevanten Beschreibungen der einzelnen Schichten eingegangen. Hierbei werden die in der Tabelle 3 aufgezeigten Regelwerke herangezogen.

Tab. 3: Regelwerke für die ungebundene Pflasterbauweise

Kurztitel	Langtitel
ATV DIN 18315	Verkehrswegebauarbeiten - Oberbauschichten ohne Bindemittel
ATV DIN 18318	Verkehrswegebauarbeiten - Pflasterdecken und Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen
Technische Lieferbedingungen	
TL Pflaster-StB 06	Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbeläge und Einfassungen
TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
TL SoB-StB	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
Zusätzliche technische Vertragsbedingungen	
ZTV Pflaster- StB 06	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen
ZTV SoB-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
ZTV E-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau
Zusätzliche Richtlinien/Merkblätter/Arbeitspapiere	
M FP 1	Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie für Einfassungen (R2)
---	Richtlinie Pflaster- und Plattendecken für befahrene und begangene Flächen in ungebundener und gebundener Ausführung sowie in Mischbauweisen
---	Merkblatt für die Herstellung von Trag- und Deckschichten ohne Bindemittel

Deckschicht:

Die **Pflasterdecke** als oberste Schicht des Oberbaus besteht aus dem eigentlichen Pflaster- bzw. Plattenbelag sowie der Bettung und der Fuge/Fugenfüllung.

Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterflächen, Plattenbelägen und Einfassungen“ (ZTV Pflaster-StB 06) beschreiben die **Pflastersteine** als Pflastersteine aus Beton, Pflasterziegel oder Pflasterklinker sowie Pflastersteine aus Natursteinen. Dabei müssen die Anforderungen der TL Pflaster-StB 06 erfüllt werden.

Die **Fugen** mit einer Breite von 3 mm bis 5 mm stellen den Zwischenraum der Pflastersteine oder der Platten dar. Dabei besteht der Fugenstoff, mit dem der Zwischenraum verfüllt wird, ebenso wie die Bettung aus Baustoffgemischen ohne Bindemittel gemäß den Anforderungen der TL Pflaster-StB 06. Anforderungen an die Fugen bzw. den Fugenstoff sind in der ATV DIN 18318, den ZTV Pflaster-StB sowie in den TL Pflaster-StB enthalten.

Die **Bettung** als unterer Teil der Pflasterdecke besteht bei der ungebundenen Bauweise aus Baustoffgemischen ohne Bindemittel gemäß den „Technischen Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen“ (TL Pflaster-StB 06) (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 6 ff.). Die als Bettung verwendeten Schüttstoffe bestehen aus witterungsbeständigem, körnigem Material. Insgesamt soll die Bettung an örtliche Verhältnisse sowie an die zukünftige Beanspruchung angepasst werden (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 12). Die **Schichtdicke** muss im verdichteten Zustand 30 mm bis 50 mm betragen. Bei dickeren Steinen ab einer Nenndicke von 12 cm liegt die Schichtdicke zwischen 40 mm bis 60 mm (vgl. ATV DIN 18318: 2015-08, S. 11).

Tab. 4: Anforderungen an die Eigenschaften von Bettungstoffen für den Anwendungsbereich: Pflasterdecke für Geh- und Radwege (ungebundene Bauweise)

Eigenschaften	Anforderungen	geregelt in:
Körnung	0/4, 0/5, 0/8 mm Wenn Nenndicke der Steine ab 12 cm und Bettungsdicke > 40 mm: 0/11 möglich Wenn keine Erreichbarkeit über KFZ: 0/2, 1/3, 2/5 mm möglich	ATV DIN 18318: 2015-08; S. 11 ATV DIN 18318: 2015-08; S. 8
Korngrößenverteilung	Keine Anforderungen	TL Pflaster-StB 06 (Tabellen 4-6)
Wasserdurchlässigkeit	muss im eingebauten und verdichteten Zustand dauerhaft gegeben sein.	TL Pflaster-StB 06, S. 10
Frostunempfindlichkeit	Durchgang 0,063 mm Massenanteil in Prozent ≤ 5	TL Pflaster-StB 06 (Tabelle 1)
Überkomanteil	100 M.-% Siebdurchgang bei 1,4 D; 90-99 M.-% Siebdurchgang bei D 1)	TL Pflaster-StB 06 (Tabelle 3), S.11
Maximaler Feinanteil	Durchgang 0,063 mm Massenanteil in Prozent ≤ 5	TL Pflaster-StB 06 (Tabelle 1)
Minimaler Feinanteil	Keine Anforderungen	TL Pflaster-StB 06 (Tabelle 2)
Filterstabilität	$D_{15}/d_{85} \leq 5$ und $D_{50}/d_{50} \leq 25$ 2)	ZTV Pflaster-StB ATV DIN 18318: 2015-09; S. 9

1) D = obere Siebgröße

2) D_{15} ; D_{50} = Korndurchmesser [mm] des Tragschichtmaterials, der bei 15 bzw. 50 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt. d_{50} ; d_{85} = Korndurchmesser [mm] des Bettungsmaterials, der bei 50 bzw. 85 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB, S. 14).

Bezüglich der **Körnung von Bettungsstoffen** werden unter bautechnischen Belangen verschiedene Anforderungen gestellt. Die für die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen bedeutsamen Anforderungen sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

Insgesamt sieht die ATV DIN 18318 für die Bettung **Körnungen** von 0/4 mm, 0/5 mm sowie 0/8 mm vor. Sobald die Nenndicke der Steine größer 12 cm und die Bettungsdicke größer 40 mm liegen ist eine Körnung von 0/11 mm möglich. Zudem können Körnungen von 0/2 mm, 1/3 mm, 2/5 mm verwendet werden, wenn keine Befahrung mit Kraftfahrzeugen erfolgt (vgl. ATV DIN 18318:2015-08, S. 8). Für nicht befahrbare Geh- und Radwege werden nach TL Pflaster-StB 06 keine Anforderungen hinsichtlich der **Korngrößenverteilung** gestellt. Vorgaben zur Korngrößenverteilung nach TL Pflaster-StB 06 beziehen sich lediglich auf Flächen mit Verkehrsbelastung. Lieferkörnungen 2/5, 2/8 sowie 2/11 sollten als Bettungsstoff für Verkehrsflächen, die mit Kraftfahrzeugen befahren werden, dabei nicht verwendet werden (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 13).

Tragschicht:

Die **ungebundene Tragschicht** stellt eine lastverteilende Schicht zwischen Deckschicht und Planum dar. Die RStO 12 beschreiben die ungebundenen Tragschichten sowie die Tragschichten mit Bindemitteln. Bei den Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) sind zu unterscheiden (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 9):

- **Frostschuttschicht:** Besteht aus frostunempfindlichen Baustoffgemischen und sollen Frostschäden im Oberbau vermeiden.
- **Schottertragschicht:** Besteht aus korngestuftem Baustoffgemisch aus überwiegend gebrochenen (kantigen) Gesteinskörnungen.
- **Kiestragschicht:** Besteht aus korngestuftem Baustoffgemisch aus ungebrochenen (runden) Gesteinskörnungen ggf. unter Zusatz von gebrochenen (kantigen) Gesteinskörnungen.

Anforderungen zu den Tragschichten ohne Bindemittel insgesamt sind in der ATV DIN 18315, den ZTV SoB-StB sowie den TL SoB-StB und den TL Gestein-StB enthalten. Die zu verwendenden Baustoffgemische für Kies- und Schottertragschichten müssen den TL SoB-StB entsprechen.

Neben den Tragschichten wird zudem die **Schicht aus frostunempfindlichem Material** unterschieden. Diese Schicht kann zusätzlich unter die eigentliche Tragschicht angeordnet werden, um eine ausreichende Dicke des frostsicheren Oberbaus zu schaffen. Auch im verdichteten Zustand muss diese Schicht eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit gewährleisten (vgl. FGSV 2012; RStO 12, S. 9).

Untergrund/Unterbau:

Als **Untergrund** wird der natürlich anstehende Boden oder Fels verstanden, der gegebenenfalls verbessert werden muss. Wohingegen der **Unterbau** eine Bodenschüttung darstellt (vgl. FGSV 2006: ZTV Pflaster-StB 06, S. 6). Den Abschluss des Untergrundes / des Unterbaus bildet das **Planum**, welches für den darauf aufbauenden Oberbau eine bestimmte Mindesttragfähigkeit von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ (geprüft durch Plattendruckversuch nach DIN 18134) auch für den Geh- und Radwegebau erfüllen muss (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 25). „Die ZTV E-StB regeln die Ausführung

und die Qualitätsanforderungen für den Untergrund und Unterbau von Verkehrsflächen und für sonstige Erdbauwerke“ (vgl. FGSV 2009: ZTV E-StB, S. 9). So trifft sie auch die Zuordnung von Böden nach ihrer Frostempfindlichkeit (F1-, F2 oder F3-Böden).

Randeffassung:

Damit die Pflastersteine bei Verkehrsbelastung nicht seitlich verschoben werden können, wird eine der Verkehrsbelastung angepasste **Randeffassung** benötigt. Bei wenigen Fällen und bei einigen Verbundpflastersteinen bei sehr geringen Verkehrsbelastungen kann auf eine Effassung verzichtet werden (vgl. MENTLEIN 2009, S. 111). Bei an Baumstandorten angrenzenden Geh- und Radwegflächen dient die Randeffassung auch als **Abgrenzung zur Baumpflanzgrube** und kann ein Eindringen der Baumwurzeln in die Schichten des Wegebbaus minimieren. Angaben zu Effassungen stehen in der ATV DIN 18318, der ZTV Pflaster-StB 06 sowie der TL Pflaster-StB. Typische Randeffassungen sind aus Bordsteinen, Effassungssteinen oder Pflastersteinen.

Das 2015 neu herausgegebene „**Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie für Effassungen**“ (**M FP**) ergänzt die ATV DIN 18318, die ZTV Pflaster-StB, die TL Pflaster-StB sowie die RStO 12 (FGSV 2015: M FP, S. 9). Als Einsatzbereich für Pflasterdecken und Plattenbeläge nennt das Merkblatt konkret auch geringbelastete Geh- und Radwege, welche ferner von Fahrzeugen des Unterhaltungsdienstes genutzt werden. Die Oberbaukonstruktion ist dabei nach den RStO festzulegen (FGSV 2015: M FP, S. 11).

2.1.2 Aufbau und Baustoffe der gebundenen Pflasterbauweise

Regelwerke

Derzeit werden die gebundenen bzw. teilgebundenen Pflasterbauweisen nicht als Standardbauweise für den Geh- und Radwegbau angesehen. Auf Grund der in dieser Arbeit untersuchten Bettungsschichten mit hydraulischen Bindemitteln, soll im Folgenden die gebundene Pflasterbauweise beschrieben werden. Dabei wird auf die derzeit existierenden Regelwerke eingegangen, welche Aussagen zu den Bauweisen in gebundener Ausführung tätigen (vgl. Tab. 5).

Nach dem **W2 Arbeitspapier** der FGSV sollten Pflasterdecken in gebundener Ausführung nicht für Verkehrsflächen mit sehr hohen Verkehrslasten angewendet werden. Bei Flächen für den Geh- und Radwegbau ohne Verkehrsbelastung können geringe Anforderungen an die Tragfähigkeit gewählt werden. Eine Mischbauweise mit gebundener Bettung auf ungebundener Tragschicht sieht das W2 Arbeitspapier der FGSV als nicht fachgerecht an (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 6). Das Arbeitspapier soll in erster Linie als Leitfaden verwendet werden (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 5). Als sogenanntes „W2 Arbeitspapier“, also laut FGSV „Wissensdokument der Kategorie 2“, zeigt dieses den Stand des Wissens auf. Dabei kann es sich bei der Kategorie 2 laut FGSV um Zwischenstände oder Informations- und Arbeitshilfen handeln, welche nicht innerhalb der FGSV abgestimmt sind und lediglich die Auffassung eines einzelnen Gremiums wiedergeben (vgl. Systematik der FGSV Regelwerke unter <http://www.fgsv.de/795.html> [Stand: 16.03.2015]).

Tab. 5: Regelwerke für die gebundene Pflasterbauweise

Kurztitel	Langtitel
ATV DIN 18316	Verkehrswegebauarbeiten - Oberbauschichten mit hydraulischen Bindemitteln
Technische Lieferbedingungen	
TL Pflaster-StB 06	Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbeläge und Einfassungen
TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
TL SoB-StB	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
Zusätzliche technische Vertragsbedingungen	
ZTV-Wegebau	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb von Flächen des Straßenverkehrs
Zusätzliche Richtlinien/Merkblätter/Arbeitspapiere	
---	Richtlinie Pflaster- und Plattendecken für befahrene und begangene Flächen in ungebundener und gebundener Ausführung sowie in Mischbauweisen (DNV)
---	Arbeitspapier Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in gebundener Ausführung (W2)

Bei geringen Verkehrsbelastungen, wie auch bei den in den **ZTV-Wegebau** betrachteten Flächen außerhalb des Straßenverkehrs, ist die Ausführung gebundener Bauweisen insgesamt nicht so problematisch wie bei Flächen mit hohen Verkehrsbelastungen. Eine Berücksichtigung selbst von nicht befahrbaren Geh- und Radwegen erfolgt in der ZTV-Wegebau jedoch nicht. Entgegen dem W2 Arbeitspapier wird für Flächen außerhalb des Straßenverkehrs in den ZTV-Wegebau die Mischbauweise mit einer gebundenen Bettung auf einer ungebundenen Tragschicht beschrieben (vgl. FLL 2013: ZTV-Wegebau, S. 24). Insgesamt werden „mit dieser **ZTV-Wegebau** [...] die von der ATV DIN 18318 abweichenden und bewährten Bauweisen des Landschaftsbau, die zum Teil seit Jahrzehnten standardmäßig Anwendung finden, in einem Regelwerk dargestellt. Für die Anwendung der gebundenen Bauweise werden aber auch ganz neue und ergänzende Anforderungen, insbesondere für die Herstellung und Ausführung von Bettungs- und Fugenstoffen, definiert“ (vgl. FLL 2013: ZTV-Wegebau, S. 7). Insgesamt beziehen sich die ZTV-Wegebau somit auch auf gebundene (vollgebundene, teilgebundene) Bauweisen.

Explizit genannt werden die Geh- und Radwege in der **Richtlinie des DNV**. Diese hat dabei „grundsätzlich empfehlenden Charakter [...] und stellt Bauweisen [für den Naturstein] dar, die sich bereits vielfach bewährt haben“ (vgl. DNV 2014, S. 5). Eine Einordnung erfahren hier die Geh- und Radwege in die Verkehrsbelastungskategorie VBK 4, welche der Bauklasse 0,3 (z.B. Wohnwege) der RSTO 12 entspricht (vgl. Tab. 6). Hinsichtlich der Belastung wird für diesen Bereich „seltener Schwerlastverkehr“ berücksichtigt. Die VBK 4 liegt damit bezüglich der Belastbarkeit über der in der ZTV-Wegebau beschriebenen Nutzungskategorie N3, welche mit der VBK 3 der Richtlinie des DNV gleichzusetzen ist. Hiermit sind Flächen gemeint, welche gelegentlich mit Fahrzeugen bis 20 t zulässigem Gesamtgewicht befahren werden.

Tab. 6: Belastungskategorien bestehender Regelwerke

FGSV 2012: RStO 12	DNV 2014: Richtlinie Pflaster- und Plattendecken	FLL 2013: ZTV-Wegebau
Belastungsklassen ¹⁾	Verkehrsbelastungsklassen ²⁾	Nutzungskategorien ³⁾
Bk100		
Bk32		
Bk10		
Bk3,2	≙ VBK 7	
Bk1,8	≙ VBK 6	
Bk1,0	≙ VBK 5	
Bk0,3	≙ VBK 4	
	VBK 3	≙ N3
	VBK 2	≙ N2
	VBK 1	≙ N1

1) Geh- und Radwege werden gesondert betrachtet.

2) Geh- und Radwege werden der VBK 4 zugeordnet.

3) Geh- und Radwege werden nicht benannt.

Die Richtlinie des DNV sieht für die VBK 4, d.h. auch für die Geh- und Radwege, eine gebundene Bauweise als geeignet vor. Diese besteht aus einer gebundenen Bettung (Schichtdicke 30 bis 70 mm) sowie einer gebundenen Fuge. Ob eine gebundene wasserdurchlässige Tragschicht vorzusehen ist, hängt laut DNV von den „erhöhten Beanspruchungen“ ab (vgl. DNV 2014, S.17). Zu einer erhöhten Beanspruchung zählt z.B. die „maschinelle Reinigung mit schwerem Gerät und häufige Nassreinigung“ oder „Bereiche mit Längsneigung über 6%“ (vgl. DNV 2014, S.17). Ohne das Vorkommen einer „erhöhten Beanspruchung“ sieht die Richtlinie des DNV also auch eine gebundene Bauweise mit gebundener Bettung auf ungebundener Tragschicht vor. Diese Form wird in der ZTV-Wegebau als sogenannte „Mischbauweise mit gebundener Bettung auf ungebundener Tragschicht“ beschrieben und für die Nutzungskategorien N1 und N2 vorgesehen (vgl. FLL 2013: ZTV-Wegebau, S. 15). Somit sprechen sich hiermit beide Regelwerke entgegen des Arbeitspapiere der FGSV für eine „Mischbauweise“ aus. Die Anwendbarkeit für Geh- und Radwege muss zukünftig überprüft werden.

Schichtenaufbau

Wie die Ungebundene wird auch die gebundene Pflasterbauweise in Schichten ausgeführt. Im Gegensatz zur ungebundenen Bauweise werden bei der **gebundenen Bauweise** Baustoffgemische mit Bindemittel für die Bettung und/oder die Fugenfüllung (Bettungs- und Fugenmörtel) verwendet. Dabei kann die Tragschicht je nach Flächenbeanspruchung ungebunden oder gebunden ausgeführt sein.

Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen **außerhalb** von Flächen des Straßenverkehrs“ (ZTV-Wegebau) unterscheiden die folgenden gebundenen Bauweisen:

- **Vollgebundene Bauweise;** mit gebundener Bettung, gebundener Fuge und gebundener Tragschicht,
- **Mischbauweisen mit gebundener Bettung;** mit gebundener Bettung, gebundener Fuge sowie ungebunden Tragschicht (vgl. Abb. 3),
- **Mischbauweise mit ungebundener Bettung;** lediglich die Fuge gebunden (vgl. FLL 2013: ZTV-Wegebau, S. 15).

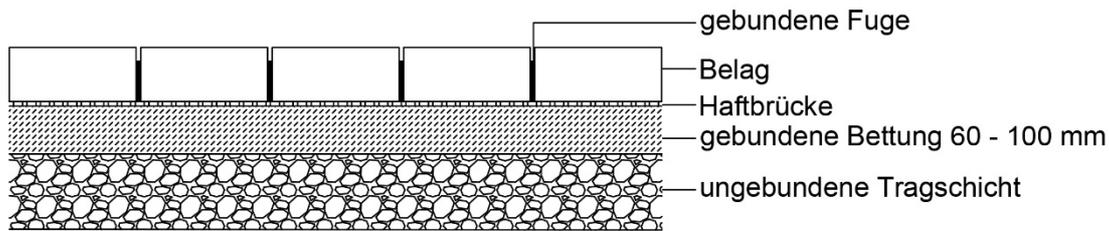


Abb. 3: Querschnitt der Mischbauweise mit gebundener Bettung (vgl. LAY et al. (2013), S. 487)

Bei der Bettung wird bei den ZTV-Wegebau unterschieden in:

- **Bettungstyp 1:** mit Zugabe von Gesteinskörnungen 0,063 mm bis 2 mm,
- **Bettungstyp 2:** keine Verwendung von Gesteinskörnungen 0,063 mm bis 2 mm.

Entgegen der ZTV-Wegebau sind laut „W2 Arbeitspapier Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in gebundener Ausführung“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) Mischbauweisen, bei denen nur die Bettungsschicht oder die Fugenfüllung aus Baustoffen mit Bindemittel hergestellt wird, nicht fachgerecht (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 6). Hier wird unter der gebundenen Bauweise die Verwendung von Baustoffen mit Bindemitteln für die Bettung **und** die Fugenfüllung verstanden. Die Tragschicht sollte dabei bei gebundenen Pflasterbelägen ebenfalls gebunden ausgeführt sein.

Hinsichtlich der gebundenen Bauweisen unterscheidet die Richtlinie des DNV folgende Bezeichnungen (vgl. DNV 2014, S. 6):

- **Gebundene Bauweise für Pflaster- und Plattendecken;** bei der gebundenen Bauweise ist der Fugen- **und** Bettungsstoff ein Baustoffgemisch mit Bindemittel.
- **Mischbauweise für Pflaster- und Plattendecken;** bei der Mischbauweise enthält entweder der Bettungsstoff **oder** der Fugenstoff ein Bindemittel.

Die Mischbauweise für Pflasterdecken, wie sie nach der Richtlinie des DNV verstanden wird, ist für den Bereich der Geh- und Radwege, d.h. für VBK 4, nicht geeignet (vgl. DNV 2014, S. 20). Hinsichtlich der **Tragschicht** formuliert die DNV Richtlinie, dass bei „erhöhten Beanspruchungen“ gebundene wasserdurchlässige Tragschichten vorzusehen sind (vgl. DNV 2014, S. 17).

Bei **Pflastersteinen aus Beton** sollten deren mechanische Eigenschaften z.B. Schwindverhalten, und die des Bettungs- und Fugenmörtels aufeinander abgestimmt werden (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 11). Die Dicke der Pflastersteine hängt von der zu erwartenden Verkehrsbelastung ab. Des Weiteren müssen die Pflastersteine gemäß TL Pflaster-StB sein.

Mit dem **Fugenmörtel** sollte sich eine „vollständige, weitgehend wasserundurchlässige Fugenfüllung ausführen“ lassen können. Die Mörtel müssen zudem ausreichend fließfähig und selbstverdichtend sein (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 10). Weiter Anforderungen verzeichnen das W2 Arbeitspapier der FGSV, die ZTV-Wegebau sowie die Richtlinien des DNV.

Nach dem Arbeitspapier der FGSV sollen gebundene Bauweisen mit **Bewegungsfugen** ausgeführt werden, damit diese die in der Pflasterdecke entstehenden thermischen

Spannungen abbauen können. Auch die Richtlinie des DNV beinhaltet, dass gebundene Bauweisen Bewegungsfugen erfordern (vgl. DNV 2014, S. 14). Bewegungsfugen sind laut DNV auch im Bereich von Anschlüssen an Gebäuden herzustellen (vgl. DNV 2014, S. 22). Zur Notwendigkeit der Bewegungsfuge sagen die ZTV-Wegebau, dass „zwar die Notwendigkeit in vielen Anwendungsfällen gegeben [ist], über die Art der Ausbildung kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nur der Bedarf an Forschung und Entwicklung formuliert werden“ (vgl. FLL 2013, ZTV-Wegebau, S. 8).

Die Vorbehandlung der Pflastersteine durch die Aufbringung einer **Haftbrücke** führt zur Erhöhung der Haftzugfestigkeit zwischen Pflaster und Bettungsmörtel (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 6). Auch gemäß ZTV-Wegebau ist zwischen Steinunterseite und Bettung bei der Mischbauweise mit gebundener Bettung eine Haftbrücke einzurichten. Dabei werden je nach Nutzungskategorien Anforderungen an die Haftzug- und Zugfestigkeit gestellt (vgl. FLL 2013: ZTV-Wegebau, S. 35). Witterungs- und Einbaubedingungen, Art, Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Pflastersteine bzw. Platten sowie die Mörtelzusammensetzung üben einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit aus (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 6). Die DNV verweist ebenso darauf, dass in der gebundenen Bauweise bei allen Steinformaten mit bearbeiteter Unterseite sowie Platten und Einfassungen **Haftvermittler** zu verwenden sind, um einen Verbund zwischen Stein und Bettung zu erzielen und ein Ablösen der Steine zu verhindern (vgl. DNV 2014, S. 12).

Insgesamt soll die **gebundene Bettung** die in die Fläche eingebrachten Lasten in die Unterlage abführen sowie die Dickentoleranzen der Pflastersteine ausgleichen (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 12). Anforderungen beschreiben das W2 Arbeitspapier der FGSV, die ZTV-Wegebau sowie die Richtlinien des DNV.

Anforderungen für **Tragschichten** mit hydraulischen Bindemitteln zeigen die ATV DIN 18316. Hierauf verweisen ebenso die ZTV-Wegebau. Zudem verweist diese hinsichtlich der Dränbetontragschichten und der Asphalttragschichten auf die Anforderungen gemäß FGSV „Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen“. Laut Richtlinie des DNV sollten Drainbetone ohne Feinanteile verwendet werden, da „beim Verdichten die Feinanteile oft an die Oberfläche gesogen werden und dann die Wasserdurchlässigkeit nicht mehr gegeben ist“ (vgl. DNV 2014, S. 16). Für den Anwendungsbereich Geh- und Radwege (VBK 4) werden hinsichtlich der gebundenen Tragschicht aus Drainbeton Anforderungen an die Druckfestigkeit, die Wasserdurchlässigkeit sowie an das kapillare Saugverhalten gestellt (vgl. DNV 2014, S. 16). Für wasserdurchlässige Asphalttragschichten verweist die Richtlinie des DNV auf die Anforderungen gemäß FGSV „Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen“. Hinsichtlich der Dimensionierung der Oberbauschichten für die VBK 4 – 7 richtet sich die DNV Richtlinie an die RStO 12. Für die VBK 4, also somit für Geh- und Radwege, soll die Mindestdicke einer gebundenen Tragschicht aus Grobkornbeton sowie aus wasserdurchlässigem Asphalt 15 cm betragen (vgl. DNV 2014, S. 17).

Das **Planum** ist ebenso wie für die ungebundenen Pflasterbauweise gemäß ZTV E-StB herzustellen (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 12).

Pflasterbeläge in gebundener Ausführung benötigen eine **Einfassung** oder eine sonstige feste Begrenzung (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 5 ff.). Des Weiteren müssen die Einfassungen gemäß TL Pflaster-StB sein.

2.2 Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen

In Untersuchungen von REICHWEIN (2002) sowie STÜTZEL et al. (2009) weisen die untersuchten Wegebaustoffe insgesamt ausreichende **bodenphysikalische Eigenschaften** für das Eindringen der Wurzeln auf. Hierzu zählt insbesondere das Vorhandensein von **Grobporen** mit der damit verbundenen hohen Luftkapazität, welches für die Durchwurzelung von Stoffen entscheidend ist (vgl. POLOMSKI u. KUHN 1998).

In den Beobachtungen von REICHWEIN (2002) wurzeln angrenzende Baumwurzeln insbesondere in die **Fugen** der Pflaster- und Plattenbeläge, in die **Grenzschichten** direkt unter dem Belag sowie in die **Pflasterbettung** (vgl. REICHWEIN 2002, S. 189). Nach Untersuchungen von STRECKENBACH (2009) wurde gezeigt, dass bei der Verwendung von grobkörnigen Splitten als Bettungsschicht die Einwurzelung gegenüber der Verwendung von feinkörnigem Sand reduziert werden konnte (vgl. STRECKENBACH 2009, S. 106). Er bezieht dieses auf die geringere **Wasserhaltefähigkeit** des Splittes. Mit Kalk oder Zement **gebundene Pflasterbettungen** werden nach REICHWEIN (2002) durch Spalten und Risse erschlossen. Sie zeigt auf, dass insgesamt bei Mörtelbettungen hohe Anhebungen entstehen, da das Material nicht weiter durch die Wurzel verdichtet d.h. verdrängt werden kann (vgl. REICHWEIN 2002, S. 202).

Auf Basis von Ausgrabungen untersucht REICHWEIN (2002) auch **bodenchemische Eigenschaften** der Bettungen und Tragschichten, wie pH-Wert, Carbonatgehalt sowie Salzgehalt, um einen Zusammenhang zur Durchwurzelungsintensität von Wegebauweisen herzustellen; eine Nährstoffanalyse fand dabei nicht statt. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse war jedoch nicht möglich, da es sich um exemplarische Aufgrabungen handelt (vgl. REICHWEIN 2002, S. 181).

Gemeinsamkeit des natürlichen Standortes und der Wegebauweisen ist es, dass die Wurzeln in die Stoffe eindringen können. Zum weiteren Verständnis der Arbeit werden im Folgenden der Aufbau und das Wachstum von Baumwurzeln sowie die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum erläutert.

2.2.1 Aufbau und Wachstum von Baumwurzeln

Die grundlegenden **Methoden** zur Erforschung von Wurzeln beschreibt BÖHM (1979). Neben den Methoden werden in der bestehenden Literatur von KÖSTLER et al. (1968), BRAUN (1988), CRAUL (1992), LYR et al. (1992), POLOMSKI u. KUHN (1998), KUTSCHERA u. LICHTENEGGER (2002) zudem die **Anatomie**, die **Wachstumsvorgänge** als auch Anforderungen an die **Bodenbeschaffenheit** beschrieben. Häufig beziehen sich hier die Angaben zu den Wurzeln auf den Bereich der Waldbäume auf ihrem **natürlichen Standort**. Dass die Wurzelausprägungen zum Beispiel bei urbanen Baumstandorten von ihren genetisch vorbestimmten Veranlagungen abweichen können, bestätigen u.a. REICHWEIN (2002) sowie STRECKENBACH (2009). Die ursprüngliche Unterteilung nach Pfahl-, Herz- und Senkwurzeln (vgl. MALEK et al. 1999, S. 71) wird am Straßenstandort nicht mehr deutlich.

Durchmesser und Funktionen der Wurzeln

Hinzu kommt eine Unterteilung nach unterschiedlichen Durchmessern der Wurzeln wobei diese unterschiedlich starken Wurzeln auch verschiedene Funktionen übernehmen. So sind die Wurzeln mit einem Durchmesser kleiner fünf Millimeter für die

Aufnahme von Wasser und darin gelösten Nährstoffen zuständig. Während dickere Wurzeln unter anderem die Funktion der Verankerung im Boden übernehmen (vgl. Tab. 7).

Tab. 7: Einteilung des Baumwurzelsystems nach Wurzeldurchmessern und Funktionen

Wurzelbezeichnung	Durchmesser	Funktion
Feinstwurzeln	≤ 1 mm	Aufnahme von Wasser und darin gelösten Nährstoffen
Feinwurzeln	1-2 mm	
Schwachwurzeln	2-5 mm	
Grobwurzeln	5-20 mm	Transport von Wasser und Nährstoffen
Derbwurzeln	20-50 mm	Speicherung von Reservestoffen Verankerung im Boden Abwehr- und Regenerationsverhalten
Starkwurzeln	≥ 50 mm	Transport- und Speicherfunktion Verankerung im Boden

Wurzeldurchmesser nach KÖSTLER et al. 1968, S. 12
Wurzelfunktionen nach MALEK et al. 1999, S. 73

Bedeutung der Wurzelspitze

Beim **Wurzelwachstum** teilen und strecken sich die Zellen in den jeweils dafür vorgesehenen Zonen der Wurzel – der Zellteilungs- bzw. der Zellstreckungszone. Die **Wurzelspitze** gibt den Weg durch den Boden vor (POLOMSKI & KUHN 1998, S. 58). Dabei schützt die Wurzelhaube (Kalyptra) den Vegetationskegel und erleichtert das Vordringen der Wurzel im Boden. Dadurch, dass sich die äußeren Haubenzellen auflösen und verschleimen, kann die Wurzel leichter zwischen den Bodenpartikel hindurch wachsen (vgl. BRAUN 1988, S.74).

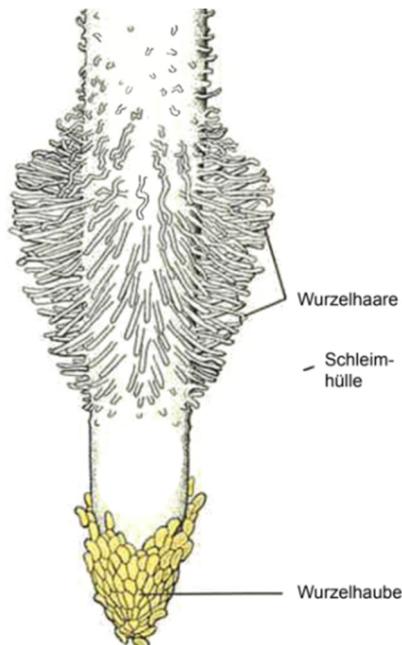


Abb. 4: Grafische Darstellung einer Wurzel mit Wurzelspitze (vgl. RAVEN et al., S. 609)

Das **Längenwachstum** der Wurzeln findet lediglich in der Zellstreckungszone statt. Das heißt, dass das Wachstum lediglich in einem wenige Millimeter langen Bereich direkt über der **Wurzelspitze** erfolgt. Es ist also nur ein sehr kleiner Bereich der Wurzel dazu ausgerichtet ins Erdreich bzw. in die Wegebaustoffe einzudringen (vgl. RAVEN et al. 2006; S. 608). Über der Zellstreckungszone gliedert sich die Wurzelhaarzone an.

Wurzelhaare sind „dünnwandige, nicht durch Zellwand geteilte Ausstülpungen an der Saugwurzel zur Vergrößerung der Oberfläche und zur Aufnahme der Nährstoffe aus dem Boden“ (vgl. MALEK et al. 1999, S. 71). „Die Wurzelhaare leben nur wenige Tage. Sie werden von der Wurzelspitze her immer wieder neu gebildet und sterben nach hinten ab“ (vgl. BRAUN 1988, S. 76).

2.2.2 Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum

Damit die Baumwurzeln ihre Funktionen erfüllen können, benötigen sie bestimmte Bedingungen (vgl. MALEK et al. 1999, S. 64; BRAUN 1988, S. 28). Als Standort und Nährstoffquelle für den Baum mit seinen Wurzeln dient dabei ursprünglich der Boden, der mit seinen Eigenschaften das Wachstum und die Entwicklung der Wurzeln und damit des Baumes bestimmt (vgl. MALEK et al. 1999, S. 74). Wobei zu beachten ist, dass die Erschließung des Bodenraumes durch die Wurzeln auch **pflanzenartspezifisch** erfolgt (vgl. POLOMSKI u. KUHN 1998, S. 13).

Zu den **Einflussfaktoren**, die auf das Wachstum der Wurzeln einwirken, gehören nach SCHRÖDER u. GRIMM-WETZEL (1990), CRAUL (1992), BALDER (1998), MALEK et al. (1999), SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (2010), ROBERTS et al. (2006) die in der Abbildung 5 dargestellten Parameter. Die in dieser Arbeit näher betrachteten Faktoren hinsichtlich der Einwurzelung in die benachbarten Wegbaustoffe sind in der Abbildung dickumrandet.

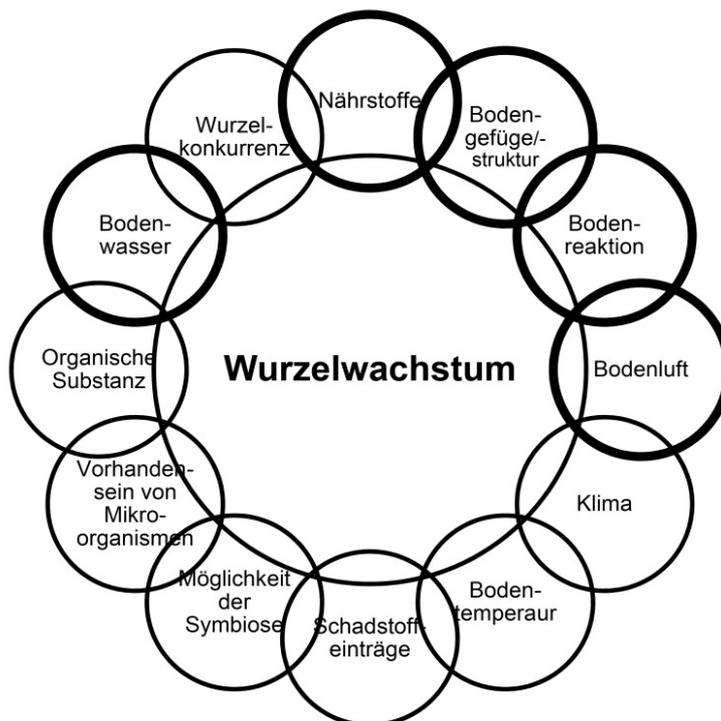


Abb. 5: Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum; dickumrandet sind die in dieser Arbeit untersuchten Bereiche

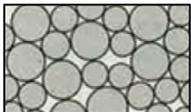
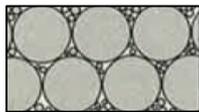
Bodengefüge, -luft, -wasser

Den Wurzeln steht der Boden bzw. ein Substrat oder Baustoff in drei Phasen zur Verfügung – **Bodenmatrix** (feste Phase; Kies, Sand, Schluff, Ton), **Bodenlösung** (flüssige Phase), **Bodenluft** (gasförmige Phase) –. Alle wichtigen Prozesse im Boden werden vom Anteil und der räumlichen Verteilung dieser drei Phasen bestimmt. Die

Anordnung der festen Phase wird als Bodengefüge oder Bodenstruktur benannt. Die unterschiedlich großen Partikel des Bodens bilden dabei ein System von Poren, die analog zur Körnung nach ihrer Größe unterschieden werden (vgl. GISI, 1997, S. 21 ff.).

Wie Tabelle 8 zeigt, stehen **Körnung**, **Porung** und **Lagerungsdichte** in einem engen Zusammenhang. Die Poren sind umso größer, je größer und gleichmäßiger die Körner sind. Eine abgestufte Körnung führt zu einer Verfüllung der Hohlräume. Dadurch ist die Lagerungsdichte größer und die Poren kleiner. Die Lagerungsdichte wird besonders bei runden Formen erhöht (vgl. GISI, 1997, S. 26).

Tab. 8: Beeinflussung der Porosität durch die Eigenschaften der Kornform, Korngrößenabstufung und Lagerung (vgl. FLÜHLER unpubl. in GISI 1997, S. 27)

Kleine Porosität	Große Porosität	Eigenschaft
		Kornform
rundlich (Sand)	sperrig (Tonplättchen)	
		Korngrößenabstufung
abgestufte Körnung	einseitige Körnung	
		Lagerung
verdichtet, gerüttelt, ausgerichtet	locker, frisch geschüttet	

Dabei kann Ton, als sehr feinkörniger Stoff, ein größeres Gesamtporenvolumen haben als der im Verhältnis gröbere Sand (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 180). Wobei bei Sand das Grobporenvolumen größer ausfällt als bei dem Ton und umgekehrt das Feinporenvolumen beim Ton größer ist als bei Sand (vgl. Tab. 9). Im Allgemeinen sind Sandböden auf Grund ihrer günstigen Korngrößenzusammensetzung (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 173) intensiv durchwurzelbar (vgl. DUMBECK 1986, S.202). Sande besitzen im Gegensatz zu anderen Kornfraktionen einen hohen Grobporenanteil, welcher das Wurzelwachstum begünstigt, da die Wurzelspitze ungehindert eindringen kann (vgl. SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 2010, S. 182). Auch REICHWEIN (2002) zeigt auf, dass Bettungen unter Pflaster- und Plattenbelägen aus lockerem Sand sehr intensiv durchwurzelt werden (vgl. REICHWEIN 2002, S. 192).

Tab. 9: Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 182)

	Porenvolumen (%)	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Sand	46 ± 10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluff	47 ± 9	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Ton	50 ± 15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10

Von der Körnung und dem Gefüge des Bodens bzw. Baustoffs sind Eigenschaften wie Festigkeit, Porengrößenverteilung, Speicherfähigkeit für Wasser, Nährstoffe und Luft sowie die Temperatur abhängig. Diese Eigenschaften sagen zudem etwas über die **Durchwurzelbarkeit** bzw. über die **Wachstumsbedingungen** für die Vegetation aus (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 171; HELAL 1991, S. 404).

Die Wurzeln erschließen überwiegend die **Grobporen** (vgl. GISI 1997, S. 51; POLOMSKI u. KUHN 1998, S. 60; SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 379). Wird ein Boden/Baustoff verdichtet kommt es zum **Rückgang von Grobporen** während sich der Anteil an Mittelporen leicht erhöht (vgl. DUMBECK 1986, S. 205). Da die Luftdurchlässigkeit mit dem Grobporenanteil korreliert, kommt es bei Abnahme des Grobporenanteils zur Verringerung der Luftdurchlässigkeit und damit zur negativen Beeinträchtigung des Wurzelwachstums (vgl. u.a. DUMBECK 1986, S. 205 f.). Eine Verringerung der für die Pflanzenwurzeln notwendigen Luftkapazität kann dabei durch eine Erhöhung des Schluffanteils mit zusätzlicher Verdichtung des Baustoffes herbeigeführt werden. Hingegen gewährleistet ein hoher Grobporenanteil eine hohe Wasserleitfähigkeit. Dränendes Sickerwasser ist jedoch für die Pflanzenwurzel schlecht verfügbar.

Unter Energieaufwand werden auch die Mittelporen von den Wurzeln erschlossen (vgl. POLOMSKI u. KUHN 1998, S. 60). Die engeren Mittelporen werden dabei nur durchwurzelt, wenn wenige Grobporenräume im Boden vorhanden sind. Dass der Porendurchmesser größer sein muss als die Wurzelspitze selber und, dass das Eindringen der Wurzel eine Verschiebung des Bodenmaterials bewirkt bestätigen auch WIERSUM (1957) und CRAUL (1992).

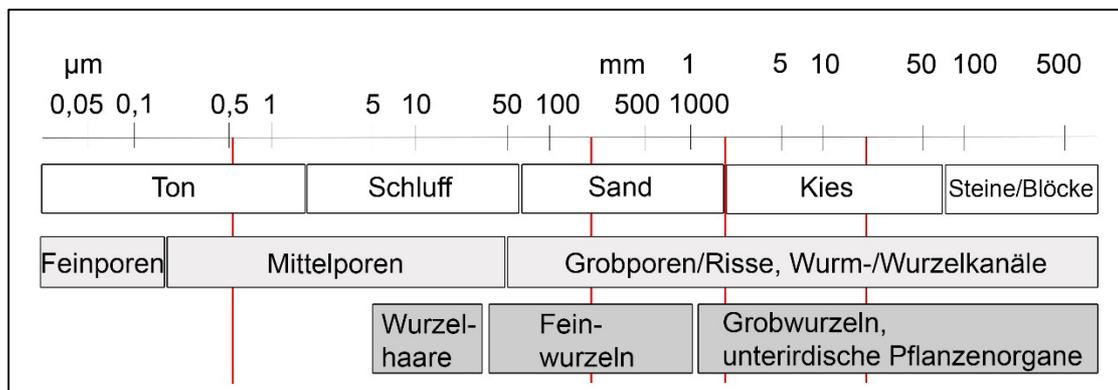


Abb. 6: Wurzel- und Porendurchmesser im Vergleich zu Partikeldurchmessern (nach GISI 1997, S. 51; Ausschnitt)

Bei Böden bzw. ungebundenen Baustoffen durchdringen die Wurzeln demnach den zugänglichen Porenraum, der für das Wurzelwachstum entscheidend ist (vgl. WIERSUM 1957, S. 78; SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 380). Die Wurzelspitze nimmt hierbei den Weg des geringsten Widerstandes (vgl. RAVEN et al. 2006; S. 605). Der **mechanische Widerstand** ist somit ein limitierender Faktor für die Wurzelentwicklung (vgl. WIERSUM 1957, S. 85). Bei der Verwendung von hydraulisch gebundenen Wegebauwerkstoffen wird das Wurzelwachstum gegebenenfalls eingeschränkt, dadurch, dass durch die Festigkeit des Mörtels der Eindringwiderstand für die Wurzelspitze zu hoch ausfällt. Ein Verschieben der festen Teilchen in Folge des Eindringens ist bei gebundenen Bettungsmaterialien für die Wurzelspitze nicht möglich. Bezüglich des **Eindringwiderstands des Bodens** zeigt sich anhand der Untersuchungen von KOPINGA

(1992), dass ein Sandbett unter einem Asphaltbelag so stark verdichtet ist, dass es nicht von Wurzeln durchwurzelt werden kann. Dabei geht KOPINGA (1992) davon aus, dass die Obergrenze der Wurzelpenetration im Boden bei circa 3,0 MPa liegt. Unterschiede bei der Durchwurzlung von Tragschichten werden nach REICHWEIN (2002) ebenso auf den **Verdichtungsgrad** und dem davon abhängigen **Eindringwiderstand** zurückgeführt. In manchen Randbereichen, wo zum Beispiel eine bautechnische Verdichtung nicht so stark ist, führen geringe Eindringwiderstände zum Einwurzeln. Auch die Verwendung von Schotter, bei dem auch nach einem Verdichtungsprozess Hohlräume verbleiben, bietet den Wurzeln eine Möglichkeit die Tragschichten zu durchwurzeln (vgl. REICHWEIN 2002, S. 192).

Eine Beeinflussung des Wurzelwachstums erfolgt neben der Luftkapazität durch die Kapazität des **pflanzenverfügbaren Wassers**. Diese steigt mit sinkendem Korndurchmesser vom Grobsand zu Schluff; zum Ton hin sinkt sie dann wieder ab. Die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser wird besonders in Schluffen und Tonen geringer, umso höher die Lagerungsdichte ist. Wobei in sandigen Böden bei steigender Lagerungsdichte häufig eine höhere **nutzbare Feldkapazität** zu verzeichnen ist (vgl. HORN 2011, S. 117 f.).

Der Wasserzustand eines normal durchlässigen Bodens, der sich nach ungefähr drei Tagen nach vollständiger Sättigung einstellt, wird als „Feldkapazität“ beschrieben. Bei diesem Zustand des Bodens ist das Gravitationswasser aus den Grobporen abgefließen. Der „permanente Welkepunkt“ bezeichnet einen Potentialbereich, bei dem die Pflanze dem Boden kein Wasser mehr entziehen kann. Der Potentialbereich zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt wird als „nutzbare Feldkapazität“ bezeichnet; hier ist das Wasser für die Pflanze verfügbar. Das pflanzenverfügbare Wasser befindet sich dabei in den Mittelporen (vgl. GISI 1997, S. 47 f.).

Tab. 10: Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Äquivalentdurchmesser mit dem pF-Wert als Grenzwert zur Entwässerung kreiskapilarer Poren (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 181)

Porengrößenbereiche	Porendurchmesser (mm)	Saugspannungsbereich pF-Wert	Porenfunktion
Feinporen	≤ 0,0002	≥ 4,2 (Grenzwert für den permanenten Welkepunkt)	Enthaltendes Wasser ist nicht für die Pflanzenwurzel verwendbar (Totwasser).
Mittelporen	0,0002 – 0,01	2,5 – 4,2	Können von Wurzelhaaren erschlossen werden, speichern kapillares Wasser (Haftwasser), welches für die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden kann (vgl. GISI, 1997, S. 24 ff.).
Enge Grobporen	0,01 – 0,05	1,8 - 2,5	Bodenlüftung, Binden das Wasser nur wenig; dränendes Sickerwasser ist nicht pflanzenverfügbar.
Weite Grobporen	≥ 0,05	≤ 1,8	

Bodenreaktion

Die Bodenreaktion bezeichnet den pH-Wert eines Bodens. Dieser gibt Aufschluss über das Verhalten von Nähr- und Schadstoffen sowie über die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 151). Die Ansprüche an den pH-Wert sind dabei pflanzenartspezifisch, da Pflanzen ungleiche Bedürfnisse an die Nährstoffversorgung aufweisen. Tabelle 11 zeigt die Einteilung der pH-Werte bei Böden.

Tab. 11: Einteilung der pH- Werte bei Böden (vgl. MENGEL 1991, S.194)

< 4,1	sehr stark sauer
4,1-4,5	stark sauer
4,6-5,2	sauer
5,3-6,4	schwach sauer
6,5-7,4	neutral
> 7,4	alkalisch

Natürliche Böden haben überwiegend Werte zwischen pH 3 bis pH 10. Hinsichtlich des pH-Wertes liegen hingegen Wegebaustoffe eher im alkalischen Bereich. Damit wichtige Bodenprozesse ablaufen können, werden insgesamt Werte zwischen pH 5 und 7,5 als optimal angesehen (vgl. GISI 1997, S. 126). Ein Wachstum von Pflanzen unterhalb eines pH-Wertes von 3 ist nicht mehr möglich (vgl. FINCK 2007, S. 179).

Eine zunehmende Versauerung (< pH 5) bei Böden führt nach AMBERGER (1996) zu einer Veränderung des Gefüges durch Tonverlagerung, zur Abnahme der Aggregatstabilität sowie zu einer Hemmung der biologischen Aktivität und des Wurzelwachstums. Zudem kommt es zur Veränderung der Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen (vgl. AMBERGER 1996, S. 247). Die wichtige Nährstoffversorgung für die Pflanze mit Calcium, Magnesium und Kalium nimmt mit steigender Bodenversauerung ab. Zudem steigt der Anteil an Aluminiumionen (Al^{3+}) an der effektiven Kationenaustauschkapazität; besonders, wenn der pH-Wert unter 4,5 sinkt, nimmt die Aluminiumsättigung sehr stark zu. Eine hohe **Aluminiumkonzentration** im Boden führt bei empfindlichen Pflanzenarten durch die Toxizität zu einem stark gehemmten Wurzelwachstum (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 152).

Calcium

Für das Pflanzenwachstum werden verschiedene mineralische Nährelemente benötigt, die aus dem Boden entzogen werden. Diese Nährelemente können dabei nur von der Pflanze aufgenommen werden, wenn sie in der Bodenlösung vorkommen, welche hinsichtlich der gelösten Elemente große Schwankungen aufweisen kann. Der Ionenaustausch findet insgesamt an der Grenzschicht Flüssig-/Festphase statt. Hierbei werden Kationen von den negativ geladenen Bodenartikeln abgelöst und gegen pflanzeigene Protonen eingetauscht. Die abgelösten Kationen werden dann von der Pflanze wiederum durch die Wurzelhaare aufgenommen (vgl. GISI, 1997, S. 4).

Speziell zum Wurzelwachstum benötigt die Pflanze u.a. gelöste **Calciumionen**. Dieses Makronährelement wird vor allem über die Wurzelspitze aufgenommen (vgl. SCHILLING 2000, S. 149). Calciumgehalte in Böden/Substraten hängen dabei vom Ausgangsgestein ab. In basischen Gesteinen wie Gabbro, Basalt oder Diabas ist mehr Calcium enthalten als in sauren Gesteinen wie Granit (vgl. MENGEL 1991, S. 354). Carbonat- und gipshaltige Böden weisen demnach höhere Calciumgehalte auf als quarzreiche Sande (vgl. AMBERGER 1996, S. 244). Im Freiland kann es praktisch nicht zum Calciummangel kommen, da der Boden immer ausreichend Ca^{2+} -Ionen enthält (vgl. SCHILLING 2000, S. 149). Ein Calciummangel würde sich in einer geringen Bewurzelung und geringem Pflanzenwachstum zeigen (vgl. FINCK 2007, S. 113).

Calcium liegt in Böden/Baustoffen in unterschiedlichen Verbindungen vor und ist damit auch unterschiedlich löslich. Dadurch entstehen große Schwankungen in der Bodenlösung. Die Pflanzenwurzel nimmt jedoch nur das lösliche Ca^{2+} -Ion auf. Insgesamt

kommt das Calcium in Böden in ausreichender Menge vor, so dass der Bedarf der Pflanzen am natürlichen Standort stets gedeckt ist (vgl. MENGEL 1991, S. 358 ff.).

Grenzzonenausbildung

Verschiedene Untersuchungen zeigen auf, dass **Grenzsichten** zwischen zwei Stoffen ein Einwurzeln von möglichen schadenverursachenden Wurzeln begünstigen (vgl. KRIETER et al. 1989; NICOLL u. ARMSTRONG 1998; REICHWEIN 2002; STRECKENBACH 2009). Bezüglich der Grenzsichten nennt KOPINGA (1992) in seinen Untersuchungen den relativ hohen **Feuchtigkeitsgrad** des Bodens direkt unter dem betrachteten Asphaltbelag der die Wurzel anzieht (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.15). Zudem ergibt sich in seinen Untersuchungen durch die unterschiedlichen **Ausdehnungskoeffizienten** der Werkstoffe eine Grenzfläche zwischen Asphaltbelag und darunter befindlicher Bettung. In diese Grenzfläche können die Wurzeln dann ungehindert eindringen (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.11). Insgesamt sind ebenso laut ROBERTS et al. (2006, S. 389) die Bedingungen unter den Wegeböden für Wurzeln günstig, wenn die Bodenfeuchtigkeit sowie die Temperatur hoch sind und die Bodenverdichtung gering. Ansätze eine **Verzahnung** im Bereich der Wegeböden herbeizuführen, um ein Einwurzeln zu reduzieren, wurden indes noch nicht systematisch und zugleich praxisorientiert untersucht. Die bestehenden Regelwerke sehen ebenso keine Verzahnung der Schichten auf bautechnischer Ebene vor.

2.3 Lösungsansätze im Wegebau-Baumwurzel-Konflikt

Verschiedene Forschungen und Beiträge verdeutlichen das Bestehen des **Wegebau-Baumwurzel-Konflikts** (KOPINGA 1992; CODER 1998; RANDRUP et al. 2001; REICHWEIN 2002; RAJANI 2002, ROBERTS et al. 2006). Bei REICHWEIN (2002) zeigt eine Kartierung von Straßenbäumen innerhalb von befestigten Flächen im Raum Hannover, dass circa die Hälfte der untersuchten Standorte Schadenmerkmale aufweisen. Deutlich wird, dass der „Wegebau-Baumwurzel-Konflikt“ insgesamt ein umfassendes Untersuchungsfeld darstellt. Vorrangegangene Beiträge und Untersuchungen zeigen die unterschiedlichen Herangehensweisen und Forschungsfelder auf. Hier werden **Ausmaß und Ursachen** des Konfliktes untersucht, **Schadenstypisierungen** vorgenommen sowie **Lösungsansätze** hinsichtlich **Schadenvorbeugung** und **Schadenbehebung** dargelegt. Die Problematik des Wegebau-Baumwurzel-Konfliktes ist dabei interdisziplinär und vielschichtig. Daraus ergeben sich unterschiedliche Herangehensweisen bezüglich der Lösungsansätze.

Eine umfassende, internationale Übersicht zu schadenreduzierenden und -behebenden Maßnahmen bieten COSTELLO u. JONES (2003) (vgl. Tab. 12). Hier werden die Lösungen differenziert in Ansätze, welche sich auf den **Wegebau** beziehen, solche, die den **Baum** und seinen **Wurzelraum** betreffen und Ansätze, die sich mit speziellen **Wurzelbarrieren** beschäftigen. Dabei müssen diese Bereiche immer in einem Zusammenhang gesehen werden. So sagt auch REICHWEIN (2002), dass nach ihren Erkenntnissen große Wurzelräume alleine Baumwurzeln nicht davon abhalten, „in durchwurzelbare Schichten unter dem Belag und in der Tragschicht zu wachsen“ (vgl. REICHWEIN 2002, S. 243). Ebenso belegen Untersuchungsergebnisse von KÄPPELI (2006), dass es „unabhängig von den Pflanzgruben-Bauweisen, den Bodenverhältnissen und den spezifizierten Eigenschaften der Baumarten immer zu einem Herauswurzeln aus der Pflanzgrube gekommen ist“ (vgl. KÄPPELI 2006, S. 20).

Tab. 12: Strategien zur Reduzierung von Schäden (vgl. COSTELLO u. JONES 2003, S. 5)

Strategien	Vorbeugende Maßnahme	Schadensbehebende Maßnahme
Infrastruktur betreffend - Gestaltung		
Größerer Pflanzraum	x	x
Gehwege in Kurven ausgestaltet	x	x
Ausweitung der Baumscheibe in den Straßenraum („Pop-outs“)	x	x
Nichtstandardisierte Plattengrößen		x
Monolithische Gehwege	x	x
Ausweitung der Baumscheibe auf private Grundstücke (Wegerecht)	x	x
Beseitigung von Gehwegen	x	x
Bauminseln	x	
Schmalere Straßen	x	x
Ausbildung von Brücken	x	x
Absenkung der Baumgrube	x	
Abgeänderte Kiesschichten	x	x
Infrastruktur betreffend - Material		
Bewehrte Platten	x	x
Dickere Platten	x	
Dehnungsfugen	x	x
Durchlässiger Beton	x	x
Asphalt	x	x
Zersetzter Granit	x	x
Verdichteter Schotter	x	x
Pflastersteine	x	x
Recyceltes Gummi	x	x
Mulch		x
Rampen oder Keile		x
Baum betreffend		
Artenauswahl	x	
Wurzelschnitt		x
Wurzelzone betreffend		
Wurzelbarrieren	x	x
Durchgehende Gräben	x	
Wurzelpfade	x	
Stahlbleche		x
Schaumstoffschicht		x
Strukturreicher Boden	x	
Bodenveränderung	x	
Wassermanagement	x	x

2.3.1 Wegebaubezogene Maßnahmen

Insgesamt können sich die Lösungsansätze für den in dieser Arbeit betrachteten Wegebau zum einen auf die **Ausgestaltung** der Wege und zum anderen auf die verwendeten **Stoffe** und die **Konstruktion** beziehen (vgl. COSTELLO u. JONES 2003).

Die den Wegebau betreffenden Maßnahmen zielen zumeist auch auf eine **Vergrößerung des Wurzelraumes** ab. Hierzu zählt zum Beispiel, dass zur Vergrößerung der Baumscheibe der Weg wellenförmig entlang der Baumreihen geführt wird. Zudem wird aufgeführt, Straßen insgesamt schmaler zu bauen oder als Extremmaßnahme die Beseitigung der Gehwege, um deren Sanierung komplett auszuschließen. Des Weiteren kann durch die Ausbildung von Wegebrücken und die Absenkung der Baumgruben eine verstärkte **Separation von Wurzelraum und Infrastruktur** erfolgen, was ebenfalls zur Schadenvorbeugung beiträgt (vgl. COSTELLO u. JONES 2003, S. 5). Hinsichtlich der Stoffe und der Konstruktion ist eine **Modifikation von Baustoffen und Bauweisen** möglich (vgl. REICHWEIN 2002; COSTELLO u. JONES 2003).

Nach REICHWEIN (2002) wird insgesamt der Einfluss der Wegedeckenart als relativ gering eingestuft (vgl. REICHWEIN 2002, S. 91). Schäden an Asphaltbelägen sind seltener und weniger stark als Schäden an Platten- und Pflasterbelägen. Zu bituminösen Decken (Asphaltbauweise) sagt REICHWEIN (2002), dass diese „relativ elastisch und daher im Hinblick auf Schadbilder bei Anhebungen durch Baumwurzeln anders zu bewerten [sind] als Pflasterdecken und Plattenbeläge. Eine Durchwurzelung der hohlraumarmen Deckschicht selber ist unwahrscheinlich“ (REICHWEIN 2002, S. 12). Anders berichtet WONG et al. (1988); hiernach führt ein Plattenbelag zu weniger Schäden als ein Asphaltbelag.

Als chemische Substanz übt nach Untersuchungen von KOPINGA (1992) Asphalt keine hemmende Wirkung auf die Baumwurzelentwicklung aus d.h. es kommt nicht zu einer Reduzierung der Durchwurzelung (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.14).

Damit die Deckschichten eine geringe Schadanfälligkeit aufweisen, können laut REICHWEIN (2002) anpassungsfähige, verformbare oder kleinteilige Beläge mit hoher Rauigkeit eingesetzt werden (vgl. REICHWEIN 2002, S. 239 f.). Im Bereich von Bäumen könnten zudem anstelle von Deckschichten auch Wurzelbrücken Anwendung finden. Insgesamt sieht sie hinsichtlich der Deckschicht Lösungen eher in externen Schutzmaßnahmen, um das Wurzeleindringen von unten oder von der Seite zu verhindern.

Zur immer wieder durchwurzeltten Deckschicht aus Pflaster- und Plattenbelägen mit Sandbettung sagt REICHWEIN (2002), dass eine Veränderung dieser „gängigen Bauweisen für Deckschichten im Hinblick auf eine geringere Schadanfälligkeit [...] nur bedingt möglich“ ist (vgl. REICHWEIN 2002, S. 243). Die Sandbettung ist bautechnisch notwendig und „ein Ersatz durch nicht durchwurzelbare Mörtel führt zu bautechnischen Schwierigkeiten [...] und löst das Problem nicht unbedingt [...]“ (vgl. REICHWEIN 2002, S. 243).

