



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Baumpflanzungen für Verkehrsflächen – Multifunktionale Optimierung überbaubarer Baumsubstrate

**Dissertation zur Erlangung
eines Doktorgrades
(Dr.-Ing.)**

in der
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Harald Kurkowski
aus Wuppertal

Wuppertal 2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
Anlagenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
 Kurzfassung.....	1
Abstract	2
 1 Einleitung	3
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Zielsetzung	7
 2 Grundlagen	10
2.1 Bodenphysik.....	10
2.2.1 Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung.....	16
2.2.2 Historische Entwicklung der Regelwerke für Baumpflanzungen und der Anforderungsprofile für Baumsubstrate	20
2.2.3 Neue Bauweisen für Baumstandorte zur Regenwassernutzung und zum Überflutungsschutz	22
2.2.4 Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch Baumstandorte	25
2.2.5 Diskussion der Anforderungen an Baumsubstrate	26
2.3 Prüfverfahren und Eignungsnachweise	30
2.4 Anforderungen aus dem Erdbau und Regressionen der Verfahren.....	31
2.5 Fotooptische Analysemethode	33
2.6 Aufbereitung von Mauerwerksbauschutt zur Gewinnung poröser Gesteinskörnungen	35
2.7 Die Aufbereitung von Böden und Substraten	38
2.8 Leichte Gesteinskörnungen für Beton	39
2.9 Packungsdichte	42
2.9.1 Allgemeines	42
2.9.2 Bedeutung der Packungsdichterechnung für die Vegetationstechnik.....	44

3	Untersuchungsprogramm.....	46
3.1	Überbaubare Baumsubstrate	46
3.1.1	Vegetationstechnische Prüfungen nach FLL	48
3.1.2	Straßenbautechnische Prüfungen	49
3.2	Ziegel-Aufbereitungsversuche im Technikum.....	49
3.2.1	Aufbereitungsversuche an Ziegelbaustoffen im Technikum	50
3.2.2	Mauer- und Dachziegel von einem Standort	51
3.2.3	Mauer- und Dachziegel verschiedener Provenienzen	51
3.3	Fotooptische Prüfungen	52
3.4	Packungsdichteberechnungen	53
4	Darstellung der Ergebnisse	54
4.1	Überbaubare Baumsubstrate	54
4.1.1	Vegetationstechnische Prüfungen nach FLL	54
4.1.2	Straßenbautechnische Prüfungen	58
4.1.3	Fotooptische Prüfungen	62
4.2	Ziegel-Gesteinskörnungen	66
4.2.1	Mauer- und Dachziegel aus Weimar	66
4.2.2	Mauer- und Dachziegel verschiedener Provenienzen	66
4.3	Packungsdichteberechnungen Baumsubstrate	69
5	Auswertung der Ergebnisse	71
5.1	Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse.....	71
5.2	Baumsubstrate	72
5.3	Ziegel-Gesteinskörnungen	79
5.4	Packungsdichteberechnungen	81
5.4.1	1-Stoff-System.....	81
5.4.2	2-Stoff-System.....	82
6	Ergänzende Untersuchungen zur Ressourceneffektivität, Umwelt- verträglichkeit und Maximierung der Wasserkapazität	85
6.1	Allgemeines	85
6.2	Chemische Eigenschaften von rezyklierten Ziegeln	85
6.3	Wasserspannungskurve von Baumsubstraten	89

7	Modellbildung	91
7.1	Allgemeines	91
7.2	Stoffraumrechnung für Vegetationstragschichten.....	93
7.3	Fallbeispiel Stoffraumrechnung Vegetationsbaustoffe.....	97
7.3.1	Eigenschaften der Mischungskomponenten	97
7.3.2	Berechnung der Packungsdichte (3-Stoff-System).....	98
7.3.3	Mischungsberechnung	102
7.3.4	Stoffraumrechnung	104
7.3.5	Modelleigenschaften der Stoffmischung.....	105
7.3.6	Vergleich der Eigenschaften mit dem Anforderungsprofil für Baumsubstrate	106
7.3.7	Ermittlung und Bewertung der optimalen Eigenschaften des Baumsubstrates.....	108
7.3.8	Interdisziplinäre Pflanzgrubenbauweise mit Einleitung von Regenwasser.....	110
8	Zusammenfassung.....	115
9	Ausblick.....	119
9.1	Optimierung von Vegetationssubstraten.....	119
9.2	Umsetzbarkeit der Erkenntnisse in die Praxis und neue Bauweisen	120
	Literaturverzeichnis	122

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Die multifunktionale Optimierung von Baumsubstraten als interdisziplinäre Aufgabenstellung	9
Bild 2:	Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt verschiedener Böden sowie Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Äquivalentdurchmesser für kreiskapillare Poren in Anlehnung an [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL, 2015]	11
Bild 3:	Bodenstruktur natürlicher Böden mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens in Anlehnung an [HARTGE, HORN, 1999]	13
Bild 4:	Bodenstruktur eines natürlichen Bodens mit Kiesanteilen mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens.....	13
Bild 5:	Bodenstruktur einer Schottertragschicht (ToB) mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens.....	13
Bild 6:	Struktur eines Vegetationssubstrates mit poriger Gesteinskörnung und qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens	13
Bild 7:	Porengrößenverteilung der Substrate aus [LIESEKE, HEIDGER 1994]..	19
Bild 8:	Einflussfaktoren/Stressfaktoren für Baumpflanzungen am Extremstandort Verkehrsfläche	21
Bild 9:	Bauweise Stockholm: Neupflanzung Baum in versiegelter Fläche mit Baumrost [EMBRÉM et al. 2009]	22
Bild 10:	Weiterentwickeltes Pflanzgrubensystem (ohne Maßstab) [BIBER 2017]	23
Bild 11:	Gegensätzlichkeit der Anforderungen von Vegetationstechnik (links) und Straßenbautechnik (rechts) gemäß HEIDGER	26
Bild 12:	Vergleich der zulässigen/empfohlenen Korngrößenverteilungsbereiche für überbaubare Baumsubstrate nach den verschiedenen Regelwerken	27
Bild 13:	Vergleich der Mindestanforderungen für das Gesamtporenvolumen und die Maximale Wasserkapazität überbaubarer Baumsubstrate nach Regelwerken [KURKOWSKI 2010]	29
Bild 14:	Untersuchungsparameter für den Eignungsnachweis von Vegetationstragschichten für Straßenbäume nach FLL und ZTV-Vegtra-Mü.....	31
Bild 15:	Regression des statischen und dynamischen Lastplattendruckversuchs nach WEINGART [1998]	33
Bild 16:	Schematischer Aufbau eines bildverarbeitenden Partikelanalysegerätes [STARK, 2003].....	34
Bild 17:	Definition der Kornformparameter für grobe Körner [STARK, 2003].....	35
Bild 18:	Einfaches mobiles Verfahrenskonzept für die Aufbereitung von Recycling-Baustoffen [in Anlehnung an KOHLER, 1997 und Bundesverband, 2000]	36

Bild 19:	Beispiel für ein einstufiges stationäres Verfahrenskonzept einer Bauschuttaufbereitungsanlage [in Anlehnung an KOHLER, 1997 und Bundesverband, 2000]	37
Bild 20:	Porosität und Permeabilität von leichten Gesteinskörnungen für Beton (Beschriftung ergänzt) [EuroLigthCon, 1998]	41
Bild 21:	Untersuchungsparameter für den Eignungsnachweis von Vegetationstragschichten für Straßenbäume	48
Bild 22:	Messung mit dem Partikelanalysegerät an der Bauhaus-Universität Weimar	53
Bild 23:	Korngrößenverteilungen der geprüften Baumsubstrate	54
Bild 24:	Rohdichte der untersuchten Substrate	55
Bild 25:	Wassergehalt, Korngrößenverteilung und Ergebnisse des Proctorversuchs für die verschiedenen Baumsubstrate	56
Bild 26:	Ergebnisse der verschiedenen Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Luftpyknometer	59
Bild 27:	Ergebnisse der verschiedenen Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Wasserpyknometer	60
Bild 28:	Ergebnisse des CBR-Versuchs und des Dynamischen Plattendruckversuchs mit dem leichten Fallgewichtgerät für die verschiedenen Baumsubstrate	61
Bild 29:	Sphärizität der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sowie der gesamten Sandfraktion 0,063/2 mm der Substrate	62
Bild 30:	Sphärizität der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobkies sowie der gesamten Kiesfraktion 2/32 mm der Substrate	63
Bild 31:	Länge-Breite-Verhältnis der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sowie der gesamten Sandfraktion 0,063/2 mm der Substrate	64
Bild 32:	Länge-Breite-Verhältnis der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobkies sowie der gesamten Kiesfraktion 2/32 mm der Substrate	65
Bild 33:	Reindichte/Rohdichte mit dem Heliumpyknometer sowie Rohdichte Wasser- und Luftpyknometer der Körnung 2/32 mm aufbereitet mittels Prall- und Backenbrecher	67
Bild 34:	Packungsdichte der geprüften Baumsubstrate BS 1 bis BS 19	69
Bild 35:	Vergleich der Packungsdichte mit der Proctordichte – Luft- und Wasserpyknometer	70
Bild 36:	Regression Rohdichte – Luftpyknometer zu Wasserpyknometer	73
Bild 37:	Regressionen der Rohdichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Luftpyknometer	75
Bild 38:	Regressionen der Rohdichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Wasserpyknometer	76

Bild 39:	Regressionen der Rohdichte zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuch – Luftpyknometer	77
Bild 40:	Regressionen der Rohdichte zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuchs – Wasseryknometer	78
Bild 41:	Regression zwischen Rohdichte Wasseryknometer und Wasseraufnahme der Ziegel – Prall- und Backenbrecher 2/32 mm	80
Bild 42:	Regression zwischen 95 %iger Proctordichte und der theoretischen Einbaudichte – Luftpyknometer	81
Bild 43:	Regression zwischen 95 %iger Proctordichte und der theoretischen Einbaudichte – Wasseryknometer	82
Bild 44:	Packungsdichte-Minimum- und -Maximum eines 2-Stoff-Systems der untersuchten Baumsubstrate in Variation des Kies- und Sandgehaltes ..	83
Bild 45:	Packungsdichte von BS 10 als 2-Stoff-System im Vergleich zum Ist-Wert	84
Bild 46:	Porengrößenverteilung der Substrate aus [Kurkowski, Tobias 2022]	90
Bild 47:	Einflussgrößen von Vegetationssubstraten auf die bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften (erweitert nach HEIDGER in Anlehnung von EDEN)	91
Bild 48:	Vegetationstechnisches Modell für Vegetationstragschichten (überbaubare Baumsubstrate)	94
Bild 49:	Vegetationstechnisches Modell für Vegetationstragschichten (überbaubare Baumsubstrate) mit Darstellung des Feinwurzelwachstums	95
Bild 50:	Vorgehensweise bei der Stoffraumrechnung Vegetationstechnik	96
Bild 51:	Korngrößenverteilung Stoff 1 bis Stoff 3	97
Bild 52:	Packungsdichte in Abhängigkeit von der Stoffzusammensetzung	99
Bild 53:	Rechnerische Korngrößenverteilung des Fallbeispiels in Vol.-% und M.-% im Vergleich zu den Orientierungswerten der FLL für PGB 1 und PGB 2 [FLL 2010]	104
Bild 54:	Interdisziplinäre Aufgabenstellung mit Wichtung ausgewählter Faktoren	109
Bild 55:	Multifunktionale überbaubare Pflanzgrubenbauweise für urbane Baumstandorte (Schnitt)	113
Bild 56:	Multifunktionale überbaubare Pflanzgrubenbauweise für urbane Baumstandorte (Aufsicht)	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definitionen der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden [AD-HOC-AG Boden, 2005]	12
Tabelle 2:	Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte zum Luft- und Wasserhaushalt von natürlichen Böden [AD-HOC-AG Boden, 2005] ..	12
Tabelle 3:	Definition der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt: Bodenkunde und Vegetationstechnik (FLL) [HEIDGER, KURKOWSKI 2019a und b].....	15
Tabelle 4:	Vergleich der Korngrößenverteilung von Baumsubstraten verschiedener Forschungsarbeiten in Hauptfraktionen nach [LIESEKE, HEIDGER, 1994]	16
Tabelle 5:	Vergleich der bodenphysikalischen Eigenschaften von Baumsubstraten verschiedener Forschungsarbeiten nach [LIESEKE, HEIDGER, 1994]	17
Tabelle 6:	Bodenluft- und Bodenwassergehalt mit Porengrößenverteilung der Substrate aus [LIESEKE, HEIDGER 1994]	18
Tabelle 7:	Auszug geeigneter Bodenarten für Vegetationstragschichten nach DIN 18915 [2002]	38
Tabelle 8:	Kornrohrichtebereiche leichter und normaler Gesteinskörnungen [Vgl. FAUST, 2003]	41
Tabelle 9:	Überblick über die untersuchten Substrate und charakteristische stoffliche Hauptbestandteile der untersuchten überbaubaren Baumsubstrate	47
Tabelle 10:	Gewählte Drehzahl/Umfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers für die Versuche	50
Tabelle 11:	Einstellbare Spaltbreite des Backenbrechers	51
Tabelle 12:	Ermittelte Regressionen der Kornrohrichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt und zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuchs – Luft- und Wasserpyknometer	74
Tabelle 13:	Ausgewählte Mauerziegel und Lava-Referenz für die chemische Analytik.....	86
Tabelle 14:	Ergebnisse für pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Kohlenstoff- und Carbonatgehalt.....	87
Tabelle 15:	Ergebnisse für die Hauptnährstoffe.....	87
Tabelle 16:	Ergebnisse für Nährstoffe, anorganische Schad- und Spurenelemente	88
Tabelle 17:	Korngrößenverteilung der Mischungskomponenten.....	97
Tabelle 18:	Kornrohrichte der Stoffbestandteile	98

Tabelle 19:	Packungsdichtematrix Ziegel-3-Stoff-Systems in Vol.-% mit Korngrößenverteilungsbereich [FLL, 2010]	100
Tabelle 20:	Packungsdichtematrix Ziegel-3-Stoff-Systems in Vol.-% mit Korngrößenverteilungsbereich [FGSV, 2006; HEIDGER, 2006]	101
Tabelle 21:	Mischungsberechnung Fallbeispiel in Vol.-%.....	102
Tabelle 22:	Mischungsberechnung Fallbeispiel in M.-% – Wasserpyknometer	103
Tabelle 23:	Stoffraumrechnung Fallbeispiel Ziegelsubstrat für die theoretisch max. Einbaudichte.....	105
Tabelle 24:	Modelleigenschaften des Baumsubstrates ermittelt mit der Kornrohddichte des Luftpyknometers.....	105
Tabelle 25:	Modelleigenschaften des Baumsubstrates ermittelt mit der Kornrohddichte des Wasserpyknometers.....	106
Tabelle 26:	Vergleich der Eigenschaften des Modells mit den Anforderungswerten	107
Tabelle 27:	Porenraum für Wasser bei Baumpflanzungen, oben in Vol.-%, unten pro Pflanzgrube	111
Tabelle 28:	Historische Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate im tabellarischen Überblick	144
Tabelle 29:	Größenverhältnis und Volumenanteile einer maximalen Packungsdichte aus vier Kugelkomponenten [MC GEARY, 1961].....	197

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Historische Entwicklung der Regelwerke und der Anforderungsprofile für Baumsubstrate	132
Anlage 2:	Prüfungen für Vegetationstragschichten	145
Anlage 3:	Mauer- und Dachziegelproben unterschiedlicher Provenienzen für die Technikums-Brecherversuche	146
Anlage 4:	Korngrößenverteilungen der untersuchten Baumsubstrate BS 1 bis BS 19	147
Anlage 5:	Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate: Korngrößenverteilungen (KGV), Proctorversuch	148
Anlage 6:	Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate: Korngrößenverteilungen – Schluff-, Sand- und Kiesanteile	149
Anlage 7:	Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate: Rohdichte, Wasser- und Lufthaushalt	150
Anlage 8:	Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate: CBR-Versuch, Dynamischer Lastplattendruckversuch	151
Anlage 9:	Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate: CPA-Analyse – Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis	152
Anlage 10:	Korngrößenverteilungen der Ziegel-Gesteinskörnungen bei den Aufbereitungsversuchen im Technikum	153
Anlage 11:	Korndichte/Rohdichte der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum	159
Anlage 12:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauer- und Dachziegel Weimar, Prallbrecher	165
Anlage 13:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauer- und Dachziegel Weimar, Backenbrecher	166
Anlage 14:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher	167
Anlage 15:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Backenbrecher	168
Anlage 16:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher	169
Anlage 17:	Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, eckige/runde Schlagleiste	170
Anlage 18:	Reindichte und Rohdichte – Heliumpyknometer	171
Anlage 19:	Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher	172

Anlage 20:	Rohdichte Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher	173
Anlage 21:	Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher – eckige und runde Schlagleiste	174
Anlage 22:	Wasseraufnahme Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher	175
Anlage 23:	Wasseraufnahme Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher	176
Anlage 24:	Wasseraufnahme Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher – eckige und runde Schlagleiste	177
Anlage 25:	Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher – Vergleich Wasser- mit Luftpyknometer.....	178
Anlage 26:	Rohdichte Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher – Vergleich Wasser- mit Luftpyknometer.....	179
Anlage 27:	Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher – eckige/runde Schlagleiste – Vergleich Wasser- mit Luftpyknometer..	180
Anlage 28:	Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Proctordichte – Rohdichte Wasserpyknometer zu Luftpyknometer	181
Anlage 29:	Optimierungspotential der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 als rechnerisches 2-Stoff-System im Vergleich zum Praxisgemisch (1-Stoff-System) in Vol.-%.....	182
Anlage 30:	Packungsdichte von BS 1 bis BS 19 als 2-Stoff-System 0/2 mm: 2/X mm im gewählten Bereich von 25 – 75 % für den Anteil der Fraktion 0/2 mm	183
Anlage 31:	Prüfverfahren nach FLL und FGSV für Baumsubstrate	184
Anlage 32:	Theoretische Grundlagen zur Packungsdichteermittlung.....	194
Anlage 33:	Fotodokumentation Überbaubare Baumsubstrate	206
Anlage 34:	Fotodokumentation Technikumsversuche Ziegel-Gesteinskörnungen	224
Anlage 35:	Bilddokumentation Straßenbäume und Baumpflanzungen	266

Abkürzungsverzeichnis

B	Baumsubstrat
BB	Backenbrecher
°C	Grad Celsius
CBR	California Bearing Ratio
DZ	Dachziegel
DIN	Deutsches Institut für Normung
D _{Pr}	Proctordichte
DüMV	Düngemittelverordnung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
E _v	Verformungsmodul
E _{VD}	Dynamischer Verformungsmodul
EPA	United States Environmental Protection Agency
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau
GPV	Gesamtporenvolumen
KA	Kartieranleitung
ISO	International Organisation for Standardization
KAK	Kationen-Austausch-Kapazität
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
LV	Luftvolumen
M.-%	Masseprozent
MW	Arithmetischer Mittelwert
MZ	Mauerziegel

PB	Prallbrecher
PD	Packungsdichte
PV	Porenvolumen
μ	Mikro
ρ	Rohdichte
R^2	Regressionskoeffizient
SI	Shape Index (Kornformkennzahl)
TL	Technische Lieferbedingungen
TP	Technische Prüfbedingungen
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Vol.	Volumen
Vol.-%	Volumenprozent
$WK_{\max.}$	Maximale Wasserkapazität

Kurzfassung

Die Vegetationstechnologie ist eine im Vergleich zur Bautechnologie junge Wissenschaft, die in den letzten Jahrzehnten u.a. Bauweisen und Substrate für z.B. Dachbegrünungen und Baumpflanzungen entwickelt und regelt. Dabei wird auf Prüfverfahren aus Bereichen z.B. der Bodenkunde, dem Erd- und Straßenbau oder auch der Betontechnologie zurückgegriffen.

Die Optimierung von Vegetationssubstraten erfolgt heute noch immer empirisch.

Diese Arbeit setzt sich zum Ziel – ähnlich wie in der Beton- und Kalksandsteintechnik bereits existent –, für die Vegetationstechnik ein abgestimmtes Regelwerk auf der Basis anerkannter und wiederholbarer technischer Prüfungen unter Laborvoraussetzungen zu entwickeln, welches insitu-Untersuchungen weitgehend überflüssig macht.

Hersteller, Lieferanten, Auftraggeber, Gutachter bzw. Labore und mit dem Einbau befassten Instanzen können so auf ein Berechnungsmodell zurückgreifen, das a priori belastbare Anforderungen an vegetationstechnische Substrate definiert.

Das Modell bildet eine Stoffraumrechnung ab, die erstmals anwendungstechnisch von der Konzeptionierung von Leichtbeton/Normalbeton auf die Vegetationstechnologie auf der Basis eines 4-Stoff-Systems, bestehend aus Gesteinskörnung, Wasser, Luft und organischer Substanz, übertragen wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird also ein praxisnahes Ingenieurmodell für die Konzeption und Optimierung von überbaubaren Baumsubstraten (Vegetationstragschichten) aufgezeigt, welches auch auf andere vegetationstechnische Aufgabenstellungen übertragen und so verallgemeinert werden kann. Das Modell reduziert bzw. vermeidet zeit- und kostenintensive empirische Versuche zur Optimierung von Vegetationsbaustoffen.

Zukünftig wird es erforderlich sein, der Vegetationstechnologie eine komplexe interdisziplinäre Bedeutung zuzumessen, die ihr im Hinblick auf die umweltbezogenen klimatischen Veränderungen und ihren daraus entstehenden Problemstellungen für Stadt- und Raumplanung, Wasserwirtschaft, Kreislaufwirtschaft, Ressourcennutzung, Umweltschutz etc. eine besondere Bedeutung zukommen lässt.

Die vorliegende Arbeit stellt hierzu einen Ansatz der Verknüpfung dieser technischen, ökonomischen und ökologischen Aufgabenstellung dar und liefert auf Basis des bestehenden Regelwerks Grundlagen für die weitere Entwicklung vegetationstechnischer Bauweisen für zukunftsweisende Baumpflanzungen in Verkehrsflächen.

Abstract

Compared to construction technology, vegetation technology is a young science that has developed and regulated construction methods and substrates for green roofs and tree planting, for example, in recent decades. This involves the use of test methods from areas such as soil science, earthworks and road construction as well as concrete technology.

The optimisation of vegetation substrates is still carried out empirically today.

This work aims to develop a coordinated set of rules for vegetation technology based on recognised and repeatable technical tests under laboratory conditions - similar to those already existing in concrete and sand-lime brick technology - which will make in-situ tests largely superfluous.

Manufacturers, suppliers, clients, experts and laboratories and the authorities involved in installation can thus rely on a calculation model that defines a priori reliable requirements for vegetation substrates.

The model represents a material space calculation that is transferred for the first time from the conceptual design of lightweight concrete/normal concrete to vegetation technology on the basis of a 4-material system consisting of aggregate, water, air and organic matter.

This work therefore presents a practical engineering model for the design and optimisation of tree substrates that can be built over (vegetation support layers), which can also be transferred to other vegetation technology tasks and thus generalised. The model reduces or avoids time-consuming and cost-intensive empirical tests for the optimisation of vegetation building materials.

In the future, it will be necessary to attribute a complex interdisciplinary significance to vegetation technology, which will make it particularly important with regard to environmental climatic changes and the resulting problems for urban and spatial planning, water management, recycling management, resource utilisation, environmental protection, etc. The present work presents an approach to this problem.

The present work represents an approach to linking these technical, economic and ecological tasks and provides a basis for the further development of vegetation engineering construction methods for future-oriented tree planting in traffic areas on the basis of existing regulations.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Straßenbäume gestalten und leiten Verkehrswege. Sie sind in der Landschaftsarchitektur wichtige Raumgestaltungselemente und für Mensch und Tier markante Orientierungspunkte mit hohem Erlebniswert. Ökologisch haben Straßenbäume eine große Bedeutung. Sie verbessern das Stadtklima, z.B. durch:

- Aufnahme von Kohlendioxid
- Abgabe von Sauerstoff
- Erhöhung der Luftfeuchtigkeit
- Erzeugung von Verdunstungskälte
- Staubfilterung
- Geräuschpegeldämpfung

und stellen Kleinbiotope mit einer hohen Anzahl darin lebender Tierarten dar. [FGSV, 2006]

In Verkehrsflächen unterliegen Straßenbäume aufgrund der baulichen Gegebenheiten und der Nutzung vielfältigen Stressbedingungen, die die Vitalität und das Wachstum der Bäume an diesem Ort wesentlich beeinflussen können [u.a. BALDER, 2020; SCHÖNFELD, 2018]. Verkehrsflächenstandorte stellen daher als Standort für Straßenbäume aus vegetationstechnischer Sicht immer ‚Extremstandorte‘ dar.

Neben den abiotischen Stressfaktoren – die umweltbedingt und i.d.R. nicht beeinflussbar sind, wie z.B. Klima, Atmosphäre, Wasser, Temperatur und Konzentration an Nährsalzen – kommen in der Verkehrsfläche noch weitere vom Menschen beeinflussbare Stressfaktoren hinzu. Hierzu zählen insbesondere die Versiegelung der Verkehrsfläche und die Verdichtung des umgebenden Bodens, da durch unzureichende Hohlraumverhältnisse im Untergrund die Versorgung des Baumes mit Luft, Wasser und Nährstoffen deutlich erschwert wird. Viele Straßenbäume leiden in Verkehrsflächen daher an den verschiedensten Stresssymptomen. Neben dem Luftmangel, der wesentlich auf unzureichende Boden-/Substrateigenschaften und ungeeignete Bauweisen zurückgeführt werden kann, erhöhen vielfach auch Wasser- und/oder Nährstoffmangel, fehlerhafte Planung, Pflanzung/Artenwahl sowie eine unzureichende Pflege die Stresssituation. Die Folge ist ein mangelhaftes Begleitgrün in und an Verkehrsflächen. [Vgl. BALDER, 2020]

Straßenbäume werden oftmals bodenphysikalisch in zu dichte Bodenverhältnisse sowie in einen viel zu kleinen durchwurzelbaren Bodenraum eingebracht und können diesen gar nicht oder nur unter erschwerten Verhältnissen verlassen. Es entsteht in diesem Zusammenhang ein sogenannter Blumentopfeffekt, der sich durch den begrenzten durchwurzelbaren Bodenraum ergibt.

Die bautechnischen Vorgaben des Straßen- und Tiefbaus mit seinen hohen Anforderungen an die regelkonforme Verdichtung des Untergrundes bzw. Oberbaus und der Versiegelung der Verkehrsfläche stehen im Widerspruch zu den vegetationstechnischen Ansprüchen der Straßenbäume. In der Praxis leiden daher viele Straßenbäume in Verkehrsflächen an ‚vermeidbaren Stresssymptomen‘. [Vgl. z.B. HEIDGER, 2006a]

Die Verkehrsfläche kann aufgrund der unterirdischen beengten Verhältnisse für das Wurzelwachstum ebenfalls in Mitleidenschaft gezogen werden. Überwindet der Straßenbaum die einengenden Boden- und Begleitumstände, nutzt der Straßenbaum jede zugängliche Pore und Ritze, um zu überleben und sich zu versorgen – meist mit ungewünschten Auswirkungen auf die Belagsoberfläche und die Randeinfassungen der Verkehrsfläche.

Das Wachstum von Baumwurzeln unter Verkehrsflächen und die dadurch bedingte Anhebung von Wegebelägen werden im Rahmen der Dissertation von REICHWEIN untersucht. Durch eine statistisch auswertbare Kartierung von 2881 Straßenbäumen im Stadtgebiet von Hannover werden die Größenordnung, die Häufigkeit und das Ausmaß von wurzelbedingten Schäden an Verkehrsflächen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern schon vor Jahren erfasst. Dabei zeigen rund die Hälfte der kartierten Baumstandorte schädliche Merkmale. Die zur Instandhaltung der Verkehrsflächen und zur Wahrung der Verkehrssicherheit notwendigen Reparaturen verursachen Kosten und führen häufig zu baubedingten Wurzelverlusten bei den betroffenen Bäumen. [Vgl. REICHWEIN, 2002]

Die Situation, dass mehr als 50 % der Straßenbäume am Extremstandort Verkehrsfläche nur einen unzureichenden Standraum zur Verfügung gestellt bekommen und bedingt dadurch der Straßenbaum und die Verkehrsfläche häufig später in Mitleidenschaft gezogen werden, besteht auch heute noch in großem Maße. Die in der Folge veröffentlichten Regelwerke der FLL [2004, 2010, 2019] und FGSV [2006, 2019] bestätigen dies allein durch ihre Notwendigkeit der Bearbeitung. In diesen Regelwerken werden Bauweisen und Substrate beschrieben, die insbesondere auch unter der Verkehrsfläche einen ausreichend durchwurzelbaren Untergrund beinhalten. Damit soll das Wurzelwachstum schadlos unter den Verkehrsflächenoberbau in die Tiefe gelenkt werden. Die Baumgruben werden mit Baumsubstraten mit einem Anforderungsprofil – welches bau- und vegetationstechnisch definiert ist – verfüllt und verdichtet. Sie dienen daher als Verkehrsflächenuntergrund und durchwurzelbarer Bodenbereich.

Schadensbilder bei urbanen Baumstandorten sind auch bekannt aus der technischen Problematik „Einwachsen von Baumwurzeln in Ver- und Entsorgungsleitungen“. Seit 2001 werden zu dieser Problematik verschiedene Forschungsarbeiten veröffentlicht. Insbesondere BENNERSCHIEDT [2007], BENNERSCHIEDT et. al. [2007], BOSSELER et. al. [2001] und STÜTZEL et. al. [2004 und 2007] sind hier tätig. Später werden diese Arbeiten u.a. von STRECKENBACH et. al. [2013] weitergeführt.

Dabei sind Baumwurzeln in der Lage, in Rohrmuffen und feinste Risse von Bauteilen einzuwachsen und können dabei unterirdische Ver- und Entsorgungsleitungen in ihrer Lebensdauer oder Leistungsfähigkeit gefährden.

Auch für Auswirkungen mit Unfallfolge bei Gasleitungen in Verbindung mit Baumpflanzungen sind Schadensfälle bekannt. [HEIDGER, KRÜCKEN, 2006; HONZ, 2011]

Um diesen bekannten Missständen nachträglich entgegenzuwirken, wird als weiteres Regelwerk 2019 das Merkblatt für die Erhaltung von Verkehrsflächen mit Baumbestand [FGSV, 2019, textgleich mit FLL, 2019] veröffentlicht.

Technisch hochwertige Baumsubstrate werden aufgrund ihres erhöhten Wasser- und Luftspeichervermögens heute i.d.R. auf der Basis von porösen Gesteinskörnungen hergestellt. Neben natürlichen Gesteinskörnungen wie Lava und Bims haben sich in der Praxis z.B. auch Gesteinskörnungen aus aufbereiteten Ziegeln – regional unterschiedlich – aus Kosten- und Nachhaltigkeitsgründen etabliert. Diese haben im direkten Vergleich zum Einsatz von Böden einen höheren Preis. Zunehmend treten aber auch andere aufbereitete Mauerwerksbaustoffe, wie Kalksandstein oder Porenbeton aus dem selektiven Rückbau aufgrund ihrer Porosität in den Fokus der Verwendung für Vegetationsbaustoffe [BISCHOFF, et. al., 2014]. Auch industrielle Nebenprodukte wie Hochofenstüchschlacke werden für Baumsubstrate erforscht. [LESON, KURKOWSKI, 2022]

Vegetationssubstrate werden heute mittels einer empirisch festgelegten Rezeptur konzipiert und damit punktuell in Ihren technischen Eigenschaften festgelegt. Dazu führt der Produzent im Regelfall einen Eignungsnachweis durch, der als Vertragsgrundlage dient und von Auftraggeberseite über Kontrollprüfungen bestätigt werden kann. Die Festlegung der Rezeptur erfolgt meist nach Erfahrungswerten oder in Anlehnung an die Vorgaben der Regelwerke. Damit führt der Eignungsnachweis Prüfwerte auf, die genau für eine Probe und Rezeptur gelten. Das technische Verhalten dieser Mischung, abseits der Rezeptur, ist nicht erkennbar. So bleiben Optimierungspotentiale für die jeweiligen Mischungen oftmals unentdeckt oder wären nur mit einem zusätzlichen hohem Laboraufwand feststellbar.

Die wissenschaftlich belegte Klimaverschiebung wird die am Extremstandort vorherrschenden Standortverhältnisse von Straßenbäumen zukünftig noch weiter verschlechtern. Dürreperioden gefolgt von Starkregenereignissen werden in Deutschland voraussichtlich weiter zunehmen. Der Dürresommer 2018 war hierfür ein erstes prägnantes Beispiel [SCHÖNFELD, BÖLL, 2020]. Unter diesem Klimaaspekt wird in der aktuellen Forschungstätigkeit der Begriff ‚Klimabäume‘ genutzt. Gemeint sind Baumarten, die zukünftig voraussichtlich besser geeignet sind, Trockenstresssituationen in Deutschland zu ertragen. Bei der Erforschung dieser Baumarten wird aber meist nur auf handelsübliche Baumsubstrate zurückgegriffen und unberücksichtigt gelassen, dass auch Baumsubstrate noch ein Optimierungspotential, z.B. zur Erhöhung der Wasserkapazität, aufweisen können.

Weiterentwickelte Pflanzgrubenbauweisen versuchen auch die Effekte der Klimaverschiebung schon bei der Stadtplanung mitzuberücksichtigen, um so die Auswirkungen der Extremwetterereignisse auf unsere Städte zu mildern [BIBER, 2017]. Bei diesen Bauweisen wird Regenwasser von bebauten oder befestigten Flächen genutzt, um damit auch Bäume zu bewässern und Trockenstress zu minimieren. Gleichzeitig wird das Kanalnetz geschont und Überschusswasser dem natürlichen Kreislauf ortsnahe zugeführt. Rechtlich unklar ist bei dieser Möglichkeit insbesondere noch, ob diese Art der möglichen künftigen Regenwassernutzung den Forderungen des Wasserschutzrechts entspricht.

Dabei stellt sich auch die Frage, wieviel Wasser von einem Baum in kurzer Zeit überhaupt aufgenommen werden kann und dabei bei den unterschiedlichen Pflanzgrubenbauweisen pflanzenverfügbar ist. Insbesondere WELTECKE, STRECKENBACH [2022] und GAERTIG [2022] werfen diese Frage auf und diskutieren dabei auch die Regelwerksanforderungen kritisch.

Wie aktuell Fragestellungen rund um das Thema Klimaverschiebung sind, bestätigen auch neue Zahlen und Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes [DWD, 2023] für Deutschland:

- 2022 ist das sonnenscheinreichste Jahr seit 1881.
- 2018 und 2022 sind die wärmsten Jahre mit einem deutlichen Niederschlagsdefizit seit Beginn der Wetteraufzeichnungen.
- Die letzten fünf zurückliegenden Jahre weisen eine Jahresdurchschnittstemperatur größer 10 °C auf. So hohe Werte werden vor 2014 nicht erreicht.
- Im Vergleich zu 1881 steigt die aktuelle Jahresdurchschnittstemperatur um 1,7 °C.

Der Anstieg lässt sich laut DWA nur durch den vom Menschen gemachten Klimawandel erklären, und es lässt sich kein Trend erkennen, der diesen Erwärmungstrend verlangsamen wird. Resümee DWA: Der Klimaschutz muss in Deutschland und global bedeutend stärker vorangetrieben werden. Die bisher bekannten Wetterdaten von 2023 kennzeichnen dagegen nach diesen Hitzejahren ein niederschlagsreiches Jahr auf Rekordniveau.