Bestehende Lösungsansätze machen deutlich, dass bezüglich der wegebaubezogenen Maßnahmen zur Schadenvorbeugung Forschungsbedarf konstatiert wird; und hier setzt die vorliegende Arbeit an. Ansätze hinsichtlich der Modifikation der Stoffe sehen COSTELLO u. JONES (2003) u.a. in der **Stärkung der Wegedecke** und somit in einer

vergrößerten Toleranz gegen Wurzeldrücke. Die Verwendung von bewehrten Platten, das Einsetzen von insgesamt dickeren Platten sowie der Einsatz von monolithischen Gehwegen, wie sie zum Beispiel in Mitteleuropa und den USA eingesetzt werden, werden diesbezüglich als Möglichkeiten aufgeführt. Hinsichtlich großformatiger und schwerer Deckschichten bestätigt auch REICHWEIN (2002), dass hier durch Wurzeln unter dem Belag kaum Schäden zu erwarten wären. Jedoch kommen diese massiven Bauweisen für gering belastete Verkehrsflächen ihrer Meinung nach nicht in Betracht (vgl. REICHWEIN 2002, S. 243).

Neben den aufgeführten wegebaubezogenen Maßnahmen werden in der bestehenden Literatur ferner Maßnahmen aufgeführt, welche den Baum und seinen Wurzelraum beziehungsweise spezielle Wurzelbarrieren betreffen. Da immer der **Gesamtkomplex „Wegebau-Baumwurzel“** bei der Entwicklung von Lösungsansätzen zu berücksichtigen ist, werden der Vollständigkeit halber im Folgenden auch diese in der bestehenden Literatur aufgeführten Lösungsansätze dargestellt, welche jedoch in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit nicht mit einbezogen wurden.

2.3.2 Baum- und wurzelraumbezogene Maßnahmen

Baumauswahl

Die schadenvorbeugenden Maßnahmen beginnen schon bei der **Baumauswahl** (vgl. COSTELLO u. JONES, 2003), da die Häufigkeit und das Ausmaß von Verkehrsflächenschäden vom **gattungsspezifischen Wurzelverhalten** beeinflusst werden können (vgl. REICHWEIN 2002, S. 90). Allerdings wurde noch nicht ausreichend erforscht, wie groß der Einfluss des artspezifischen Wurzelwachstums auf die Schadenproblematik ist (vgl. REICHWEIN 2002, S. 231). Die Verwendung von weniger schnell wachsenden und kleinen Baumarten führt zu weniger Schäden an Wegen (vgl. WONG et al. 1988; FRANCIS et al. 1996; WAGAR u. BARKER, 1983). Nach KOPINGA (1992) handelt es sich bei den schadenverursachenden Gehölzen besonders um sogenannte **Pioniergehölze** (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.5). Schäden an Wegen fallen zudem stärker aus, wenn die benachbarten Bäume **Flachwurzler** sind (vgl. ROBERTS et al. 2006, S. 389).

Wurzelraum

Um einem Einwurzeln in die Schichten des Wegebaus vorzubeugen, müssen auch für den unterirdischen Bereich des Baumes, dem Wurzelwerk, gute Bedingungen geschaffen werden. Empfehlungen für **Pflanzgrubenbauweisen**, **Substrate** und **Baumscheibengröße** gibt die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2010). In diese Empfehlung flossen die Ergebnisse der Untersuchungen von LIESECKE u. HEIDGER (1994) ein, die sich mit der Thematik „Bäume in Stadtstraßen“ auseinandersetzen. Ein von REICHWEIN (2002) vorgeschlagener Ansatz ist die **„vertikale funktionsräumliche Trennung von Verkehrsfläche und Wurzelraum“**. Dieser Ansatz berücksichtigt, dass die Baumgröße und die Platzverhältnisse mit einbezogen werden und unter der obersten Tragschicht des Wegebaus zusätzlicher Wurzelraum zu schaffen ist. Diese Möglichkeit der **Wurzelraumerweiterung** findet ebenso in der FLL Empfehlung für Baumpflanzungen Teil 2 Berücksichtigung. Genauere Untersuchungen zur Wurzelraumerweiterung durch geeignete Stoffe, die sowohl als Tragschicht für den Wegeaufbau als auch als Substrat für den Baum dienen können, wurden von COUENBERG (1994), GRABOSKI u. BASSUK

(1996), SCHRÖDER (1997), KRISTOFFERSON (1999) sowie von SCHÖNFELD (1999) unternommen.

Substrat

Neben ausreichend Wurzelraum benötigt der Baum ebenso ein geeignetes **Substrat** in dem sich die Wurzeln optimal entwickeln können. Die Entwicklung von Substraten für Pflanzgruben stand schon bei früheren Forschungen im Fokus (KRIETER et al., 1989; KRIETER u. MALKUS, 1996; LIESECKE, 1994; LIESECKE u. HEIDGER, 2000; LINDSEY, 1997; SCHRÖDER u. GRIMM-WETZEL, 1990). Mit Baumsubstraten auf Basis von Baustoff-Recyclingstoffen setzen sich ASTLEITNER 2010 und FLORINETH 2011 auseinander.

Grundlegende normative Angaben zu Baumpflanzungen sind in der DIN 18916 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten“ verzeichnet. Diese wird ergänzt durch Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL). Teil 1 beschäftigt sich hierbei mit der Planung und der Pflege sowie mit den Baumpflanzungen direkt. Der Teil 2 der FLL Richtlinie macht Angaben zur Standortvorbereitung für Neupflanzungen hinsichtlich der Pflanzgruben und der Wurzelraumerweiterung sowie zu Bauweisen und den anzuwendenden Substraten. Die Empfehlungen zielen auch auf Baumstandorte mit schwierigeren Verhältnissen ab. So können diese für Pflanzungen für Baumstandorte in befestigten Flächen wie Wegen und Plätzen angewendet werden. Zur Standortsanierung und Wurzelraumerweiterung bei bestehenden Baumstandorten ist die Anwendung zu überprüfen (vgl. FLL 2010, S. 9).

Daneben geben die „Zusätzlichen Technischen Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten“ (ZTV-Vegtra-Mü) (2008) Hinweise zu verschiedenen Substraten für die Baumpflanzungen und nennen zwei Arten von verbesserten Vegetationstragschichten, die sich in der Überbaubarkeit unterscheiden.

Die sogenannten „Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen“ (2006) machen ebenso Vorgaben zur Vegetationstechnik (Pflanzgrube, Substrate) sowie Angaben zur Pflege und Erhalt des Baumbestandes. Die zu verwendenden Schüttstoffe für die Substrate sollen hiernach den Angaben der TL Gestein-StB 04 und der ATV DIN 18315 entsprechen.

2.3.3 Wurzelbarrieren und Randeinfassung

Wurzelbarrieren

Als schadenvorbeugende Maßnahme werden des Weiteren **Wurzelbarrieren** genannt, die laut aktuellem Forschungsstand zumindest eine Reduzierung des Einwurzeln in die benachbarten Geh- und Radwege herbeiführen können (vgl. MORGENROTH 2008). Im Ausland existieren zahlreiche Untersuchungen zur Thematik der Wurzelbarrieren (vgl. u.a. BARKER 1994, GILMAN 1996, SMILEY et al. 2009). Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass unterschiedliche Arten von **physikalischen oder chemischen Wurzelbarrieren** die Entwicklung von oberflächennahen Wurzeln hemmen können und die Wurzeln in tiefere Schichten wachsen. Wurzelbarrieren können laut diesen Untersuchungen Schäden am Gehweg zumindest reduzieren. Ein Versuch, bei dem eine mit Preventol-B (biochemischer Hemmstoff) imprägnierte Dachpappe als Unterschicht unter einen Asphaltbelag gelegt wurde, ergab, dass nach fünf Jahren kein hemmender Effekt mehr festgestellt wurde. Dieser konnte lediglich im ersten Versuchsjahr erkannt

werden. Es wurde gefolgert, dass durch die Anwendung eines **Wurzelherbizids** im Stoff des Belags das Wurzelwachstum nicht verhindert wird (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.19 f.). Untersuchungen mit **Geotextilien** von KOPINGA (1992) zeigen, dass bei verschiedenen Tuchstärken Wurzeldurchwachs stattgefunden hat. Es gab jedoch Unterschiede in der Menge sowie im Durchmesser der Wurzeln (vgl. KOPINGA 1992, 10.21). Eine Übersicht über bestehende Forschung im Bereich der Wurzelbarrieren gibt MORGENROTH (2008). In Deutschland steht eine systematische Erprobung von Wurzelbarrieren noch aus.

Randeinfassung

Hinsichtlich der Verhinderung der Wurzelentwicklung unter Wegebela­gen konstatiert REICHWEIN (2002), dass insgesamt das Vorhandensein einer **Randeinfassung** zu niedrigeren Schadenquoten führt. Dieses beschreiben auch WONG et al. (1988). Durch eine nicht durchwurzelbare Randeinfassung soll der seitliche Zugang in die Wegebau­schichten versperrt werden. Nach REICHWEIN (2002) sollten nicht durchwurzelbare Randeinfassungen durch dichte oder nicht vorhandene Fugen als Schutz der Deckschicht eingebaut werden (vgl. REICHWEIN 2002, S. 239).

Von HEIDGER u. KURKOWSKI (2004) werden massive **monolithische Pflanzglocken** beschrieben, welche das Einwurzeln in die Oberbauschicht verhindern sollen.

Mit Ansätzen zur **Schadenbehebung** beschäftigen sich u.a. REICHWEIN (2002) sowie COSTELLO u. JONES (2003). Zu unterscheiden sind wurzelerhaltene Maßnahmen oder Verfahren mit Wurzelentfernung (vgl. REICHWEIN 2002). Wobei REICHWEIN (2002) vorhergehende Untersuchungen (z.B. HAMILTON 1984b, NICOLL u. ARMSTRONG 1998) bestätigt und die Wurzelkappung als kritisch einschätzt. Laut REICHWEIN (2002) wird hinsichtlich der Schadenbehebung Forschungsbedarf formuliert.

3 Versuchsanlagen

3.1 Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit unterschiedlicher Baustoffe und Bauweisen

3.1.1 Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe



Abb. 7: Versuchsanlage des Feldversuches zu Versuchsbeginn am 19.04.2011

Nord																		
3. Wiederholung									4. Wiederholung									
V8	V6	V0	V7	V3	V1	V0	V5	V2	V4	V3	V1	V2	V0	V4	V6	V7	V5	V8
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V0	V4	V6	V5	V8	V3	V2	V0	V1	V7
1. Wiederholung									2. Wiederholung									
Süd																		

Abb. 8: Anordnung der Versuchsvarianten (V0 – V8) entlang der Bäume (B1 – B19) (schematisch) (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 7)

Tab. 13: Varianten des Feldversuches

Ungebundene Bettungsstoffe	
V0	Hart-Kalkstein 0/5
V1	Karbon Quarzit 0/5
V2	Hydrophober Sand 0/5
V3	Hart-Kalkstein 0/5; Pflasterstein mit profilierter Unterseite
V4	Hart-Kalkstein 0/5; aufgeraute Tragschichtoberfläche
V5	Hart-Kalkstein 0/11
V6	Hart-Kalkstein 2/5
Gebundene Bettungsstoffe 1)	
V7	Bettung: TPM-D Portlandzement mit Trass- Anteil (drainfähig, Körnung: 0 – 4 mm, alkalisch, Druckfestigkeit $\geq 30\text{N/mm}^2$)
V8	Bettung: TPM-D Portlandzement mit Gesteinsmehl (Kalksteinmehl) als Trassersatzmittel (Körnung: 0 – 4 mm)
V7/V8	PFN Pflasterfugenmörtel: Wasserundurchlässiger Mörtel (drainfähig, Körnung: 0 – 1 mm, alkalisch, trassgebunden, Druckfestigkeit: $> 25\text{N/mm}^2$,) TNH-flex Trass-Naturstein-Haftschlämme: Zur Verbesserung des Haftverbundes zwischen Stein mit Mörtelbettung
1) vgl. Beschreibung Gefäßversuch Kapitel 3.4	

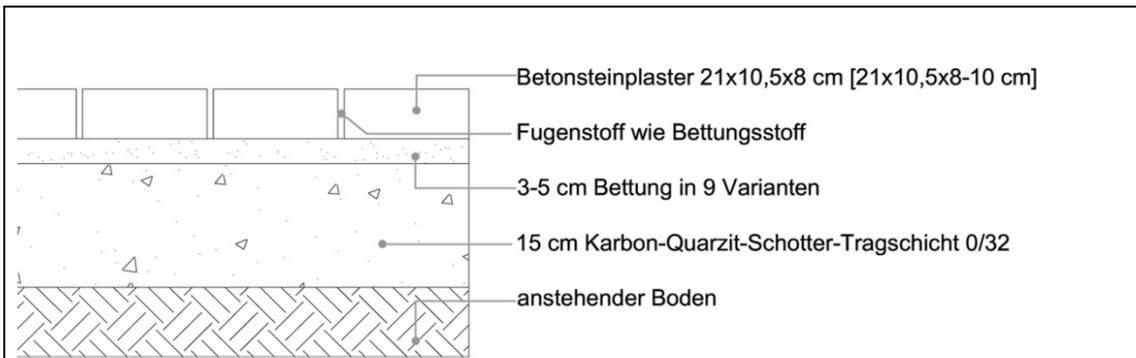


Abb. 9: Schematischer Querschnitt des Versuchsfächenaufbaus (vgl. STENDEL et al. 2013, Anlage 1)

Ort:	Baumschulfläche in Bad Zwischenahn/Westerstede
Bauzeit:	2,5 Wochen
Versuchslaufzeit:	April 2011 bis November 2012 (18 Monate)
Versuchspflanze:	19 <i>Ulmus x hollandica</i> 'Lobel'
Wegelänge:	je 95 Meter
Wegebreite:	1 Meter
Versuchsfeldgröße:	5 Meter x 1 Meter
Anzahl der Varianten:	9
Anzahl der Wiederholungen:	4 (Die Variante 0 wurde sechsmal aufgebaut, um die Möglichkeit von Probeöffnungen zu haben.)
Bauweisen:	ungebunden/gebunden
Untersuchte Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Wurzelfrischmasse/Wurzeltrockenmasse • Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe • hydrophober Sand als ungebundener Bettungsstoff • Bodenreaktion ungebundener Bettungsstoffe • Calciumgehalt ungebundener Bettungsstoffe • Verzahnung der Wegebauweisen mittels aufgerauter Tragschicht sowie profilierter Unterseite eines Betonpflastersteins • hydraulisch gebundene Bettungsmörtel
Untersuchte Randfaktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Wurzelwachstum vor Versuchsbeginn • Stammumfang • Salzgehalt ungebundener Bettungsstoffe • Wurzelwachstum aus der Tragschicht • Wurzeleinwuchs in Pflasterfugen • Ebenheitsüberprüfung der Pflasterfläche

Der Feldversuch wurde mit den in Tabelle 13 dargestellten Varianten durchgeführt. Insgesamt wurden sieben Varianten mit ungebundenen Bettungsstoffen sowie zwei mit gebundenen Bettungsstoffen eingebaut.

Die ungebundenen Bettungsstoffe für die Varianten V0 bis V6 unterscheiden sich zum einen in der Korngrößenzusammensetzung. Zum anderen werden Bettungsstoffe verwendet, welche unterschiedliche bodenchemische Eigenschaften aufweisen. Untersucht wurden hierbei der pH-Wert, der Salzgehalt sowie der Gehalt an löslichen Calciumionen. Die Untersuchungsergebnisse werden in Kapitel 4.1.6 dargestellt. Eine besondere Stellung nimmt der **hydrophobe Sand** ein, der eine wasserabweisende Wirkung aufweist. Laut Hersteller hat der hydrophobe Sand eine hohe Umweltverträglichkeit, gilt nach Frostempfindlichkeitsklasse F1 als frostsicher, ist salzwasserresistent sowie beständig gegen Ultraviolettstrahlung (UV). Zudem bleibt die wasserabweisende Wirkung permanent erhalten.

Im Gegensatz zu den übrigen Varianten, bei denen als Pflasterstein ein **Betonrechteckstein** mit den Maßen 20 x 10,5 x 8 cm eingesetzt wurde, ist für die Variante 3 ein Betonrechteckstein mit **profiliertes Unterseite** zur Verzahnung zwischen Pflasterstein und Bettungsschicht hergestellt worden (vgl. Abb. 10). Variante 4 beinhaltet eine **aufgeraute Tragschichtoberfläche**, die zu einer „Auflösung“ der Grenzschicht zwischen Trag- und Bettungsschicht beitragen soll.



Abb. 10: Verlegen des Betonsteins mit profilierter Unterseite (Variante 3) zur Verzahnung der Pflasterdecke mit der Bettungsschicht (links). Unterseite des profilierten Betonpflastersteins (rechts).

Die gebundenen Bettungsmörtel für die Varianten 7 und 8 unterscheiden sich bezüglich ihrer Zusatzstoffe. Die unterschiedlichen Stoffe unterscheiden sich nicht maßgeblich in ihren physikalisch-mechanischen Eigenschaften d.h. zum Beispiel in ihrer Druckfestigkeit sowie in ihrem Porenvolumen. Im Gefäßversuch wurde der Einsatz von gebundenen Bettungsmörteln weiter untersucht (vgl. 3.4).

Die Versuchsfläche besteht aus einer 15 cm dicken **Schottertragschicht** (Karbon Quarzit 0/32), da der Stoff nicht mehr lösliches Calcium enthalten sollte als die „calciumärmste“ Variante 1. Die **seitliche Einfassung** der Versuchsfläche erfolgt mit Hilfe eines Kunststoffsystems (PAVE-EDGE Randbefestigungsschienen).

Bei der Auswahl der Gattung des Versuchsbaums musste abgewogen werden zwischen einer zur Verfügung stehenden Rosskastanienreihe (*Aesculus hippocastanum*) oder einer Reihe aus schmalkronigen Stadtulmen (*Ulmus x hollandica* 'Lobel'). Beide Baumgattungen werden in der Straßenbaumliste (Stand: 30.04.2015) der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) in ihrer Verwendbarkeit als Straßenbaum als „geeignet mit Einschränkungen“ bewertet. Laut dem Forschungsprojekt „Stadtgrün 21“ handelt es sich bei der Ulme im Allgemeinen um einen sehr belastbaren Baum, der zukünftig mehr berücksichtigt werden sollte. Insgesamt gilt die Ulme hinsichtlich ihrer Nährstoffansprüche zwar als anspruchsvoll, jedoch ist sie bezüglich des Bodengefüges anpassungsfähig und verträgt auch hohe Verdichtungen. Die Probeöffnungen an den jeweiligen bestehenden Baumreihen vor Versuchsbeginn haben gezeigt, dass das bestehende Wurzelwachstum der Ulmen für den Versuch geeignet scheint. Die Wurzeln waren gleichmäßig, dicht verzweigt in der für den Versuchsaufbau passenden Bodentiefe ausgebildet. Die Baumschulware zeigte insgesamt eine gleichmäßige Ausbildung der Kronen. Die Bäume hatten zu Versuchsbeginn eine Höhe von ca. zehn Metern. Der mittlere Stammumfang in einem Meter Höhe betrug zu Versuchsbeginn 60,5 cm.

3.1.2 Herstellung der Versuchsfläche

Vor dem Einbau der unterschiedlichen Varianten wurde nach der Entfernung der vorhandenen Rasensoden der seitliche Wurzelbereich im Baumbestand abgegraben. Die Abgrabung mit der Wurzelfreilegung in unmittelbarer Baumnähe erfolgte in Handarbeit. Nach der Freigrabung der Wurzeln (vgl. Abb. 11) wurden das Wachstum dokumentiert und die Wurzeln mit einer Rosenschere gekappt, so dass die Wurzelenden direkt an den Außenseiten der zukünftigen Versuchsvarianten liegen (vgl. Abb. 12).



Abb. 11: Freigelegte Wurzeln im vorgesehenem Wegebereich, Baum 17 Südseite, Wurzeln geweißt (Datum: 06.04.2011) (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 7) **Abb. 12:** Abgeschnittene Wurzeln vor Einbau der Tragschicht; Baum 17 Nordseite (Datum: 05.04.2011)

Für die Aufnahme der Wurzeln im vorhandenen Baumschulboden vor Versuchsbeginn wurden die Wurzelmengen, welche kleiner als 5 mm im Durchmesser waren, nach drei Intensitätsklassen eingeteilt (1 = sehr geringe Wurzelintensität; 2 = mittlere Wurzelintensität; 3 = hohe Wurzelintensität). Die Wurzeln über 5 mm bis 20 mm (Grobwurzeln) wurden gezählt; ebenso die Wurzeln mit einem Durchmesser über 20 mm bis 50 mm (Derbwurzeln).

Nach der Herstellung des Planums wurde sowohl auf der Nordseite der Baumreihe als auch auf der Südseite die Schottertragschicht (Karbon Quarzit 0/32) eingebaut, verdichtet und auf Ebenheit überprüft. Für die Variante 4 wurde die Tragschicht tiefer eingebaut, um die zweite Schicht als „aufgeraute Tragschicht“ ohne Verdichtung einzubauen.

Im Anschluss wurden die unterschiedlichen Bettungstoffe eingebaut und das Betonrechteck im Ellenbogenverband verlegt. Bei der Variante 3, für die der Betonrechteckstein mit profilierter Unterseite verwendet wurde, wurde die Bettungsschicht einen Zentimeter tiefer eingebaut, da der Stein mit der profilierten Unterseite höher war als der Stein für die übrigen Varianten. Die Flächen mit den ungebundenen Bettungstoffen wurden nach Verlegen des Pflastersteins mit einer Rüttelplatte verdichtet.

Für die gebundenen Bettungsschichten der Varianten 7 und 8 wurde der Mörtel jeweils mit einem Betonmischer gemischt, erdfeucht eingebaut und abgezogen. Die Haftschlämme für die Unterseite der Betonrechtecksteine wurde mit dem Handmischer angerührt und in einem fließfähigem Zustand unter die Steine gebracht, welche dann auf die Bettungsschicht im Ellenbogenverband mit 3 – 5 cm Fuge verlegt wurden (vgl. Abb. 13). Mit Hilfe einer Holzbohle wurde jede Reihe in der Ebenheit überprüft und mit leichten

Hammerschlägen gegebenenfalls korrigiert. Die Verfugung der abgefegten und leicht angefeuchteten Fläche erfolgte mit dem angerührten Fugenmörtel (vgl. Abb. 14)



Abb. 13: Verlegen des Betonrechtecksteins mit aufgetragener Haftschlämme auf der Steinunterseite auf die gebundene Bettungsschicht (Datum: 14.04.2011)



Abb. 14: Verfugen der gebundenen Bauweise mit Fugenmörtel (Datum: 18.04.2011)

Am Ende wurde die seitliche Einfassung aller Varianten jeweils auf der gegenüberliegenden Baumseite aus einem Kunststoffsystem (PAVE-EDGE Randbefestigungsschienen) angebracht sowie der Pflanzstreifen mit dem vorher ausgekofferten Baumschulboden bis zur Oberkante Pflasterstein angefüllt.

Die gesamten Pflasteroberflächen wurden nach der Fertigstellung mit einer 4-Meter-Latte auf ihre Ebenheit nach DIN 18202 hin überprüft.

3.1.3 Versuchsflächenbetreuung

Inaugenscheinnahme/Flächenpflege

Nach Fertigstellung wurde die Versuchsfläche drei- bis viermal im Jahresverlauf in Augenschein genommen. Kontrolliert wurden hierbei auch die 19 Ulmen mit ihrer Pflanzfläche sowie die Beschilderung.

Im Rahmen der Betreuungsgänge wurde die Pflanzfläche von Aufwuchs befreit sowie die Pflasterfläche gesäubert. Die Säuberung war insbesondere im Herbst nach dem Laubfall und nach einer „Sandüberschwemmung“ im April 2011 notwendig (vgl. Abb. 15 und 17) Des Weiteren wurden Auffälligkeiten im Pflasterbereich dokumentiert; so zum Beispiel die Verschmutzung der Fläche an Baum 1 (vgl. Abb. 16).



Abb. 15: Laubfall auf der Versuchsfläche (Datum: 03.11.2011)



Abb. 16: Mit Reifenabrieb verschmutzte Versuchsfläche; Baum 1 Nordseite (Datum: 18.05.2011)



Abb. 17: Reinigung der von Sand überlagerten Versuchsfäche (Datum: 04.04.2012)



Abb. 18: Aufgekommener Aufwuchs auf den Pflanzflächen (Datum: 06.06.2012)

Datenaufnahme

Hinsichtlich der 19 Ulmen wurden die Stammumfänge aufgenommen und eine visuelle Betrachtung des Stammes sowie der Krone durchgeführt. Insgesamt wurden während der Versuchslaufzeit keine das Wurzelwachstum nachhaltig beeinflussenden externen Faktoren beobachtet.

3.1.4 Öffnung der Versuchsfächen

Nach einer Versuchslaufzeit von 18 Monaten wurden die Versuchsfächen im Zeitraum vom 12.11.2012 bis zum 04.12.012 geöffnet. Um die Versuchslaufzeit zu verlängern, erfolgte die Versuchsfächenöffnung zur vorliegenden Arbeit als Teilöffnung. Das heißt, von jeder Fläche einer Variante wurde lediglich die eine Hälfte (2,5 m x 1,0 m) geöffnet (vgl. Abb. 19). Um dabei die Wurzelersfassung zu erleichtern, wurde die Öffnung nach einem vorher festgelegten Raster durchgeführt (vgl. Abb. 20). Bei den gebundenen Varianten 7 und 8 wurde lediglich eine Probeöffnung durchgeführt.



Abb. 19: Teilöffnung der Versuchsfäche (Südseite) im November 2012 (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 8)

				D	E	F
				A	B	C
Feld	1	2	3	4	5	
Nord	Variante 8					
Baum	Baum 1					
Süd	Variante 0					
Feld	1	2	3	4	5	
	A	B	C			
	D	E	F			

Abb. 20: Raster für die Teilöffnung der Versuchsfäche am Beispiel Baum 1; geöffnet wurden die Flächen A- F (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 8)

Zu Beginn der Aufgrabung standen das Abfegen der Pflasterflächen sowie die Kontrolle der Ebenheit mit einer 4-Meter-Latte. Im Rahmen der Öffnung wurden die Pflastersteine von Hand angehoben. Im Anschluss wurde das Hilfsraster mit Schnüren abgespannt. Nach Dokumentation des **Wurzelwachstums in der Grenzschicht** wurde mit Hilfe von Kleinwerkzeug (herkömmliche Besteckgabel) die Bettungsschicht aufgelockert. Von der **aufgelockerten Bettungsschicht** und den darin befindlichen Wurzeln wurden ebenfalls Fotos gemacht und eine Dokumentation vorgenommen. Das **Sieben** der ungebundenen Bettungsstoffe pro Rasterfeld und das damit erzielte „Abernten“ der Wurzel erfolgten mit

Hilfe eines Siebes mit einer Maschenweite von acht Millimetern. Die Wurzeln wurden mit einer Schere abgetrennt. Um die Wurzelverluste durch die Siebung so gering wie möglich zu halten, wurde der durchsiebte Stoff augenscheinlich betrachtet und die gegebenenfalls durch das Sieb gefallenen Wurzeln abgesammelt. Nach der **Entnahme der Wurzelmasse** wurde eine **Mischprobe** aus den Bettungsstoffen gezogen. Im Anschluss an die gesamte Öffnung wurden die einzelnen Flächen wieder mit der Pflasterdecke verschlossen.

3.1.5 Aufbereitung der Wurzelfrischmasse

Die abgesammelten Wurzeln wurden nach einer gründlichen Waschung gewogen. Für die Waschung wurden die Wurzeln vorerst grob in einer Schale mit Wasser von Hand gereinigt. Im Anschluss wurde die vorgewaschene Wurzelmasse in ein Sieb mit einer Maschenbreite von fünf Millimetern gefüllt und mit fließendem Wasser über einer Metallschale von den noch anhaftenden Bettungsstoffresten befreit. Dabei wurde das Wasser in der Metallschale aufgefangen, um mögliche Wurzelstücke, die durch das Sieb gegangen sind, wieder herauszusieben. Um überschüssiges Wasser von den Wurzeln zu beseitigen, wurden diese vor dem Wiegen mit einem Küchentuch abgetupft. Nach dem Wiegen erfolgte die Trocknung der Wurzeln in einem Trockenschrank bei 65 Grad Celsius bis zu einer Gewichtskonstanz. Die Wurzel trockenmassen wurden ebenso wie die Wurzelfrischmassen dokumentiert.

3.2 Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung der Bettungstoffe

3.2.1 Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe



Abb. 21: Versuchsanlage des Gefäßversuches zu Versuchsbeginn am 20.12.2012 (FOTO: KIBLER 2013)

Block 1	C1.5	C2.1	C1.4	C2.2	B2	C1.1	B1	C1.3	A2	A3/C1.2	A1	A4
Block 2	A2	A3/C1.2	A4	A1	C1.5	C2.1	C2.2	C1.4	B2	C1.1	C1.3	B1
Block 3	C1.3	B1	B2	C1.1	C2.2	C1.4	C1.5	C2.1	A4	A1	A2	A3/C1.2
Block 4	C2.1	C2.2	C1.4	C1.5	A3/C1.2	A4	A1	A2	C1.1	C1.3	B1	B2
Block 5	A1	A2	A3/C1.2	A4	B1	B2	C1.1	C1.3	C1.4	C1.5	C2.1	C2.2

Abb. 22: Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) (vgl. KIBLER 2013, S. 56)

Tab. 14: Varianten des Gefäßversuches (vgl. KIBLER 2013, S. 26)

Variante/Stoffe	
Kornabstufungen	
A1	Karbon Quarzit 0/5
A2	Karbon Quarzit 0/8
A3	Karbon Quarzit 0/11
A4	Karbon Quarzit 2/5
Kornoberfläche/Bruchflächigkeit	
B1	Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche
B2	Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche
Schlammkornanteil – Gehalt an Schluffanteilen	
C1.1	Karbon Quarzit 0/11; gewaschen; 0,4 M.-% Schluff
C1.2	Karbon Quarzit 0/11; 3,0 M.-% Schluff
C1.3	Karbon Quarzit 0/11; 9,3 M.-% Schluff
C1.4	Karbon Quarzit 0/11; 11,9 M.-% Schluff
C1.5	Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff
Schlammkornanteil – Gehalt an Tonanteilen	
C2.1	Karbon Quarzit 0/11; 1,1 M.-% Ton
C2.2	Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton

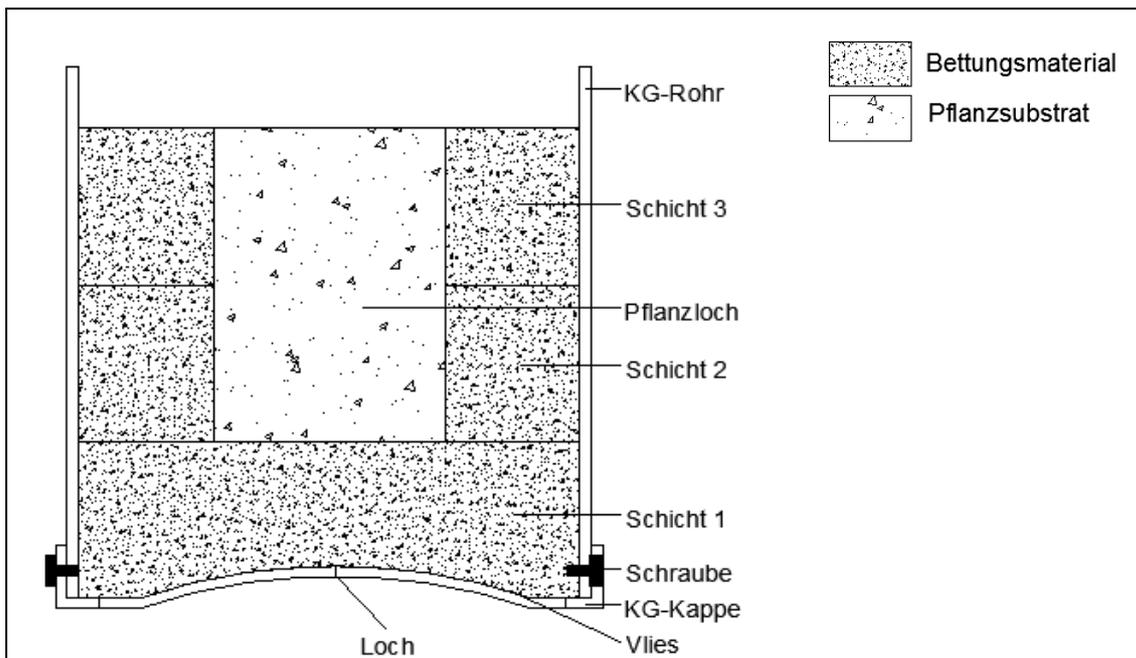


Abb. 23: Schematischer Querschnitt des Versuchskörpers (vgl. Kießler 2013, S. 52)

Ort:	Gelände der Hochschule Osnabrück (Haste)
Versuchslaufzeit:	20.12.2012 - 02.09.2013 (8 Monate)
Versuchspflanze:	<i>Salix purpurea</i>
Höhe Versuchskörper:	26 Zentimeter
Breite Versuchskörper:	25 Zentimeter
Anzahl der Varianten:	12
Anzahl der Wiederholungen:	5
Bauweisen:	ungebunden
Untersuchte Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Wurzelfrischmasse/Wurzeltrockenmasse • Korngrößenverteilung/Porengrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe • Kornform • Proctordichte (optimaler Wassergehalt) ungebundener Bettungsstoffe • Wasserdurchlässigkeit ungebundener Bettungsstoffe
Untersuchte Randfaktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Versuchspflanze • Wurzeleinwuchs in Grenzzonenbereiche

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit den in Tabelle 14 aufgezeigten Varianten. Bei den Varianten wurden vier Gesichtspunkte berücksichtigt:

- Kornabstufung
- Beschaffenheit der Kornoberfläche
- Gehalt an Schluffanteilen
- Gehalt an Tonanteilen

Damit ausgeschlossen werden konnte, dass andere Faktoren einen Einfluss auf die Durchwurzelung nehmen, sollte bei allen Variantenblöcken der gleiche Ausgangsstoff verwendet werden. Gewählt wurde das vor Ort (Raum Osnabrück) vorkommende Karbon Quarzit. Da es sich hierbei um einen gebrochenen Stoff handelt, kam es für den Einsatz im Variantenblock B jedoch nicht in Frage. Hier musste deshalb auf ein Stoff (Donau-Moos-Kies) zurückgegriffen werden, welcher sowohl als runder als auch als gebrochener Stoff bezogen werden konnte.



Abb. 24: Donau-Moos-Kies als gebrochenes (linkes Bild) und rundes (rechtes Bild) Material

Als Ausgangsstoff für den Variantenblock C wurde Karbon Quarzit mit der Körnung 0/11 herangezogen. Um den Schluffanteil zu variieren wurde ein sogenanntes Füllmaterial aus dem gleichen Ausgangsstoff (Karbon Quarzit) verwendet, welches laut Prüfzeugnis einen Schluffanteil von ca. 86% aufweist.

Da für die Varianten C2 kein Ton aus Karbon Quarzit zur Verfügung stand, wurde ein nicht quellfähiger Kaolin-Ton verwendet.

Die für den Versuch ausgewählten Stoffe wurden zu Versuchsbeginn auf ihre bodenphysikalischen Faktoren hin untersucht. Kriterium war zum einen die **Korngrößenverteilung**. Des Weiteren wurde die **Proctordichte (optimaler Wassergehalt)** ermittelt, da diese ebenso wie die Korngrößenverteilung einen Einfluss auf die Porengröße ausübt. Abgeleitet wurden aus der Porengrößenverteilung das **Gesamtporenvolumen**, die **nutzbare Feldkapazität** sowie die **Luftkapazität**. Ebenfalls wurde der **Wasserdurchlässigkeitsbeiwert** berechnet. Die Untersuchungsergebnisse werden in Kapitel 4.2.4 dargestellt.

Als Versuchspflanze wurde wie in den anderen Gefäßversuchen *Salix purpurea* eingesetzt.

3.2.2 Herstellung der Versuchskörper

Vorbereitung der Versuchspflanzen

Die *Salix purpurea* wurden nach einer Zwischenlagerung im Kühlhaus am 19.12.2012 hieraus entnommen und ihr Wurzelwerk durch Waschung gründlich vom noch anhaftendem Boden befreit. Im Anschluss erfolgte das Einkürzen der oberirdischen Pflanzenteile sowie des Wurzelwerks mit Hilfe einer Schablone (vgl. Abb. 25). Die Triebe wurden auf eine Höhe von 40 cm gekürzt. Das Wurzelwerk wurde auf ein Maß von 10 x 12 cm zurückgeschnitten, damit es in das Pflanzloch des Versuchskörpers passte.



Abb. 25: Anhand einer Schablone eingekürzte Versuchspflanze *Salix purpurea* (Foto: KIBLER 2013)

Des Weiteren wurden die Pflanzen nach dem Zuschnitt gewogen.

Aufbau der Versuchskörper

In Anlehnung an MÜLLER (2011) erfolgte die Erstellung der einzelnen Versuchskörper (vgl. Abb. 26). Die Versuchskörper bestanden aus PVC KG-Rohren mit einem Nenndurchmesser von DN 250 mm. Die Unterseite war eine passende KG-Kappe, die mit zwei Schrauben befestigt wurde. Um ein Abfließen von anfallendem Wasser zu gewährleisten wurde die Kappe mit 16 kreisförmig angeordneten Löchern von circa einem Millimeter Durchmesser versehen. Damit keine Feianteile durch die Löcher ausgeschwemmt werden, wurde ein wasserdurchlässiges, 20 g/m² schweres Geotextilvlies von Innen auf die Kappe gelegt.

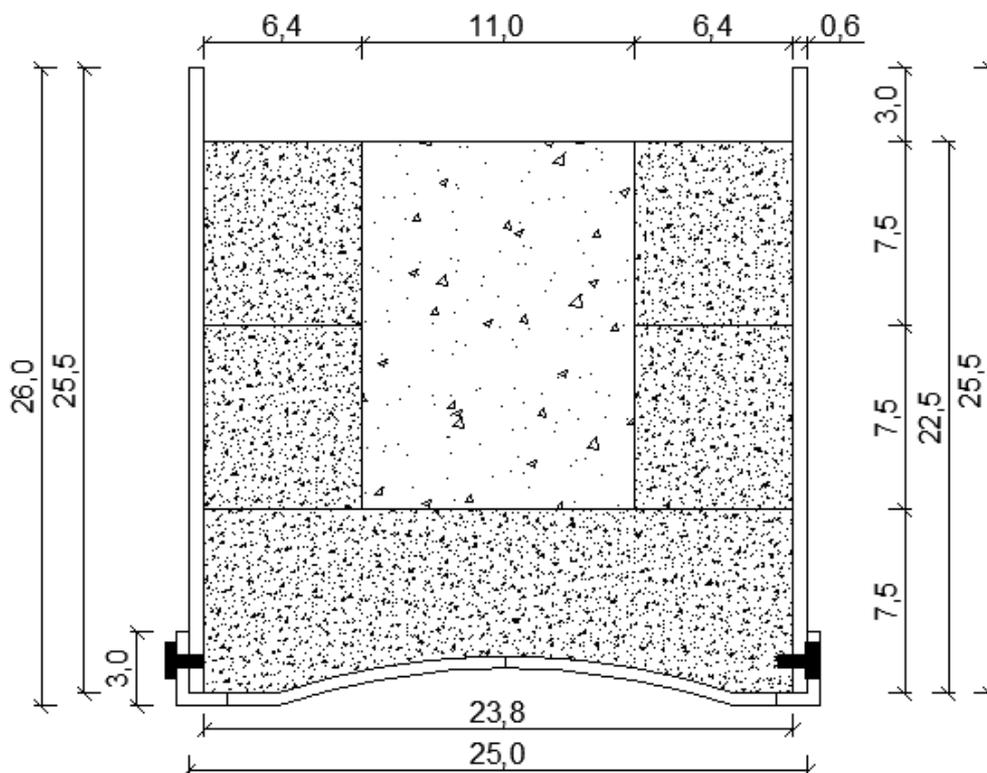


Abb. 26: Bemaßung des Versuchskörpers (in cm) (vgl. KIBLER 2013, S. 52)

Der Einbau des jeweiligen Bettungsstoffs erfolgte aus bautechnischen Gründen in drei Schichten mit je 7,5 cm Dicke und einer im Vorfeld ermittelten Proctordichte. Hierbei wurde bei der zweiten und dritten Schicht das Pflanzloch ausgespart.



Abb. 27: Schichtenweiser Einbau der Stoffe mit Aussparung des Pflanzlochs (FOTO: KIBLER 2013)



Abb. 28: Eingebauter Bettungsstoff mit definierter Proctordichte (FOTO: KIBLER 2013)

Am Ende wurden die Versuchspflanzen in die ausgesparten Pflanzlöcher mit einem Pflanzsubstrat eingesetzt. Die Versuchskörper wurden mit einem Abstand von 60 cm x 60 cm auf die Versuchsfläche gestellt.

3.2.3 Versuchsfeldebetreuung

Inaugenscheinnahme/Pflege der Versuchskörper

Nach Aufstellen der Versuchskörper am 20.12.2012 erfolgte eine regelmäßige Inaugenscheinnahme. Ab Anfang April 2013 zeigten sich erste Knospen an den *Salix purpurea*. Leicht aufkommender Fremdbewuchs in den Versuchskörpern wurde händisch beseitigt.

Startdüngung

Mitte April 2013 wurden die *Salix purpurea* mit einem NPKMg-Dünger (16:8:12:2) (Triabon Compo) gedüngt. Dabei wurden pro Versuchsgefäß ca. 1,5 g an die Stammbasis gestreut.

Bewässerung

Ab Mitte April 2013 wurden die *Salix purpurea* witterungsabhängig mit einer Handbrause gegossen. Die Wassermengen in den Monaten April und Mai betragen pro Gießgang und Versuchskörper ca. 0,5 Liter. Das Wasser stammte aus der hauseigenen Zisterne. Ab Juni wurde die Gießmenge auf 1 Liter erhöht. Dabei erfolgte eine fast tägliche Bewässerung. Eine weitere Erhöhung der Gießmenge auf ca. 2 Liter pro Versuchskörper fand ab Mitte Juli bis Mitte August statt. Ab Mitte August konnte die Bewässerung wieder auf 1 Liter reduziert werden.

Datenaufnahme

Im Rahmen der Versuchsflächenbetreuung erfolgten eine fotografische Dokumentation der oberirdischen Pflanzenentwicklung sowie die Aufnahme der Sprosshöhe des höchsten Sprosses.

3.2.4 Öffnung der Versuchskörper

Die Öffnung der Versuchskörper fand vom 26. August bis zum 02. September 2013 statt. Im Rahmen der Öffnung wurde eine **Fotodokumentation** angelegt, in der zum einen die einzelnen Versuchskörper zum anderen die gewaschenen Wurzelwerke fotografiert wurden.

Des Weiteren fand die Messung des **längsten Sprosses** je Versuchspflanze statt, um die Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile zu dokumentieren. Zur Massenermittlung (Frisch- und Trockenmasse in Gramm) wurden die Blätter der Pflanzen händisch entfernt. Um die **Frisch- und Trockenmassen der Wurzeln** zu ermitteln, wurden die Wurzelballen nach Entfernung des KG-Rohrs gründlich durch Waschung von dem jeweiligen Bettungsstoff befreit. Zur Reduzierung von Wurzelverlusten wurde das Wasser aufgefangen und durchgesiebt. Neben den Blatt- und Wurzelmassen wurden ebenso die Massen der Sprosse aufgenommen. Besonderheiten während der Öffnung der einzelnen Versuchskörper wurden aufgenommen.

3.3 Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit bodenchemischer Baustoffeigenschaften

3.3.1 Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe



Abb. 29: Versuchsanlage des Gefäßversuches zu Versuchsbeginn am 24.06.2011 (FOTO: V. SCHLOMBS)

1	7	11	3	9	4	5	10	2	8	6	7	8	5	3	10	2	4	6	1	9	11	6	9	7	3	2	1	11	10	8	5	4
1	7	11	3	9	4	5	10	2	8	6	7	8	5	3	10	2	4	6	1	9	11	6	9	7	3	2	1	11	10	8	5	4
1	7	11	3	9	4	5	10	2	8	6	7	8	5	3	10	2	4	6	1	9	11	6	9	7	3	2	1	11	10	8	5	4
1	7	11	3	9	4	5	10	2	8	6	7	8	5	3	10	2	4	6	1	9	11	6	9	7	3	2	1	11	10	8	5	4
Block 1										Block 2										Block 3												

Abb. 30: Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 35)

Tab. 15: Varianten des Gefäßversuches (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 28)

Variante/Stoffe	
1	Baumschulboden
2	Plazadur
3	Karbon Quarzit
4	Basalt
5	Grauwacke
6	Gabbro
7	Ibbenbürener Sandstein
8	Hart-Kalkstein
9	Glasasche Granulat
10	Glasasche Granulat; 0,5 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l
11	Glasasche Granulat; 2,0 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l
Ort:	Gelände der Hochschule Osnabrück (Haste)
Versuchslaufzeit:	24.06.2011 – 24.10.2011 (4 Monate)
Versuchspflanze:	<i>Salix purpurea</i>
Durchmesser Pflanzcontainer:	39 Zentimeter
Volumen Pflanzcontainer:	15 Liter
Volumen Befüllung:	14 Liter
Anzahl der Varianten:	11
Anzahl der Wiederholungen:	4
Anzahl der Blöcke:	3
Bauweisen:	ungebunden
Untersuchte Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Wurzelfrischmasse • Bodenreaktion ungebundener Bettungstoffe • Calciumgehalt ungebundener Bettungstoffe
Untersuchte Randfaktoren:	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Versuchspflanze • Korngrößenverteilung ungebundener Bettungstoffe • Salz- und Nährstoffgehalt ungebundener Bettungstoffe

In der Tabelle 15 sind die Stoffe der elf Varianten dargestellt. Der Baumschulboden der Variante 1 stellt die Vergleichsvariante dar und stammt aus der Baumschulfläche des in dieser Arbeit beschriebenen Feldversuches in Bad Zwischenahn. Plazadur ist ein Baustoffprodukt aus gebrochenen Natursteinkörnungen, welches als natürliches, bindemittelfreies Produkt als wassergebundene Wegedecke eingesetzt wird. Das Glasasche-Granulat als industrielles Nebenprodukt wird in manchen Gegenden Deutschlands als Pflasterbettung verwendet. Des Weiteren wurden Stoffe ausgewählt, die nach TL-Gestein-StB (2004) als Bettungstoffe eingesetzt werden können und eine Körnung von 0/5 aufweisen.

Im Rahmen der **Stoffauswahl** wurden verschiedene Stoffproben mit einem wässrigen Aufschluss auf ihren löslichen Calciumionen-Gehalt hin untersucht. Dabei wurden diejenigen Stoffe für den Versuch verwendet, die hierbei einen niedrigen Calciumgehalt aufwiesen (Basalt, Plazadur, Karbon Quarzit, Glasasche Granulat). Und Stoffe, bei denen der Calciumgehalt vergleichsweise höher ausfiel (Grauwacke, Hart-Kalkstein, Ibbenbürener Sandstein, Gabbro).

Die für den Versuch ausgewählten Stoffe wurden zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende auf bodenchemische Faktoren hin untersucht. Untersuchungskriterien waren der Gehalt an pflanzenverfügbarem (löslichem) Calcium, der pH-Wert sowie zur weiteren Beschreibung der Stoffe der Salzgehalt und die Nährstoffgehalte. Des Weiteren wurde als Randfaktor zur Überprüfung der Korngrößenangaben zu Versuchsbeginn die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse werden in den Kapiteln 4.3.4 und 4.3.5 dargestellt.

Als Versuchspflanze wurde *Salix purpurea* eingesetzt, die als wurzelnackter, verpflanzter Strauch mit vier Trieben geliefert wurde. Damit bis Versuchsbeginn kein Austrieb erfolgte, wurden die Pflanzen in einem Kühlhaus gelagert.

3.3.2 Herstellung der Versuchskörper

Vorbereitung der Versuchspflanzen

Im Vorfeld der Herstellung der einzelnen Versuchskörper mit den unterschiedlichen Stoffen wurden die Pflanzen vorbereitet. Insgesamt wurden aus den 400 gelieferten Pflanzen 132 Versuchspflanzen herausortiert, die augenscheinlich gleichartiges Wachstum hinsichtlich der Triebzahl (9-11 Stück) und der Wurzelmasse aufwiesen. Bei diesen ausgewählten *Salix purpurea* wurden für den Versuch die Triebe auf eine Höhe von 40 cm gekürzt und die Wurzelballen auf einen Durchmesser von 20 cm beschnitten (vgl. Abb. 31).

Nach einer Waschung der Wurzeln wurde das Gesamtgewicht der einzelnen Versuchspflanzen dokumentiert. Vor der Pflanzung wurden die Wurzeln über Nacht mit Wasser gesättigt.

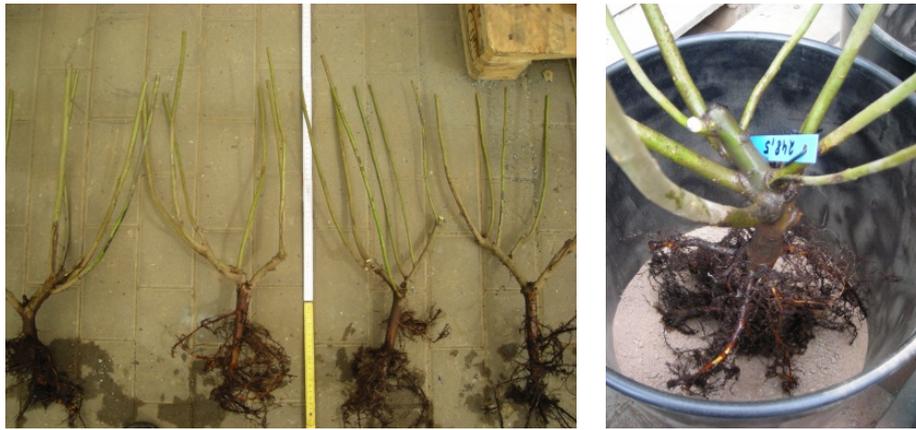


Abb. 31: Einkürzte Versuchspflanzen *Salix purpurea* am 23.06.2011 (FOTO: SCHLOMBS 2012)

Abb. 32: Einsetzen einer Versuchspflanze *Salix purpurea* in den Pflanzcontainer am 23.06.2011 (FOTO: SCHLOMBS 2012)

Aufbau des Versuchskörpers

Damit der Bettungsstoff nicht durch die im Pflanzcontainer vorhandenen Löcher ausgespült wird, wurde vor dem Befüllen ein wasserdurchlässiges Vlies in den Pflanzcontainer gelegt. Der Container hat ein Durchmesser von 39 cm und somit ein Pflanzvolumen von 15 Litern, von denen ca. 14 Liter mit Bettungsstoff aufgefüllt wurden. Der mit dem jeweiligen Bettungsstoff befüllte und mit je einer Pflanze bepflanzte Container wurde auf dem Versuchsfeld auf einen Untersetzer gestellt, damit überschüssiges Gießwasser aufgefangen wird und dieses der Pflanze länger zur Verfügung steht. Insgesamt wurden die Versuchskörper in einem 40 cm x 40 cm großen Raster aufgestellt, um den Pflanzen ausreichend Platz für ihr oberirdisches Wachstum zur Verfügung zu stellen.

Ansäuern der Varianten 10 und 11

Zur Senkung des pH-Werts der Varianten 10 und 11 wurde Aluminiumsulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) verwendet. Durch Vorversuche mit dem in diesen Varianten verwendeten Glasasche Granulat (pH-Wert 7,7) wurde die Konzentration ermittelt, welche notwendig war, um die pH-Werte auf 4,0 (Variante 10) bzw. auf 3,8 (Variante 11) zu senken. Die Aufbringung der Lösung auf die Bettungsstoffe der Varianten 10 und 11 erfolgte nach vier Wochen Versuchslaufzeit in zwei Durchgängen mit jeweils 2,1 Litern der Lösung. Zu diesem Zeitpunkt hatten sich alle Pflanzen der elf Varianten gleichermaßen entwickelt. Für Variante 10 wurden 0,5 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$ und für Variante 11 2,0 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$ eingesetzt.

3.3.3 Versuchsfeldbetreuung

Inaugenscheinnahme/Datenaufnahme

Nach Fertigstellung wurde die Versuchsfläche regelmäßig in Augenschein genommen. Im Rahmen der Betreuung des Versuchsfeldes wurden Bewässerungs- und Düngegänge sowie der Zeitpunkt der Zugabe von Aluminiumsulfat bei den Varianten 10 und 11 dokumentiert (vgl. SCHLOMBS 2012; Anhang 3.3). Ebenso wurden augenscheinliche Besonderheiten des oberirdischen Pflanzenwachstums schriftlich notiert und wöchentlich das Gesamtwachstum fotografisch festgehalten.

Bewässerung

Die regelmäßige, bedarfsgerechte Bewässerung erfolgte von Hand mit Regenwasser aus einer hauseigenen Zisterne (pH-Wert: 6,3; Calciumgehalt: 4,3 mg/l) (vgl. SCHLOMBS 2012, S.39). Unter Berücksichtigung der vor Ort gefallenen Niederschläge (Anhaltswert war das in den Untersetzern anfallende Wasser) wurde im Durchschnitt alle zwei Tage mit an den jeweiligen Bettungsstoff angepassten Wassermengen bewässert. Die Ermittlung der Bewässerungsmengen für die einzelnen Bettungsstoffe erfolgte auf Basis der Gefäßkapazität der einzelnen Stoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 50).

Düngung

Um eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen während der Versuchslaufzeit zu gewährleisten und damit gleiche Bedingungen zu schaffen, wurden die Varianten bedarfsgerecht mit Stickstoff (N), Phosphat (P) und Kalium (K) gedüngt. Innerhalb der Versuchslaufzeit von vier Monaten wurden insgesamt acht Düngedurchgänge angesetzt. Zur gleichmäßigen Verteilung der Düngelösung in den Bettungsstoffen erfolgte ein Bewässerungsgang (vgl. SCHLOMBS 2012, S.37 f.).

3.3.4 Öffnung der Versuchskörper

Die Öffnung der Versuchskörper wurde im Zeitraum vom 24.10.2011 bis 28.10.2011 durchgeführt. Dabei wurden die Pflanzen im Vorfeld von den Blättern befreit. Nach der Entfernung der Pflanzcontainer von den Wurzelballen wurde der Bettungsstoff aus den Wurzeln durch vorsichtiges Spülen gründlich ausgewaschen.

Nach der gründlichen Waschung des Wurzelballens wurde durch Wiegen das Gewicht der einzelnen Gesamtpflanze ermittelt. Zudem wurden die Sprosshöhe des längsten Sprosses sowie die Anzahl der Triebe aufgenommen. Zur Erhebung der Wurzelfrischmasse wurde der Wurzelballen am Wurzelhals abgetrennt und ebenso gewogen. Erkennbar war, dass auf dem Vlies, welches beim Versuchsaufbau auf dem Boden des Pflanzcontainers ausgelegt worden ist, Wurzeln anhafteten. Der dadurch entstandene Wurzelverlust war jedoch sehr gering und wurde nicht mit in der Wurzelmasse berücksichtigt. Des Weiteren wurde eine Mischprobe der Bettungsstoffe je Variante genommen, um die Nährstoffgehalte, den Calciumgehalt sowie den pH-Wert zu Versuchsende zu ermitteln.

3.4 Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit hydraulisch gebundener Bettungstoffe

3.4.1 Versuchsanordnung, Varianten und Stoffe



Abb. 33 : Versuchsanlage des Gefäßversuches am 14.07.2011 (vgl. KÜHN 2012, S. 28)

03T	21F	33L	40M	01R	20E	13D	43P	32K	11B
31J	10A	02S	23H	12C	42O	30I	22G	00Q	41N

Abb. 34: Randomisierte Blockanlage der Versuchsvarianten im Gefäßversuch (schematisch) Codierung: Nummer der Variante 0 – 4; Nummer der Wiederholung 1 – 4; Bezeichnung der Versuchspflanze A – T (vgl. KÜHN 2012, S. 24 f.)

Tab. 16: Varianten des Gefäßversuches (vgl. KÜHN 2012, S. 21 f.)

Variante/Stoffe	
0	Hart-Kalkstein 0/5
1	TPM-D Portlandzement + Trass
2	TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl (Kalksteinmehl)
3	TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat
4	TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas
Bei allen Varianten eingesetzt:	
Haftschlämme: TNH-flex Trass-Naturstein-Haftsschlämme zur Verbesserung des Haftverbundes zwischen Stein und Bettungsschicht	
Ort:	Gelände der Hochschule Osnabrück (Haste)
Versuchslaufzeit:	24.06.2011 – 31.10.2011 (4 Monate) => 1. Auswertung ¹⁾ (Versuchskörper: 21F, 33L, 40M, 13D, 03T, 01R) 24.06.2011 – 18.09.2013 (27 Monate) => 2. Auswertung
Versuchspflanze:	<i>Salix purpurea</i>
Höhe Versuchskörper:	40 Zentimeter
Breite Versuchskörper:	46 Zentimeter
Länge Versuchskörper:	46 Zentimeter
Anzahl der Varianten:	5
Anzahl der Wiederholungen:	4
Bauweisen:	gebunden/ungebunden

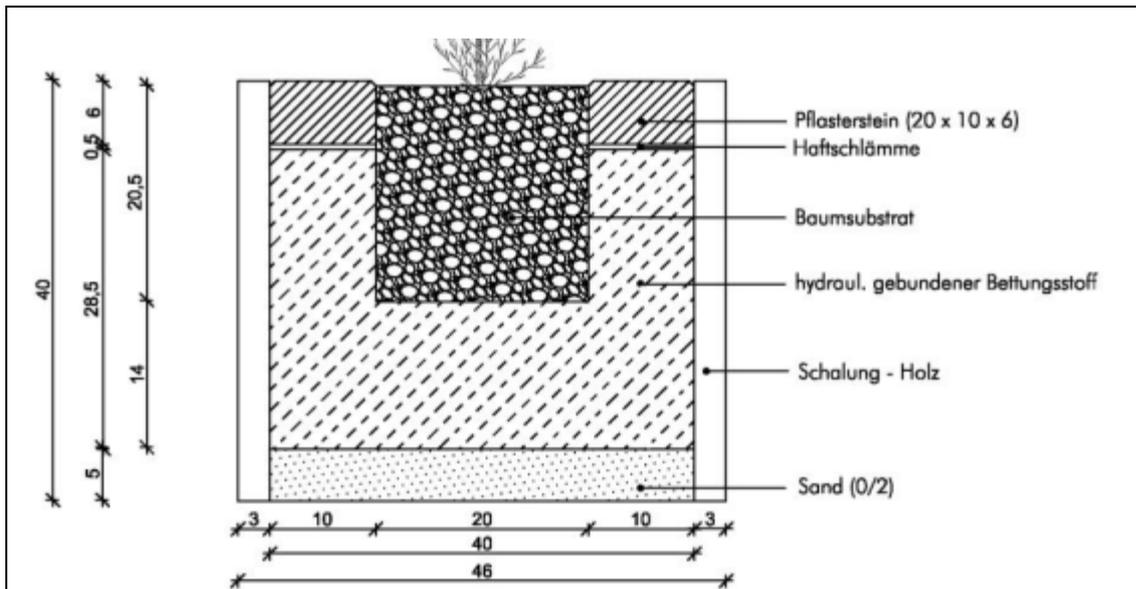


Abb. 35: Schematischer Querschnitt und Bemaßung des Versuchskörpers (vgl. KÜHN 2012, S. 25)

<p>Untersuchte Faktoren:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Wurzelfrischmasse/Wurzeltrockenmasse • Anzahl der Penetrationsstellen (1. Auswertung) • Wurzeldeckungsgrad-Rang (2. Auswertung) • Calciumgehalt hydraulisch gebundener Bettungsstoffe
<p>Untersuchte Randfaktoren:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Versuchspflanze • Wurzeleinwuchs in Fugen, Rissen und Grenzbereichen gebundener Bettungsstoffe • Gesamtionenbilanz hydraulisch gebundener Bettungsstoffe • Rohdichte hydraulisch gebundener Bettungsstoffe
<p>¹⁾ Richtigstellung: Die 1. Auswertung erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von KÜHN (2012). Nach einem Gespräch vom 29. Januar 2015 mit Herrn Dr. Martin Kanig (quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG; Abteilung Forschung und Entwicklung) stellte sich raus, dass die Bezeichnungen der Varianten 3 und 4 bei KÜHN (2012) vertauscht worden sind. Eine Untersuchung der Mörtelproben bestätigte diese Vermutung. Berichtig ist die Variante 3 mit Calciumsulfoaluminat und die Variante 4 mit Kaliwasserglas als Zusatzstoffe hergestellt worden. Diese Berichtigung wird in der vorliegenden Arbeit aufgenommen. Die Ergebnisse aus der Teilauswertung nach KÜHN (2012) werden unter Kapitel 4.4 berichtigt dargestellt.</p>	

Die Tabelle 16 zeigt die Stoffe der insgesamt fünf Varianten. Um die Entwicklung der Durchwurzelung mit einem ungebundenen Bettungsstoff zu vergleichen, bestand die Variante 0 aus einem Hart-Kalkstein der Körnung 0/5 mm. Die übrigen vier Varianten wurden aus unterschiedlichen Bettungsmörteln hergestellt. In Zusammenarbeit mit der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Mörtelherstellers wurden die verschiedenen Rezepturen der Bettungsmörtel entwickelt und als Trockenmörtelmischung produziert. Die verschiedenen gebundenen Varianten wurden durch die Verwendung unterschiedlicher Zusatzstoffe hergestellt. Dabei erfolgte die Auswahl der Produkte mit dem ursprünglichen Ziel, dass die Bettungsmörtel unterschiedliche Gehalte an löslichen und damit pflanzenverfügbaren Calcium-Ion aufweisen. Die Angaben zu den Mörtel Eigenschaften werden in Kapitel 4.4.5 aufgezeigt.

Tab. 17: Technische Eigenschaften der Bettungstoffe (vgl. KÜHN 2012, S. 22)

Eigenschaft	
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	> $5,4 \times 10^{-5}$ m/s
Körnung	0 – 4 mm
Druckfestigkeit (nach 28 Tagen)	≥ 35 N/mm ²
Versickerbare Regenspende	> 270 l/(s x ha)
Biegezugfestigkeit (nach 28 Tagen)	≥ 6 N/mm ²
Haftzugfestigkeit (Labor)	$\geq 1,5$ N/mm ² (als Mittelwert)
Frost-Tauwechsel-Widerstand	nachgewiesen
Elastizitätsmodul	≥ 18.000 N/mm ²
Verarbeitungszeit	bis ca. 2 Stunden
Verarbeitungstemperatur	+ 5 °C bis 30 °C

In ihren physikalisch-mechanischen Eigenschaften, d.h. z.B. in ihrer Druckfestigkeit und in ihrem Porenvolumen, unterscheiden sich die verwendeten gebundenen Bettungstoffe nicht maßgeblich. Alle hergestellten Mörtelmischungen erfüllen laut Aussage des Mörtelherstellers die normgerechten Eigenschaften für hydraulisch gebundene Mörtel (vgl. Tab. 17).

Als **Versuchspflanze** wurde *Salix purpurea* verwendet, die im hergestellten Versuchskörper in ein Kultursubstrat unter Verwendung vulkanischem Bodenmaterial gepflanzt wurde (pH-Wert (CaCl₂): 7,6; Salzgehalt: 0,4 g KCl/L)

3.4.2 Herstellung der Versuchskörper

Vorbereitung der Versuchspflanzen

Damit die gelieferten Versuchspflanzen nicht vor Versuchsbeginn austrieben, wurden diese in einem Kühlhaus gelagert. Zur Herstellung der Versuchskörper wurden die *Salix purpurea* auf eine Trieblänge von ca. 45 cm eingekürzt. Ebenfalls erfolgte die Einkürzung der Wurzelballen auf ca. 20 cm. Aus den gelieferten *Salix purpurea* wurden für den Versuch augenscheinlich gleichartig gewachsene Pflanzen ausgewählt, die eine ähnliche Wurzelbildung aufwiesen. Die Wurzelballen wurden gründlich gewaschen und das **Gewicht der Gesamtpflanze** aufgenommen.

Am 24.06.2011 wurden die *Salix purpurea* in Pflanztöpfe (3 Liter) mit dem Kultursubstrat vorgetrieben, um sie am 14.07.2011 in die erstellten Versuchskörper umzupflanzen.

Aufbau des Versuchskörpers

Für die Herstellung der Versuchskörper wurde eine Schalung angefertigt, die mit dem jeweiligen Bettungsmörtel befüllt wurde (vgl. Abb. 35). Bevor der Bettungsmörtel eingefüllt wurde, wurde eine Sauberkeitsschicht aus Sand in 5 cm Dicke auf dem Boden aufgetragen. Diese sollte den Abbau der Varianten zu Versuchsende erleichtern.

Die hydraulisch gebundenen Bettungsmörtel wurden in **zwei Schichten** eingebaut und verdichtet. Die erste Schicht endete in der Höhe, in der die Aussparung für das Pflanzloch anging.

Zur Herstellung des Mörtels wurden 40 kg des Trockenmörtels mit der jeweils optimalen Wassermenge versetzt und mit einem Handrührgerät vermischt. Die Konsistenz des Mörtels ist dabei so eingestellt worden, dass eine mit den Händen geformte Kugel einen leichten Oberflächenglanz aufwies. Nach Abbindung des Mörtels wurden auf die zweite Bettungsmörtelschicht die Betonrechtecksteine aufgebracht, welche im Vorfeld mit der

sauberen Unterseite in eine Haftschlämme eingetaucht wurden. Nach dem Einfüllen des Baumsubstrates wurden die Versuchspflanzen eingesetzt.

3.4.3 Versuchsfeldbetreuung

Inaugenscheinnahme/Pflege der Versuchskörper

Während des gesamten Versuchszeitraums wurden die Versuchskörper regelmäßig in Augenschein genommen. Zudem wurde oberirdischer Fremdaufwuchs aus den Versuchskörpern entfernt.

Datenaufnahme

Im Rahmen der Versuchsfeldbetreuung wurde das oberirdische Wachstum der *Salix purpurea* fotografisch dokumentiert und in regelmäßigen Abständen die Höhe des längsten Sprosses aufgenommen.

Stardüngung

Mitte April 2013 wurden die *Salix purpurea* mit einem NPKMg-Dünger (16:8:12:2) (Triabon Compo) gedüngt. Dabei wurden pro Versuchsgefäß ca. 5 g an die Stammbasis gestreut.

Bewässerung

Nach Einpflanzen der Versuchspflanzen in die eigentlichen Versuchskörper am 14.07.2011 wurde eine regelmäßige, bedarfsgerechte Bewässerung mit Wasser aus einer hauseigenen Zisterne durchgeführt. In den Sommermonaten bis ca. Mitte August erfolgte diese Bewässerung täglich. In den Wintermonaten erfolgte keine Bewässerung. Ab Mitte April 2012 wurden die *Salix purpurea* wieder witterungsabhängig mit einer Handbrause gegossen. In den Wintermonaten November 2012 bis April 2013 erfolgte wiederum eine minimale Betreuung der Versuchsfläche ohne Bewässerung. Diese wurde wie im Vorjahr erst wieder Anfang April 2013 durchgeführt.

3.4.4 Öffnung der Versuchskörper

Teilöffnung Dezember 2011

Der Rückbau der Versuchskörper im Rahmen der Teilauswertung erfolgte innerhalb von zwei Tagen vom 07.12.2011 bis 08.12.2011. Zu diesem Zeitraum waren die Pflanzen jahreszeitlich bedingt laubfrei. Pro Variante der gebundenen Bettungstoffe wurde jeweils ein Versuchskörper geöffnet (Versuchskörper: 21F, 33L, 40M, 13D). Bei der ungebundenen Variante mit dem Hart-Kalkstein wurden zwei Versuchskörper ausgewertet (Versuchskörper: 03T, 01R). Da jedoch zu Beginn dieser Auswertung davon ausgegangen wurde, dass eine Auswertung der vollständigen Versuchsanlage vorgenommen wird, wurden die Pflanzen der ungebundenen Bettungstoffe vorschnell gekappt (Versuchskörper: 02S, 00Q).

Zur Öffnung der einzelnen Versuchskörper wurde zu Beginn die Schalung entfernt. Darauf erfolgte die Entfernung der Pflastersteine. Um die Wurzelballen aus dem Mörtelblock zu lösen, wurde mit einem Messer der Wurzelballen von den Rändern des Mörtelblocks getrennt und das Kultursubstrat mit Wasser aus dem Mörtelblock gespült. Die vier Innenseiten der Mörtelblöcke (S1 – S4) wurden zur weiteren Auswertung des Einwurzeln in ein 5 cm x 5 cm Raster eingeteilt, welches mit Kreide markiert wurde (vgl. Abb. 37).

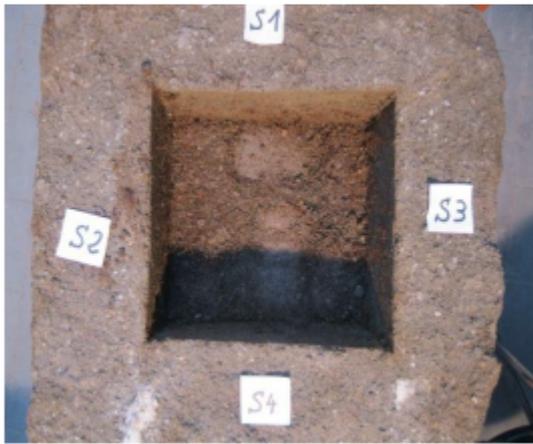


Abb. 36: Markierung der vier Innenseiten (S1 – S4) eines vom Wurzelballen befreiten Mörtelbettungsblocks (vgl. KÜHN 2012, S.32)



Abb. 37: Mit ROT markierte Rasterpunkte auf einer Innenseite eines Mörtelblocks und penetrierte Wurzel ca. 1,5 mm dick (vgl. KÜHN 2012, S.33)

Mit Hilfe des Rasters wurde von jeder gebundenen Variante die **Anzahl der Penetrationsstellen** der Wurzeln im Mörtelblock aufgenommen (unter Verwendung einer Lupe) und dokumentiert. Die Öffnung der zwei ungebundenen Hart-Kalkstein Varianten wurde durch schichtweisen Abbau des Bettungsstoffs durchgeführt. Dabei wurde das Vorkommen der Wurzeln im Bettungsstoff fotografisch festgehalten. Hinsichtlich der Versuchspflanzen wurden die **Höhe des längsten Sprosses** sowie die **Frischmasse der Gesamtpflanze** und die **Frischmasse der Wurzeln** im Kultursubstrat-Körper aufgenommen.

Öffnung September 2013

Zur Öffnung der übrigen Versuchskörper wurde bezüglich der oberirdischen Pflanzenteile die **Höhe des längsten Sprosses** gemessen und dokumentiert. Zudem wurden die **Frisch- und Trockenmassen der Blätter, der Sprosse sowie der Wurzeln im Substratkörper** aufgenommen. Die Aufnahme der Wurzelmassen erfolgte nach einer gründlichen Spülung der Wurzelballen. Für die Aufnahme der Wurzelmassen aus dem **ungebundenen Bettungsstoff** wurde der Bettungsstoff abgeseibt. Neben der Massenaufnahme wurde eine Fotodokumentation der Gesamtpflanzen sowie der Wurzelballen hergestellt.

Durch die Entfernung der Schalung wurden die einzelnen Versuchskörper freigelegt. Das nach Öffnung des Versuchskörpers ersichtliche Wurzelvorkommen wurde schriftlich festgehalten und fotografiert. Das Herausspülen des Kultursubstrates, wie es zur Teilauswertung durchgeführt wurde, konnte auf Grund der starken Verwurzelung nicht ausgeführt werden. Um die stark durchwurzelten Substratkörper vom umgebenden Mörtelblock zu befreien, wurden die Versuchskörper auf die Seite gelegt und vorsichtig mit einem Hammer zerschlagen. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Mörtelblock möglichst in große Stücke zerschlagen wurde, um die anschließende Begutachtung der **Penetrationsstellen der Wurzeln** in die Innenwände der Blöcke vorzunehmen.

Von den Mörtelblockinnenseiten wurden wiederum Fotos erstellt, um den Grad des Wurzeleindringens festzuhalten. Die Auszählung der Penetrationsstellen, wie sie zur Teilauswertung erfolgt ist, konnte auf Grund der sehr hohen Anzahl nicht mehr durchgeführt werden.

4 Ergebnisse zu den Feld- und Gefäßversuchen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der unter Kapitel 3 dargestellten Versuche aufgezeigt. Die **Wurzelmassen**, welche innerhalb der Versuchszeit in die Versuchsaufbauten hineingewachsen waren, wurden ausgewertet. Die **statistische Auswertung** der erhobenen Daten erfolgte mit den Programmen Excel sowie SPSS.

Neben den aufgenommenen **Wurzelmassen** sind ebenso die **visuellen Beobachtungen** hinsichtlich des Wurzelvorkommens innerhalb der Schichten und Grenzzonenbereiche ausgewertet worden. Zudem berücksichtigen die Ergebnisse die **Entwicklung der Versuchspflanzen**, um darzustellen, ob diese durch Anwendung der unterschiedlichen Baustoff- und Bauweisen-Varianten in ihrem Wachstum beeinträchtigt werden.

4.1 Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit unterschiedlicher Baustoffe und Bauweisen

Die folgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Feldversuch (vgl. 3.1.1).

4.1.1 Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile

Insgesamt konnte im Vergleich mit einer benachbarten Ulmenreihe, welche sich ebenso auf der Baumschulfläche befand, kein Unterschied im oberirdischen Wachstum festgestellt werden. Innerhalb der untersuchten Baumreihe mit den 19 Ulmen zeigte sich augenscheinlich während der Versuchslaufzeit lediglich ein leichter Unterschied in der **Baumhöhe**. Abbildung 38 zeigt die Baumreihe am 15. August 2013 ca. drei Monate vor Versuchsauswertung. Zu diesem Zeitpunkt sind die Bäume 2 bis 5 sowie 9 und 10 die niedrigsten Bäume; während die Bäume 6, 8 sowie 11 und 12 augenscheinlich die höchsten Bäume sind.



Abb.: 38: Vergleich der Baumhöhen der Bäume 1 – 19 im Feldversuch am 15. August 2013

Hinsichtlich der **Entwicklung der Stammumfänge** in einem Meter Höhe zeigt sich während der Versuchslaufzeit bei allen Bäumen ein gleichmäßiges Wachstum. Im Mittel beträgt der Stammumfang vor Versuchsbeginn 60,5 cm. Zum Zeitpunkt der Freigrabung der Wurzeln beträgt dieser im Mittel 64,2 cm. Im Durchschnitt wuchs der Umfang der Stämme bis zur Aufgrabung der Versuchsfelder damit um ca. 4 cm an.

4.1.2 Ebenheitsüberprüfung der Pflasterfläche

Nach dem Verlegen der Pflasterfläche sowie unmittelbar vor der Öffnung dieser wurde die Abweichung von der Ebenheit mit einer 4-Meter-Latte überprüft. Zu beiden Zeitpunkten betrug die maximale Abweichung 5 mm.

4.1.3 Wurzelwachstum vor Versuchsbeginn

Bei der seitlichen Abgrabung entlang der 19 Ulmen zum Bau der Versuchsfläche (Tiefe: ca. 28 cm), wurden lediglich an neun Bäumen wenige **Derbwurzeln** (Durchmesser über 20 mm bis 50 mm) gesichtet. Auffällig viele **Grobwurzeln** (Durchmesser 5 mm bis 20 mm) kamen an den Ulmen 17, 18, 19 jeweils auf der Südseite vor; zudem an Baum 10 an der Nordseite. Insgesamt war auf der Südseite durchschnittlich eine höhere Anzahl an Grobwurzeln zu verzeichnen als auf der Nordseite (vgl. Abb. 39).

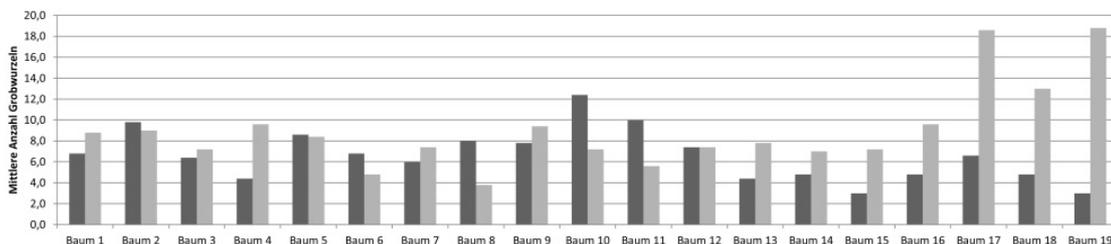


Abb. 39: Mittlere Anzahl an Grobwurzeln (Wurzeldurchmesser 5 mm bis 20 mm) auf der Nordseite (Balken dunkel) und Südseite (Balken hell) der Bäume 1 - 19 zu Versuchsbeginn (Tiefe der Aufgrabung bis ca. 28 cm)

Hinsichtlich der Wurzeln kleiner 5 mm Durchmesser war die **Wurzelintensität** bei den Bäumen, welche in der Teilöffnung untersucht wurden, auf der Nordseite im Mittel geringer (vgl. Abb. 40). Allerdings ist insgesamt eine weite Streuung der Daten ersichtlich.

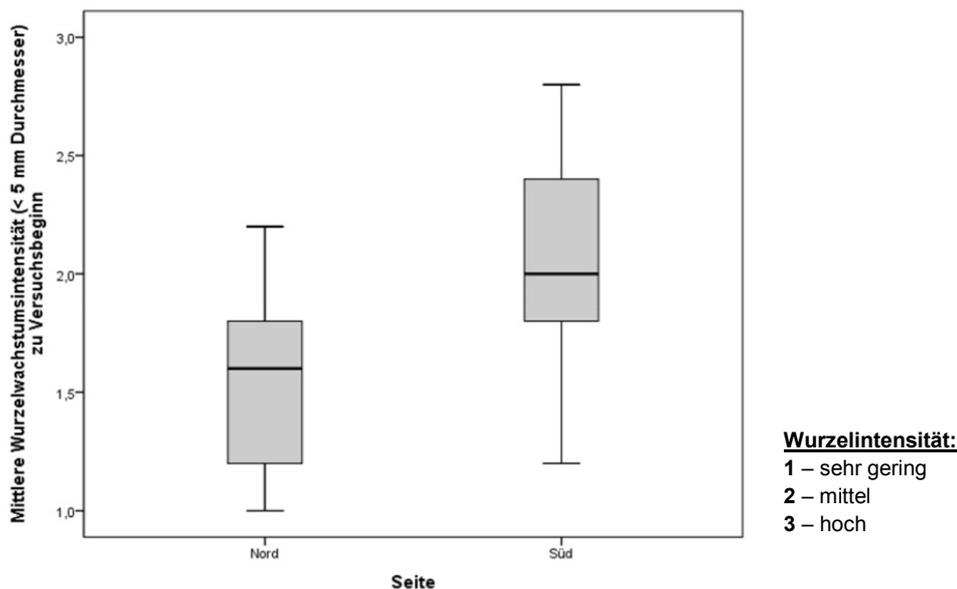


Abb. 40: Durchschnittliche Wurzelintensitätsstufen (Wurzeldurchmesser < 5 mm) auf der Nord- und Südseite der in der Teilöffnung untersuchten Bäume vor Versuchsbeginn; n = 14 (Tiefe der Aufgrabung bis ca. 28 cm)

4.1.4 Wurzelentwicklung zu Versuchsende

Die erfassten **Wurzelmassen** aus den einzelnen ungebundenen Varianten wurden sowohl als Frisch- als auch als Trockenmasse aufgenommen. Die Tabelle 18 zeigt u.a. die Summen der Wurzelmassen aus den jeweils vier Wiederholungen pro Variante.

Tab. 18: Wurzelmassen (g) der ungebundenen Varianten des Feldversuches

	Summe	Min.	Max.	Mittelwert	Median	Spannweite	Standard- abweichung
Hart-Kalkstein 0/5 (V0); n = 4							
Frischmasse	379,2	58,1	116,5	94,8	102,3	58,4	27,0
Trockenmasse	110,2	17,2	34,3	27,6	29,4	17,1	8,3
Karbon Quarzit 0/5 (V1); n = 4							
Frischmasse	517,8	50,7	279,7	129,5	93,7	229,0	105,4
Trockenmasse	133,4	14,2	67,4	33,4	25,9	53,2	24,1
Hydrophober Sand 0/5 (V2); n = 4							
Frischmasse	1.912,5	280,0	837,5	478,1	397,5	557,5	246,2
Trockenmasse	345,7	51,9	144,8	86,4	74,5	92,9	40,4
Hart-Kalkstein 0/5; Pflasterstein mit profilierter Unterseite (V3); n = 4							
Frischmasse	271,8	24,7	100,1	68,0	73,5	75,4	31,6
Trockenmasse	79,6	8,3	28,3	19,9	21,5	20,0	8,7
Hart-Kalkstein 0/5; aufgeraute Tragschichtoberfläche (V4); n = 4							
Frischmasse	391,2	9,9	222,2	97,8	79,6	212,3	89,2
Trockenmasse	106,4	3,8	57,2	26,6	22,7	53,4	22,3
Hart-Kalkstein 0/11 (V5); n = 4							
Frischmasse	366,8	55,2	105,7	91,7	103,0	50,5	24,4
Trockenmasse	105,8	17,1	31,4	26,5	28,7	14,3	6,4
Hart-Kalkstein 2/5 (V6); n = 4							
Frischmasse	430,1	1,4	209,9	107,5	109,4	208,5	99,1
Trockenmasse	124,3	0,2	58,4	31,1	32,9	58,2	27,7
Frischmasse (gesamt); n = 28	4.269,4	1,4	837,5	152,5	101,4	836,1	169,8
Trockenmasse (gesamt); n = 28	1.005,4	0,2	144,8	35,9	28,5	144,6	29,4

Mit insgesamt 1.912,5 Gramm weist die Variante 2 (hydrophober Sand) die größte Frischmassensumme auf. Die geringste Frischmassensumme wurde bei Variante 3 (Hart-Kalkstein 0/5, profilierte Steinunterseite) mit 271,8 Gramm ermittelt.

Insgesamt besteht zu Versuchsende zwischen der Wurzelfrischmasse und der Wurzeltrockenmasse eine sehr starke positive lineare Korrelation ($R^2=0,961$). Auf Grund des starken Zusammenhangs zwischen Wurzelfrisch- und Wurzeltrockenmasse wird im Folgenden lediglich auf die Wurzelfrischmasse eingegangen.

Die grafische Darstellung (vgl. Abb. 41) zeigt, dass die Variante 2 (hydrophober Sand) hinsichtlich der Wurzelfrischmassen bedeutend von den anderen Varianten abweicht. Deutlich wird zudem, dass bei Variante 2 (hydrophober Sand) eine sehr weite Streuung der Daten vorliegt. Eine weite Streuung liegt ebenso bei den Varianten 1 (Karbon Quarzit 0/5), 4 (Hart-Kalkstein 0/5; aufgeraute Tragschicht) und 6 (Hart-Kalkstein 2/5) vor. Ausgenommen von der Variante 2 (hydrophober Sand) sind die Mediane der Varianten annähernd gleich und liegen um die 100 Gramm.

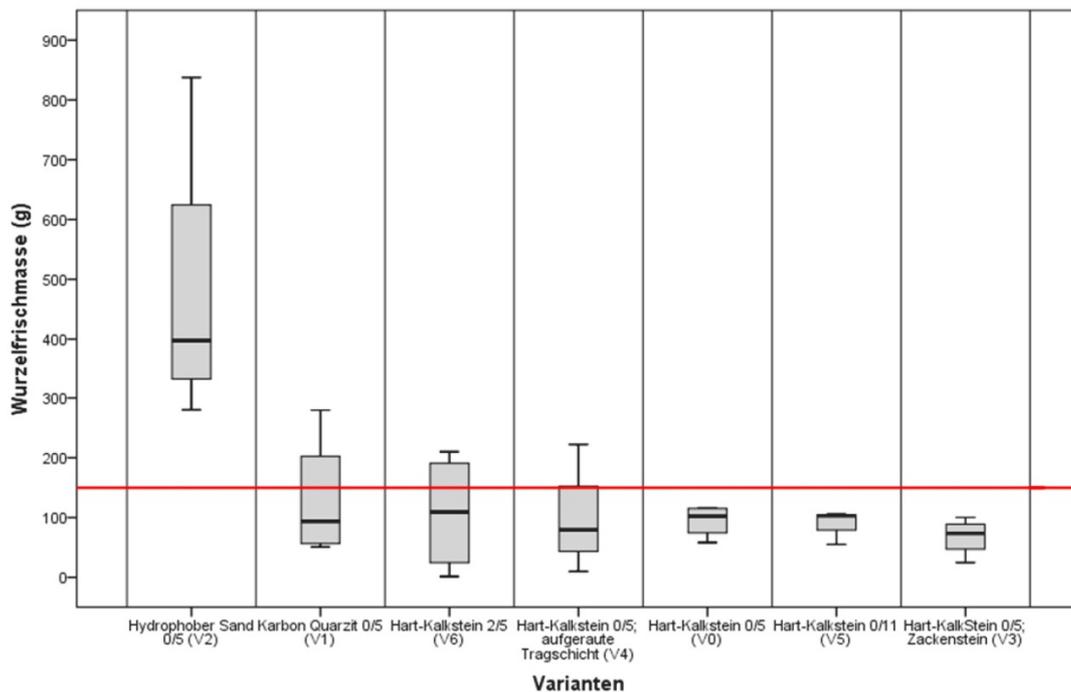


Abb. 41: Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der ungebundenen Varianten ($n = 4$); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Feldversuches von 152,5 Gramm (vgl. STENGEL et al. 2013, S. 4)

Unter Berücksichtigung der Variante 2 (hydrophober Sand) ergibt sich ein Gesamtmittelwert der Wurzelfrischmasse von 152,5 Gramm. Mit allen vier erhobenen Werten liegen lediglich Variante 0 (Hart-Kalkstein 0/5), Variante 3 (Hart-Kalkstein 0/5; profilierte Steinunterseite) sowie Variante 5 (Hart-Kalkstein 0/11) unter diesem Gesamtmittelwert. Damit können diese drei Varianten, als diejenigen mit dem geringsten Durchwurzelungsgrad angesehen werden. Von diesen drei Varianten besitzt wiederum die Variante 3 (Hart-Kalkstein 0/5; profilierte Steinunterseite) die niedrigsten Wurzelfrischmassen. Zudem ist auffällig, dass diese Varianten die geringste Streubreite innerhalb der Einzelwerte der Wurzelfrischmasse aufweisen. Des Weiteren kann beschrieben werden, dass die höchsten Wurzelfrischmassen in der Variante 2 (hydrophober Sand) vorzufinden sind. Untereinander ähnliche Wurzelfrischmassen haben die Variante 1 (Karbon Quarzit 0/5), Variante 6 (Hart-Kalkstein 2/5) sowie die Variante 4 (Hart-Kalkstein 0/5, aufgeraute Tragschichtoberfläche). Die Wurzelfrischmassen dieser drei Varianten weisen im Vergleich mit den Varianten 0 (Hart-Kalkstein 0/5), 3 (Hart-Kalkstein 0/5; profilierte Steinunterseite) und 5 (Hart-

Kalkstein 0/11) leicht weitere Streubreiten in ihren Werten auf und liegen insgesamt mit den erhobenen Massen um den Bereich des Gesamtmittelwerts.



Abb. 42: Nach Auflockerung der Bettungsschicht wenige ersichtliche Wurzeln bei der Variante V6 (HKS 2/5) auf der Südseite des Baumes B7; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite



Abb. 43: Nach Auflockerung der Bettungsschicht vermehrt ersichtliche Wurzeln bei Variante V1 (Karbon Quarzit 0/5) auf der Südseite des Baumes B2; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite



Abb. 44: Freigelegte fleischige Wurzeln im Bettungstoff der Variante V2 (hydrophober Sand) auf der Südseite des Baumes B3; Oberkante Bild entspricht der Baumseite

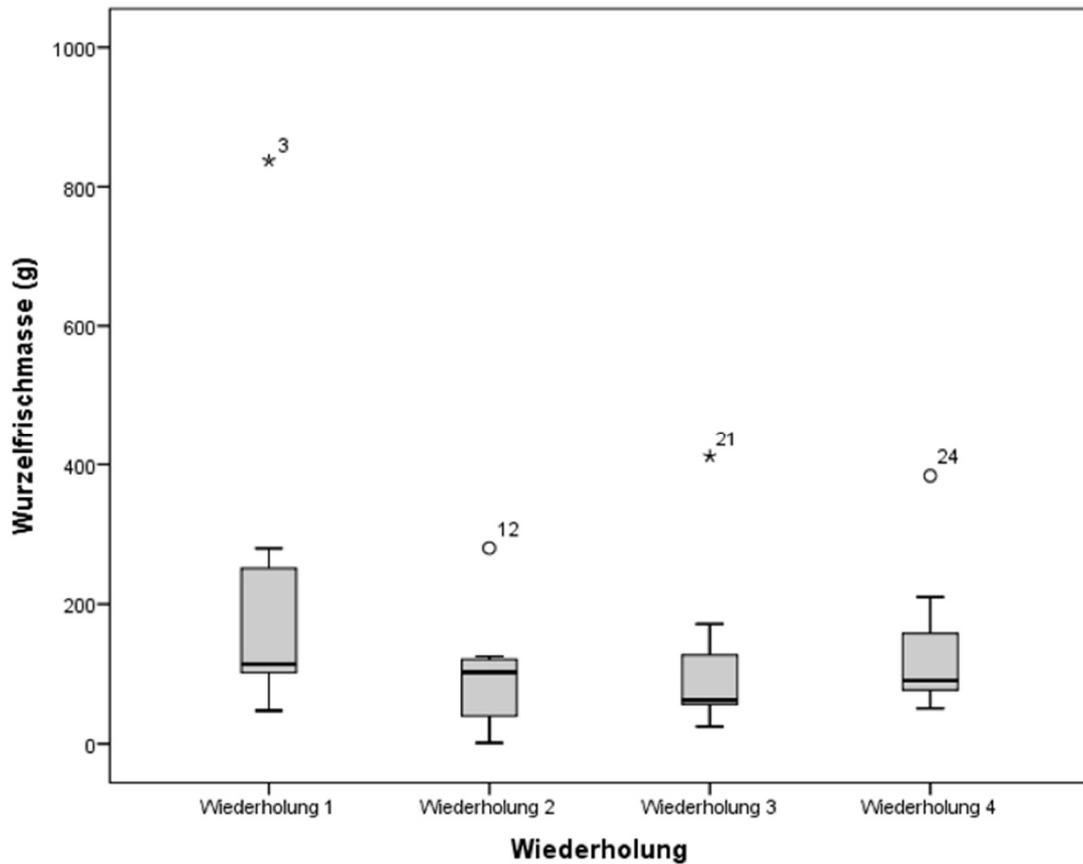


Abb. 45: Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) in den vier Wiederholungen (n = 7). Die vier Ausreißer sind die Werte der Variante 2 (hydrophober Sand). Wiederholung 1 und 2: Südseite; Wiederholung 3 und 4: Nordseite

Die Abbildung 45 zeigt die Wurzelfrischmassen in Abhängigkeit der vier Wiederholungsblöcke (vgl. 3.3.1). Dabei liegen die Wiederholungen 1 und 2 auf der Südseite und die Wiederholungen 3 und 4 auf der Nordseite der Baumreihe. Die vier Ausreißer sind die Werte der Variante 2 (hydrophober Sand). Die Wiederholungen auf der Südseite weisen insgesamt eine größere Spanne bei den Wurzelfrischmassensummen auf. Dennoch lässt die grafische Darstellung über die Box Plots vermuten, dass die Wiederholungen (d.h. die Lage der Blöcke) keinen Effekt auf die Wurzelfrischmasse ausüben. Die varianzanalytische Betrachtung der Daten bestätigt diese Vermutung (vgl. 4.1.5).

Neben der höheren Wurzelfrischmasse kann bei der Variante 2 (hydrophober Sand) zudem festgestellt werden, dass die Wurzeln eine gröbere Wurzelstruktur ausgebildet hatten als die Wurzeln in den anderen Stoffen (vgl. Abb. 46 und 47). Zudem sind die Wurzelspitzen deutlich weißer und dicker entwickelt.



Abb. 46: Gewaschene Wurzelmasse der Variante 2, hydrophober Sand als Bettungsstoff, Wurzelstärke bis 3 mm; Baum 16, Südseite, Feld C



Abb. 47: Gewaschene Wurzelmasse der Variante 5, Hart-Kalkstein 0/11 als Bettungsstoff, Wurzelstärke bis 1,6 mm; Baum 18, Nordseite, Feld F

Bei der Trocknung der Wurzeln war der Massenverlust bei der Variante 2 (hydrophober Sand) dementsprechend größer als bei den anderen Varianten (vgl. Abb. 48). Im Durchschnitt beträgt das Trockengewicht 25 Prozent der Frischmasse; d.h. der Massenverlust liegt bei ca. 75 Prozent. Bei der Variante 2 (hydrophober Sand) lag der Massenverlust durch die Trocknung im Durchschnitt bei 82 Prozent.

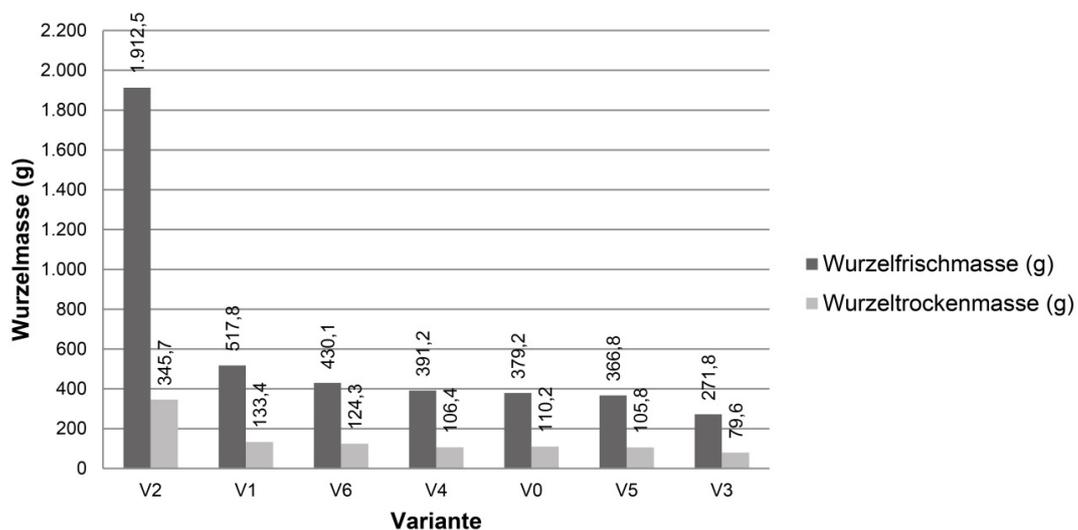


Abb. 48: Wurzelfrisch- und Wurzel trockenmasse (g) der ungebundenen Varianten V1 – V6

Neben der quantitativen Aufnahme der Wurzelmassen wurden im Rahmen der Versuchsflächenöffnung auch die **visuellen Beobachtungen zur Wurzelentwicklung** in den verschiedenen Wegebau-schichten erfasst und dokumentiert.

Wurzeln in Grenzschichten unter Pflastersteinen

Der erste Eindruck des Wurzelvorkommens innerhalb der Wegebau-schichten der ungebundenen Varianten zeigt sich nach Abheben der einzelnen Pflastersteine in der direkt darunter befindlichen Grenzschicht zur Bettung. Einzig bei Variante 5 (Hart-Kalkstein, 0/11) zeigt sich augenscheinlich ein **vermehrtes** Wurzelwachstum in der Grenzschicht. Ein eher **geringes** Wurzelvorkommen zeigt sich bei Variante 1 (Karbon Quarzit, 0/5) sowie Variante 4 (Hart-Kalkstein, 0/5 mit aufgerauter Tragschichtoberfläche). In den Varianten 0 (Hart-Kalkstein, 0/5) (vgl. Abb. 49), 2 (hydrophober Sand) und 3 (Hart-Kalkstein 0/5, profilierte Steinunterseite) war hier lediglich ein **sehr geringes** Wurzelvorkommen ersichtlich. Ein **sehr geringes bis kein** Wurzelvorkommen zeigt sich augenscheinlich bei der Variante 6 (Hart-Kalkstein 2/5).



Abb. 49: Vermehrt ersichtliche Wurzeln in der Grenzschicht der Variante V0 (HKS 0/5) nach Abheben der Pflastersteine auf der Südseite des Baumes B1; Oberkante Bild entspricht der Baumseite

Wurzeln in Fugen/Zwischenräumen

Bei allen Varianten konnte ein Wurzelvorkommen in den Fugen festgestellt werden. Betroffen waren dabei insbesondere die Fugen am baumseitigen Randbereich der Pflasterfläche (vgl. Abb. 50).



Abb. 50: Wurzelbild nach Entfernen der Pflastersteine der Variante V0 auf der Nordseite des Baumes B10; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite. Wurzeln wachsen in die Pflasterfugen ein.

Auffällig war ein augenscheinlich vermehrtes Wurzelvorkommen in den Fugen der Variante 1 (Karbon Quarzit, 0/5).

Bei Variante 3 kann zudem ein Wurzelvorkommen in den Zwischenräumen der profilierten Steine beobachtet werden (vgl. Abb. 51).



Abb. 51: Weiße, feine Wurzeln nach Entfernen des Steins mit der profilierten Steinunterseite (Variante V3) auf der Südseite des Baumes B15 (links). Unterseite des profilierten Betonpflastersteins (rechts).

Ein sehr vereinzelt Wurzelwachstum findet in den Fugen der Variante 2 (hydrophober Sand) statt. Hier ist zudem zu sehen, dass beim Herausnehmen der Pflastersteine der hydrophobe Fugensand stellenweise trocken ist.

Wurzeln in gebundenen Versuchsvarianten

Bei den Varianten 7 und 8 der gebundenen Bauweisen wurde im Rahmen der Versuchsöffnung lediglich an einer Versuchsfläche pro Variante eine kleine Probeöffnung durchgeführt. Unter dem Pflasterstein der Variante 7 sind dabei keine Wurzeln ersichtlich. Wie bei den ungebundenen Bauweisen wachsen die Wurzeln jedoch aus der ungebundenen Tragschicht heraus nach oben. Aus diesem Grund waren an der Mörtelbettung-Unterseite des herausgeflexten Probestücks anhaftende Wurzeln sichtbar.

Ebenso wachsen bei der Variante 8 die Wurzeln aus der ungebundenen Tragschicht heraus in die Poren der Mörtelbettung. Das Wurzelvorkommen direkt unter dem Pflasterstein kann nicht betrachtet werden, da sich der Stein wahrscheinlich aufgrund der Haftschlämme, nicht von der Mörtelbettung entfernen lässt.

Wurzelwachstum aus Tragschicht

Nach Beseitigung der Bettungsstoffe zeigt sich bei allen Varianten, dass die Wurzeln aus der Tragschicht heraus nach oben in die Bettungsschicht einwachsen. Bei den Varianten 1 (Karbon Quarzit, 0/5) und 6 (Hart-Kalkstein 2/5) ist dieses Wachstum augenscheinlich stärker als bei den anderen Varianten. Das stärkste Einwachsen von Wurzeln aus der Tragschicht heraus ist jedoch bei Variante 4 (Hart-Kalkstein, 0/5 mit aufgerauter Tragschichtoberfläche) zu erkennen, bei der eine zweite, lockere Tragschicht-Schicht zur Verzahnung eingebaut wurde (vgl. Abb. 53).



Abb. 52: Wurzeln aus der Tragschicht heraus nach oben in die Bettungsschicht wachsend bei Variante V2 (hydrophober Sand) auf der Südseite des Baumes B3; Oberkannte Bild entspricht der Baumseite



Abb. 53: Wurzeln aus der aufgerauten Tragschicht heraus nach oben in die Bettungsschicht wachsend bei Variante V4 (HKS (0/5) auf der Südseite des Baumes B5; linke Seite Bild entspricht der Baumseite

4.1.5 Varianzanalytischer Vergleich der Varianten

Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der Varianzanalyse

Der Shapiro-Wilk Test als Test der **Residuen auf Normalverteilung** zeigt, dass eine Normalverteilung vorliegt und somit hinsichtlich dieser Voraussetzung eine Varianzanalyse gerechnet werden kann. Eine Normalverteilung liegt sowohl für die Ausgangsdaten ($p=0,118$) als auch für die logarithmierten Daten ($p=0,083$) vor (vgl. Tab. 19).

Tab. 19: Test auf Normalverteilung der Residuen

	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
Residuen für Wurzelfrischmasse	,941	28	,118
Residuen für log_Wurzelfrischmasse	,935	28	,083

Zweite Voraussetzung zur Durchführung einer Varianzanalyse ist die **Homogenität der Varianzen**. Der Levene Test zeigt, dass keine Varianzhomogenität vorliegt und eine Varianzanalyse somit nicht belastbar ist (vgl. Tab. 20).

Tab. 20: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Wurzelfrischmasse (g)	3,634	6	21	,012
log_Wurzelfrischmasse	2,828	6	21	,035

Varianzanalyse

Trotz fehlender Varianzhomogenität soll folgend die Varianzanalyse mit den logarithmierten Daten ($p=0,035$) der Wurzelfrischmasse aufgezeigt werden. Die Varianzanalyse ergibt, dass es zwischen den Varianten des Feldversuches **keinen signifikanten Unterschied** gibt ($p=0,094$). Auch besteht kein Effekt der vier Wiederholungen auf die untersuchte Wurzelfrischmasse ($p=0,171$). Das bedeutet, dass weder das Wurzelwachstum vor Versuchsbeginn noch die unterschiedlichen Standorte (Nord-/Südseite) einen Einfluss auf das Wurzelwachstum ausgeübt haben.

Tab. 21: Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse_logarithmiert

Quelle	Quadratsumme	df	Mittel der	F	Sig.
	vom Typ III		Quadrate		
Korrigiertes Modell	3,797 ^a	9	,422	2,077	,089
Konstanter Term	107,613	1	107,613	529,714	,000
Wiederholung	1,141	3	,380	1,872	,171
Variante	2,656	6	,443	2,179	,094
Fehler	3,657	18	,203		
Gesamt	115,067	28			
Korrigierte Gesamtvariation	7,454	27			

a. R-Quadrat = .509 (korrigiertes R-Quadrat = .264)

Friedman-Test

Der zur Ergänzung der Varianzanalyse durchgeführte Friedman-Test als sogenanntes nichtparametrisches Verfahren bestätigt, dass es statistisch gesehen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ **keinen signifikanten Unterschied** zwischen den einzelnen Varianten hinsichtlich der Wurzelfrischmassen gibt ($p = 0,087$).

4.1.6 Bodenchemische Eigenschaften der Bettungsstoffe

Sowohl vor Versuchsbeginn als auch zu Versuchsende wurden die ungebundenen Bettungsstoffe hinsichtlich ihrer bodenchemischen Eigenschaften untersucht. Aufgenommen wurden die Bodenreaktion (pH-Wert), der Salzgehalt sowie der Gehalt an löslichen Calciumionen.

Im Bereich des **pH-Werts** gibt es nur geringe Schwankungen zwischen den Werten zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Die verwendeten Bettungsstoffe besitzen demnach alle einen pH-Wert im unteren basischen Bereich um pH 8. Eine Abweichung stellt der Bettungsstoff Karbon Quarzit dar, welcher mit einem Wert um pH 7 die geringste Bodenreaktion aufweist.

Tab. 22: Bodenreaktion (pH-Wert) der ungebundenen Bettungsstoffe

Variante / Stoffe	pH-Wert (in CaCl ₂)	
	Versuchsbeginn	Versuchsende
V0 Hart-Kalkstein 0/5	8,2	8,3
V1 Karbon Quarzit 0/5	7,3	7,6
V2 Hydrophober Sand 0/5	8,3	8,0
V3 Hart-Kalkstein 0/5	8,2	8,3
V4 Hart-Kalkstein 0/5	8,2	8,3
V5 Hart-Kalkstein 0/11	8,3	8,3
V6 Hart-Kalkstein 2/5	8,3	8,4

pH-Wert: Doppelbestimmung nach einer Stunde Schütteln; 50 g Stoffprobe in 125 ml 0,01 mol/l Calciumchloridlösung (CaCl₂); Messung mit Elektrode; (nach DIN EN 15933 2012-11)

Hinsichtlich des Gehalts an **löslichen Calciumionen** der ungemörserten Stoffe zeigt sich beim Karbon Quarzit mit 3,2 mg/100 g der geringste Wert. Während beim Hart-Kalkstein der Körnung 2/5 mit 9,0 mg/100 g der höchste Wert vorzufinden ist. Insgesamt ist eine Steigerung aller Werte zu Versuchsende zu verzeichnen (vgl. Tab. 23).

Tab. 23: Gehalt an löslichen Calciumionen der ungebundenen Bettungsstoffe

Variante / Stoffe	Ca ²⁺ - Gehalt mg/100 g	
	Versuchsbeginn	Versuchsende
V0 Hart-Kalkstein 0/5	6,8	17,0
V1 Karbon Quarzit 0/5	3,2	7,0
V2 Hydrophober Sand 0/5	5,6	13,9
V3 Hart-Kalkstein 0/5	6,8	17,0
V4 Hart-Kalkstein 0/5	6,8	17,0
V5 Hart-Kalkstein 0/11	7,3	10,9
V6 Hart-Kalkstein 2/5	9,0	16,1

Ca²⁺-Gehalt: Bestimmung Calciumgehalt: Komplextometrische, visuelle Titration (DIN EN 1015-17: 2005-01) mit EDTA-Lösung; Aufschluss mit 100 ml entmineralisiertem Wasser und 10 g ungemörserter Stoffprobe (Untersuchung durch Abteilung Forschung und Entwicklung des Mörtelherstellers)
Umrechnung CaO in Ca²⁺: Stöchiometrischer Faktor 1,399

Die Messung des **Salzgehalts** zeigt, dass der Karbon Quarzit mit 18,6 mg/L zu Versuchsbeginn den geringsten Salzgehalt aufweist. Den höchsten Salzgehalt besitzt zu dieser Zeit mit 37,1 mg/L der hydrophobe Sand. Zu Versuchsende ist der Salzgehalt bei dem Hart Kalkstein der Körnung 0/5 sowie der Körnung 0/11 stark gestiegen. Während die übrigen Varianten hier einen im Vergleich zum Versuchsbeginn ähnlichen Salzgehalt aufweisen (vgl. Tab. 24).

Tab. 24: Salzgehalte der ungebundenen Bettungstoffe

Variante / Stoffe	Leitfähigkeit µS/cm		Salzgehalt mg KCl/L		Salzgehalt mg KCl/100 g	
	VB	VE	VB	VE	VB	VE
V0 Hart-Kalkstein 0/5	40	91	25,6	58,2	12,8	29,1
V1 Karbon Quarzit 0/5	29	26	18,6	16,6	9,3	8,3
V2 Hydrophober Sand 0/5	58	54	37,1	34,6	18,6	17,3
V3 Hart-Kalkstein 0/5	40	91	25,6	58,2	12,8	29,1
V4 Hart-Kalkstein 0/5	40	91	25,6	58,2	12,8	29,1
V5 Hart-Kalkstein 0/11	44	83	28,2	53,1	14,1	26,6
V6 Hart-Kalkstein 2/5	35	35	22,4	22,4	11,2	11,2

VB: Versuchsbeginn

VE: Versuchsende

Leitfähigkeit: 10 g Stoffprobe in 50 ml dest. Wasser; nach einer Stunde Schütteln Messung der filtrierten Extrakte mit Elektrode

Salzgehalt: Berechnung des Salzgehaltes als Kaliumchlorid nach Messung der Leitfähigkeit der filtrierten Extrakte; Faktor 0,64; (in Anlehnung an VDLUFA | A 10.1.1)

4.1.7 Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungstoffe

Neben den bodenchemischen Eigenschaften wurde als bodenphysikalische Eigenschaft die **Korngrößenzusammensetzung** untersucht, welche zudem eine Einstufung nach DIN 18196 beinhaltet.

Tab. 25: Korngrößenzusammensetzung der ungebundenen Bettungstoffe aus dem Feldversuch

Variante / Stoffe	Anteil > 2 mm	Anteil 0,063 – 2 mm	Anteil < 0,063 mm	Einstufung nach DIN 18196
	M.-%	M.-%	M.-%	
V0 Hart-Kalkstein 0/5	60,4	32,2	7,4	GU
V1 Karbon Quarzit 0/5	51,2	44,5	4,3	GW
V2 Hydrophober Sand 0/5	3,7	96,3	0,0	SE
V3 Hart-Kalkstein 0/5	60,4	32,2	7,4	GU
V4 Hart-Kalkstein 0/5	60,4	32,2	7,4	GU
V5 Hart-Kalkstein 0/11	61,9	31,5	6,6	GU
V6 Hart-Kalkstein 2/5	95,2	4,0	0,8	GE

Korngrößenverteilung: nach DIN EN 933-1 (2006); Nasssiebung für Körnung < 0,063 mm und Trockensiebung für > 0,063 mm

Einstufung nach DIN 18196 (2011):

GW – weitgestufter Kies

GU – Kies-Schluff-Gemisch

GE – enggestufter Kies

SE – enggestufter Sand

Gemäß der **Einstufung nach DIN 18196** handelt es sich bei dem Bettungstoff Hart-Kalkstein mit den Körnungen 0/5 sowie 0/11 um Kies-Schluff-Gemische mit weitgestufter Körnungslinie. Der Massenanteil des Korndurchmessers < 0,063 mm liegt bei beiden

Bettungsstoffen über 5%. Der Bettungsstoff aus Hart Kalkstein mit der Körnung 2/5 stellt einen enggestuften Kies dar; hier liegt der Massenanteil des Korndurchmessers $< 0,063$ mm lediglich bei 0,8 % und der Massenanteil des Korndurchmessers > 2 mm hingegen bei 95,2 %. Bei dem Bettungsstoff Karbon Quarzit mit der Körnung 0/5 handelt es sich um einen weitgestuften Kies. Eine Ausnahme stellt der hydrophobe Sand dar; dieser wird als enggestufter Sand verzeichnet. Sowohl der Massenanteil des Korndurchmessers $< 0,063$ mm als auch der Massenanteil des Korndurchmessers > 2 mm liegen unter 5%.

4.1.8 Regressionsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren

Wie die unter 4.1.5 aufgeführte Varianzanalyse zeigt, besteht kein signifikanter Unterschied in den Wurzelfrischmassen der untersuchten ungebundenen Bauweisenvarianten. Lediglich die Variante 2 (hydrophober Sand) weicht bezüglich ihrer Wurzelfrischmassen von den übrigen Varianten ab. Die regressionsanalytische Auswertung zeigt, dass unter Ausschluss von Variante 2 kein untersuchter Parameter (Korngrößenverteilung, Bodenreaktion, lösliches Calcium, Verzahnung der Grenzschichten) einen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse ausübt. Die Betrachtung der Faktoren bezieht sich jeweils auf die zu Versuchsbeginn ermittelten Werte.

4.1.9 Methodenbetrachtung

Der Versuch wurde als **Freilandversuch** durchgeführt, um praxisnahe Bedingungen herzustellen. Dieses mit dem Bewusstsein, dass die untersuchten Faktoren nicht isoliert stehen, sondern weitere Einflüsse wie Klima oder Flächenverschmutzungen vorhanden sind. Bezüglich des Baumes konnten die Parameter durch die Wahl eines Baumschulquartiers als Versuchsstandort gleichmäßig gehalten werden. Bei den Bäumen handelte es sich um gleiche Gattungen im selben Alter, mit ähnlichen Stammdurchmessern und einem gleichmäßig entwickelten Wurzelsystem als gute Ausgangssituation für eine Versuchsanordnung.

Als negativ gewertet werden kann, dass die Herstellung der Versuchsfläche ohne eine bautechnisch notwendige **Randeinfassung** erfolgte und somit die Praxisnähe an dieser Stelle nicht gewährleistet ist. Eine Randeinfassung hätte womöglich auf kurze Zeit gesehen ein Wurzeindringen in die Schichten der Wegebaukonstruktion verzögert. Dadurch hätte die Versuchslaufzeit jedoch um weitere Jahre verlängert werden müssen, um eine Antwort zu bekommen, ob die einzelnen Varianten der eingesetzten Wegebaustoffe einen Einfluss auf die Wurzel ausbreitung ausüben.

Hinsichtlich der angestrebten Praxisnähe ist ebenfalls anzumerken, dass auf der erstellten Schottertragschicht aus Karbon Quarzit 0/32 nach der Verdichtung mittels Rüttelplatte nicht das bautechnisch geforderte Verformungsmodul von mindestens $E_{v2} = 80 \text{ MN/m}^2$ (vgl. FGSV 2012: RStO 12, S. 25) erreicht werden konnte.

Insgesamt kann eine Versuchspflanzung nur beschränkt **allgemeingültige Aussagen** geben. Zumal der Baumstandort an Geh- und Radwegen unterschiedlich ausgestaltet sein kann. Diese Heterogenität zeigt sich alleine schon bei der Baumauswahl und den damit verbundenem artspezifischen Wurzelwachstum.

Als ungünstige Voraussetzung im Versuch kann gesehen werden, dass an jeweils einem Versuchsbaum zwei unterschiedliche Bauweisenvarianten gebaut wurden (vgl. 3.1.1). Somit gibt es für die **statistische Auswertung** eine Verbundenheit über den Baum. Für die Interpretation der Ergebnisse ist es von Bedeutung, ob es Wechselwirkungen gibt, die dadurch entstehen, dass der Baum auf der einen Seite mehr Wurzeln ausbildet, da auf der einen Seite zum Beispiel eine schwer durchwurzelbarere gebundene Variante besteht. Durch ggf. anfallende Wechselwirkungen kann es eine Verzerrung der Daten geben. Die statistische Auswertung bestätigte diese Vermutung jedoch nicht.

Für den Versuch wurde eine **Laufzeit** von zwei Vegetationsperioden angenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einwurzelung in die Wegebauschichten stattgefunden hat, welche sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgewertet werden konnte (vgl. 4.1.4). Nicht aufgezeigt werden kann in diesem relativ kurzen Versuchszeitraum, ob und in welchem Ausmaß ein sich anschließendes Dickenwachstum der Wurzeln **Schäden an der Pflasterfläche** verursacht. Nach dem Verlegen der Pflasterfläche sowie unmittelbar vor der Öffnung dieser wurde die Abweichung von der Ebenheit mit einer 4-Meter-Latte überprüft. Zu beiden Zeitpunkten betrug die maximale Abweichung 5 mm. Es wird daraus geschlossen, dass es zu keinen wurzelwachstumsbedingten Anhebungen gekommen ist. Schäden an der Pflasteroberfläche waren somit nicht zu verzeichnen. Die Öffnung der Versuchsfläche erfolgte nach den zwei Vegetationsperioden als **Teilöffnung** (vgl. 3.1.5). Die Teilöffnung ermöglicht es, die Versuchslaufzeit der übrigen Flächen zu verlängern. Somit sind weitere Auswertungen möglich, welche hilfreiche Erkenntnisse zum Wurzeleinwuchs in die Wegebauschichten sowie zu möglichen Schadbildern liefern können.

Trotz geringfügiger Massenverluste von Feinstwurzeln, welche durch das Sieben und Waschen der Wurzeln erfolgt sind, wird die Aussagekraft der **Wurzelmassen** als positiv bewertet. Die Aufnahme der Wurzelmassen gewährleistete eine quantitative Auswertung zur Durchwurzelungsintensität in den unterschiedlichen Bettungstoffen. Zudem wurde durch die **Fotodokumentation** eine qualitative Auswertung vorgenommen, welche die Aussagen zur Durchwurzelung ergänzt. Dadurch konnte unter anderem festgestellt werden, dass die Wurzeln aus der Variante 2 (hydrophober Sand) eine dickere Struktur aufweisen und dadurch die Wurzelmassen erhöht ausfallen. Insgesamt kann die Methodik der Wurzelmassenaufnahme bei einem großen Flächenausmaß, wie es bei dem Feldversuch der Fall war, jedoch als sehr zeit- und arbeitsaufwendig bewertet werden. Auf Grund der gleichmäßigen Verdichtung der Tragschicht sowie der Pflasterdecke mittels Rüttelplatte wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Bauweisenvarianten die gleiche Verdichtungsleistung erhalten haben. Eine Entnahme einer **ungestörten Probe** zur Bestimmung der Dichte konnte auf Grund der Grobkörnigkeit der Stoffe nicht erfolgen. Als Ergänzung zum Feldversuch wurde deshalb der Kleinversuch zum Einfluss der Korn- bzw. Porengrößenverteilung unternommen. Hier wurden die untersuchten Stoffe jeweils mit einem Verdichtungsgrad von 100% eingebaut.

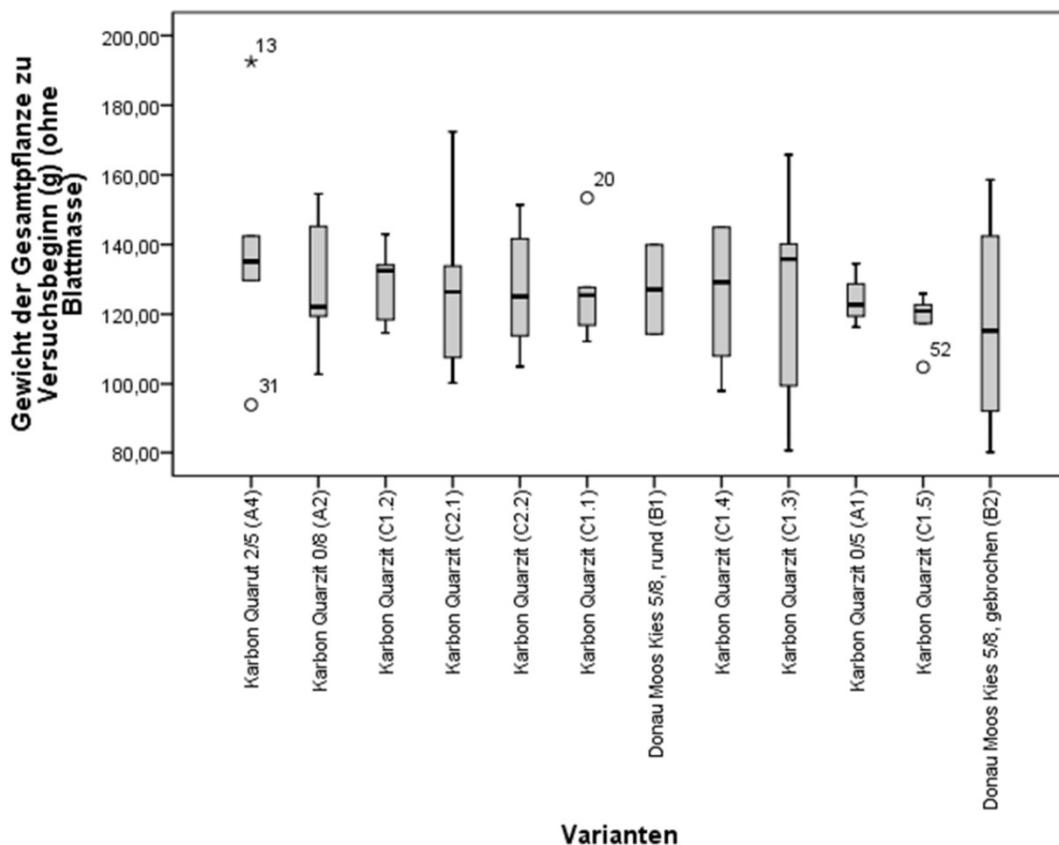
Zur **regressionsanalytischen Auswertung** ist zu erwähnen, dass sich die Betrachtung der Faktoren jeweils auf die zu Versuchsbeginn ermittelten Werte bezieht. Die Werte hinsichtlich der chemischen Bodenbeschaffenheit zeigen lediglich eine Momentaufnahme. So zeigt sich, dass die Calciumwerte zu Versuchsende angestiegen sind. Insgesamt kann von einer Schwankung der Werte während der Versuchslaufzeit ausgegangen werden.

4.2 Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung der Bettungstoffe

Die folgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Gefäßversuch nach KIBLER 2013 (vgl. 3.2.1).