1.2 Zielsetzung

Die Vegetationstechnik ist im Vergleich zur Bautechnik noch eine junge Wissenschaft. In den letzten zurückliegenden Jahrzehnten werden u.a. Bauweisen und Substrate für z.B. Rasenflächen, Dachbegrünungen und Baumpflanzungen entwickelt und geregelt.

Im Rahmen dieser Dissertation sollen auf Basis einer Untersuchung von in der Praxis erhältlichen überbaubaren Baumsubstraten deren Leistungsfähigkeit und das Optimierungspotential hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen und bautechnischen Eigenschaften unter Vergleichsbedingungen untersucht und diskutiert und den heutigen Anforderungsprofilen gegenübergestellt werden. Gemeint sind hiermit im Wesentlichen Baumsubstrate, die mit einem Verkehrsflächenoberbau ‚überbaut‘ werden und damit auch synonym mit ‚unterbaufähig‘ unter einer Verkehrsfläche bezeichnet werden. Dabei sollen auch die angewendeten Prüfverfahren kritisch hinterfragt werden, um auch auf andere Anwendungen, wie z.B. Dachsubstrate oder Schotterrasen, übertragbar zu sein.

In einem weiteren Untersuchungsschritt sollen die Eigenschaften und die Bandbreite von unterschiedlich aufbereiteten Ziegeln für die Anwendung in Vegetationsbaustoffen erfasst und beschrieben werden, um deren Einsatz für die Produktion von Substraten auch zukünftig zu ermöglichen.

Packungsdichteberechnungen, die für den Bereich der Beton- und später Kalksandsteinoptimierung entwickelt wurden, sowie die Bestimmung kornformabhängiger Parameter mittels fotooptischer Analyseverfahren sollen ein Berechnungsmodell zur Optimierung solcher technischen Substrate ermöglichen.

Die interdisziplinäre Aufgabenstellung der multifunktionalen Optimierung von überbaubaren Baumsubstraten soll dabei Anforderungen und Abstimmungen aus den Bereichen

- Vegetationstechnik
- Bodenkunde
- Bautechnik
- Siedlungswasserwirtschaft
- Nachhaltigkeit

- Ressourcenverwendung
- Kreislaufwirtschaft und des
- Klimaschutzes

berücksichtigen (siehe Bild 1).

Das Optimierungsmodell soll einen prüftechnisch vertretbaren Laboraufwand beinhalten, welches die Optimierungsparameter aus den verschiedenen Disziplinen angemessen oder je nach Zielstellung auch im Speziellen berücksichtigen kann.

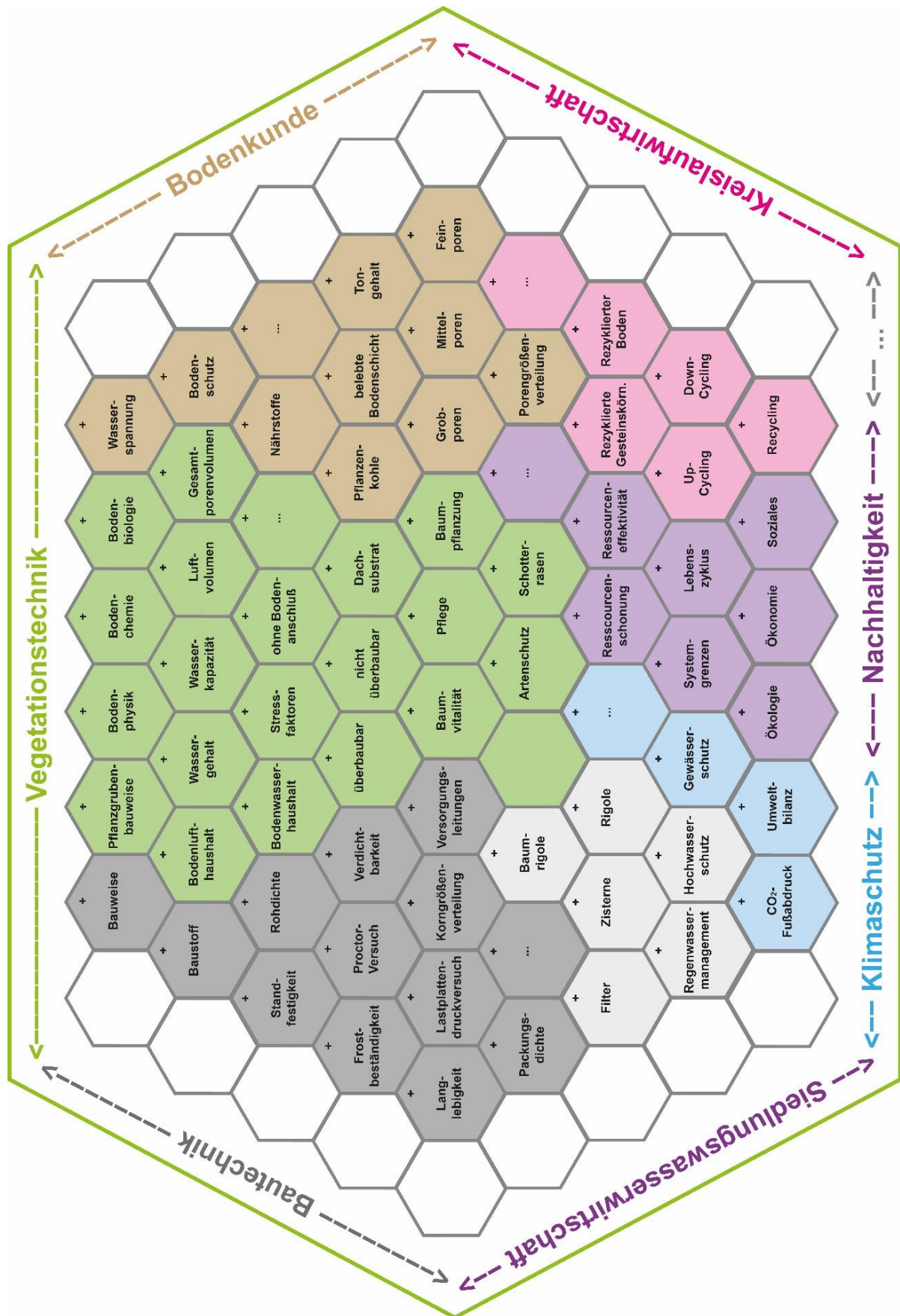


Bild 1: Die multifunktionale Optimierung von Baumsubstraten als interdisziplinäre Aufgabenstellung

2 Grundlagen

2.1 Bodenphysik

Gemäß FLL [2010] versteht man unter einem Substrat „einen nach definierten Anforderungen hergestellten Bodenersatz zur Pflanzgrubenverfüllung aus miteinander vermischten Stoffen oder aus aufbereiteten Böden“. Die Regelwerke für Straßenbäume gemäß FLL [2010] und FGSV [2006] definieren vegetationstechnische Anforderungen an solche Substrate, insbesondere aus bodenphysikalischer und bodenchemischer Sicht. Hinsichtlich der bautechnischen Anforderungen dieser Regelwerke wird dabei auf Erfahrungswerte und Prüfverfahren anderer Fachrichtungen, wie z.B. der Bodenkunde, dem Erd- und Straßenbau oder auch der Betontechnologie, zurückgegriffen. So bestehen heute im Bereich der Vegetationstechnik für die unterschiedlichen Baustoffe/Substrate teilweise sehr unterschiedliche Anforderungen und Prüfverfahren in der Branche, die noch einer allgemeinen Harmonisierung untereinander bedürfen.

Die allgemein anerkannte Bodenkundliche Kartieranleitung [AD-HOC-AG Boden, 2005] definiert den Begriff ‚Substrat‘ als das Material, aus dem die Festsubstanz des Bodens besteht. Der Begriff Substrat gibt daher im Bereich der Bodenkunde und der Bodenbeschreibung in erster Linie Hinweise zur Bodenentstehung. Er charakterisiert die bodenbildenden Ausgangsgesteine sowie deren Verwitterungs-, Umlagerungs- und Verlagerungszustand und unterscheidet weiterhin in anthropogene und natürliche Substrate. [AD-HOC-AG Boden, 2005]

Zweiter Bodenbestandteil sind die Poren. Im Porensystem von Böden vollziehen sich der Lufthaushalt und die Wasserbewegung, verbunden mit Transport- und Akkumulationsvorgängen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Bodenwasser in den weiten Grobporen des Bodens frei beweglich ist – Wasser, welches als Sickerwasser entsprechend der Gravitation dem Grundwasser zustrebt. Das pflanzenverfügbare Haftwasser befindet sich in den Mittelporen des Bodens. Nicht pflanzenverfügbares Haftwasser, auch Totwasser genannt, befindet sich in den Feinporen. Luftkapazität plus Feldkapazität ergeben das Gesamtporenvolumen des Bodens. [AD-HOC-AG Boden, 2005]

Eine typische Korngrößenverteilung für einen Ton-, Schluff- und Sandboden ist in Bild 2 aufgeführt. Hier und in Tabelle 1 sind auch die Definitionen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden allgemein zugeordnet.

Die Definitionen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden werden auf Basis von Untersuchungen an Sonnenblumen abgeleitet und definiert und sind somit streng genommen nicht auf alle Pflanzenarten direkt übertragbar. Die Definitionen stellen aber heute ein in der Praxis viel genutztes Bewertungsverfahren für Böden dar und werden auch für Substrate zur Beurteilung der vegetationstechnischen Eigenschaften

genutzt. Der Begriff ‚Kapazität‘ in der Bodenkunde stellt somit verschiedene Porenvolumina dar.

Natürliche Böden bestehen physikalisch gesehen im ‚Ruhezustand‘ prinzipiell immer aus der Feststoffsubstanz V_{fest} der Bodenpartikel, dem an den Bodenpartikeln anhaftenden Bodenwasser und dem Restvolumen, welches mit Bodenluft ausgefüllt wird – V_{Poren} (Dreistoffsystem: Bodenpartikel, Wasser, Luft). Dabei besitzen viele Bodenpartikel von Oberböden aufgrund ihrer Entstehung Korndurchmesser $< 2 \text{ mm}$ und sind deshalb bautechnisch nur begrenzt einsetzbar [HARTGE, HORN, 1999] (siehe Bild 3). Für die Bodenentwicklung und -nutzung in der Landwirtschaft sind Bodenteilchen mit einem Durchmesser von $< 2 \text{ mm}$ von erheblicher Bedeutung. Hier können große Wassermengen gegen die Schwerkraft gehalten werden, die dann den Luftinhalt im Boden verdrängen.

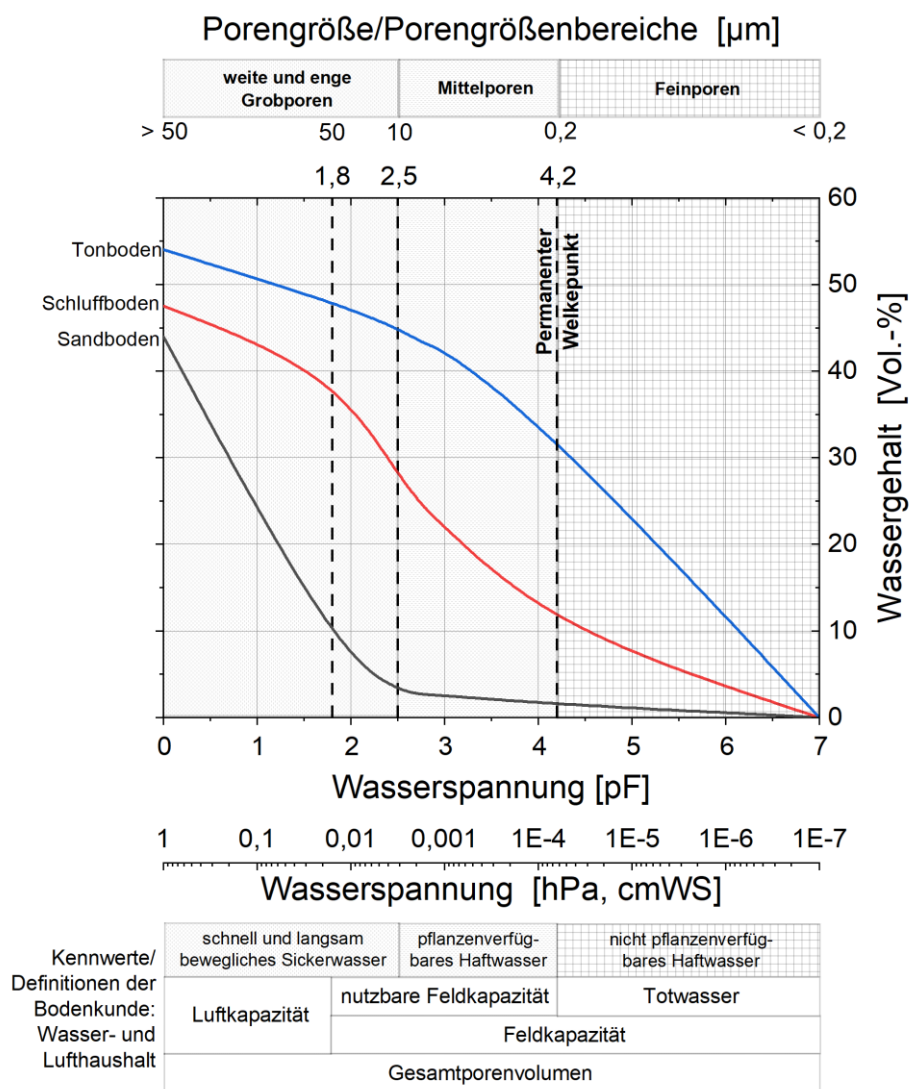


Bild 2: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt verschiedener Böden sowie Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Äquivalentdurchmesser für kapillare Poren in Anlehnung an [SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL, 2015]

Die Einstufung und Bewertung der bodenphysikalischen Kennwerte erfolgt für Oberböden, die überwiegend dichte Mineralbestandteile enthalten und in ihrer in der Natur vorkommenden Lagerungsdichte geprüft wurden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung [AD-HOC-AG Boden, 2005] gemäß Tabelle 2.

Tabelle 1: Definitionen der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden [AD-HOC-AG Boden, 2005]

Saugspannung [hPa]	< 60	60 bis < 300	300 bis < 15000	≥ 15000
pF-Wert	< 1,8	1,8 bis < 2,5	2,5 bis < 4,2	≥ 4,2
Porenäquivalent [µm]	> 50	50 bis > 10	10 bis > 0,2	≤ 0,2
Porenbezeichnung	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Bodenwasser	schnell bewegliches	langsam bewegliches	pflanzen- verfügbares	nicht pflanzen- verfügbares
	Sickerwasser		Haftwasser	
Kennwerte	Luftkapazität	nutzbare Feldkapazität		Totwasser
		Feldkapazität		
	Gesamtporenvolumen			

Tabelle 2: Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte zum Luft- und Wasserhaushalt von natürlichen Böden [AD-HOC-AG Boden, 2005]

Bezeichnung	Stufe	Gesamtporenvolumen GPV	Luftkapazität LK	Feldkapazität FK	nutzbare Feldkapazität nFK	Totwasser TW
		[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
sehr gering	1	< 30	< 2	< 21	< 6	< 4
gering	2	30 bis < 38	2 bis < 5	21 bis < 30	6 bis < 14	4 bis < 10
mittel	3	38 bis < 46	5 bis < 13	30 bis < 39	14 bis < 22	10 bis < 22
hoch	4	46 bis < 54	13 bis < 26	39 bis < 48	22 bis < 30	22 bis < 34
sehr hoch	5	≥ 54	≥ 26	≥ 48	≥ 30	≥ 34

Die in natürlichen Böden vorkommenden Korngrößen variieren innerhalb eines weiten Bereichs und sind skalenmäßig nach oben wie unten offen. In der Bodenkunde werden die Kornfraktionen im Bereich zwischen 0,002 und 32 mm in die Bereiche Ton (bis 0,002 mm), Schluff (0,002/0,063 mm), Sand (0,063/2 mm) und Kies (2/32 mm) eingeteilt. Bei der Wahl der Zahlenwerte für die Fraktionsgrenzen orientiert sich ATTERBERG im Jahr 1912 [ATTERBERG, 1912] für die Sandobergrenze an der Ziffer 2, da oberhalb dieser Körnung unter Freilandbedingungen kein großer Einfluss auf die Wasserbewegung mehr festzustellen ist. Die Ziffer 63 wird für die Kornfraktionsgrenzen weiterhin gewählt, da sie in der logarithmischen Einteilung genau in die Mitte fällt. Die einzelnen Kornfraktionen werden weiterhin in die Untergruppen fein, mittel und grob unterteilt. [HARTGE, HORN, 1999]

Auch die Porengrößenverteilung, die maßgeblich durch die Korngrößenverteilung und die einwirkenden mechanischen Kräfte beeinflusst wird, stellt eine wichtige Kenngröße für die Beurteilung der vegetationstechnischen Eigenschaften von Böden dar. Form und Größe der Poren sind wesentlich abhängig von der Korngrößenverteilung.

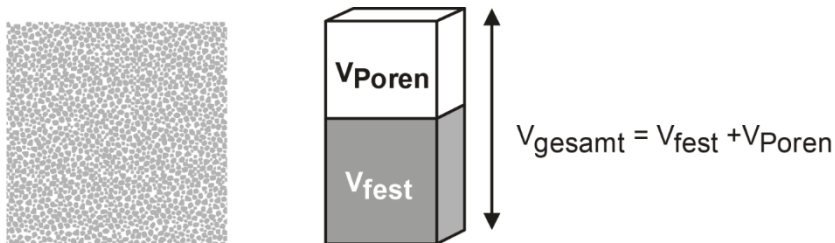


Bild 3: Bodenstruktur natürlicher Böden mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens in Anlehnung an [HARTGE, HORN, 1999]

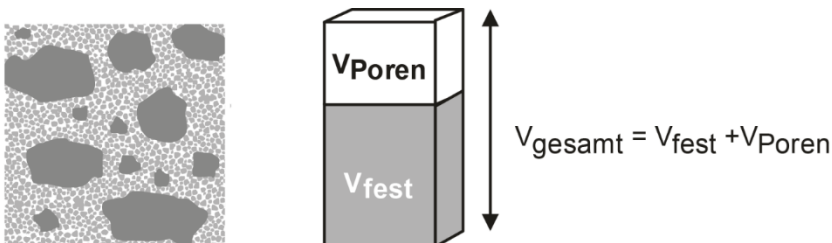


Bild 4: Bodenstruktur eines natürlichen Bodens mit Kiesanteilen mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens

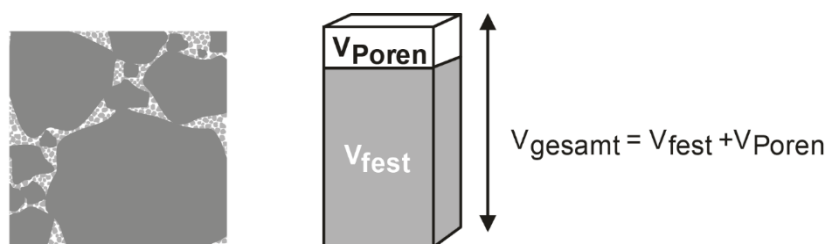


Bild 5: Bodenstruktur einer Schottertragschicht (ToB) mit qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens

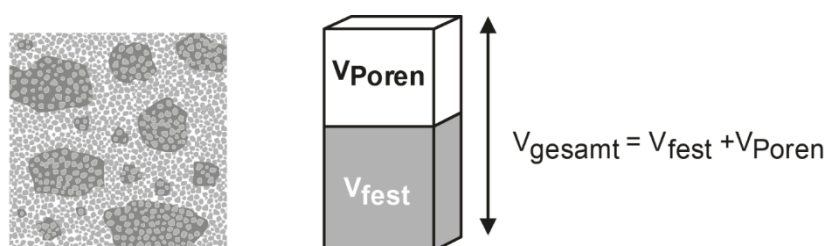


Bild 6: Struktur eines Vegetationssubstrates mit poriger Gesteinskörnung und qualitativer Darstellung des Gesamtporenvolumens

Die Kornform der Partikel beeinflusst die natürliche Lagerungsdichte von natürlichen Böden in Abhängigkeit von der Nutzung. Die Form der Poren lässt sich bei annähernd runden Kornformen der Partikel (Kies- und Sandfraktion) durch ineinander übergehende Tetraeder oder Oktaeder mit bauchig zur Porenmitte hin gebogenen Flächen beschreiben. Wie die Korngrößenverteilung stellt auch die Porengrößenverteilung ein Kontinuum dar, welches in konventionell festgelegte Bereiche unterteilt wird. Unterschiedliche Kornformen beeinflussen die Porengrößenverteilung und die Form der Poren. Die durch die Partikelpackung bedingten Poren werden in der Literatur als körnungsbedingte Primärporen bezeichnet. Als Sekundärporen bezeichnet man z. B. spaltförmige Schrumpfrisse sowie Wurzel- oder Tierröhren. Diese sind nicht körnungsbedingt und treten daher auch unregelmäßig auf. Sie können auch durch Bearbeitungsmaßnahmen, wie z. B. Pflügen, erzeugt werden. Sekundärporen unterscheiden sich von Primärporen dadurch, dass sie leicht zerstört werden können, da sie meist im Bodengefüge nur einseitig abgestützt werden. Weiterhin weisen sie meist größere Äquivalentdurchmesser ($> 60 \mu\text{m}$) auf und tragen daher überwiegend zur Erhöhung des Lufthaushaltes bei. In natürlichen Böden findet man daher zwei Porensysteme vor, die einander durchdringen – ein gröberes Sekundärporensystem und ein feineres Primärporensystem. [Vgl. SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., et. al.]

Böden mit Anteilen der Kiesfraktion $> 2 \text{ mm}$, wie z.B. aus dichtem Naturstein, weisen i.d.R. höhere Standfestigkeiten auf – jedoch zu Lasten einer vegetationstechnisch weniger nutzbaren verringerten Porenstruktur (siehe Bild 4).

Straßenbaulich genutzte Baustoffe, wie z.B. Tragschichten ohne Bindemittel, werden mit hohen Verdichtungsanforderungen eingebaut, um die geforderten Standfestigkeiten bei begrenzter Setzung zu erreichen. Diese weisen im direkten Vergleich zu natürlichen Böden im Regelfall noch geringere Porenanteile auf und sind in der Kies- und Schotterfraktion grobkörniger zusammengesetzt (siehe Bild 5).

Die vegetationstechnischen Eigenschaften künstlich hergestellter Substrate (Bodenersatzstoffe für bestimmte technische Anwendungen und definierte Eigenschaften) werden üblicherweise hinsichtlich ihrer Anforderungen eng aus dem Fachgebiet der Bodenkunde abgeleitet. Bei besonderen Anforderungen an die Standfestigkeit solcher Substrate, wie z.B. überbaubarer Baumsubstrate, sind noch weitere bautechnische Anforderungen zu beachten.

Um die vegetationstechnischen Eigenschaften künstlich hergestellter Substrate zu verbessern, werden porige Gesteinskörnungen verwendet (siehe Bild 6). Neben Baumsubstraten gibt es insbesondere für den Bereich der Dachbegrünungen hierzu jahrzehntelange Erfahrungen. Hier werden mit Hilfe poriger Gesteinskörnungen, wie z.B. Lava, Bims oder Ziegel, die vegetationstechnischen Eigenschaften für den Wasser- und Lufthaushalt vergrößert.

Vergleicht man die diskutierten Strukturen ‚Boden – Vegetationssubstrat‘, erkennt man, dass Vegetationssubstrate mit hohen Anforderungen an den Wasser- und Lufthaushalt nur mit porösen Gesteinskörnungen für überbaubare Pflanzgrubenbauweisen hergestellt werden können, um annähernd das Potential von natürlichen Böden zu erreichen. Weiterhin ist es bei dieser Analyse schon an dieser Stelle wichtig zu beachten, dass sich die Definitionen für den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt zwischen Bodenkunde und Vegetationskunde in ihren Prüfmethoden für Baumsubstrate bewusst unterscheiden. Diesen Zusammenhang verdeutlicht die folgende Tabelle 3:

Tabelle 3: Definition der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt: Bodenkunde und Vegetationstechnik (FLL) [HEIDGER, KURKOWSKI 2019a und b]

Bezeichnung der Poren	Äquivalent- durch- messer der Poren	Saugspannungs- bereich		Bodenwasser		Bodenluft	
				Speicherkapazität			
	µm	cm WS*	pF-Wert**	nach AG Boden	nach FLL	nach FLL und FGSV	
weite Grobporen	> 50	< 60	< 1,8			Gesamt- poren- volumen (GPV)	Luft- kapazität (LK)
enge Grobporen	50 – 100	60 – 300	1,8 – 2,5	nutzbare Feld- kapazität (nFK)	maximale Wasser- kapazität (WK max.)		
Mittelporen	10 – 0,2	300 – 15.000	2,5 – 4,2				
Feinporen	< 0,2	> 15.000	> 4,2	Totwasser			

* Wassersäule

** log cm Wassersäule

Unter bodenkundlicher Betrachtung beschränkt sich die nutzbare Feldkapazität nur auf den Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser, während in der Vegetationstechnik mit den Begriffen ‚maximale Wasserspeicherfähigkeit‘ bzw. ‚maximale Wasserkapazität‘ die Gesamtmenge an Wasser bezeichnet wird, die der Boden maximal speichern kann (d.h. abzüglich des in den Grobporen schwerkraftbedingt abfließenden Sickerwassers, unabhängig von dem Aspekt des eventuellen Vorhandenseins von Bewuchs, der das Speicherwasser nutzt).

Der Luftgehalt bzw. die Luftkapazität im Boden, welches einer Wasserspannung von < 60 hPa oder einem pF-Wert von < 1,8 entspricht, haben eine besondere Bedeutung für das Pflanzenwachstum. Es wird angenommen, dass bis zu einem Luftgehalt von ca. 10 Vol.-% eine Pflanze im Boden nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden kann.

2.2 Entwicklung der Anforderungen an Baumsubstrate

2.2.1 Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung

Um auch Bäume in Extremstandorten, wie z.B. Verkehrsflächen in Städten, zu etablieren, sind ausreichend vitale, standfeste und möglichst pflegearme Umgebungsbedingungen notwendig. So wird in früheren Jahren nach Möglichkeiten geforscht, den Wurzelraum eines Straßenbaumes zu vergrößern und zu verbessern. Grundlegenden Forschungsarbeiten werden hierzu von KRIETER und MALKUS [1989 und 1996], LIESEKE und HEIDGER [1994] sowie SCHRÖDER [1997] erarbeitet. Von den Gartenämtern sind Osnabrück und München führend. In München wird bereits 2002 ein erstes Regelwerk [ZTV Vegtra Mü, 2002] in Form einer Zusätzlichen technischen Vorschrift erarbeitet.

Im Forschungsbericht des Bundesministeriums für Verkehr „Bäume in Stadtstraßen“ von LIESEKE und HEIDGER [1994] werden die damaligen Forschungsergebnisse der verschiedenen Quellen vergleichend dargestellt. Es wird dort noch in Obersubstrate und Untersubstrate (zweischichtige Bauweisen) unterschieden. In Tabelle 4 und 5 sind die Versuchsmaterialien der damaligen Zeit mit den Hauptfraktionen der Korngrößenverteilung und den resultierenden bodenphysikalischen Eigenschaften aufgeführt.

Tabelle 4: Vergleich der Korngrößenverteilung von Baumsubstraten verschiedener Forschungsarbeiten in Hauptfraktionen nach [LIESEKE, HEIDGER, 1994]

Substrat	Forschungsvorhaben	Korngrößenverteilung in Massen-%		
		Kies	Sand	Schluff und Ton
		2 – 20 mm	0,063 – 2 mm	0 – 0,063 mm
Ober-substrat	BMV F+E-Vorhaben (1991)	29,4	59,7	10,9
	KRIETER u.a. (1989) A	43,0	36,0	21,0
	KRIETER u.a. (1989) B	49,0	39,0	12,0
	SCHRÖDER u.a. (1990) I	31,0	59,0	10
	SCHRÖDER u.a. (1991) P 17	47,7	42,4	9,9
	SCHRÖDER u.a. (1991) P20	46,7	50,9	2,4
	OPTIMA (1988-1990)	22,6	56,7	20,7
	VULKATEC (1992)	45,9	47,7	6,7
Unter-substrat	BMV F+E-Vorhaben (1991)	29,6	62,1	8,3
	KRIETER u.a. (1989) A	43,0	36,0	21,0
	KRIETER u.a. (1989) B	49,0	39,0	12,0
	SCHRÖDER u.a. (1990) I	41,0	50,0	9,0
	SCHRÖDER u.a. (1991) P 17	58,5	21,7	19,8
	SCHRÖDER u.a. (1991) P20	67,9	25,2	6,9
	OPTIMA (1988-1990)	27,3	57,2	15,3

Tabelle 5: Vergleich der bodenphysikalischen Eigenschaften von Baumsubstraten verschiedener Forschungsarbeiten nach [LIESEKE, HEIDGER, 1994]

Substrat	Forschungsvorhaben	Gesamt-poren-volumen	Nutzbare Feld-kapazität pF 1,8 – 4,2	Luft-kapazität bei pF 1,8	Maximale Wasser-kapazität	Luft-kapazität bei max. WK	Wasserdurch-lässigkeit mod. K*
		Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	cm/s
Obersubstrat	BMV F+E-Vorhaben (1991) ¹⁾	44,0	15,2	22,1	38,7	5,3	$1,3 \times 10^{-3}$
	KRIETER u.a. (1989) A2 ¹⁾	41,4	17,8	16,2	n.b.	n.b.	$7,9 \times 10^{-4}$
	KRIETER u.a. (1989) A3 ¹⁾	33,5	17,0	11,3	n.b.	n.b.	$4,1 \times 10^{-4}$
	KRIETER u.a. (1989) B1 ¹⁾	37,5	12,7	19,8	n.b.	n.b.	$6,2 \times 10^{-3}$
	KRIETER u.a. (1989) B2 ¹⁾	37,7	12,2	22,6	n.b.	n.b.	$6,3 \times 10^{-3}$
	SCHRÖDER u.a. (1990) I	66,0	n.b.	n.b.	58,0	8,0	n.b.
	SCHRÖDER u.a. (1991) P17	56,3	25,2	21,8	n.b.	n.b.	n.b.
	SCHRÖDER u.a. (1991) P20	58,6	28,9	21,8	n.b.	n.b.	n.b.
	OPTIMA (1988-1990)	55,6	n.b.	n.b.	46,6	9,0	n.b.
	VULKATEC (1992) ¹⁾	57,4	19,7	31,5	51,5	5,9	$2,0 \times 10^{-2}$
Untersubstrat	BMV F+E-Vorhaben (1991) ¹⁾	40,2	14,8	18,6	36,1	4,0	$7,4 \times 10^{-3}$
	KRIETER u.a. (1989) A2 ¹⁾	41,4	17,8	16,2	n.b.	n.b.	$7,4 \times 10^{-3}$
	KRIETER u.a. (1989) A3 ¹⁾	33,5	17,0	11,3	n.b.	n.b.	$4,1 \times 10^{-4}$
	KRIETER u.a. (1989) B1 ¹⁾	37,5	12,7	19,8	n.b.	n.b.	$6,2 \times 10^{-3}$
	KRIETER u.a. (1989) B2 ¹⁾	37,7	12,2	22,6	n.b.	n.b.	$6,3 \times 10^{-3}$
	SCHRÖDER u.a. (1990) I	46,0	n.b.	n.b.	33,0	13,0	n.b.
	SCHRÖDER u.a. (1991) P17	52,2	22,3	20,1	n.b.	n.b.	n.b.
	SCHRÖDER u.a. (1991) P20	49,3	13,2	33,2	n.b.	n.b.	n.b.
	OPTIMA (1988-1990)	53,8	n.b.	n.b.	39,6	14,2	n.b.

1) Im verdichteten Zustand

n.b. nicht bestimmt

Die bodenphysikalischen Eigenschaften werden bei den verschiedenen Forschungsarbeiten insbesondere mit unterschiedlichen Verdichtungsgraden untersucht, sodass sich z.B. beim Gesamtporenvolumen deutlich unterschiedliche Ergebnisse zeigen. Aber auch bei der maximalen Wasserkapazität und dem Luftvolumen spiegelt sich diese Bandbreite wider.

Aufbauend auf diesen Forschungsarbeiten werden in der Folgezeit erste Regelwerke für Straßenbäume gemäß FLL und FGSV [FLL, 2004 und FGSV, 2006] entwickelt und später auch fortgeschrieben. Anforderungen für den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt, abgeleitet aus der Bestimmung von vollständigen Wasserspannungskurven, hat man in den Regelwerken bis auf die Bestimmung des Luftgehaltes bei pF 1,8 nicht vorgesehen. In der Bodenkunde werden Wasserspannungskurven in der Regel an kleinen Stechzylindern < 100 cm³ Volumen und maximal an der Körnung bis 2 mm bestimmt, um akzeptable Prüfzeiten für die sehr unterschiedlich wirkenden Bodenarten zu erzielen.

Im Vergleich dazu bestimmt HEIDGER Baumsubstrate 0/16 mm auf ihre Wasserspannungskurve im 200-cm³-Zylinder [LIESEKE, HEIDGER 1994]. In der folgenden Tabelle 6 sind diese ermittelten Werte für diese Methode bei vegetationstechnisch veränderter Prüfung aufgeführt.