4.2.1 Entwicklung der Versuchspflanzen

Vor dem Einsetzen in die Versuchskörper wurde das **Gewicht der Gesamtpflanzen** (ohne Blattmasse) ermittelt. Insgesamt liegen die gemessenen Werte aller Pflanzen zwischen 80,1 Gramm (Pflanze der Variante B2) und 192,5 Gramm (Pflanze der Variante A4). Der Mittelwert aller Versuchspflanzen liegt bei 126,4 Gramm. Abbildung 54 zeigt die jeweils gemessenen Werte je Variante. Die Zuordnung der Pflanzen zu den einzelnen Versuchsvarianten erfolgte zufällig.



- Variante A1 (0/5); n = 4
- Variante A2 (0/8); n = 5
- Variante A3/C1.2 (0/11); n = 5
- Variante A4 (2/5); n = 5
- Variante B1 (5/8); n = 2
- Variante B2 (5/8); n = 4
- Variante C1.1 (0/11, 0,4 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.3 (0/11, 9,3 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.4 (0/11, 11,9 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton); n = 5
- Variante C2.2 (0/11, 1,5 M.-% Ton); n = 5

Abb. 54: Box Plot zum Vergleich des Pflanzengewichtes je Variante zu Versuchsbeginn

Abbildung 55 zeigt, dass keine Korrelation zwischen der Wurzelfrischmasse zu Versuchsende und dem Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn besteht, obwohl die eingesetzten Versuchspflanzen sehr unterschiedliche Ausgangsgewichte haben. Dieses wird auch durch die varianzanalytische Auswertung bestätigt (vgl. Kapitel 4.2.3).

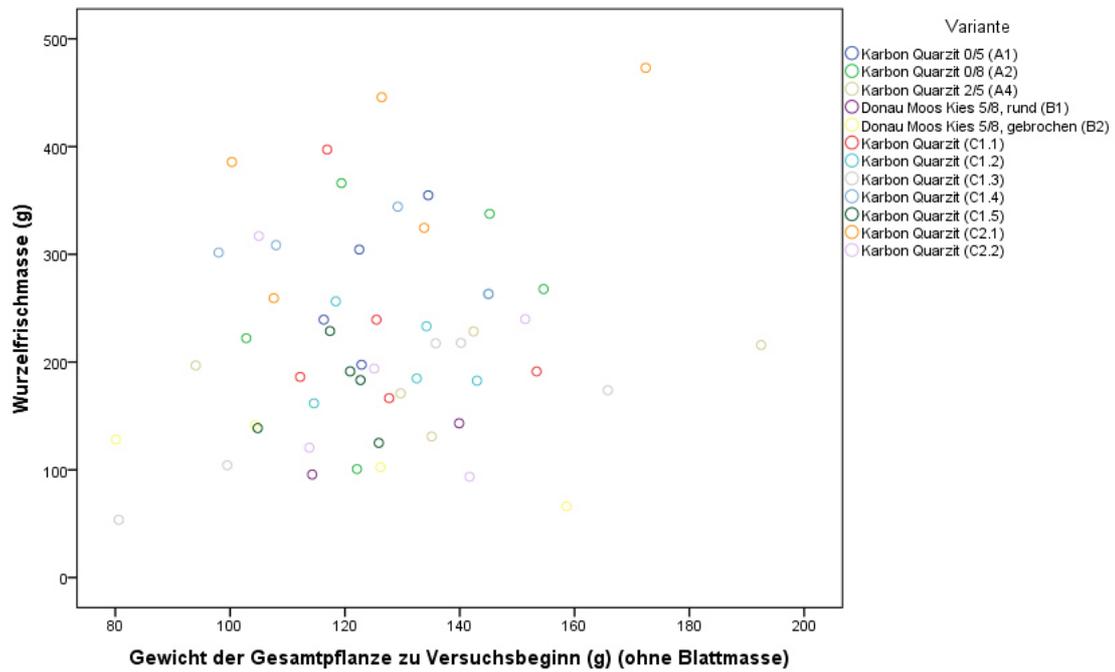
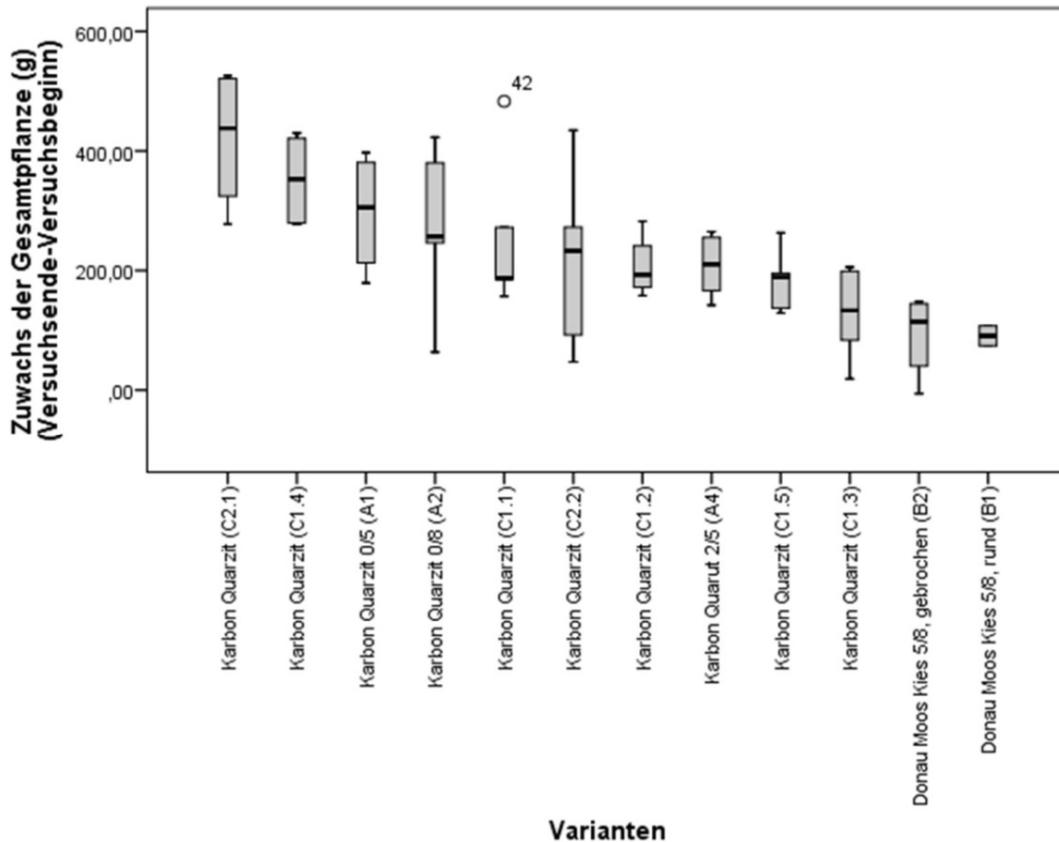


Abb. 55: Korrelationsanalytische Auswertung der Beziehung zwischen Wurzelfrischmasse (g) zu Versuchsende und dem Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn (g)

Hinsichtlich des **Zuwachses der Gesamtpflanze** liegt der Gesamtmittelwert bei 235,6 Gramm. Mit ca. 526 Gramm weist eine Pflanze der Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton) den höchsten Zuwachs auf. Wohingegen bei einer Pflanze der Variante B2 der Zuwachs im negativen Bereich liegt (vgl. Abb. 56). Der Unterschied in der Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile wird auch anhand der Fotodokumentation deutlich (vgl. Abb. 57 und 58).



- Variante A1 (0/5); n = 4
- Variante A2 (0/8); n = 5
- Variante A3/C1.2 (0/11); n = 5
- Variante A4 (2/5); n = 5
- Variante B1 (5/8 mit runder Oberfläche); n = 2
- Variante B2 (5/8 mit gebrochener Oberfläche); n = 4
- Variante C1.1 (0/11, 0,4 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.3 (0/11, 9,3 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.4 (0/11, 11,9 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff); n = 5
- Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton); n = 5
- Variante C2.2 (0/11, 1,5 M.-% Ton); n = 5

Abb. 56: Box Plot zum Vergleich des Zuwachses des Pflanzengewichtes je Variante zu Versuchsende



Abb. 57: Gesamter Versuchskörper der Variante B1 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche) zu Versuchsende; Pflanze weist einen geringen Zuwachs auf. (Datum: 26.08.2013)



Abb. 58: Gesamter Versuchskörper der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; mit 1,1 M.-% Tonanteil) zu Versuchsende. Pflanze weist einen starken Zuwachs auf. (Datum: 29.08.2013)

Zwischen der Wurzelfrischmasse zu Versuchsende und dem Zuwachs der Gesamtpflanze besteht eine sehr starke positive lineare Korrelation ($R^2=0,961$; $y=49,35+0,73*x$). Ebenso zeigen sich positive lineare Korrelationen zwischen der Wurzelfrischmasse und der Sprossfrischmasse ($R^2=0,684$; $y=-54,25+1,96*x$) sowie zwischen der Wurzelfrischmasse und der Blattfrischmasse ($R^2 = 0,710$; $y=27,94+6,15*x$).

4.2.2 Wurzelentwicklung zu Versuchsende

Die Wurzelmassen der einzelnen Varianten zu Versuchsende werden in der Tabelle 26 aufgezeigt.

Tab. 26: Wurzelmassen (g) der Varianten des Gefäßversuches zu Versuchsende

	Summe	Min.	Max.	Mittelwert	Median	Spannweite	Standard- abweichung
Karbon Quarzit 0/5 (A1); n = 4							
Frischmasse	1.096,2	197,5	354,8	274,0	271,9	157,3	69,5
Trockenmasse	382,7	58,7	133,6	95,7	95,2	74,9	30,8
Karbon Quarzit 0/8 (A2); n = 5							
Frischmasse	1.294,3	100,7	366,1	258,9	267,8	265,4	105,0
Trockenmasse	479,3	35,6	153,8	95,9	105,5	118,2	44,6
Karbon Quarzit 2/5 (A4); n = 5							
Frischmasse	942,9	130,9	228,4	188,6	196,9	97,5	38,8
Trockenmasse	311,1	42,3	73,2	62,2	65,1	30,9	11,7
Donau Moos Kies 5/8, rund (B1); n = 2							
Frischmasse	238,9	95,7	143,2	119,4	119,4	47,6	33,6
Trockenmasse	81,9	39,5	42,37	40,9	40,9	2,87	2,0
Donau Moos Kies 5/8, gebrochen (B2); n = 4							
Frischmasse	438,0	66,1	141,5	109,5	115,3	75,4	33,2
Trockenmasse	133,0	22,4	39,5	33,3	35,6	17,1	7,6
Karbon Quarzit (C1.1); n = 5							
Frischmasse	1.180,5	166,5	397,2	236,1	191,3	230,7	94,0
Trockenmasse	425,4	50,7	159,4	85,1	61,1	108,7	46,8
Karbon Quarzit (C1.2/A3); n = 5							
Frischmasse	1.018,9	161,8	256,4	203,8	184,9	94,6	39,4
Trockenmasse	364,6	49,8	96,1	72,9	64,0	46,3	19,8
Karbon Quarzit (C1.3); n = 5							
Frischmasse	767,1	53,7	217,8	153,4	173,9	164,2	72,5
Trockenmasse	232,0	13,6	74,1	46,4	45,9	60,5	25,9
Karbon Quarzit (C1.4); n = 5							
Frischmasse	1.480,8	263,0	344,2	296,2	301,6	81,2	34,1
Trockenmasse	517,0	79,7	127,9	103,4	108,3	48,2	19,2
Karbon Quarzit (C1.5); n = 5							
Frischmasse	867,2	125,0	228,8	173,5	183,3	103,8	42,0
Trockenmasse	278,5	32,5	79,5	55,7	56,7	47,0	18,2
Karbon Quarzit (C2.1); n = 5							
Frischmasse	1.888,5	259,3	473,1	377,7	385,7	213,8	87,5
Trockenmasse	724,4	70,2	185,5	144,9	159,1	115,3	44,8
Karbon Quarzit (C2.2); n = 5							
Frischmasse	965,0	93,6	317,0	193,0	193,9	223,5	90,4
Trockenmasse	328,9	29,2	129,0	65,8	64,0	100,0	39,9

Gesamt Frischmasse	12.178,2	53,7	473,1	221,4	215,8	419,4	95,5
Gesamt Trockenmasse	4.258,9	13,6	185,5	77,4	65,9	171,9	41,0

* Insgesamt gibt es pro Variante fünf Wiederholungen eine Ausnahme stellt Variante B1 dar, bei der aus Stoffmangel nur drei Wiederholungen aufgebaut wurden. Von diesen kam es durch einen Ausfall einer Versuchspflanze zudem zu einer weiteren Reduzierung auf schließlich zwei Wiederholungen. Des Weiteren verringerte sich durch den Ausfall von Versuchspflanzen die Anzahl der Wiederholungen bei Variante A1 und B2 auf jeweils vier Wiederholungen.

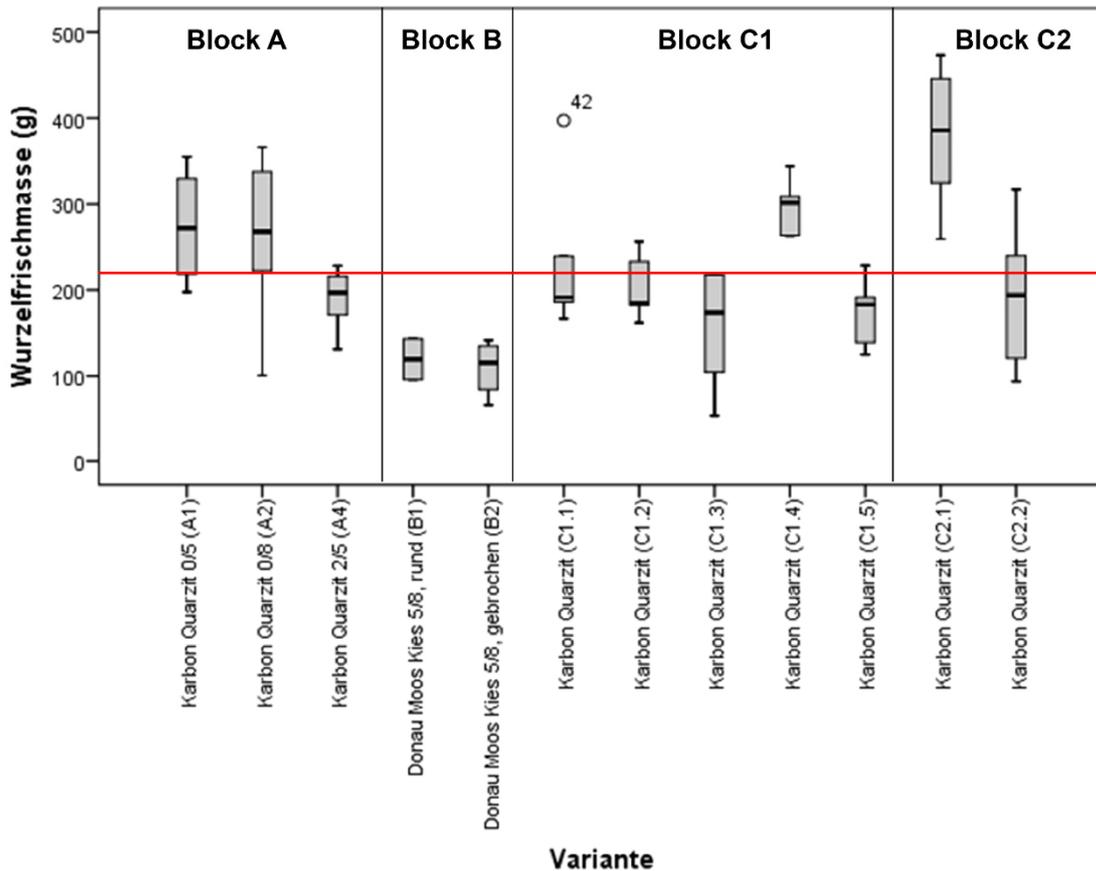
Die geringsten **Wurzelfrischmassen** kommen in den Varianten B1 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche) mit einem Mittelwert von 119,4 g sowie B2 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche) mit einem Mittelwert von 109,5 g vor. Wohingegen die höchsten Wurzelfrischmassen in den Varianten C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton) mit einem Mittelwert von 377,7 g und C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff) mit einem Mittelwert von 296,2 g zu verzeichnen sind.

Zu den Varianten mit einem geringen Aufkommen an Wurzeln gehört ebenso die Variante A4 (2/5), welche wie die Varianten aus dem Block B (Donau-Moos-Kies) zu den enggestuften Kiesen zählt, bei denen der Massenanteil der Körnung < 0,063 mm nahe 0,0 liegt. Die Varianten A1 (0/5) und A2 (0/8), bei denen eine für Wegebettungen standardmäßige Körnung verwendet wurde, liegen mit den gemessenen Wurzelfrischmassen oberhalb des Gesamtmittelwerts von 221,42 Gramm; die Werte dieser Varianten unterscheiden sich kaum untereinander.

Insgesamt besteht mit $R^2=0,940$ zu Versuchsende zwischen der Wurzelfrischmasse und der Wurzeltrockenmasse eine sehr starke positive lineare Korrelation. Aus diesem Grund wird folgend lediglich auf die Wurzelfrischmasse eingegangen.

Bezüglich der **Wurzelfrischmasse** liegen die gemessenen Werte aus **Block C1** insgesamt eher unterhalb des Gesamtmittelwertes des Versuches (vgl. Abb. 59). Im Block C1 hat die Variante C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff) mit einem Mittelwert von 296,15 die größte Masse; dieser Mittelwert wird jedoch von einem Einzelwert (Ausreißer) aus Variante C1.1 (0/11; gewaschen; 0,4 M.-% Schluff) übertroffen. Hinzu kommt, dass die Streuung bei C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff) gering ausfällt. Variante C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) zeigt mit Variante C1.3 (0/11; 9,3 M.-% Schluff) die geringsten Wurzelfrischmassen.

Die größte Streuung in den Wurzelfrischmassen ist in **Block C2** vorzufinden. Hier hat die Variante C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton) mit einem Mittelwert von 377,70 Gramm im Gesamtversuch die höchste Wurzelfrischmasse. Der **varianzanalytische Vergleich** der Wurzelfrischmassen zeigt, dass insgesamt ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten besteht (vgl. 4.2.3; Varianzanalyse). So zeigt sich zwischen der Varianten B2 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche) und der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton) der deutlichste Unterschied (vgl. 4.2.3; Tukey Test).



- Variante A1 (0/5); n = 4
 Variante A2 (0/8); n = 5
 Variante A3/C1.2 (0/11); n = 5
 Variante B1 (5/8 mit runder Oberfläche); n = 2
 Variante B2 (5/8 mit gebrochener Oberfläche); n = 4
 Variante C1.1 (0/11, 0,4 M.-% Schluff); n = 5
 Variante C1.3 (0/11, 9,3 M.-% Schluff); n = 5
 Variante C1.4 (0/11, 11,9 M.-% Schluff); n = 5
 Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff); n = 5
 Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton); n = 5
 Variante C2.2 (0/11, 1,5 M.-% Ton); n = 5

Abb. 59: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmasse der Varianten zu Versuchsende; rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Gefäßversuches von 221,42 Gramm

Neben der Aufnahme der Massen wurden im Rahmen der Versuchsflächenöffnung auch die **visuellen Beobachtungen zur Wurzelentwicklung** in den verschiedenen Varianten erfasst und dokumentiert. Die Fotodokumentation verdeutlicht die Unterschiede im Wurzelwachstum. Der schwerste Wurzelballen wurde bei der Variante C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton) ermittelt (vgl. Abb. 60). Wohingegen der leichteste Wurzelballen bei der Variante B2 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche) erfasst wurde (vgl. Abb. 61).



Abb. 60: Gewaschener Wurzelballen der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; mit 1,1 M.-% Tonanteil); Wurzelwachstum in Substratkern, Grenzzone zum Rohr sowie kränzförmig im Rohdeckel



Abb. 61: Gewaschener Wurzelballen der Variante B2 (Donau-Moos-Kies mit gebrochener Oberfläche); Wurzelwachstum vermehrt im Substratkern und sehr feine Durchwurzelung des gesamten Bettungsstoffkörpers

Hinweis: Die schwarze untergelegte Fläche bildet die Bezugsfläche von 40 cm x 60 cm.

In den **Varianten B1** (Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche), **B2** (Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche) sowie **A4** (2/5; enggestufte Kiese) befanden sich die Wurzeln vermehrt im Substratkern. Zudem wurde der gesamte Bettungsstoffkörper mit sehr feinen Wurzeln durchzogen (vgl. Abb. 62).



Abb. 62: Entfernung des KG-Rohres bei der Variante B1 (Donau-Moos-Kies mit runder Oberfläche); sehr feine Durchwurzlung des gesamten Bettungsstoffkörpers



Abb. 63: Gewaschener Wurzelballen der Variante A4 (Karbon Quarzit 2/5); Durchwurzlung des gesamten Bettungskörpers

In allen fünf Versuchskörpern der **Variante C2.1** (0/11; 1,1 M.-% Ton) war festzustellen, dass in der Grenzzone zwischen Bettungsstoff und Rohr ein vermehrtes Wurzelvorkommen auftrat. In zwei der Versuchskörper dieser Variante war auffällig, dass sich die Wurzeln zudem weniger im kompakten Bettungsstoffkörper selbst ausbildeten als vielmehr im Substratkern sowie in der oben beschriebenen Grenzzone und weiter kranzförmig in der Kappe des KG-Rohrs. Das Wurzelwachstum in den Versuchskörpern der **Variante C2.2** (0/11; 1,5 M.-% Ton) war nicht so stark wie in denen der Variante C2.1. (0/11; 1,1 M.-% Ton) Nach Entfernung des Rohrs blieb der Bettungsstoffkörper kompakt zusammen und war von Wurzeln ummantelt. Zudem war ein kranzförmiges Wurzelvorkommen in der Rohrkappe zu verzeichnen.

Wie bei Variante C2.2 (0/11; 1,5 M.-% Ton) zeigte sich auch bei **Variante C1.4** (0/11, 11,9 M.-% Schluff) bei allen fünf Versuchskörpern ein verstärktes Wurzelwachstum in der Grenzzone zwischen Bettungsstoffkörper und dem ihn umgebenden Rohr. In den Bettungsstoffkörpern selber waren fast keine Wurzeln vorhanden. Der Bettungsstoffkörper zeigte sich auch nach Entfernung des KG-Rohres als sehr kompakt (vgl. Abb. 64 und 65).



Abb. 64: Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.4 (Karbon Quarzit 0/11 mit 11,9 M.-% Schluffanteil); Wurzelwachstum in Substratkern und verstärkt in Grenzzone zum Rohr

Abb. 65: Kompakter Versuchskörper der Variante C1.4 (Karbon Quarzit 0/11 mit 11,9 M.-% Schluffanteil) nach Entfernung des Rohres. Wurzeln wachsen vermehrt in der Grenzzone zum Rohr.

Die visuellen Beobachtungen bei **Variante C1.5** (0/11, 16,5 M.-% Schluff) zeigten, dass nach der Entfernung der Rohrkappe kein Wurzelvorkommen in der untersten Schicht des Bettungsstoffkörpers ersichtlich war (vgl. Abb.66). Auch im übrigen

Bettungsstoffkörper war kein Wurzelvorkommen erkennbar. Im Grenzzonenbereich zum Rohr wuchsen hingegen gleichmäßig feine Wurzeln; ebenso im Substratkern (vgl. Abb.67).



Abb. 66: Entfernung der KG-Rohr-Kappe bei der Variante C1.5 (Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff); kein Wurzelwachstum im Bettungsstoffkörper, Wurzelwachstum in der Grenzzone zum Rohr



Abb. 67: Waschung des Versuchskörpers der Variante C1.5 (Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff); Bettungskörper wird von den Wurzeln netzartig umgeben. Kein Wurzelwachstum innerhalb des Bettungskörpers.

Ebenso wie bei Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff) wachsen die Wurzeln bei **Variante C1.3** (0/11, 9,3 M.-% Schluff) verstärkt in der Grenzzone zum Rohr und kranzförmig in der Kappe des KG-Rohrs. Im Bettungstoffkörper selber kamen fast keine Wurzeln vor.

Der Mittelwert der **Variante C1.1** (0/11; gewaschen, 0,4 M.-% Schluff) ähnelt denen der Varianten A1 (0/5) und A2 (0/8). Im gewaschenen 0/11 Bettungstoff mit 0,4 % „Rest“-Schluffanteil kamen zudem wie in den Varianten A1 (0/5) und A2 (0/8) vermehrt Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu einem Zentimeter vor. Die Abbildungen 68 und 69 zeigen die gewaschenen Wurzelballen mit der leichtesten und der schwersten Masse bei der Variante C1.1 (0/11; gewaschen, 0,4 M.-% Schluff).



Abb. 68: Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.1 (Karbon Quarzit 0/11; gewaschen mit 0,4 M.-% Schluffanteil)



Abb. 69: Gewaschener Wurzelballen der Variante C1.1 (Karbon Quarzit 0/11; gewaschen mit 0,4 M.-% Schluffanteil)

Hinweis: Die schwarze untergelegte Fläche bildet die Bezugsfläche von 40 cm x 60 cm.

Bei **Variante A1** (0/5) und **A2** (0/8) zeigte sich ein ähnliches Wurzelwachstum. Bei beiden Varianten trat teilweise ein Wurzelwachstum innerhalb der Grenzzone zum Rohr auf. Insgesamt war jedoch meist der gesamte Bettungstoffkörper durchwurzelt. Auffällig war, dass gegenüber den übrigen Varianten vermehrt Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu einem Zentimeter auftraten (vgl. Abb. 70 und 71).



Abb. 70: Entfernung der KG-Rohr-Kappe und Beginn des Ausspülens des Bettungsstoffes bei der Variante A1 (Karbon Quarzit 0/5). Wurzeln im Bereich des Bettungskörpers ersichtlich.



Abb. 71: Gewaschener Wurzelballen der Variante A1 (Karbon Quarzit 0/5); gesamter Bettungskörper durchwurzelt, viele Wurzeln über 1 cm Durchmesser durchwurzelt.



Abb. 72: Entfernung der KG-Rohr-Kappe und Beginn des Ausspülens des Bettungsstoffes bei der Variante A2 (Karbon Quarzit 0/8). Wurzeln im Bereich des Bettungskörpers ersichtlich.



Abb. 73: Gewaschener Wurzelballen der Variante A2 (Karbon Quarzit 0/8); gesamter Bettungskörper durchwurzelt, viele Wurzeln über 1 cm Durchmesser durchwurzelt.

Die **Variante A3** (0/11) (bzw. C1.2) stellt ein standardmäßiges 0/11 Bettungsstoff mit 3,0 % Massenanteil Schluff dar. Insgesamt waren die Bettungsstoffkörper selber fein

durchwurzelt. Ein verstärktes Wurzelwachstum war in den Grenzzonen zum Rohr zu verzeichnen. Zudem wuchsen die Wurzeln überwiegend im Substratkern.

4.2.3 Varianzanalytischer Vergleich der Varianten

Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der Varianzanalyse

Der Shapiro-Wilk Test als Test der **Residuen auf Normalverteilung** zeigt, dass eine Normalverteilung der Residuen vorliegt ($p=0,763$) und somit hinsichtlich dieser Voraussetzung eine Varianzanalyse gerechnet werden kann.

Tab. 27: Test auf Normalverteilung der Residuen

	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
Residuen für Wurzelfrischmasse	,986	55	,763

Die statistischen Untersuchungen der Daten haben des Weiteren ergeben, dass eine **Varianzhomogenität** (Levene $p=0,179$) vorliegt.

Tab. 28: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Wurzelfrischmasse (g)	1,468	11	43	,179

Varianzanalyse

Die durchgeführte Varianzanalyse zeigt, dass es zum einen keinen signifikanten Unterschied zwischen den fünf Wiederholungsblöcken gibt ($p=0,707$). Signifikante Unterschiede bestehen jedoch zwischen den Varianten ($p=0,000$). Das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn hat keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende ($p=0,236$).

Tab. 29: Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse

Quelle	Quadratsumme		Mittel der		
	vom Typ III	df	Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	302101,844 ^a	16	18881,365	3,770	,000
Konstanter Term	23749,511	1	23749,511	4,742	,036
Wiederholungsblock	10838,039	4	2709,510	,541	,707
Variante	270833,432	11	24621,221	4,916	,000
Gewicht der Pflanze zu Versuchsbeginn	7261,068	1	7261,068	1,450	,236
Fehler	190312,607	38	5008,227		
Gesamt	3188929,209	55			
Korrigierte Gesamtvariation	492414,451	54			

a. R-Quadrat = ,614 (korrigiertes R-Quadrat = ,451)

Tukey Test

Der zur Ergänzung der Varianzanalyse durchgeführte Tukey Test zeigt, zwischen welchen Varianten ein signifikanter Unterschied besteht. Insgesamt sind hier drei homogene Untergruppen zu verzeichnen zwischen denen ein signifikanter Unterschied vorhanden ist (vgl. Tab. 30). Zwischen den einzelnen Varianten innerhalb einer Untergruppe gibt es demnach keinen signifikanten Unterschied bei den Mittelwerten der Wurzelfrischmasse. Somit zeigt sich zwischen der Varianten B2 (Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche) und der Variante C2.1 (Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton) der deutlichste Unterschied.

Tab. 30: Tukey-HSD^{a,b,c}; Wurzelfrischmasse (g)

Variante	N	Untergruppe		
		1	2	3
B2	4	109,5100		
B1	2	119,4250		
C1.3	5	153,4100	153,4100	
C1.5	5	173,4460	173,4460	
A4	5	188,5820	188,5820	
C2.2	5	192,9900	192,9900	
C1.2/A3	5	203,7840	203,7840	
C1.1	5	236,1020	236,1020	236,1020
A2	5	258,8640	258,8640	258,8640
A1	4	274,0425	274,0425	274,0425
C1.4	5		296,1520	296,1520
C2.1	5			377,6960
Sig.		,062	,168	,176

Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt.

Grundlage: beobachtete Mittelwerte.

Der Fehlerterm ist Mittel der Quadrate (Fehler) = 5065,992.

a. Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 4,286

b. Die Größen der Gruppen ist ungleich. Es wird das harmonische Mittel der Größe der Gruppen verwendet. Fehlerniveaus für Typ I werden nicht garantiert.

c. Alpha = ,05

4.2.4 Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungstoffe

Korngrößenzusammensetzung

Die **Korngrößenzusammensetzungen** der Bettungstoffe werden in Tabelle 31 aufgezeigt. Im **Variantenblock A** werden Stoffe eingesetzt, welche als standardmäßige Wegebaubettungen verwendet werden. Dabei handelt es sich vorwiegend um intermittierend gestufte Kiese (GI), bei denen der Massenanteil < 0,063 mm unter 5% liegt. Insgesamt zeigen die Varianten A1 (0/5), A2 (0/8) und A3 (0/11) ähnliche Korngrößenzusammensetzungen auf.

Eine Ausnahme stellt in diesem Block die Variante A4 (2/5) dar. Diese ist nach DIN 18196 ein enggestufter Kies (GE), bei dem der Massenanteil > 2 mm annähernd bei 100% liegt.

Tab. 31: Korngrößenzusammensetzung der Bettungstoffe (Messergebnisse nach KIBLER 2013, S. 80f.; korrigiert)

Variante	Stoffe	Anteil > 2 mm (Kies) (%)	Anteil 2 – 0,063 mm (Sand) (%)	Anteil 0,063 – 0,002 mm (Schluff) (%)	Anteil ≤ 0,002 mm (Ton) (%)	Einstufung nach DIN 18196
A1	Karbon Quarzit 0/5	53,2	42,7	3,5	0,6	GI
A2	Karbon Quarzit 0/8	49,9	46,4	3,1	0,6	GI
A3/C1.2	Karbon Quarzit 0/11; 3,0 M.-% Schluff	57,3	39,1	3,0	0,6	GI
A4	Karbon Quarzit 2/5	98,1	1,7	0,2	0,0	GE
B1	Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche	100,0	0,0	0,0	0,0	GE
B2	Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche	100,0	0,0	0,0	0,0	GE
C1.1	Karbon Quarzit 0/11; gewaschen; 0,4 M.-% Schluff	52,7	46,9	0,4	0,0	GI
C1.3	Karbon Quarzit 0/11; 9,3 M.-% Schluff	53,5	37,2	9,3	0,0	GU
C1.4	Karbon Quarzit 0/11; 11,9 M.-% Schluff	48,6	37,9	11,9	1,6	GU
C1.5	Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff	43,0	38,2	16,5	2,3	GU*
C2.1	Karbon Quarzit 0/11; 1,1 M.-% Ton	48,9	41	9,0	1,1	GU
C2.2	Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton	59,1	27,7	11,7	1,5	GU

Korngrößenverteilung: nach DIN EN 933-1 (2006); Nasssiebung für Körnung < 0,063 mm und Trockensiebung für > 0,063 mm; Tonanteilbestimmung: Laser Particle Sizer

Einstufung nach DIN 18196 (2011):

GE – enggestufter Kies

GI – intermittierend gestufter Kies

GU – Kies-Schluff-Gemisch mit geringem Massenanteil des Feinkorns < 0,063 (über 5 bis 15 M.-%)

GU* – Kies-Schluff-Gemisch mit hohem Massenanteil des Feinkorns < 0,063 (über 15 bis 40 M.-%)

GT – Kies-Ton-Gemisch mit geringem Massenanteil des Feinkorns < 0,063 (über 5 bis 15 M.-%)

Da auch die Beschaffenheit der **Kornoberfläche** einen Einfluss auf die Porengröße ausübt, wurde im **Variantenblock B** ein Stoff mit runder Oberflächenstruktur (B1) und ein Stoff mit einer gebrochenen Oberfläche (B2) eingesetzt. Beide sind enggestufte Kiese (GE), bei denen der Massenanteil > 2 mm bei 100% liegt. Vergleichbar mit der Variante A4 (2/5) fehlen hier die Sand-, Schluff- und Tonanteile.

Die **Varianten im Block C1** unterscheiden sich in ihrem Anteil an Schluff. Dabei wurden die geplanten Werte bei der Umsetzungen der Mischungen unterschritten. Dennoch ist eine Steigerung des Schluffanteils von der Variante C1.1 mit 0,4 M.-% bis zur Variante C1.5 mit 16,5 M.-% vorhanden. Nach Einstufung laut DIN 18196 handelt es sich bei C1.1 und C1.2 um intermittierend gestufte Kiese (GI) während es sich bei C1.3 und C1.4 um Kies-Schluff-Gemische mit geringem Anteil des Feinkorns < 0,063mm handelt. Bei C1.5 steigert sich der Schluffanteil über 15 M.-% auf 16,5 M.-%; d.h. laut DIN 18196 fällt die Variante unter Kies-Schluff-Gemische mit hohem Anteil des Feinkorns < 0,063mm. Zudem hat die Variante C1.5 mit 2,3 M.-% den höchsten Tonanteil.

Im **Variantenblock C2** wurden die geplanten Werte bezüglich des Tonanteils bei der Mischung nicht erreicht, da der eingebrachte Ton nicht den Anteil an Ton enthielt, der auf dem technischen Merkblatt beschrieben wurde. Laut technischem Merkblatt beträgt der Nasssieberückstand > 45 µm (0,045 mm) 0,04 M.-%. Die Korngrößenverteilung kleiner 2 µm (0,002 mm) liegt nach Merkblatt bei 51 M.-%. Die erstellte Körnungslinie nach KIBLER (2013) ergab jedoch einen Tongehalt (kleiner 2 µm) von lediglich 12 M.-% sowie einen Feinschluffanteil (2 µm bis 6 µm) von ca. 40 M.-%. Die Varianten C2.1 und 2.2 ähneln den Varianten C1.3 und C1.4 und stellen somit auch Kies-Schluff-Gemische mit geringem Anteil des Feinkorns < 0,063mm dar.

Proctordichte

Da die einzelnen Bettungstoffe in den Versuchskörpern mit der jeweiligen zuvor ermittelten Proctordichte eingebaut werden sollten, wurden die Proctordichten nach DIN 18127 ermittelt. Die Tabelle 32 zeigt auf, dass bei optimalem Wassergehalt mit über 2,1 g/cm³ die höchsten Dichten bei den Varianten C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff), C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) sowie C2.2 (0/11; 1,5 M.-% Ton) auftreten. Bei optimalem Wassergehalt erreicht die Variante A4 (2/5) mit 1,468 g/cm³ die geringste Proctordichte. Gefolgt von den enggestuften Kiesen der Varianten B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) 1,700 g/cm³ sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) mit 1,577 g/cm³. Die übrigen Varianten liegen knapp unter 2,0 g/cm³.

Tab. 32: Proctordichte (ρ_{Pr}) mit optimalem Wassergehalt (w_{Pr}) der Bettungstoffe (Messergebnisse nach KISLER 2013, S. 38)

Variante/Stoffe		ρ_{Pr} (g/cm ³)	w_{Pr}
A1	Karbon Quarzit 0/5	1,900	0,082
A2	Karbon Quarzit 0/8	1,925	0,075
A3/C1.2	Karbon Quarzit 0/11 3 M.-% Schluff	1,970	0,058
A4	Karbon Quarzit 2/5	1,468	0,040
B1	Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche	1,700	0,000
B2	Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche	1,577	0,005
C1.1	Karbon Quarzit 0/11; gewaschen, 0,4 M.-% Schluff	1,980	0,050
C1.3	Karbon Quarzit 0/11; 9,3 M.-% Schluff	2,088	0,084
C1.4	Karbon Quarzit 0/11; 11,9 M.-% Schluff	2,135	0,087
C1.5	Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff	2,130	0,088
C2.1	Karbon Quarzit 0/11; 1,1 M.-% Ton	2,098	0,090
C2.2	Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton	2,105	0,086

ρ_{Pr} : Proctordichte nach DIN 18127 (2012); Proctortopf 100 x 120 mm, Fallgewicht Form A, 2,5 kg, drei Schichten je 25 Schläge

w_{Pr} : optimaler Wassergehalt

Porenvolumenbestimmung

Tabelle 33 beinhaltet die einzelnen Werte des mittleren Wassergehalts (Gew.-%) bei unterschiedlichen pF-Werten. Die Werte werden zusammen mit den jeweiligen Korndichten (g/cm^3) zur Porenvolumenbestimmung (Vol.-%) benötigt. Zur Ermittlung des mittleren Wassergehalts wurden die Bettungstoffe der Varianten mit der jeweils zuvor ermittelten Proctordichte verwendet.

Tab. 33: pF-Werte zur Porenvolumenbestimmung der Varianten
(Messergebnisse nach KIELER 2013, S. 85)

Variante	A1	A2	A3/ C1.2	A4	B1	B2	C1.1	C1.3	C1.4	C1.5	C2.1	C2.2
mittlerer Wassergehalt in Gew.-%												
bei pF 1,8	5,7	5,6	4,9	2,0	1,7	1,1	3,8	7,1	7,9	8,1	8,2	8,4
bei pF 2,5	2,8	2,9	3,0	1,4	1,3	0,9	1,8	4,8	6,0	7,5	6,3	7,7
bei pF 4,2	1,4	1,3	1,4	1,1	1,6	0,9	1,0	1,9	2,3	2,4	2,5	3,7
Porenvolumen in Vol.-%												
bei pF 1,8	10,8	10,8	9,7	2,9	2,9	1,7	7,5	14,8	16,9	17,3	17,2	17,7
bei pF 2,5	5,3	5,6	5,9	2,1	2,2	1,4	3,6	10,0	12,8	16,0	13,2	16,2
bei pF 4,2	2,7	2,5	2,8	1,6	2,7	1,4	2,0	4,0	4,9	5,1	5,2	7,8
Korndichte g/cm^3	2,68	2,68	2,68	2,68	2,70	2,70	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
Trockendichte g/cm^3	1,90	1,92	1,97	1,47	1,70	1,58	1,98	2,09	2,14	2,13	2,10	2,11
Korndichte: Ermittlung mit Multi-Pyknometer												

Porengrößenverteilung

Auf Basis der Porenvolumenbestimmung kann die Ermittlung der Porengrößenverteilung vorgenommen werden (vgl. Tab. 34). Hier liegt das **Gesamtporenvolumen (GPV)** (bei definierter Proctordichte) insgesamt zwischen 20,3 Vol.-% (Variante C1.4) und 45,2 Vol.-% (Variante A4).

Werte über 30 Vol.-% erreichen die enggestuften Kiese der Varianten A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche).

Bezüglich der **nutzbaren Feldkapazität** verzeichnen fast alle Varianten einen Wert unter 10 Vol.-%. Am geringsten liegen die Werte der enggestuften Kiese der Varianten A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche). Den höchsten Wert mit 12,1 Vol.-% erreichen die Varianten C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff), C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) sowie C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton). Auf Grund ihrer Kornzusammensetzung besitzen die Varianten A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) die geringste **nutzbare Feldkapazität**.

Bei den Varianten C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff), C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) sowie C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton), C2.2 (0/11; 1,5 M.-% Ton) liegt die **Luftkapazität** unter 5 Vol.-%. Variante C1.3 (0/11; 9,3 M.-% Schluff), erreicht 7,3 Vol.-% während die übrigen Varianten über 15 Vol.-% liegen.

Tab. 34: Porengrößenverteilung der Bettungsstoffe bei definierter Proctordichte (Messergebnisse nach KIßLER 2013, S. 85)

		GPV	Luftkapazität bei pF 1,8 (weite Grobporen)	Feldkapazität	Nutzbare Feldkapazität	Feinporen
Variante/Stoffe		Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
A1	Karbon Quarzit 0/5	29,1	18,3	10,8	8,1	2,7
A2	Karbon Quarzit 0/8	28,2	17,4	10,8	8,3	2,5
A3 / C1.2	Karbon Quarzit 0/11 3 M.-% Schluff	26,5	16,8	9,7	6,8	2,8
A4	Karbon Quarzit 2/5	45,2	42,3	2,9	1,3	1,6
B1	Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche	37,0	34,1	2,9	0,1	2,7
B2	Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche	41,6	39,9	1,7	0,3	1,4
C1.1	Karbon Quarzit 0/11; gewaschen, 0,4 M.-% Schluff	26,1	18,6	7,5	5,5	2,0
C1.3	Karbon Quarzit 0/11; 9,3 M.-% Schluff	22,1	7,3	14,8	10,8	4,0
C1.4	Karbon Quarzit 0/11; 11,9 M.-% Schluff	20,3	3,4	16,9	12,1	4,9
C1.5	Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff	20,5	3,2	17,3	12,1	5,1
C2.1	Karbon Quarzit 0/11; 1,1 M.-% Ton	21,7	4,5	17,2	12,1	5,2
C2.2	Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton	21,5	3,8	17,7	9,7	7,8

Porengrößenverteilung in Anlehnung an DIN EN 13041

Gesamtporenvolumen (GPV) = (1-Trockendicht/Korndichte)*100

Luftkapazität = GPV - Wassergehalt (Vol.-%) bei pF 1,8 (=> weite Grobporen)

Feldkapazität = Wassergehalt (Vol.-%) bei pF 1,8

nutzbare Feldkapazität = Wassergehalt (Vol.-%) bei pF 1,8 - Wassergehalt (Vol.-%) bei pF 4,2

Feinporen = Wassergehalt (Vol.-%) bei pF 4,2 (Totwasser)

Wasserdurchlässigkeit

Hinsichtlich des **Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts** werden die höchsten Werte bei den enggestuften Kiesen der Varianten A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) errechnet (vgl. Tab. 35). Insbesondere die Varianten aus dem Block B liegen weit über den Werten der übrigen Varianten. Mit $7,3 \times 10^{-9}$ liegt der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Variante C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) am niedrigsten.

Tab. 35: Errechneter Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Bettungstoffe (Messergebnisse nach KIBLER 2013, S.48)

Variante/Stoffe		k_f -Wert (m/s)
A1	Karbon Quarzit 0/5	$5,8 \times 10^{-6}$
A2	Karbon Quarzit 0/8	$5,7 \times 10^{-6}$
A3/C1.2	Karbon Quarzit 0/11 3 M.-% Schluff	$6,3 \times 10^{-6}$
A4	Karbon Quarzit 2/5	3,0
B1	Donau-Moos-Kies 5/8 mit runder Oberfläche	14,5
B2	Donau-Moos-Kies 5/8 mit gebrochener Oberfläche	10,8
C1.1	Karbon Quarzit 0/11; gewaschen, 0,4 M.-% Schluff	$1,2 \times 10^{-5}$
C1.3	Karbon Quarzit 0/11; 9,3 M.-% Schluff	$3,9 \times 10^{-7}$
C1.4	Karbon Quarzit 0/11; 11,9 M.-% Schluff	$3,6 \times 10^{-8}$
C1.5	Karbon Quarzit 0/11; 16,5 M.-% Schluff	$7,3 \times 10^{-9}$
C2.1	Karbon Quarzit 0/11; 1,1 M.-% Ton	$2,8 \times 10^{-7}$
C2.2	Karbon Quarzit 0/11; 1,5 M.-% Ton	$1,7 \times 10^{-8}$

Kf-Wert: berechneter Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach HAZEN modifiziert

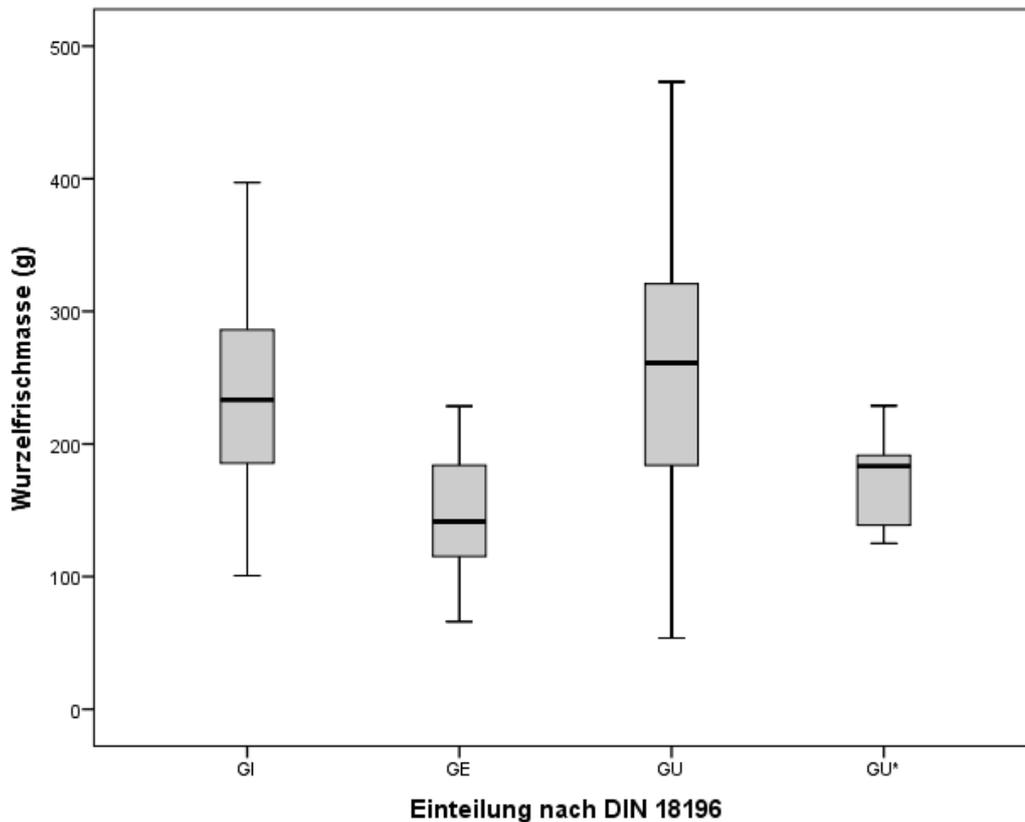
4.2.5 Regressions- und korrelationsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren

Im Folgenden werden mögliche Zusammenhänge zwischen den bodenphysikalischen Faktoren und der erhobenen Wurzelfrischmasse zu Versuchsende dargestellt. Die Betrachtung der Faktoren bezieht sich jeweils auf die zu Versuchsbeginn ermittelten Werte. Zudem erfolgt eine korrelationsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren untereinander.

Korngrößenzusammensetzung

Abbildung 74 zeigt, dass in den Varianten mit den Kies-Schluff-Gemischen (GU) die geringsten und zugleich die höchsten Wurzelfrischmassen vorzufinden sind. Die enggestuften Kiese (GE) - Variante B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche), B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) sowie A4 (2/5) - weisen im Vergleich eine geringere Streubreite bezüglich der Wurzelfrischmasse auf. Insgesamt befinden sich hier wenig Wurzeln in den Varianten mit den enggestuften Kiesen. Die standardmäßigen Bettungstoffe sind die intermittierend gestuften Kiese (GI). Im Vergleich zu den anderen Bodenklassifikationen sind hier nicht deutlich weniger Wurzeln

enthalten. Eine Besonderheit stellt zudem die Variante C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) dar. Diese Variante besitzt den höchsten Schluffanteil und den höchsten Tonanteil und erreicht damit, dass insgesamt ein eher geringes Wurzelvorkommen festgestellt werden kann. Ein linearer Zusammenhang zwischen Wurzelfrischmasse und den jeweiligen Anteilen an Kies, Sand, Schluff und Ton ist jedoch nicht eindeutig abzulesen.



GU – Kies-Schluff-Gemisch (Variante C1.3, C1.4, C2.1, C2.2; n = 20)
GU* - Kies-Schluff-Gemisch mit hohem Anteil an Feinkorn < 0,063 (Variante C1.5 ;n = 5)
GE – enggestufter Kies (Variante A4, B1, B2; n = 11)
GI – intermittierend gestufter Kies (Variante A1, A2, A3/C1.2, C1.1; n = 19)

Abb. 74: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungsstoffe

Proctordichte

Zu den Varianten mit den geringsten Proctordichten zählen A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) sowie B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche). Hier zeigen sich auch geringere Wurzelfrischmassen. Die höchste Proctordichte weist die Variante C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff) auf; dicht gefolgt von den Varianten C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) und den Varianten C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton) und C2.2. (0/11; 1,5 M.-% Ton). Insgesamt erreichen die Varianten mit einem höheren Schluffanteil tendenziell auch die höheren Dichten ($R^2 = 0,596$) (vgl. Abb. 75).

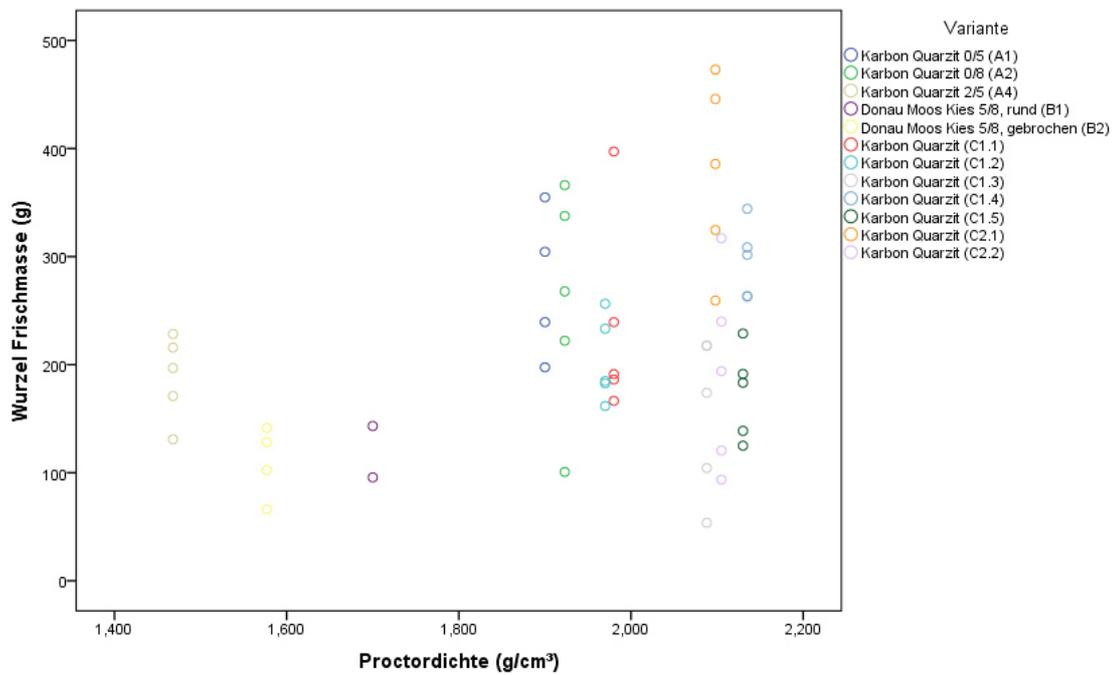


Abb. 75: Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte (g/cm³) der Bettungstoffe aus dem Gefäßversuch

Die ermittelte Luftkapazität der einzelnen Varianten zeigt eine perfekte negative Korrelation mit der Proctordichte ($R^2 = 0,972$) (vgl. Abb. 76). Die enggestuften Kiese der Varianten A4 (2/5), B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche) und B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) weisen die höchsten Luftkapazitäten, d.h. die höchsten Grobporenvolumen, auf. Gleichzeitig werden mit diesen Stoffen die geringsten Proctordichten erreicht. Bei den Varianten C1.4 (0/11; 11,9 M.-% Schluff), C1.5 (0/11; 16,5 M.-% Schluff) sowie C2.1 (0/11; 1,1 M.-% Ton) und C2.2. (0/11; 1,5 M.-% Ton) liegt die Luftkapazität unter 5 Vol.-%. Mit diesen Varianten werden jedoch die höchsten Proctordichten erzeugt.

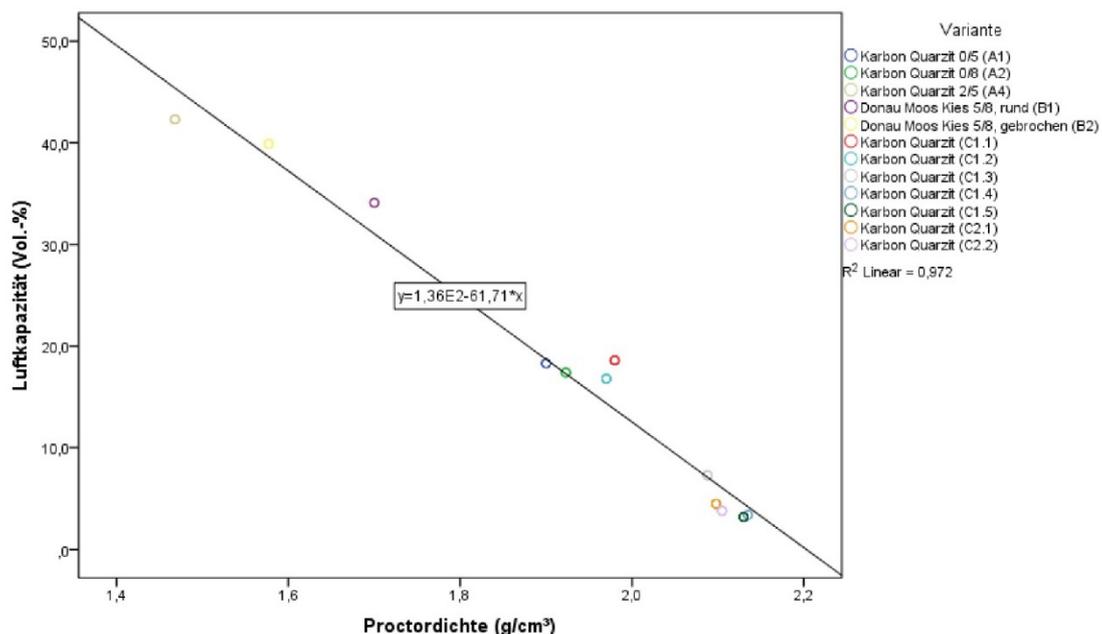


Abb. 76: Streudiagramm zum Vergleich der Luftkapazität (Vol.-%) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte (g/cm³) der Bettungstoffe aus dem Gefäßversuch

Porengrößenverteilung

Auch hinsichtlich des **Gesamtporenvolumens** (GPV) fallen die Varianten B1 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit runder Oberfläche), B2 (Donau-Moos-Kies, 5/8 mit gebrochener Oberfläche) sowie A4 (2/5) auf, da diese im Vergleich zu den übrigen Varianten ein hohes Gesamtporenvolumen aufweisen und gleichzeitig zu den Varianten mit einer geringen Wurzelmasse gehören. Ein eindeutiger linearer Zusammenhang zwischen Wurzelfrischmasse und dem Gesamtporenvolumen kann bei dieser Einzelbetrachtung des Einflussfaktors GPV jedoch nicht festgestellt werden.

Hinsichtlich der **nutzbaren Feldkapazität** zeigt das folgende Streudiagramm, dass bei Erhöhung des Schluffanteils die nutzbare Feldkapazität steigt (vgl. Abb. 77). Bettungsstoffvarianten, bei denen der Schluffanteil unter 5 M.-% (bautechnische Höchstgrenze nach TL Pflaster-StB 06) liegt, erreichen nutzbare Feldkapazitäten von bis zu 8 Vol.-%.

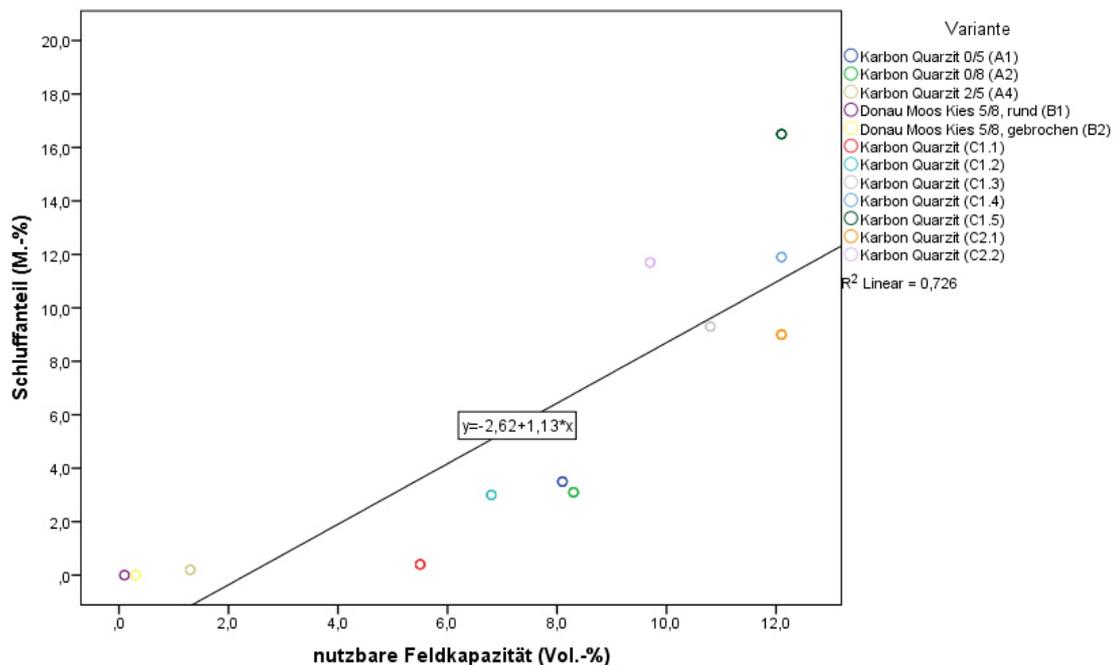


Abb. 77: Streudiagramm zum Vergleich der nutzbaren Feldkapazität (Vol.-%) der Varianten in Abhängigkeit des Schluffanteils (M.-%) der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch

Wasserdurchlässigkeit

Eine hohe Luftkapazität, d.h. das Vorkommen vieler Grobporen, bewirkt insgesamt eine hohe Wasserdurchlässigkeit (vgl. Abb. 78). Unterdessen ist eine hohe Wasserdurchlässigkeit gleichzusetzen mit einer niedrigen nutzbaren Feldkapazität (vgl. Abb. 79).

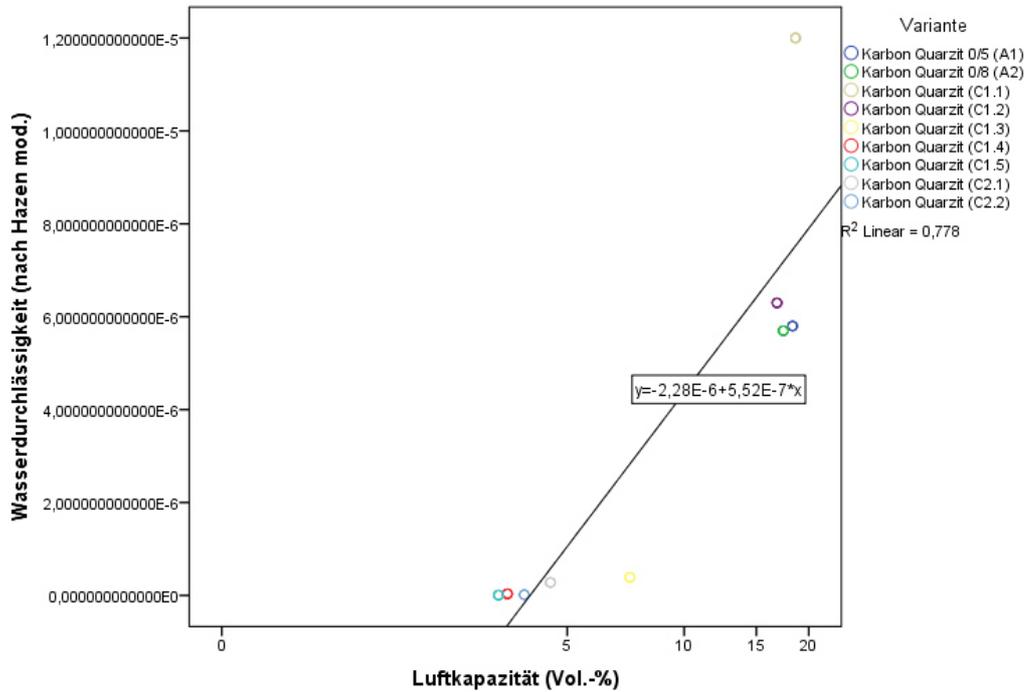


Abb. 78: Streudiagramm zum Vergleich der Wasserdurchlässigkeit der Varianten in Abhängigkeit der Luftkapazität (Vol.-%) der Bettungsstoffe

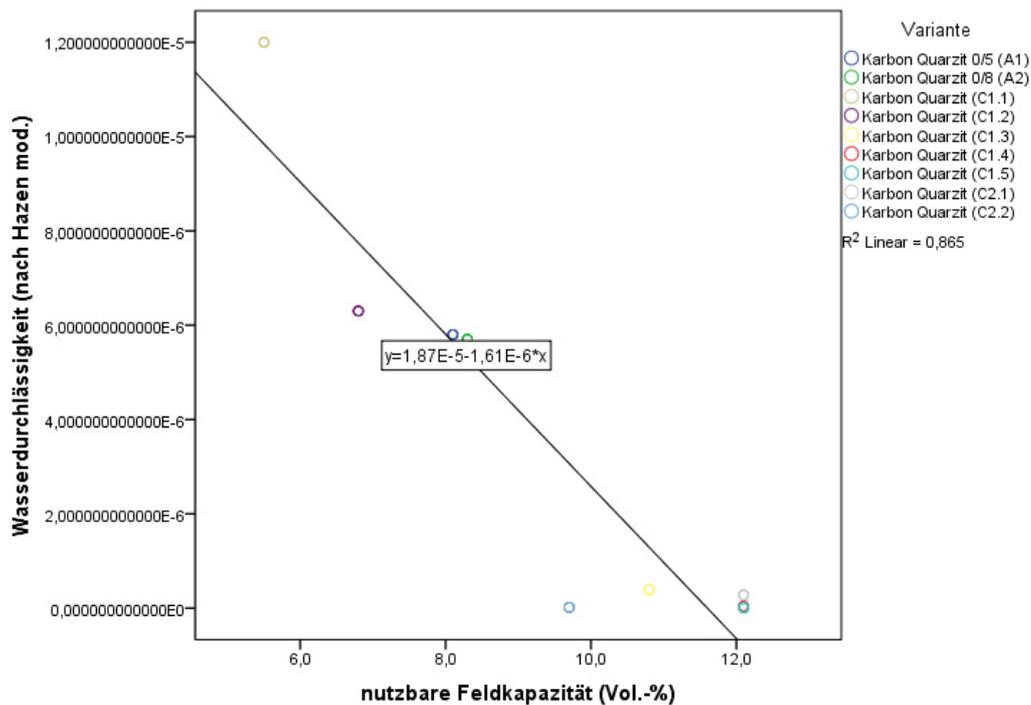


Abb. 79: Streudiagramm zum Vergleich der Wasserdurchlässigkeit der Varianten in Abhängigkeit der nutzbaren Feldkapazität (Vol.-%) der Bettungsstoffe

4.2.6 Methodenbetrachtung

Wie bei fast allen Praxisversuchen bestimmen Arbeits-, Zeit-, Kosten- und Platzaufwand die Rahmenbedingungen. Dieser Versuch (sowie die übrigen Gefäßversuche) wurde aus diesem Hintergrund heraus als **Gefäßversuch im Außenbereich** initiiert. Zu berücksichtigen ist, dass ein Gefäßversuch im Gegensatz zu einer groß angelegten Versuchsfläche, welche die Straßenbaumsituation eher abbildet, nicht die reale Situation darstellt. Es ist zudem lediglich eine Untersuchung einer Teilmenge möglich. Im Gegensatz zu einem großformatigen Freiflächenversuch, können mit Hilfe eines kleinformatischen Gefäßversuches jedoch genauere Faktoren, wie in diesem Gefäßversuch die Proctordichte, eingestellt werden, um allgemeingültigere Aussagen herausarbeiten zu können.

Der Gefäßversuch wurde mit einer **Versuchslaufzeit** von acht Monaten durchgeführt. Wie die Auswertung zeigt, hat sich im Laufe dieser Zeit an einigen Versuchskörpern der sogenannte „Blumentopfeffekt“ ausgebildet und die Wurzeln wuchsen kranzförmig in den Rohrkappen weiter. Dieses führt bei einigen Varianten zu einer Erhöhung der Wurzelmassen und muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Bei weiteren Versuchen sollte die Versuchslaufzeit an die Größe der Versuchskörper sowie an die Pflanzenauswahl genauer angepasst werden. Trotz dieser Problematik konnte im Versuchszeitraum eine Wurzelentwicklung herbeigeführt werden, welche eine qualitative und quantitative Auswertung der Wurzelmassen zuließ (vgl. 4.2). Mit dem durchgeführten Gefäßversuch konnte somit der Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Durchwurzelung untersucht werden (vgl. 5.1).

Hinsichtlich der **Versuchspflanze** wurde sich bei allen Gefäßversuchen auf *Salix purpurea* beschränkt. Der Einsatz wurde für die Gefäßversuche mit relativ kurzer Laufzeit als sehr geeignet eingestuft, da sie als schnellwüchsiges Pioniergehölz mit auffallend hohem Feinwurzelbesatz gilt (vgl. KUTSCHERA/LICHTENEGGER 2002, S. 504). Zudem wächst *Salix purpurea* in der Natur vorwiegend z.B. auf Kies- und Schotterbänken und verträgt periodische Überschwemmungen aber auch trockene Böden (vgl. SCHIECHTL 1992, S. 92). Um annähernd gleiche Ausgangsbedingungen für den Versuch zu gewährleisten, wurden die einzelnen Pflanzen so ausgewählt und beschnitten, dass augenscheinlich gleichgroße Pflanzen verwendet wurden. Wie die Varianzanalyse bestätigte, hatte das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende (vgl. 4.2.3).

Um artspezifische Aussagen zu den Reaktionen der im Straßenraum angewendeten Baumgattungen auf Veränderung der Korngrößenzusammensetzung der Bettungstoffe treffen zu können, ist zu empfehlen mögliche Folgeversuche mit mehreren, ausgewählten Gattungen durchzuführen.

In Anlehnung an MÜLLER (2011) erfolgte die Erstellung der **Versuchskörper** mit der jeweiligen Proctordichte der einzelnen Bettungstoffe. Insgesamt konnte der Aufbau gut durchgeführt werden (vgl. KIßLER 2013, S. 62). Die **Proctordichte** wurde im Vorfeld ermittelt, da diese ebenso wie die Korngrößenverteilung einen Einfluss auf die Porengrößenverteilung ausübt. Die Durchführung des **Proctorversuches** nach DIN 18127 gestaltete sich bei den Stoffen ohne Feinanteil, d.h. für die Varianten B1, B2 und A4, schwierig. Um die Messgenauigkeit zu optimieren, wurden bis zu zwölf Einzelversuche durchgeführt (vgl. KIßLER 2013, S. 60). Um die jeweilige Proctordichte

in den Versuchskörpern zu erreichen, erfolgte der Einbau der Stoffe schichtenweise in drei Schichten. Dabei wurde vermutet, dass die dadurch entstehenden Grenzschichten durch Wurzeln erschlossen werden können (vgl. KIBLER 2013, S. 62). Diese Vermutung wurde durch die Ergebnisse nicht bestätigt.

Damit ausgeschlossen werden konnte, dass andere Faktoren, wie bodenchemische Zusammensetzung, einen Einfluss auf die Durchwurzelung nehmen, sollte bei allen Variantenblöcken der gleiche **Ausgangsstoff** verwendet werden. Gewählt wurde das vor Ort (Raum Osnabrück) vorkommende Karbon Quarzit. Da es sich hierbei um ein gebrochenen Bettungsstoff handelt, kam es für den Einsatz im Variantenblock B, bei dem eine gebrochene Kornoberfläche mit einer unebrochene Kornoberfläche verglichen wird, jedoch nicht in Frage. Hier musste deshalb auf ein Stoff (Donau-Moos-Kies) zurückgegriffen werden, welcher sowohl als runder als auch als gebrochener Stoff bezogen werden konnte.

Als Ausgangsstoff für den Variantenblock C wurde Karbon Quarzit mit der Körnung 0/11 herangezogen. Um den Schluffanteil zu variieren wurde ein sogenanntes Füllmaterial aus dem gleichen Ausgangsstoff (Karbon Quarzit) verwendet, welches laut Prüfzeugnis einen Schluffanteil von ca. 86% aufweist. Da für die Varianten C2 kein Ton aus Karbon Quarzit zur Verfügung stand, wurde ein nicht quellfähiger Kaolin-Ton verwendet.

Die Varianten im Block C1 unterscheiden sich in ihrem **Schluffanteil**. Dabei wurden die geplanten Werte bei der Umsetzungen der Mischungen unterschritten. Dennoch ist eine Steigerung des Schluffanteils von der Variante C1.1 mit 0,4 M.-% bis zur Variante C1.5 mit 16,5 M.-% vorhanden. Nach Einstufung laut DIN 18196 handelt es sich bei C1.1 und C1.2 um intermittierend gestufte Kiese (GI) während es sich bei C1.3 und C1.4 um Kies-Schluff-Gemische mit geringem Anteil des Feinkorns < 0,063mm handelt. Bei C1.5 steigert sich der Schluffanteil über 15 M.-% auf 16,5 M.-%; d.h. laut DIN 18196 fällt die Variante unter Kies-Schluff-Gemische mit hohem Anteil des Feinkorns < 0,063mm. Zudem hat die Variante C1.5 mit 2,3 M.-% den höchsten Tonanteil.

Im Variantenblock C2 wurden die geplanten Werte bezüglich des **Tonanteils** bei der Mischung nicht erreicht, da der eingebrachte Ton nicht den Anteil an Ton enthielt, der auf dem technischen Merkblatt beschrieben wurde. Laut technischem Merkblatt beträgt der Nasssieberückstand > 45 µm (0,045 mm) 0,04 M.-%. Die Korngrößenverteilung kleiner 2 µm (0,002 mm) liegt nach Merkblatt bei 51 M.-%. Die erstellte Körnungslinie nach KIBLER (2013) ergab jedoch einen Tongehalt (kleiner 2 µm) von lediglich 12 M.-% sowie einen Feinschluffanteil (2 µm bis 6 µm) von ca. 40 M.-%. Die Varianten C2.1 und 2.2 ähneln den Varianten C1.3 und C1.4 und stellen somit auch Kies-Schluff-Gemische mit geringem Anteil des Feinkorns < 0,063mm dar.

Ungünstig war zudem, dass die Stoffmenge für die Variante B1 lediglich für drei statt der fünf **Wiederholungen** ausreichte. Erschwerend kam hinzu, dass eine Versuchspflanze der Variante B1 im frühen Verlauf des Versuches ausfiel und somit lediglich zwei Versuchskörper mit in die Auswertung einbezogen werden konnten. Des Weiteren verringerte sich durch den **Ausfall von Versuchspflanzen** die Anzahl der Wiederholungen bei Variante A1 und B2 auf jeweils vier Wiederholungen. Für die durchgeführten statistischen Auswertungen ist dieser Ausfall jedoch irrelevant, da fehlende Werte rechnerische ausgeglichen werden können.

Für die Ermittlung der **Porengrößenverteilungen** wurden die Stoffe mit der jeweiligen Proctordichte verwendet. Abgeleitet wurden sodann das **Gesamtporenvolumen**, die **nutzbare Feldkapazität** sowie die **Luftkapazität**. Da die Versuchsgefäße selber jedoch im Außenbereich standen und zusätzlich bewässert worden sind, sind die direkten Abhängigkeiten zwischen dem Wurzelwachstum und dem Wasser- und Lufthaushalt mit Vorsicht zu interpretieren, da diese durch die externen Faktoren beeinflusst wurden (vgl. 5.1).

Wie bei der Ermittlung der Proctordichten, erwiesen sich auch bei der Methode zur Porengrößenverteilung die Stoffe ohne Feinanteile als problematischer. Die ursprünglich für Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate verwendete Methode zeigte für die Varianten A4, B1 und B2 einen Totwasseranteil von bis zu 2,7 Vol.-% an, der jedoch bei diesen Stoffen nicht zu erwarten ist. Es wird vermutet, dass sich die Werte dadurch ergeben, dass Wasser außen an den Stoffen anhaftet und nicht durch die saugende Unterlage entzogen wird (vgl. KIBLER 2013, S. 60).

Als Messgröße für die Durchwurzelungsintensität wurde die **Wurzelfrischmasse** aufgenommen. Hiermit wurde eine quantifizierbare Auswertung möglich. Trotz **Wurzelverlusten**, die durch das Lösen der Bettungstoffe vom Wurzelwerk, durch das Waschen der Wurzeln entstanden sind, wird die Methode, obgleich eines hohen Zeit- und Arbeitsaufwands, als geeignet gewertet. Einschränkungen in der Anwendbarkeit ergeben sich bei größeren Gefäßen, wenn die Wurzelmassen zur Aufnahme zu groß ausfallen und diese nicht mehr handhabbar sind.

Zusätzlich zur quantifizierten Auswertung der Wurzelmassen sind bei allen durchgeführten Gefäßversuchen die **visuellen Beobachtungen** ein wertvoller Bestandteil, um Rückschlüsse für die Praxisempfehlungen ziehen zu können. Zur qualitativen Auswertung trägt dabei die **fotographische Dokumentation** der oberirdischen Pflanzenteile sowie der gewaschenen Wurzelwerke bei. Hierdurch kann ein anschaulicher Beweis für die Entwicklung der Pflanzen geführt werden.

Neben der Wurzelfrischmasse fand die Messung des längsten Sprosses je Versuchspflanze statt, um die Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile zu dokumentieren. Zur Massenermittlung (Frisch- und Trockenmasse in Gramm) wurden die Blätter der Pflanzen entfernt. Um die Frisch- und Trockenmassen der Wurzeln zu ermitteln, wurden die Wurzelballen nach Entfernung des KG-Rohrs gewaschen. Zur Reduzierung von Wurzelverlusten, wurde das Wasser aufgefangen und durchgeseibt. Neben den Blatt- und Wurzelmassen wurden ebenso die Massen der Sprosse aufgenommen. Das Vorgehen stellte sich insgesamt als eine geeignete Methode heraus.

Um **Langzeitbeobachtungen** hinsichtlich der Schadenaufkommen im Bereich der Wegedecken vornehmen zu können, sind lange Versuchszeiten Voraussetzung. In diesem Fall ist insgesamt die Anwendung von Gefäßversuchen vermutlich nicht sinnvoll.

4.3 Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit bodenchemischer Baustoffeigenschaften

Die folgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Gefäßversuch nach SCHLOMBS 2012 (vgl. 3.3.1).

4.3.1 Entwicklung der oberirdischen Pflanzenteile

Das Gewicht der 132 Versuchspflanzen betrug zu Versuchsbeginn im Mittel 313,62 Gramm. Die Darstellung des Box Plots zeigt, dass bei der Variante mit dem Glasasche Granulat im Schnitt zufällig die Pflanzen mit dem höchsten Ausgangsgewicht ausgewählt wurden (vgl. Abb.80). Bei dieser Variante betrug das mittlere Pflanzengewicht 367,63 Gramm. Bei der Variante mit dem Gabbro als Bettungsstoff betrug das mittlere Pflanzengewicht 266,63 Gramm. Insgesamt lag das Gewicht der Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn zwischen 192,2 Gramm bis 480,9 Gramm (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 58).

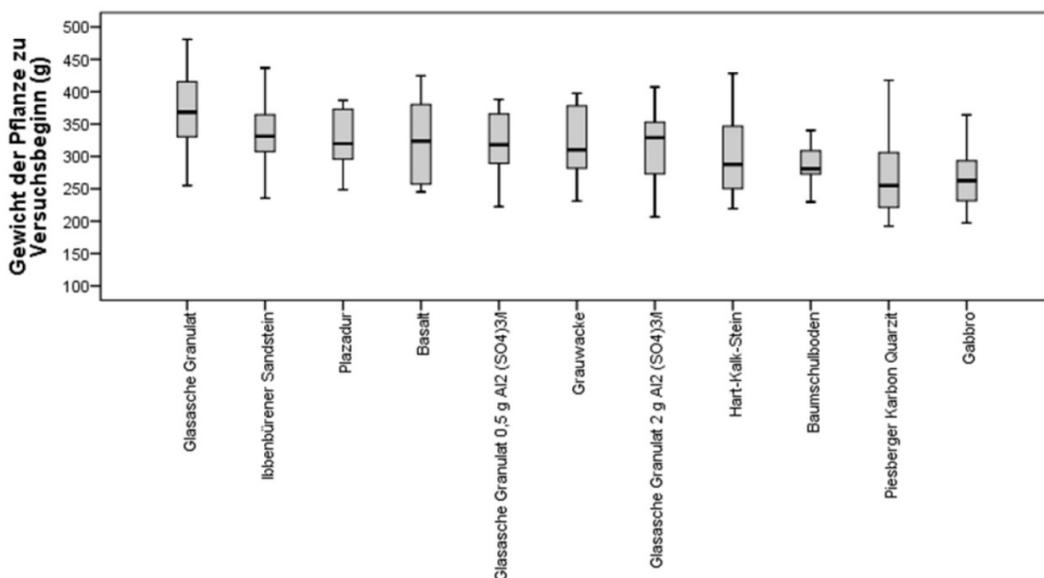


Abb. 80: Box Plots zum Vergleich des Pflanzengewichts (g) der 132 verwendeten Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn (n = 12)

Zwei Wochen nach Aufstellen der einzelnen Versuchskörper waren alle Pflanzen der unterschiedlichen Bettungsstoffe gleichmäßig ausgetrieben. Ein Unterschied zwischen den einzelnen Varianten bei den oberirdischen Pflanzenteilen war augenscheinlich zu diesem Zeitpunkt nicht zu erkennen. Während der weiteren Versuchslaufzeit entwickelten sich nach bloßer Beobachtung alle Pflanzen gleich. Eine Ausnahme stellte die Variante 7 (lbbenbürener Sandstein) dar. Die Pflanzen der Variante 7 (lbbenbürener Sandstein) wuchsen einen Monat nach Aufstellen der Versuchskörper langsamer und bildeten weniger Blätter aus (vgl. Abb. 81). Die langsamere Entwicklung der Variante 7 (lbbenbürener Sandstein) zog sich bis Versuchsende. Insgesamt ist hinsichtlich des Zuwachses hier einer der geringsten Werte zu verzeichnen (vgl. Abb. 87). Zudem nahm die Ansäuerung mit der Aluminiumsulfat-Lösung einen Einfluss auf die weitere Entwicklung der Pflanzen der Varianten 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l) und 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l). Bereits vier Tage (am 02.08.2011) nach Aufbringen der zweiten Aluminiumsulfat-Lösung war ersichtlich, dass die Sprosse der Variante 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l)

absterben. Die Blätter der *Salix purpurea* wurden schwarz und fielen ab. Ebenso verfärbten sich die Triebe schwarz. Bei den Pflanzen der Variante 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l) wurden die Blätter am 04.08.2011 vereinzelt gelb und lösten sich von den Trieben. Drei Wochen nach Aufbringen der Lösung wurde jedoch beobachtet, dass sowohl die Pflanzen der Variante 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l) als auch der Variante 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l) neue Knospen aufwiesen und neue Triebe bildeten. Das darauf folgende Wachstum der Pflanze der beiden Varianten verlief insgesamt langsamer (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 55).



Abb. 81: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1; Varianten 1, 7, 11, 3 und 9 am 05.08.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 82: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 3; Varianten 11 und 10 am 12.08.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 83: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1/2; Varianten 6 und 7 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 7 sind verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 84: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 2; Varianten 3 und 10 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 10 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 85: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 2; Varianten 9 und 11 am 02.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 86: Entwicklungsstand der Versuchspflanzen in Block 1; Varianten 1, 7, 11 und 3 am 30.09.2011 (von rechts nach links). Versuchspflanzen der Varianten 7 sind verkümmert ausgebildet. Versuchspflanzen der Variante 11 zeigen schwarze abgestorbene Blätter und Sprosse auf. Foto: SCHLOMBS 2012

Die Darstellung des Zuwachses zeigt, dass, wie auch visuell beobachtet, die Varianten 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l), Variante 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l) und Variante 7 (Ibbenbürener Sandstein) den geringsten Zuwachs aufweisen.

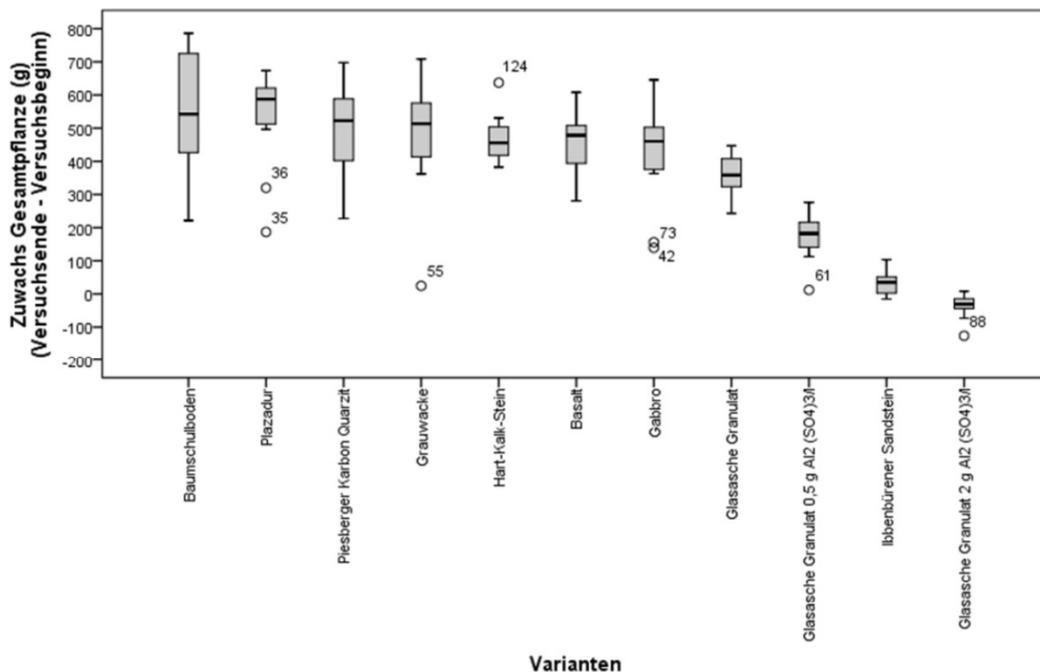


Abb. 87: Box Plot zum Vergleich des Zuwachses des Pflanzengewichtes während der Versuchslaufzeit (n = 12)

Abbildung 88 zeigt die Mittelwerte der Sprosslängen des jeweils längsten Sprosses zu Versuchsende. Hier zeigt sich, dass die jeweils zwölf Versuchspflanzen der Varianten 2 (Plazadur), Variante 3 (Karbon Quarzit) sowie Variante 1 (Baumschulboden) und

Variante 6 (Gabbro) die längsten Sprosslängen zu Versuchsende aufweisen. Wohingegen die oben beschriebene langsame Entwicklung mit der geringen Zuwachsrates der Varianten 7 (Ibbenbürener Sandstein), 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l) und 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l) auch in der Entwicklung der kurzen Sprosslängen deutlich wird (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 60).

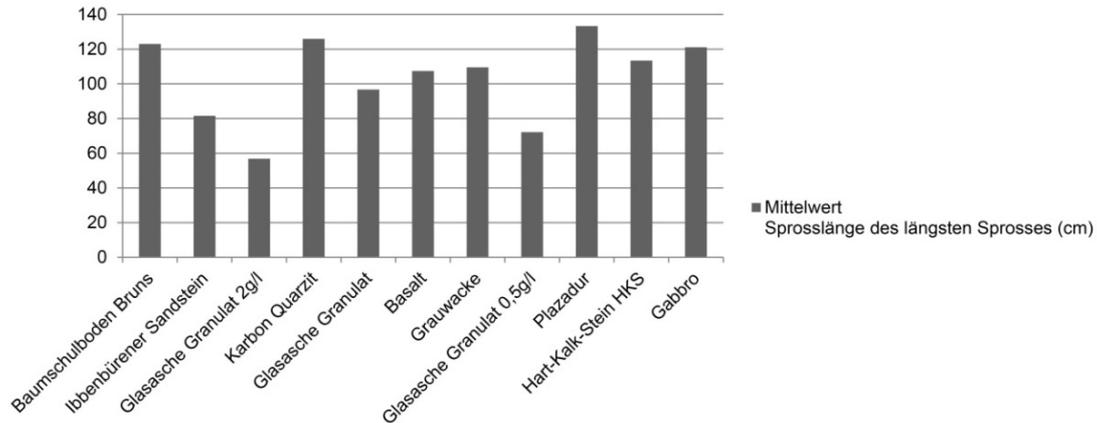


Abb. 88: Vergleich der Mittelwerte der Sprosslängen des längsten Sprosses (cm) zu Versuchsende (n = 12)

4.3.2 Wurzelentwicklung zu Versuchsende

Tabelle 36 zeigt den Mittelwert der erfassten Wurzelfrischmassen der Varianten.

Tab. 36: Wurzelfrischmassen (g) der Varianten

Variante/Stoffe	Mittelwert	Minimum	Maximum	Median	Spannweite	Standardabweichung
Variante 1; n = 12 Baumschulboden	431,33	275,00	600,00	437,00	325,00	104,06
Variante 2; n = 12 Plazadur	410,92	209,00	487,00	427,00	278,00	72,74
Variante 3; n = 12 Karbon Quarzit	406,67	244,00	628,00	422,50	384,00	100,66
Variante 4; n = 12 Basalt	421,08	318,00	540,00	405,50	222,00	66,31
Variante 5; n = 12 Grauwacke	429,42	159,00	577,00	460,00	418,00	115,67
Variante 6; n = 12 Gabbro	348,33	170,00	500,00	370,00	330,00	105,43
Variante 7; n = 12 Ibbenbürener Sandstein	157,67	115,00	218,00	151,00	103,00	29,32
Variante 8; n = 12 Hart Kalk Stein	398,42	345,00	528,00	379,00	183,00	56,22
Variante 9; n = 12 Glasasche Granulat	393,08	319,00	462,00	390,00	143,00	47,67
Variante 10; n = 12 Glasasche Granulat 0,5 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	255,00	165,00	345,00	260,50	180,00	55,32

Variante 11 ; n = 12 Glasasche Granulat 2,0 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	138,83	89,00	175,00	144,50	86,00	29,58
Frischmasse (gesamt) ; n = 132	343,88	89,00	628,00	361,50	539,00	128,86

Den geringsten Mittelwert der Wurzelfrischmasse weist mit 138,83 g die Variante 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l) auf. Während Variante 1 (Baumschulboden) mit einem Mittelwert von 431,33 g das höchste Wurzelfrischmassengewicht verzeichnet.

Die Darstellung der Box Plots (vgl. Abb. 89) zeigt zudem die unterschiedlichen Streuungen der Einzelwerte. So liegt bei Variante 5 (Grauwacke) mit 418 Gramm die höchste Streubreite vor. Dagegen zeigen die Varianten mit Plazadur, Hart-Kalk-Stein, Ibbenbürener Sandstein sowie Glasasche Granulat mit einer Ansäuerung von 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l die geringsten Streuungen auf.

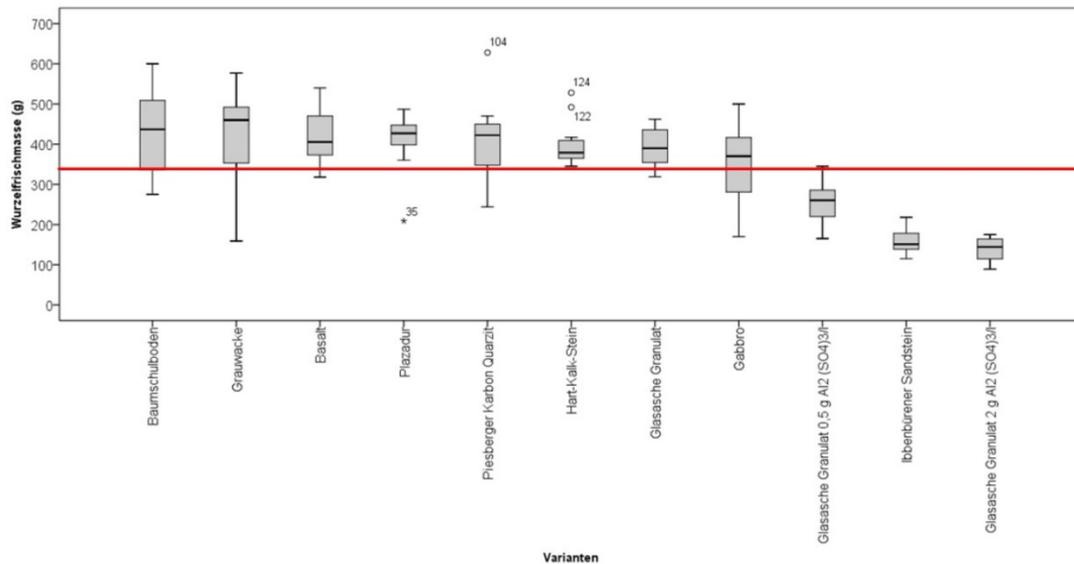


Abb. 89: Box Plots zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der unterschiedlichen Varianten (n = 12); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Gefäßversuches von 343,88 Gramm

Der **varianzanalytische Vergleich** der Wurzelfrischmassen zeigt, dass insgesamt ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten besteht (vgl. 4.3.3; Varianzanalyse). So zeigt sich der deutlichste Unterschied zwischen der Gruppe aus Varianten 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/Al₂(SO₄)₃/l), 7 (Ibbenbürener Sandstein) und 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/Al₂(SO₄)₃/l) und den übrigen Varianten (vgl. 4.3.3; Tukey Test).

Die Abbildungen der Versuchspflanzen mit den Wurzelballen bestätigen die gemessenen Werte (vgl. Abb. 90 – 93). Gegenüber der Variante 1 (Baumschulboden) haben die Varianten 7 (Ibbenbürener Sandstein), 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$) und 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$) einen wenig ausgeprägten Wurzelballen und ein verkürztes Triebwachstum. Die Wurzelstruktur der einzelnen Versuchspflanzen unterscheidet sich jedoch nicht.



Abb. 90: Gewaschene Wurzelballen der Variante 1, Baumschulboden Bruns. Wurzelballen sind gut ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 91: Gewaschene Wurzelballen der Variante 7, Ibbenbürener Sandstein. Wurzelballen sind stark verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 92: Gewaschene Wurzelballen der Variante 10, Glasasche Granulat mit 0,5 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$. Wurzelballen sind verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012



Abb. 93: Gewaschene Wurzelballen der Variante 11, Glasasche Granulat mit 2 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$. Wurzelballen sind stark verkümmert ausgebildet. Foto: SCHLOMBS 2012

4.3.3 Varianzanalytischer Vergleich der Varianten

Die Durchführung der Varianzanalyse erfolgt mit den **aggregierten Daten** unter Berücksichtigung der drei Blöcke sowie des Gesamtgewichts der Pflanzen zu Versuchsbeginn.

Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der Varianzanalyse

Der Shapiro-Wilk Test als Test der Residuen auf **Normalverteilung** zeigt, dass eine Normalverteilung der Residuen vorliegt ($p=0,946$) und somit hinsichtlich dieser Voraussetzung eine Varianzanalyse gerechnet werden kann.

Tab. 37: Test auf Normalverteilung der Residuen

	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
Residuen für Wurzelfrischmasse_mean	,986	33	,946

Die statistischen Untersuchungen der Daten haben des Weiteren ergeben, dass eine annähernde **Varianzhomogenität** (Levene $p=0,04$) vorliegt.

Tab. 38: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Wurzelfrischmasse (g)	2,423	10	22	,040

Varianzanalyse

Die durchgeführte Varianzanalyse zeigt, dass es zum einen keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Blöcken gibt ($p=0,193$). Das bedeutet, dass die einzelnen Wiederholungsblöcke keinen Effekt auf die Wurzelfrischmasse ausüben. Obwohl das Gewicht der Gesamtpflanzen zu Versuchsbeginn unterschiedlich ausgefallen ist, hat es laut Varianzanalyse ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende ($p=0,082$). Signifikante Unterschiede bestehen jedoch zwischen den Varianten ($p=0,000$) selber.

Tab. 39: Test der Zwischensubjekteffekte; abhängige Variable: Wurzelfrischmasse

Quelle	Quadrat-		Mittel der	F	Sig.
	summe vom	df			
	Typ III				
Korrigiertes Modell	368332,922 ^a	13	28333,302	15,141	,000
Konstanter Term	3929,125	1	3929,125	2,100	,164
Block	6713,143	2	3356,572	1,794	,193
Variante	361463,973	10	36146,397	19,317	,000
Gewicht der Pflanze zu Versuchsbeginn	6295,479	1	6295,479	3,364	,082
Fehler	35553,968	19	1871,261		
Gesamt	4306223,375	33			
Korrigierte Gesamtvariation	403886,890	32			

a. R-Quadrat = ,912 (korrigiertes R-Quadrat = ,852)

Tukey Test

Der zur Ergänzung der Varianzanalyse durchgeführte Tukey Test zeigt, zwischen welchen Varianten ein signifikanter Unterschied besteht. Insgesamt sind hier drei homogene Untergruppen zu verzeichnen zwischen denen ein signifikanter Unterschied vorhanden ist. Innerhalb der aufgezeigten Untergruppen gibt es demnach keinen signifikanten Unterschied bei den Mittelwerten der Wurzelfrischmasse.

Tab. 40: Tukey-HSD^{a,b} Wurzelfrischmasse (g)

Variante	N	Untergruppe		
		1	2	3
Glasasche Granulat 2,0 g Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	3	138,8333		
Ibbenbürener Sandstein	3	157,6667		
Glasasche Granulat 0,5 g Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	3	255,0000	255,0000	
Gabbro	3		348,3333	348,3333
Hart-Kalk-Stein	3			390,3333
Glasasche Granulat	3			393,0833
Karbon Quarzit	3			406,6667
Plazadur	3			410,9167
Basalt	3			421,0833
Grauwacke	3			429,4167
Baumschulboden	3			431,3333
Sig.		,132	,360	,515

Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt.

Grundlage: beobachtete Mittelwerte.

Der Fehlerterm ist Mittel der Quadrate(Fehler) = 2092,472.

a. Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 3,000

b. Alpha = ,05

4.3.4 Bodenchemische Eigenschaften der Bettungsstoffe

Die eingesetzten Baustoffe wurden auf ihre vegetationstechnischen, bodenchemischen Eigenschaften hin untersucht. Aufgenommen wurden die Bodenreaktion (pH-Wert), der Salzgehalt, der Gehalt an löslichem Calcium sowie zur weiteren Charakterisierung der Stoffe die Nährstoffgehalte. Die Angaben der Salz-, Calcium- und Nährstoffgehalte bezieht sich auf die in Tabelle 41 dargestellten Volumengewichte.

Tab. 41: Volumengewichte der ungebundenen Bettungsstoffe

Variante / Stoffe	Volumengewicht g/L	
	Versuchsbeginn	Versuchsende
1 Baumschulboden	1.320	1.310
2 Plazadur	1.620	1.430
3 Karbon Quarzit	1.710	1.480
4 Basalt	1.770	1.580
5 Grauwacke	1.490	1.430
6 Gabbro	1.630	1.500
7 Ibbenbürener Sandstein	1.450	1.480
8 Hart-Kalkstein	1.800	1.550
9 Glasasche Granulat	1.380	1.340

Volumengewicht: nach VDLUFA A 13.2.1 (Untersucht durch LUFA Nord-West)

Im Bereich des **pH-Wertes** haben die meisten verwendeten Bettungsstoffe zu Versuchsbeginn einen Wert im schwach alkalischen Bereich um pH 7. Ausnahmen stellen der Baumschulboden mit pH 5,0 sowie der Ibbenbürener Sandstein mit pH 3,9 dar. Nach Aufbringen der Aluminiumsulfat-Lösungen ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) am 25.07.2011 und am 29.07.2011 wurde einen Tag später der pH-Wert der Bettungsstoffe der Varianten 10 und 11 gemessen. Dieser lag bei Variante 10 (Glasasche Granulat angesäuert mit 0,5 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ /l) bei pH 4,0 und bei Variante 11 (Glasasche Granulat angesäuert mit 2,0 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ /l) bei pH 3,8. Zu Versuchsende sind die pH-Werte bei sieben von den neun Bettungsstoffen gesunken. Eine leichte Steigerung wurde bei dem Baumschulboden und dem Hart-Kalkstein festgestellt.

Tab. 42: Bodenreaktion der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 47)

Variante / Stoffe	pH-Wert (in CaCl_2)	
	Versuchsbeginn	Versuchsende
1 Baumschulboden	5,0	5,2
2 Plazadur	7,4	5,8
3 Karbon Quarzit	7,2	7,0
4 Basalt	7,6	7,0
5 Grauwacke	7,8	7,3
6 Gabbro	7,6	6,0
7 Ibbenbürener Sandstein	3,9	3,5
8 Hart-Kalkstein	7,8	7,9
9 Glasasche Granulat	7,7	5,9

pH-Wert: in 0,01 mol/l CaCl_2 -Lösung; Messung mit Elektrode; nach VDLUFA | A 5.1.1 (Untersucht durch LUFA Nord-West)

Weitere pH-Wert Messungen am 19.08.2011 und am 19.09.2011 bei Variante 10 und 11 ergaben eine stetige Zunahme des Wertes bis zu pH 6,3 (vgl. Tab. 43).

Tab. 43: Entwicklung des pH-Werts bei Variante 10 und 11 (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 53)

Variante/Stoffe	pH-Wert (in CaCl ₂) zu Versuchsbeginn nach Ansäuerung	pH-Wert (in CaCl ₂) 19.08.2011	pH-Wert (in CaCl ₂) 19.09.2011	pH-Wert (in CaCl ₂) zu Versuchsende
10 Glasasche Granulat 0,5 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	4,0	4,5	5,0	6,3
11 Glasasche Granulat 2,0 g/Al ₂ (SO ₄) ₃ /l	3,8	4,0	4,5	6,3

Mit 13 mg/ 100 g weist der Basalt zu Versuchsbeginn den niedrigsten **Salzgehalt** auf. Wohingegen der Ibbenbürener Sandstein mit 69 mg/ 100 g den höchsten Salzgehalt besitzt. Insgesamt können die Stoffe als salzarm bezeichnet werden.

Tab. 44: Salzgehalt der ungebundenen Bettungsstoffe zu Versuchsbeginn

Variante / Stoffe	Salzgehalt mg KCl/L Bettungsstoff	Salzgehalt mg/100 g
1 Baumschulboden	450	34
2 Plazadur	500	31
3 Karbon Quarzit	260	15
4 Basalt	230	13
5 Grauwacke	390	26
6 Gabbro	610	37
7 Ibbenbürener Sandstein	1.000	69
8 Hart-Kalkstein	630	35
9 Glasasche Granulat	270	20

Salzgehalt: Bestimmung in Wasserauszug nach VDLUFA A 13.4.1 (Berechnung des Salzgehaltes als Kaliumchlorid nach Messung der Leitfähigkeit der filtrierten Extrakte) (Untersucht durch LUFA Nord-West)

Hinsichtlich des **Calcium-Gehalts** zu Versuchsbeginn zeigt sich mit 218 mg pro Liter der höchste Wert beim Bettungsstoff Ibbenbürener Sandstein. Den niedrigsten Wert weist der Baumschulboden mit 66 mg pro Liter auf. Bei allen Bettungsstoffen außer beim Baumschulboden ist eine Senkung des Calcium-Gehaltes während der Versuchslaufzeit festzustellen. Die höchste Minderung trat bei den Bettungsstoffen Grauwacke, Gabbro sowie Ibbenbürener Sandstein auf. Ebenso dargestellt werden in der Tabelle 45 die Calciumgehalte umgerechnet in Milligramm pro 100 Gramm Bettungsstoff (mg/100 g).

Tab. 45: Calciumgehalt der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 46)

Variante / Stoffe	Ca ²⁺ - Gehalt		Ca ²⁺ - Gehalt	
	(mg/L Bettungsstoff)		(mg/100 g)	
	Versuchs- beginn	Versuchs- ende	Versuchs- beginn	Versuchs- ende
1 Baumschulboden	66	66	5	5
2 Plazadur	81	72	5	5
3 Karbon Quarzit	86	74	5	5
4 Basalt	89	79	5	5
5 Grauwacke	149	72	10	5
6 Gabbro	163	75	10	5
7 Ibbenbürener Sandstein	218	74	15	5
8 Hart-Kalkstein	270	233	15	15
9 Glasasche Granulat	69	67	5	5

Ca²⁺- Gehalt: Bestimmung in Wasserauszug; aus der Lösung zur Bestimmung des Salzgehaltes nach VDLUFA A 13.4.1 (Untersucht durch LUFA Nord-West)

Zusätzlich wurden die **Nährstoffgehalte** der eingesetzten Bettungsstoffe zu Versuchsbeginn und –ende aufgenommen (vgl. Tab. 46), um die Gehalte selber aufzuzeigen sowie einen möglichen Einfluss ggf. auszuschließen.

Tab. 46: Nährstoffgehalte der ungebundenen Bettungsstoffe (vgl. SCHLOMBS 2012, Anhang 1.2)

Variante / Stoffe	NO ₃ -N		NH ₄ -N		P ₂ O ₅		K ₂ O		Mg	
	(mg/L Bettungsstoff)									
	VB	VE	VB	VE	VB	VE	VB	VE	VB	VE
1 Baumschulboden	26	26	13	13	92	144	92	66	66	39
2 Plazadur	32	29	16	14	16	57	211	86	97	57
3 Karbon Quarzit	17	30	17	15	17	59	137	74	51	59
4 Basalt	18	16	18	16	18	79	230	126	177	158
5 Grauwacke	15	14	15	1	15	29	104	43	104	100
6 Gabbro	33	15	16	1	16	30	375	90	82	30
7 Ibbenbürener Sandstein	29	30	15	59	15	30	131	89	73	30
8 Hart-Kalkstein	18	16	18	1	18	16	36	16	36	31
9 Glasasche Granulat	28	13	14	1	14	13	97	13	28	13

VB: Versuchsbeginn

VE: Versuchsende

Bestimmung mit CAT-Methode nach VDLUFA A 13.1.1 (Untersucht durch LUFA Nord-West)

NO₃-N – Nitratstickstoff

NH₄-N - Ammoniumstickstoff

P₂O₅ - Phosphorpentoxid

K₂O - Kaliumoxid

Mg - Magnesium

4.3.5 Bodenphysikalische Eigenschaften der Bettungstoffe

Ebenso zur tieferen Charakterisierung werden die Ergebnisse der Korngrößenverteilung zur weiteren Beschreibung der Stoffe an dieser Stelle mit aufgezeigt. Die Darstellung der **Korngrößenzusammensetzung** in Tabelle 47 beinhaltet auch die Einteilung nach DIN 18196. Hiernach wird deutlich, dass die verwendeten Bettungstoffe sowohl Sande als auch Kiese sind. Bei den Kiesen sind neben den weitgestuften Kiesen (Grauwacke) auch enggestufte (Basalt) sowie intermittierend gestufte Kiese (Karbon Quarzit) und Kies-Schluff-Gemische (Gabbro, Hart-Kaltstein, Glasasche Granulat) vorzufinden. Der Baumschulboden und der Plazadur sind Sand-Schluff-Gemische, bei denen der Massenanteil an Sand über 60 Prozent liegt. Dieses trifft auch bei den enggestuften Ibbenbürener Sandstein zu. Trotz einer gleichen Körnung von 0/5 weisen die einzelnen Bettungstoffe Unterschiede in der anteiligen Korngrößenzusammensetzung auf.

Tab. 47: Korngrößenzusammensetzung der Bettungstoffe (Messergebnisse nach SCHLOMBS 2012, S.47)

Variante / Stoffe	Anteil > 2 mm (M.-%)	Anteil 0,063 – 2 mm (M.-%)	Anteil bei 0,063 mm (M.-%)	Einordnung nach DIN 18196
1 Baumschulboden	0,2	99,8	11,3	SU
2 Plazadur	22,7	77,3	13,2	SU
3 Karbon Quarzit	45,3	54,7	2,6	GI
4 Basalt	53,2	46,8	2,6	GE
5 Grauwacke	79,1	20,9	4,9	GW
6 Gabbro	52,1	47,9	6,5	GU
7 Ibbenbürener Sandstein	29,9	70,1	2,2	SE
8 Hart-Kalkstein	69,1	30,9	7,9	GU
9 Glasasche Granulat	49,9	50,1	13,8	GU

Korngrößenverteilung: nach DIN EN 933-1, 2 (2011); Nasssiebung für Körnung < 0,063 mm und Trockensiebung für > 0,063 mm

Einstufung nach DIN 18196 (2011):

GW – weitgestufter Kies
GU – Kies-Schluff-Gemisch
GE – enggestufter Kies
GI – intermittierend gestufter Kies
SE – enggestufter Sand
SU – Sand-Schluff-Gemisch

4.3.6 Regressionsanalytische Betrachtung der Einflussfaktoren

Folgend werden mögliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen untersuchten bodenchemischen Faktoren und der erhobenen Wurzelfrischmassen aufgezeigt. Die Betrachtung der Faktoren bezieht sich jeweils auf die zu Versuchsbeginn ermittelten Werte. Die Analyse erfolgt mit den aggregierten Daten.

Bodenreaktion

Anhand des Streudiagramms in Abbildung 94 kann ein schwacher positiv linearer Zusammenhang zwischen der Wurzelfrischmasse und der **Bodenreaktion** (pH-Wert) angenommen werden. Die niedrigsten Wurzelfrischmassen werden bei den Stoffen mit den niedrigsten pH-Werten erreicht. Einen Ausreißer stellt in diesem Zusammenhang der Baumschulboden dar; trotz eines niedrigen pH-Werts von 5,0 entwickelte sich in diesem Substrat eine relativ hohe Wurzelfrischmasse. Bei pH-Werten zwischen 7,2 und 7,8 entwickelten sich ähnliche Wurzelfrischmassen, die sich aber deutlich von den Frischmassen der sauren Substrate absetzten. Werden die mit Aluminiumsulfat angesäuerten Varianten aus dieser Betrachtung ausgeschlossen schwächt sich hingegen der positiv lineare Zusammenhang weiter ab.

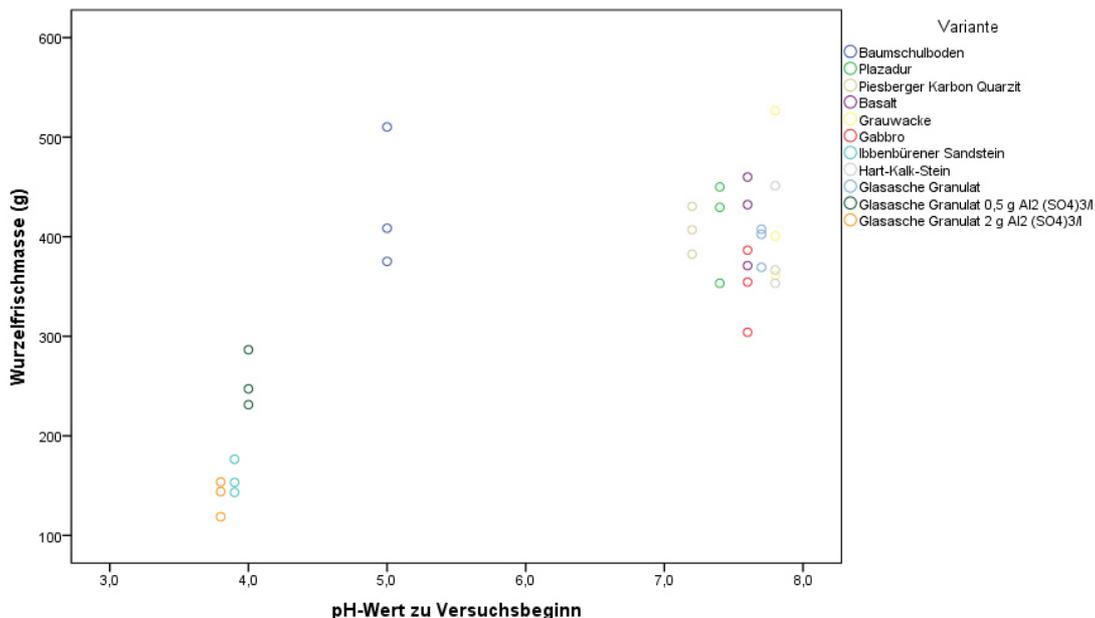


Abb. 94: Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des pH-Werts der Bettungstoffe

Calciumgehalt

Hinsichtlich des **Gehaltes an löslichem Calcium** kann mit Hilfe des Streudiagramms kein Zusammenhang zur Wurzelfrischmasse erkannt werden (vgl. Abb. 95). Nicht mit in die Betrachtung einbezogen wurden die mit Aluminiumsulfat angesäuerten Varianten. Nimmt man den Ibbenbürener Sandstein aus dieser Betrachtung heraus, zeigt sich noch deutlicher, dass kein Zusammenhang zwischen dem Calciumgehalt und der Wurzelfrischmasse erkennbar wird.

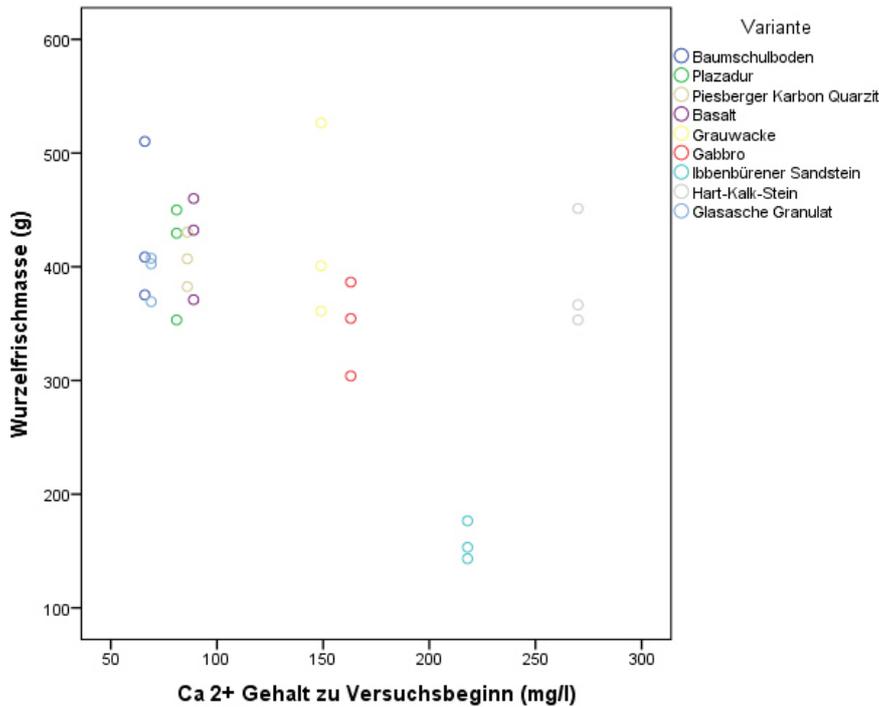


Abb. 95: Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des Calciumgehalts der Bettungsstoffe

Salzgehalt

Der Ibbenbürener Sandstein mit seinem im Verhältnis hohen **Salzgehalt** zeigt die geringste Wurzelfrischmasse auf. Wohingegen die übrigen Varianten mit einem niedrigeren Salzgehalt auch höhere Wurzelfrischmassen aufweisen (vgl. Abb. 96). Nicht mit in die Betrachtung einbezogen wurden die mit Aluminiumsulfat angesäuerten Varianten.

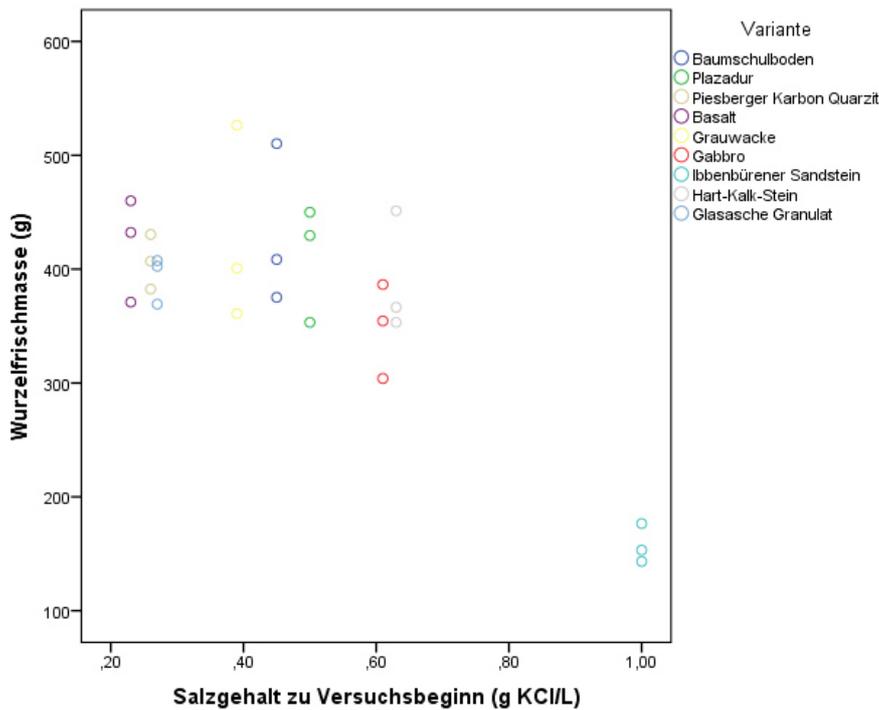


Abb. 96: Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit des Salzgehalts der Bettungsstoffe aus dem Gefäßversuch

4.3.7 Methodenbetrachtung

Die zu untersuchende Gesamtheit ist bei Gefäßversuchen auf Grund u.a. von räumlichen, zeitlichen oder finanziellen Rahmenbedingungen eingeschränkt. Zudem ergeben sich neben den untersuchten Faktoren bei einem **Gefäßversuch im Außenbereich** stets weitere Einflüsse wie zum Beispiel das Klima. Ziel des Versuches ist es dennoch mit den Ergebnissen eine Annäherung an allgemeingültige Aussagen zu gewinnen. Mit dem durchgeführten Gefäßversuch konnte der Einfluss des pH-Wertes und des pflanzenverfügbaren Calciumionengehalts auf die Durchwurzelung in der **Laufzeit** von vier Monaten untersucht werden.

Wie bei den übrigen Gefäßversuchen wurde sich hinsichtlich der **Versuchspflanze** auf *Salix purpurea* beschränkt. Bezogen auf die Bodenreaktion kann *Salix purpurea* zu den kalktoleranten Gehölzen gezählt werden (vgl. SCHIECHTL u. STERN 2002, S. 31). Somit wurde davon ausgegangen, dass die Pflanze auf Absenkungen des pH-Wertes reagieren wird. Um annähernd gleiche Ausgangsbedingungen für den Versuch zu gewährleisten, wurden die einzelnen Pflanzen so ausgewählt und beschnitten, dass augenscheinlich gleichgroße Pflanzen verwendet wurden. Wie die Varianzanalyse bestätigte, hatte das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende.

Um genauere Aussagen zu den Reaktionen der im Straßenraum angewendeten Baumgattungen zu treffen, müssten weitere Versuche mit mehreren, ausgewählten Gattungen durchgeführt werden. Hierbei müsste zudem die Spanne der pH-Werte vergrößert werden, um genauere Schwellenwerte erheben zu können. Des Weiteren ist zu empfehlen, für die Auswahl der Bettungstoffe weitere Ausgangsgesteine anzuwenden, welche von Natur aus niedrige pH-Werte aufweisen und bautechnisch für den Geh- und Radwegebereich geeignet sind.

Als Messgröße für die Durchwurzelungsintensität wurde die **Wurzelfrischmasse** aufgenommen. Trotz **Wurzelverlusten**, die durch das Lösen der Bettungstoffe vom Wurzelwerk, durch das Waschen der Wurzeln sowie durch das Anhaften von Feinstwurzeln im Vlies entstanden sind, wird die Methode, obgleich eines hohen Zeit- und Arbeitsaufwands, als geeignet bewertet, da somit eine quantifizierbare Auswertung möglich ist. Einschränkungen in der Anwendbarkeit ergeben sich bei größeren Gefäßen, wenn die Wurzelmassen zur Aufnahme zu groß ausfallen und diese nicht mehr handhabbar sind.

Die für den Versuch ausgewählten Stoffe wurden zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende auf **bodenchemische Faktoren** hin untersucht. Untersuchungskriterien waren der Gehalt an pflanzenverfügbarem (löslichem) Calcium, der pH-Wert sowie der Salz- und Nährstoffgehalt. Zur regressionsanalytischen Auswertung ist zu erwähnen, dass sich die Betrachtung dieser Faktoren jeweils auf die zu Versuchsbeginn ermittelten Werte bezieht. Die Werte hinsichtlich der chemischen Bodenbeschaffenheit zeigen jedoch immer nur eine Momentaufnahme. Insgesamt kann von einer Schwankung der Werte während der Versuchslaufzeit ausgegangen werden. Zudem haben die Versuchspflanzen einen unterschiedlichen Verbrauch an Nährelementen. Zusätzlich zu den aufgenommenen Bodenwerten sollte deshalb unterstützend auch die Entwicklung des Pflanzenbestands dokumentiert werden. Dieses zeigt sich insbesondere bei der Untersuchung der pH-Werts. Bei den Versuchspflanzen wurden nach der Absenkung

des pH-Wertes Reaktionen im oberirdischen Pflanzenwachstum festgestellt, welche sich im Absterben von Blättern und Sprossen zeigten.

Zur Senkung des pH-Werts der Varianten 10 und 11 wurde Aluminiumsulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) verwendet. Um Bettungsstoffe in ihrem pH-Wert zu senken, gibt es keine vorausgegangene Forschung, welche möglich Methoden aufzeigt und Konzentrationen benennt (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 66). Die Methode selber zeigt sich als wirkungsvoll den pH-Wert des verwendeten Bettungstoffes zu senken. Die Anwendbarkeit in der Praxis soll unter Kapitel 5.3 weiter diskutiert werden.

Zur näheren Charakterisierung der verwendeten Stoffe wurde als bodenphysikalischer Faktor zu Versuchsbeginn die **Korngrößenverteilung** bestimmt. Hinsichtlich aller verwendeten Bettungsstoffe wurde die als Bettung häufig verwendete Körnung 0/5 gewählt. Die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung zeigen, dass trotz gleicher Angabe von 0/5 zwischen den Bettungsstoffen große Unterschiede auftreten, welche vermutlich einen weiteren Einfluss auf das Wurzelwachstum ausüben. Genauere Angaben zu den Korngrößen hätten diese weite Differenz zwar vermeiden können, allerdings wird hierbei deutlich, wie weit die Toleranzen bei praxisnahen Stoffbestellungen ausfallen (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 68).