Tabelle 6: Bodenluft- und Bodenwassergehalt mit Porengrößenverteilung der Substrate aus [LIESEKE, HEIDGER 1994]

Nr.	Substrat	Gesamt- poren- volumen GPV	Porengrößenverteilung				Wasser- kapazität WKmax.	Wasser- durch- lässigkeit mod K*
			weite Grob- poren	enge Grob- poren	Mittel- poren	Fein- poren		
			pF < 1,8	pF 1,8 - 2,5	pF 2,5- 4,2	pF > 4,2		
		[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[m/s]
Voruntersuchung								
B 1	OB Hannover	57,3	23,4	8,3	16,5	9,1	44,8	7,3 x 10 ⁻⁶
B 2	US Hannover	45,3	23,3	2,0	12,9	7,1	36,3	3,8 x 10 ⁻⁶
B 3	OB Münster	49,0	21,6	2,3	17,0	8,0	21,7	6,2 x 10 ⁻⁴
B 4	SS Viersen	48,0	14,8	10,4	14,2	8,5	47,3	5,8 x 10 ⁻⁶
Substratentwicklung								
B 5	US A	47,9	30,1	2,1	12,4	3,3	34,5	5,4 x 10 ⁻⁵
B 6	US B	44,5	25,7	2,8	12,1	3,9	33,7	2,6 x 10 ⁻⁵
B 7	OS C	48,5	29,4	4,2	9,6	5,4	44,8	5,9 x 10 ⁻⁵
B 8	OS D	48,9	25,2	5,0	12,5	6,2	45,9	2,0 x 10 ⁻⁵
Versuchsstandort Hannover, Im Heidekampe								
B 9	OS Baustelle	37,5	16,7	3,4	10,8	7,0	35,9	7,0 x 10 ⁻⁶
B 10	OS Kontrolle	42,9	21,3	5,2	12,0	4,4	33,9	1,3 x 10 ⁻⁵
B 11	US Baustelle	38,8	22,2	2,3	11,3	3,0	37,6	5,9 x 10 ⁻⁵
B 12	US Kontrolle	41,8	23,2	4,6	10,2	3,8	37,5	5,6 x 10 ⁻⁵
Versuchsstandort Münster, Hansestraße								
B 13	OB Baustelle	48,3	28,9	4,2	7,7	7,5	30,7	3,2 x 10 ⁻⁵
B 14	OS Kontrolle	44,5	21,6	3,8	8,9	10,1	28,9	7,5 x 10 ⁻⁵
B 15	US Baustelle	41,1	19,0	4,6	14,4	3,1	25,8	8,5 x 10 ⁻⁵
B 16	US Kontrolle	42,9	24,9	3,8	10,4	3,6	25,5	3,3 x 10 ⁻⁵
Versuchsstandort Viersen, Innerer Erschließungsring								
B 17	OS Baustelle	44,2	16,7	3,3	15,9	8,3	43,0	1,7 x 10 ⁻⁵
B 18	OS Kontrolle	45,4	22,0	4,1	12,6	6,7	44,0	6,0 x 10 ⁻⁵
B 19	US Baustelle	40,1	23,1	2,3	9,8	4,9	39,2	2,7 x 10 ⁻⁴
B 20	US Kontrolle	39,4	23,8	2,0	9,5	4,1	37,8	1,6 x 10 ⁻⁴
Versuchsstandort Hannover, Hildesheimer Straße								
B 21	OS Baustelle	39,3	18,1	3,1	11,8	6,3	38,4	1,1 x 10 ⁻⁵
B 22	OS Kontrolle	43,8	25,8	3,0	9,3	5,6	43,8	6,1 x 10 ⁻⁵
B 23	US Baustelle	41,7	24,9	2,4	9,9	4,6	41,6	4,5 x 10 ⁻⁶
B 24	US Kontrolle	36,5	18,4	4,0	9,9	4,1	36,4	1,0 x 10 ⁻⁴
Versuchsstandort Münster Loddenheide								
B 25	OS Baustelle	49,9	29,4	3,4	12,6	4,5	43,8	3,0 x 10 ⁻⁵
B 26	OS Kontrolle	44,5	21,6	3,8	8,9	10,1	43,6	7,5 x 10 ⁻⁵
B 27	US Baustelle	40,4	23,1	3,1	11,5	2,7	38,6	2,1 x 10 ⁻⁵
B 28	US Kontrolle	42,9	24,9	3,8	10,4	3,6	40,1	3,3 x 10 ⁻⁵
Versuchsstandort Münster/Angelmodde Angelstraße								
B 29	OS Baustelle	45,1	21,8	5,6	10,6	7,1	40,6	9,3 x 10 ⁻⁶
B 30	OS Kontrolle	45,2	19,2	5,8	12,9	7,3	41,4	1,3 x 10 ⁻⁵
B 31	US Baustelle	38,9	17,2	6,9	10,5	4,3	34,2	4,1 x 10 ⁻⁶
B 32	US Kontrolle	39,7	20,6	5,1	10,4	3,6	32,0	1,1 x 10 ⁻⁵

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Prüfcylinder – wie damals üblich für Dachsubstrate – mit sechs Schlägen des Proctor-Fallgewichts verdichtet werden und damit keiner straßenbautechnischen Verdichtung unterliegen. Die heutige Vorgehensweise, mit einem höheren definierten Verdichtungsgrad bei der Prüfung von überbaubaren Baumsubstraten vorzugehen, ist zum damaligen Zeitpunkt noch nicht entwickelt.

In Bild 7 werden die ermittelten Wasserspannungskurven von HEIDGER auf Basis von Tabelle 6 zusätzlich grafisch dargestellt.

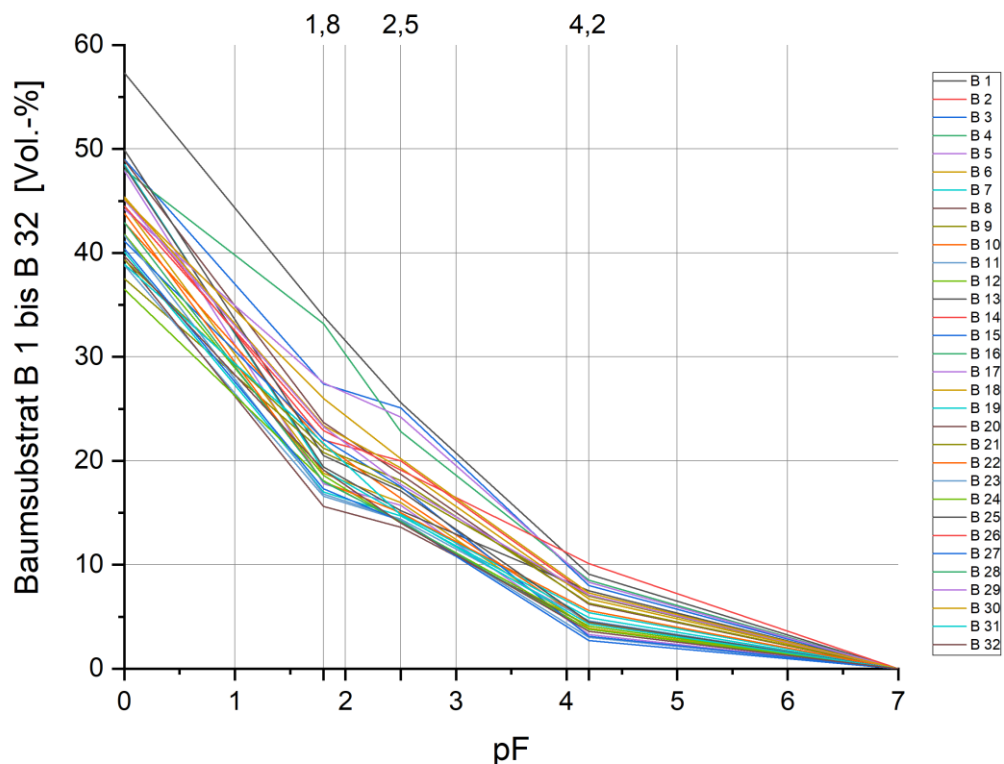


Bild 7: Porengrößenverteilung der Substrate aus [LIESEKE, HEIDGER 1994]

2.2.2 Historische Entwicklung der Regelwerke für Baumpflanzungen und der Anforderungsprofile für Baumsubstrate

In Anlage 1 ist die jahrzehntedauernde historische Entwicklung der Regelwerke und der Bauweisen für Baumpflanzungen aufgeführt. Diese Zusammenfassung geht auf die Entwicklung der Regelwerke und ihre wesentlichen Änderungen für Baumpflanzungen und deren vegetationstechnische Problematiken ein:

- DIN 18915 und DIN 18916, Fassung 2002 und 2016 [DIN 18915 und 18916 von 2002 und 2016]
- FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2004 [FLL, 2004]
- Anforderungsprofil von HEIDGER [HEIDGER, 2006b]
- FGSV-Hinweise, 2006 [FGSV, 2006]
- ZTV-Vegtra-Mü, 2008 und 2016 [ZTV-Vegtra-Mü von 2008 und 2016]
- FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2010 [FLL 2010]
- FGSV-Merkblatt für die Erhaltung von Baumstandorten in Verkehrsflächen [FLL, 2019]
- Baumwurzeln in der Nähe von Leitungen und Kanälen

und wird am Ende durch einen tabellarischen Überblick über die Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate und deren entwickelten Bauweisen dargestellt.

Insbesondere der vorgegebene unterschiedliche Verdichtungsgrad für Baumsubstrate in nicht überbaubarer und überbaubarer Bauweise der Pflanzgrubenbauweisen 1 oder 2 hat einen entsprechenden Einfluss auf die bodenphysikalischen Eigenschaften der Substrate.

Gerade überbaubare Baumstandorte in Verkehrsflächen stellen für Straßenbäume immer Extremstandorte dar. Werden diese nicht nach dem heutigen Kenntnisstand bei der Planung, Umsetzung der Baumpflanzung und späteren Pflege sorgfältig gebaut und gepflegt, können diese Einflussfaktoren für die Baumentwicklung zu Stressfaktoren [Vgl. BALDER, 2020] werden und später sogar die Verkehrsfläche schädigen.

Beispiele für schadhafte Verkehrsflächen bei unzureichender Bauweise und eine praxisgemäße Umsetzung einer Baumpflanzung in einer Verkehrsfläche sind als Bilddokumentation am Ende dieser Arbeit aufgeführt (siehe auch Bild 8).

Einflussfaktoren für Baumpflanzungen an urbanen Extrem-Standorten

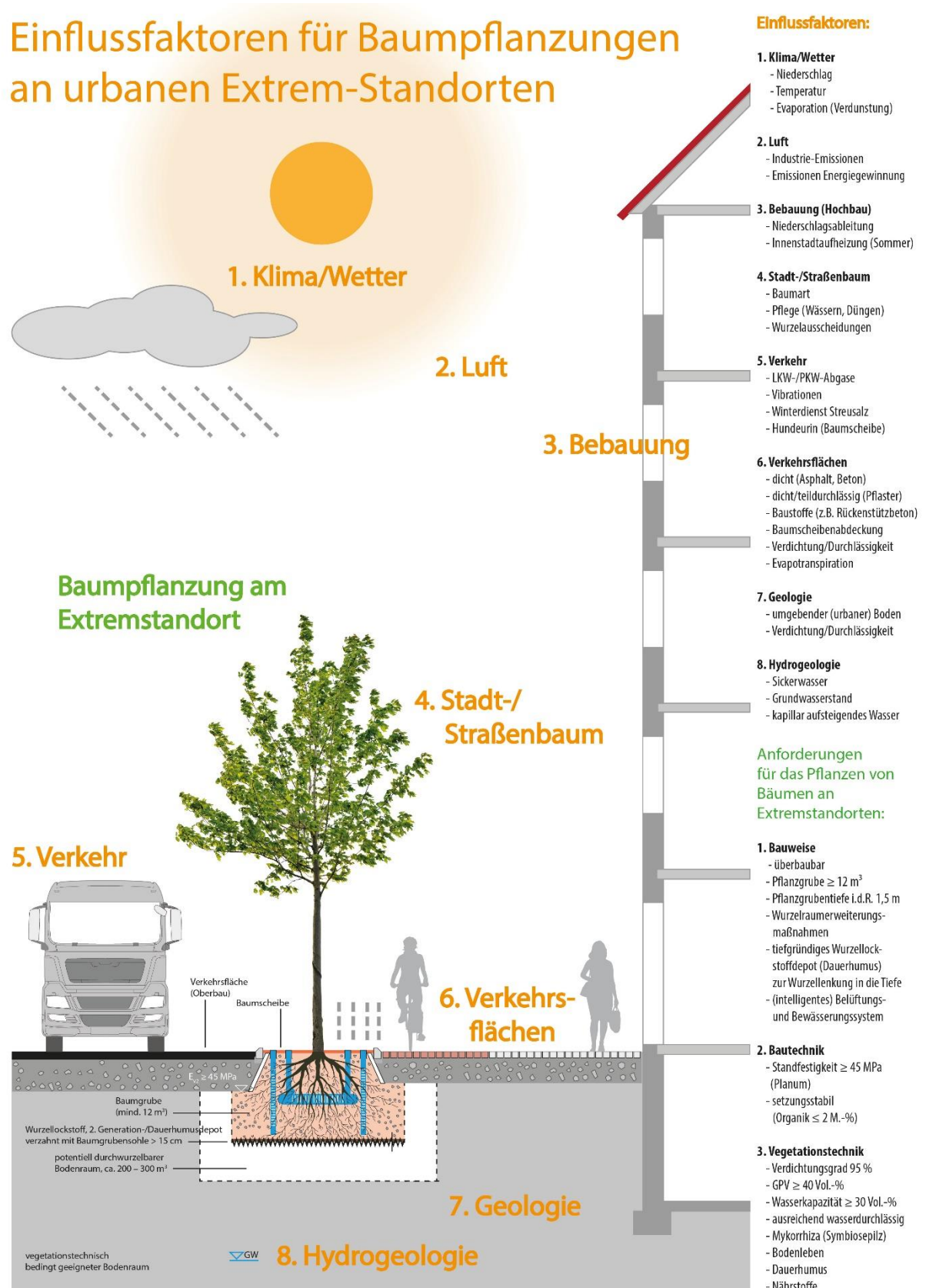


Bild 8: Einflussfaktoren/Stressfaktoren für Baumpflanzungen am Extremstandort Verkehrsfläche

2.2.3 Neue Bauweisen für Baumstandorte zur Regenwassernutzung und zum Überflutungsschutz

In den letzten Jahren beschäftigen sich aktuelle Forschungsvorhaben national und international [FELLMER, 2017] mit der Nutzung der Baumgrube als Bestandteil eines Regenwasser- oder Überflutungskonzeptes im Rahmen von Stadtplanungskonzepten. Ziel ist es, Regenwasser aus städtischen Bereichen zur Versorgung von Baumstandorten und Grünflächen zu verwenden. Gleichzeitig wird das Ziel verfolgt, überschüssiges Regenwasser in der Grünfläche versickern zu lassen, um so zum Hochwasserschutz beizutragen. Dabei wird bei den Substraten auch von den Regelungen der FGSV und FLL für Baumpflanzungen abgewichen und es werden modifizierte Bauweisen und andere Substratkonzepte angewandt unter Berufung auf internationale Erfahrungen zu Bauweisen aus Stockholm, New York City, Melbourne und Toronto. Allen Bauweisen gemeinsam ist die Nutzung von Straßen- oder auch Gebäudeabwasser, um die Straßenbäume hiermit zu versorgen. Oberflächenwasser wird gezielt über spezielle Schächte oder Rigolen in die Baumgrube eingeleitet. [KRUSE et. al. 2019]

Die eingesetzten Substrate werden hierbei von BIBER im Rahmen ihrer Masterarbeit [2017] in folgende Kategorien aufgeteilt:

- Großformatige Steine – Beispiel Stockholm, Schweden (Bild 9)
- Mittelformatige Steine – Beispiel New York City, USA
- Feine Böden – Beispiel Melbourne, Australien
- Rigolenkörpersysteme – Beispiele Toronto, Kanada

Straßenbäume sind bei diesen Bauweisen ein wichtiges Instrument zur Überflutungs- und Hitzevorsorge in Großstädten. In Stockholm wird das System auch zur vegetationstechnischen Verbesserung bei bestehenden Baumstandorten eingesetzt.

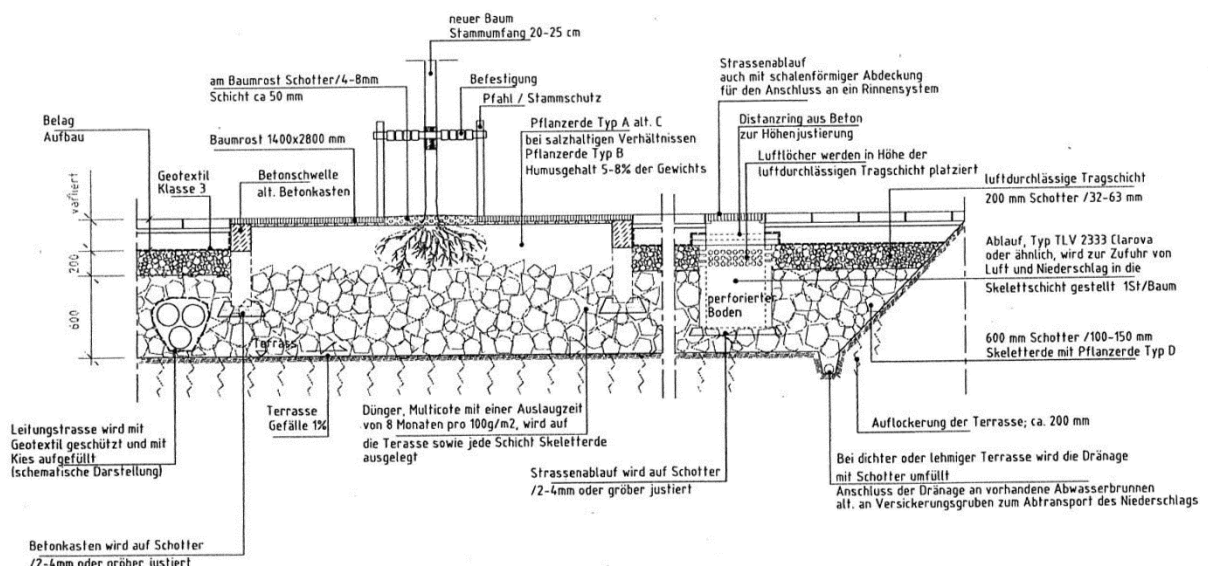


Bild 9: Bauweise Stockholm: Neupflanzung Baum in versiegelter Fläche mit Baumrost [EMBRÉM et al. 2009]

Aber auch HEIDGER, KURKOWSKI weisen in 2019a und 2019b auf weitere offene technische Fragen zu diesen neuen Bauweisen hin. Insbesondere zweifeln sie an, dass diese straßenbautechnisch für überbaubare Pflanzgrubenbauweisen in prüfbarer Form und praktischer Ausführbarkeit geeignet erscheinen. Sie verweisen dabei auch auf die Problematik, dass das einkörnige Stützgerüst schon allein ca. 70 Vol.-% Raum systembedingt in Anspruch nimmt und daraus nur noch ein zu geringer Raum für den Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt resultieren kann. [HEIDGER, KURKOWSKI 2019a und b]

Diesen offenen Fragen wird in dem Projekt ‚BlueGreenStreets – Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere‘ nachgegangen. Ein interdisziplinäres Team strebt in diesem Projekt an, die Wirksamkeit von Planungsinstrumenten und Regelwerken zu grünen städtischen Infrastrukturen, urbaner Wasserwirtschaft, dem Sanierungsmanagement von Straßen und Kanälen sowie der Verkehrs- und Freiraumplanung zu untersuchen, zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Straßenräume sollen hier zukunftsfähig gestaltet werden und so zu ‚Multitalenten‘ der Stadtquartiere werden. Dabei haben Stadtgrün und Wasserflächen nicht nur eine große Bedeutung für die Lebensqualität, sondern auch für das Mikroklima eines Stadtquartiers. In wachsenden Städten besteht die Gefahr, dass durch die Bebauung von Flächen die Überflutungsgefahr steigt. Die Aufgabe zukünftiger Stadtentwicklung ist es deshalb, verschiedene Flächennutzungen nicht nur nebeneinander zu entwickeln, sondern miteinander im Sinne einer ‚Schwammstadt‘ zu verknüpfen. Stadtgrün und Überflutungsschutz müssen sich daher in den multifunktional genutzten Straßenraum einfügen. [Vgl. BGS 2022]

Anhand der während der Projektlaufzeit von BGS erprobten „BlueGreenStreets-Elementen“ für die Umsetzung einer multifunktionalen Straßenraumgestaltung werden Planungshilfen veröffentlicht, die ‚BlueGreenStreets Toolbox A und B‘. Darin werden die entwickelten blau-grünen Elemente ausführlich vorgestellt und bewertet. Auch die Themen Gestaltung, Barrierefreiheit, unterirdische Leitungen sowie Pflege und Unterhaltung werden in den Toolboxes aufbereitet. [BGS-TBA 2022] und [BGS-TBB 2022]

2.2.4 Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch Baumstandorte

Mit der Umsetzung der Agenda 2030 der Vereinten Nationen [UN, 2022] in Deutschland [Bundesregierung, 2021], die den gegenwärtigen Stand zur Umsetzung der globalen Nachhaltigkeitsstrategie beschreibt, ist Deutschland auf dem Weg der Transformation ‚zum Besseren‘. Auch eine nachhaltige Ressourcenverwendung als Basiskriterium soll dazu beitragen, hohe Ziele wie die Bekämpfung von Armut, Hunger und Ungleichheiten sowie dem Erhalt von Frieden, Gesundheit und Wohlergehen und dem Schutz des Klimas beizutragen.

Die Agenda 2030 mit ihren 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung („Sustainable Development Goals“, SDGs) ist damit das Leitprinzip der Politik der deutschen Bundesregierung mit europäischen und deutschen Vorgaben in der Umsetzung. Die Ressourcenverwendung befindet sich damit noch ausgeprägter auf dem Weg hin zur Kreislaufwirtschaft und damit weg von einem linearen Wirtschaftssystem im Bauwesen, in dem Baumaterialien wie Gesteinskörnungen nur einmal genutzt und nach ihrer Nutzungsdauer wie in der Vergangenheit vollständig entsorgt werden. Die Nachnutzungsmöglichkeiten von Baustoffen stehen damit heute im Fokus z.B. der Wiederverwendung oder Wiederverwertung.

Nachhaltigkeit und hier insbesondere Ressourceneffizienz sind damit auch Ziele der Materialverwendung in der Vegetationstechnik geworden. Neben dem Einsatz natürlicher poriger Gesteinskörnungen wie Lava und Bims werden in der Vegetationstechnik schon früh gleichwertige rezyklierte Alternativen, wie z.B. poriger Ziegel, erprobt und für geeignet befunden. Auch industrielle Nebenprodukte, wie z.B. Rostasche oder Kesselasche [ROTH-KLEYER, 2020] werden heute für Substrate in der Vegetationstechnik verwendet. In [LESON, KURKOWSKI 2022] wird über die Verwendung von Hochofenstückschlacke als Ersatz für vulkanische Rohstoffe in Baumsubstraten berichtet. Diese Alternativen können ihren Beitrag leisten für einen nachhaltigen Umgang und schonen unsere endlichen natürlichen Ressourcen mit möglichst geringer CO₂-Bilanz zum Schutz des Klimas.

2.2.5 Diskussion der Anforderungen an Baumsubstrate

Bäume stellen besondere Ansprüche an ihre Umgebung, vor allem benötigen sie im Untergrund ausreichend porige Bodenverhältnisse und die Möglichkeit einer weiträumigen Erschließung des Untergrundes mit ihren Wurzeln zur Wasser- und Nährstoffaufnahme.

Die bautechnischen Anforderungen einer Straße sind konträr zu den vegetationstechnischen Ansprüchen von Bäumen. Ein Straßenbauwerk muss eine hohe Tragfähigkeit für die Aufnahme des Verkehrs aufweisen, um eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Die hierzu benötigte hohe Verdichtungsleistung der einzelnen Straßenbauschichten des Straßenoberbaus und des Unterbaus/ Untergrunds sind dermaßen hoch und der daraus resultierende Porenraum so niedrig, dass ein vitales Wurzelwachstum von Straßenbäumen nach konventionellen Pflanzmethoden nach DIN-Normung [DIN 18915 und DIN 18916, 2002/2016] in Verkehrsflächen heute nicht mehr möglich ist.

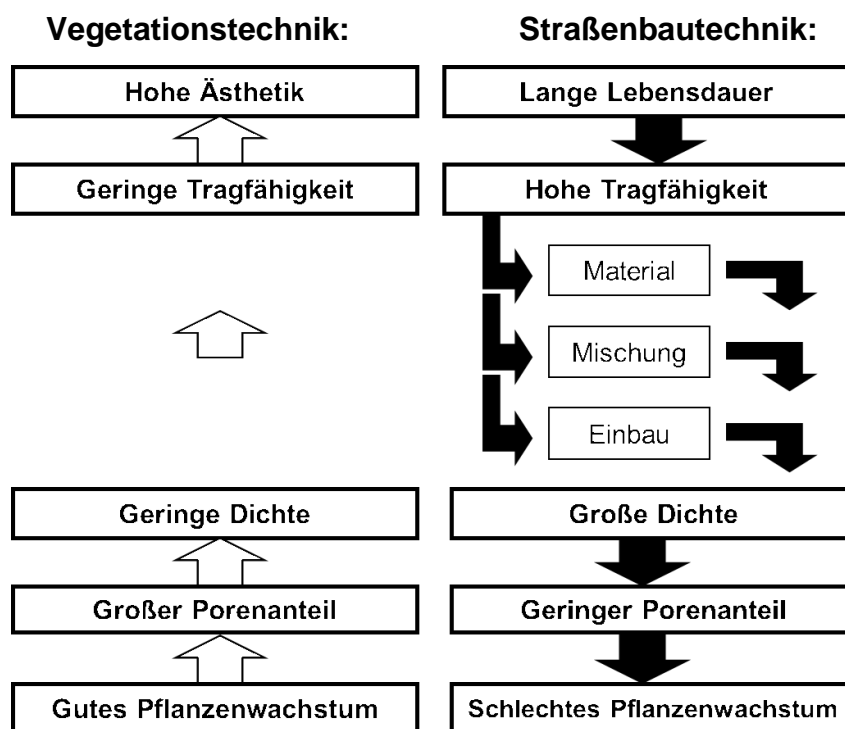


Bild 11: Gegensätzlichkeit der Anforderungen von Vegetationstechnik (links) und Straßenbautechnik (rechts) gemäß HEIDGER

Als Gegensätzlichkeit der ‚Fachrichtungen‘ Vegetationstechnik und Straßenbautechnik beschreibt HEIDGER (Bild 11) in mehreren Publikationen, z.B. [HEIDGER, KURKOWSKI, 2002, 2003, 2004 und HEIDGER, 2006a], diesen Umstand. Die Folge ist, dass jede Fachrichtung so weit mit ihren Anforderungen zurücktreten muss, wie sie verträglich für das Gesamtsystem ist. Es muss der bestmögliche Kompromiss erreicht werden.

Auf Basis der verschiedenen in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Forschungsarbeiten entsteht ein Regelwerk, das regional unterschiedlich angewendet wird. Das betrifft insbesondere die Regelwerke oder die Anforderungsprofile

- der FLL [2004] und [2010]
- der FGSV [2006]
- nach HEIDGER [2006b]
- der ZTV-Vegtra-Mü [2008] und [2016]

Bei einem Vergleich der verschiedenen Anforderungsprofile in Anlage 1, die auch immer im direkten Zusammenhang zu den Bauweisen, für die sie entwickelt wurden, gesehen werden müssen, erkennt man, dass Baumsubstrate, die aus stetig abgestimmten Korngemischen bestehen, im Fall der ZTV-Vegtra-Mü, Substrat B von [2008] angelehnt waren an den früheren Korngrößenverteilungsbereich von Tragschichten ohne Bindemittel (Kiestragschicht, Schottertragschicht). Diese sind früher für den Straßenoberbau heute nicht mehr gültigen ZTVT [1995] weitgehend entnommen und ähneln feinkörnigen Substraten oder gar Oberböden nicht. Das spiegelt sich auch in den Anforderungen an die Korngrößenverteilung der verschiedenen Regelwerke wider (Bild 12).

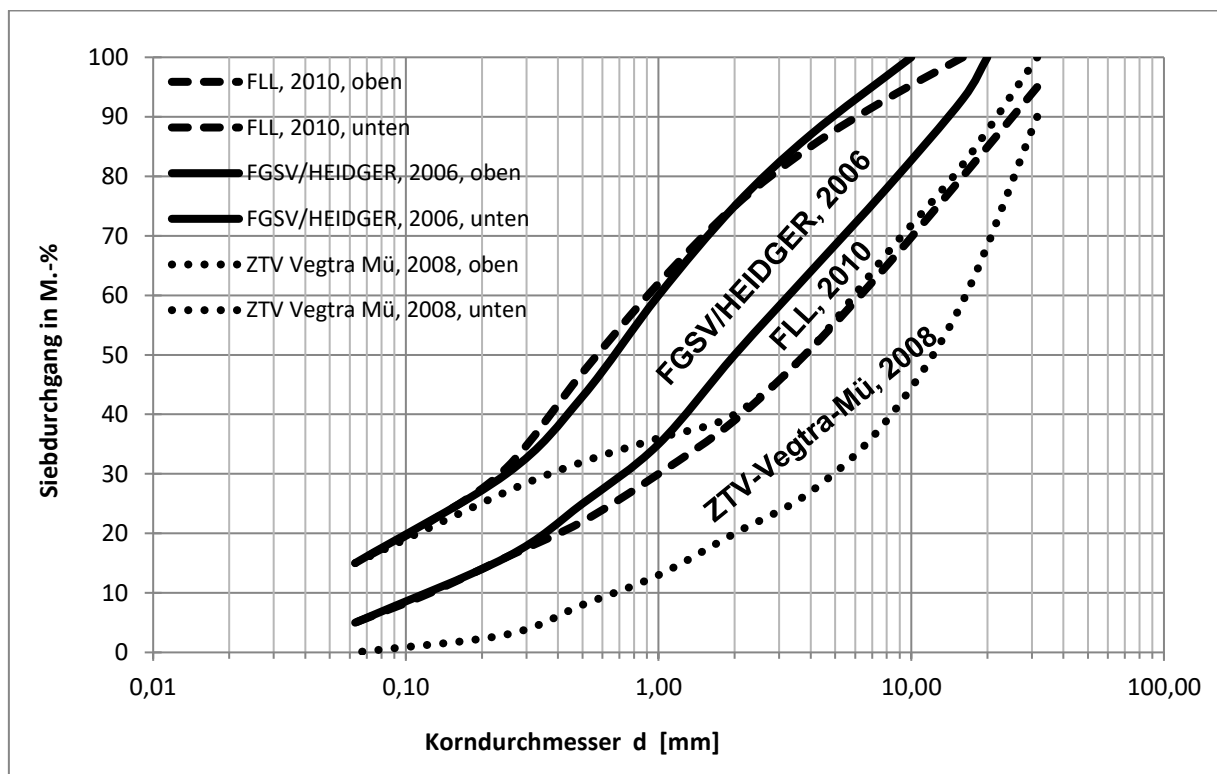


Bild 12: Vergleich der zulässigen/empfohlenen Korngrößenverteilungsbereiche für überbaubare Baumsubstrate nach den verschiedenen Regelwerken

Damit unterscheiden sich auch rein optisch Baumsubstrate mit höchsten Anforderungswerten an den Bodenluft- und Wasserhaushalt direkt von den Korngrößenverteilungen, die für eine Tragschicht ohne Bindemittel des Straßenbaus zulässig sind [siehe auch HEIDGER, 2006a, vergleiche mit Bild 12]. Eine Ausnahme

bilden hier nur die Korngrößenanforderungen des Substrats B, überbaubar der ZTV-Vegtra-Mü [2008]. Da dieses Korngrößenverteilungsband von einer Kiestragschicht nach ZTVT [1995] abgeleitet wird, entspricht es diesem fast vollständig, außer im erhöhten Anteil im Korngrößenbereich kleiner 0,063 mm, der max. 15 M.-% betragen darf. Dieses Substrat darf gemäß ZTV-Vegtra-Mü [2008] jedoch nicht im direkten Pflanzgrubenbereich eines Baumes verwendet werden.

Bei den chronologisch aufgeführten Anforderungswerten für Baumsubstrate der verschiedenen Regelwerke der Anlage 1 erkennt man weitgehende Übereinstimmungen, aber auch Differenzen. Während die Anforderungen an die bodenchemischen Eigenschaften der Substrate der Bauweise 1 und 2 der FLL und auch A und B der ZTV-Vegtra-Mü [2008] qualitativ nahezu auf einem Wert liegen, ergeben sich für die Anforderungen an den Bodenluft- und Wasserhaushalt noch größere Abweichungen im Laufe ihrer Entwicklung.

Das geht insbesondere aus der Anforderung an die max. Wasserkapazität für überbaubare Substrate hervor. Sie beträgt bei den FGSV-Hinweisen $\geq 35 - < 40$ Vol.-%, nach HEIDGER sind es ≥ 30 Vol.-%, die FLL-Empfehlungen fordern ≥ 25 Vol.-% und die ehemalige ZTV-Vegtra-Mü [2008] fordert als max. Wasserkapazität ≥ 35 % des GPV von > 20 Vol.-%, also im geringsten Fall lediglich 7 Vol.-%. Dabei muss erwähnt werden, dass selbst Wasserkapazitäten von ca. 25 Vol.-% auch mit dichten Gesteinen erreicht werden können. Ein direkter Vergleich mit Substrat B nach ZTV-Vegtra-Mü [2008] ist aber auch nicht statthaft, da dieses Substrat nicht als direktes Pflanzsubstrat als Bauweise vorgesehen war. Die qualitative Reihung kann aus den Anforderungswerten für das Gesamtporenvolumen abgeleitet werden [KURKOWSKI, 2010] (Bild 13).

Rein qualitativ ergibt sich hierbei für die verschiedenen Regelwerke im Jahr 2010 bei überbauten Baumstandorten in Verkehrsflächen daher die folgende Reihung [KURKOWSKI, 2010] (höchste zu geringste Anforderung) bezüglich der vegetationstechnischen Anforderungen:

1. Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten der FGSV [2006]
2. verschärftes Anforderungsprofil von HEIDGER [2006b]
3. Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate der FLL [2010]
4. Zusätzliche technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten – ZTV-Vegtra-Mü [2008] der Landeshauptstadt München

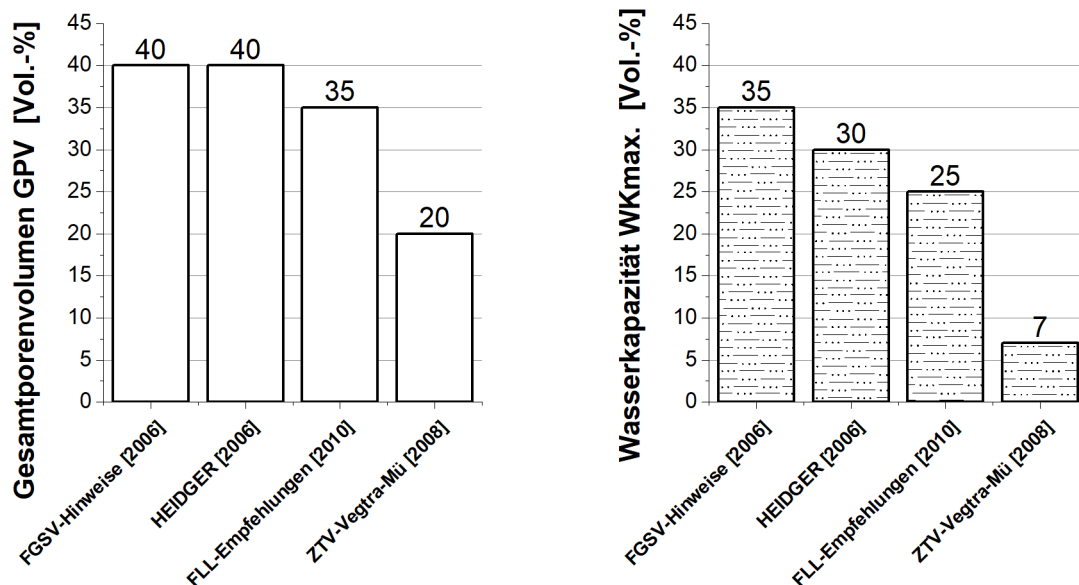


Bild 13: Vergleich der Mindestanforderungen für das Gesamtporenvolumen und die Maximale Wasserkapazität überbaubarer Baumsubstrate nach Regelwerken [KURKOWSKI 2010]

Seit 2016 werden die Anforderungen an die Korngrößenverteilung und an die vegetationstechnischen Eigenschaften der Substrate nach FLL [2010] auch weitgehend von der ZTV-Vegtra-Mü [2016] übernommen. Die Anforderungswerte an die Tragfähigkeit und den Verdichtungsgrad im verdichteten Zustand sind ebenfalls in den verschiedenen Regelwerken und Bauweisen über die Zeit angeglichen.

Aus dem Prüfablauf nach Bild 14 und den anzuwendenden Prüfverfahren nach FLL-Empfehlungen von 2004 können folgende Punkte abgeleitet werden:

- Die Tragfähigkeit wird nur in situ festgestellt und nicht auch bei der Eignungsuntersuchung im Labor. Eine zusätzliche Bestimmung der Einbaudichte in situ erfolgt im Regelfall nicht.
- Im Erd- und Straßenbau wird beispielsweise der Lastplattendruckversuch bei einer Prüflosgröße bis 1000 m² viermal gemäß ZTV E-StB 09 [ZTV E, 2009] für den Nachweis des ordnungsgemäßen Einbaus gefordert. Betrachtet man dagegen eine Baumgrube, die bei 1,5 m Höhe eine Fläche von ca. 9 m² erreicht, kann nachvollzogen werden, dass diese Prüfung für den Nachweis einer vertragsgemäßen Leistungserstellung in Form einer Tragfähigkeitsbeurteilung im Einzelfall einen sehr hohen Aufwand darstellt. Damit erscheint deren Durchführung in der Praxis für den Regelfall als unrealistisch.
- Das Prüfverfahren für die Korndichte/Kornrohdichte (Wasser- oder Luftpiknometer) ist die rechnerische Voraussetzung für die Bestimmung des Gesamtporen- und Luftvolumens bei pF 1,8 und bestimmt damit maßgeblich das Prüfergebnis der Substrateigenschaften. Das gewählte Prüfverfahren bestimmt daher in hohem Maße auch die Erfüllung des Anforderungswertes.