4.4 Ergebnisse zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit hydraulisch gebundener Bettungsstoffe

Die folgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Gefäßversuch nach KÜHN 2012 (vgl. 3.4.1). Zur Untersuchung wurden hier zwei Auswertungen vorgenommen. Die erste Teilauswertung erfolgte 2011 durch KÜHN (2012). Hierbei wurde je ein Versuchskörper pro gebundener Variante und zwei Versuchskörper der ungebundenen Vergleichsvariante in die Auswertung einbezogen. Die abschließende Auswertung der übrigen Versuchskörper erfolgte im September 2013 im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

4.4.1 Entwicklung der Gesamtpflanze

Zu Versuchsbeginn (Juli 2011) stand die Ermittlung des Gewichts der Gesamtpflanzen (ohne Blattmasse). Diese Pflanzen wurden zufällig den unterschiedlichen Varianten zugeordnet. Tabelle 48 zeigt die Mittelwerte der **Frischmassen der Gesamtpflanzen** zu Versuchsbeginn. Mit 145,50 Gramm ist der Mittelwert der Pflanzen für die Variante 3 (TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat) am geringsten. Den höchsten Mittelwert erreichen mit 216,03 Gramm die Pflanzen, welche für die Variante 4 (TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas) eingesetzt wurden.

Tab. 48: Gesamtfrischmasse (g) der Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende mit Zuwachs (g); ohne Blattmasse

	Versuchs- beginn (g)	Versuchsende (Sep. 2013) (g)	Zuwachs (g)
TPM-D Portlandzement + Trass (V1)			
10A	158,90	1.207,40	1.048,50
11B	211,70	122,20	-89,50
12C	132,20	612,43	480,23
13D*	159,52	---	---
Mittelwert:	165,58	647,34	319,93
Standardabweichung:	33,28	543,44	569,00
TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl (V2)			
20E	163,22	561,20	397,98
21F*	199,12	---	---
22G	192,21	760,78	568,57
23H	144,55	753,75	609,20
Mittelwert:	174,78	691,91	344,16
Standardabweichung:	25,45	113,25	112,08
TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat (V3)			
30I	178,07	703,73	525,66
31J	128,45	1.089,56	961,11
32K	143,45	537,72	394,27
33L*	132,04	---	---
Mittelwert:	145,50	777,00	627,01
Standardabweichung:	22,63	283,12	296,70
TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas (V4)			
40M*	252,60	---	---
41N	138,75	1.276,25	1.137,50
42O	181,51	597,25	415,74
43P	291,26	966,15	674,89
Mittelwert:	216,03	946,55	742,71
Standardabweichung:	68,70	339,92	365,63
Hartkalk-Stein 0/5 (V0)			
00Q (Kappung bei Teilauswertung)	211,63	822,00	610,37
01R*	173,10	---	---
02S (Kappung bei Teilauswertung)	238,31	1.532,65	1.294,34
03T*	205,50	---	---
Mittelwert:	207,14	1.177,34	952,36
Standardabweichung:	26,79	502,51	483,64

* Versuchskörperauswertung im Rahmen der Teilauswertung in 2011

Hinsichtlich des **Zuwachses der Gesamtpflanzen** aus den gebundenen Varianten hat die Variante 4 (TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas) mit einem Mittelwert von 742,71 g den höchsten Zuwachs und die Variante 1 (TPM-D Portlandzement + Trass) mit einem Mittelwert von 319,93 g den niedrigsten Zuwachs (vgl. Tab. 48). Der niedrige Mittelwert bei Variante 1 (TPM-D Portlandzement + Trass) ist jedoch so zu erklären, dass eine der drei Pflanzen einen negativen Zuwachs aufzeigt; die Pflanze war zu Versuchsbeginn schwerer als zu Versuchsende. Mit der Ausnahme der Variante 1 (TPM-D Portlandzement + Trass) liegt der Zuwachs gesamtheitlich zwischen 394,27 Gramm (Variante 3) und 1.137,50 Gramm (Variante 4). Dabei weist Variante 2 (TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl) die geringste Spannweite auf (vgl. Abb. 97).

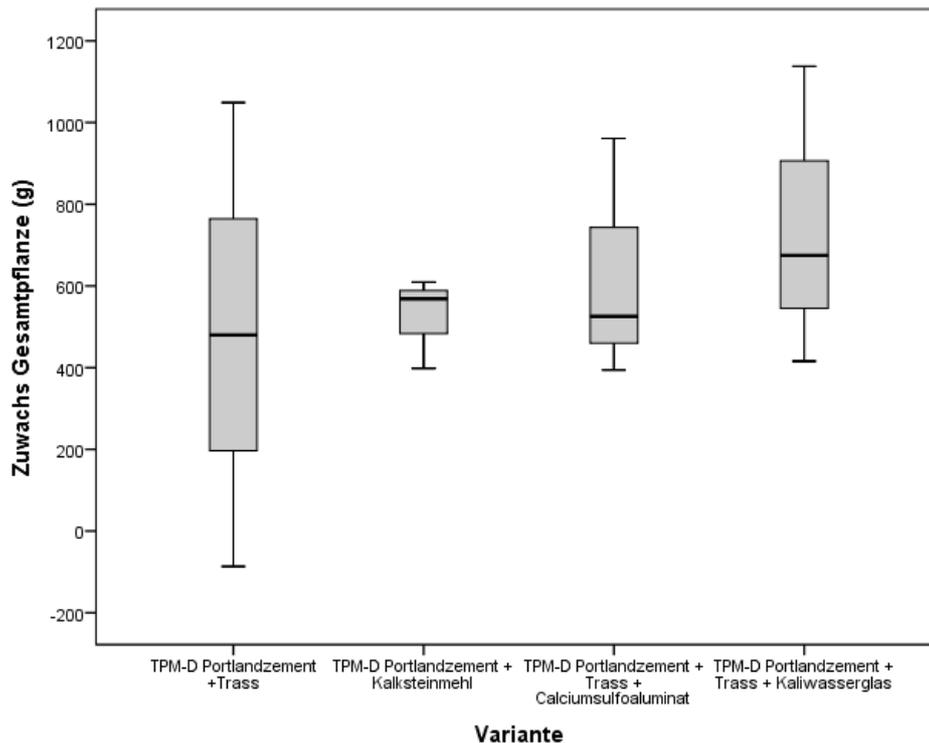


Abb. 97: Box Plot zum Vergleich des Zuwachses der Gesamtpflanzen je gebundener Variante zu Versuchsende September 2013; ohne Blattmasse (g); (n = 3)

Trotz der Kappung der oberirdischen Teile zur Teilauswertung liegt der Zuwachs der Gesamtpflanzen der ungebundenen Variante (Hart-Kalkstein) in der Spanne der Zuwächse der Gesamtpflanzen der gebundenen Varianten (vgl. Tab. 115)

Entwicklung des längsten Sprosses

Neben dem Zuwachs der Gesamtpflanze wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Mittelwerte zu den Sprosshöhen der jeweils längsten Sprosse ermittelt. Hier zeigt sich, dass bei allen vier gebundenen Varianten ein gleichmäßiges Wachstum stattgefunden hat. Die höchsten Sprosse werden bei Variante 1 (Trass) verzeichnet. Die geringsten Sprosshöhen weist zu Versuchsende Variante 3 (Calciumsulfoaluminat) auf.

Hinsichtlich der Sprossentwicklung der zwei ungebundenen Versuchskörper-Varianten mit dem Hart-Kalkstein 0/5 zeigt sich, dass die während der Teilauswertung vorschnell gekappten Pflanzen im Laufe der darauf folgenden Versuchslaufzeit wieder stark

ausgetrieben sind und zu Versuchsende Sprosslängen von 125,0 cm bzw. 155,0 cm erreichten.

4.4.2 Wurzelentwicklung zur Teilauswertung

Anzahl der Penetrationsstellen bei den gebundenen Varianten

Zur Teilauswertung wurde die **Anzahl der Penetrationsstellen** in den Innenseiten der Mörtelblöcke der gebundenen Varianten aufgenommen (vgl. KÜHN 2012, Anhang S. 28).

Tabelle 49 zeigt die **Summen der Penetrationsstellen** der vier Mörtelblockinnenseiten pro Variante. Hierbei weist Variante 3 (Calciumsulfoaluminat) mit 119 Stellen die niedrigste Anzahl auf; während Variante 2 (Gesteinsmehl) mit 443 die höchste Anzahl an Penetrationsstellen besitzt (vgl. KÜHN 2012, S. 57).

Tab. 49: Summe der Penetrationsstellen bei den Varianten zur Teilauswertung (Oktober 2011)

Varianten/Versuchskörper	Summe der Penetrationsstellen
TPM-D Portlandzement + Trass / 13D	242
TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl / 21F	443
TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat / 33L	119
TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas / 40M	244

Eindringtiefen

Bei den Mörtelblöcken ist eine maximale Eindringtiefe vom einem Zentimeter zu beobachten. Zudem zeigen sich die Wurzeln an den Penetrationsstellen teilweise verdickt (vgl. Abb. 98).

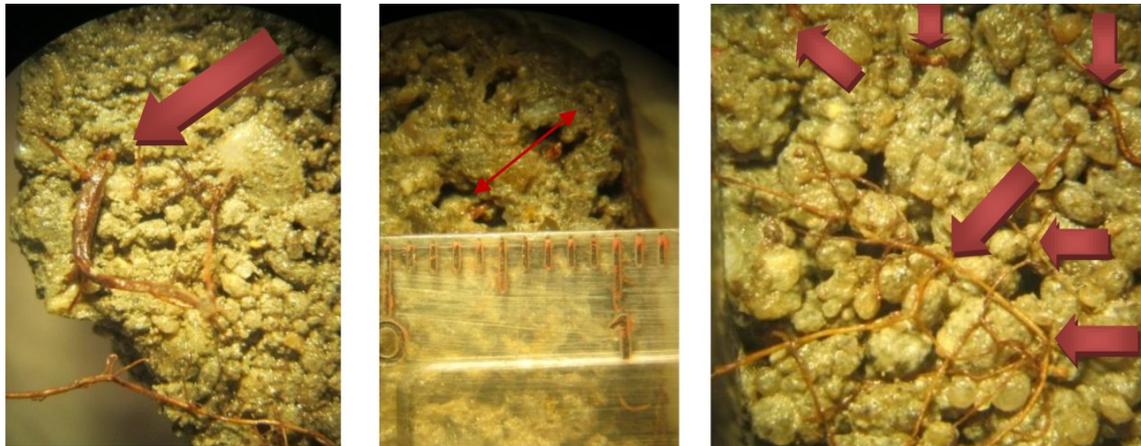


Abb. 98: (von links nach rechts) 1. Verdickte Wurzel an einer Penetrationsstelle; 2. Einwuchs von ca. 1 cm in den Mörtelblock hinein; 3. Anhaftende Wurzel mit mehreren Penetrationsstellen in den Mörtelblock (vgl. KÜHN 2012, S. 52)

Bezüglich der **Wurzelfrischmassen im Substratkern** weist Variante 3 (Calciumsulfoaluminat) als gebundene Variante mit 299,6 Gramm die geringste Wurzelfrischmasse auf (vgl. Tab. 50).

Tab. 50: Wurzelfrischmasse im Substratkern zu Versuchsende (g)

Variante (Versuchskörpercodierung)	Wurzelfrischmasse (g)
Gebundene Varianten	
TPM-D Portlandzement + Trass (13D)	338,8
TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl (21F)	392,9
TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat (33L)	299,6
TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas (40M)	351,9
Ungebundene Varianten*	
Hart-Kalkstein (ungebundene Variante) (01R)	115,8
Hart-Kalkstein (ungebundene Variante) (03T)	303,1

*Bei den ungebundenen Varianten wuchsen die Wurzeln aus dem Substratkern in die Bettungsstoffe hinein.

Einwurzelung in die ungebundene Variante

Hinsichtlich der ungebundenen Variante (Hart-Kalkstein) liegt die Wurzelfrischmasse des Versuchskörpers 01R mit 115,8 Gramm noch unter dem Wert von Variante 3 (Calciumsulfoaluminat). Das Wurzelwachstum der ungebundenen Variante erstreckt sich insgesamt über den Substratkörper hinaus in den Bettungsstoff (vgl. KÜHN 2012, S. 94).

4.4.3 Wurzelentwicklung zu Versuchsende

Wurzelmassen bei den gebundenen Varianten

In Tabelle 51 werden die Wurzelmassen im Substratkern der einzelnen gebundenen Varianten zu Versuchsende aufgezeigt. Mit 723,8 Gramm weist die Variante 1 (Trass) im Mittel die höchste Wurzelfrischmasse auf.

Tab. 51: Wurzelmassen im Substratkern (g) der gebundenen Varianten des Gefäßversuches zu Versuchsende

	Summe	Min.	Max.	Mittelwert	Median	Spannweite	Standardabweichung
TPM-D Portlandzement + Trass (V1); n = 3							
Frischmasse	2.171,5	400,7	935,5	723,8	835,3	534,8	284,3
Trockenmasse	657,7	125,3	270,1	219,2	262,3	144,8	81,4
TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl (V2); n = 3							
Frischmasse	1.401,5	377,8	554,2	467,2	469,5	176,4	88,2
Trockenmasse	440,0	82,0	194,6	146,7	163,4	112,6	58,1
TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat (V3); n = 3							
Frischmasse	1.726,7	368,4	892,8	575,6	465,5	524,4	279,0
Trockenmasse	684,6	131,8	382,5	228,2	170,3	250,7	135,0
TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas (V4); n = 3							
Frischmasse	2.044,2	415,3	947,4	681,4	681,5	532,1	266,1
Trockenmasse	722,9	139,5	401,4	241,0	182,0	261,9	140,6
Gesamt Frischmasse	7.343,9	368,4	947,4	612,0	511,9	579,0	232,3
Gesamt Trockenmasse	2.505,2	82,0	401,4	208,8	176,2	319,4	101,0

Insgesamt besteht zu Versuchsende zwischen der **Wurzelfrischmasse** und der **Wurzeltrockenmasse** mit $R^2=0,837$ eine starke positive lineare Korrelation. Auf Grund der Korrelation wird im Folgenden lediglich auf die Wurzelfrischmasse eingegangen.

Die geringsten **Wurzelfrischmassen** kommen in der Variante 2 (Kalksteinmehl) vor. Der Mittelwert liegt hier mit 467,2 Gramm weit unter dem Gesamtmittelwert von 612,0 Gramm (vgl. Abb. 99). Der höchste Mittelwert wird mit 723,8 Gramm bei der Variante TPM-D Portlandzement + Trass erreicht. Deutlich wird bei dieser Variante zudem, dass eine weite Spannweite vorliegt. Bezüglich der Spannweite liegt nur bei Variante 2 (Kalksteinmehl) eine geringe Streuung vor.

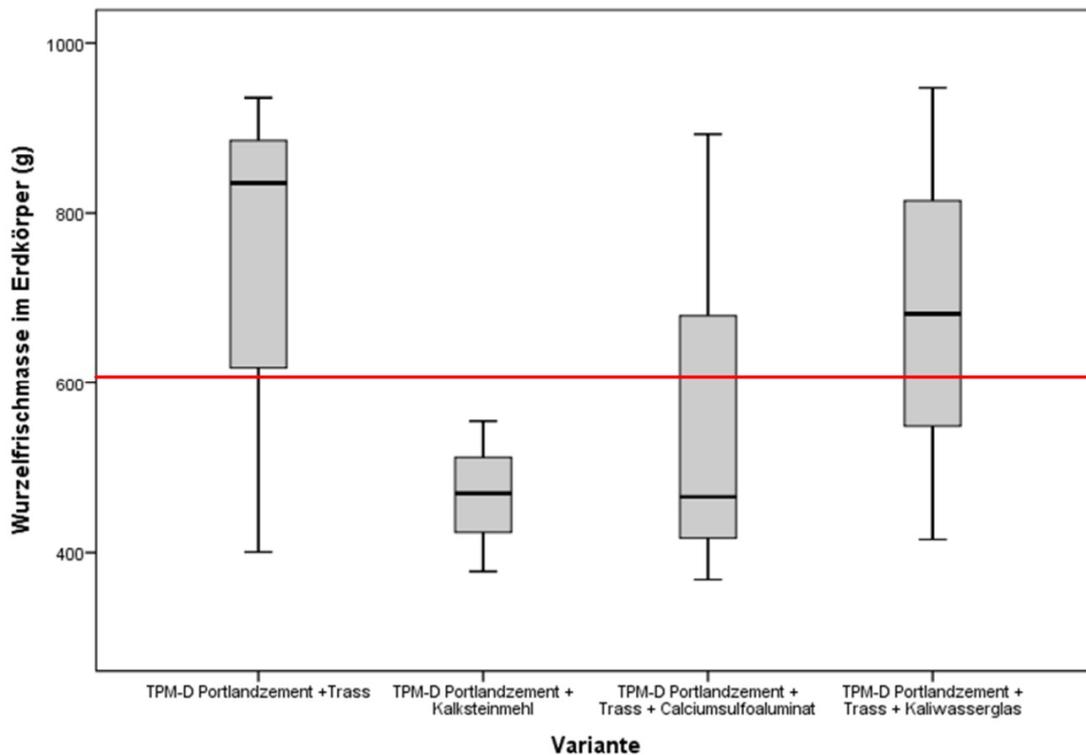


Abb. 99: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) (im Substratkern) der unterschiedlichen gebundenen Varianten zu Versuchsende ($n = 3$); rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert von 612,00 Gramm

Abbildung 100 zeigt, dass keine Korrelation zwischen der Wurzelfrischmasse zu Versuchsende und dem Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn besteht. Das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn hat somit vermutlich keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende. Eine Überprüfung erfolgt in der Varianzanalyse.

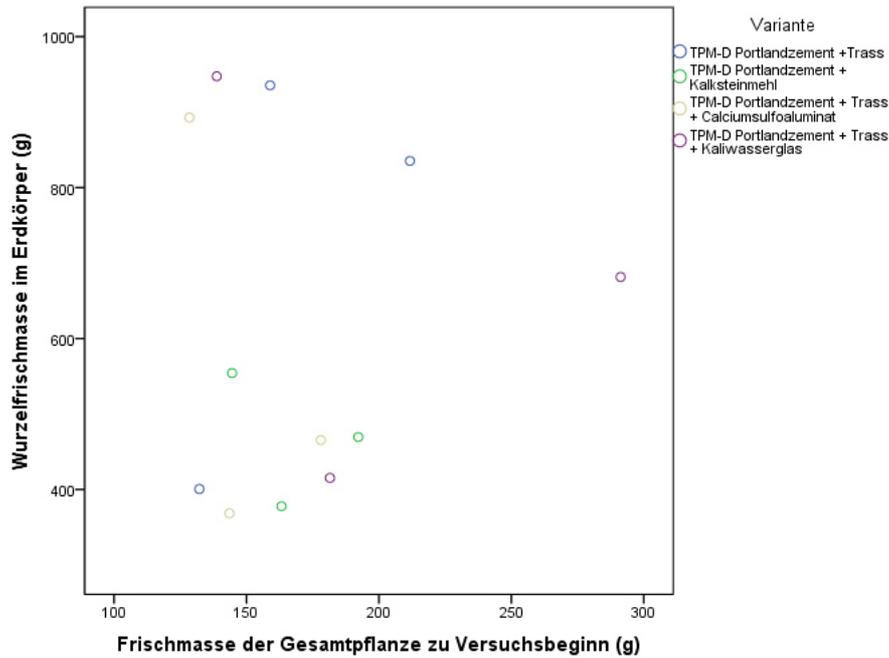


Abb. 100: Streudiagramm zum Vergleich der Wurzelfrischmassen im Substratkern zu Versuchsende mit der Frischmasse der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn; (n = 3)

Wurzelmassen im ungebundenen Bettungsstoff

Im Vergleich mit den gebundenen Versuchskörpern, bei denen sich die Einwurzelung lediglich bis auf eine Eindringtiefe von circa einem Zentimeter erstreckt, zeigt sich, dass sich die Wurzeln im gesamten ungebundenen Bettungskörper ausbreiten (vgl. Abb. 101).



Abb. 101: Freigrabung des Wurzelballens der ungebundenen Variante (Versuchskörper 00Q mit 553,4 g Wurzelfrischmasse); Wurzeln erstrecken sich aus dem Substratkern heraus im gesamten ungebundenem Bettungsstoff.

Die Wurzelmassen der Versuchspflanzen in der ungebundenen Hart-Kalksteinbettung liegen bei dem Versuchskörper 02S mit 1.704,8 Gramm deutlich über dem

Gesamtmittelwert der Pflanzen von den gebundenen Varianten. Die Abbildungen 102 und 103 zeigen den Vergleich der Wurzelballen aus dem ungebundenen Bettungstoff.



Abb. 102: Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen der ungebundenen Variante (Versuchskörper 00Q mit 553,4 g Wurzelfrischmasse)



Abb. 103: Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen der ungebundenen Variante (Versuchskörper 02S mit 1.704,8 g Wurzelfrischmasse)

Deutlich wird der Unterschied im Wurzelwachstum zwischen der ungebundenen Variante mit dem Hart-Kalkstein 0/5 und den gebundenen Varianten anhand der Wurzelmassen. Bei den ungebundenen Versuchskörpern kommt es zudem zur Ausbildung dickerer Wurzelstränge (vgl. Abb. 104 und 105).



Abb. 104: Gewaschener stark ausgeprägter Wurzelballen aus der ungebundenen Variante mit Hart-Kalkstein 0/5 (Versuchskörper 02S mit 1.704,8 g Wurzelfrischmasse)



Abb. 105: Gewaschener Wurzelballen (aus Substratkern) der gebundene Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (Versuchskörper 20E mit 377,8 g Wurzelfrischmasse)

Hinweis: Die schwarze untergelegte Fläche bildet die Bezugsfläche von 40 cm x 60 cm.

Wurzelintensität auf der Innenseite der Mörtelbettungen

Nach dem Lösen der Substratkern von den Mörtelblöcken verbleibt an den Innenseiten der Blöcke durch das Eindringen der Wurzelspitzen in die gebundenen Varianten ein

Wurzelflaum. Dieser Wurzelflaum wird mit einem **Wurzeldeckungsgrad-Rang** eingestuft und im Folgenden weiter beschrieben (vgl. Abb. 106).



Abb. 106: Teile des Mörtelblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (22G)
Blockinnenseiten mit Wurzeldeckungsgrad-Rang 3 (hoch) zeigen nach oben.

Die Einstufung der Ränge erfolgt durch einen visuellen Vergleich zwischen den einzelnen gebundenen Varianten. Tabelle 52 zeigt die einzelnen Ränge der Wurzeldeckungsgrade bei den vier gebundenen Varianten auf. Im Mittel weist die Variante 3 (Calciumsulfoaluminat) mit 2,0 den geringsten Grad auf.

Tab. 52: Ränge der Wurzeldeckungsgrade

Variante	Wurzeldeckungsgrad-Rang der Versuchskörper			Mittelwert
V1: TPM-D Portlandzement + Trass	4 (10A)	3 (11B)	1 (12C)	2,7
V2: TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl	4 (20E)	3 (22G)	2 (23H)	3,0
V3: TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat	2 (30I)	3 (31J)	1 (32K)	2,0
V4: TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas	4 (41N)	1 (42O)	2 (43P)	2,3

Wurzeldeckungsgrad-Rang:
1: sehr gering; 2: gering; 3: hoch; 4: sehr hoch



Abb. 107: Teile des Mörtelblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat (31J) Blockinnenseiten mit Wurzeldeckungsgrad-Rang 3 (hoch) zeigen nach oben.

Abbildung 108 zeigt am Beispiel der Variante 1 (Trass) den Grenzbereich zwischen Wurzelballen und der Mörtelblockinnenseite. An der porösen Innenseite des Mörtelblocks wachsen die Wurzeln bis zu einem Zentimeter in die gebundene Bettung ein. Abhängig vom Wurzeldeckungsgrad-Rang war die Eindringtiefe in den Varianten vergleichbar.



Abb. 108: Grenzbereich zwischen Wurzelballen und Mörtelblockinnenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass (10A); Wurzelwachstum bis 1 cm in den Mörtelblock hinein.

Die Abbildung 109 zeigt den Vergleich der Wurzelfrischmasse im Substratkern der gebundenen Bauweisenvarianten zur Endauswertung und dem visuell eingeschätzten Wurzeldeckungsgrad-Rang auf den jeweiligen Innenseiten der Mörtelblöcke. Auffällig ist, dass bei den Varianten 1 (Trass), 3 (Calciumsulfosaluminat) sowie Variante 4 (Kaliwasserglas) der Wurzeldeckungsgrad-Rang bei steigender Wurzelfrischmasse hoch ausfällt. Einzig bei der Variante 2 (Kalksteinmehl) steigt trotz abnehmender Wurzelfrischmasse der Wurzeldeckungsgrad-Rang. Statistisch gesehen besteht kein Zusammenhang zwischen der Wurzelfrischmasse und dem Wurzeldeckungsgrad-Rang ($R^2=0,091$).

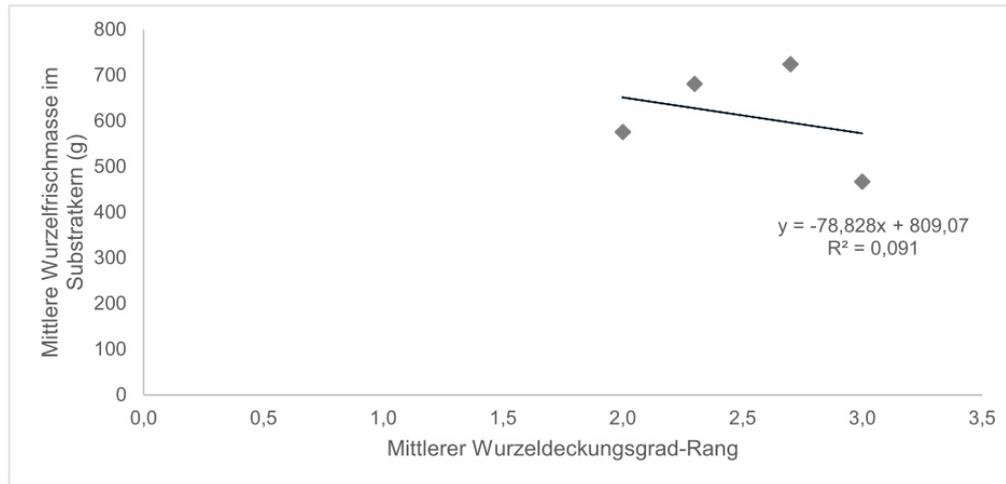


Abb. 109: Streudiagramm zum Vergleich der mittleren Wurzelfrischmassen im Substratkern zu Versuchsende mit dem visuell eingeschätzten Wurzeldeckungsgrad-Rang; (n = 3)
 Wurzeldeckungsgrad-Rang: 1: sehr gering; 2: gering; 3: hoch; 4: sehr hoch

Neben der Aufnahme der Wurzelmassen und der Wurzeldeckungsgrad-Ränge wurden im Rahmen der Versuchsflächenöffnung auch die **visuellen Beobachtungen zur Wurzelentwicklung** in den verschiedenen Varianten erfasst und dokumentiert (vgl. Tab. 53).

Tab. 53: Visuelle Beobachtungen zum Wurzelwachstum bei den Versuchskörpern

	Wurzelwachstum in:			
	Stiefugen	Grenzschicht Haftschlämme und Mörtelblock	Grenzschicht Mörtelblock schichten	Mörtelblockecken
V1: TPM-D Portlandzement + Trass				
10A	x		x	x
11B	x			
12C	x	x	x	x
V2: TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl				
20E	x			
22G	x		x	
23H			x	
V3: TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfosaluminat				
30I	x		x	
31J	x			
32K			x	
V4: TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas				
41N	x	x	x	x
42O			x	
43P	x	x		

x – Wurzelwachstum vorhanden

Wurzelwachstum in Steinfugen

Ein Wurzelwachstum in den Fugen der Pflastersteine kann bei neun von den insgesamt zwölf Versuchskörpern festgestellt werden. Die Wurzeln konnten ungehindert in die nicht verfugte Deckschicht eindringen. Abbildung 110 zeigt am Beispiel des Versuchskörpers 20E der Variante 2 (Kalksteinmehl) die Blockaußenseite mit einer aus der Pflasterfuge herauswachsenden Wurzel.

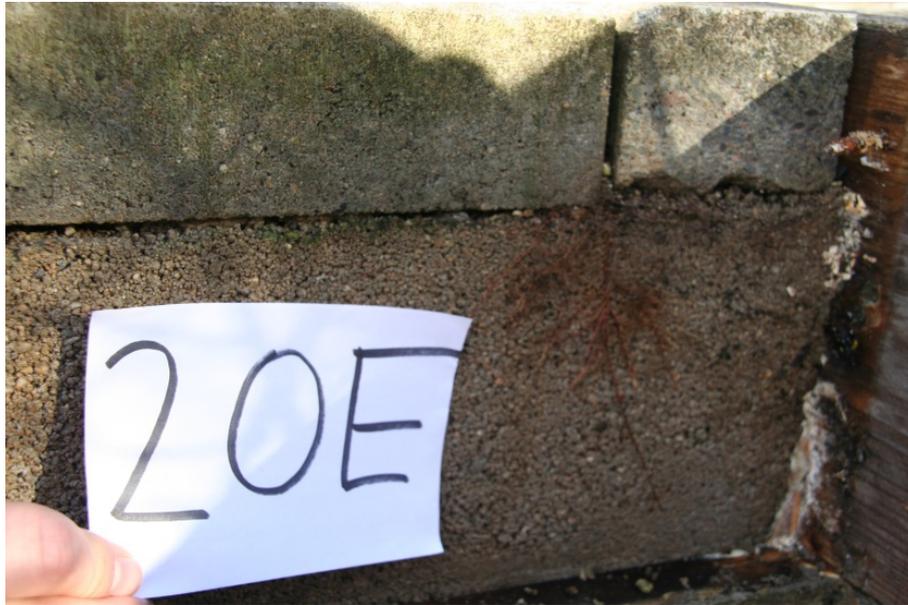


Abb. 110: Blockaußenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (20E); Wurzelwachstum aus den Pflastersteinfugen heraus

Wurzelwachstum in Grenzschicht Haftschlämme und Pflasterstein/Mörtelblock

An drei Versuchskörpern wuchsen die Wurzeln zwischen der Haftschlämme und dem Mörtelblock bzw. zwischen der Haftschlämme und dem Pflasterstein hinein (vgl. Abb. 111).



Abb. 111: Blockaußenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas (43P); Wurzelwachstum zwischen Pflasterstein und Haftschlämme

Wurzelwachstum in Grenzschicht der Mörtelblockschichten

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, besteht der Mörtelblock der Versuchskörper aus einbautechnischen Gründen aus zwei Schichten. An acht Versuchskörpern konnte ein Wurzelwachstum zwischen dem oberen und unteren Mörtelblockschicht festgestellt werden.

Eine Nahaufnahme der Grenzschicht bei der Variante 2 (Kalksteinmehl) zeigt Abbildung 112. Die feinen Wurzeln durchwachsen die komplette Grenzschichttiefe.



Abb. 112: Teil des Versuchsblocks der Variante TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl (23H) Draufsicht auf die Grenzschicht. Die feinen Wurzeln durchwachsen die komplette Grenzschichttiefe.

Mörtelblockecken

Insbesondere konnte an drei Versuchskörpern ein vermehrtes Wurzelwachstum in den Ecken der Mörtelblöcke beobachtet werden (vgl. Abb. 113).



Abb. 113: Blockinnenseite der Variante TPM-D Portlandzement + Trass (10A); verstärktes Wurzelwachstum in den Ecken des Mörtelblocks

4.4.4 Varianzanalytischer Vergleich der Varianten

In der nachfolgend durchgeführten Varianzanalyse sind lediglich die gebundenen Varianten des Gefäßversuches berücksichtigt worden.

Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der Varianzanalyse

Der Shapiro-Wilk Test als Test der **Residuen auf Normalverteilung** zeigt, dass eine Normalverteilung der Residuen vorliegt ($p=0,519$) und somit hinsichtlich dieser Voraussetzung eine Varianzanalyse gerechnet werden kann.

Tab. 54: Test auf Normalverteilung der Residuen

	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
Residuen für Wurzelfrischmassen im Substratkern	,942	12	,519

Die statistischen Untersuchungen der Daten haben des Weiteren ergeben, dass eine **Varianzhomogenität** (Levene $p=0,331$) vorliegt.

Tab. 55: Test auf Homogenität der Varianzen

	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
Wurzelfrischmasse im Substratkern (g)	1,331	3	8	,331

Varianzanalyse

Die durchgeführte Varianzanalyse zeigt, dass es hinsichtlich der Wurzelfrischmasse im Substratkern keinen signifikanten Unterschied zwischen den gebundenen Varianten gibt ($p=0,655$). Ebenso besteht kein signifikanter Unterschiede zwischen den Wiederholungen ($p=0,143$). Das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn hat keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende ($p=0,809$).

Tab. 56: Tests der Zwischensubjekteffekte abhängige Variable: Wurzelfrischmasse im Substratkern (g)

Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Konstanter Term	Hypothese	216839,026	1	216839,026	5,738	,061
	Fehler	193474,123	5,119	37791,947 ^a		
Varianten	Hypothese	60566,631	3	20188,877	,586	,655
	Fehler	137736,230	4	34434,058 ^b		
Wiederholung	Hypothese	333992,940	3	111330,980	3,233	,143
	Fehler	137736,230	4	34434,058 ^b		
Gewicht der Pflanze zu Versuchsbeginn	Hypothese	2291,092	1	2291,092	,067	,809
	Fehler	137736,230	4	34434,058 ^b		

a. ,044 MS(Block) + ,956 MS(Fehler)
b. MS(Fehler)

4.4.5 Eigenschaften der Mörtelbettungen

Gesamtionenbilanz

Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (Handspektrometer) wurde die Gesamtionenbilanz der zuvor gemörserten Stoffen gemessen (vgl. Tab. 57). Im Folgenden soll insbesondere auf den zu untersuchenden Calciumgehalt eingegangen werden.

Tab. 57: Gesamtionenbilanz der Varianten (Messergebnisse nach KÜHN 2012, S. 54)

Variante/Stoffe	AL	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	LE
(g/100 g)								
0 Hart-Kalkstein 0/5	0,48	1,69	---	---	40,43	---	0,09	57,31
1 TPM-D Portlandzement + Trass	2,63	22,94	0,51	---	13,18	0,11	1,53	59,11
2 TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl	1,62	20,40	0,46	---	16,49	0,08	1,08	59,87
3 TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat	3,35	17,41	1,17	0,05	17,13	0,18	1,70	59,00
4 TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas	2,57	19,57	0,66	---	17,00	0,14	1,69	58,36

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) mit Handspektrometer (ohne Vakuum): ca. 10 g gemörserte Stoffprobe
AL: Aluminium; **Si:** Silicium; **S:** Schwefel; **K:** Kalium; **Ca:** Calcium; **Ti:** Titan; **Fe:** Eisen; **LE:** (Low Emission) Elemente, die nicht vom System erfasst wurden.

(Untersuchung durch quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG; Abteilung Forschung und Entwicklung)

Hinsichtlich des Gesamtcalciumionen-Gehalts weist die **Variante 1** (Trass) mit 13,18 Gew.-% den niedrigsten Wert auf. In der **Variante 2** entsteht durch den Austausch des Trass durch die gleiche Menge Gesteinsmehl (Kalksteinmehl: 55% Anteil an Calciumoxid (CaO)) eine Mischung, welche mit 16,49 Gew.-% einen höheren Gesamtcalciumionen-Gehalt aufweist als Variante 1 (vgl. Tab. 57). Neben Trass beinhaltet die **Variante 3** Calciumsulfoaluminat. Calciumsulfoaluminat-Zemente sind eine CO₂-freundliche Alternative zu Portlandzement. Im Vergleich zu Portlandzement sind diese zum Beispiel leichter mahlbar. Das Calciumsulfoaluminat entsteht nur bei einem pH-Wert von über 12 und zerfällt bei einem pH-Wert von unter 9 in die Bestandteile Calciumaluminat und Gips. Hinsichtlich der Gesamtcalciumionenbilanz weist die Variante 3 mit 17,13 Gew.-% einen ähnlichen Gehalt auf wie **Variante 4** mit 17,00 Gew.-%. Die Variante 4 ergänzt die Bestandteile aus Variante 1 mit Kaliwasserglas, welches die Druckfestigkeit des Mörtels erhöht und Calciumionen bindet. Die ungebundene **Variante 0** aus dem Hart-Kalkstein übersteigt mit 40,43 Gew.-% Calciumionengehalt bei Weitem die vier Mörtel.

Gehalt an löslichen Calciumionen

Tabelle 58 führt die Gehalte an **löslichen Calciumionen** der fünf Varianten auf. Entgegen der Gesamtcalciumionenbilanz weist hier die **Variante 0** (Hart-Kalkstein) mit 12,0 mg/100g den niedrigsten Gehalt auf.

Während die **Variante 1** (Trass) mit 130,2 mg/100 g und **Variante 3** (Calciumsulfoaluminat) mit 132,2 mg/100 g ähnliche Gehalte aufweisen, besitzt **Variante 2** (Kalksteinmehl) mit 494,1 mg/100 g den deutlich höchsten Gehalt. Mit 177,6 mg/100 g unterscheidet sich die Variante 4 (Kaliwasserglas) nur geringfügig von den Varianten 1 (Trass) und 3 (Calciumsulfoaluminat).

Tab. 58: Gehalt an löslichem Calcium der Varianten zum Ende der ersten Versuchslaufzeit (Messergebnisse nach KÜHN 2012, S. 55)

Variante/Stoffe	CaO (g/100 g)	Ca ²⁺ (g/100 g)	Ca ²⁺ (mg/100 g)
0 Hart-Kalkstein 0/5	0,02	0,01	12,0
1 TPM-D Portlandzement + Trass	0,18	0,13	130,2
2 TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl	0,69	0,49	494,1
3 TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat	0,19	0,13	132,2
4 TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas	0,25	0,18	177,6

Bestimmung Calciumgehalt: Komplexometrische, visuelle Titration (DIN EN 1015-17:2005-01) mit EDTA-Lösung; Aufschluss mit 100 ml entmineralisiertem Wasser und 10 g gemörserter Stoffprobe
Umrechnung CaO in Ca²⁺: Stöchiometrischer Faktor: 1,399
(Untersuchung durch quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG; Abteilung Forschung und Entwicklung)

Nach Einbau der Varianten in die Versuchskörper wurden diese zur Qualitätskontrolle auf ihre Rohdichten hin überprüft (vgl. Tab. 59). Hier weist Variante 4 (Kaliwasserglas) mit 1,837 kg/dm³ die höchste Rohdichte auf.

Tab. 59: Rohdichte der Varianten nach Mörtelherstellung (Messergebnisse nach KÜHN 2012, S. 27)

Variante/Stoffe	Rohdichte (kg/dm ³)
1 TPM-D Portlandzement + Trass	1,526
2 TPM-D Portlandzement + Gesteinsmehl	1,708
3 TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat	1,660
4 TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas	1,837

Rohdichte nach DIN EN 1015-6:2007-05
(Untersuchung durch quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG; Abteilung Forschung und Entwicklung)

4.4.6 Wurzelwachstum in Abhängigkeit zum löslichem Calcium

Die nachstehende Tabelle 60 zeigt die Gegenüberstellung der Gehalte an löslichen Calciumionen der vier Bettungsmörtel mit der Einwurzelungsintensität.

Tab. 60: Gehalt an löslichen Calciumionen der Bettungsmörtel in Zusammenhang zur Einwurzelungsintensität

Variante	1	2	3	4
	TPM-D Portlandzement + Trass	TPM-D Portlandzement + Kalksteinmehl	TPM-D Portlandzement + Trass + Calciumsulfoaluminat	TPM-D Portlandzement + Trass + Kaliwasserglas
Ca ²⁺ -Gehalt (löslich) (mg/100 g)	130,2	494,1	132,2	177,6
Teilauswertung; n = 1				
Summe der Penetrationsstellen an den vier Mörtelblockinnenseiten	242	443	119	244
Endauswertung; n = 3				
Mittlerer Wurzeldeckungsgrad- Rang auf den Mörtelblockinnenseiten	2,7	3,0	2,0	2,3
Wurzeldeckungsgrad-Rang: 1: sehr gering; 2: gering; 3: hoch; 4: sehr hoch				

Dabei wird unterschieden zwischen der Einwurzelungsintensität zur Teilauswertung (Anzahl der Penetrationsstellen) und zur Endauswertung (Mittlerer Wurzeldeckungsgrad-Rang).

Die unmittelbare Gegenüberstellung zeigt, dass die Endauswertung die Teilauswertung bestätigt. So fallen bei der Variante 2 (Kalksteinmehl) sowohl die Anzahl der Penetrationsstellen als auch der Wurzeldeckungsgrad-Rang hoch aus. Bei Variante 3 (Calciumsulfoaluminat) hingegen fallen beide Werte am niedrigsten aus. Ein geringer Unterschied bezüglich der Einwurzelungsintensität ist bei den Varianten 1 (Trass) und 4 (Kaliwasserglas) sowohl zur ersten Teilauswertung als auch zur Endauswertung zu verzeichnen.

4.4.7 Methodenbetrachtung

Wie die Teilauswertung deutlich macht, war die **Versuchslaufzeit** von vier Monaten zu niedrig angesetzt, um eine intensive Einwurzelung in die gebundenen Bettungsmörtel beobachten zu können. Die Verlängerung der Versuchslaufzeit auf insgesamt 27 Monate war hinsichtlich der gebundenen Bauweisenvarianten sinnvoll und zeigte vertiefte Eindrücke der Durchwurzelungsintensität. Bei der Auswertung der ungebundenen Variante zeigte sich jedoch, dass zur Aufnahme der Wurzelfrischmasse die 27 Monate Laufzeit für die gegebenen Versuchsbedingungen zu lange waren, da die Wurzeln teilweise schon aus dem Versuchskörpern herausgewachsen sind. Bei möglichen Folgeversuchen sollte die Versuchslaufzeit weiter auf die Gefäßgröße abgestimmt werden.

Um **Langzeitbeobachtungen** hinsichtlich der Schadenaufkommen im Bereich der Wegedecken vornehmen zu können, sind lange Versuchszeiten jedoch Voraussetzung. In diesem Fall ist die Anwendung von Gefäßversuchen vermutlich nicht sinnvoll.

Im **Versuchskörper** wurden die hydraulisch gebundenen Bettungsmörtel in zwei Schichten eingebaut und verdichtet. Wie die Ergebnisse aufzeigen entstand hinsichtlich der Durchwurzelbarkeit in diesem Bereich eine Grenzschicht und somit eine „Schwachstelle“, da die Wurzeln hier eindringen konnten. Ebenso wuchsen die Wurzeln in die offene Fuge der Betonrechtecksteine. Hier könnte vermutlich eine gebundene Fuge (wie sie die Mischbauweise nach ZTV-Wegebau auch vorsieht) vorbeugende Wirkung zeigen.

Als **Versuchspflanzen** wurden wie bei den übrigen Gefäßversuchen *Salix purpurea* ausgewählt. Die einzelnen Pflanzen wurden so ausgewählt, dass augenscheinlich gleichgroße Pflanzen verwendet wurden, um annähernd gleiche Ausgangsbedingungen für den Versuch zu gewährleisten. Wie die Varianzanalyse bestätigte, hatte das Gewicht der Gesamtpflanze zu Versuchsbeginn keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelfrischmasse zu Versuchsende.

Im Rahmen der **Versuchsfeldbetreuung** wurde eine regelmäßige Inaugenscheinnahme der Versuchspflanzen vorgenommen sowie witterungsabhängige Bewässerungen durchgeführt. Hierdurch wurde gewährleistet, dass auf ggf. auftretende Probleme zeitnah reagiert werden und diese dokumentiert werden konnten. Zudem wurde das Ende der Versuchslaufzeit dadurch bestimmt, dass die oberirdischen Pflanzenteile nur noch ein eingeschränktes Wachstum aufzeigten, welches sich durch die regelmäßige Betreuung der Versuchspflanzen ablesen ließ.

Um den Gehalt an löslichen und damit pflanzenverfügbaren Calciumionen der unterschiedlichen **Mörtelrezepturen** bestimmen zu können, wurde der wässrige Aufschluss als **Untersuchungsmethode** gewählt. Hierzu war es notwendig die Stoffproben zu mörsern. Durch die Zerkleinerung wird jedoch eine Verwitterung simuliert, welche im Versuchsaufbau nicht stattfindet. Vermutlich fallen die Calciumgehalte in Wahrheit nicht so hoch aus, wie sie unter Laborbedingungen ermittelt worden sind. Zudem ist zu beachten, dass die Mörtel mit der Zeit immer weniger Ionen abgeben, da die Reaktionsfähigkeit des Zementes abnimmt.

Insgesamt werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Baustoffe hinsichtlich ihrer vegetationstechnischen Eignung untersucht, da Calcium ubiquitär in für Pflanzungen vorgesehenen Böden jedoch vorhanden ist und durch Kalkung immer nachgeliefert wird, stellt sich in der Bodenanalyse die Frage nach einem Calciummangel nicht.

Zur **Untersuchung der Durchwurzelbarkeit** von hydraulisch gebundenen Bettungsstoffen sind derzeit keine vergleichbaren Forschungen bekannt. Dadurch konnten keine schon bewährten Untersuchungsmethoden auf die Gefäßversuche übertragen werden. Für die Auswertung des Gefäßversuches mussten deshalb geeignete Methoden gefunden werden, welche qualitative oder quantitative Ergebnisse hervorbringen.

Zur Untersuchung der Durchwurzelbarkeit der Bettungsmörtel wurden in der ersten Teilauswertung die **Penetrationsstellen** ausgezählt. Diese Auszählung führte zu einem quantitativen Ergebnis, welches eindeutige Unterschiede in der Intensität der Wurzeleindringstellen zwischen den Mörtelvarianten aufzeigte. Da jedoch zur ersten Teilauswertung lediglich ein Versuchskörper pro Variante geöffnet wurde, ist das Ergebnis nicht repräsentativ. Die Teilauswertung konnte somit nur erste Hinweise geben, ob Tendenzen zu erkennen sind. Die Anwendung dieser Methode ist bei weiteren Versuchen zu hinterfragen, da diese sehr zeitaufwändig und dadurch nur bei kleineren Versuchskörpern zu empfehlen ist. Zudem spielt der Versuchszeitraum eine entscheidende Rolle, da, wie auch die Endauswertung zeigte, die Auszählung bei stark ausgeprägtem Wurzelwachstum nicht mehr möglich ist.

Zur Endauswertung wurden deshalb die einzelnen Mörtelseiten augenscheinlich nach der Intensität der **Wurzeldeckung** beurteilt, um ein Maß für die Durchwurzelbarkeit zu benennen. Hinzu kam hinsichtlich der Wurzeln die Aufnahme der **Wurzelfrischmassen**, welche sich während der Versuchslaufzeit im Substratkern entwickelt haben. Diese Aufnahme zeigte, dass sich die Wurzeln der einzelnen Versuchspflanzen gleichmäßig entwickelt haben. Ein Unterschied im Eindringverhalten der Wurzeln bei den vier Mörtelvarianten ist also vermutlich nicht auf eine unterschiedliche Gesamtwurzelentwicklung zurückzuführen.

Hinsichtlich der ungebundenen Vergleichsvariante ist die Aufnahme der Wurzelfrischmassen als Maß für die Durchwurzelbarkeit trotz des hohen Zeit- und Arbeitsaufwands als sinnvoll einzustufen, da so quantifizierbare Ergebnisse vorliegen. Obwohl es durch die Trennung der Wurzeln vom umgebenden Bettungsstoff und durch die Wurzelwaschung zu minimalen Wurzelverlusten kommt, ist eine Vergleichbarkeit möglich. Eine zusätzliche Aufnahme der Wurzeltrockenmasse kann aufzeigen, ob die Wurzeln annähernd die gleichen Massenverluste aufweisen.

Als bedeutsam zu bewerten sind bei Versuchen auch die **visuellen Beobachtungen** bezüglich der Wurzelentwicklung. Hiermit können weitere Hinweise zum Wurzelwachstum herausgearbeitet werden, welche als Hilfestellung für mögliche Praxisempfehlungen zur Schadenvermeidung genutzt werden können. So zeigt das Ergebnis der genauen Inaugenscheinnahme von Bruchstellen der Mörtelblöcke auch die Einwurzelungstiefe auf, welche bei bloßer Betrachtung der Mörtelblockinnenseiten nicht zu erkennen war. Das Zerschneiden der Mörtelblöcke in Schichten zur weiteren Untersuchung der Eindringtiefe bewies sich als nicht vorteilhaft, da der aufkommende Staub die sehr kleinen Wurzeln eher verdeckte. Das Entfernen des Staubs durch Luftdruck würde auch die Wurzeln entfernen.

Insgesamt können Gefäßversuche immer nur eine Teilmenge aufzeigen. Entscheidungen hinsichtlich der Stoff- und Methodenwahl müssen sorgfältig überlegt werden, um aus den Versuchsergebnissen allgemeingültige Aussagen für die Praxis herausarbeiten zu können. In jedem Fall ist es möglich, erste qualitative Aussagen zur Durchwurzelbarkeit unterschiedlicher Mörtel zu treffen, welche ggf. durch Folgeversuche weiter zu untersuchen sind.

5 Einfluss untersuchter Faktoren auf die Durchwurzelbarkeit

Im Folgenden werden die in Kapitel 4 aufgezeigten Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses untersuchter Faktoren zusammengefasst und interpretiert. Neben dem untersuchten Einfluss der verschiedenen bodenphysikalischen und –chemischen **Baustoffeigenschaften** auf die Durchwurzelung steht die Betrachtung der Wirkung der unterschiedlichen **Bauweisen**. In einem nächsten Schritt werden mögliche schadenvorbeugende Ansätze für den Geh- und Radwegebau abgeleitet (vgl. 6.). Zudem kann ferner weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden, um noch vorhandene Erkenntnislücken auf dem Untersuchungsgebiet des Wegebau-Baumwurzel-Konflikts zukünftig schließen zu können.

5.1 Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe

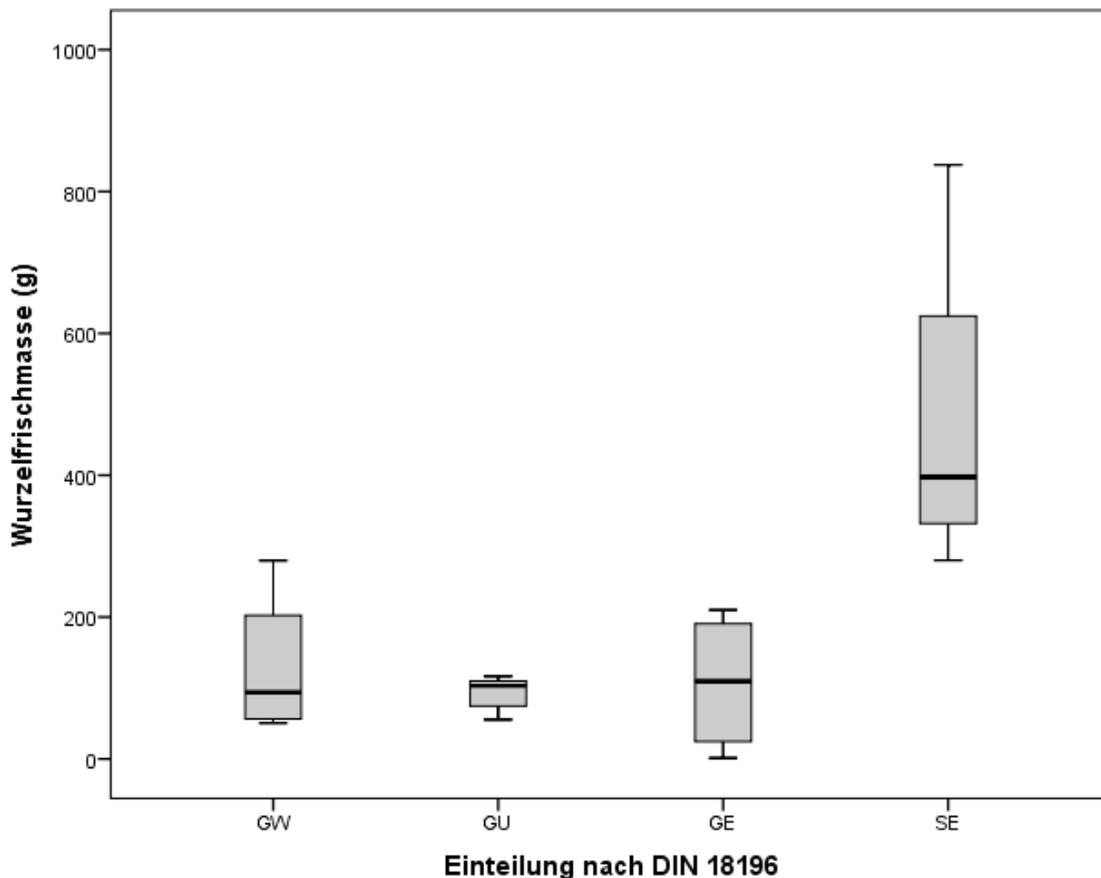
Einfluss handelsüblicher Bettungsstoffe (Feldversuch)

Die Ergebnisse machen deutlich, dass es laut den aufgenommenen Wurzelfrischmassen **keinen signifikanten Unterschied** im Wurzelwachstum zwischen den untersuchten handelsüblichen Bettungsstoffen gibt (vgl. 4.1.5). Hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung kann in diesem Versuch somit **kein statistisch signifikanter Zusammenhang** zur Wurzelfrischmasse erkannt werden (vgl. 4.1.8). Ausgrabungen anhand von Fallbeispielen bei REICHWEIN (2002) zeigen ebenso, dass sich kein Einfluss von der Korngrößenverteilung auf die Durchwurzelungsintensität feststellen lässt (vgl. REICHWEIN 2002, S. 182). Diese Untersuchungen werden statistisch gesehen demnach durch den Feldversuch bestätigt. Trotzdem die als Versuchspflanze eingesetzte Ulme lockere, tiefgründige Böden bevorzugt, wachsen die Wurzeln in die verdichteten Bettungsstoffe ein.

Die ungebundenen Bettungsstoffe mit den **Korngrößenverteilungen 0/5, 0/11** sowie **2/5** wurden unter praxisnahen Bedingungen eingebaut (vgl. 3.1.2). Gemäß der Einstufung nach DIN 18196 handelt es sich bei dem Bettungsstoff Hart-Kalkstein (HKS) mit den Körnungen 0/5 und 0/11 um **Kies-Schluff-Gemische (GU)** mit **weitgestufter Körnungslinie**. Bei dem Bettungsstoff Karbon Quarzit mit der Körnung 0/5 handelt es sich um einen **weitgestuften Kies (GW)**. Der Bettungsstoff aus Hart-Kalkstein mit der Körnung 2/5 stellt einen **enggestuften Kies (GE)** dar (vgl. 4.1.7). Neben den gängigen Bettungsstoffen erfolgte zudem der Einbau eines hydrophoben Sandes als **enggestufter Sand (SE)**, der in Kapitel 5.2 gesondert diskutiert wird.

Die Hart-Kalkstein-Varianten (HKS) mit den Körnungen 0/5 sowie 0/11 weisen trotz der unterschiedlichen Lieferbezeichnungen fast gleiche Korngrößenverteilungen insbesondere im Bereich des Sand- und Schluffanteils auf (vgl. 4.1.7). Hinsichtlich der Korngrößenverteilung weicht die Variante 6 (HKS 2/5) als enggestufter Kies am bedeutendsten von den übrigen Varianten ab. Die Wurzelfrischmassen haben bei dieser Variante im Vergleich zu den Varianten V0 (HKS 0/5) und V5 (HKS 0/11) zwar eine weitere Streubreite, liegen jedoch bezüglich der Wurzelmassensumme insgesamt nur geringfügig über denen der anderen. Wie der eingebaute HKS der Variante 0 hat laut Lieferbezeichnung auch der Karbon Quarzit der Variante 1 eine Körnung von 0/5. Der Vergleich der Korngrößenverteilung zeigt, dass der Schluff- und Kiesanteil des Karbon Quarzits zugunsten eines höheren Sandanteils niedriger ausfällt als bei dem HKS 0/5 (vgl. 4.1.7). Hier zeigen sich bei der Variante 1 dann auch leicht höhere

Wurzelfrischmassen (vgl. Abb. 114), welche vermutlich auf den höheren Sandanteil zurückzuführen sind.



GW – weitgestufter Kies (Karbon Quarzit 0/5; n = 4)
GU – Kies-Schluff-Gemisch (HKS 0/5, 0/11; n = 8)
GE – enggestufter Kies (HKS 2/5; n = 4)
SE – enggestufter Sand (hydrophober Sand 0/5; n = 4)

Abb. 114: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungstoffe

Die **visuellen Beobachtungen** im Feldversuch zeigen bei der Variante 6 (HKS 2/5), dass die Wurzeln insgesamt eine feinere Struktur aufweisen als bei den anderen Varianten. Dieses wird ebenfalls im Gefäßversuch bestätigt. Hinsichtlich unterschiedlicher Strukturen von Wurzeln in Splitten sind in der hier einbezogenen Literatur keine weiteren vergleichbaren Beobachtungen beschrieben worden.

Im Gegensatz zum Feldversuch zeigt ein Versuch von STRECKENBACH (2009), dass die Korngrößenverteilung bei unverdichteten Substraten einen deutlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum ausübt (vgl. STRECKENBACH 2009, S. 76). In seinen Versuchen wurde der Korngrößenanteil kleiner 0,063 mm sowie über 6 mm jedoch nicht mit einbezogen. Die Unterschiede im Wurzelvorkommen beruhen hierbei vermutlich auch auf ein artspezifisches Wurzelwachstum der jeweiligen Versuchspflanzen. Der in dieser Arbeit aufgezeigte Feldversuch verwendet als Versuchspflanze *Ulmus hollandica* 'Lobel', welche hinsichtlich des Bodengefüges anpassungsfähig ist und hohe Verdichtungen verträgt. Der Versuch zeigt auf, dass selbst die verdichteten Wegebau-schichten für ein Durchdringen durch Ulmenwurzeln geeignet sind.

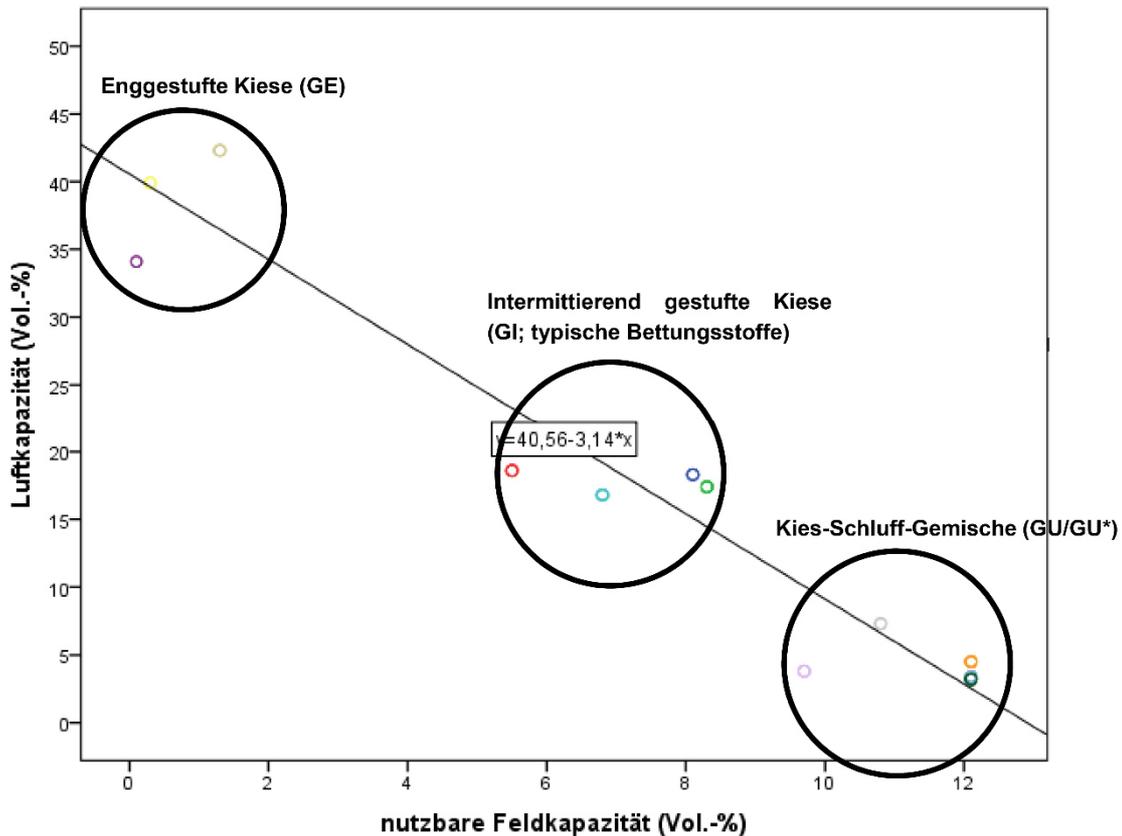
In Untersuchungen von REICHWEIN (2002) sowie STÜTZEL et al. (2009) weisen die untersuchten Wegebaustoffe ebenso ausreichende **bodenphysikalische Eigenschaften** für das Eindringen der Wurzeln auf. Hierzu zählt insbesondere das Vorhandensein von **Grobporen** mit der damit verbundenen hohen Luftkapazität, welches für die Durchwurzelung von Stoffen entscheidend ist (vgl. POLOMSKI u. KUHN 1998).