- Für die Bestimmung unterschiedlicher Anforderungen werden teilweise mehrere Prüfverfahren zugelassen, die zu unterschiedlichen Beurteilungsergebnissen führen können.

2.3 Prüfverfahren und Eignungsnachweise

Die FLL [2004, 2010] für Baumpflanzungen unterscheidet neben den Voruntersuchungen, die insbesondere vom Auftraggeber zur Feststellung der Standortgegebenheiten durchzuführen sind, folgende Prüfungen zum Nachweis der Eigenschaften der Vegetationstragschichten:

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| • Eignungsprüfungen | des Auftragnehmers/Produzenten |
| • Eigenüberwachungsprüfungen | des Auftragnehmers/Produzenten |
| • Kontrollprüfungen | des Auftraggebers |

Zusätzlich sind in den ZTV-Vegtra-Mü [2008 und 2016] Schiedsuntersuchungen für die Überprüfung von Kontrollprüfungen vorgesehen. In den Hinweisen zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten der FGSV [2006] sind keine Prüfverfahren angegeben. Hier wird Bezug genommen auf die FLL-Vorgaben.

Für die Durchführung von Eignungsprüfungen wird ein umfangreicher Prüfumfang empfohlen, während für Eigenüberwachungsprüfungen und Kontrollprüfungen der Untersuchungsumfang eingeschränkt werden kann. Es werden bodenphysikalische und bodenchemische Untersuchungen vorgegeben, die nachfolgendem Ablauf (Bild 20) zu bestimmen sind:

Die anzuwendenden Prüfverfahren für Vegetationstragschichtgemische für Baumpflanzungen werden hier ebenfalls aufgeführt.

Soweit mehrere Prüfverfahren für die Prüfung angegeben sind, können diese gemäß den Regelwerken alternativ für den Nachweis genutzt werden. Es werden Prüfungen unterschieden, die vor dem Einbau, im Labor und nach dem Einbau und im Feldversuch durchgeführt werden.

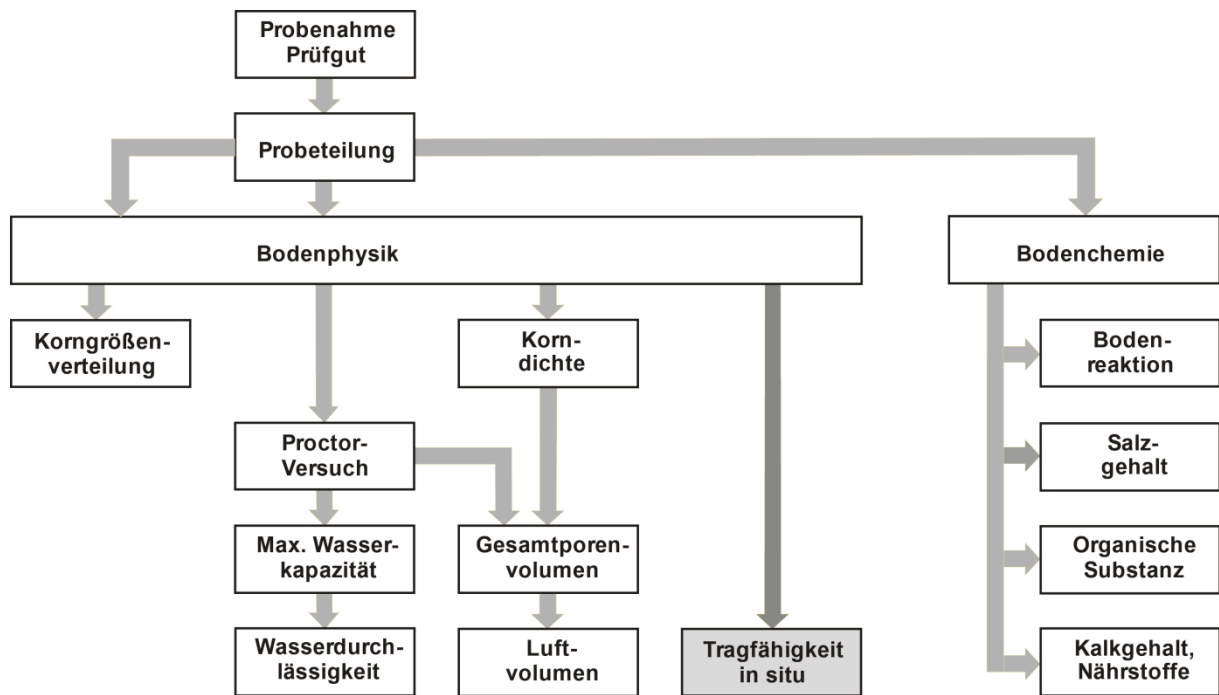


Bild 14: Untersuchungsparameter für den Eignungsnachweis von Vegetationstragschichten für Straßenbäume nach FLL und ZTV-Vegtra-Mü

Der Nachweis der Tragfähigkeit kann gemäß den Regelwerken nur getrennt von der Eignungsprüfung und nach dem Einbau im Rahmen der Eigenüberwachungsprüfung durchgeführt werden. Das bedeutet, dass in der Praxis für beide Nachweise (vegetationstechnische Eigenschaften/Tragfähigkeit) meist getrennte Prüfzeugnisse vorliegen. Ein direkter Schluss auf das so geprüfte Material ist hierbei nicht zweifelsfrei möglich. Damit ist der Nachweis der Tragfähigkeit nach FLL [2004] des Substrats lediglich im Feldversuch und ‚bei Bedarf‘ möglich. Analog verhält sich hier die Prüfungsanforderung nach FLL hinsichtlich des Verdichtungsgrades. Bei Kontrollprüfungen wird lediglich die Prüfung des Verdichtungsgrades oder des Verformungsmoduls empfohlen. Die FLL [2010] geben hinsichtlich der Prüfparameter in der Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfung keine Empfehlung für einen eingeschränkten Prüfumfang mehr vor. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass für den Bereich der Baumsubstrate die anzuwendenden Prüfverfahren in den Regelwerken aufeinander abgestimmt werden sollten.

Kurzbeschreibungen der für diese Arbeit wesentlichen Prüfverfahren sind in der Anlage 31 aufgeführt und diskutiert.

2.4 Anforderungen aus dem Erdbau und Regressionen der Verfahren

Gemäß DIN 18196 [2006] Bodenklassifizierung für bautechnische Zwecke sind Baumsubstrate nach FLL [2004 und 2010], FGSV [2006], HEIDGER [2006b] und ZTV-Vegtra-Mü [2008, 2016] den ‚gemischtkörnigen Böden‘ zuzuordnen und können in folgende Bodengruppen eingeordnet werden:

- Pflanzgrubenbauweise 1 (nicht überbaubar): GU, SU, GU*, SU*
(Kies-Schluff-Gemische)
- Pflanzgrubenbauweise 2 (überbaubar): GU, SU
(Sand-Schluff-Gemische)

Für die Einstufung in die Bodengruppe G oder S ist der Kornanteil ≤ 2 mm entscheidend. Bis 60 % ist die Bodengruppe G maßgebend, darüber hinaus die Bodengruppe S. Liegt der Anteil der Kornfraktion von 0,063 mm bei 5 – 15 %, ergibt sich die Bodengruppe GU oder SU. Liegt der Anteil über 15 – 40 %, ergibt sich die Zuordnung zu einem GU* oder SU* für nicht überbaubare Baumsubstrate.

Hinsichtlich der Klassifikation der Bodengruppen nach der Frostempfindlichkeit ergibt sich folgende Zuordnung gemäß ZTV E [2009]:

- F 2: gering bis mittel frostempfindlich für die Bodengruppe GU, SU
- F 3: sehr frostempfindlich für die Bodengruppe GU*, SU*

Gemäß ZTV E [2009] ist der Unterbau von Straßen und Wegen so zu verdichten, dass folgende Anforderungen an das 10 %-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad nach Proctor erreicht werden:

- Bodengruppe GU, SU: 98 %
- Bodengruppe GU*, SU*: 97 %

Für den Nachweis eines ausreichenden Verdichtungsgrades können gemäß ZTV E [2009] auch für gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil kleiner 15 M.-% folgende indirekte Bestimmungsverfahren genutzt werden:

- Statischer Plattendruckversuch nach DIN 18134 [2012]
- Dynamischer Plattendruckversuch nach TP Boden, EVD, [2003]

Der Zusammenhang der Regression zum Verdichtungsgrad zwischen den Verfahren ist durch Kalibrierversuche festzustellen.

Für den Einsatz des CBR-Versuchs und des Dynamischen Lastplattendruckversuchs bei Baumpflanzungen kann damit auch auf vorliegende Erfahrungen des Erd- und Straßenbaus zurückgegriffen werden. Mit diesen Verfahren stehen in der Praxis erprobte Verfahren zur Verfügung, die auf einfache Weise im Labor sowie auf den kleinen Flächen der Baumpflanzungen ausgeführt werden können und im Erd- und Straßenbau anerkannt sind.

Dazu können vorliegende Regressionen zu Ergebnissen des statischen Lastplattendruckversuchs genutzt werden. WEINGART [1998] ermittelt folgende Regressionen (siehe auch Bild 15):

Beziehung zwischen CBR und E_{v2} :

$$E_{v2} = 6 \times CBR^{0,85}$$

Beziehung zwischen E_{vd} und E_{v2} :

$$E_{vd} = 300 \times \left(1 - e^{-\frac{E_{v2}}{600}}\right)$$

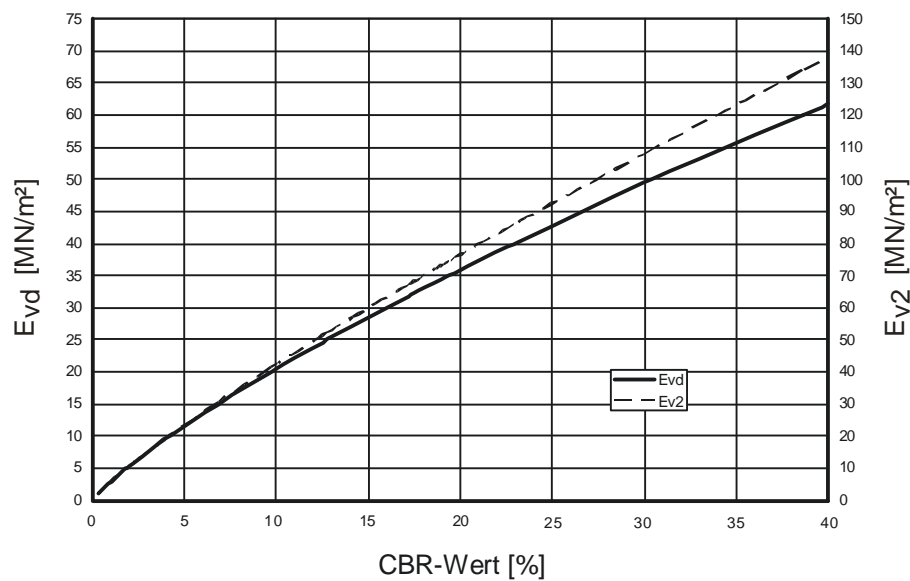


Bild 15: Regression des statischen und dynamischen Lastplattendruckversuchs nach WEINGART [1998]

Für einen E_{v2} -Anforderungswert von 45 MN/m² ergeben sich rechnerisch nach WEINGART [1998]:

$$E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2 \approx E_{vd} = 21,7 \text{ MN/m}^2 \approx \text{CBR} = 10,7 \%$$

2.5 Fotooptische Analyseverfahren

Mittels fotooptischer computergestützter Analysemethoden kann heute auf einfache Weise eine Korngrößen- und Kornformanalyse von unterschiedlichsten Partikeln durchgeführt werden. Ausführlich werden diese Verfahren im Vergleich zu konventionellen Prüfmethode von STARK [2003] (Bild 16) beschrieben.

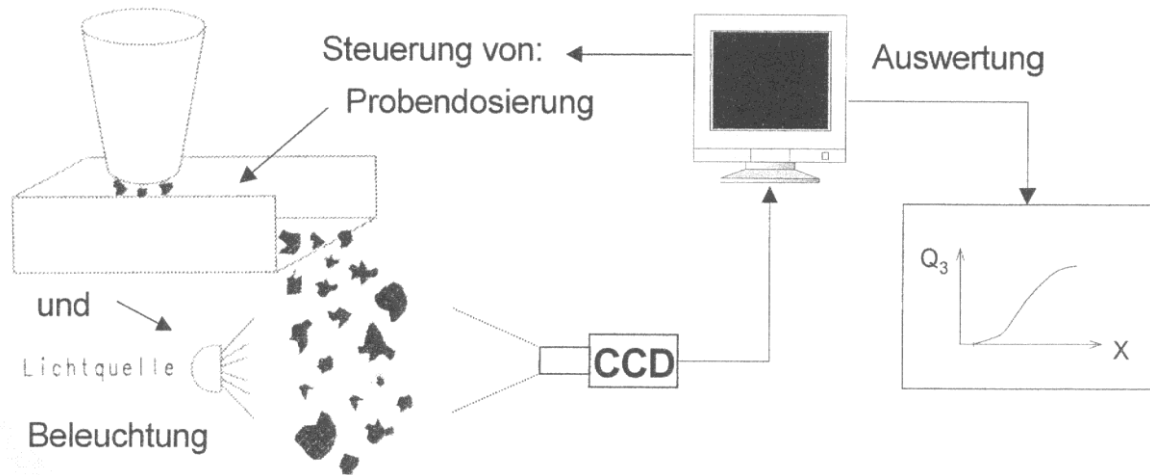


Bild 16: Schematischer Aufbau eines bildverarbeitenden Partikelanalysegerätes [STARK, 2003]

Das fotooptische Partikelmessgerät der Bauhaus-Universität Weimar von Haver & Boecker, Haver CPA 4' ist in [HAVER, 2017] beschrieben. Mit dem CPA 4 von Haver können Kornformanalysen von 0,063 bis 100 mm in zwei Messbereichen bestimmt werden. Neben der Korngrößenanalyse können die Kornformverteilung mit Bestimmung z.B. der Kornformparameter Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis sowie Rauigkeit durchgeführt werden.

Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis, Rauigkeit

Genormte Methoden zur Kornformbestimmung, wie der [DIN EN 933-3, DIN EN 933-4, 2008] von groben Gesteinskörnungen, bestimmen die Plattigkeitskennzahl mit Hilfe von Stabsieben oder die Kornformkennzahl SI (Shape-Index, Verhältnis Dicke zu Dicke größer als 3:1) mit der Kornformschieblehre nur sehr grob. Fotooptische computergestützter Analyseverfahren ermöglichen ins Detail gehende Auswertungen bezüglich der Korngröße, der Kornform und der Oberflächenrauigkeit.

Durch eine ausreichend große Partikelanzahl für die Messung können gewisse Informationsverluste durch die Auswertung der Schattenprojektion (Reduzierung der 3-D-Realität auf ein reines 2-D-Problem) ausgeglichen werden.

Dabei sind Sphärizität und Länge-Breite-Verhältnis wie folgt definiert (Bild 17):

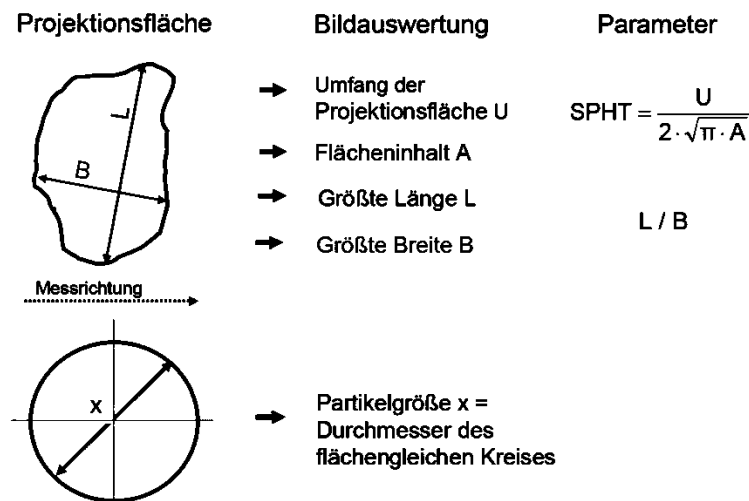


Bild 17: Definition der Kornformparameter für grobe Körner [STARK, 2003]

2.6 Aufbereitung von Mauerwerksbauschutt zur Gewinnung poröser Gesteinskörnungen

Bei der Aufbereitung von Ziegel und Ziegelmauerwerk sind grundsätzlich die Aufbereitung von Rückständen des Produktionsprozesses und die Aufbereitung von abgebrochenem bzw. rückgebautem Ziegelmauerwerk zu unterscheiden. Ungebrannte Rohmischungen, die während der Produktion anfallen, werden unmittelbar wieder in dem Herstellungsprozess von Ziegelbaustoffen zugeführt. Gebrannte sortenreine Produktionsrückstände bzw. Ausschussware wird vielfach im Werk z. B. für Werkstraßen eingesetzt oder an externe Baustoffhersteller abgegeben, die daraus Baustoffe, u. a. für die Dachbegrünung, den Sportplatzbau („Tennenbaustoffe“), oder auch Baumsubstrate herstellen. Darüber hinaus sind analog Tondachziegel entsprechend zu unterscheiden.

Rückgebautes Ziegelmauerwerk und Tondachziegel werden heute überwiegend in Recyclinganlagen getrennt oder im Gemisch mit weiteren mineralischen Ausgangsstoffen, z.B. Beton oder Naturstein, aufbereitet. Hierbei stellt der Ziegel einen Ausgangsstoff für mineralische Recycling-Produkte dar. [MÜLLER, 2018]

Die stoffliche Zusammensetzung der Ausgangsstoffe hängt im Wesentlichen davon ab, welche Bauweisen und Baustoffe verwendet werden, mit welchen Abbruchgeräten Abriss bzw. Rückbau durchgeführt und wie sorgfältig die abgebrochenen Baustoffe auf der Baustelle in einzelne Stoffgruppen (vor-) separiert werden.

Neben der ursprünglichen stofflichen Zusammensetzung ist für die Qualität der hergestellten Recycling-Baustoffe die eingesetzte Verfahrenstechnik entscheidend. Für die Aufbereitung mineralischer Baureststoffe werden mobile, semimobile und stationäre Aufbereitungsanlagen eingesetzt. Die Komplexität der Aufbereitungsverfahrensweise ist bei stationären Anlagen am größten.

Mobile Anlagen werden eingesetzt, wenn bei größeren Abbruchmaßnahmen für einen begrenzten Zeitraum auf der Baumaßnahme die Möglichkeit besteht, eine Anlage vor Ort aufzustellen und die entstehenden Materialien zu verwenden. Ein einfaches Aufbereitungsschema ist in Bild 18 dargestellt.

Es handelt sich hierbei um eine einstufige Verfahrensweise. Das (vorzerkleinerte) Rohmaterial wird in den Aufgabebunker per Radlader oder Schaufelbagger aufgegeben und dem Prall- oder Backenbrecher zugeführt. Ein Überbandmagnet entfernt Eisen- und Schrottanteile. Danach erfolgt eine Überkornabsiebung, die das Größtkorn des hergestellten Produktes entsprechend begrenzt. Im Beispiel erfolgt die Überkornabsiebung bei 45 mm. Das Material 45/X mm kann entweder aufgehaldet oder dem Brecher wieder zugeführt werden. Das Produkt 0/45 mm kann ebenfalls bis zur Verarbeitung zwischengelagert werden.

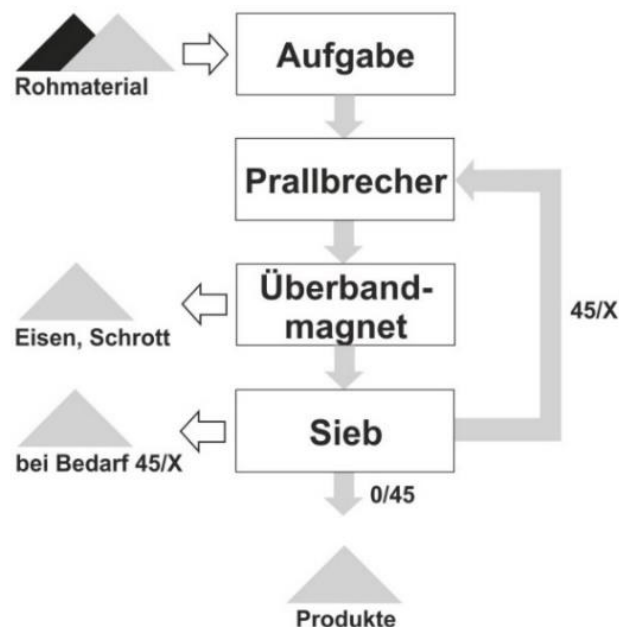


Bild 18: Einfaches mobiles Verfahrenskonzept für die Aufbereitung von Recycling-Baustoffen [in Anlehnung an KOHLER, 1997 und Bundesverband, 2000]

Andere mobile Verfahrenskonzepte enthalten auch die Möglichkeit der Vorabsiebung oder des Einsatzes eines Windsichters für die Sortierung. Auf eine Überkornabsiebung kann je nach Verwendungszweck des Produktes auch verzichtet werden.

Ein Beispiel für eine einstufige stationäre Aufbereitungsanlage ist in Bild 19 dargestellt. Daneben gibt es in geringerem Umfang auch zweistufige (Vor- und Nachbrecher) Aufbereitungsanlagen.

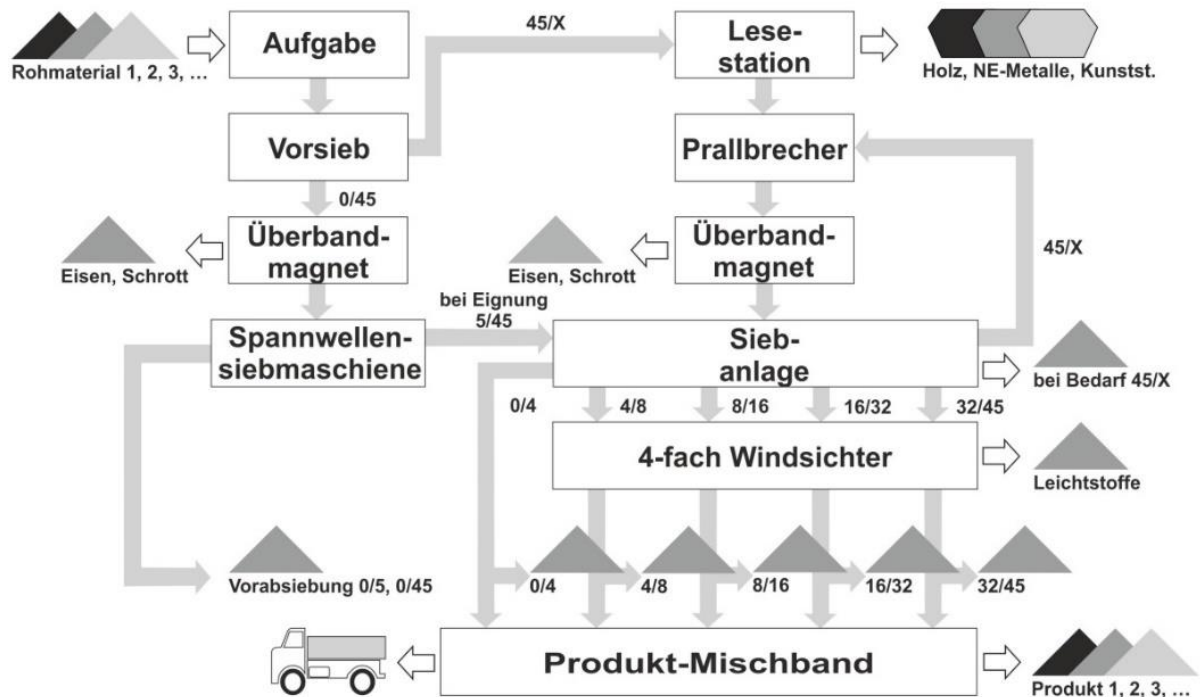


Bild 19: Beispiel für ein einstufiges stationäres Verfahrenskonzept einer Bauschuttauflaufbereitungsanlage [in Anlehnung an KOHLER, 1997 und Bundesverband, 2000]

Diese Anlagen werden mit einem Lager zur Bevorratung der Input- wie Output-Materialströme fest errichtet und erlauben die Herstellung diverser Körnungen und Korngemische. Stationäre Verfahrensweisen verfügen über eine Vorabsiebung. Über das Vorsieb können feinkörnige Bestandteile vom zu brechendem Gut (z. B. 0/45 oder 0/60 mm) abgetrennt werden. Dies entlastet den Brecher. So werden beim Ziegelmauerwerk aber tendenziell auch größere Mörtel- und Putzanteile abgetrennt. Spannwellensiebmaschinen werden eingesetzt zum weiteren Auftrennen des Vorabsiebungsmaterials, z.B. in die Körnungen 0/5 und 5/45. Der gröbere Anteil der Vorabsiebung kann dem Verfahrensfluss bei Materialeignung nach dem Brecher wieder zugeführt oder getrennt aufgehaldet und verwendet werden. Eisen- und Schrottanteile werden an verschiedenen Stellen bei Verfahrenskonzepten für stationäre Anlagen per Magnet abgetrennt. Über Lesebänder können per Klaubung grobe Störstoffe, wie Holz, Papier und Pappe und Kunststoffe, entfernt und getrennt verwertet werden. Nach dem Brechprozess wird der Mineralstrom in mehrere Körnungen per Siebanlage aufgetrennt. Splitt- und Schotteranteile können in Einzelkörnungen nun dem Windsichter zugeführt werden. Der Windsichter entfernt per Aero-Sortierung aus dem Mineralstrom kleinere, leichtere Partikel an Holz, Papier, Pappe, Kunststoffen, Porenbeton usw. Die so gereinigten Mineralkörnungen können danach getrennt aufgehaldet und verwendet oder auch zu Mineralstoffgemischen wieder zusammengeführt werden. Stationäre Anlagenkonzepte werden für Anlagenleistungen bis zu ca. 300 t/h ausgelegt.

2.7 Die Aufbereitung von Böden und Substraten

Die Aufbereitung von Böden ist im Wesentlichen abhängig vom Aufbereitungsziel, der Bodenart und dessen Feuchtigkeitsgehalt. Überwiegend sandige oder gemischtkörnige kiesige Bodenmassen lassen sich mit Hilfe eines Siebprozesses per Trommelrost oder Mehrdecksiebmaschine von Überkorn und Störstoffen, z.B. Bauschuttanteilen, befreien oder auch in mehrere Kornfraktionen sortieren. Eine Aufbereitung von tonigen oder lehmigen Bodenarten ist mit dieser Methode in der Regel nicht möglich, da sich die Siebmaschen leicht zusetzen. Für die Verwendung von Boden für Substrate werden daher oftmals nur die Bodenklassen 2, 4, 5 und ggf. 6 nach DIN 18115 [2002] (Tabelle 7) entsprechend aufbereitet und verwendet.

Tabelle 7: Auszug geeigneter Bodenarten für Vegetationstragschichten nach DIN 18915 [2002]

Boden- gruppe	Benennung	Boden, aus z.B.	Bearbeitbarkeit ohne Gefügestörung	Körnung Massenanteile in %		Größtkorn- durch- messer d
				d < 0,02 mm	d >20 mm	
2	nichtbindiger Boden	Sand	keine Einschränkungen	≤ 10	≤ 10	50
4	schwachbindiger Boden	anlehmigem Sand, Sandlöss, Löss	erst nach oberflächlicher Abtrocknung bei mindestens steifer Konsistenz ($U_c \geq 0,75$)	über 10 bis 20	≤ 10	50
5	schwachbindiger, steiniger Boden	lehmigem Kies und Schotter	wie Bodengruppe 4	über 10 bis 20	über 10 bis 30	200
6	bindiger Boden	lehmigem Sand, sandigem Lehm	erst nach oberflächlicher Abtrocknung bei mindestens halbfester Konsistenz ($U_c \geq 1,0$)	über 20 bis 40	≤ 10	50

Substrate werden dabei heute oftmals als sogenannte Radladermischung aufbereitet. Hierzu werden die einzelnen Bestandteile der Substrate voluminös oder gewichtsmäßig als Charge durch mehrmaliges Überkopfmischen auf einer geeigneten Fläche gemischt.

Stationäre Mischanlagen für Substrate verfügen über eine Lagerhaltung für die verschiedenen Mischungskomponenten. Gesteinskörnungen, Boden, Organische Komponenten, wie z.B. Kompost, Bodenhilfsstoffe, werden per Doseur aufgegeben und im Zwangsmischer unter Zugabe von ggf. Wasser gemischt. Eventuell wird noch eine Überkornabsiebung dem Mischprozeß nachgeschaltet, um Verklumpungen oder andere größere Bestandteile aus dem Fertigsubstrat zu entfernen. Die fertig gemischten Substrate werden sofort verladen oder gelangen in eine Lagerbox oder

auf eine Lagerhalde. Dabei ist die Lagerung unter freiem Himmel kritisch, da zu große Regenspenden z.B. Baumsubstrate vernässen können und so zumindest temporär uneinbaubar machen.

2.8 Leichte Gesteinskörnungen für Beton

Die Verwendung poröser Gesteinskörnungen ist auch als leichte Gesteinskörnung für Beton bekannt und für verschiedenartige Betone genormt. Mithilfe der Stoffraumrechnung kann das Leichtbetonkonzept schon im Vorfeld, z.B. als Drei-Stoff-System ‚Leichte Gesteinskörnung – Zement – Wasser‘, berechnet werden. Dabei fließen in die Mischungsberechnung für konstruktiven Leichtbeton folgende Besonderheiten in die Berechnung gemäß THIENEL [2010] mit ein:

- Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung
- unterschiedliche Korndichte der leichten Gesteinskörnung
- Abhängigkeit der Betonfestigkeit von der Korndichte.

Deshalb weicht der Gang der Mischungsberechnung für Leichtbeton vom Berechnungsgang für Normalbeton auch in einigen Punkten ab. Er gliedert sich daher nach [THIENEL, 2010] wie folgt:

1. Festlegen der leichten groben Gesteinskörnung $< 2 \text{ mm}$, um die avisierte Betonfestigkeit zu erreichen. Dabei können sich die Rohdichten der feinen und groben Gesteinskörnung deutlich voneinander unterscheiden.
2. Wahl des Zementgehaltes bzw. des Bindemittelgehaltes in Abhängigkeit von der geforderten Expositionsklasse.
3. Festlegung der Zugabewassermenge nach wirksamem Wasser für den w/z -Wert und dem Zugabewasser für die leichte Gesteinskörnung. Hierbei müssen das Saugwasser der leichten Gesteinskörnung sowie die Eigenfeuchte berücksichtigt werden.
4. Anteil der Verdichtungsporen. Leichtbetone mit Natursand können tendenziell besser bei der Verdichtung entlüftet werden im Vergleich zur Verwendung von Leichtsanden.
5. Wahl des Sandanteils zur Festlegung des Mörtelgehaltes. Mit Natursand ist die Trockenrohdichte des Leichtbetons höher als bei der Verwendung von Leichtsanden.
6. Bestimmung der voraussichtlichen Trockenrohdichte des Leichtbetons. Sie kann abgeschätzt werden, indem unterstellt wird, dass der Zement bei der Hydratation Wasser zu ca. 20 M.-% seines Gewichts chemisch bindet und damit keine vollständige Hydratation eingeht.

7. Kontrolle der Ergiebigkeit. Der Mischungsentwurf wird im Rahmen der Eignungsprüfung mit der Berechnung verglichen.
8. Mischen. Dabei sollten die leichten Gesteinskörnungen grundsätzlich volumetrisch dosiert werden.
9. Verarbeitbarkeit. Die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung beeinflusst die Verarbeitungszeit.
10. Einbau. Heute kann Leichtbeton mit begrenzt vorgehängter leichter Gesteinskörnung auch gepumpt werden.
11. Verdichten. Die Verdichtungsfrequenz mit Außenrüttlern ist geringer als bei Normalbeton.
12. Nachbehandlung. Auch der Leichtbeton bedarf – trotz gespeicherten Wassers in der leichten Gesteinskörnung für eine gute innere Nachbehandlung – einer sorgfältigen Nachbehandlung.

Man unterscheidet bei Leichtbeton gefügedichten (geschlossenes Gefüge wie bei Normalbeton) von haufwerksporigem (Einkornbeton mit Haufwerksporen) Leichtbeton. Die Druckfestigkeit und Rohdichte des Betons wird hierbei entscheidend von der eingesetzten Gesteinskornart und der Betonzusammensetzung bestimmt.

Gefügedichter Leichtbeton erhält seine Porosität durch die Poren der eingesetzten leichten Gesteinskörnung. Neben der Porosität ist eine weitere relevante Größe die Permeabilität. Unter Permeabilität ist allgemein die Durchgängigkeit einer porösen Struktur für Wasser und Gase, wie z.B. auch Luft, definiert und muss daher gesondert beachtet werden. Die schematische Unterscheidung zwischen porösen und permeablen Porensystemen ist in Bild 20 veranschaulicht.

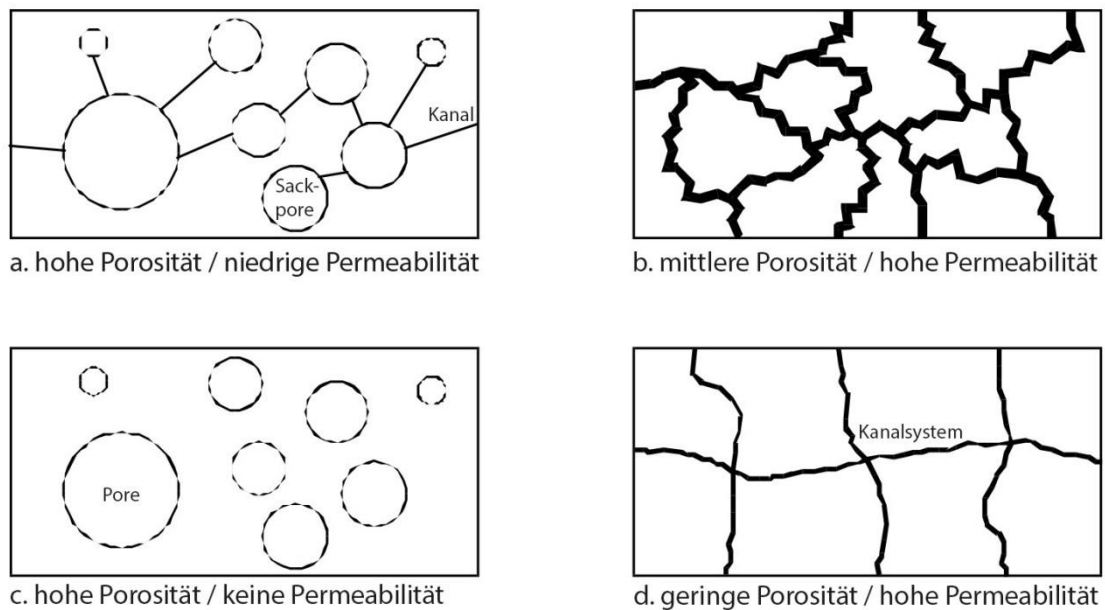


Bild 20: Porosität und Permeabilität von leichten Gesteinskörnungen für Beton (Beschriftung ergänzt) [EuroLighCon, 1998]

Die Kornrohdbereiche leichter und normaler Gesteinskörnung werden von FAUST [2003] (Tabelle 8) wie folgt angegeben. Da Normalbeton ab einer Kornrohdbichte von $2,000 \text{ g/cm}^3$ definiert ist, können in der folgenden Tabelle nur Lava $\geq 2,000 \text{ g/cm}^3$ und Kies und Splitt aus Naturstein das Normalbetonkriterium erfüllen. Alle anderen aufgeführten Materialien sind daher den leichten Gesteinskörnungen zuzuordnen. Alle aufgeführten Materialien können auch für Baumschubstrat/Vegetationstragschichten in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften verwendet werden.

Tabelle 8: Kornrohdbereiche leichter und normaler Gesteinskörnungen [Vgl. FAUST, 2003]

Gesteinskörnung	Kornrohdbereich [g/cm^3]	
	von	bis
Vermiculit	0,120	0,370
Perlit	0,100	0,400
Blähglas	0,280	0,650
Naturbims	0,550	1,300
Blähschiefer	0,950	1,600
Blähton	0,520	1,720
Kesselsand	1,350	1,850
Gesinterte Steinkohlenflugasche	1,300	1,800
Tuff, Lava	1,200	2,300
Kies, Splitt	2,400	3,000

2.9 Packungsdichte

2.9.1 Allgemeines

Die Packungsdichte hat in vielen bautechnischen Fachdisziplinen eine große Bedeutung. Baustoffe, wie z.B. Asphalt und Beton, nutzen das ‚betontechnische Prinzip‘ der Hohlraumausfüllung. Dabei geht es hier um die Erzielung einer möglichst hohen Packungsdichte, die gewünscht ist, um eine möglichst hohe Rohdichte und geringe Porosität und damit hohe Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften zu erzielen. Beim betontechnischen Prinzip werden gezielt feinere Partikel genutzt, um die Hohlräume des gröberen Stützkorngerüsts auszufüllen. Die Grundlagen hierzu werden bereits von FULLER und THOMSON [1907] beschrieben. Eine Vertiefung dieser Erkenntnisse erfolgt z.B. in den Arbeiten von FURNAS [1928] und ANDREASEN und ANDERSON [1930].

In der Betontechnologie wird die Packungsdichteberechnung genutzt, um z.B. Beton mit höherer Festigkeit und in selbstverdichtender Form zu entwickeln. Hierbei steht die Optimierung des Feinkornanteils der Korngrößenverteilung im Mittelpunkt der Entwicklung. RESCHKE und SIEBEL [1999, 2000] und RESCHKE [2000] weisen nach, dass eine höhere Rohdichte und eine Erhöhung der Festigkeiten der Betone durch Optimierung des Feinkornbereichs erreicht wird. Selbstverdichtende Betone (SVB), die sich beim Einbau ohne äußere Energiezufuhr verdichten und hochfeste sowie ultrahochfeste Betone (UHPC) werden mit Hilfe der Packungsdichteberechnung in den letzten Jahren in der Betontechnologie weiterentwickelt. DE LARRARD [1986] und DE LARRARD und SEDRAN [1994] führen auf, dass die Steigerung der Packungsdichte u.a. die festigkeitsreduzierenden Hohlraumanteile reduziert.

EDEN [2010] nutzt die Erkenntnisse zur Packungsdichteoptimierung aus der Betontechnologie für deren Anwendung in der Kalksandsteintechnologie. Bei dieser Fortentwicklung in einem neuen Technologiefeld kann mit Hilfe des Rechenmodells die Erhöhung der Scherbenrohichte von Kalksandsteinen vorbestimmt werden. Damit gelingt die Optimierung der Rezepte zur Kalksandsteinproduktion und der Korngrößenverteilung mittels Packungsdichteberechnung auf einfache Weise. Die Berechnungen haben analog zur Betontechnologie das Ziel, mit der Erhöhung der Rohdichte einen Anstieg der Festigkeit und der Dauerhaftigkeit bei der Kalksandsteinproduktion zu erreichen. Durch den günstigeren Kornaufbau der verwendeten Gesteinskörnungen werden insbesondere die Rohlingsstandfestigkeit, die Steindruckfestigkeit, die Steinrohichte und die Frostwiderstandsfestigkeit von Kalksandsteinen verbessert. Die Packungsdichteberechnungen bilden zur Optimierung der Kalksandstein-Rezeptur die Grundlage für einen deutlich reduzierten Laboraufwand. [EDEN, 2010]

EDEN vergleicht bei dieser Entwicklung auch die Übertragung der Ergebnisse für weiche bis fließfähige Betone aus der Betontechnologie auf die steife bis erdfeuchte Konsistenz von Kalk-Sand-Rohmassen bei der Produktion von Kalksandsteinen. Die Packungsdichteberechnung ist somit auch im Bereich erdfeuchter Kalksandstein-Rohmassen anwendbar.

Die Berechnung der Packungsdichte der Arbeiten von RESCHKE, SIEBEL [1999, 2000] und EDEN [2010] gehen dabei auf das Berechnungsverfahren von SCHWANDA [1956] zurück.

Allgemein ist die Packungsdichte Φ definiert als das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen eines betrachteten Raumes [RESCHKE, SIEBEL, 1999]:

$$\Phi = \frac{F_v}{R_v}$$

mit:

Φ	Packungsdichte in Vol.-%
F_v	Volumen des Feststoffs in Vol.-%
R_v	Volumen des betrachteten Raumes in Vol.-%

Die Porosität ε und die Packungsdichte Φ stehen wie folgt funktional miteinander in Beziehung:

$$\varepsilon = 1 - \Phi$$

mit:

ε	Porosität in Vol.-%
Φ	Packungsdichte in Vol.-%

In Anlage 32 sind weitere theoretische Grundlagen zur Packungsdichteberechnung, die für die Ableitung der Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit zum Verständnis beitragen, kurz zusammengefasst:

- Kugelpackungen
 - Kugeleinkornpackungen
 - Kugel-Zweikornpackungen (Binärpackungen)
 - Kugel-Mehrkornpackungen
 - Apollonische Packungen
- Packungsdichte bei realen Kornformen
 - Hohlraum und Reichweite zur Teilchenbehinderung
 - Koordinationszahl
 - Kornform und Packungsdichte

2.9.2 Bedeutung der Packungsdichterechnung für die Vegetationstechnik

Im Bereich der Vegetationstechnik wird die Packungsdichteberechnung zur Optimierung von Vegetationssubstraten wie überbaubare Baumsubstrate noch nicht angewendet.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Packungsdichteberechnungen nur für Substrate durchgeführt werden können, die (nahezu) keine quellfähigen Bestandteile enthalten. Ansonsten könnte ein Wasserzutritt eine Quellung verursachen und so eine ausreichend genaue Berechnung der Packungsdichte verhindern. Bekannte quellfähige Bestandteile in der Vegetationstechnik können Tone sein. Auch bindige Böden können quellfähige Tone enthalten.

Überbaubare Baumsubstrate weisen überwiegend mineralische Gesteinskörnungen als Ausgangsstoffe auf. Der mögliche Anteil an Ton und Schluff ist auf 5 bis 15 M.-% [FGSV, 2006 und FLL, 2010] begrenzt. Die Vorgaben für den Wasser- und Lufthaushalt der Substrate und auch der Standfestigkeit grenzen den möglichen Tonanteil insbesondere für überbaubare Baumsubstrate weiterhin auf einen geringen Anteil ein.

Die Packungsdichteberechnung sollte daher in der Vegetationstechnik überall dort begrenzt anwendbar sein, bei denen die zuvor genannten Randbedingungen eingehalten sind, wie für:

- sandige, kiesige und gemischtkörnige Böden
- vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen
- Rasensubstrate
- Schotterrasen
- Dachgartensubstrate
- nicht überbaubare und überbaubare Baumsubstrate

Aufgrund der überwiegend mineralischen Ausgangsstoffe solcher Baustoffe mit realen Kornformen kommen nur weiterentwickelte Rechenverfahren in Betracht, die eine Teilchenbehinderung berücksichtigen.

Diese verschiedenen Vegetationsbaustoffe haben neben den vegetationstechnischen Anforderungen auch bautechnische Anforderungen zu erfüllen. Die Optimierung von Vegetationssubstraten erfolgt heute noch immer empirisch. Der Einsatz der Packungsdichteberechnung kann in diesen Fällen den notwendigen Laboraufwand zur Optimierung der Baustoffe mit hohen technischen Anforderungen deutlich reduzieren. Gleichzeitig könnte mit Hilfe der Packungsdichteberechnung das Qualitätsniveau der Baustoffe verbessert werden.

Im direkten Vergleich zur Zielstellung in anderen technischen Bereichen wie der Betonindustrie geht es bei der Optimierung von Vegetationssubstraten nicht um die maximale Erhöhung der Packungsdichte, sondern darum, eine Mischung oder einen Bereich zu finden, in denen die vegetationstechnischen auf die bautechnischen Eigenschaften und ggf. weiterer Zielparameter bestmöglich aufeinander abgestimmt sind. So soll eine definierte Porosität zur Durchwurzelbarkeit erzeugt werden, um Pflanzen mit Wasser, Luft und Nährstoffen in bautechnisch verdichteten Umgebungen besser zu versorgen.

3 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in drei Teilabschnitte:

- Untersuchung von handelsüblichen überbaubaren Baumsubstraten
- Aufbereitung und Untersuchung von unterschiedlichen porösen Ziegelmaterialeien für den Substrateinsatz im Technikum der Bauhaus-Universität Weimar
- Berechnungen zur Packungsdichte an Baumsubstraten

Damit soll zunächst der Eigenschaftsbereich von praxisüblichen Baumsubstraten festgestellt werden, um Optimierungspotentiale für überbaubare Baumsubstrate ableiten zu können. Weiterhin werden unterschiedliche Ziegelmaterialeien aufbereitet und untersucht, um die Möglichkeiten des Einsatzes in Vegetationssubstrate abzuleiten. An den Baumsubstraten und Ziegel-Gesteinskörnungen der Technikumsversuche werden fotooptische Untersuchungen mit dem HAVER CPA 4 der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt.

3.1 Überbaubare Baumsubstrate

Um einen Überblick über die Leistungsfähigkeit und die gebräuchlichen stofflichen Bestandteile von überbaubaren Baumsubstraten von verschiedenen Substrat-Herstellern und aus unterschiedlichen Regionen Deutschlands aus der Praxis zu ermitteln, werden insgesamt 19 verschiedene Substrate (Bezeichnung: BS 1 bis BS 19, Tabelle 9) hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften im Labor sowie eingeschränkt auch in Trogversuchen (BS 1 bis BS 17) untersucht. Die ausgewählten Substrate entsprechen dabei der Bandbreite der praxisüblichen technischen Eigenschaften des Marktes.

Die stofflichen Hauptbestandteile der untersuchten Substrate sind:

- Boden/Kies/Sand
- Naturstein
- Ziegel
- Lava
- Bims
- Rostasche
- Kompost

Die verschiedenen Substrate BS 1 bis BS 17 sind als Kleinmenge – jeweils ein Big Bag mit ca. 0,8 bis 1,5 t Menge – von den unterschiedlichen Produzenten handelsüblich eingekauft. Von BS 18 und BS 19 steht eine Probemenge von ca. 200 kg zur Verfügung, sodass an diesen Substraten nicht alle Untersuchungen erfolgen.

Tabelle 9: Überblick über die untersuchten Substrate und charakteristische stoffliche Hauptbestandteile der untersuchten überbaubaren Baumsubstrate

Nr.	Bezeichnung	Charakteristische stoffliche Hauptbestandteile	Stoffliche Hauptbestandteile	
			> 2mm	≤ 2 mm
BS 1	Baumsubstrat 1	Naturstein	Kies, Lava	Natursand
BS 2	Baumsubstrat 2		Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand
BS 3	Baumsubstrat 3	Ziegel	Ziegel	Ziegel
BS 4	Baumsubstrat 4		Ziegel	Ziegel, Natursand
BS 5	Baumsubstrat 5		Ziegel	Ziegel, Natursand
BS 6	Baumsubstrat 6		Ziegel	Ziegel
BS 7	Baumsubstrat 7		Ziegel, Lava	Ziegel
BS 8	Baumsubstrat 8		Ziegel, Naturstein	Natursand
BS 9	Baumsubstrat 9	Lava	Lava	Bims, Lava
BS 10	Baumsubstrat 10		Lava	Bims, Lava
BS 11	Baumsubstrat 11		Lava	Natursand
BS 12	Baumsubstrat 12	Rostasche	Rostasche	Rostasche
BS 13	Baumsubstrat 13	Gemische	Ziegel, Rostasche	Ziegel
BS 14	Baumsubstrat 14		Ziegel, Rostasche	Natursand
BS 15	Baumsubstrat 15		Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche
BS 16	Baumsubstrat 16		Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche
BS 17	Baumsubstrat 17		Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel
BS 18	Baumsubstrat 18		Lava, Bims	Natursand, Lava
BS 19	Baumsubstrat 19		Bims, Lava	Bims, Lava

Die überbaubaren Baumsubstrate werden nach dem folgenden Schema (Bild 21) untersucht:

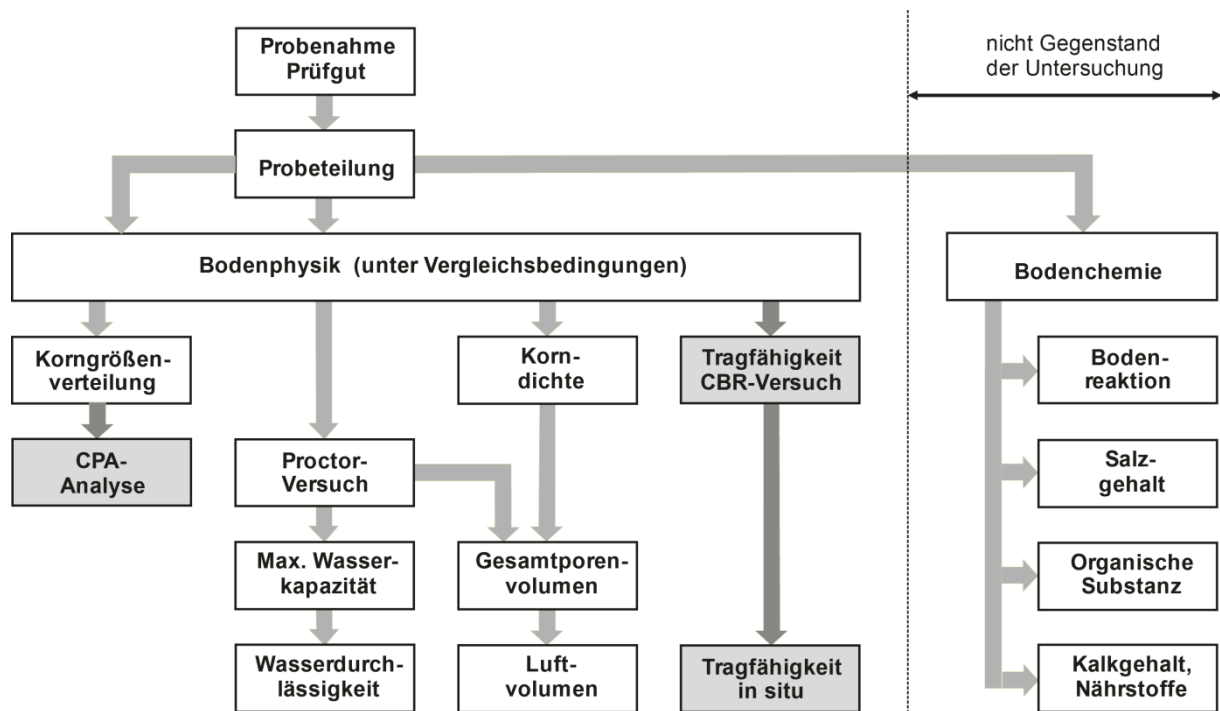


Bild 21: Untersuchungsparameter für den Eignungsnachweis von Vegetationstragschichten für Straßenbäume

Neben den Eigenschaften nach FLL mit zwei Verfahren zur Bestimmung der Kornrohdichte werden erweiternde bautechnische und photooptische Untersuchungen an allen Substraten durchgeführt.

3.1.1 Vegetationstechnische Prüfungen nach FLL

Folgende bodenphysikalischen Eigenschaften werden an allen 19 überbaubaren Baumsubstraten BS 1 bis BS 19 gemäß den FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen [FLL, 2010] untersucht:

- Korngrößenverteilung nach DIN 18123 [1996]
- Wassergehalt nach DIN 18121-1 [1998]
- Proctordichte und optimaler Wassergehalt nach DIN 18127 [1997]
- maximale Wasserkapazität nach normativem Anhang 1 der FLL [2010]
- Wasserdurchlässigkeit nach normativem Anhang 1 der FLL [2010]
- Gesamtporenvolumen nach normativem Anhang 1 der FLL [2010]
- Rohdichte nach DIN EN 1097-6 im ‚Wasserpiknometer‘ [2005]
- Rohdichte nach DIN EN 12350-7 im ‚Luftpiknometer‘ [2000]
- Luftvolumen nach normativem Anhang 1 der FLL [2010]

Zur Bestimmung des Gesamtporenvolumens und des Luftvolumens wird die Rohdichte im ‚Luft- und Wasserpiknometer‘ bestimmt. Diese zwei Verfahren können gemäß FLL-

Empfehlungen von 2004 [FLL, 2004] gleichrangig zur Bestimmung des Wasser- und Lufthaushaltes (siehe Anlage 31) angewendet werden.

3.1.2 Straßenbautechnische Prüfungen

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit der Substrate per Laborprüfverfahren wird der CBR-Versuch gemäß TP BF-StB Teil B 7.1 [TP Boden, CBR, 2009] in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei Verdichtungsgraden von 95 % und 100 % bestimmt.

Anstelle der Bestimmung des Verformungsmoduls nach DIN 18134 [2012] Plattendruckversuch erfolgt die Auswertung mittels Regression von WEINGART [1998] im Vergleich zum statischen Plattendruckversuch.

Die verschiedenen Substrate BS 1 bis BS 17 werden für diesen Zweck in ein 200-Liter-Fass aus Kunststoff mit einem Verdichtungsgrad von 95 % eingebaut, verdichtet und anschließend mit dem dynamischen Plattendruckversuch untersucht.

3.2 Ziegel-Aufbereitungsversuche im Technikum

Insgesamt werden 20 unterschiedliche Ziegel-Ausgangsstoffe verschiedener Provenienzen Deutschlands – 13 aus dem Bereich Mauerziegel und 7 aus dem Bereich Dachziegel – mittels Prall- und Backenbrecher (Nummer Z 1 bis Z 20) im Technikum der Bauhaus-Universität Weimar aufbereitet und analysiert. Die unterschiedlichen Materialien, ihre Bezeichnungen und Versuchsreihen sind in Anlage 3 aufgeführt.

Damit ergeben sich folgende Einflussparameter, die sich auf die bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften der porösen rezyklierten Ziegel-Gesteinskörnungen auswirken:

a. vom Rohstoff Ziegel

- Mauer- oder Dachziegel
- Provenienz
- gebraucht/neu
- Formgebung vor der Aufbereitung
- ggf. Fremdstoffe

b. durch die Verfahrensweise

- Brecherart, Prall- oder Backenbrecher
- Prallbrecher, Schlagleistengeometrie
- Zerkleinerungsverhalten (Kornform, Korngrößenverteilung)

c. für die Substrateigenschaften

- Korngrößenzusammensetzung
- Packungsdichte
- Kornfestigkeit
- Kornform und Rauigkeit
- Kornrohdichte – Porosität und Permeabilität
- Wasseraufnahmevermögen

Die Aufbereitungsversuche gliedern sich in eine Vor- und eine Hauptuntersuchung zur Festlegung der gewählten Umfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers und Spaltbreite des Backenbrechers. Dabei werden die folgenden Ziegelmaterialien jeweils verwendet:

- Mauer- und Dachziegel aus Weimar (Vor- und Hauptuntersuchung)
- Mauer- und Dachziegel verschiedener Provenienzen (Hauptuntersuchung)

3.2.1 Aufbereitungsversuche an Ziegelbaustoffen im Technikum

Im Technikum der Bauhaus-Universität Weimar werden Versuche an verschiedenporigen Ziegelbaustoffen mit dem Prall- und Backenbrecher („Schnell- und Langsamläufer“) durchgeführt, um insbesondere die Rohdichte und die Wasserspeichereigenschaften für die Anwendung in Substraten zu ermitteln.

Der Drehzahlbereich des Prallbrechers kann in einem weiten Bereich von 750 bis 1450 U/min stufenlos variiert werden. In den Vorversuchen werden daher drei Drehzahlbereiche gewählt und entsprechend der Umfangsgeschwindigkeit mit einem Rotordurchmesser von 0,45 m, einschließlich der Schlagleistenbreiten, zugeordnet.

Die gewählten Einstellungen liegen hinsichtlich der Umfangsgeschwindigkeiten im unteren Bereich von Prallbrechern, die üblicherweise mit 20 bis 50 m/s (Tabelle 10) angegeben werden.

Tabelle 10: Gewählte Drehzahl/Umfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers für die Versuche

Drehzahl n [U/min]	Umfangsgeschwindigkeit v [m/s] $v = 2\pi \times r \times n$
750	17,7
1070	25,2
1450	34,2

Bei dem verwendeten Backenbrecher des Technikums Weimar kann die Spaltbreite zwischen der Einstellung ,6 und 13‘ variiert werden. Diese entspricht der maximal einstellbaren Bandbreite des Backenbrechers für seine Spaltbreite am Auslauf (Tabelle 11).

Tabelle 11: Einstellbare Spaltbreite des Backenbrechers

Einstellung	Spaltbreite [cm]	
	offen	geschlossen
6	≈ 5,0	≈ 3,5
9	≈ 4,5	≈ 1,5
13	≈ 2,5	≈ 0,5

3.2.2 Mauer- und Dachziegel von einem Standort

Mit dem Prall- und Backenbrecher des Technikums der Bauhaus-Universität Weimar werden Vorversuche an folgenden Materialproben durchgeführt:

- Mauerziegel Weimar, rot, gebraucht, gemischt – Kurzbezeichnung MZ 3 WEI
- Dachziegel Weimar, rot gemischt, gebraucht, mit Mörtel – Kurzbezeichnung DZ 3 WEI

Das Material wird gewählt, weil es eine durchschnittliche Rohdichte bei den rückgebauten (gebrauchten) Baustoffen aufweist. Bei den Vorversuchen werden die Umfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers und die Spaltbreite des Backenbrechers gemäß Tabelle 10 und 11 variiert, um den Einfluss der Brechereinstellung auf die Korngrößenverteilung zu ermitteln.

3.2.3 Mauer- und Dachziegel verschiedener Provenienzen

An den insgesamt 20 verschiedenen Mauer- und Dachziegelarten (13 MZ- und sieben DZ-Arten) verschiedener Provenienz gemäß Anlage 3 ist mit folgenden Einflussparametern des Rohstoffs Ziegel auf das Zerkleinerungsverhalten im Prall- und Backenbrecher zu rechnen:

- Mauer- oder Dachziegel (Herstellung)
- Provenienz
- gebraucht/neu
- Formgebung vor der Aufbereitung
- Fremdstoffe, wie Putz- und Mörtelanhaftungen

Auf Basis der Voruntersuchung werden beim Prallbrecher die höchste Umlaufgeschwindigkeit und beim Backenbrecher die geringste Spaltweite für die Versuche der Ziegel aus verschiedenen Provenienzen gewählt.

An den zerkleinerten Ziegelproben werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung nach DIN 18123 [1996]
- Die Rohdichte wird nach DIN EN 1097-6 [2005] als ‚Rohdichte, ofentrocken‘ und ‚Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken‘ an den Körnungen 2/4, 4/8, 8/16 und 16/32 mm bei 22 °C Wassertemperatur bestimmt.
- Die Wasseraufnahme wird wie die Rohdichte nach DIN EN 1097-6 [2005] an den Körnungen 2/4, 4/8, 8/16 und 16/32 mm bei 22 °C Wassertemperatur bestimmt.
- Die ‚Reindichte‘, also die Korndichte ohne eingeschlossene Poren, wird an der Körnung 0/0,063 mm mit dem Heliumpyknometer der Bauhaus-Universität Weimar ermittelt. Im direkten Vergleich wird auch die Körnung 0,063/2 mm mit dem Heliumpyknometer überprüft. Generell werden damit jedoch auch eingeschlossene Poren in die Messung miteinbezogen, sodass sich eine Kornrohndichte ergibt.

3.3 Fotooptische Prüfungen

Das fotooptische Partikelmessgerät Haver CPA 4 von Haver & Boecker wird für photooptische Untersuchungen der Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 (siehe Tabelle 9) verwendet.

Für die Messung werden die Baumsubstratproben mittels Nasssiebung in die Kornanteile 0,063/2 mm und > 2 mm aufgetrennt und im getrockneten Zustand der Messung zugeführt. Das CPA-Messgerät verfügt dazu über zwei getrennte Aufgabemöglichkeiten (fein und grob), die für die jeweilige Messung genutzt werden.

Mit dem CPA 4 von Haver & Boecker können damit Korngrößen- und Kornformanalysen von 0,063 bis 100 mm in zwei Messbereichen durchgeführt werden. Die Probe wird beim CPA 4 in einen Fülltrichter aufgegeben und über eine steuerbare Vibrationsrinne der Fallebene und Messung zugeführt. Während des Falls werden die vereinzelt Partikel über die Lichtquelle beleuchtet. Die Schattenprojektion wird von einer Zeilenkamera zeilenweise abgescannt und per PC mit spezieller Software ausgewertet. Pro Sekunde finden 10.000 Messungen statt (Bild 22).

Ausgewertet werden bei den verschiedenen Baumsubstratproben die Parameter:

- Korngrößenverteilung
- Kornformverteilung
- Sphärizität
- Länge-Breite-Verhältnis
- Rauigkeit



Bild 22: Messung mit dem Partikelanalysegerät an der Bauhaus-Universität Weimar

3.4 Packungsdichteberechnungen

Das in dieser Arbeit für die Packungsdichteberechnungen verwendete Rechenprogramm basiert auf den Rechenalgorithmen von SCHWANDA [1956].

Diesen Algorithmus nutzen mit Erfolg auch schon RESCHKE [2000], GEISENHANSLÜKE [2008] und EDEN [2010] für ihre jeweiligen Arbeiten im Bereich der Beton- und Kalksandsteintechnologie. Das Rechenprogramm mit der Benutzeroberfläche in Excel wird für die hier durchgeführten Berechnungen um einen bodenphysikalischen Siebsatz in der Fassung „BdP v. 3.03“ [BÄZ, DÖRING, 2012] erweitert.

Im Mittelpunkt der durchgeführten Berechnungen soll die Maximierung des Gesamtporenvolumens GPV stehen und somit nicht wie bei den zuvor genannten Anwendungen die Maximierung des Feststoffanteils (Gestein).

Es werden verschiedene Berechnungen an den Baumsubstraten BS 1 bis BS 19 für die verschiedenen Praxisgemische als

- 1-Stoff-System (0 bis X mm)
- 2-Stoff-System (0 bis 2 und 2 bis X mm)

durchgeführt.

4 Darstellung der Ergebnisse

4.1 Überbaubare Baumsubstrate

4.1.1 Vegetationstechnische Prüfungen nach FLL

4.1.1.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der verschiedenen Baumsubstrate werden grafisch in den Sollsieblinienbereich nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2010] (Bild 23) eingetragen. Die tabellarische Auswertung erfolgt in Anlage 4.

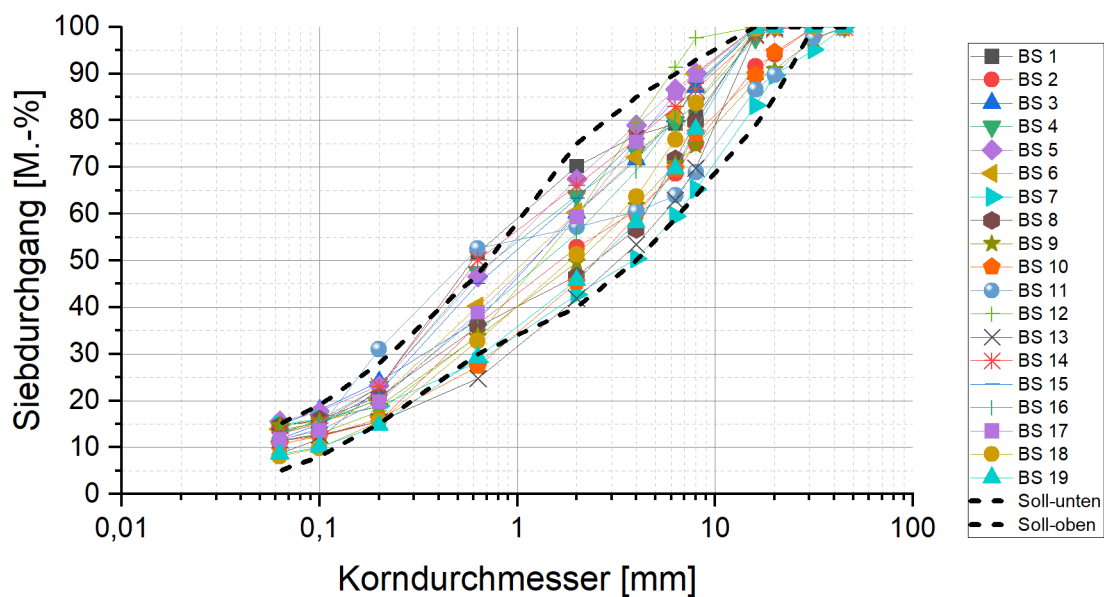


Bild 23: Korngrößenverteilungen der geprüften Baumsubstrate

Die untersuchten Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 liegen damit nahezu alle im vorgegebenen Soll-Korngrößenbereich (gestrichelt dargestellt) der FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen und füllen den Bereich nahezu vollständig aus. Die untersuchten 19 verschiedenen Baumsubstrate aus der Praxis decken daher den gesamten Sollbereich des empfohlenen Korngrößenbereiches ab.

Der Wassergehalt und die Anteile der Korngrößenbereiche für Schluff, Sand und Kies können der Anlage 5 und 6 entnommen werden.

In Anlage 33 wird ergänzend eine Fotodokumentation der Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 aufgeführt. Dargestellt sind jeweils die untersuchten Baumsubstrate im Lieferzustand und gesiebt in die einzelnen Kornfraktionen 0,063/2 mm und 2/X mm.

4.1.1.2 Rohdichte

Die Rohdichte wird in Anlehnung an DIN EN 1097-6 [2005] im ‚Wasserypyknometer‘ sowie DIN EN 12350-7 [2000] im ‚Luftpyknometer‘ bestimmt und vergleichend ausgewertet. Für diesen Zweck wird die Originalprobe getrocknet (klassische Ofentrocknung bis zur Massenkonstanz) und ohne weitere Auftrennung in einzelne Kornfraktionen, wie es eigentlich DIN EN 1097-6 fordert, für die Prüfung verwendet. Analog werden die Untersuchungen im Luftpyknometer durchgeführt, wobei hierbei getrocknetes oder feuchtes Material verwendet wird. Die Ergebnisse der verschiedenen Substrate sind in Bild 24 dargestellt:

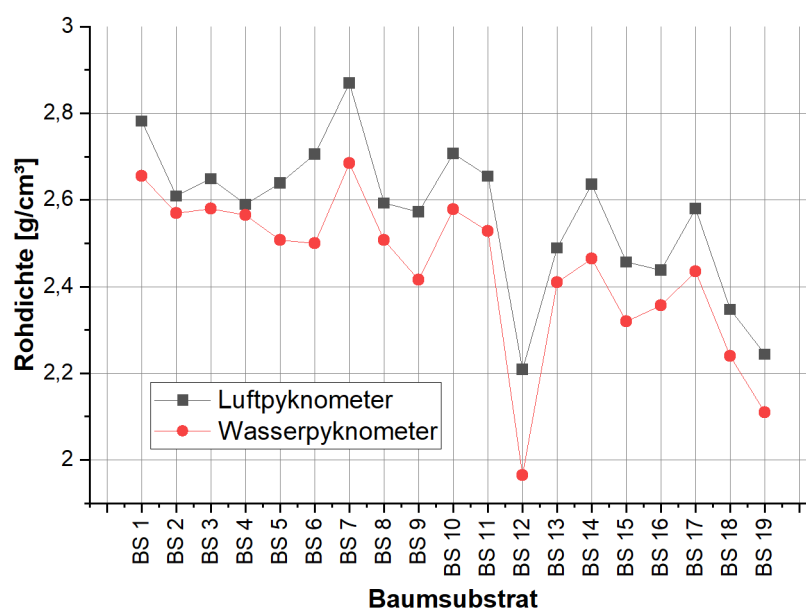


Bild 24: Rohdichte der untersuchten Substrate

Für die Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 werden mit dem Luftpyknometer Rohdichten in einer Spanne von 2,209 bis 2,870 g/cm³ sowie für die Untersuchung im Wasserypyknometer von 1,964 bis 2,685 g/cm³ bestimmt.

4.1.1.3 Verdichtbarkeit nach Proctor

Die Ergebnisse des Proctorversuchs sind neben den Ergebnissen zur Korngrößenverteilung in Bild 25 dargestellt:

- Proctordichte bei D_{Pr} 100 % und optimaler Proctor-Wassergehalt,
- die rechnerisch ermittelte Proctor-Bezugsdichte bei D_{Pr} 95 %,

die die Dichte für die weiteren bodenphysikalischen Untersuchungen der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 darstellt.

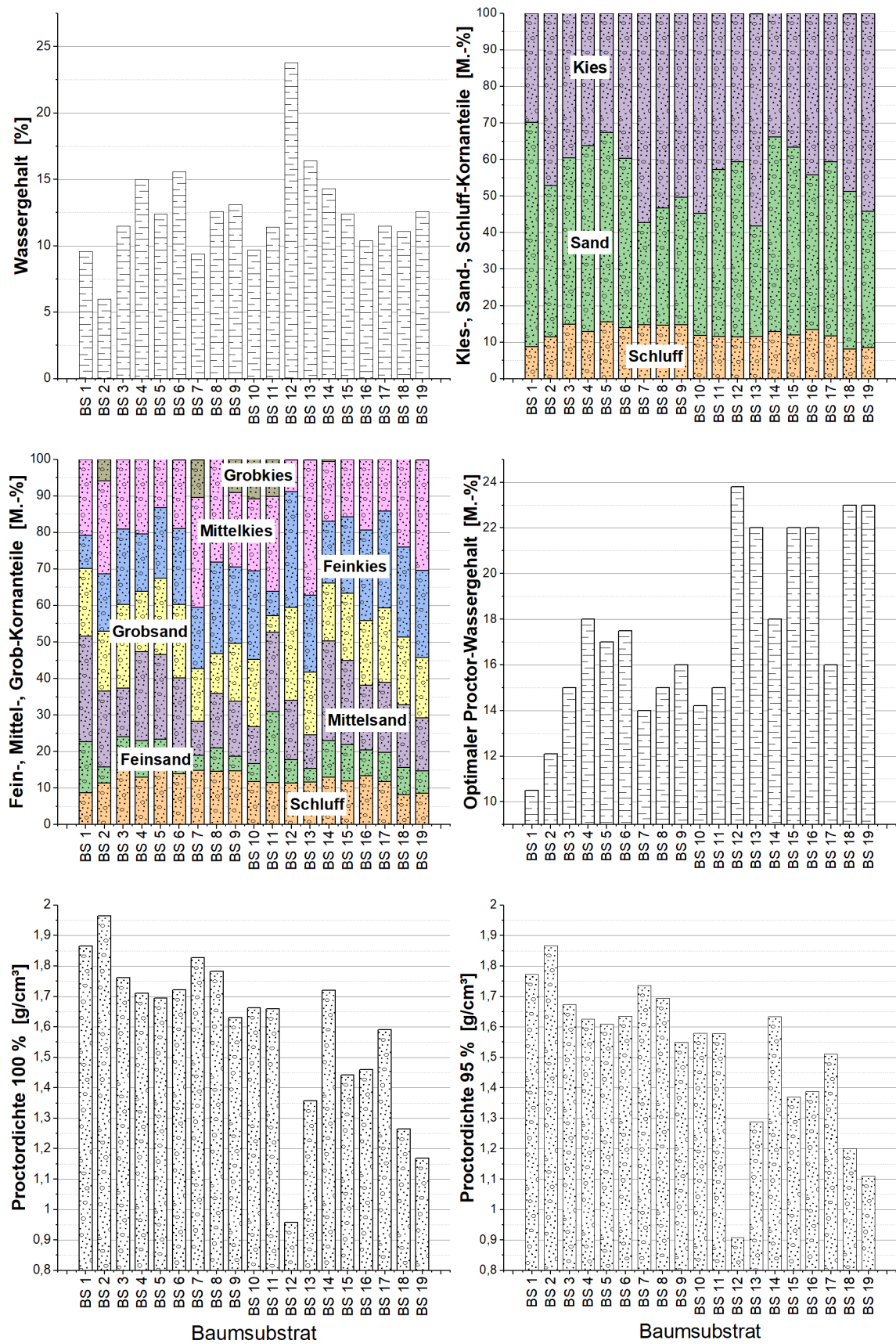


Bild 25: Wassergehalt, Korngrößenverteilung und Ergebnisse des Proctorversuchs für die verschiedenen Baumsubstrate

Die ermittelten Proctordichten der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 bei 100 % bewegen sich in einer weiten Spanne von 0,957 (BS 12) bis 1,965 g/cm³ (BS 2). Bei 95 % Verdichtungsgrad ergeben sich rechnerische Werte von 0,909 (BS 12) bis 1,867 g/cm³ (BS 2). Für den optimalen Wassergehalt nach Proctor werden Werte von 10,5 (BS 1) bis 23,8 % (BS 12) bestimmt. Damit ergeben sich erwartungsgemäß die höchsten Dichten bei überwiegend dichter Kornstruktur und die geringsten Dichten bei zunehmend poriger Kornstruktur. Die tabellarische Auswertung des Proctorversuchs mit Bezug zur Korngrößenverteilung ist in Anlage 5 aufgeführt.

4.1.1.4 *Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt*

Die ermittelten Ergebnisse sind in Bild 26 und 27, Anlage 7 jeweils für die Untersuchungen mit dem Luft- und Wasserpyknometer aufgeführt. Dargestellt sind jeweils von oben links nach unten rechts:

- Rohdichte (Kornrohddichte Luft- oder Wasserpyknometer)
- Wasserkapazität WK_{max} .
- Wasserdurchlässigkeit
- Gesamtporenvolumen GPV
- $GPV-WK_{max}$ (Luftvolumen, rechnerisch)
- Luftvolumen pF 1,8

Durch die unterschiedliche Rohdichte ändern sich in den Grafiken jeweils das Gesamtporenvolumen, das Luftvolumen ‚ $GPV-WK_{max}$ ‘ sowie das Luftvolumen pF 1,8. Die Wasserkapazität und die Wasserdurchlässigkeit sind jeweils gleich, da diese Prüfung unabhängig von der Rohdichte ist.

Die maximale Wasserkapazität der verschiedenen Substrate ergibt Prüfwerte zwischen 15,9 % (BS 9) und 43,7 % (BS 12). Der Anforderungswert der FLL-Empfehlungen [FLL, 2004, 2010] von 25 M.-% wird dabei von den Substraten BS 1, BS 2, BS 7, BS 9 und BS 11 nicht erfüllt. Deutlich erkennbar ist, dass Gemische auf der Basis von vorwiegend Rostasche oder Lava/Bims die höchsten Werte von bis zu 43,7 M.-% (BS 12) aufweisen. Die hohen Anforderungswerte der FGSV-Hinweise [FGSV, 2006] von 35 bis 40 M.-% für die maximale Wasserkapazität erfüllen nur wenige Substrate.

Die unterschiedlichen Substrate weisen eine Bandbreite bei der Wasserdurchlässigkeit von $6,1 \times 10^{-4}$ m/s bis $2,7 \times 10^{-6}$ m/s auf. Bis auf BS 2 erfüllen daher alle geprüften Substrate die Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit.

Das ermittelte Gesamtporenvolumen GPV in Abhängigkeit von der Kornrohddichte, ermittelt mit dem Luft- und Wasserpyknometer, sind unterschiedlich. Die geringeren

Werte der Kornrohddichte, ermittelt mit dem Wasserpyknometer, führen rechnerisch zu einem entsprechend niedrigeren Gesamtporenvolumen. Analog zur maximalen Wasserkapazität weisen die Gemische auf der Basis von vorwiegend Rostasche oder Lava/Bims die höchsten Werte für das Gesamtporenvolumen auf.

Analog verhält sich das ermittelte Luftvolumen unterschiedlich. Bei einer Verdichtungsanforderung von 95 % erfüllen nicht alle überbaubaren Baumsubstrate die Anforderung der FLL-Empfehlungen [FLL, 2010] und der FGSV-Hinweise [FGSV, 2006] von 15 Vol.-% bei p_F 1,8 – selbst bei Anwendung des Luftpyknometers für die Bestimmung der Kornrohddichte, welches generell höhere Werte liefert.

4.1.2 Straßenbautechnische Prüfungen

4.1.2.1 *Verdichtbarkeit nach Proctor*

Die Ergebnisse des Proctorversuchs sind in Bild 25 und in Anlage 5 aufgeführt.

Um den Einfluss der Proctorverdichtung bei 100 % Verdichtung auf die Kornfestigkeit festzustellen, wird die Korngrößenverteilung der Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 wiederholt auch nach Durchführung des Proctorversuchs ermittelt. Die Ergebnisse für die Veränderungen im Schluff-, Sand- und Kiesbereich können der Anlage 5 entnommen werden.

4.1.2.2 *CBR-Versuch*

Für die Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 sind die ermittelten CBR-Werte in Bild 28 und in Anlage 8 aufgeführt.

Vergleicht man die ermittelten CBR-Werte mit der Regression von WEINGART [1998], ist festzustellen, dass im Laborversuch bis auf BS 12 alle untersuchten Substrate einen CBR-Wert $> 10,7 \%$ aufweisen und damit die heutige Standfestigkeitsanforderung von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ bei einem Verdichtungsgrad von 95 % erfüllen.

4.1.2.3 *Dynamischer Lastplattendruckversuch*

Analog sind in Bild 28 und Anlage 8 für die Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 die E_{vd} -Werte – durchgeführt im Troggefäß mit 200 Liter Fassungsvermögen – aufgeführt.

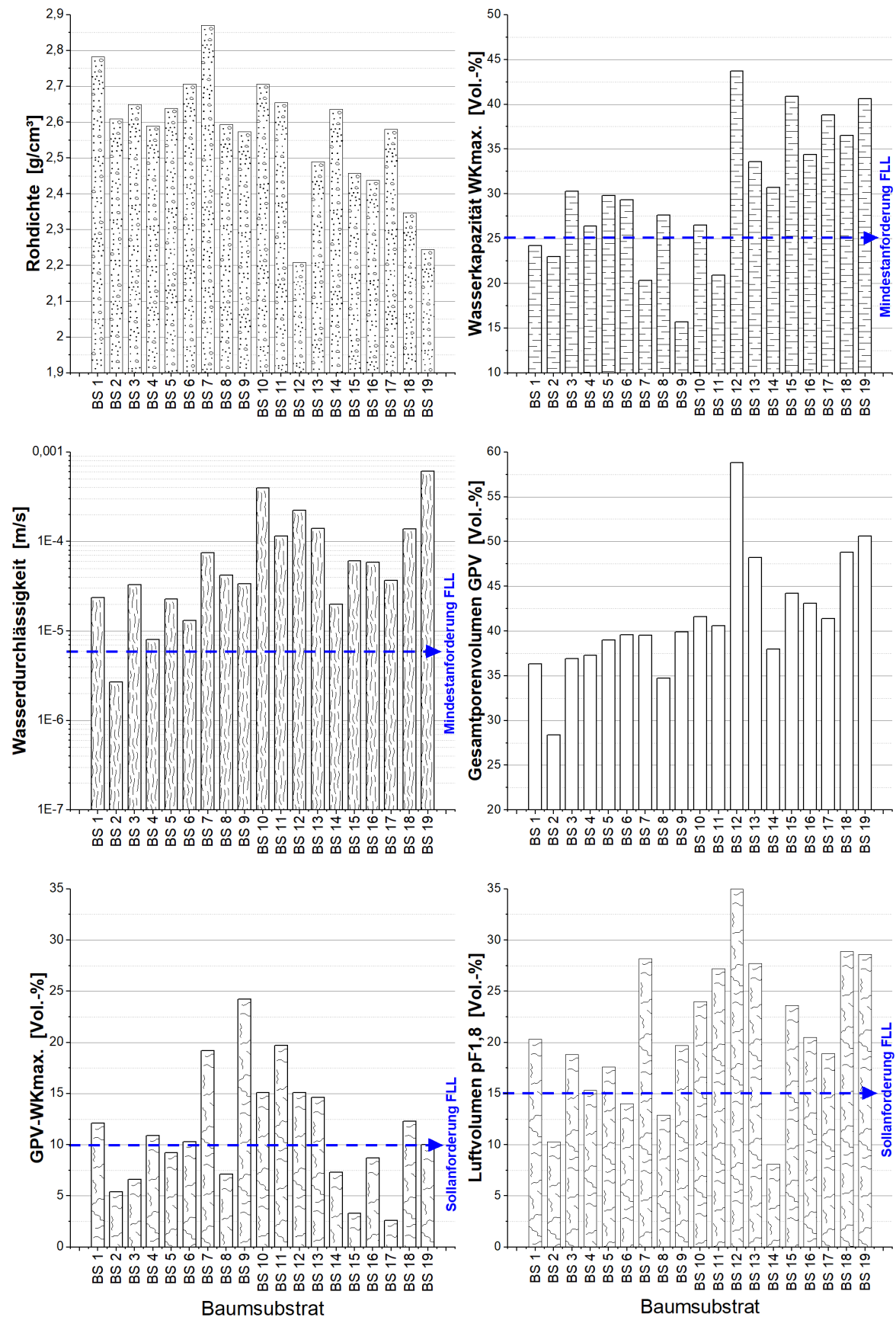


Bild 26: Ergebnisse der verschiedenen Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Luftpyknometer

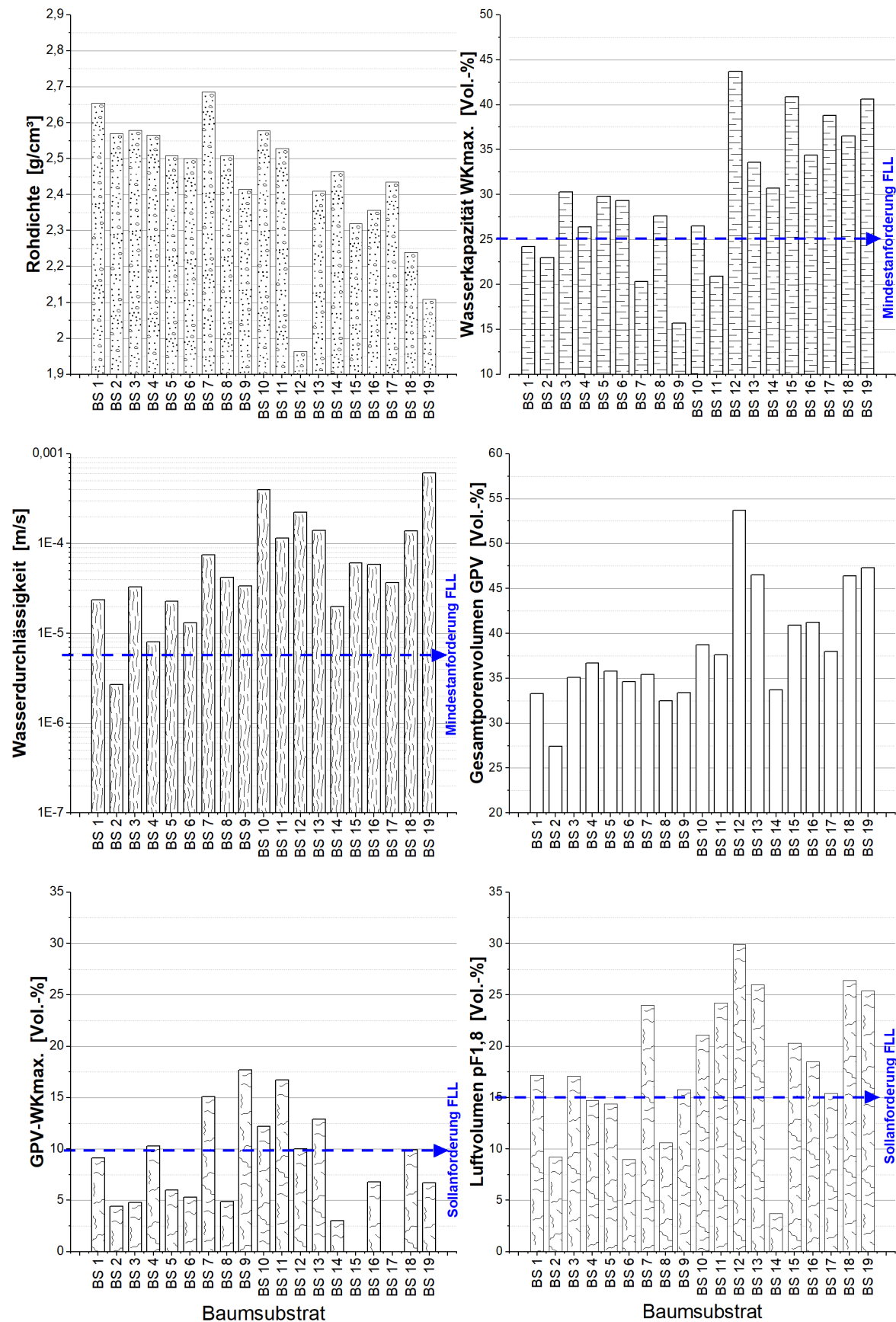


Bild 27: Ergebnisse der verschiedenen Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Wasserypknometer

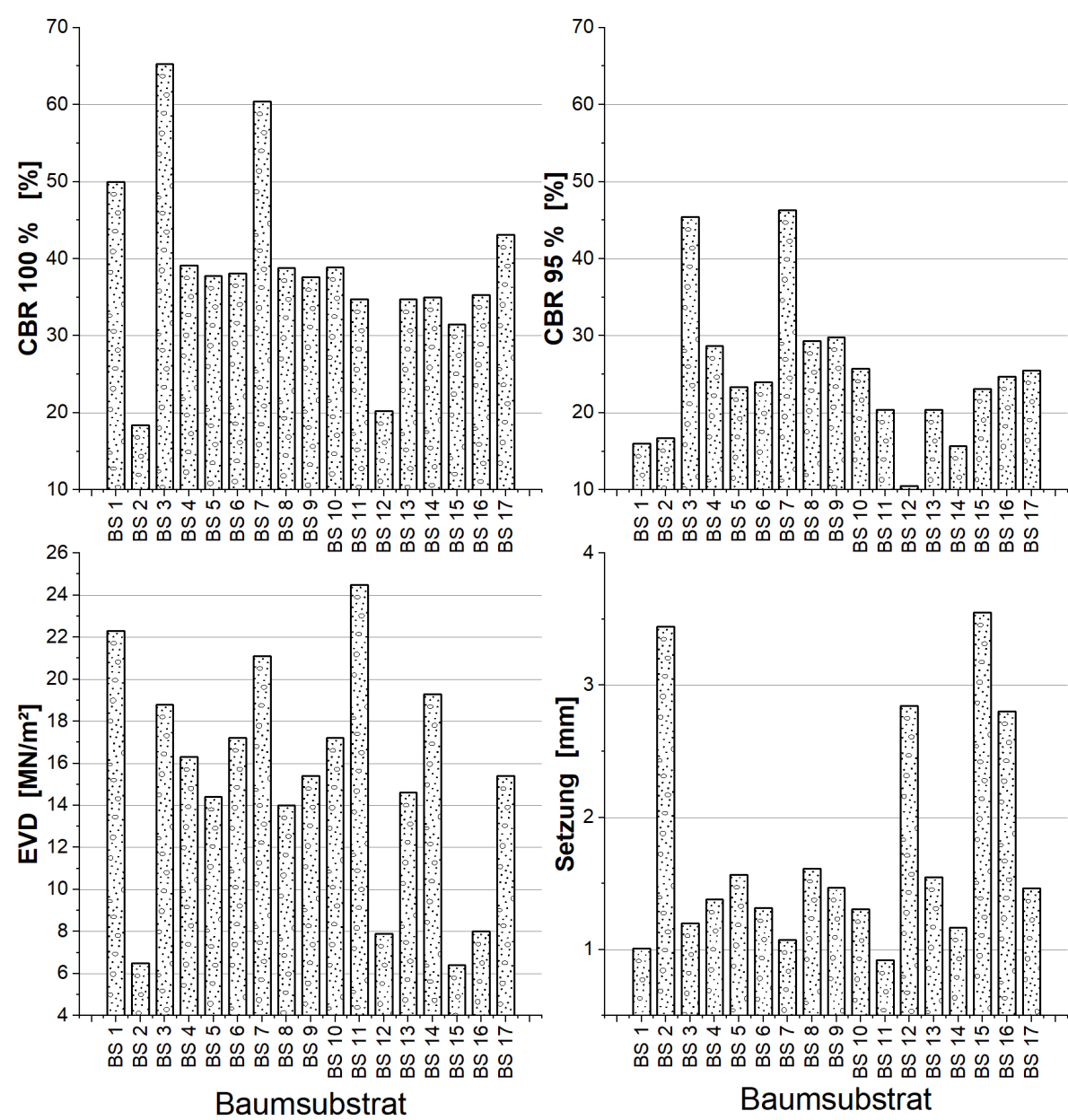


Bild 28: Ergebnisse des CBR-Versuchs und des Dynamischen Plattendruckversuchs mit dem leichten Fallgewichtgerät für die verschiedenen Baumsubstrate

4.1.3 Fotooptische Prüfungen

4.1.3.1 Sphärizität

Die Ergebnisse der fotooptischen Untersuchungen zur Sphärizität der Baumsubstrate BS 1 bis BS 17 sind in Bild 29 und 30 dargestellt. Die tabellarische Auswertung folgt in Anlage 9. Dabei wird die Sphärizität der Kornfraktionen 0,063/2 mm (Bild 29) und 2/X mm (Bild 30) folgend dargestellt. Neben der gesamten Sandfraktion ist die Sphärizität der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand dargestellt. Danach folgt die Sphärizität für den gesamten Kiesbereich sowie der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobkies.

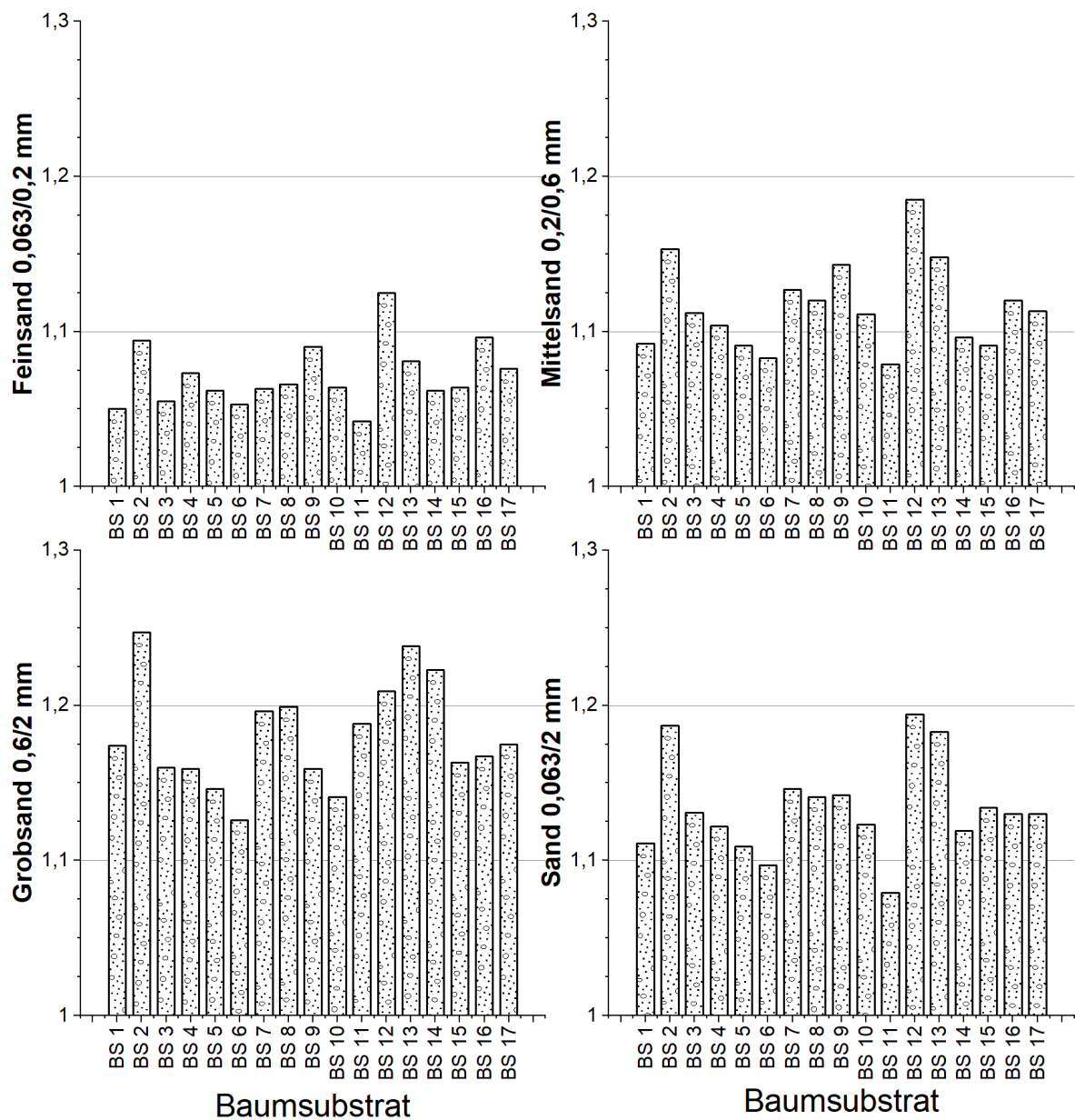


Bild 29: Sphärizität der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sowie der gesamten Sandfraktion 0,063/2 mm der Substrate

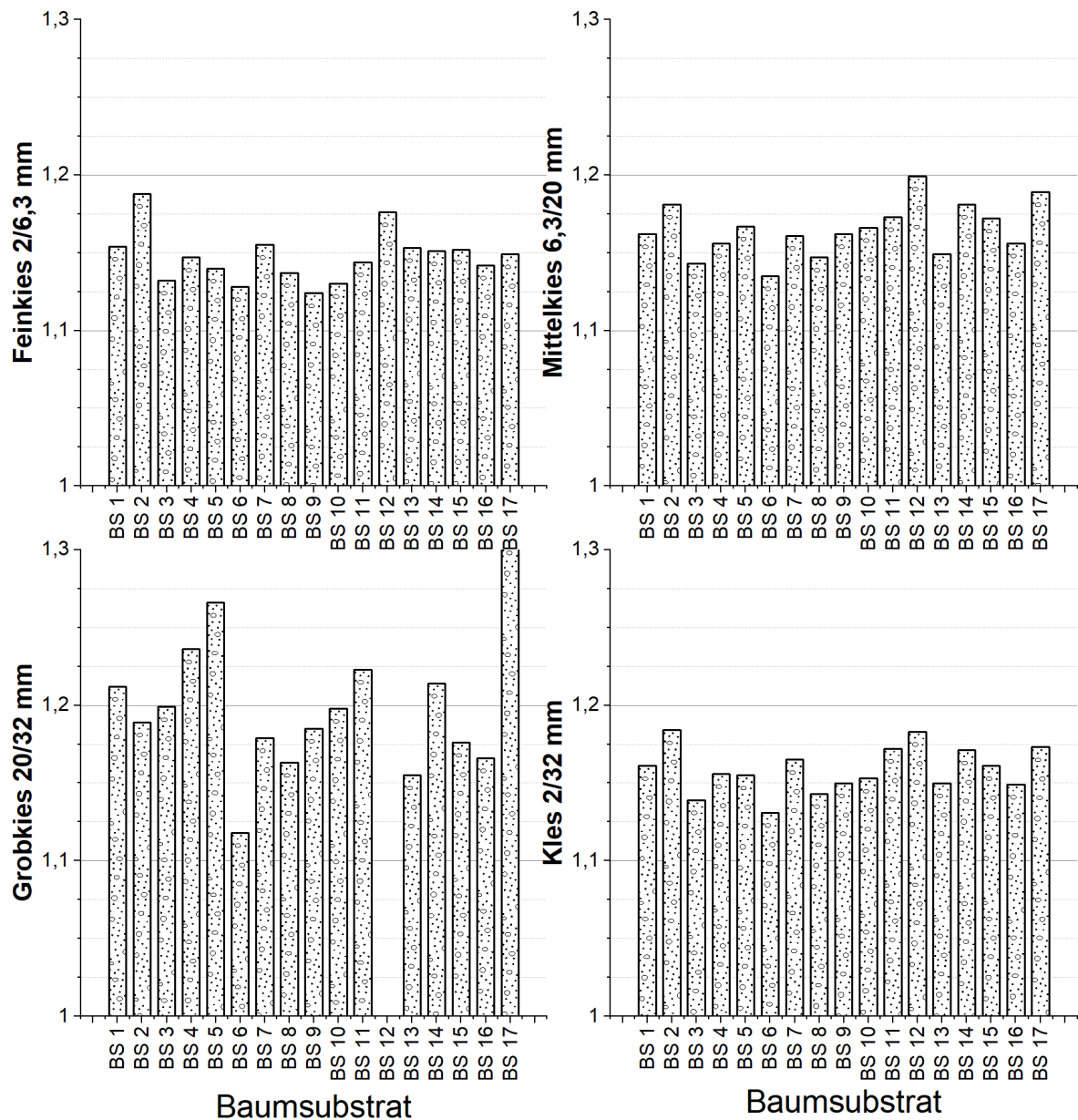


Bild 30: Sphärizität der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobkies sowie der gesamten Kiesfraktion 2/32 mm der Substrate

4.1.3.2 Länge-Breite-Verhältnis

Die Ergebnisse der fotooptischen Untersuchungen zum Länge-Breite-Verhältnis der Baums substrate BS 1 bis BS 17 sind analog zur Auswertung für die Sphärizität in den Bildern 31 und 32 dargestellt. Die tabellarische Auswertung folgt in Anlage 9.

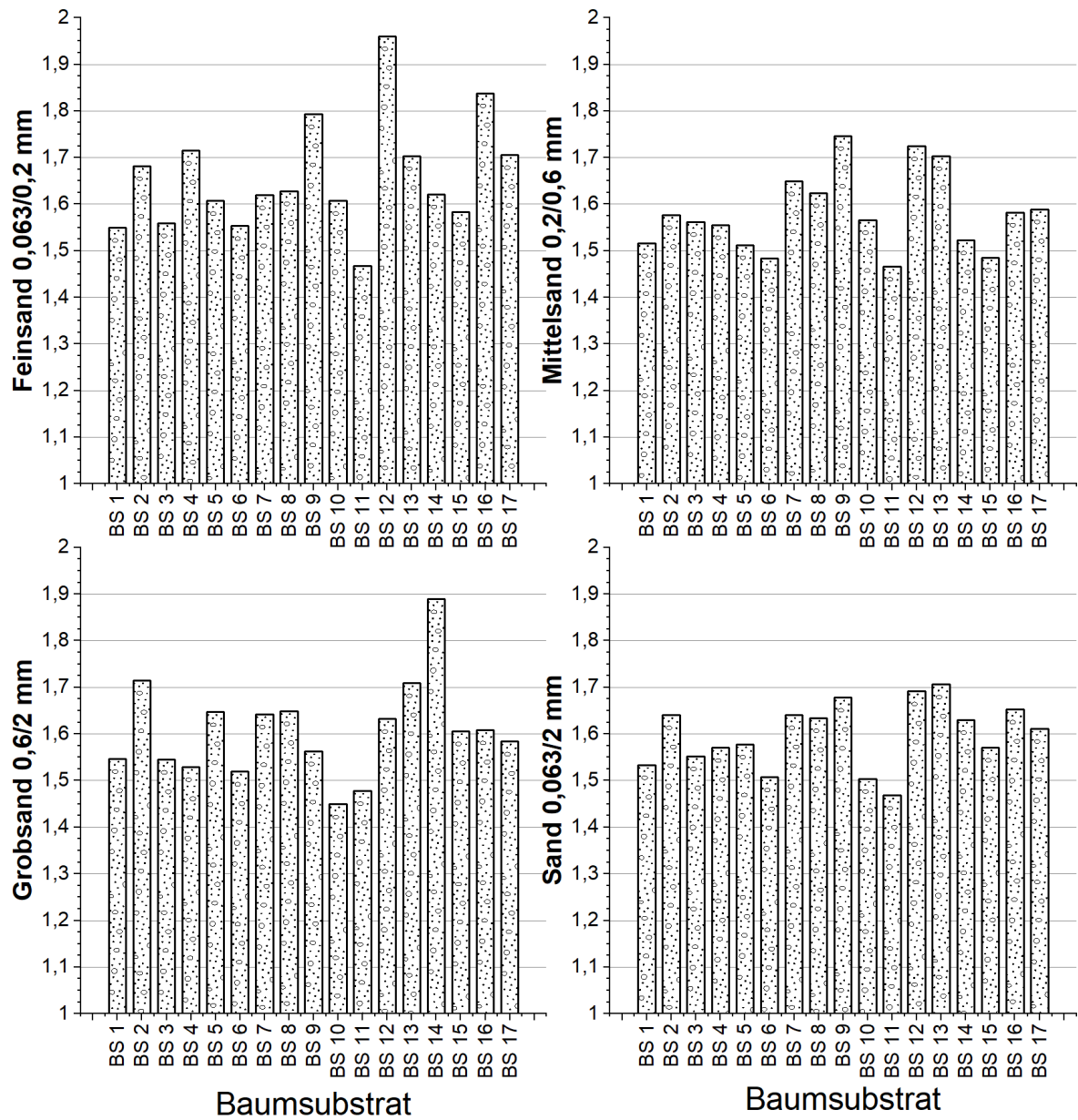


Bild 31: Länge-Breite-Verhältnis der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sowie der gesamten Sandfraktion 0,063/2 mm der Substrate

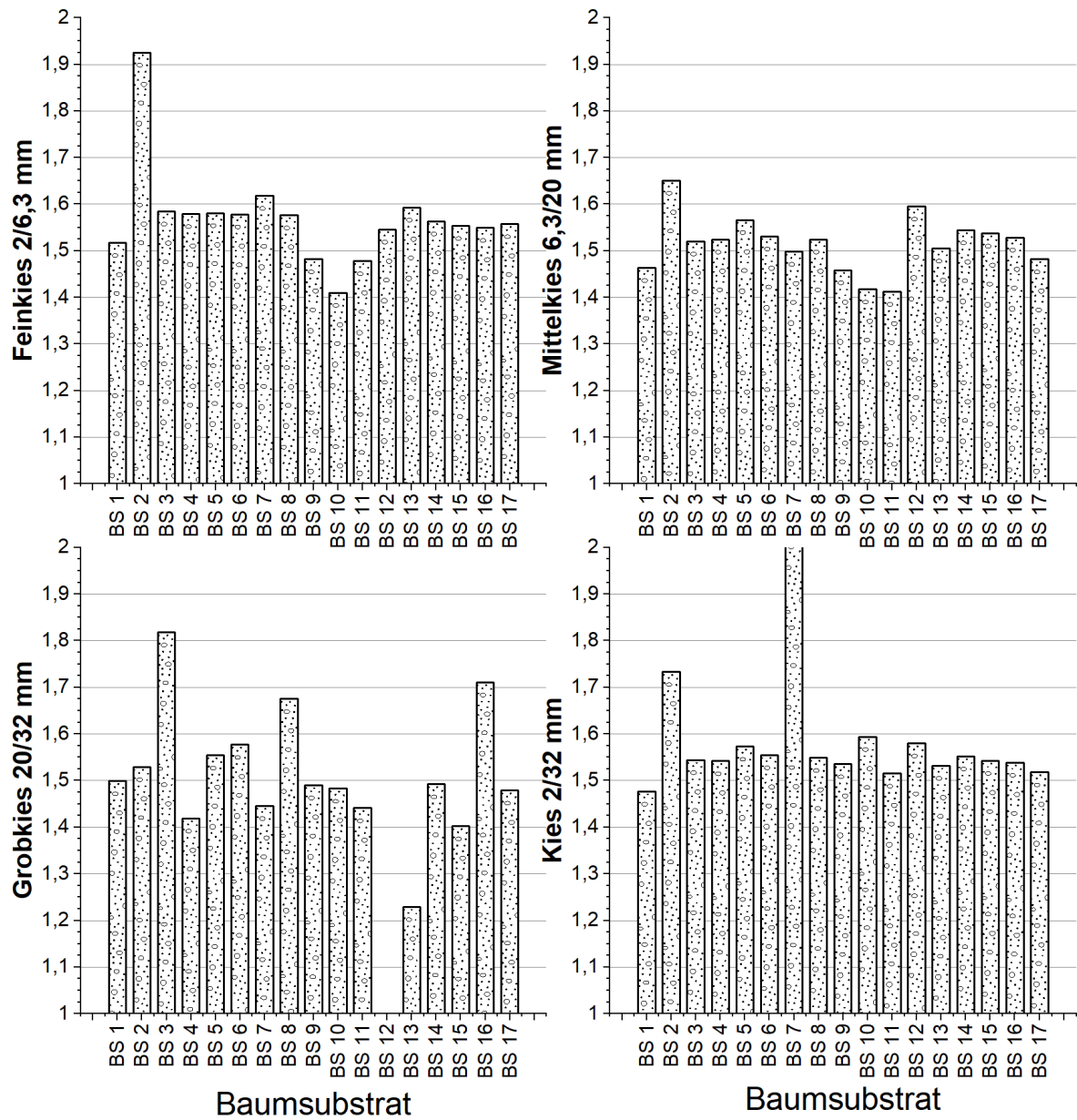


Bild 32: Länge-Breite-Verhältnis der Kornfraktionen Fein-, Mittel- und Grobkies sowie der gesamten Kiesfraktion 2/32 mm der Substrate

4.2 Ziegel-Gesteinskörnungen

4.2.1 Mauer- und Dachziegel aus Weimar

Die ermittelten Korngrößenverteilungen der Technikumsversuche sind in Anlage 10, A10.1 in Bild 64 und Bild 65, für die untersuchten Mauer- und Dachziegel aus Weimar der Prallbrecherversuche mit unterschiedlicher Drehzahl (tabellarisch auch in Anlage 12) aufgeführt. Analog folgen in Anlage 10, A10.2, Bild 66 und Bild 67, die Korngrößenverteilungen der Backenbrecherversuche (siehe auch Anlage 13) mit unterschiedlichen Spaltbreiten.