Der Feldversuch bestätigt, dass unter praxisnahen Einbaubedingungen unter Verwendung handelsüblicher Bettungsstoffe Wurzeln in die Schichten des Wegebaus eindringen können. Ein statistisch signifikanter Unterschied in der Durchwurzelungsintensität der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen konnte nicht festgestellt werden.

Im Rahmen des Feldversuches wurde die Porengrößenverteilung (Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität) nicht differenziert betrachtet, da die Entnahme einer ungestörten Stoffprobe bei verdichteten Bettungsstoffen nicht möglich ist. Durch den ergänzenden Gefäßversuch (vgl. 3.2) soll der Einfluss der Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe auf die Durchwurzelung differenzierter nach dem Wasser- und Lufthaushalt, auch unter Berücksichtigung einer bestimmten Verdichtung der unterschiedlichen Stoffe, betrachtet werden. Durch die Verwendung von Bettungsstoffen mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung werden für den Versuch verschiedene Porengrößenverteilungen und dementsprechend verschiedene Luft- und nutzbare Feldkapazitäten erzielt (vgl. 4.2.4). Insgesamt werden hinsichtlich der Korngrößenverteilung/Porengrößenverteilung drei verschiedene Bereiche betrachtet (vgl. Abb. 140):

- Intermittierend gestufte Kiese (handelsübliche Bettungsstoffe),
- Grobporenreiche Bettungsstoffe (enggestufte Kiese) sowie
- Grobporenarme Bettungsstoffe (Kies-Schluff-Gemische).

Wie in der Abbildung 115 ersichtlich stehen die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität in einer perfekten negativen Korrelation zueinander ($R^2=0,930$). Ein hohes Grobporenvolumen, d.h. eine hohe Luftkapazität, geht einher mit einer niedrigen nutzbaren Feldkapazität, da das pflanzenverfügbare Wasser durch den groben Stoff nicht gehalten werden kann und schnell versickert. Damit kann sich für die Pflanzenwurzel ein Wassermangel ergeben. Umgekehrt erhöht sich die nutzbare Feldkapazität bei Verringerung der Grobporen/Luftkapazität. Für die Pflanzenwurzeln kann sich bei diesem Stoffzustand jedoch ggf. ein Luftmangel ergeben.



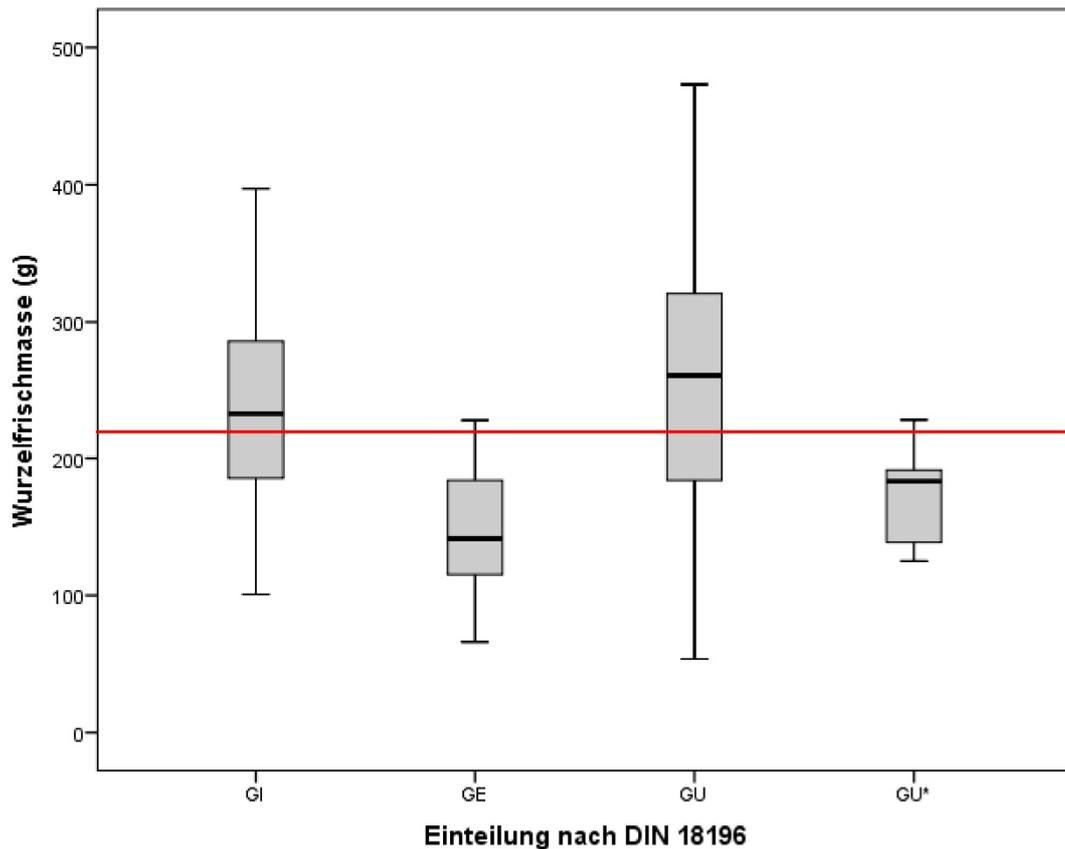
- GU** – Kies-Schluff-Gemisch (Variante C1.3, C1.4, C2.1, C2.2; n = 20)
GU* – Kies-Schluff-Gemisch mit hohem Anteil an Feinkorn < 0,063 (Variante C1.5 ;n = 5)
GE – enggestufter Kies (Variante A4, B1, B2; n = 11)
GI – intermittierend gestufter Kies (Variante A1, A2, A3/C1.2, C1.1; n = 19)

Abb. 115: Drei Bettungsstoffgruppen mit unterschiedlichen Luftkapazitäten und nutzbaren Feldkapazitäten
 R^2 Linear = 0,930

Einfluss handelsüblicher Bettungsstoffe (Gefäßversuch)

In der ersten Gruppe befinden sich die Bettungsstoffe, welche als typische, handelsübliche Bettungsstoffe mit den **Körnungen 0/5, 0/8, 0/11** eingeordnet werden können. Hiermit bezieht der Gefäßversuch die Korngrößenverteilung des Feldversuches mit ein. Diese Stoffe sind laut Einstufung nach DIN 18196 intermittierend gestufte Kiese (GI).

Hinsichtlich der **Durchwurzelung** wurde vermutet, dass schon in dem Bereich der handelsüblichen Bettungsstoffkörnungen ein unterschiedliches Wurzelwachstum festzustellen sei. Die Ergebnisse des Gefäßversuches (vgl. 3.2.2) bestätigen bezüglich der handelsüblichen Bettungsstoffe 0/5, 0/8 sowie 0/11 jedoch die Ergebnisse des Feldversuches; ein statistischer Unterschied zwischen den Varianten ist nicht festzustellen (vgl. 4.2.3). Wie auch im Feldversuch konnte im Gefäßversuch festgestellt werden, dass die Varianten mit den Körnungen 0/5, 0/8 sowie 0/11 trotz der unterschiedlichen Lieferbezeichnungen fast gleiche Korngrößenverteilungen haben und alle drei **intermittierend gestufte Kiese** (GI) darstellen (vgl. 4.2.4).



GU – Kies-Schluff-Gemisch (Variante C1.3, C1.4, C2.1, C2.2; n = 20)
GU* – Kies-Schluff-Gemisch mit hohem Anteil an Feinkorn < 0,063 (Variante C1.5 ;n = 5)
GE – enggestufter Kies (Variante A4, B1, B2; n = 11)
GI – intermittierend gestufter Kies (Variante A1, A2, A3/C1.2, C1.1; n = 19)
 Rote Linie zeigt den Gesamtmittelwert des Gefäßversuches von 221,42 Gramm

Abb. 116: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Bodenklassifikation der Bettungsstoffe

Insgesamt sind bezüglich der Porengrößenverteilung die Bedingungen auch in den stark verdichteten handelsüblichen Bettungsstoffen für ein Wurzelwachstum ausreichend. Die Stoffe haben, trotz einer **Proctordichte** von über 1,9 g/cm², eine **Luftkapazität** von 16,8 Vol.-% bis 18,3 Vol.-% (vgl. 4.2.4.). Laut Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden sind diese Werte im Bereich von Böden als hoch einzustufen (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Ebenso nach der von der FLL (2010) geforderten Luftdurchlässigkeit von größer 15 Vol.-% für Baumsubstrate reicht die vorhandene Luftkapazität der Bettungsstoffe für eine Durchwurzelung aus (vgl. FLL 2010, S. 41). Die ZTV Vegtra Mü (2008) stellt als Anforderung eine Luftkapazität von größer 10 Vol.-%. Auch hier liegen die Luftkapazitäten der Bettungsstoffe somit über dem geforderten Wert.

Die **nutzbare Feldkapazität** liegt bei diesen Bettungsstoffen zwischen 5,5 bis 8,1 Vol.-% (vgl. 4.2.4.). Dieses wird von der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden als sehr gering bis gering bewertet (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Auch LIESECKE u. HEIDGER (2000b) formulieren, dass für eine ausreichende Wasserversorgung für die Pflanze die nutzbare Feldkapazität größer 10 Vol.-% sein sollte (vgl. LIESECKE u. HEIDGER 2000b, S. 624). Die geringe nutzbare Feldkapazität der Stoffe wurde durch die regelmäßige Bewässerung der Versuchsgefäße ausgeglichen.

Das **Gesamtporenvolumen** (GPV) liegt bei dieser Gruppe zwischen 26,1 Vol.-% und 29,1 Vol.-% und ist demnach hinsichtlich guter Bedingungen für ein Pflanzenwachstum als sehr gering einzustufen (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Anforderungen hinsichtlich des GPV an Baumsubstrate liegen nach ZTV Vegtra Mü (2008) bei mindestens 20 Vol.-% sowie nach FGSV (2006) bei mindestens 40 Vol.-% bei jeweils 95% der Proctordichte.

Hinsichtlich der **Wasserdurchlässigkeit** liegen die Bettungsstoffe mit Werten zwischen $6,3 \times 10^{-6}$ m/s bis $1,2 \times 10^{-5}$ m/s im Vergleich zu der in der FLL (2010) geforderten Durchlässigkeit für Baumsubstrate von überbaubaren Pflanzgruben von größer 5×10^{-6} m/s bzw. nach ZTV Vegtra Mü (2008) von größer 1×10^{-5} m/s im tolerierbaren Bereich und können als durchlässig bezeichnet werden (vgl. FLL 2010, S. 41).

Die einzelnen von der Korngrößenverteilung beeinflussten Faktoren zeigen auf, dass handelsübliche Bettungsstoffe als intermittierend gestufte Kiese (GI) für ein Wurzelwachstum ausreichende Bedingungen vorweisen. Wie der Gefäßversuch bestätigt, findet eine Durchwurzelung statt. Auf Grund ähnlicher Korngrößenverteilungen besteht zwischen den einzelnen Varianten des Weiteren kein statistisch signifikanter Unterschied in der Durchwurzelungsintensität.

Einfluss grobporenreicher Bettungsstoffe

Zur Untersuchung grobporenreicher Bettungsstoffe wurden enggestufte Kiese (GE) eingesetzt. Diese weisen in der Variante A4 eine Körnung von 2/5 auf. Im Variantenblock B wurde Kies mit der Körnung 5/8 eingesetzt. Zudem unterscheidet sich der Kies in der Kornoberfläche (vgl. 3.2.2).

Insgesamt demonstrieren die Ergebnisse des Gefäßversuches hinsichtlich der Durchwurzelung, dass die enggestuften Kiese (GE) mit die geringsten Wurzelfrischmassen aufweisen (vgl. 4.2.2). Der signifikanteste Unterschied besteht im Wurzelwachstum zwischen den Varianten B1, B2 zu den Varianten C1.4 sowie C2.1 (vgl. 4.2.3). Die Vermutung, dass kein Wurzelwachstum in den stark grobporenreichen Stoffen stattfindet, kann nicht bestätigt werden. Zwar sind weniger Wurzelmassen aufgenommen worden, jedoch sind diese geringeren Wurzelmassen dadurch begründet, dass die eingedrungenen Wurzeln sehr fein ausgebildet sind. Ein Unterschied zwischen gebrochenem und ungebrochenem Stoff war nicht zu verzeichnen. Auch die visuellen Beobachtungen im Feldversuch zeigen bei der Variante 6 (HKS 2/5), dass die Wurzeln insgesamt eine feinere Struktur aufweisen, als bei den anderen Varianten. Im Feldversuch wird anders als im Gefäßversuch jedoch nicht bestätigt, dass der Bettungsstoff mit der Körnung 2/5 eine geringere Wurzelfrischmasse aufweist, als ein handelsüblicher Bettungsstoff der Körnung 0/5.

Im Vergleich zu den anderen Varianten weisen die Stoffe mit Werten zwischen $1,4 \text{ g/cm}^2$ und $1,7 \text{ g/cm}^2$ die niedrigsten **Proctordichten** auf (vgl. 4.2.4). Nach GIS1 (1997) gehören sie damit jedoch schon zu den schlechter durchwurzelbaren Bereichen (vgl. GIS1 1997, S. 24). Hinsichtlich der **Luftkapazität** (Groporenanteil) zeigen die Stoffe Werte von 39,9 Vol.-% bis 42,3 Vol.-% auf (vgl. 4.2.4). Werte größer 26 Vol.-% im Bereich von Böden bewertet die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden als sehr hoch (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Die ZTV Vegtra Mü (2008) stellt als Anforderung eine Luftkapazität von größer 10 Vol.-%. Ebenso nach der von der FLL (2010) geforderten

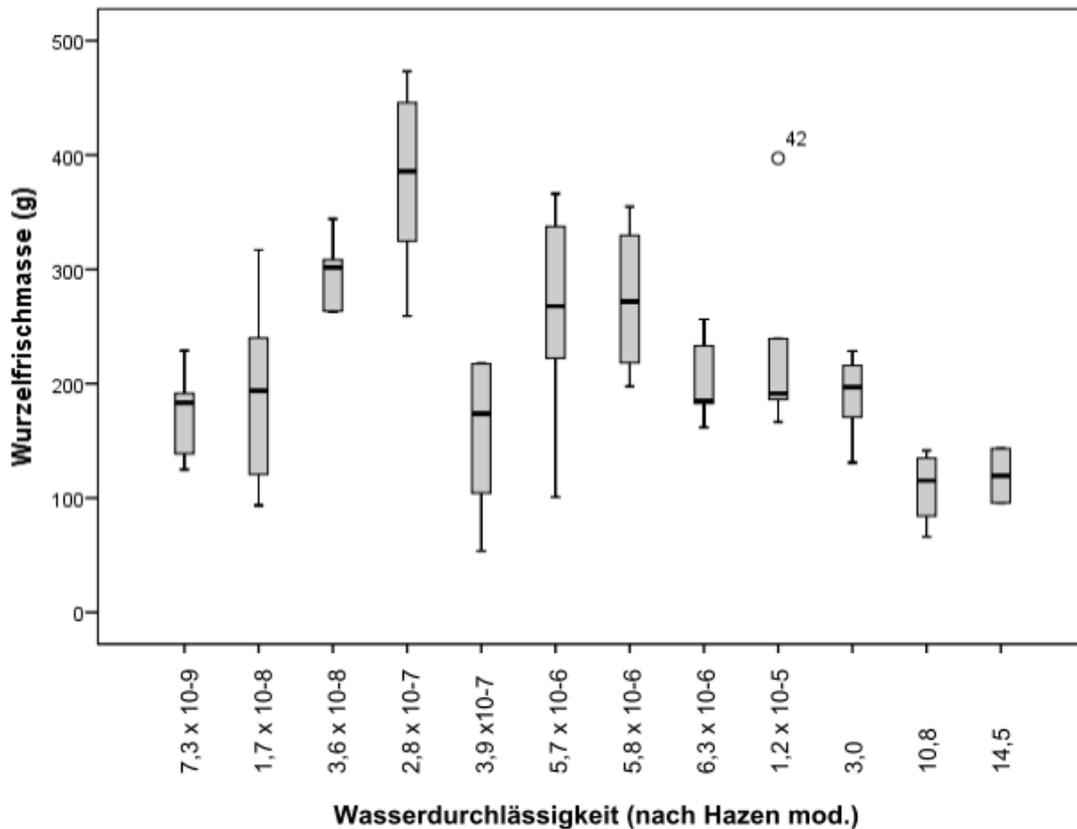
Luftdurchlässigkeit von größer 15 Vol.-% für Baumsubstrate reicht die vorhandene Luftkapazität der Bettungstoffe für eine Durchwurzelung aus (vgl. FLL 2010, S. 41).

Durch ihre Korngrößenzusammensetzung liegt bei den Stoffen mit 37,0 Vol.-% bis 45,2 Vol.-% ein nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden mittleres **Gesamtporenvolumen** vor (vgl. 4.2.4). Anforderungen hinsichtlich des GPV an Baumsubstrate, für einen erweiterten Wurzelraum als Unterbau unter überbautem Bereichen, liegen nach ZTV Vegtra Mü (2008) bei mindestens 20 Vol.-% sowie nach FGSV (2006) bei mindestens 40 Vol.-% bei jeweils 95% der Proctordichte. Werte unter 30 Vol.-% im Bereich von Böden bewertet die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden jedoch als sehr gering. Erst Werte über 54 Vol.-% werden hiernach als sehr hoch eingestuft (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Der Gefäßversuch zeigt, dass bei Erhöhung des Gesamtporenvolumens der Bettungstoffe (Varianten: B1, B2, A4) über 30 Vol.-% die Wurzelmassen eher abnehmen (vgl. 4.2.5).

Dass wenig pflanzenverfügbares Wasser in diesen stark grobporenen Varianten vorhanden ist, zeigt die unter Laborbedingungen ermittelte niedrige **nutzbare Feldkapazität** von 0,1 Vol.-% bei Variante B1 bis 1,3 Vol.-% bei Variante A4. Für eine ausreichende Wasserversorgung sollte die nutzbare Feldkapazität bei verdichteten Baumsubstraten laut LIESECKE u. HEIDGER (2000b) größer 10 Vol.-% sein (vgl. LIESECKE u. HEIDGER 2000b, S. 624). Bei Werten kleiner 10 Vol.-% ergibt sich hiernach ein eingeschränktes Wurzelwachstum. Auch die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden stuft Werte kleiner 6 Vol.-% als sehr gering ein (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349).

Die Werte der **Wasserdurchlässigkeit** bestätigen, dass die Stoffe mit einem kf-Wert von 3,0 m/s bei Variante A4 und bis zu 14,4 m/s bei Variante B1 sehr stark wasserdurchlässig sind und dadurch kaum Wasser für die Wurzeln zur Verfügung steht. Die von der FLL (2010) oder der ZTV Vegtra Mü (2008) geforderten Werte werden bei Weitem überschritten (vgl. FLL 2010, S. 41). Hier liegen die Anforderungen bei größer 5×10^{-6} m/s bzw. nach ZTV Vegtra Mü (2008) bei größer 1×10^{-5} m/s. Für Baumsubstrate gibt die FGSV (2006) in ihren Hinweisen zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten einen Wert von $1,0 \times 10^{-5}$ m/s als Maximalwert an.

Die Abbildung 117 verdeutlicht, dass eine hohe Wasserdurchlässigkeit und eine damit verbundene niedrige nutzbare Feldkapazität zu geringeren Wurzelmassen bzw. zu feineren Wurzeln führen. Bei Wasserdurchlässigkeit von kleiner 5×10^{-6} m/s ist die Wurzelfrischmasse hingegen nicht auf Grund der feiner ausgebildeten Wurzelstrukturen, sondern vermutlich auf Grund der geringen Luftkapazität.



- 7,3 x 10-9 m/s** – Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff); n = 5
1,7 x 10-8 m/s – Variante C2.2 (0/11, 1,5 M.-% Ton); n = 5
3,6 x 10-8 m/s – Variante C1.4 (0/11, 11,9 M.-% Schluff); n = 5
2,8 x 10-7 m/s – Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton); n = 5
3,9 x 10-7 m/s – Variante C1.3 (0/11, 9,3 M.-% Schluff); n = 5
5,7 x 10-6 m/s – Variante A2 (0/8); n = 5
5,8 x 10-6 m/s – Variante A1 (0/5); n = 4
6,3 x 10-6 m/s – Variante A3/C1.2 (0/11, 3,0 M.-% Schluff); n = 5
1,2 x 10-5 m/s – Variante C1.1 (0/11, 0,4 M.-% Schluff); n = 5
3,0 m/s – Variante A4 (2/5); n = 5
10,8 m/s – Variante B2 (5/8; gebrochene Oberfläche); n = 4
14,5 m/s – Variante B1 (5/8; runde Oberfläche); n = 2

Abb. 117: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit der Bettungstoffe

Nach Untersuchungen von STRECKENBACH (2009) wurde gezeigt, dass bei der Verwendung von grobkörnigen Splitten als Bettungsschicht die Einwurzelung gegenüber der Verwendung von feinkörnigem Sand reduziert werden konnte. Er bezieht dieses ebenso auf die geringere Wasserhaltefähigkeit des Splittes (vgl. STRECKENBACH 2009, S. 106). KRIETER (1989) berichtet, dass extrem wasserdurchlässige „mächtigere Schotter- oder Kieslagen (> 20 cm), sofern sie über keinerlei Schluff- oder Tonanteile verfügen“ nicht von Feinwurzeln durchwurzelt werden (vgl. KRIETER 1989, S. 19). Hinsichtlich unterschiedlicher Strukturen von Wurzeln in Splitten sind in der hier einbezogenen Literatur keine weiteren vergleichbaren Tatsachen beschrieben worden. Der Gefäßversuch zeigt, dass enggestufte Kiese (ohne abschlämmbare Teile) nicht so stark verdichtet werden können wie intermittierend gestufte Kiese oder Kies-Schluff-Gemische. Dadurch liegen bei diesen Stoffen eine höhere Luftkapazität mit einer hohen Wasserdurchlässigkeit verbunden jedoch mit einer geringen nutzbaren Feldkapazität

vor. Durch diese Bedingungen entwickelte sich gegenüber den übrigen Varianten vermutlich auf Grund des Wassermangels lediglich ein sehr feines Wurzelsystem aus. Mit Hilfe des Gefäßversuchs kann nicht bestätigt werden, dass gar kein Wurzelwachstum in den groben Stoffen stattfindet.

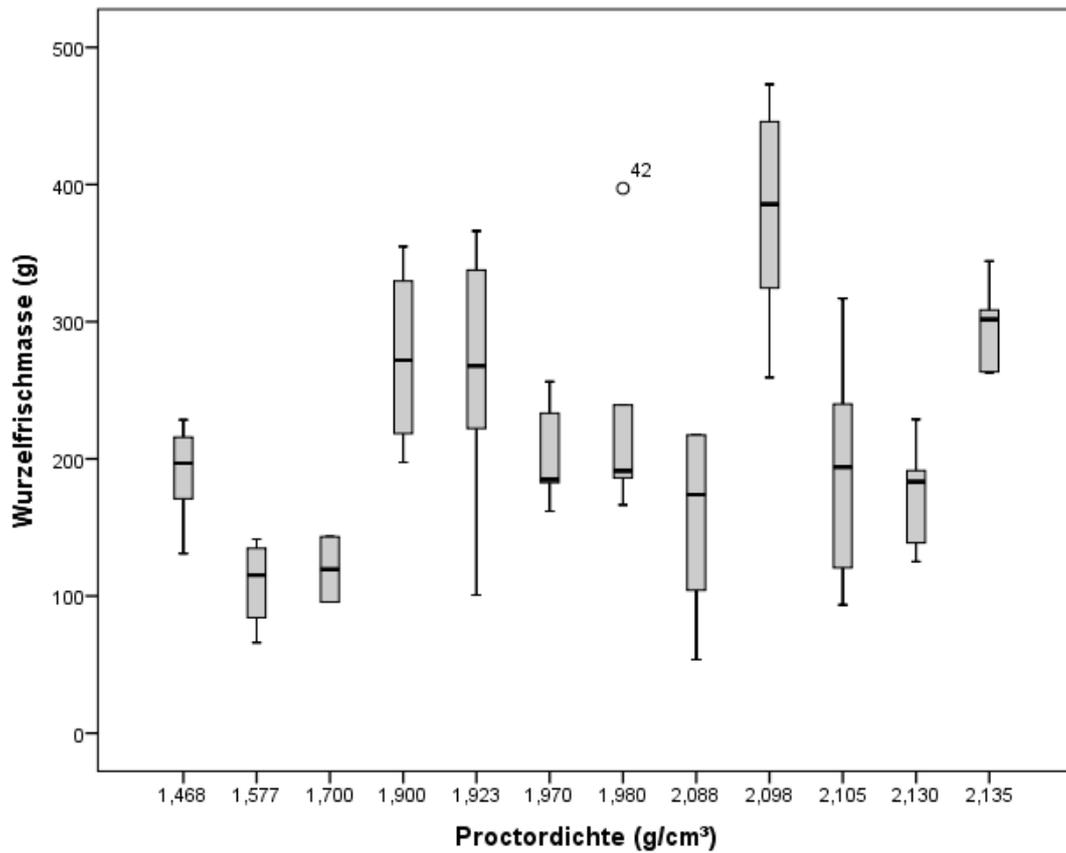
Einfluss grobporenarmer Bettungsstoffe

Zur Untersuchung grobporenarmer Bettungsstoffe wurden die Variantenblöcke C1 und C2 entwickelt (vgl. 3.2.2). Die Varianten im Block C1 unterscheiden sich dabei in ihrem unterschiedlichen Anteil an Schluff. Insgesamt ergibt sich eine Steigerung des Schluffanteils von der Variante C1.1 mit 0,4 M.-% bis zur Variante C1.5 mit 16,5 M.-% (vgl. 4.2.4). Laut Einstufung nach DIN 18196 handelt es sich bei Varianten C1.1 und C1.2 um intermittierend gestufte Kiese (GI) während es sich bei C1.3 und C1.4 um Kies-Schluff-Gemische mit geringem Anteil des Feinkorns $< 0,063\text{mm}$ handelt. Bei C1.5 steigert sich der Schluffanteil über 15 M.-%; d.h. laut DIN 18196 fällt diese Variante unter Kies-Schluff-Gemische mit hohem Anteil des Feinkorns $< 0,063\text{mm}$ (vgl. 4.2.4).

Im Variantenblock C2 wurden die geplanten Werte bezüglich des Tonanteils bei der Mischung nicht erreicht, da der eingebrachte Ton nicht den Anteil an Ton enthielt, der auf dem technischen Merkblatt beschrieben wurde. Die Varianten C2.1 und C2.2 ähneln in ihrer Korngrößenverteilung somit den Varianten C1.3 und C1.4 und stellen auch Kies-Schluff-Gemische (GU) mit einem geringem Anteil an Feinkorn $< 0,063\text{mm}$ dar.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass durch die Erhöhung des Schluffanteils tendenziell eine Erhöhung der Proctordichte erzielt werden kann (vgl. 4.2.5). Die Bettungsstoffkörper zeigen sich auch nach Entfernung des KG-Rohres somit überwiegend als sehr kompakt (vgl. 4.2.2.). Die hohen Proctordichten von über 2 g/cm^3 bestätigen die Festigkeit der Versuchskörper. Diese hohen Dichten bewirken wiederum eine Absenkung der Luftkapazität bis unter 5 Vol.-% (vgl. Abb. 143). Dadurch wird die Durchwurzelungsintensität beeinflusst. Bezüglich der Wurzelfrischmasse kann festgestellt werden, dass von den sieben Varianten in den Variantenblöcken C fünf Varianten mit den aufgenommenen Werten überwiegend unter dem Gesamtmittelwert liegen (vgl. 4.2.2).

Die visuellen Beobachtungen zeigen ergänzend, dass ab einer Proctordichte von ungefähr 2 g/cm^2 ein Wurzelwachstum überwiegend in der Grenzzone zum Rohr sowie kranzförmig in der Rohrkappe auftritt (vgl. 4.2.2). In den stark verdichteten Bettungskörpern findet hingegen fast kein Wurzelwachstum statt. Das Wurzelwachstum entlang des Rohres hat jedoch Einfluss auf die Wurzelfrischmassen und führt zu einer Verzerrung der Ergebnisse. So zeigen die Varianten C1.4 und C2.1 trotz der Proctordichten über 2 g/cm^2 durch den „Rohreffekt“ hohe Wurzelfrischmassen auf (vgl. Abb. 118).



- 1,468** – Variante A4 (2/5); n = 5
1,577 – Variante B2 (5/8); n = 4
1,700 – Variante B1 (5/8); n = 2
1,900 – Variante A1 (0/5); n = 4
1,925 – Variante A2 (0/8); n = 5
1,970 – Variante A3/C1.2 (0/11); n = 5
1,980 – Variante C1.1 (0/11, 0,4 M.-% Schluff); n = 5
2,088 – Variante C1.3 (0/11, 9,3 M.-% Schluff); n = 5
2,096 – Variante C2.1 (0/11, 1,1 M.-% Ton); n = 5
2,105 – Variante C2.2 (0/11, 1,5 M.-% Ton); n = 5
2,130 – Variante C1.5 (0/11, 16,5 M.-% Schluff); n = 5
2,135 – Variante C1.4 (0/11, 11,9 M.-% Schluff); n = 5

Abb. 118: Box Plot zum Vergleich der Wurzelfrischmassen (g) der Varianten in Abhängigkeit der Proctordichte der Bettungstoffe

Lässt man die Varianten C1.4 sowie C2.1 jedoch außer Betracht, so kann zwischen dem Schluffanteil und der Wurzelfrischmasse eine schwach negative Korrelation ($R^2=0,536$) verzeichnet werden (vgl. Abb. 119).

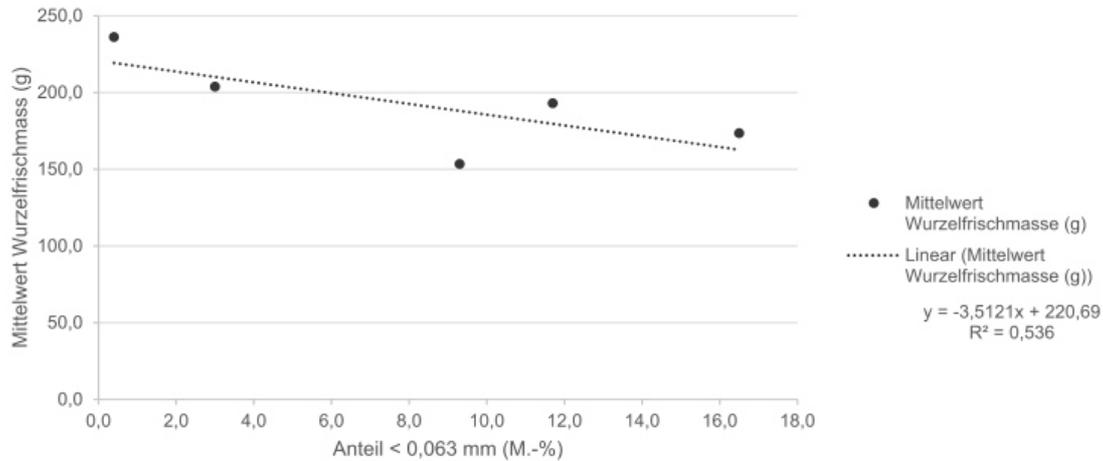


Abb. 119: Schwach negative Korrelation zwischen der Wurzelfrischmasse und dem Anteil an abschlämmbaren Teilen im Variantenblock C

Insgesamt stellt die **Variante C1.5** als Kies-Schluff-Gemische (GU*) mit hohem Anteil des Feinkorns < 0,063mm die extremste Variante dar. Diese Variante weist mit 16,5 M.-% den höchsten Schluffanteil sowie mit 2,3 M.-% den höchsten Tonanteil auf. Durch ihre Korngrößenverteilung lässt sich des Weiteren mit 2,13 g/cm³ eine der höchsten Proctordichten erzielen. Dadurch fallen sowohl die Luftkapazität mit 3,2 Vol.-% als auch die Wasserdurchlässigkeit mit $7,3 \times 10^{-9}$ von allen Varianten am geringsten aus. Zwar fällt korngößenbedingt die nutzbare Feldkapazität mit 12,1 Vol.-% mit am höchsten aus, dennoch fallen in dieser Variante vermutlich auf Grund der hohen Dichte und dem damit verbundenen erhöhten Eindringwiderstand sowie der fehlenden Luftkapazität die Wurzelfrischmassen vergleichsweise sehr gering aus. Die visuellen Beobachtungen bei **Variante C1.5** zeigten, dass nach der Entfernung der Rohrkappe kein Wurzelvorkommen in der untersten Schicht des Bettungsstoffkörpers ersichtlich war. Auch im übrigen Bettungsstoffkörper war kein Wurzelvorkommen erkennbar. Im Grenzzonenbereich zum Rohr wuchsen hingegen gleichmäßig feine Wurzeln; ebenso im Substratkern. Auch KRIETER (1989) zeigt auf, dass ein vermehrtes Auftreten von Ton- und Schluffanteilen mit gleichzeitiger starker Verdichtung die Bedingungen für die Wurzeln verschlechtern (vgl. KRIETER 1989, S. 22 ff.). KRIETER (1989) berichtet, dass „stark verdichtete Lehme, Tone sowie tonige Schluffe und tonige Sande besonders in Tiefen > 30 cm“ nicht von Feinwurzeln durchwurzelt werden (vgl. KRIETER 1989, S. 19).

Nach GISI (1997) zählen Lagerungsdichten von Böden ab 1,4 g/m³ schon zu den schlecht durchwurzelnaren Bereichen (vgl. GISI 1997, S. 24). Bei einer Bodenfeststoffdichte von 1,9 g/cm³ wurde in den Untersuchungen von KOROTAEV (1992) mit Fichten, Lärchen, Kiefern, Eichen, Linden und Birken kein Wurzelwachstum mehr festgestellt (vgl. KOROTAEV 1992, S. 118). Eine Bodenverdichtung mit einem damit verbundenen erhöhten Eindringwiderstand führt häufig durch das erschwerte Einwurzeln zu einem verlangsamten Wurzelwachstum (vgl. KOROTAEV 1992, S.116).

Der Gefäßversuch zeigt, dass ab einer Proctordichte von 2 g/m^3 kein Wurzelwachstum mehr im Bettungskörper festzustellen ist. Die Wurzeln wachsen dann verstärkt im Substratkern sowie in der Grenzzone zum Rohr.

Bezüglich der **Luftkapazität** (Grobporenanteil) zeigen die Stoffe des Variantenblocks C Werte von 3,2 Vol.-% bis 18,6 Vol.-% auf und liegen damit weit unter den Werten der enggestuften Kiese (vgl. 4.2.4). Werte kleiner 5 Vol.-% im Bereich von Böden bewertet die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden als gering. Werte zwischen 5 Vol.-% und 13 Vol.-% als mittel und Werte über 13 Vol.-% als hoch (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Da die Sauerstoffversorgung des Wurzelraumes die Wasser- und Ionenaufnahme durch die Wurzel regelt, ist die ausreichende Versorgung mit Sauerstoff eine Voraussetzung für Wurzelwachstum. Dabei kann ein Gehalt von 10% Sauerstoff als Untergrenze für optimales Pflanzenwachstum gesehen werden (vgl. u.a. HORN 2011, S. 120 f.). Der Einfluss der Bodenluft ist daher nicht zu unterschätzen (vgl. TROMMER 1920, S. 54; BURGER 1923, S. 183; KRIETER 1989, S. 18; DUMBECK 1986, S. 201). Eine Reduktion der Grobporen von 9 Vol.-% auf 4 Vol.-% beeinflusste die Durchwurzelungsintensität in den Versuche von DUMBECK (1986) am meisten (vgl. DUMBECK 1986, S. 201).

Im Vergleich zur Gruppe der intermittierenden Kiese sowie zur Gruppe der enggestuften Kiese werden hinsichtlich der **nutzbaren Feldkapazität** die höchsten Werte erreicht. Diese liegen zwischen 5,5 Vol.-% und 12,1 Vol.-%. Wie schon beschrieben sollte für eine ausreichende Wasserversorgung die nutzbare Feldkapazität bei verdichteten Baumsubstraten laut LIESECKE u. HEIDGER (2000b) größer 10 Vol.-% sein (vgl. LIESECKE u. HEIDGER 2000b, S. 624). Bei Werten kleiner 10 Vol.-% ergibt sich hiernach ein eingeschränktes Wurzelwachstum. Auch die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden stuft Werte kleine 6 Vol.-% als sehr gering ein; Werte unter 14 Vol.-% immer noch als gering (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Der Gefäßversuch zeigt, dass die Kies-Schluff-Gemische zwar noch eine ausreichende nutzbare Feldkapazität aufweisen, jedoch wird hier das Wurzelwachstum durch die hohen Dichten eingeschränkt. Auch HEIDGER u. LIESECKE (1997) bestätigen, dass nicht ein Wassermangel, sondern der Mangel an Bodenluft einen begrenzenden Faktor für die Wurzelausbreitung darstellt. Sie zeigten, dass die Baumwurzeln alle gut durchlüfteten Grenzzone nutzen, um ihr Wurzelwachstum fortzuführen (vgl. HEIDGER u. LIESECKE 1997, S. IV.1). Nach seinen Untersuchungen zum Einfluss standardisierter Substrate auf das Wachstum von Laubbäumen berichtet SCHRÖDER (1997) ebenso, dass „eine hohe Strukturstabilität und gute bodenphysikalische Eigenschaften wie Luft- und Wasserhaushalt die Basis für eine gute Entwicklung der Bäume darstellen“ (vgl. SCHRÖDER 1997, S. 45). Grobporenreiche Gemische aus Kies-Sand-Schluff weisen auch nach KRIETER (1989) eine hohe Durchwurzelungsintensität auf (vgl. KRIETER 1989, S. 19). Der Einfluss der physikalischen Bodeneigenschaften überwiegt dem des Nähstoffhaushaltes (vgl. KRIETER 1989, S. 20 f.)

Hinsichtlich des **Gesamtporenvolumens** unterscheiden sich die unterschiedlichen Varianten in dieser Untersuchungsgruppe nicht maßgeblich untereinander. Insgesamt liegen die Werte zwischen 20,3 Vol.-% und 26,5 Vol.-% (vgl. 4.2.4). Anforderungen hinsichtlich des GPV an Baumsubstrate, für einen erweiterten Wurzelraum als Unterbau unter überbautem Bereichen, liegen nach ZTV Vegtra Mü (2008) bei mindestens 20 Vol.-% sowie nach FGSV (2006) bei mindestens 40 Vol.-% bei jeweils 95% Proctordichte. Werte unter 30 Vol.-% im Bereich von Böden bewertet die Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden

als sehr gering. Erst Werte über 54 Vol.-% werden hiernach als sehr hoch eingestuft (vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, S. 349). Der Gefäßversuch zeigt, dass im Bereich von stark verdichteten, schluffhaltigen Stoffe nicht das Gesamtporenvolumen, sondern die luftführenden Grobporen (Luftkapazität) hinsichtlich der Durchwurzelung eine entscheidendere Rolle spielen.

Des Weiteren untersuchte STRECKENBACH (2009) den Einfluss eines porenarmen Substrats auf das Wurzelwachstum. Verwendung fand hierbei das Tonmineral Bentonit, welches Korngrößen mit Durchmesser von weniger als 0,002 mm aufweist (vgl. STRECKENBACH 2009, S. 29). Auffällig ist, dass keine Einwurzelung in das Bentonit beobachtet wurde, wenn der Stoff trocken statt gequollen eingebaut wird (vgl. STRECKENBACH 2009, S. 94). Zudem wurden im Gegensatz zum gequollenem Einbau bei der trockenen Einbauweise keine Rissbildungen im Bentonit beobachtet.

Hinsichtlich der **Wasserdurchlässigkeit** liegen die Bettungstoffe mit Werten zwischen $1,2 \times 10^{-5}$ m/s bis $7,3 \times 10^{-9}$ m/s im Vergleich zu der in der FLL (2010) geforderten Durchlässigkeit für Baumsubstrate von überbaubaren Pflanzgruben von größer 5×10^{-6} m/s bzw. nach ZTV Vegtra Mü (2008) von größer 1×10^{-5} m/s teilweise weit unter dem für ein Wurzelwachstum tolerierbaren Bereich (vgl. FLL 2010, S. 41).

Betreffend den örtlichen Bodenverhältnissen wurden auch bei REICHWEIN (2002) die physikalischen Bodeneigenschaften (Korngrößenverteilung, Rohdichte, Volumenabnahme, Wassergehalte/WK max., Wasserdurchlässigkeit k_f mod., Organische Substanz) beschrieben und mit der Durchwurzelung in Beziehung gesetzt (vgl. REICHWEIN 2002, S. 95). Insgesamt gaben die bei REICHWEIN (2002) aufgenommenen Bodenkennwerte kaum Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Eigenschaften der Wegebaustoffe und Durchwurzelungsintensität (REICHWEIN 2002, S. 189). Als „ausschlaggebende Kriterien für die Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen“ nennt REICHWEIN (2002) den Verdichtungsgrad in Verbindung mit der Kornzusammensetzung und dem daraus resultierenden Eindringwiderstand (vgl. REICHWEIN 2002, S. 188). Dieses kann in der vorliegenden Arbeit bestätigt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Variation des Schluffanteils die Durchwurzelbarkeit der untersuchten Stoffe beeinflusst werden kann. Mit einer Erhöhung des Massenanteils der Kornfraktion $< 0,063$ mm (abschlämmbare Teile) können Verdichtungen der Bettungsschichten erzielt werden, welche eine Erhöhung des Eindringwiderstandes und eine Reduzierung der Luftkapazität für die Wurzeln bewirken.

5.2 Hydrophober Sand als ungebundener Bettungsstoff

Der untersuchte hydrophobe Sand stellt ein Stoff dar, welcher durch seine permanent wasserabweisende Wirkung den Wasserhaushalt in der Bettungsschicht beeinflusst (vgl. 3.1.2). Dadurch, dass die Bettungsschicht, wie bautechnisch gefordert, auf eine Dicke von 3 bis 5 Zentimetern begrenzt ist, wurde angenommen, dass das Wasser, welches im grobporigen Sand sowieso schon nur geringfügig gehalten wird (vgl. 2.2.3), durch die Abweisung noch schneller abgeführt wird und der Pflanzenwurzel somit nur stark begrenzt zur Verfügung steht. Dadurch wurde gefolgert, dass die Verwendung eines hydrophoben Sandes als Bettungsstoff zur verminderten Durchwurzelung führt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Variante mit dem hydrophoben Sand mit Abstand die größte Wurzelfrischmassensumme aufweist (vgl. 4.1.4). Diese hohen Wurzelmassen sind jedoch darauf begründet, dass die Wurzeln in diesem Bettungsstoff dicker ausgebildet sind als in den übrigen Varianten.

Die hohen Wurzelmassen in den Bettungsstoffen lassen vermuten, dass das von den Stoffen abgewiesene Wasser nicht wie ursprünglich angedacht im grobporigen Sand noch schneller versickert und der Pflanze nicht zur Verfügung steht, sondern im Gegenteil für die Pflanzenwurzeln durch die Abweisung des Wassers vom Stoff mehr Wasser vorhanden ist. Das würde bedeuten, dass der Sand in der Verwendung als Bettungsschicht von circa drei Zentimetern neben seinem für das Wurzelwachstum günstigen Grobporenvolumen vermutlich auch noch eine vorteilhafte vermehrte Wasserverfügbarkeit für die Wurzel besitzt. Dieses stützt die Aussage des Sandherstellers, dass der Wasserverbrauch beim Einsetzen des Sandes im landwirtschaftlichen Bereich stark reduziert werden kann. Anzumerken ist weiter, dass enggestufte Körnungsgemische wie der hydrophobe Sand weniger verdichtungsfähig sind als weitgestufte Körnungsgemische. Auch dieses geringere Verdichtbarkeit kann eine Durchwurzelung ergänzend fördern.

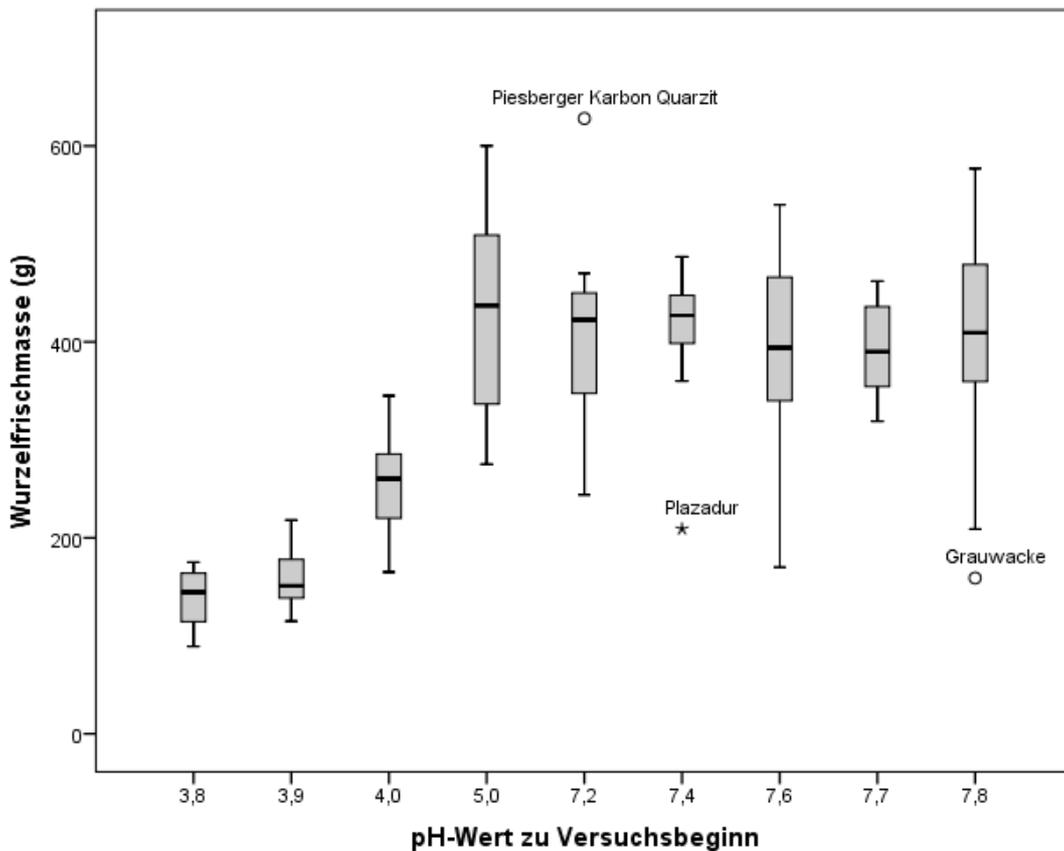
Hinsichtlich seiner bodenchemischen Eigenschaften weist der hydrophobe Sand mit pH 8,3 einen basischen Wert auf, welcher den Werten der übrigen Varianten stark ähnelt. Im Vergleich zu den restlichen Varianten besitzt er mit 18,6 mg/100 g zwar den höchsten Salzgehalt, jedoch liegt dieser nach den Anforderungen der FLL (2010) für Baumsubstrate weit unter dem geforderten Wert von 150 mg/100 g (vgl. FLL 2010, S. 41). Im Rahmen der Analyse konnte im Feldversuch kein weiterer Einfluss der untersuchten bodenchemischen Eigenschaften festgestellt werden (vgl. 4.1.8). Es wird vermutet, dass in diesem Fall die Korngrößenverteilung und die wasserabweisende Wirkung einen größeren Einfluss ausüben.

Lediglich ein sehr vereinzelt Wurzelwachstum findet jedoch in den Fugen statt. Beim Herausnehmen der Pflastersteine zeigte sich der hydrophobe Fugensand nicht wie die übrigen Fugenstoffe durchnässt, sondern stellenweise trocken. Scheinbar ist hier durch die enge Fuge in Kombination mit dem wasserabweisenden Sand die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzenwurzel doch zu gering. Zu beachten ist jedoch, dass es durch die Nutzung einer Pflasterfläche mit den Jahren zu Einträgen in den Fugenstoff kommt, welche die Zusammensetzung des Fugenstoffs ändern und die Minimierung der Durchwurzelbarkeit aufheben können. Es ist zu überprüfen, ob ein Einsatz als Fugenstoff hinsichtlich der Korngrößenverteilung und der Filterstabilität möglich wäre. Weitere Erfahrungswerte zum Einsatz des hydrophoben Sandes als Fugen- bzw. Bettungsstoff sind derzeit nicht bekannt.

5.3 Bodenreaktion ungebundener Bettungstoffe

Die im Feldversuch eingesetzten handelsüblichen Bettungstoffe weisen pH-Werte (in CaCl_2) zwischen pH 7,3 und pH 8,3 auf und liegen damit in einem schwach alkalischen Bereich (vgl. 4.1.6). Ein Einfluss des pH-Wertes auf die Durchwurzelung der Bettungstoffe konnte für die kalktolerante Ulme nicht ausgemacht werden (vgl. 4.1.8).

Die Ergebnisse des Gefäßversuchs nach SCHLOMBS (2012) zeigen, dass ein schwach positiv linearer Zusammenhang zwischen der Wurzelfrischmasse und der Bodenreaktion (pH-Wert) angenommen werden kann. Die niedrigsten Wurzelfrischmassen wurden dabei bei einem Wert kleiner pH 5 erreicht (vgl. Abb. 120). Dieser niedrige pH-Wert wurde neben dem angesäuerten Glasasche Granulat zudem von Natur aus vom Ibbenbürener Sandstein mit pH 3,9 erreicht.



pH 3,8 – Glasasche Granulat 2,0 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$ (n = 12)

pH 3,9 – Ibbenbürener Sandstein (n = 12)

pH 4,0 – Glasasche Granulat 0,5 g/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{l}$ (n = 12)

pH 5,0 – Baumschulboden (n = 12)

pH 7,2 – Karbon Quarzit (n = 12)

pH 7,4 – Plazadur (n = 12)

pH 7,6 – Basalt, Gabbro (n = 24)

pH 7,7 – Glasasche Granulat (n = 12)

pH 7,8 – Grauwacke, Hart-Kalkstein (n = 24)

Abb. 120: Wurzelfrischmasse je Pflanze (g) in Abhängigkeit zum pH-Wert (in CaCl_2) der untersuchten Stoffe zu Versuchsbeginn (Gefäßversuch nach SCHLOMBS 2012)

Im Baumschulboden mit einem pH-Wert von pH 5,0 liegt die Wurzelfrischmasse der verwendeten *Salix* im Mittel am höchsten. Bei Werten zwischen pH 7,2 bis pH 7,8 entwickelten sich ähnliche Wurzelfrischmassen, die sich deutlich von den

Wurzelfrischmassen der sauren Substrate absetzen. Werden die mit Aluminiumsulfat angesäuerten Varianten aus dieser Betrachtung ausgeschlossen, schwächt sich der positiv lineare Zusammenhang zwischen Wurzelwachstum und pH-Wert ab.

Des Weiteren ist zu verzeichnen, dass der Ibbenbürener Sandstein als enggestufter Sand (SE) der Pflanzenwurzel eigentlich gute bodenphysikalische Bedingungen bringen sollte (vgl. 5.2). Jedoch zeigt sich in dieser Variante mit einem natürlichen Wert von pH 3,9 ein sehr geringes Wurzelwachstum. Vermutlich hat hier der niedrige pH-Wert einen größeren Einfluss auf das Wurzelwachstum der Versuchspflanzen als die guten physikalischen Bedingungen. KRIETER et al. (1989) sowie SCHROEDER (1997) hingegen stellen in ihren Untersuchungen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen fest, dass bodenphysikalische Eigenschaften bedeutender sind als bodenchemische Bedingungen.

Der Einsatz von Bettungstoffen, welche von Natur aus einen pH-Wert haben, der unter pH 5 liegt kann nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ein Einwurzeln vermindern. Insbesondere, wenn die eingesetzten Baumarten zu den kalktoleranten Pflanzen zählen. Jedoch muss diese Herangehensweise insgesamt als kritisch betrachtet werden, da der Baum grundsätzlich in seinem Wachstum gefördert werden sollte und eine Schädigung auszuschließen ist. Zudem ist zu beachten, dass die verwendeten Baustoffe lokal erhältlich sind, um lange Lieferwege zu vermeiden.

Die Absenkung des pH-Wertes mit Hilfe von Aluminiumsulfat zeigt zwar eine Reduktion des Wurzelwachstums jedoch auch ein zeitweises Absterben der oberirdischen Pflanzenteile. Diese Reaktion erfolgt vermutlich durch die toxische Wirkung des Al^{3+} . Die Applikation von Aluminium müsste zudem regelmäßig wiederholt werden, um einen niedrigen pH-Wert zu halten. Die Ergebnisse haben aufgezeigt, dass sich der pH-Wert wieder auf die ursprünglichen Werte ansteigt. Die direkte Absenkung des pH-Wertes mit Hilfsmittel ist aus diesem Grund als Lösungsansatz für den Bereich der Geh- und Radwege mit jetzigem Kenntnisstand auszuschließen.

Wie schwierig der Umgang mit der Bodenreaktion von Stoffen, welche in Verbindung mit Bäumen gebracht werden, insgesamt ist, zeigt sich auch bei derzeitigen Diskussionen im Bereich der Baumsubstrate. Die Auswirkungen unterschiedlicher pH-Werte von Baumsubstraten auf verschiedene Straßenbäume untersuchte BELTZ (2014). Nach diesen Untersuchungen ist die von der FLL (2010) geforderte Obergrenze von pH 7,0 für kalkmeidende Arten jedoch zu hoch bemessen. Ebenso ist die Obergrenze von pH 8,5 für kalkliebende Arten zu hoch bemessen. Die Obergrenzen sollten laut BELTZ auf pH 6,8 bzw. pH 8,0 herabgesetzt werden. Insgesamt wird hinsichtlich der pH-Wert-Ansprüche von Straßenbäumen Forschungsbedarf gesehen.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten handelsüblichen Bettungstoffe haben mit Ausnahme des Ibbenbürener Sandsteins einen pH-Wert zwischen pH 7,2 und pH 8,8. Damit liegen diese hinsichtlich der derzeitigen Anforderungen an Baumsubstrate laut FLL (2010) überwiegend im oberen tolerierbaren Bereich. Hingegen sind die Werte nach ZTV Vegtra Mü (2008) als überwiegend zu hoch einzustufen, da hier der genannte Maximalwert bei pH 7,9 liegt (vgl. Tab. 61).

Tab. 61: Anforderungen an die Bodenreaktion von Baumsubstraten

	FLL (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2; überbaute Pflanzgruben	ZTV Vegtra Mü (2008): Substrat B; erweiterter Wurzelraum als Unterbau unter überbautem Bereich	FGsv (2006): Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten
Bodenreaktion – pH-Wert	5,0 – 8,5*	5,5 – 7,9	4,5 – 8,5

* 7,0 – 8,5 für „kalkliebende oder kalkhaltige Böden bevorzugende Arten“
5,0 – 7,0 für „kalkmeidende Arten oder Arten, die saure bis neutrale Reaktionen bevorzugen“

Für den Anwendungsbereich Pflasterdecken- und Pflasterbeläge beziehen sich die geforderten Eigenschaften und Kategorien an die Gesteinskörnungen der ungebundenen Bettungs- und Fugenstoffen laut der TL Gestein-StB 2004 weitestgehend auf physikalische Eigenschaften (vgl. TL Gestein-StB 2004; Anhang H). Daneben werden Grenzwerte zu den sogenannten „umweltrelevanten Merkmalen“ genannt, welche sich auf chemische Eigenschaften beziehen (vgl. TL Gestein-StB 2004; Anhang D). Hierzu wird formuliert, dass bei natürlichen Gesteinskörnungen, wie gebrochenes Festgestein, Kies, Sand sowie gebrochener Kies, die Umweltverträglichkeit grundsätzlich gegeben ist und sich deshalb weitere Nachweise erübrigen (vgl. TL Gestein-StB 2004, 2.4). Hingegen sind bei industriell hergestellten Gesteinskörnungen sowie bei RC-Gemischen (Recycling-Gemischen) Anforderungen einzuhalten. Die genannten Kenngrößen beinhalten auch den in dieser Arbeit betrachteten pH-Wert. Wie die von der TL Gestein-StB angegebenen Richt- und Grenzwerte für industriell hergestellte Gesteinskörnungen sowie für RC-Gemische zeigen, liegen diese überwiegend mit pH-Werten von pH 5 bis zu pH 13 im alkalischen Bereich (vgl. TL Gestein-StB 2004; Anhang D.1).

HEIDGER u. KURKOWSKI (2006) formulieren hinsichtlich der Baumsubstrate, dass „es in einer alkalisch geprägten Umgebung unter der Einflussnahme von Beton und anderen basisch reagierenden Baustoffen in urbanen Lagen nicht möglich [ist] einen neutralen Zustand dauerhaft herzustellen. Den Dissoziationsgesetzen zur Folge kommt es mittelfristig zu einem Dissoziationsgleichgewicht bei dem die Bodenreaktionen im Wurzelraum und Untergrund die chemischen Substrateigenschaften weitgehend beeinflussen“ (vgl. HEIDGER u. KURKOWSKI 2006, S. 29).