Beim Prallbrecher ergibt sich die feinste Korngrößenverteilung mit dem kleinsten Größtkorn erwartungsgemäß bei der höchsten Umfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers (1450 U/min) und analog der engsten Spaltbreiteneinstellung (,13') des Backenbrechers. Diese Einstellung für die jeweilige Brecherart wird daher bei den folgenden Technikumsversuchen mit Mauer- und Dachziegeln verschiedener Provenienzen gewählt.

4.2.2 Mauer- und Dachziegel verschiedener Provenienzen

4.2.2.1 *Korngrößenverteilung*

Unter A10.3 in Bild 68 und Bild 69 der Anlage 10 sind die Mittel-, Minimum- und Maximumwerte der ermittelten Korngrößenverteilungen für die Mauerziegel verschiedenen Provenienzen mit dem Prall- und Backenbrecher im Vergleich zum empfohlenen Korngrößenbereich [FLL, 2010] dargestellt. Tabellarisch sind die Ergebnisse in Anlage 15 und 16 aufgeführt.

Es folgen analog die Darstellungen für die verschiedenen Dachziegel unter A10.4 in Bild 70 und Bild 71 der Anlage 10 und Anlage 16.

In Anlage 10, A10.5 in Bild 72 und Bild 73 sowie Anlage 17 sind ergänzend die Ergebnisse der Korngrößenverteilung der Prallbrecherversuche mit eckiger und runder Pralleiste dargestellt.

4.2.2.2 *Reindichte und Rohdichte – Heliumpyknometer*

Von den verschiedenen Mauer- und Dachziegeln wird die Reindichte an der Körnung 0/0,063 mm und die Rohdichte an der Körnung 0,063/2 mm mit dem Heliumpyknometer der Bauhaus-Universität Weimar untersucht und in Bild 33, obere Zeile dargestellt.

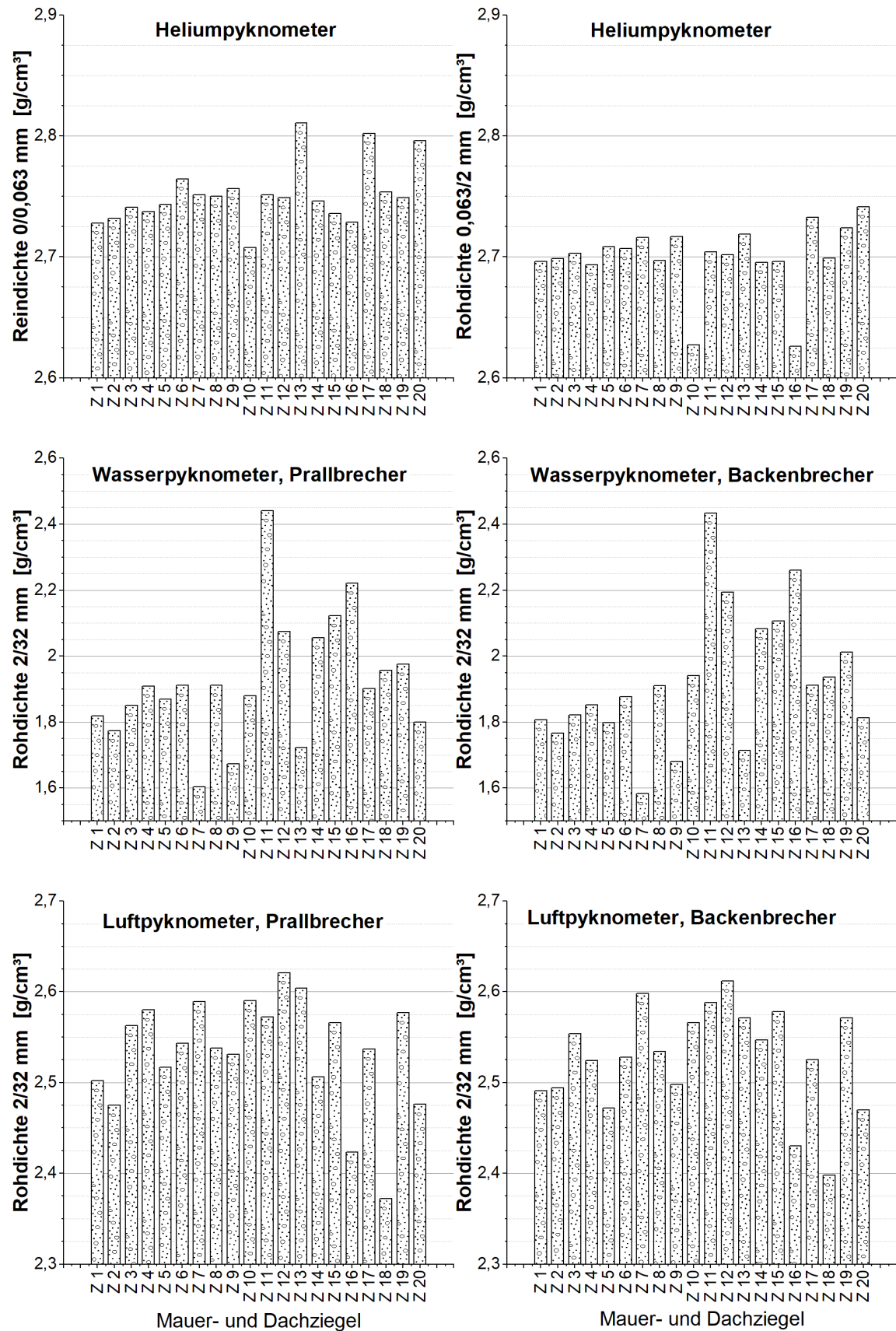


Bild 33: Reindichte/Rohdichte mit dem Heliumpyknometer sowie Rohdichte Wasser- und Luftpyknometer der Körnung 2/32 mm aufbereitet mittels Prall- und Backenbrecher

Die Werte der Reindichte, ermittelt als Mittelwert der Prallbrecher- und Backenbrecher-Versuche, liegen in einer Bandbreite zwischen 2,7076 (MZ 6 SO) und 2,8106 g/cm³ (MZ 9 HU). Die Werte der Rohdichte liegen mit 2,6272 (MZ 6 SO) und 2,7413 g/cm³ (DZ 9 HU) geringer.

Die tabellarische Auswertung der Ergebnisse der Heliumpyknometer-Versuche wird in Anlage 18 aufgeführt.

4.2.2.3 Rohdichte – Wasserpyknometer

Die verschiedenen Rohdichten (ofentrocken, wassergesättigt und ofentrocken) sind als Mittelwerte der Körnung 2/32 mm, bestimmt nach DIN EN 1097-6 [2005], für die unterschiedlich aufbereiteten Mauerziegel und Dachziegel und der verwendeten Brecher grafisch unter A11.1 in Bild 74 und Bild 75 der Anlage 11 dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Körnungen 2/4, 4/8, 8/16 und 16/32 mm und des Mittelwertes sind tabellarisch in Anlage 19 aufgeführt.

Analog folgen in Anlage 11, A11.1 in Bild 76 und Bild 77 und in Anlage 20 die Ergebnisse für die verschiedenen Dachziegel.

In Anlage 11, A11.1, Bild 78 und Bild 79 sowie in Anlage 21 sind die Ergebnisse der Versuche mit dem Prallbrecher mit unterschiedlicher Schlagleistengeometrie aufgeführt.

4.2.2.4 Wasseraufnahme – Wasserpyknometer

Parallel zur Ermittlung der Rohdichte mit dem Wasserpyknometer wird an allen Ziegelkörnungen unterschiedlicher Provenienz die Wasseraufnahme bestimmt. Die Mittelwerte der Körnungen 2/32 mm werden grafisch in Anlage 11 unter A11.2 in Bild 80 bis 82 dargestellt. In Anlage 22 bis 24 folgen die Ergebnisse tabellarisch für die Einzelkörnungen.

4.2.2.5 Rohdichtevergleich – Wasser- und Luftpiknometer

Die Ergebnisse der Rohdichtebestimmung, bestimmt mit dem Luftpiknometerverfahren [DIN EN 12350-7, 2000] im direkten Vergleich zum Wasserpyknometerverfahren [DIN EN 1097-6, 2005], sind in Anlage 25 bis 27 für die unterschiedlichen Technikumsversuche und geprüften Einzelkörnungen aufgeführt.

Eine Regression zwischen der Kornrohddichte der verschiedenen untersuchten Ziegel zwischen dem Wasser- und Luftpiknometerverfahren kann nicht ermittelt werden.

4.3 Packungsdichteberechnungen Baumsubstrate

Die Packungsdichte wird aus den Korngrößenverteilungen der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 für die verschiedenen Praxisgemische als Ist-Werte als 1-Stoff-System berechnet. Bei dieser Berechnung geht die Rohdichte der Stoffbestandteile des Baumsubstrates als Durchschnittswert für die Körnung 0/X mm mit ein.

Die Packungsdichte des 1-Stoff-Systems (Bild 34, Anlage 28) ergibt sich daher in Vol.-%.

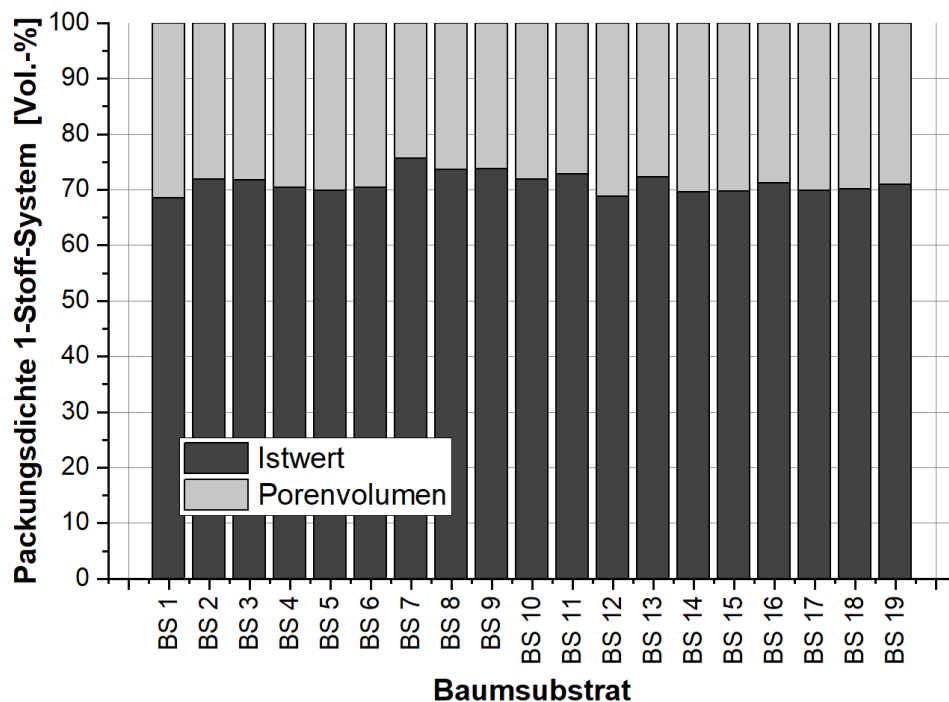


Bild 34: Packungsdichte der geprüften Baumsubstrate BS 1 bis BS 19

Die rechnerisch ermittelte Packungsdichte für die geprüften Substrate liegt zwischen 68,5 Vol.-% (BS 1) und 75,7 Vol.-% (BS 7). Der Mittelwert liegt bei 71,2 Vol.-% und ist ein Maß für den „Feststoffgehalt“ des Primärporensystems. Das Porenvolumen (Mittelwert 28,8 Vol.-%) des Primärporensystems ergibt sich als rechnerische Differenz zu 100 Vol.-%.

Wird die Packungsdichte mit der Kornrohddichte multipliziert und diese mit der 100- und 95-prozentigen Proctordichte – ermittelt mit dem Wasser- oder Luftpyknometer – verglichen, lässt sich dies in folgender Grafik mit Reihung der verschiedenen ermittelten Dichten darstellen (Bild 35).

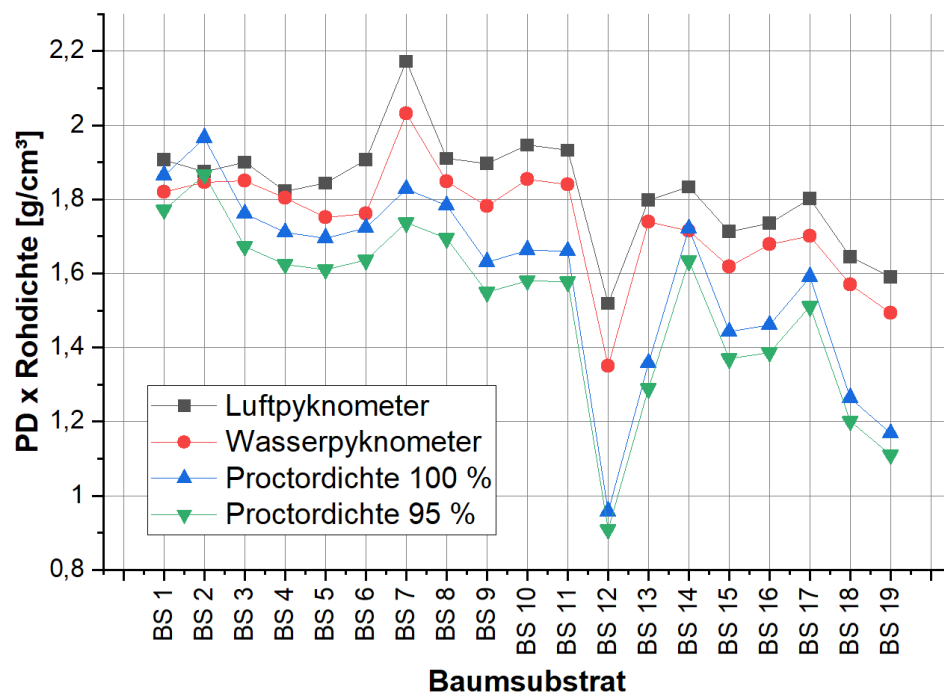


Bild 35: Vergleich der Packungsdichte mit der Proctordichte – Luft- und Wasserypnometer

5 Auswertung der Ergebnisse

5.1 Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse des Untersuchungsprogramms werden statistisch nicht auf ‚Ausreißer‘ untersucht. Ausreißer sind Messwerte einer Messreihe, die unter den gewählten technischen Bedingungen und den angenommenen statistischen Voraussetzungen nicht zu den übrigen Messwerten gehören. Es werden technische und statistische Ausreißer unterschieden. Diese Werte sind zu den anderen Werten statistisch nicht verträglich. Ein Wert ist ‚ausreißerverdächtig‘, wenn er von den anderen Werten der Messreihe erheblich abweicht, also auffällig größer oder kleiner ist. Ein ausreißerverdächtiger Wert kann technisch begründbar sein (technischer Ausreißer, z.B. Verfahrensfehler, Ablesefehler) oder rechnerisch statistisch ermittelt werden (berechneter statistischer Ausreißer, wenn kein technischer Ausreißer vorliegt). Das Auftreten von statistischen Ausreißern kann sehr unterschiedliche Gründe haben, z.B. eine höhere Streuung durch außergewöhnliche, unkontrollierbare Einflüsse während des Mess- und Prüfvorgangs [Statistik 2003].

Für den Nachweis statistischer Ausreißer sind mindestens drei Messwerte notwendig. Bei der Durchführung des Untersuchungsprogramms liegen i.d.R. nur ein Messwert oder eine Doppelbestimmung vor, sodass eine Ausreißerprüfung statistisch nicht erfolgen kann. Bei Doppelbestimmungen eines jeweiligen Prüfverfahrens wird – soweit vorhanden – die Wiederholpräzision für die Kontrolle der Messwerte genutzt.

Für die statistisch ausgewerteten Messreihen werden die Anzahl der Messwerte, der arithmetischen Mittelwert, die Standardabweichung, der Maximum- und Minimumwert angegeben.

Anhand von linearen oder polynomen Regressionsanalysen werden Beziehungen zwischen abhängigen und/oder unabhängigen Messgrößen bestimmt und die Regressionskoeffizienten R^2 bestimmt.

Folgende Bewertung der Regressionen liegt dieser Arbeit für R^2 zugrunde:

- gleich 1,00, dann ergibt sich eine Regression, die für die Daten genau übereinstimmt
- ein Wert von 0,70 – 0,99 belegt eine hohe Regression zwischen den Daten
- ein Wert von 0,40 – 0,699 zeigt ein mittelmäßiges Verhältnis zwischen den Daten an
- unter 0,399 wird die Regression als unerheblich erachtet
- wenn R^2 gleich 0 wird, gibt es keine Regression zwischen den Daten

5.2 Baumsubstrate

Nahezu alle untersuchten Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 liegen im empfohlenen Korngrößenverteilungsbereich der FLL [2010] und füllen diesen mit den untersuchten Varianten nahezu aus. Nur BS 12 fällt aufgrund seiner Korngrößenverteilung mit einem Größtkorn von 8 mm und geringem Überkornanteil der Körnung 8/16 mm aus dem Rahmen.

Die stoffliche Zusammensetzung und das Prüfverfahren der verschiedenen Baumsubstrate beeinflussen maßgeblich die Kornrohddichte der verschiedenen Varianten. Die Baumsubstrate mit dichten Natursteinanteilen zählen naturgemäß zu den Substraten mit der ermittelten höchsten Kornrohddichte, während die Substrate mit hohen Rostascheanteilen zu den leichtesten Substraten gehören. Ziegel- und Lavasubstrate liegen hinsichtlich der ermittelten Kornrohddichte im mittleren Bereich.

Grundsätzlich wird mit dem Luftpyknometerverfahren eine höhere Kornrohddichte ermittelt, als mit dem Wasserpyknometer (siehe Bild 24, Bild 36), was darauf schließen lässt, dass mittels Luftpyknometerverfahren nahezu alle luft- und wassergefüllten Poren und mit dem Wasserpyknometer lediglich die wasserzugängliche Porosität erfasst werden. Der Haupteinflussfaktor ist die für Wasser oder Luft unterschiedlich große zugängliche Porosität/Permeabilität der verschiedenen Stoffe. Dies wirkt sich rechnerisch insbesondere auf das Gesamtporenvolumen aus und muss daher bei weiteren Bewertungen und Überlegungen entsprechend berücksichtigt werden.

Trotz des großen Korndichteunterschiedes der verschiedenen Baumsubstrate mit unterschiedlicher Kornporosität lässt sich durch die Verdichtung mit dem Proctorverfahren nahezu keine Verschiebung der Korngrößenverteilung vor und nach Ausführung des Proctorversuchs (siehe Anlage 5) feststellen. Bei nahezu allen geprüften Substraten liegt nur eine unerwartet geringe Korngrößenverschiebung bei Einsatz poröser Gesteinskörnungen vor. Voraussichtlich ist die geringe Kornzertrümmerung durch den Verdichtungs Vorgang auf die ‚hohen‘ Sandgehalte in den Substraten zurückzuführen, welche sie unempfindlicher für eine Kornzertrümmerung durch die Verdichtung macht.

Typische ‚Proctor-Verdichtungs-Parabeln‘ lassen sich nur bei Mischungen mit überwiegend dichten Kornrohddichten nachweisen. Grobporöse Gesteinskörnungen, wie z.B. Lava und Rostasche weisen im Proctorversuch bis zur Übersättigung mit Wasser meist einen linearen Anstieg der Proctordichte auf, sodass sich hier ein klares Parabel-Maximum der Trockendichte in Abhängigkeit vom Wassergehalt nicht einstellt. Zurückgeführt werden kann diese Eigenschaft auf die hohe Rauigkeit der Kornoberfläche der porösen Gesteinskörnungen der Baumsubstrate bei der Verdichtung.

Bei der Bewertung der Maximalen Wasserkapazität (Bilder 26 und 27) fällt auf, dass die Baumsubstrate BS 1, BS 2, BS 7, BS 9 und BS 11 die Vorgabe der FLL [2004 und 2010] mit mindestens 25 Vol.-% nicht erfüllen und somit auch das Anforderungsprofil nicht erfüllt wird. Die höheren Vorgaben an die max. Wasserspeicherkapazität von HEIDGER [2006] und der FGSV [2006] erfüllen nur wenige Substrate. Die besten Wasserspeicherkapazitäten weisen die Substrate mit einem hohen Anteil an Lava, Bims und Rostasche auf. Es ergibt sich analog die tendenzielle vegetationstechnische Rangfolge der stofflichen Hauptkomponenten für Naturstein, Ziegel, Lava, Rostasche, Bims von ‚Anforderung nicht erfüllt‘ zu ‚Anforderung erfüllt‘ bei der Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit, des Luftvolumens und des Gesamtporenvolumens der untersuchten Baumsubstrate.

Bei den straßenbautechnischen Untersuchungen erfüllen alle Substrate beim CBR-Versuch die Regression von WEINGART [1998] zum statischen Plattendruckversuch (45 MN/m²) mit einem CBR-Wert > 10,7 % außer Baumsubstrat BS 12 (zu feinkörnig). Eine vergleichbare Bewertung ergibt sich bei Bewertung der E_{vd}-Werte bei den Trogversuchen nicht. Im Vergleich der ermittelten E_{vd}-Werte mit der Regression von WEINGART [1998] ist feststellbar, dass im hier versuchstechnisch angewendeten Trogversuch bis auf BS 1 und BS 11 alle den Regressionswert von 21,7 MN/m² – und damit die heutige Standfestigkeitsanforderung von E_{v2} ≥ 45 MN/m² bei einem Verdichtungsgrad von 95 % – nicht erfüllen. Es wird vermutet, dass diese unzureichenden Prüfergebnisse auf die zu geringe Seitenbehinderung bei der Prüfung im Trog aus Kunststoff zurückzuführen ist und damit bei der gewählten Versuchsdurchführung unrealistisch geringere Werte bestimmt werden.

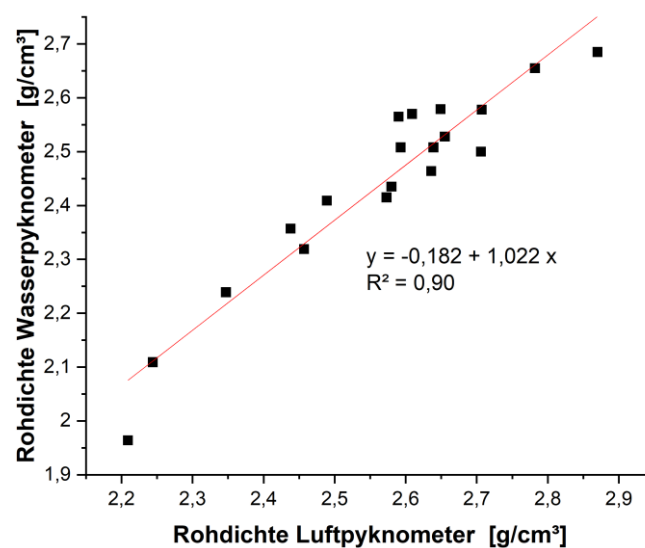


Bild 36: Regression Rohdichte – Luftpyknometer zu Wasserpyknometer

Die Bilder 37 bis 40 zeigen ermittelte Regressionen der Prüfwerte, ermittelt in Bezug auf das angewendete Rohdichteprüfverfahren, für die Kornrohddichte – Luftpyknometer oder Wasserpyknometer – auf, um darauf aufbauend später eine Modellbildung zu ermöglichen. In Tabelle 12 sind als Übersicht alle Regressionen mit Bewertung für R^2 aufgeführt.

Tabelle 12: Ermittelte Regressionen der Kornrohddichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt und zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuchs – Luft- und Wasserpyknometer

Regression	Typ*/Formel				R^{2**}	
Rohddichte Wasserpyknometer	linear $y = -0,181916 + 1,02195x$				0,90	
Regression	Typ	Formel	R^{2*}	Typ	Formel	R^{2*}
Pyknometer	Luftpyknometer			Wasserpyknometer		
Wasserkapazität WK_{max} . [Vol.-%]	lin.	$y = 117,66 - 34,0832x$	0,54	lin.	$y = 108,769 - 32,1945x$	0,56
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	pol.	$y = 0,01266 - 0,00955x + 0,00181x^2$	0,34	pol.	$y = 0,00551 - 0,00418x + 8,0144E-4x^2$	0,21
Gesamtporenvolumen GPV [Vol.-%]	lin.	$y = 117,65 - 29,699x$	0,55	lin.	$y = 109,265 - 29,0564x$	0,67
Luftvolumen $pF\ 1,8$ [Vol.-%]	lin.	$y = 70,7014 - 19,3494x$	0,17	lin.	$y = 64,3675 - 18,9727x$	0,20
Proctordichte bei $D_{Pr}=100\%$ [g/cm ³]	lin.	$y = -1,89116 + 1,356673x$	0,79	lin.	$y = -1,64875 + 1,32723x$	0,88
Optimaler Wassergehalt nach Proctor [%]	lin.	$y = 69,0525 - 20,05x$	0,72	lin.	$y = 63,136 - 18,6579x$	0,71
Proctordichte bei $D_{Pr}=95\%$ [g/cm ³]	lin.	$y = -1,79694 + 1,28907x$	0,79	lin.	$y = -1,56686 + 1,26114x$	0,88
CBR-Wert 95% [%]	lin.	$y = -53,9877 + 30,4036x$	0,18	lin.	$y = -45,4685 + 28,5084x$	0,20

* Lineare (lin.) oder polynome (pol.) Regression

**Regressionsverhältnis hoch $R^2 = 0,70$ bis $0,99$

Regressionsverhältnis mittelmäßig $R^2 = 0,40$ bis $0,69$

Regressionsverhältnis unerheblich $R^2 < 0,39$

Die Regressionskoeffizienten R^2 liegen in einem weiten Bereich unabhängig vom Rohdichteverfahren. Tendenziell liefern die ermittelten Regressionen, bestimmt mit den Wasserpyknometerverfahren, eine bessere Abhängigkeit von der Rohddichte zur Proctordichte und zum Gesamtporenvolumen.

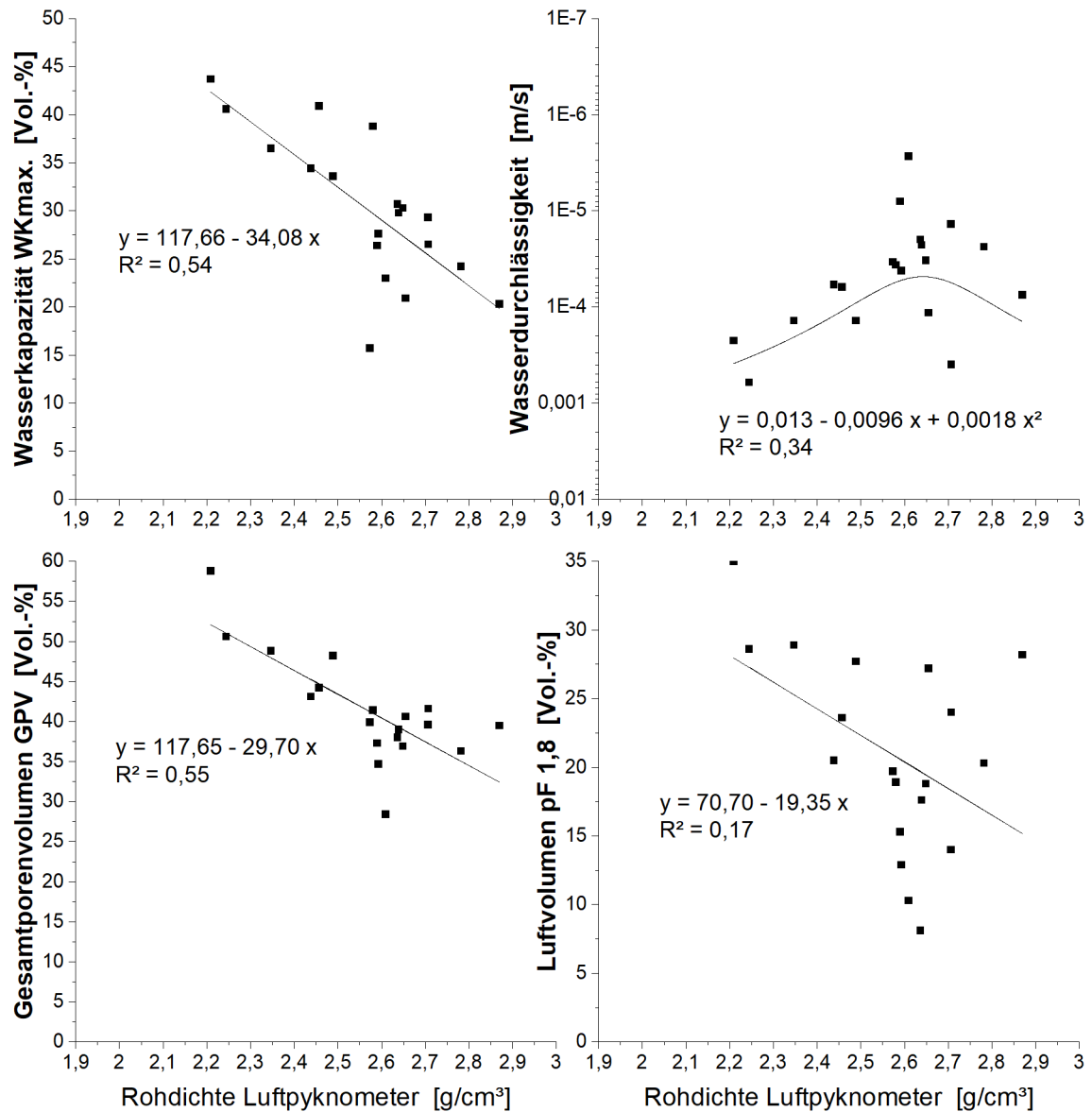


Bild 37: Regressionen der Rohdichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Luftpyknometer

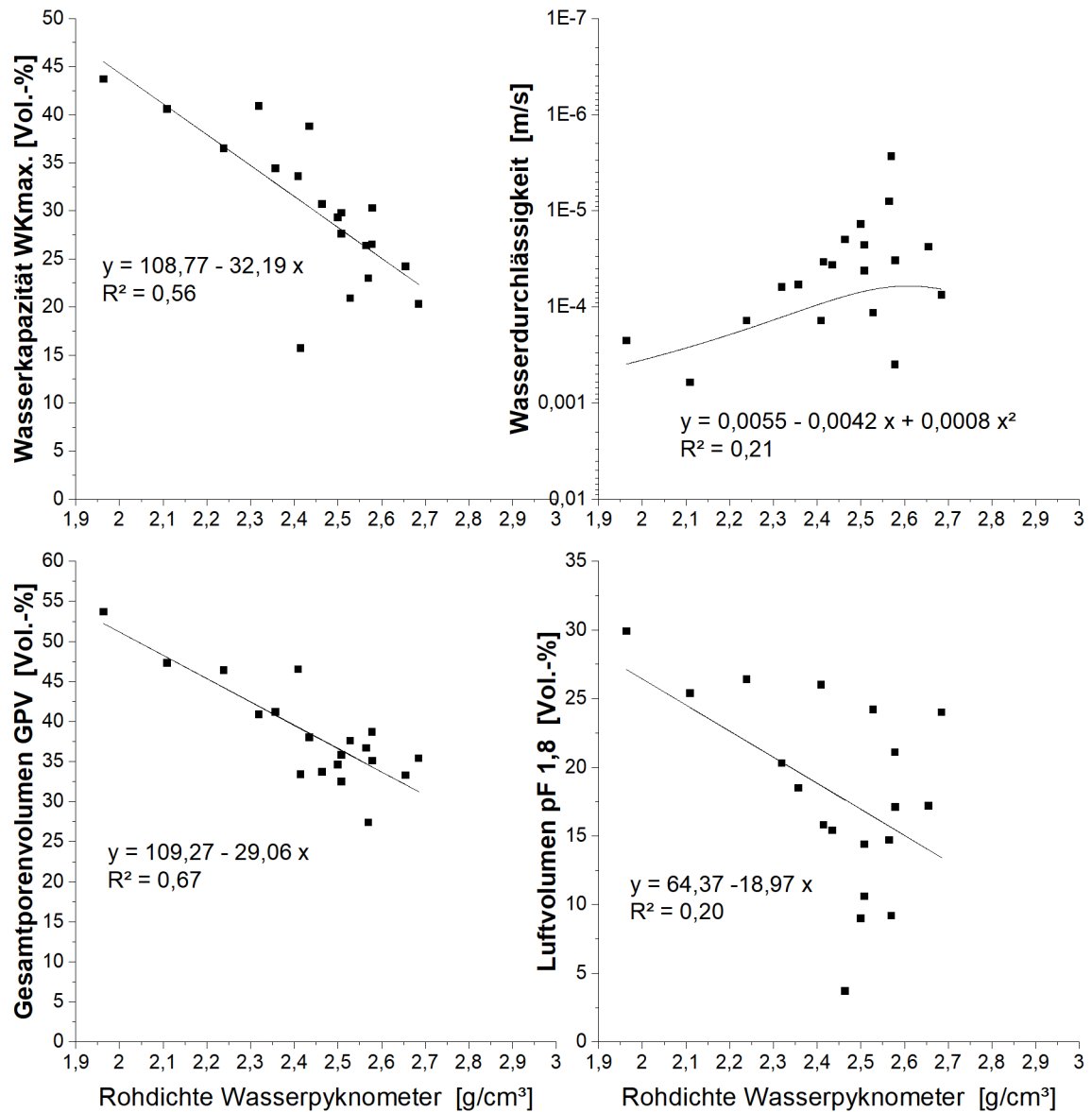


Bild 38: Regressionen der Rohdichte zum Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt – Wasserpyknometer

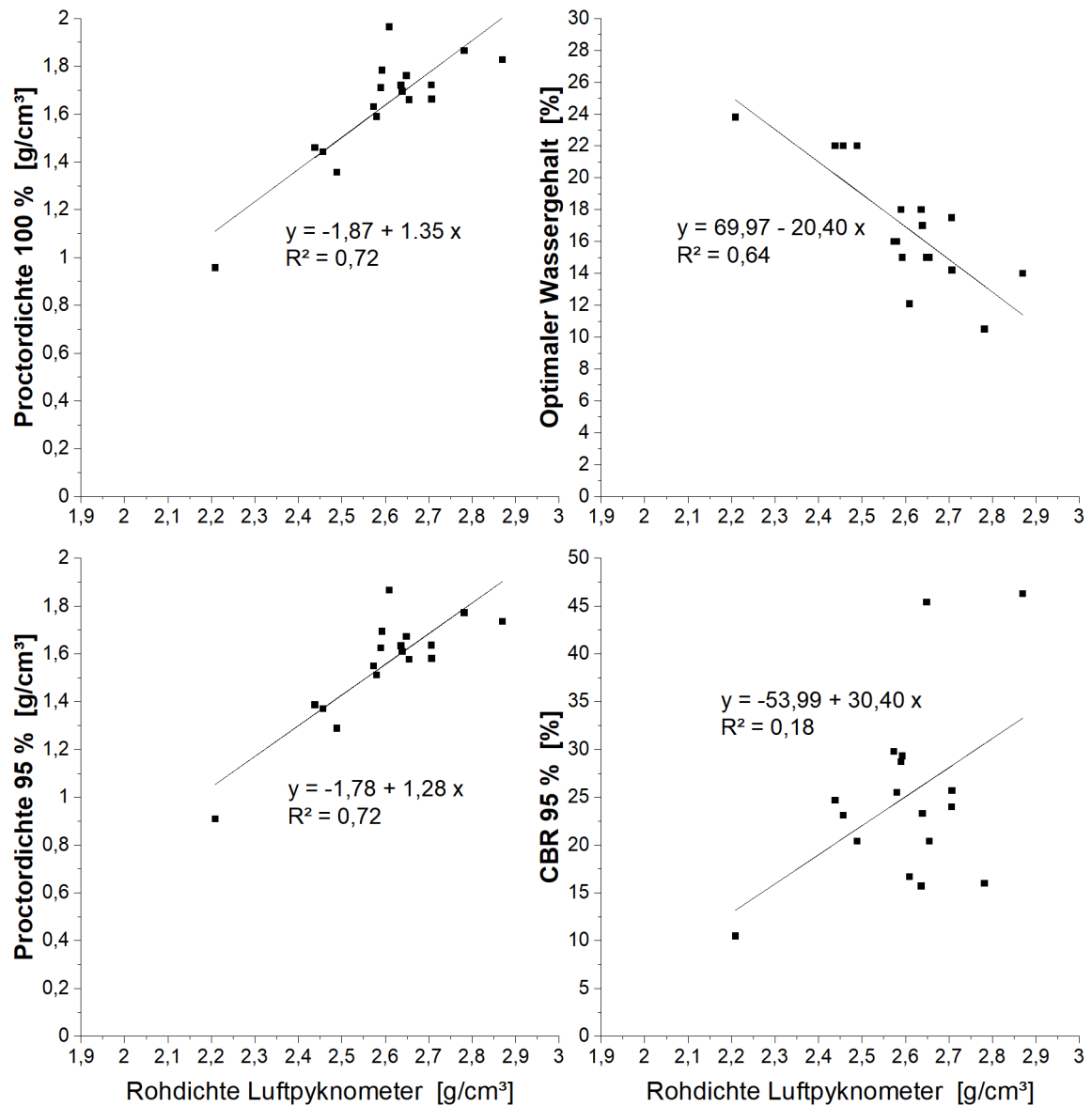


Bild 39: Regressionen der Rohdichte zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuch – Luftpyknometer

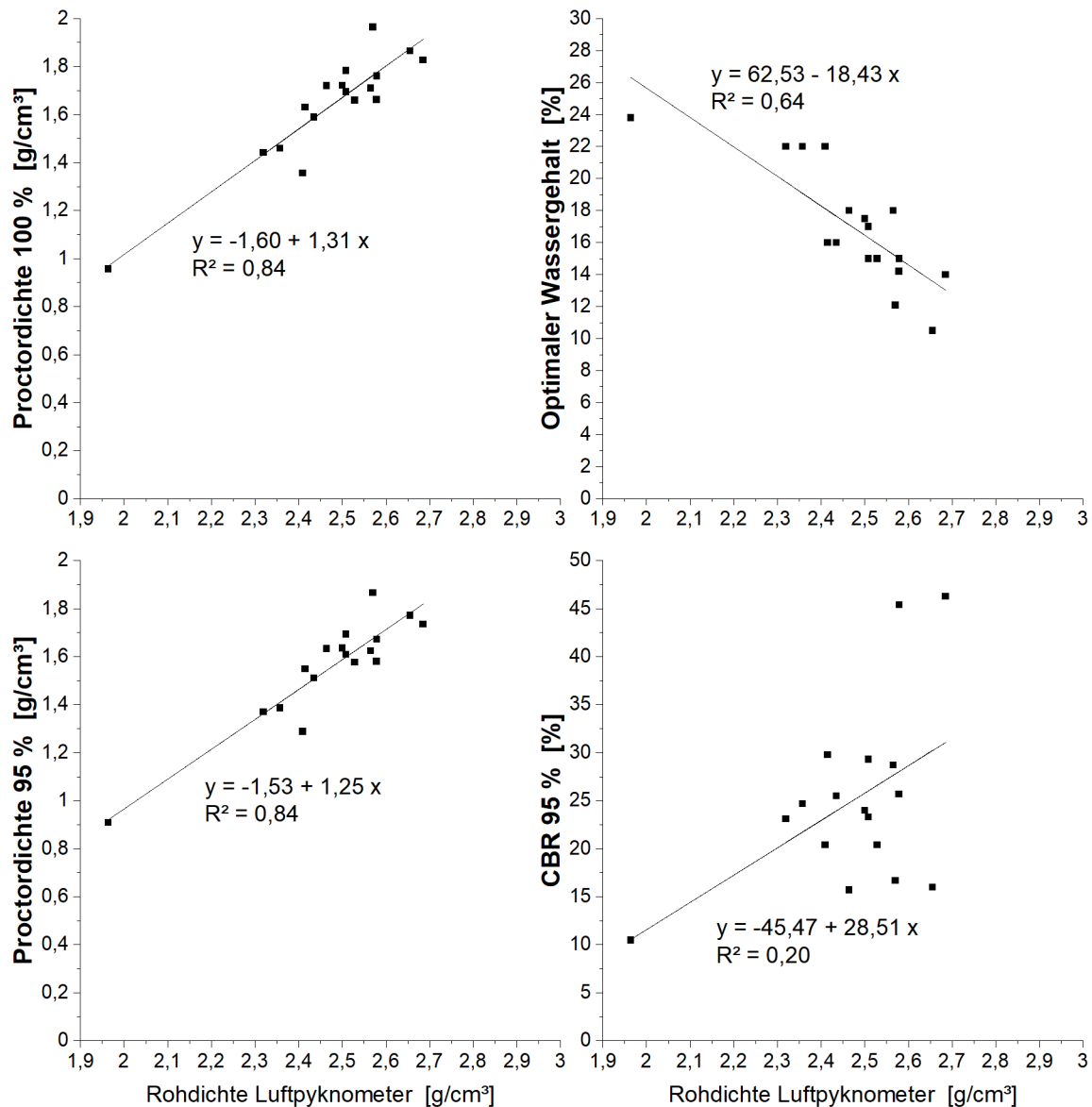


Bild 40: Regressionen der Rohdichte zu den Ergebnissen des Proctor- und CBR-Versuchs – Wassерpyknometer

Aus den fotooptischen Untersuchungen (Bilder 29 bis 32) der geprüften Baumsubstrate, insbesondere zur Kornform- und Kornformverteilung (Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis), können keine nennenswerten Abhängigkeiten zu den bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften der Baumsubstrate abgeleitet werden. Bei der Auswertung in einzelnen Kornklassen (0,063/2 mm und 2/X mm) fallen aber technische Ausreißer auf, die insbesondere bei der Prüfung des Länge-Breite-Verhältnisses der Grobkiesfraktion auftreten. Hier ist davon auszugehen, dass die geprüfte Anzahl der Partikel nicht ausreicht, um auswertbare Ergebnisse zu erzielen.

5.3 Ziegel-Gesteinskörnungen

Ziel der Aufbereitungsversuche im Technikum Weimar mit verschiedenen Ziegel-Gesteinskörnungen ist es, den Einfluss des Materials und der Verfahrensweise der Ziegel mit unterschiedlicher Rohdichte für vegetationstechnische Anwendungen zu erkennen.

Aus den ermittelten Korngrößenverteilungen mit unterschiedlichen Rotorgeschwindigkeiten des Prallbrechers und unterschiedlicher Spalteinstellung am Backenbrecher ergeben sich am Mauerziegel und Dachziegel Weimar MZ 3 WEI und DZ 3 WEI die erwarteten feinsten Korngrößenverteilungen bei höchster Rotorgeschwindigkeit des Prallbrechers und schmalster Spalteinstellung am Backenbrecher (Anlage 10, A10.1 und A10.2, Bild 64 bis Bild 67). Um einen möglichst hohen Anteil der benötigten feinen Gesteinskörnung bei der Zerkleinerung für Baumsubstrate zu erzielen, werden die weiteren Versuche an den verschiedenen Mauer- und Dachziegeln verschiedener Provenienzen und Rohdichte mit dieser Einstellung für die weiteren Untersuchungen genutzt.

Die ermittelten Bandbreiten der Korngrößenverteilung unterschiedlicher Mauer- und Dachziegel sind für diese Verfahrenseinstellung in Anlage 10, A10.3 und 10.4, Bild 68 bis Bild 71 aufgeführt. Bei Prall- wie Backenbrecher ist die Bandbreite der Korngrößenverteilung bei den untersuchten Mauerziegeln deutlich breiter als bei den untersuchten Dachziegeln. Erklärt werden kann dieser Umstand mit den höheren resultierenden Kornrohichten der Dachziegel im Vergleich zu Mauerziegeln. Die weiteren Tastversuche an ausgewählten Mauersteinen des Prallbrechers mit eckiger und runder Schlagleiste ergeben keine nennenswerten differenzierbaren Ergebnisse (Anlage 10, A10.5, Bild 72 und Bild 73).

Die Wahl des Brechers (Prallbrecher, Backenbrecher) beeinflusst die Kornrohichte (Wasserpyknometerverfahren) der unterschiedlichen Ziegel nicht systematisch (Anlage 11, A11.1, Bild 74 bis Bild 79). Es kann kein eindeutiger Zusammenhang und ggf. technischer Vorteil zwischen der Aufbereitung mit dem Prallbrecher im Vergleich zum Backenbrecher ermittelt werden.

Dasselbe Ergebnis ergibt sich bei der Bestimmung der Wasseraufnahme im Wasserpyknometerverfahren (siehe Anlage 11, A11.2, Bild 80 bis Bild 82). Auch hier liegen die ermittelten Werte im Bereich der Prüfgenaugkeit. Es kann damit kein eindeutiger Unterschied zwischen der Aufbereitung mittels Prallbrecher zu Backenbrecher erkannt werden. Die Annahme, dass ein Backenbrecher ggf. höhere Werte der Wasseraufnahme liefert, da die Aufbereitung mit dem Prallbrecher bei verfahrenstechnisch hoher Umfangsgeschwindigkeit theoretisch nahezu alle

Schwachstellen im Korninneren der Ziegelgesteinskörnung aufbricht, bestätigt sich in den Untersuchungen nicht.

Die Untersuchungsergebnisse zur Rohdichte als arithmetisches Mittel der Korngröße 2/32 mm (Wasserpyknometerverfahren) sind für alle untersuchten Mauer- und Dachziegel unabhängig von der Brecherart in der Bild 41 als Regression zur Wasseraufnahme ausgewertet. Die Abhängigkeit der Rohdichte der Ziegelgesteinskörnungen von der Korngröße und der Prüfverfahren ist aus den Anlagen 25 bis 27 erkennbar. Mit wachsender Korngröße > 4 mm wird die Rohdichte geringer. Die Werte des Luftpyknometerverfahrens liefern, wie schon bei den Baums substraten, höhere Ergebnisse bei der Bestimmung der Rohdichte.

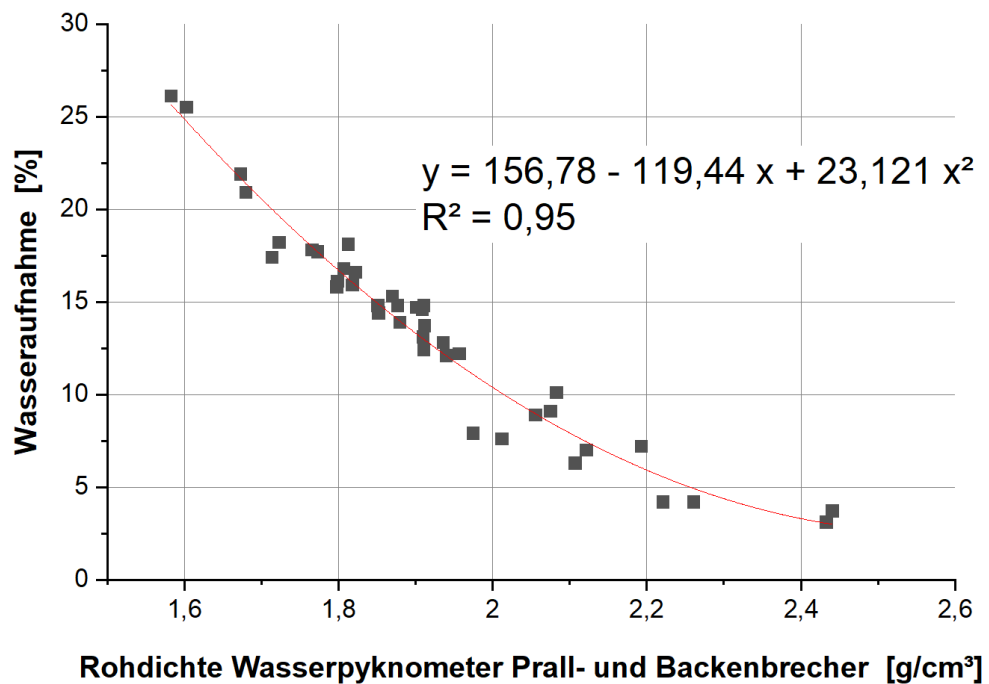


Bild 41: Regression zwischen Rohdichte Wasserpyknometer und Wasseraufnahme der Ziegel – Prall- und Backenbrecher 2/32 mm

5.4 Packungsdichteberechnungen

5.4.1 1-Stoff-System

Für die Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 wird die Packungsdichte als 1-Stoff-System mit dem speziellen Algorithmus berechnet und jeweils mit der im Wasser- und Luftpyknometer ermittelten Rohdichte multipliziert (= theoretisch maximale Einbaudichte) und dann der Proctordichte bei 100 % und 95 % gegenübergestellt (Anlage 28; fett dargestellt: Proctordichte > theoretische Einbaudichte). Als Ergebnis ergibt sich bei dieser theoretischen Berechnung, dass nahezu alle Rechenwerte bis auf BS 2 (Wasserpyknometer) erwartungsgemäß über der Proctordichte von 95 % Verdichtungsgrad liegen. Bei 100 % Proctordichte ergibt sich eine analoge Überschreitung bei BS 1 und BS 2 (Wasserpyknometer) und BS 2 (Luftpyknometer). Zurückzuführen sind diese Überschreitungen voraussichtlich auf die weniger porösen Kornanteile (Naturstein) in den Baumsubstraten BS 1 und BS 2.

Es ergeben sich die folgenden, linearen Regressionen der theoretischen Einbaudichte zur 95 %igen Proctordichte mittels Wasserpyknometer und Luftpyknometer (Bild 42 und Bild 43):

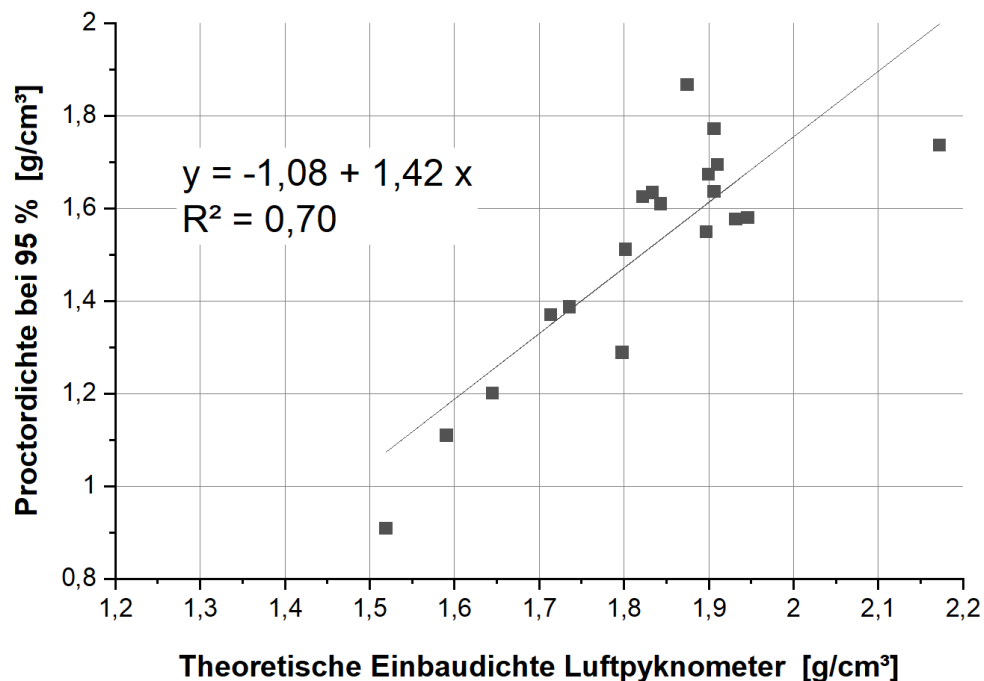


Bild 42: Regression zwischen 95 %iger Proctordichte und der theoretischen Einbaudichte – Luftpyknometer

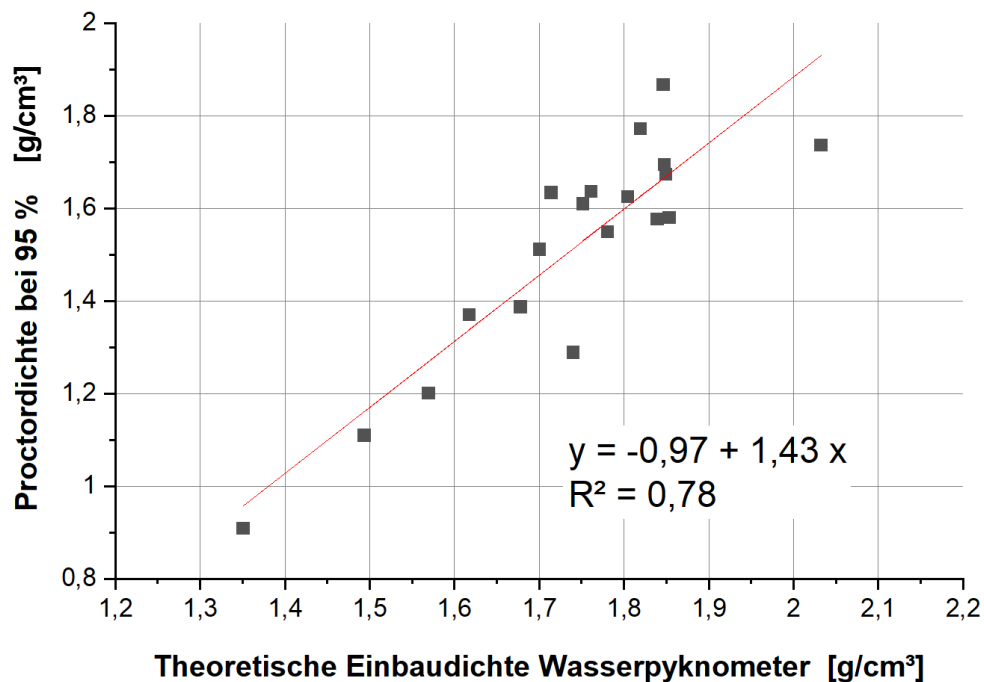


Bild 43: Regression zwischen 95 %iger Proctordichte und der theoretischen Einbaudichte – Wasseryknometer

5.4.2 2-Stoff-System

Die Korngrößenverteilungen von BS 1 bis BS 19 werden rechnerisch in die Körnungen 0/2 mm und 2/X mm zerlegt, um mit Hilfe des Packungsdichte-Rechenprogramms in einem 2-Stoff-Berechnungsverfahren das Maximum und das Minimum für die Praxisgemische zu ermitteln. So können die mögliche Spannweite und das Optimierungspotential für die Maximierung des Hohlraumgehaltes ermittelt werden. Der Trennschnitt wird bei 2 mm gelegt, um theoretisch den Anteil ≤ 2 mm als durchwurzelbaren Porenbereich zu definieren und den Bereich > 2 mm als (poröses) Stützgerüst zu nutzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Körner theoretisch aufgrund der Kornfestigkeit nicht durchwurzelt werden können.

In Bild 44 sind die Ergebnisse dieser Berechnung grafisch dargestellt. Die Packungsdichteberechnungen werden für den Bereich von 25 bis zu 75 Vol.-% des Kies- bzw. Sandgehaltes variiert. Der Maximumwert führt dabei immer als Differenz zu 100 Vol.-% zum geringsten Porengehalt des 2-Stoff-Systems.

In den Anlagen 29 und 30 sind die durchgeführten Berechnungen zur Packungsdichte in tabellarischer Form des 2-Stoff-Systems aufgeführt.

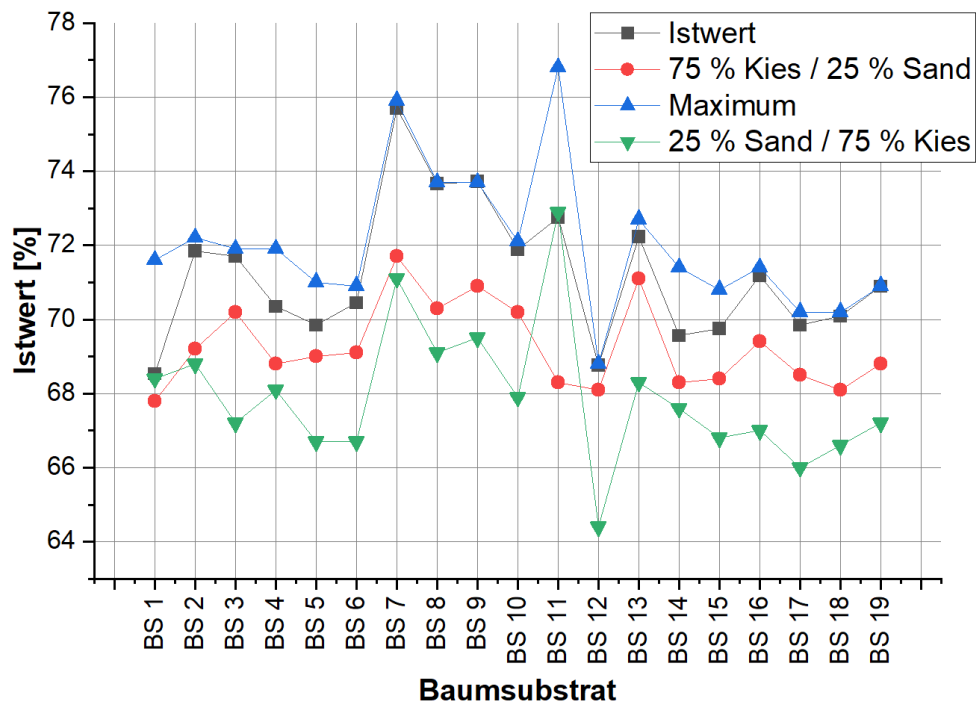


Bild 44: Packungsdichte-Minimum- und -Maximum eines 2-Stoff-Systems der untersuchten Baumsubstrate in Variation des Kies- und Sandgehaltes von 25 bis 75 Vol.-% im Vergleich zum Packungsdichte-Ist-Wert

Erwartungsgemäß erbringt die alleinige Verwendung der Fraktion 2/X mm die geringste Packungsdichte, die jedoch aufgrund anderer technischer Eigenschaften, wie der Standfestigkeit und dem Wasser- und Lufthaushalt, nicht direkt als Substrat angewendet werden kann. Der empfohlene Korngrößenanteil der Fraktion < 2 mm liegt gemäß FLL-Empfehlungen [2010] bei 39 – 75 M.-%. Damit stellt diese Spanne in der Praxis den empfohlenen empirischen Optimierungsbereich für die rechnerische Auswertung über die Packungsdichte als Anhaltspunkt dar. Für die durchgeführte rechnerische Optimierung wird ein Bereich von 25 – 75 % für den Anteil der Fraktion 0/2 mm festgelegt.

Aus dem Beispiel des Baumsubstrates BS 10 (Bild 45) ergibt sich so ein ‚Optimierungsbereich‘, der hinsichtlich der Optimierung der Packungsdichte ausgeschöpft werden kann. Eine Zunahme des Anteils 0/2 mm wird im Regelfall die Durchwurzelbarkeit des Substrates erhöhen, während eine Zunahme des Anteils 2/X mm die Standfestigkeit der Rezeptur erhöht.

Für die Baumsubstrate BS 1 – BS 19 ist das rechnerische Potential für den untersuchten Bereich für den Anteil der Fraktion 0/2 mm in den Anlagen 29 und 30 aufgeführt. Werden die rechnerisch ermittelten Maxima des 2-Stoff-Systems mit den Packungsdichten der BS 1 bis BS 19 des 1-Stoff-Systems verglichen, ist erkennbar, dass die ermittelten Werte der Praxismische bis auf BS 11 sehr eng in der Nähe der Maxima liegen. Die Anlagen zeigen das Optimierungspotential der einzelnen Substrate auf, welches als 2-Stoff-System im Bereich einer Erhöhung des Hohlraumanteils von ca. 2 bis 5 Vol.-% liegt und damit deutlich die vegetations- und bautechnischen Eigenschaften beeinflussen kann.

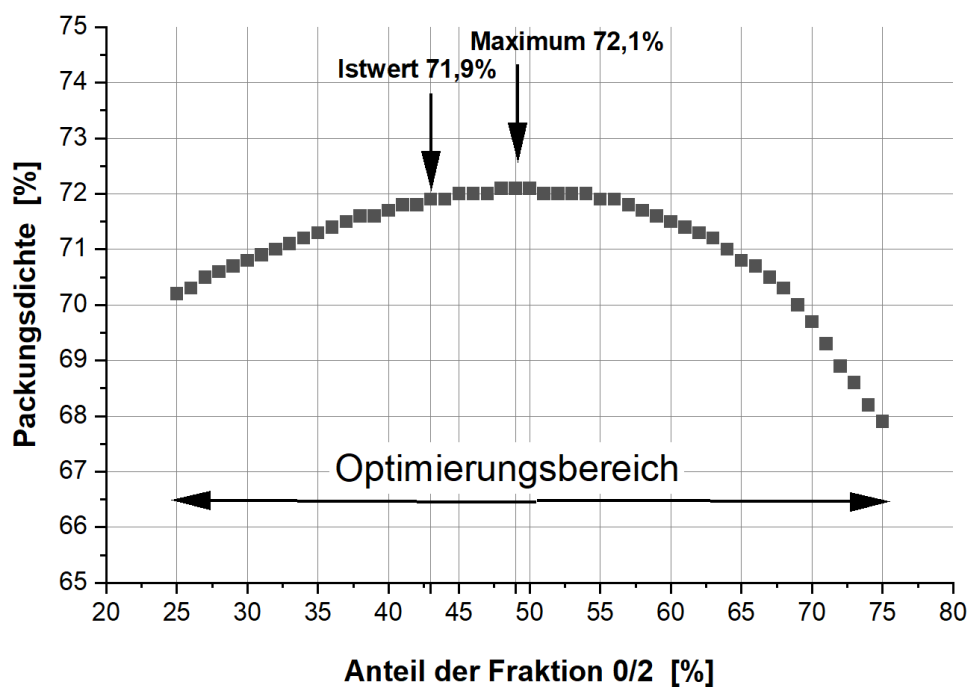


Bild 45: Packungsdichte von BS 10 als 2-Stoff-System im Vergleich zum Ist-Wert (1-Stoff-System)

6 Ergänzende Untersuchungen zur Ressourceneffektivität, Umweltverträglichkeit und Maximierung der Wasserkapazität

6.1 Allgemeines

Während der langjährigen Projektbearbeitungszeit, bei der insbesondere die Ermittlung und Auswertung der bodenphysikalischen Eigenschaften überbaubarer Baumsubstrate und aufbereiteter Ziegel im Mittelpunkt stehen, kommen weitere Fragestellungen auf, die sich aus der Klimaverschiebung mit ihren längeren Trockenphasen und der vermehrten Extremwetterereignisse und dem Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen aus Umweltsicht für den Extremstandort Straßenbaum ableiten.

In früheren Untersuchungen steht vorwiegend die Optimierung des Bodenlufthaushaltes für überbaubare Bauweisen im Mittelpunkt der Forschung und der Regelwerksarbeit. Von HEIDGER stammt aus einer früheren Veröffentlichung die Aussage ‚Luft ist das A und O‘.

Aktuell tritt wieder die Maximierung der Wasserkapazität bzw. des pflanzenverfügbaren Wassers für Bäume in den Vordergrund von Baumsubstratoptimierungen und der Bauweisen für Baumstandorte. Dabei soll der Baumstandort aber auch aus gärtnerischer Sicht pflegeleicht bleiben. Die Nutzung von Regenwasser von Dächern und Verkehrsflächen tritt damit in den Fokus neuer Bauweisen für urbane Standorte. In Abstimmung mit dem Betreuer Herrn Prof. Rinklebe wird daher im Rahmen dieser Arbeit zwei Aspekten orientierend nachgegangen, um die Arbeit abzurunden, aber auch weiteren Forschungsbedarf aufzuzeigen:

1. Ermittlung der chemischen Eigenschaften von rezyklierten Ziegeln für den Einsatz in Substraten
2. Ermittlung der Wasserspannungskurve für Baumsubstrate zum Abschätzen des pflanzenverfügbaren Wassers

6.2 Chemische Eigenschaften von rezyklierten Ziegeln

Eine mengenmäßige möglichst hohe Verwendung geeigneter rezyklierter oder auch industrieller Nebenprodukte zur Verwendung als Gesteinskörnung ist – zur Schonung und zur Effektivität natürlicher Ressourcen – ein Gebot der Stunde und der politischen und gesetzlichen Vorgaben. In Verbindung mit den Zielen zur Klimaschonung erlangen diese ehemaligen und heutigen Ziele der Kreislaufwirtschaft aktuell eine größere Bedeutung, z.B. in Form des europäischen ‚Green deals‘.

Mit der Mantelverordnung ist im August 2023 ein wichtiges einzuhaltendes Gesetzesregelwerk für die Kreislaufwirtschaft in Deutschland hierzu in Kraft getreten. In der Mantelverordnung sind die neue Bundesbodenschutzverordnung [BBodSchV 2021] und die Ersatzbaustoffverordnung [EBV 2021] enthalten. Für Baumsubstrate sind aber auch das Düngemittelrecht [z.B. DüV 2017] und das Wasserhaushaltsgesetz [WHG 2021] in aktueller Fassung von Bedeutung.

Im Rahmen des Projektes sollen daher verschiedene Ziegel aus Anlage 3 exemplarisch auf ausgewählte chemische Eigenschaften ergänzend untersucht werden. Ausgewählt werden die Mauerziegel mit der Bezeichnung:

Tabelle 13: Ausgewählte Mauerziegel und Lava-Referenz für die chemische Analytik

Nummer	Kurzbezeichnung	Stoff
Z 7	MZ 4b RO	Mauerziegel
Z 10	MZ 6 SO	Mauerziegel
Z 12	MZ 8 DO	Mauerziegel
Z 13	MZ 9 HU	Mauerziegel
L	Lava	Lava-Gesteinskörnung 0/8

Die Mauerziegel stehen als ganzer Mauerstein zur Verfügung und werden vorab in einem Laborbackenbrecher in die Körnung 0/8 mm zerkleinert. Als Referenz wird eine natürliche Gesteinskörnung aus Lava 0/8 mm aus der Eifel verwendet und ebenfalls analysiert. Die Untersuchungen erfolgen dankenswert in Doppelbestimmung im Bodenlabor der Bergischen Universität Wuppertal.

Analysiert werden die fünf Proben auf folgende chemische Parameter:

- pH-Wert
- elektrische Leitfähigkeit
- Kohlenstoffgehalt
- Carbonatgehalt
- Nährstoffgehalt
- anorganische Schadstoffe bzw. Spurenelemente

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit werden nach VDLUFA-Methoden bestimmt. Der totale Kohlenstoff (Ct) wird mit dem Kohlenstoff-Stickstoff-Analysator (C/N-Analyzer, <https://www.boden.uni-wuppertal.de/de/labor/laborgeraete.html>) bestimmt. Die Karbonat-Ergebnisse werden mit der Scheibler-Apparatur (Standardverfahren) bestimmt. Die Analyse der anorganischen Schadstoffe bzw. Spurenelemente erfolgt mittels ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss.

Es ergeben sich folgende Ergebnisse (Mittelwerte aus zwei Bestimmungen) im Vergleich zur Kennzeichnungspflicht der Düngemittelverordnung [DüV, 2017 mit Anlage 2] bzw. der Bundesbodenschutzverordnung [BBodSchV, 2021]:

Tabelle 14: Ergebnisse für pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Kohlenstoff- und Carbonatgehalt

Parameter	Einheit	Z 7	Z 10	Z 12	Z 13	L	Kennzeichnung ab [DüV 2017]
		MZ 4b RO	MZ 6 SO	MZ 8 DO	MZ 9 HU	Lava	
pH-Wert	--	7,75	8,95	7,55	9,95	7,5	K
e. Leitfähigkeit Lf	[µS/cm]	163	75	56,5	164	80,5	--
Kohlenstoff TC	[%]	2,19	0,59	0,50	0,61	0,64	--
Carbonat	[g/kg]	103,73	1,39	0,32	9,53	1,09	--

K = Kennzeichnung

Tabelle 15: Ergebnisse für die Hauptnährstoffe

Element	Einheit	Z 7	Z 10	Z 12	Z 13	L	Kennzeichnung ab [DüV 2017]
		MZ 4b RO	MZ 6 SO	MZ 8 DO	MZ 9 HU	Lava	
im Eluat							
Calcium Ca	[mg/l]	110,4	18,1	6,3	98,6	103,4	--
Phosphor P	[mg/l]	5,5	1,2	1,7	6,6	5,4	
Magnesium Mg	[mg/l]	174,3	2,4	1,8	68,7	405,7	--
Kalium K	[mg/l]	135,3	2,4	1,8	55,7	392,8	--
im Feststoff							
Calcium Ca	[mg/kg]	9198,0	1505,7	522,6	8188,5	8583,2	--
Phosphor P	[mg/kg]	459,2	100,9	144,9	544,3	445,3	0,1 % TM P ₂ O ₅
Magnesium Mg	[mg/kg]	14526,7	199,1	148,2	5705,6	33667,8	0,1 % TM
Kalium K	[mg/kg]	11274,9	199,1	149,9	4622,1	32599,5	0,1 % TM K ₂ O

Tabelle 16: Ergebnisse für Nährstoffe, anorganische Schad- und Spurenelemente

Element	Einheit	Z 7	Z 10	Z 12	Z 13	L	Anforderung/ Vorsorgewert Boden (Sand) [BBodSchV 2021]
		MZ 4b RO	MZ 6 SO	MZ 8 DO	MZ 9 HU	Lava	
im Eluat							
Silber Ag	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Aluminium Al	[mg/l]	553,6	20,2	12,5	265,4	682,8	
Arsen As	[mg/l]	-0,3	0,0	0,0	0,0	-0,4	
Cadmium Cd	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Cobalt Co	[mg/l]	0,1	0,0	0,0	0,1	0,4	
Chrom Cr	[mg/l]	0,5	0,1	0,1	0,4	1,1	
Kupfer Cu	[mg/l]	0,2	0,0	0,1	0,1	1,0	
Eisen Fe	[mg/l]	335,0	67,5	151,7	197,4	674,0	
Mangan Mn	[mg/l]	5,3	1,1	1,9	3,5	8,5	
Molybdän Mo	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nickel Ni	[mg/l]	0,2	0,0	0,1	0,2	0,9	
Blei Pb	[mg/l]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
Schwefel S	[mg/l]	13,5	0,3	0,3	2,1	1,0	
Antimon Sb	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Zinn Sn	[mg/l]	0,0	0,3	0,9	0,0	0,0	
Thallium Tl	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Vanadium V	[mg/l]	0,5	0,0	0,0	0,3	1,5	
Zink Zn	[mg/l]	1,1	0,3	0,8	0,6	0,5	
Selen Se	[mg/l]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
im Feststoff							
Silber Ag	[mg/kg]	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	
Aluminium Al	[mg/kg]	46135,8	1676,5	1039,8	22043,6	56661,1	
Arsen As	[mg/kg]	-22,4	0,8	0,4	-2,7	-37,3	≤ 10
Cadmium Cd	[mg/kg]	0,2	0,0	0,0	0,1	