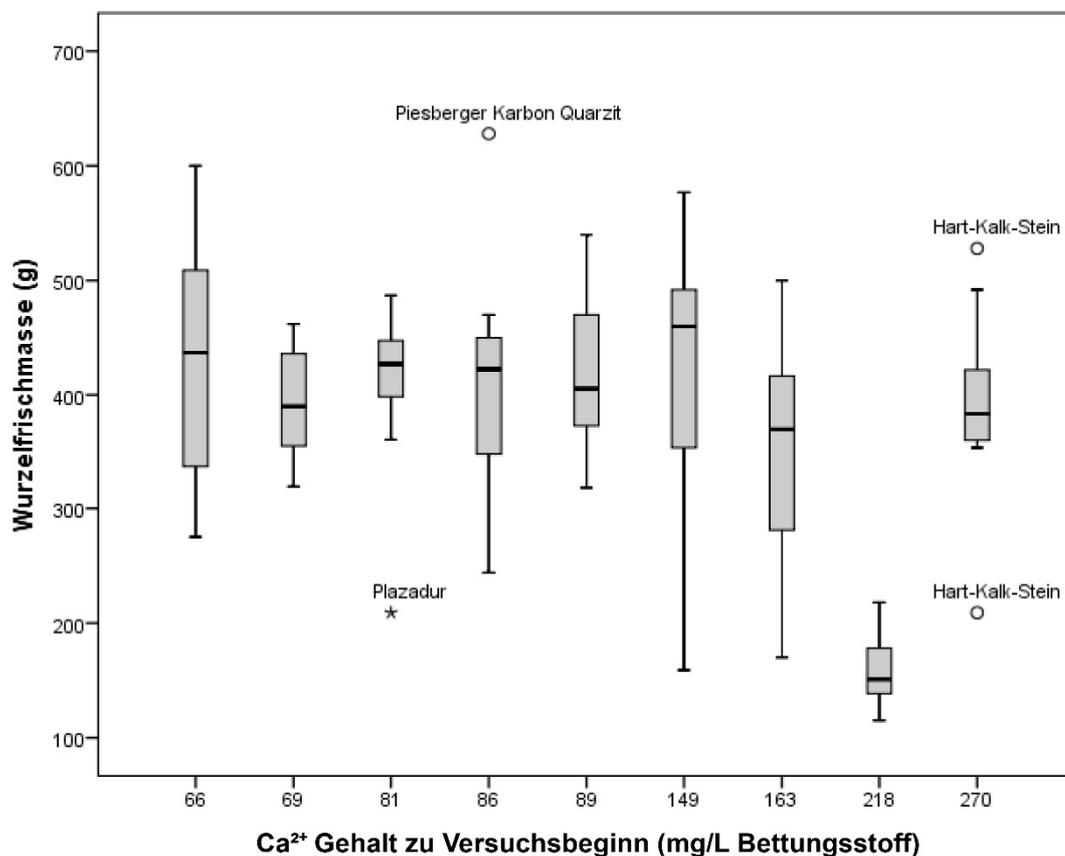
Bezogen auf die Bodenreaktion bevorzugt die als Versuchspflanze eingesetzte *Salix purpurea* schwach saure bis stark alkalische Böden und kann somit zu den kalkliebenden Gehölzen gezählt werden (vgl. SCHIECHTL u. STERN 2002, S. 31). Dadurch wurde im Gefäßversuch bei starker Senkung des pH-Wertes eine hemmende Wirkung auf das Wurzelwachstum erwartet, welche als Ergebnis bestätigt werden kann. Eine pH-Obergrenze konnte indes im Rahmen dieses Versuches nicht ermittelt werden.

5.4 Calciumgehalt ungebundener Bettungstoffe

Da die Pflanze speziell zum Wurzelwachstum gelöste Calciumionen benötigt, wurde untersucht, ob unterschiedliche Calciumgehalte der Bettungstoffe das Wurzelwachstum beeinträchtigen. Ein Calciummangel würde sich in einer geringen Bewurzelung und geringem Pflanzenwachstum zeigen (vgl. FINCK 2007, S. 113).

Die Ergebnisse aus dem Feldversuch machen deutlich, dass die Einwurzelung der unterschiedlichen Bettungstoffe keinen statistisch signifikanten Unterschied aufweist (vgl. 4.1.5). Ein Einfluss des gelösten Calciums ist somit nicht festzustellen (vgl. 4.1.8).

Hinsichtlich des Gehaltes an löslichem Calcium kann nach dem ergänzenden Gefäßversuch ebenso kein Zusammenhang zur Wurzelfrischmasse erkannt werden (vgl. Abb. 121). Vermutlich ist insgesamt kein Calciumgehalt der untersuchten Bettungstoffe niedrig genug, um das Wurzelwachstum negativ zu beeinflussen (vgl. SCHLOMBS 2012, S. 65).



- 66 mg/L Bettungsstoff** - Baumschulboden (n = 12)
- 69 mg/L Bettungsstoff** - Glasasche Granulat (n = 12)
- 81 mg/L Bettungsstoff** - Plazadur (n = 12)
- 86 mg/L Bettungsstoff** - Karbon Quarzit (N = 12)
- 89 mg/L Bettungsstoff** - Basalt (n = 12)
- 149 mg/L Bettungsstoff** - Grauwacke (n = 12)
- 163 mg/L Bettungsstoff** - Gabbro (n = 12)
- 218 mg/L Bettungsstoff** - Ibbenbürener Sandstein (n = 12)
- 270 mg/L Bettungsstoff** - Hart-Kalkstein (n = 12)

Abb. 121: Wurzelfrischmasse je Pflanze (g) in Abhängigkeit zum Gehalt an löslichen Calciumionen der untersuchten Stoffe

Nach FINCK (2007) ist Calcium außer in stark sauren Böden für die Pflanze in den meisten Böden genügend verfügbar (vgl. FINCK 2007, S. 112). Ein hoher pH-Wert ist u.a. Ausdruck für eine hohe Calciumionenkonzentration (Ca^{2+}) der Bodenlösung und damit für eine weitgehende Absättigung der Wurzeloberfläche mit Calciumionen (vgl. AMBERGER 1996, S. 247). Ist im Boden Kalk (CaCO_3) vorhanden, sinkt der pH-Wert nicht unter 7 (vgl. GISI 1997, 128). Die pH-Werte der untersuchten Bettungstoffe liegen mit Werten um pH 8 im schwach alkalischen Bereich und lassen somit vermuten, dass Calcium für die Wurzel insgesamt ausreichend vorhanden ist.

Zusätzlich zum Gehalt an löslichem Calcium wurden zur weiteren Charakterisierung der verwendeten Stoffe die **Nährstoff- und Salzgehalte** der eingesetzten Bettungstoffe aufgenommen (vgl. 4.3.4). Genaue Anforderungen an die Nährstoffgehalte von Straßenbaums substraten sind derzeit nicht bekannt.

Eine Nährstoffanalyse fand bei den Untersuchungen von REICHWEIN (2002) nicht statt. Es wurde lediglich vermutet, dass der Nährstoffgehalt bei den untersuchten Wegebaustoffen auf Grund der hohen Sand- und Kies-/Schottergehalte mit wenig organischer Substanz sehr gering ausfällt. Da dennoch teilweise große Wurzelmassen gefunden wurden, wurde geschlossen, dass der Nährstoffgehalt für die Durchwurzelung der Wegebaustoffe nicht von großer Bedeutung sein kann. (REICHWEIN 2009, S. 188). Auch BALDER (1998) formuliert, dass an innerstädtischen Baumstandorten die Nährstoffvorräte meist unzureichend sind und viele Straßenrandböden durch Mangel an Stickstoff, Kalium und Magnesium gekennzeichnet sind. Jedoch sind Phosphor sowie das Calcium häufig im Überschuss vorhanden (vgl. BALDER 1998, S. 27).

Hinsichtlich der **Salzgehalte** zeigen sich insgesamt mit Werten von 9,3 mg/100 g bis 69 mg/100 g sehr niedrige Gehalte (vgl. 4.3.4). So stellt die FLL (2010) für Baums substrate 150 mg/100 g als Anforderung. Ein Einfluss des Salzgehaltes kann in der vorliegenden Arbeit nicht aufgezeigt werden.

Trotz der relativ niedrigen Salz- und Nährstoffgehalte findet ein Wurzelwachstum in die Bettungstoffe statt. Die Vermutung, dass der Nährstoffgehalt für die Durchwurzelung eine untergeordnete Rolle spielt kann somit durch den Feld- und Gefäßversuch bestätigt werden.

Auch hinsichtlich geeigneter Baums substrate wird derzeit Forschungsbedarf konstatiert, um genauere Anforderungen an die Nährstoffgehalte von Straßenbaums substrate aufzeigen zu können (vgl. SCHÖNFELD 2013). Durch weitere Forschung könnten Anhaltspunkte ermittelt werden, wie ein Wegebaustoff bezüglich seiner bodenchemischen Eigenschaften beschaffen sein sollte, damit weniger Pflanzenwurzeln eindringen.

5.5 Grenzzonenausbildung der Wegebauschichten

Betreffend der Ausbildung der Grenzzone zwischen den Wegebauschichten wurde angenommen, dass eine Verzahnung zwischen den Wegebauschichten ein Einwurzeln vermindern kann. Die Auflösung der Grenzschichten bezieht sich zum einen auf die Zone zwischen der Pflasterdecke und der Bettung. Diese Auflösung erfolgt durch die Verwendung eines **Betonrechtecksteines mit profilierter Unterseite**. Während die Verzahnung der Grenzschicht zwischen Bettung und Tragschicht durch ein **Aufrauen der Tragschicht** durchgeführt wurde (vgl. 3.1.2).

Insgesamt machen die Ergebnisse deutlich, dass eine Verzahnung der Schichten zu keiner Senkung der aufkommenden Wurzelfrischmassen in der Bettungsschicht führt (vgl. 4.1.4). Statistisch gesehen gibt es keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Wurzelfrischmassen in der Bettungsschicht der Varianten (vgl. 4.1.5).

Die Untersuchung der Variante mit der aufgerauten Tragschicht ergibt, dass sich die Wurzeln am ehesten in dieser weniger verdichteten Wegebauschicht befinden. Das leicht vermehrte Wurzelauftreten in der Bettungsschicht ist darauf zurückzuführen, dass die Wurzeln aus der aufgerauten Tragschicht heraus von unten in die Bettungsschicht gelangen.

Die Annahme von KOPINGA (1992), dass eine unregelmäßige Grenzflächenstruktur ein zu großes Hindernis stellt und die Poren zwischen den Schotterteilchen einen zu großen Überbrückungsabstand für die Wurzeln sind, kann im Rahmen der Versuchslaufzeit nicht eindeutig bestätigt werden (vgl. KOPINGA 1992, S. 10.18). Ob die aufgeraute Tragschicht auf lange Sicht ein Einwurzeln direkt in die Grenzschicht vermindern könnte, müsste weiter untersucht werden.

Zu beobachten war zudem, dass sich die Wurzeln aus der Variante mit dem profilierten Pflasterstein in dem Zwischenraum der ein Zentimeter hohen Rillen befinden (vgl. 4.1.4). Hier ist der Bettungstoff nicht so stark verdichtet und es entstehen Hohlräume in den Rillen der profilierten Steine, die leicht von den Wurzeln erschlossen werden können.

Sowohl die eingedrungenen Wurzeln in der aufgerauten Tragschichtoberfläche als auch die Wurzeln in den Hohlräumen der profilierten Pflastersteine können in den Folgejahren durch das einsetzende Dickenwachstum Schäden an der Pflasteroberfläche verursachen.

Hinsichtlich bestehender Regelwerke gibt es keine Anforderungen bezüglich der Grenzschichtenausbildung. Weitere Ansätze eine Verzahnung im Bereich der Wegebauschichten herbeizuführen, um ein Einwurzeln in die Grenzschichten zu reduzieren, wurden noch nicht systematisch und zugleich praxisorientiert untersucht. Somit existieren derzeit im Bereich der Grenzschichtenuntersuchung keine zu vergleichenden Ergebnisse. Insgesamt werden weitere Forschung und Praxisversuche zum Thema alternative Wegebaustoffe von COSTELLO u. JONES (2003) als wichtig angesehen.

5.6 Hydraulisch gebundene Bettungsmörtel

Vor Versuchsbeginn wurde angenommen, dass hydraulisch gebundene Bettungsstoffe ein Einwurzeln vermindern oder gegebenenfalls vermeiden können, da durch die Festigkeit des Mörtels der Eindringwiderstand für die Wurzelspitze zu hoch ausfällt. Ein Verschieben der festen Teilchen in Folge des Eindringens ist bei gebundenen Bettungsstoffen für die Wurzelspitze nicht möglich.

Im Rahmen des Feldversuches wurde im Bereich der zwei gebundenen Bauweisenvarianten nach 18 Monaten Versuchslaufzeit lediglich eine Probeöffnung vorgenommen. Diese hat gezeigt, dass bei den hydraulisch gebundenen Bettungsstoffen keine Einwurzlung der angrenzenden Ulmen stattgefunden hat. Im unmittelbaren Vergleich zu den ungebundenen Bettungsstoffen konnte für den betrachteten Zeitraum somit ein Einwurzeln verhindert werden (vgl. 4.1.4).

Auch der Gefäßversuch bestätigt, dass die Verwendung von hydraulisch gebundenen Bettungsmörteln insgesamt zur stark verminderten Durchwurzelung gegenüber ungebundenen Bettungsstoffen führt. Dadurch, dass in den Versuchen keine sonst notwendige Randeinfassung berücksichtigt wurde, hatten die Wurzeln direkt die Möglichkeit in die Bettungsmörtel einzuwachsen. Die Wurzeln dringen bis circa einen Zentimeter in die poröse Oberfläche der Mörtelschicht ein (vgl. 4.4.3). Vermutlich nur so weit, bis der mechanische Widerstand zu groß wird und unmittelbar keine offene Pore mehr vor der Wurzelspitze liegt. Bei einigen eingedrungenen Wurzelspitzen konnten zudem Verdickungen beobachtet werden (vgl. 4.4.2). Dieses lässt darauf schließen, dass sie durch den hohen Eindringwiderstand in ihrem Wachstum gehindert wurden (vgl. TROMMER 1920, S. 54; BALDER 1998, S. 13; POLOMSKI & KUHN 1998, S. 61). Eine Betrachtung der **Langzeitwirkung** steht jedoch noch aus. Die weitere Auswertung des angelegten und noch bestehenden Feldversuches ist damit sinnvoll und kann vertiefende Erkenntnisse zur Durchwurzelung sowie ggf. zu entstehenden Schadbildern aufzeigen.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die Pflanze speziell zum Wurzelwachstum u.a. gelöste und damit pflanzenverfügbare **Calciumionen** (Ca^{2+}) benötigt. Der Gefäßversuch untersucht weiter, ob ein unterschiedlicher Gehalt an **löslichem Calcium** bei den verschiedenen zusammengesetzten Mörteln einen Einfluss auf die Durchwurzelungsintensität ausübt. In der Teilauswertung wurde deutlich, dass die Variante (Kalksteinmehl) mit dem höchsten Wert an löslichen Calciumionen auch die höchste Anzahl an Penetrationsstellen auf der Innenseite der Mörtelwände aufweist (vgl. 4.4.6). Dieses Ergebnis der ersten Teilauswertung konnte nach Verlängerung der Versuchslaufzeit bestätigt werden. Die Endauswertung zeigt hier, dass der aufgenommene Wurzeldeckungsgrad-Rang bei der Variante mit dem Kalksteinmehl im Mittel am höchsten ausfällt. Die Variante mit dem Calciumsulfoaluminat weist hingegen zur Teilauswertung die niedrigste Anzahl an Penetrationsstellen auf. Dieses Ergebnis wird ebenso durch die Endauswertung bestätigt. Hier zeigt sich dann auch der geringste mittlere Wurzeldeckungsgrad Rang.

Obwohl auf Basis der Gegenüberstellung zwischen den Gehalten an löslichen Calciumionen der Mörtel mit den Einwurzlungsintensitäten ein Zusammenhang zu vermuten ist, kann ein das Wurzelwachstum einschränkender Calciummangel für die Versuchspflanzen ausgeschlossen werden, da die Gehalte an löslichem Calciumionen

insgesamt sehr hoch ausfallen und weit über dem Gehalt der ungebundenen Hart-Kalkstein Variante liegen (vgl. 4.4.5), bei der eine starke Durchwurzelung festzustellen ist.

Auch HEIDGER u. KURKOWSKI (2006) erläutern, dass durch den Einbau von basenreichen Stoffen (Zementmörtel, Beton, Betonwerkstein, Kalksteingesteinskörnungen) im Bereich des Baumumfeldes die Bodenreaktion in ein alkalisches Milieu verschoben wird. Betrachtet man hier ausschließlich den pH-Wert, so müsste ein Pflanzenwachstum ausgeschlossen sein, da Bauweisen mit Zement- und Betonprodukten pH-Werte bis zu pH 13 erreichen. Auch die Senkung der Werte durch Auslaugung bis auf pH-Werte von um pH 10, reicht nicht aus, ein Optimum für die Pflanze zu bieten. Durch den stetigen Calciumüberschuss wird sich auch mit der Zeit kein neutraler Zustand einstellen (vgl. HEIDGER u. KURKOWSKI 2006, S. 3)

Auch ein unterschiedliches Wurzelwachstum der einzelnen Versuchspflanzen kann als Einflussfaktor ausgeschlossen werden. So zeigt die Varianzanalyse (vgl. 4.4.4), dass es hinsichtlich der **Wurzelfrischmassen im Substratkern** zur Endauswertung zwischen den Varianten insgesamt keinen signifikanten Unterschied gibt. Zudem kann kein statistischer Zusammenhang zwischen der mittleren Wurzelfrischmasse im Substratkern und dem Wurzeldeckungsgrad-Rang nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass ein insgesamt hohes Wurzelwachstum nicht unbedingt zu einem hohen Wurzeldeckungsgrad-Rang auf der Innenseite des Mörtelblocks führt.

Da sich laut Mörtelhersteller die verwendeten gebundenen Bettungsstoffe in ihren physikalisch-mechanischen Eigenschaften, d.h. z.B. in ihrer Druckfestigkeit und in ihrem Porenvolumen nicht maßgeblich unterscheiden, ist zu vermuten, dass andere bodenchemische Faktoren hinsichtlich der Durchwurzelungsintensität einen Einfluss haben. Die Zusammensetzung der Mörtelrezepturen hinsichtlich der Gesamtionenbilanz zeigt auf, dass bei der Variante mit dem Calciumsulfoaluminat der **Gehalt an Aluminium** am höchsten ausfällt, während der geringste Wert bei der Variante mit dem Kalksteinmehl festzustellen ist (vgl. 4.4.5). Es kann vermutet werden, dass die geringe Anzahl an Penetrationsstellen bzw. der niedrige mittlere Wurzeldeckungsgrad-Rang bei der Variante mit dem Calciumsulfoaluminat mit dem hohen Gehalt an Aluminium in Verbindung stehen könnte. Der Einsatz eines Aluminiumsulfats zur Absenkung des pH-Werts zeigt auch im Gefäßversuch nach SCHLOMBS (2012), dass die Durchwurzelungsintensität der ungebundenen Bettungsstoffe verringert werden kann (vgl. 4.3.2).

Die weiteren **visuellen Beobachtungen** geben qualitative Hinweise zur Durchwurzelbarkeit gebundener Bettungsmörtel. Hiermit kann gezeigt werden, dass ein Einwurzeln ähnlich wie bei den gebundenen Varianten insbesondere in vorhandene **Grenzschichten** und **Risse** erfolgt (vgl. 4.4.3). Auch REICHWEIN (2002) beschreibt, dass mit Kalk oder Zement gebundene Pflasterbettungen durch Spalte und Risse erschlossen werden (vgl. REICHWEIN 2002, S. 202).

In erster Linie können qualitative Ergebnisse zur Durchwurzelbarkeit gebundener Bettungsmörtel gegeben werden. Hiermit können erste Hinweise gegeben werden, dass eine Minimierung durch unterschiedliche Mörtelrezepturen geringfügig zu erzielen ist. Hier sind weitere Anschlussversuche notwendig, um Einflussfaktoren genauer zu bestimmen.

5.7 Zusammenfassende Bewertung

Das anwendungsorientierte Ziel dieser Arbeit war es, die Wirkung von Baustoffeigenschaften und Bauweisen auf die Durchwurzelbarkeit zu untersuchen und daraus mögliche **schadenvorbeugende Lösungsansätze** für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten abzuleiten.

Durch die **systematische Untersuchung** zur Durchwurzelbarkeit von Wegebaustoffen und Bauweisen können **praxisrelevante Erkenntnisse** abgeleitet werden. So verdeutlichen die Ergebnisse, dass handelsübliche ungebundene Bettungsstoffe ein Einwurzeln grundsätzlich ermöglichen, da die Wachstumsbedingungen für die Wurzeln anscheinend ausreichend sind.

Wie die nachfolgende Übersicht zeigt, kann zudem festgestellt werden, dass die untersuchten Faktoren überwiegend zu **keiner Minimierung/Verhinderung** der Durchwurzelbarkeit führen und somit zu keiner schadenvorbeugenden Wirkung beitragen (vgl. Tab. 62). So zeigten die Versuche weder bei einer **verzahnenden Grenzzonenausbildung** noch bei der Verwendung von ungebundenen Bettungsstoffen mit einem verringerten Gehalt an **löslichem Calcium** eine Verminderung in der Durchwurzelbarkeit. Und der Einsatz des **hydrophoben Sandes** als alternativer Bettungsstoff führte zu einer Förderung der Wurzelmassen.

Tab. 62: Einfluss untersuchter Faktoren auf die Durchwurzelbarkeit und Einschätzung schadenvorbeugender Wirkung

Untersuchte Faktoren	Minimierung der Durchwurzelbarkeit				Schaden- vorbeu- gende Wirkung
	keine	minimale	deutliche	differenzierte	
Ungebundene Bettungsstoffe					
Korngrößenverteilung					
Massenanteil < 0,063 mm ca. 10 M.-% (grobporanarm)			x		gegeben
ohne Kornfraktion < 0,063 mm (grobporanreich)				x	bedingt
Kornform					
runde Oberfläche	x				keine
gebroschene Oberfläche	x				keine
Alternative Materialien					
Hydrophober Sand	x				keine
Bodenchemische Baustoffeigenschaften					
Bodenreaktion (pH)				x	bedingt
Gehalt an löslichem Calcium	x				keine
Ungebundene Bauweise					
Verzahnung von Grenzsichten					
Stein mit profilierter Unterseite	x				keine
aufgeraute Tragschichtoberfläche	x				keine
Hydraulisch gebundene Bauweise					
hydraulisch gebundene Bettung			x		gegeben
Mörtelrezepturen		x			bedingt

Einer differenzierten Betrachtung bedarf der Einfluss **grobporiger Bettungsstoffe** ohne Kornfraktion $< 0,063$ mm sowie des **pH-Wertes**. Hier ist ein pflanzenartsspezifisches Wurzelwachstum mit in die Betrachtung einzubeziehen.

Eine **deutliche Minimierung** der Durchwurzelbarkeit kann durch zwei Ansätze aufgezeigt werden, bei denen unabhängig vom artsspezifischen Wurzelwachstum vermutlich eine schadenvorbeugende Wirkung für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten gegeben ist. Zum einen ist eine Verminderung bis hin zur Verhinderung durch die Verwendung des **grobporigen Bettungsstoffes** der Körnung 0/11 mit erhöhtem Massenanteil der Kornfraktion kleiner 0,063 mm über das von der TL Pflaster StB 06 geforderte Maß von maximal 5 M.-% auf ca. 10 M.-% erzielt werden. Zum anderen weisen im Vergleich zu den ungebundenen Bauweisen die **hydraulisch gebundenen Bauweisen** eine deutliche Verminderung in der Durchwurzelbarkeit auf. Zudem kann aufgezeigt werden, dass durch unterschiedliche Zusatzstoffe bei den Mörtelrezepturen eine weitere Beeinflussung der Durchwurzelbarkeit möglich ist. Als Alternative zur ungebundenen Pflasterbauweise kann eine Bauweise mit gebundener Bettung und zusätzlich mit gebundener Tragschicht für den Anwendungsbereich der Geh- und Radwege eine Möglichkeit darstellen, eine Schadenvorbeugung zu erzielen und eine möglichst lange und schadenfreie Nutzungsdauer zu gewährleisten.

6 Schadenvorbeugende Ansätze für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten

Die zusammenfassende Bewertung der untersuchten Faktoren zeigt zwei Ansätze auf, bei denen vermutlich unabhängig vom artspezifischen Wurzelwachstum eine schadenvorbeugende Wirkung für den Geh- und Radwegebau an Baumstandorten gegeben ist (vgl. 5.7). Diese Ansätze beziehen sich zum einen auf die **Modifikation der Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe** (6.1) und zum anderen auf den **Einsatz hydraulisch gebundener Bauweisen** (6.2).

Bei beiden Bauweisen bestehen jedoch hinsichtlich der fachgerechten Anwendungen Risiken, die im Rahmen einer aufmerksamen Planung einer Abwägung bedürfen. Neben den **Risiken** wird nachfolgend weiterer **Forschungsbedarf** aufgezeigt.

6.1 Modifikation der Korngrößenverteilung ungebundener Bettungsstoffe

Empfehlung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass hinsichtlich der **Korngrößenverteilung** handelsübliche Bettungsstoffe mit den Körnungen 0/5, 0/8 sowie 0/11 mit einem Schluffanteil von um die 3 M.-% durchwurzelt werden, da diese über ausreichend gute Bedingungen für ein Wurzelwachstum verfügen.

Zur Reduzierung der Durchwurzlung kann hinsichtlich der Korngrößenverteilung der Lösungsansatz gesehen werden, den Massenanteil der Kornfraktion kleiner 0,063 mm über das von der TL Pflaster StB 06 geforderte Maß von maximal 5 M.-% zu erhöhen. Es kann aufgezeigt werden, dass bei einem Bettungstoff der Körnung 0/11 mit einer Erhöhung des Massenanteils der Kornfraktion kleiner 0,063 mm auf ca. 10 M.-% Verdichtungen der Bettungsschichten von über 2 g/cm³ erzielt werden können. Diese hohen Dichten bewirken eine **Reduzierung der Luftkapazität** (Verringerung des Grobporenanteils) auf unter 10 Vol.-%. Die Luftkapazität sinkt zudem durch die Beigabe von Ton weiter auf Werten kleiner 5 Vol.-%. Der Gefäßversuch zeigt, dass dadurch die Durchwurzbarkeit minimiert und teilweise verhindert wird. Nach HORN (2011) kann ein Gehalt von 10% Sauerstoff als Untergrenze für optimales Pflanzenwachstum gesehen werden (vgl. u.a. HORN 2011, S. 120 f.).

Des Weiteren erhöht sich für die Wurzeln durch die hohen Dichten vermutlich der **Eindringwiderstand** auf ein Maß, welches nicht überwunden werden kann. Ein Wurzelwachstum im Bettungskörper war ab einer Proctordichte von 2 g/cm³ nicht mehr festzustellen. Die Wurzeln wachsen stattdessen verstärkt im Substratkern sowie in der Grenzzone zum Rohr. Auch nach Erkenntnissen von REICHWEIN (2002) werden vor allem die Bereiche nicht durchwurzelt, die sehr dicht lagern.

Nach REICHWEIN (2002) sollten **nicht durchwurzeltbare Tragschichten** (starke Verdichtung und geringer Gehalt an Grobporen) als Schutz der Deckschicht eingebaut werden, damit ein Wurzelwachstum von unten nach oben in die Bettung verhindert wird (vgl. REICHWEIN 2002, S. 239 f.). Die vorliegende Arbeit bestätigt, dass die Wurzeln von unten aus der Tragschicht heraus in die Bettung wachsen können (vgl. 4.1.4). Durch den Einsatz von nicht durchwurzeltbaren Tragschichten könnte der Zugang der Wurzeln versperrt werden. Hinsichtlich der Bettungsstoffe kann aufgezeigt werden, dass das Wurzelwachstum durch die Erhöhung des Schluffanteils eingeschränkt werden kann.

Für die Kies- und Schottertragschichten könnte ebenso anhand von weiteren Versuchen festgestellt werden, welche Kornzusammensetzung und Verdichtung eine nicht durchwurzelbare Tragschicht haben sollte. Insgesamt bestätigen die Untersuchungen der Bettungsstoffe die Aussagen für die Tragschicht, welche von REICHWEIN (2002) formuliert wurden. Hiernach werden Unterschiede bei der Durchwurzelung von Tragschichten ebenso auf den **Verdichtungsgrad** und dem davon abhängigen **Eindringwiderstand** zurückgeführt (vgl. REICHWEIN 2002, S. 192).

Risiken

Ebenso konnte jedoch verdeutlicht werden, dass sich bei Verringerung der Luftkapazität, das heißt durch eine Erhöhung der Proctordichte, auch die **Wasserdurchlässigkeit** verringert. Bautechnisch gesehen muss jedoch nach TL Pflaster-StB 06 „im eingebauten und verdichteten Zustand eine dauerhafte Wasserdurchlässigkeit der Bettung erreicht werden“ (vgl. TL Pflaster-StB 06, S. 10). Bei Pflasterflächen gelten Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten für Tragschicht von $k_f > 1 \times 10^{-5}$ m/s als ausreichend sicher. Dieser Wasserdurchlässigkeitskoeffizient wird nach MENTLEIN (2009) bei Feinkornanteilen zwischen 3 M.-% und 7 M.-% erreicht (vgl. MENTLEIN 2009, S. 44). Sinkt der k_f -Wert unter 1×10^{-6} m/s ist von einer schwachen, bei unter 1×10^{-8} m/s von einer sehr schwachen Wasserdurchlässigkeit auszugehen. Werte kleiner 1×10^{-9} m/s gelten als nahezu völlig wasserundurchlässig (vgl. DIN 18130-1: 1998-05, S. 3). So zeigte sich bei Variante C1.5 mit dem höchsten Schluffanteil von 16,5 M.-% und einem k_f -Wert von $7,3 \times 10^{-9}$, dass der Bettungstoff nahezu wasserundurchlässig ist. Mit dem oben genannten Schluffanteil von um die 10 M.-% kann mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert um die $3,9 \times 10^{-7}$ bzw. $2,8 \times 10^{-7}$ noch eine schwache Wasserdurchlässigkeit erzielt werden.

Eine Erhöhung des Schluffanteils hat neben der Auswirkung auf die Wasserdurchlässigkeit Einfluss auf die **Verdichtbarkeit**. So ist laut MENTLEIN (2009) die Verdichtbarkeit der Bettung gegeben, wenn der Feinkornanteil kleiner 3 M.-% liegt (vgl. MENTLEIN 2009, S. 73). Die Erstellung der Versuchsgefäße zeigt hinsichtlich der Verdichtbarkeit keine Einschränkungen bei einem Schluffanteil um die 10 M.-%. (vgl. KIBLER 2013, S.62).

Einfluss übt eine Erhöhung des Schluffanteils des Weiteren auf die Frostempfindlichkeit aus. Diesbezüglich gilt laut TL Pflaster-StB der Nachweis der **Frostunempfindlichkeit** des Bettungstoffes als erbracht, wenn der Massenanteil von Bestandteilen kleiner 0,063 mm kleiner 5 M.-% ist. Der als Kies-Schluff-Gemisch (GU) einstuftbare Bettungstoff mit einem Schluffanteil von 10 M.-% kann durch seine Feinkörnigkeit und den dadurch entstehenden kleinen Poren meist einen höheren Wassergehalt aufweisen als grobkörnigere Baustoffgemische. Friert das Wasser in den Poren kann es sodann zu Frosthebungen kommen (vgl. TIMMERMANN 2009, S. 380). Beifolgend zählen ebenso die **Entmischungsneigung** der Bettungsstoffe, welche gering sein sollte, sowie die **Filterstabilität** zwischen Bettung und Tragschicht bzw. zwischen Fuge und Bettung zu den zu überprüfenden bautechnischen Eigenschaften.

Hinsichtlich des Schluffanteils werden im Bereich wassergebundener Wegedecken weitaus höhere Werte für den Anteil an Schluff angegeben. Bei Baustoffen für die 40 mm bis 60 mm dicken Deckschichten von wassergebundenen Wegebauweisen nach FLL (2007) muss der Feinanteil $d < 0,063$ mm im eingebauten Zustand zwischen 8 M.-% und 21 M.-% betragen (vgl. FLL 2007, S. 35). Dabei werden für die wassergebundene Wegebauweise als 3-Schichtbauweise auch Rad- und Gehwege innerhalb

geschlossener Ortschaften aber auch Plätze und Wege mit geringem PKW Verkehr als Anwendungsgebiete genannt (vgl. FLL 2007, S. 13). Ob eine Übertragbarkeit des relativ hohen Schluffanteils aus bautechnischer Sicht auf die Pflasterbauweise möglich ist, gilt es zu untersuchen.

Forschungsbedarf

Weitere Untersuchungen müssen aufklären, inwieweit eine Erhöhung des Schluffanteils über den geforderten maximalen Anteil von 5 M.-% bzw. die damit einhergehende Absenkung der Wasserdurchlässigkeit einen negativen Einfluss auf die bautechnische Beurteilung der Geh- und Radwege ausüben. Bei der Überprüfung der **bautechnischen Eignung** müssen die Faktoren Verdichtbarkeit sowie Frostunempfindlichkeit mit einbezogen werden. Beifolgend zählen ebenso die Entmischungsneigung der Bettungsstoffe, welche gering sein sollte, sowie die Filterstabilität zwischen Bettung und Tragschicht bzw. zwischen Fuge und Bettung zu den zu überprüfenden bautechnischen Eigenschaften.

6.2 Einsatz hydraulisch gebundener Bauweisen

Empfehlung

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Wirkungsweise des von COSTELLO u. JONES (2003) angedachten Lösungsweges der Stärkung der Wegedecke und somit der Vergrößerung der Toleranz gegen Wurzeldrücke. Es konnte aufgezeigt werden, dass die gebundene Bauweise im Vergleich zu einer ungebundenen Bauweise eine Durchwurzelung vermutlich auf Grund des hohen **mechanischen Eindringwiderstands** am deutlichsten reduziert und damit hinsichtlich einer Einwurzelung voraussichtlich am wirkungsvollsten schadenvorbeugend wirkt. Werden gebundene Bettungsschichten fachgerecht ausgeführt und besitzen sie eine hohe Rohdichte können diese aller Wahrscheinlichkeit nach einen mechanischen Widerstand gewährleisten, der unabhängig vom artspezifischen Wurzelwachstum ein Eindringen vermeiden kann. Es kann somit vermutet werden, dass, falls ein Eindringen von Baumwurzeln in die hydraulisch gebundene Bettung stattfindet, dieses gegenüber den ungebundenen Bettungsstoffen zumindest zeitlich stark verzögert erfolgt. Somit können **Reparaturintervalle** verlängert werden, da Schäden an der Pflasteroberfläche erst später auftreten.

Risiken

Auch, wenn die Ergebnisse hinsichtlich der Einwurzelungsgefahr zeigen, dass der Einsatz gebundener Bettungsstoffe Vorteile aufweist, so steht allgemein die Verwendung von gebundenen Pflasterbauweisen derzeit zur Diskussion, da diese Besonderheiten im Verhalten mit sich bringen. Zwar finden sie in verschiedenen Bereichen, wie auch in Fußgängerzonen, Anwendung (vgl. MENTLEIN 2009, S. 93), dennoch berichtet WERLAND (2012), dass bei den vollgebundenen Bauweisen sowie bei den Mischbauweisen hohe Schadensfallhäufigkeiten auftreten können und häufig noch Unsicherheiten bei der Bauausführung bestehen. Das macht deutlich, dass schon bei der Planung eine hohe Aufmerksamkeit verlangt wird und insbesondere die zukünftige Verkehrsbelastung zu berücksichtigen ist.

Erkenntnisse zeigen, dass es derzeit Probleme mit der Anwendung gebundener Bauweisen gibt, die unter Umständen auch eine Einwurzelung fördern können. Hier beschreibt WERLAND (2012) u.a. das **Ablösen des Belags von der Bettung**. Dieses

führt zu einer für die Baumwurzel durchdringbaren Grenzschicht direkt unter dem Pflasterbelag. Der Gefäßversuch zur Untersuchung gebundener Bettungsmörtel bestätigt, dass diese **Grenzschicht** zu einer Einwurzelung führen kann (vgl. 4.4.3). Die Vorbehandlung der Pflastersteine durch die Aufbringung einer **Haftbrücke** führt zur Erhöhung der Haftzugfestigkeit zwischen Pflaster und Bettungsmörtel (vgl. u.a. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 6; ZTV-Wegebau 2013, S. 32). Ein mögliches Wurzeleindringen in die Grenzbereiche könnte somit verhindert werden.

Grenzschichten, in denen die Wurzeln eindringen können, werden auch ausgebildet, wenn die gebundene Bettungsschicht in zwei Schichten ausgeführt wird. Das bestätigt auch der Gefäßversuch, bei dem trotz fachgerechter Ausführung ein Wurzeleindringen in die Grenzschicht zwischen den beiden Mörtelschichten zu beobachten war (vgl. 4.4.3).

Des Weiteren kommt es bei der gebundenen Bauweise insbesondere durch Spannungen in der Gesamtkonstruktion zu **Rissbildung** in den Fugen sowie im Belag oder zur gesamten Zerstörung dieser (vgl. WERLAND 2012, S. 5). Auch hiermit kann ein Wurzeleinwuchs gefördert werden, da mögliche Eindringstellen für die Wurzelspitzen entstehen. So beschreibt auch REICHWEIN (2002), dass mit Kalk oder Zement gebundene Pflasterbettungen durch Spalte und Risse erschlossen werden. Sie zeigt auf, dass insgesamt bei Mörtelbettungen hohe Anhebungen entstehen, da der Stoff nicht weiter durch die Wurzel verdichtet d.h. verdrängt werden kann (vgl. REICHWEIN 2002, S. 202). Die Ergebnisse des Gefäßversuches zur Untersuchung gebundener Bettungsmörtel bestätigen, dass die Wurzeln in den **Fugen** und **Grenzschichten** (Ecken Mörtelblock, Grenzschicht zwischen den beiden Einbauschichten) einwachsen (vgl. 4.4.3). Schäden an der Oberfläche konnten im Rahmen der angesetzten Versuchslaufzeit jedoch noch nicht beobachtet werden. Um Rissbildung in Belag und Bettung verursacht durch thermischen Spannungen zu reduzieren und damit einem Einwurzeln entgegenzuwirken, sind **Bewegungsfugen** notwendig. Das W2 Arbeitspapier der FGSV empfiehlt Bewegungsfugen in Längs- und Querrichtung im Abstand von vier Metern und sechs Metern sowie an festen Einbauten (vgl. FGSV 2007: Arbeitspapier W2, S. 14). Auch die Richtlinie des DNV beinhaltet, dass gebundene Bauweisen Bewegungsfugen erfordern (vgl. DNV 2014, S. 14). Zur Notwendigkeit der Bewegungsfuge sagen die ZTV-Wegebau, dass „zwar die Notwendigkeit in vielen Anwendungsfällen gegeben [ist], über die Art der Ausbildung kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nur der Bedarf an Forschung und Entwicklung formuliert werden“ (vgl. FLL 2013, ZTV-Wegebau, S. 8). Zudem kann der schon erwähnte Haftvermittler zwischen Pflasterunterseite und Bettungsmörtel aufkommende Spannungen verringern (vgl. BUCHHOLZ 2010, S. 207).

Nach WERLAND (2012) haben sich Trasszementmörtel für Bettungsmörtel bewährt. Sie werden nicht so hart und können dadurch Spannungen in den Fugen und der Bettung besser abbauen (vgl. WERLAND 2012, S. 5). Insgesamt wird der Trasszement als Bindemittel mit spannungsarmen, gefügedichtes und nahezu rissfreies Abbindeverhalten beschrieben (vgl. SIMON u. KERSTEN 2010). Dadurch könnten Spannungsrisse, in die Wurzeln eindringen können, vermieden werden. Der Gefäßversuch zeigt, dass die Mörtelvariante mit Trass bezüglich des Einwurzeln geringere Werte aufweist als bei der Variante mit dem Kalksteinmehl (vgl. 4.4.3).

Die fachgerechte Anwendung einer gebundenen Bauweise im Bereich der Geh- und Radwege an Baumstandorten kann im Vergleich zu einer ungebundenen Bauweise

hinsichtlich der Einwurzelungsgefahr Abhilfe schaffen, allerdings sollte im Einzelfall stark abgewogen werden, da diese sogenannte „starre Bauweise“ unter anderen Gesichtspunkten wiederum nachteilig sein kann. So können **Schadenbehebungen/Reparaturen** bei ungebundenen Bauweisen schneller und unter Wiederverwendung der Steine durchgeführt werden (vgl. FGSV 2015, M FP, S. 7). Werden bei gebundenen Bauweisen Reparaturen durchgeführt entstehen neue Grenzschichten und Fugen, die ein Einwurzeln weiter begünstigen.

Forschungsbedarf

Im Bereich der gebundenen Bettungstoffe sind derzeit keine vergleichbaren Untersuchungen bekannt, die eine Betrachtung hinsichtlich einer Minimierung des Einwurzeln vornehmen. COSTELLO u. JONES (2003) konstatieren Forschungsbedarf hinsichtlich der Modifikation von Baustoffen und Bauweisen, um zum Beispiel die Wegedecke zu stärken und so die Toleranz gegen Wurzeldrücke zu vergrößern.

Es wird angenommen, dass Schäden, welche durch Einwurzelung entstehen können, mit der gebundenen Bauweise zumindest zeitlich herausgezögert werden können. Welche Zeiträume hierbei erreicht werden können muss durch **Langzeitbetrachtungen** weiter untersucht werden. Insgesamt kann eine gebundene Bauweise mit gebundener Tragschicht vermutlich die Einwurzelungsgefahr gegenüber einer Bauweise mit lediglich gebundener Bettung weiter eindämmen. Neben der Langzeitbetrachtung kann bei weiteren Untersuchungen der Schwerpunkt insbesondere auch auf die **Weiterentwicklung der verwendeten Mörtel** gelegt werden. Hier zeigt der Gefäßversuch, dass durch unterschiedliche Zusatzstoffe die Einwurzelung beeinflusst werden kann. Auch zur Entwicklung der gebundenen Bauweise insgesamt könnte analysiert werden, welche **Schichtdicken** bezüglich der Einwurzelungsgefahr sinnvoll sind. So unterstützt REICHWEIN den Gedanken, dass „je tiefer Wurzeln wachsen, desto geringer ist ihr Schadpotenzial“ (vgl. REICHWEIN 2002, S. 250). Des Weiteren ist zu untersuchen, wie eine **Rissbildung** des Mörtels einzudämmen ist. Hierbei spielt zum Beispiel der Wasserzementwert (w/z -Wert; Massenverhältnis von Wasser- und Zementgehalt) eine Rolle. Dieser ist bedeutsam „für den Porenraum im Zementstein [...] und damit für die Dichtigkeit und Festigkeit des Betons. [...] Je größer der w/z -Wert wird, umso geringer sind Dichtigkeit und Festigkeit des Betons.“ (vgl. SCHOLZ u. HIESE et al. 2007, S. 258). Ein weiterer Schwerpunkt kann bei der Betrachtung der gebundenen Bauweise auf die **Lebenszykluskosten** im Vergleich zur ungebundenen Bauweise gelegt werden.

Quellenverzeichnis

Literatur

- AMBERGER, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. völlig neubearbeitete Auflage. Ulmer. Stuttgart
- ASTLEITNER, Doris (2010): Endbericht_Baumssubstrat mit mineralischem Baustoff – Recycling – Material. Universität für Bodenkultur Wien
- BALDER, Hartmut (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Ein Buch zum vorsorgenden und nachsorgenden Wurzelschutz. Berlin und Wien
- BARKER, Philip A. (1994): Root Barriers for Controlling Damage to Sidewalk. In: Watson, Gary (Hrsg.): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 179-185.
- BELTZ, Heinrich (2014): Versuchsergebnisse: Baumsubstrate – Welcher pH-Wert ist der richtige? In: Tagungsband der FLL-Tagung vom 26.08.2014: Baumpflanzungen in der Stadt. Hannover.
- BÖHM, W. (1979): Methods of studying Root Systems. Berlin, Heidelberg, New York
- BRAUN, Helmut J. (1988): Bau und Leben der Bäume. 2. erneuerte Auflage. Freiburg
- BUCHHOLZ, Jörn (2010): Gebundene Pflasterbauweisen. Thermische Spannungen in Verkehrsflächenbefestigungen der gebundenen Pflasterbauweise. Kassel
- BURGER, Hans (1923): Physikalische Eigenschaften der Wald- und Freilandböden. Bühler-Buchdruck. Zürich
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Hannover
- CODER, Kim D. (1998): Root Growth Control: Managing Perceptions and Realities. In: Neely, Dan u. Watson, Gary (Hrsg.): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. San Francisco, California. 51-81
- COSTELLO, L. u. K. S. JONES (2003): Reducing Infrastructure Damage by Tree Roots: A Compendium of Strategies. Western Chapter of the International Society of Arboriculture (WSISA) 235 Hollow Oak Drive, Cohasset, CA 95973, USA.
- COUENBERG, Els A. M. (1994): Amsterdam tree soil. In: Watson, Gary W. (Hrsg.; 1994): The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois. 25-33.
- CRAUL, Phillip J. (1992): Urban Soil in Landscape Design. New York.
- DAY, Robert W. (1991): Damages of Structures due to Tree Roots. Journal of Performance of Constructed Facilities. ASCE. Vol. 5, No. 3, August. S. 200-2007
- DUMBECK, Gerhard (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation aus dem Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Justus-Liebig-Universität Gießen.
- FINCK, Arnold. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. vollständig überarbeitete Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung. Berlin, Stuttgart.
- FLORINETH, Florin (2011): Baumsubstrate auf Basis von Baustoff-Recycling-Material – Aktuelle Erfahrungen in Österreich. In: D. Dujesiefken und P. Kockerbeck (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2011. Augsburg. 27-37
- FRANCIS, John K. et al. (1996): Probability of Damage to Sidewalks and Curbs by Street trees in the Tropics. In: Journal of Arboriculture 22(4): July 1996
- GILMAN, Edward F. (1996): Root Barriers Affect Root Distribution. Journal of Arboriculture. 1996. Vol. 22, No. 3 May. 151-154.

- GALK (Ständige Konferenz der Gartenamtsleiter beim Deutschen Städtetag) (2015): GALK-Straßenbaumliste, Stand 30.04.2015 Arbeitskreis Stadtbäume. In: FLL (Hrsg.) (2015): Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 1. Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. Bonn
- Gisi, Ulrich (1997): Bodenökologie. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Thieme. Stuttgart, New York
- GRABOSKI, Jason u. Nina BASSUK (1996): Testing of structural urban tree soil materials for use under pavement to increase street tree volumes. *Journal of Arboriculture* 22 (6) November. 255-262.
- HAMILTON, W. Douglas (1984a): Sidewalk/Curb-breaking tree roots. 1. Why tree roots cause pavement problems. *Arboricultural Journal* Vol. 8 1984. 37-44.
- HAMILTON, W. Douglas (1984b): Sidewalk/Curb-breaking tree roots. 2. Management to minimise existing Pavement Problems by Tree Roots. *Arboricultural Journal* Vol. 8 1984. 223-234.
- HEIDGER, Clemens u. Hans-Joachim LIESECKE (1997): Vegetationstechnische Maßnahmen und Bauweisen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen. In: Tagungsband 15. Osnabrücker Baumpflegetage 1997, Osnabrück.
- HEIDGER, Clemens (2002): Wurzeln sind lenkbar! Optimierungsmöglichkeiten im Wurzelraum von Straßenbäumen. In: Tagungsband 20. Osnabrücker Baumpflegetage 2002, Osnabrück.
- HEIDGER, Clemens (2004): Durchwurzungen von Oberbau und Wegedecke. Schutz und Sanierungsmöglichkeiten bei Belagschäden. In: Tagungsband 22. Osnabrücker Baumpflegetage 2004, Osnabrück.
- HEIDGER, Clemens u. Harald KURKOWSKI (2004): Neue Bauweisen der Straßenbaumpflanzung. In: Straßen- und Tiefbau, 1/2004, Giesel Verlag, Isernhagen, 3-8
- HEIDGER, Clemens u. Harald KURKOWSKI (2006): Die Bedeutung des pH-Wertes bei Baumpflanzungen. In: Baustoff Recycling und Deponietechnik, 5/2006, , Giesel Verlag, Isernhagen, 26 – 29.
- HELAL, M. Helal (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. Vol.154, 403-407.
- HORN, Rainer (2011): Böden als Pflanzenstandorte. In: BLUME, Hans-Peter (Hrsg.) (2011): Handbuch des Bodenschutzes Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. vierte, vollständig überarbeitete Auflage. Wiley-Vch. Weinheim
- KÄPPELI, Felix (2006): Die Steuerung von Baumwurzeln. In: g`plus die Gärtner Fachzeitschrift (2). 20-22.
- KIBLER, Sarah (2013): Eindringverhalten von Baumwurzeln in ungebundene Bettungsschichten von Geh- und Radwegen – Entwicklung eines Versuchsaufbaus unter Berücksichtigung der Kornzusammensetzung der Bettungsstoffe - . Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück
- KOPINGA, Jitze (1992): Die Entwicklung von Baumwurzeln unter Straßenbelägen und einige praktische Methoden um Schaden vorzubeugen. In: 11. Osnabrücker Baumpflegetage: 22. bis 24. September 1992. Osnabrück. 10.1 - 10.23.
- KOROTAEV A. A. (1992): Bodenverdichtung und Wurzelwachstum von Bäumen. In: Forstarchiv 63. Jahrgang. 116-119
- KÖSTLER, Jane, E. BRÜCKNER & H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg, Berlin.
- KRIETER, M. et al. (1989): Standortoptimierung von Straßenbäumen – Teil 1 Forschungsbericht Grundlagenuntersuchung Eignungsuntersuchung Hauptuntersuchung 1. Phase. In: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.), Bonn
- KRIETER, M., A. MALKUS (1996): Untersuchungen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen. In: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.), Bonn

- KRISTOFFERSON, Palle (1999): Growing trees in road foundation materials. In: *Arboricultural Journal* Vol. 23. 57-76.
- KÜHN, Robert (2012): Untersuchung des Wurzelwachstums in hydraulisch gebundenen Bettungen für Betonpflasterstein. Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück
- KUTSCHERA, Lore u. Erwin LICHTENEGGER (2002): *Wurzlatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Graz
- LAY, Björn-Holger, Alfred NIESEL u. Martin THIEME-HACK (Hrsg.; 2013): *Lehr Taschenbuch für den Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau*. 7., neu bearbeitete Auflage. Ulmer.
- LIESECKE, Hans-Joachim (1994): Substrate für innerstädtische Straßenbaum-Pflanzungen. *Stadt und Grün* 43 (1994). 761-769.
- LIESECKE, Hans-Joachim u. CLEMENS HEIDGER (1994): Bäume in Stadtstraßen. Untersuchung zur Entwicklung und Erprobung von vegetationstechnischen und bautechnischen Maßnahmen zur Optimierung des Wurzel- und Standraumes von Bäumen in Stadtstraßen. Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.). Bonn-Bad Godesberg.
- LIESECKE, Hans-Joachim u. CLEMENS HEIDGER (2000a): Substrate für Bäume in Stadtstraßen. Teil 1: Darstellung und Beurteilung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben des BMV „Bäume in Stadtstraßen“. In: *Stadt und Grün* 7/2000. 463-470
- LIESECKE, Hans-Joachim u. CLEMENS HEIDGER (2000b): Substrate für Bäume in Stadtstraßen Teil 2: Diskussion der Ergebnisse und Ableitung eines Anforderungsprofils. In: *Stadt und Grün* 9/2000. 620 – 624
- LINDSEY, P. (1997): Die Beschaffenheit von strukturierten Substratmischungen für Bäume in urbanen Gebieten. Tagungsband 15. Osnabrücker Baumpflegetage 1997, V-15. Osnabrück
- LYR, H., H.-J. FIEDLER u. W. TRANQUILLINI (1992): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Stuttgart.
- MALEK, Johannes von et al. (1999): *Der Baumpfleger*. Ulmer. Stuttgart
- MASCHNER, Horst (1995): *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second Edition. Academic Press. London
- MENTLEIN, Horst (2009): *Planung, Konstruktion und Herstellung*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Rudolf Müller GmbH & Co. KG. Köln
- MENGEL, Konrad (1991): *Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze*. Gustav Fischer. Jena
- MORGENROTH, Justin (2008): A Review of Root Barrier Research. *Arboriculture & Urban Forestry* 2008.34(2). 84-88.
- MÜLLER, Michael (2011): Wann können Regenwürmer Bodenverdichtung restrukturieren? Entwicklung und Erprobung eines Versuchsaufbaus im Hinblick auf die Behandlung von Schadverdichtung in Waldböden. Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück
- NICOLL, W. u. ARMSTRONG (1998): Development of Prunus Root Systems in a City Street: Pavement Damage and Root Architecture. In: *Arboricultural Journal* 1998 Vol. 22. 259-270.
- POLOMSKI, Janina u. Nino KUHN (1998): *Wurzelsysteme*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.). Bern, Stuttgart, Berlin
- RAJANI, Balvant (2002): *Behaviour and Performance of Concrete Sidewalks*. Institute for Research in Construction (IRC) (Publisher). Canada
- RANDRUP, T. B. u. E. G. MCPHERSON u. L. R. COSTELLO (2001): A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs and roads. *Urban Ecosystems*, 5. 209-225.
- RAVEN, Peter H.; Ray F. Evert, Susan E. Eichhorn (2006): *Biologie der Pflanzen*. 4. Auflage. De Gruyter. Berlin. New York
- REICHWEIN, Sabine (2002): Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung. Beiträge zur Räumlichen Planung Heft 66. Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur (Hrsg.). Hannover

- ROBERTS, John, Nick JACKSON u. Mark SMITH (2006): *Tree Roots in the Built Environment*. Department for Communities and Local Government. London.
- SCHIEFFER, Fritz, Paul SCHACHTSCHABEL (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. neu bearbeitete Auflage. Spektrum akademischer Verlag. Heidelberg
- SCHIECHTL, Hugo Meinhard (1992): *Weiden in der Praxis. Die Weiden Mitteleuropas, ihre Verwendung und ihre Bestimmung*. Patzer Verlag, Berlin, Hannover.
- SCHIECHTL, Hugo Meinhard u. Roland STERN (2002): *Naturnaher Wasserbau. Anleitung für ingenieurbioologische Bauweisen*. Ernst und Sohn Verlag, Berlin.
- SCHILLING, Günther (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- SCHLOMBS, Vanessa (2012): *Einfluss chemisch-physikalischer Eigenschaften verschiedener Bettungstoffe auf das Wurzelwachstum von Salix purpurea – Untersuchung zur Verminderung von Schäden durch Baumwurzeln im Wegebereich*. Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück
- SCHÖNFELD, Philipp (1999): *Substrate für Straßenbäume. Rezepte und Erfahrungen*. In: *Landschaftsarchitektur* 29(11). 44-47.
- SCHÖNFELD, Philipp, Susanne BÖLL (2013): *Düngung von Straßenbäumen. Substrate, Nährstoffe, Düngung im Projekt „Stadtgrün 2021“*. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Abteilung Landespflege (Hrsg.).Veitshöchheim
- SCHRÖDER, Klaus u. Peter GRIMM-WETZEL (1990): *Einfluss von Böden und Substraten auf das Wurzel- und Triebwachstum von Robinia pseudoacacia 'Monophylla'*. In: *Das Gartenamt* 39 (1990) Januar, 28-34.
- SCHRÖDER, Klaus (1997): *STADT OSNABRÜCK (Hrsg.): Wurzelraumoptimierung – Beispiele aus Osnabrück*. Osnabrück.
- SIMON, Walter u. Volker KERSTEN (2010): *Bindemittel und Mörtel gestern und heute*. Vortrag an der Hochschule Osnabrück vom 27.05.2010.
- SMILEY, Thomas E., Liza WILKINSON u. Bruce R. FRAEDRICH (2009): *Root Growth Near Vertical Root Barriers after Seven Years*. *Arboriculture & Urban Forestry* 2009.35 (1). 23-26.
- STENGEL, Verena, Jürgen BOUILLON, Jens THOMAS u. Martin THIEME-HACK (2013): *Untersuchung zur Durchwurzelbarkeit von Geh- und Radwegen. Baumwurzeln wachsen in den Oberbau von Wegebeflächen*. In: *Neue Landschaft* 12/2013. 41-45
- STENGEL, Verena, Jürgen BOUILLON, Jens THOMAS u. Martin THIEME-HACK (2013): *Abschlussbericht zum EFRE-Forschungsprojekt: Wegebau an Baumstandorten. Bauweisen zur Minimierung von Schäden durch Baumwurzeln im Wegebereich*. unveröffentlicht
- STRECKENBACH, Markus (2009): *Interaktionen zwischen Wurzeln und unterirdischer technischer Infrastruktur – Grundlagen und Strategien zur Problemvermeidung*. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum.
- STÜTZEL, Thomas, Christoph BENNERSCHIEDT u. Markus STRECKENBACH (2009): *Unterschiedliche Arten und Ursachen von Schäden durch Gehölzwurzeln an Verkehrswegen*; In: *Dujesiefken, Dirk (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2009*. Augsburg. 33-40.
- TIMMERMANN, Ulrike (2009): *Wegebau und Oberflächenentwässerung*. In: LAY, Björn-Holger, Alfred NIESEL u. Martin THIEME-HACK (Hrsg.; 2013): *Bauen mit Grün Die Bau und Vegetationstechnik im Landschaftsbau*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Ulmer.
- TROMMER, Max (1920): *Untersuchungen über den Einfluß der mechanischen Bodenbeschaffenheit auf das Wurzelwachstum der Wurzeln*. Dissertation an der Technischen Hochschule zu München.
- WAGAR, J. A. u. Philip A. BARKER (1983): *Tree Root damage to sidewalks and curbs*. *Journal of Arboriculture*. 1983 (9) 7. 177-181.
- WATSON, Gary W. (Hrsg., 1994): *The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban soils*. International Society of Arboriculture. Sayoy, Illinois.

- WERLAND, Piet (2012): Gebundene Pflaster- und Plattenbauweisen. Vortragsskript zur Fortbildungsveranstaltung vom 12.01.2012 bei der Firma Dahlhoff. Neuenkirchen/St. Arnold
- WIERSUM, L. K. (1957): The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. In: Plant and Soil IX, no 1. 75-85
- WONG, T. W., J. E. G. GOOD U. M. P. DENNE (1988): Tree Root Damage to Pavements and Kerbs in the City of Manchester. Arboricultural Journal Vol. 12 1988. 17-34.

Normen und Richtlinien

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN), Berlin

- DIN EN 933-1 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012 (März 2012)
- DIN EN 1015-6 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-6:1998+A1:2006 (Mai 2007)
- DIN EN 1015-17 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 17: Bestimmung des Gehalts an wasserlöslichem Chlorid von Frischmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-17:2000 + A1: 2004 (Januar 2005)
- DIN EN 13041 Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate – Bestimmung der physikalischen Eigenschaften – Rohdichte (trocken), Luftkapazität, Wasserkapazität, Schrumpfungswert und Gesamtporenvolumen; Deutsche Fassung EN 13041:2011 (Januar 2012)
- DIN EN 15933 Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden – Bestimmung des pH-Werts; Deutsche Fassung EN 15933: 2012 (November 2012)
- DIN 18127 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch (September 2012)
- DIN 18130-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts Teil 1: Laborversuche (Mai 1998)
- DIN 18134 Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch (April 2012)
- DIN 18196 Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke (Mai 2011)
- DIN 18202 Toleranzen im Hochbau – Bauwerke (April 2013)
- ATV DIN 18300 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen (ATV) – Erdarbeiten (August 2015)
- ATV DIN 18315 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Oberbauschichten ohne Bindemittel (August 2015)
- ATV DIN 18316 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Oberbauschichten mit hydraulischen Bindemitteln (August 2015)
- ATV DIN 18318 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken und Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen (August 2015)

DIN 18916 Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Pflanzen und Pflanzarbeiten (Oktober 2015)

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN E.V. (FGSV), Köln

--- Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten (2006)

W2 Arbeitspapier Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in gebundener Ausführung (2007)

M FP Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in Ungebundener Ausführung sowie für Einfassungen (2015)

M VV Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen (2013)

RStO 12 Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (2012)

TL Gestein-StB 04 Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (2004)

TL Pflaster-StB 06 Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen (2006)

TL SoB StB 04 Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (2004)

ZTV-E-StB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (2009)

ZTV Pflaster-StB 06 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen (2006)

ZTV SoB-StB 04 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (2004)

ZTV T-StB 95 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau (1995)

DEUTSCHER NATURWERKSTEIN-VERBAND E.V. (DNV), Würzburg

Richtlinie Pflaster- und Plattendecken für befahrene und begangene Flächen in ungebundener und gebundener Ausführung sowie Mischbauweisen (Mai 2014)

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V. (FLL), Bonn

ZTV-Wegebau Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb von Flächen des Straßenverkehrs (2013)

Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 1. Planung, Pflanzarbeiten, Pflege (2015)

Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate (2010)

Fachbericht zu Planung, Bau und Instandhaltung von Wassergebundenen Wegen (2007)

LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN BAUREFERAT GARTENBAU

ZTV-Vegtra-Mü, Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten, Ausgabe 2008. München

Internet

FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (2015): Systematik der FGSV-Regelwerke unter <http://www.fgsv.de/795.html> [Stand:16.03.2015]

Mündliche Auskünfte

BUCHHOLZ, Jörn (2013), quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG
Abteilung Forschung und Entwicklung, Osnabrück

DAUM, Diemo (2015), Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück

KANIG, Martin (2015), quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG
Abteilung Forschung und Entwicklung, Osnabrück

KIELHORN, Uwe (2015), quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG
Abteilung Forschung und Entwicklung, Osnabrück

OPREE, Rudolf (2014), Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück

SCHÖN, Hans-Georg (2014), Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück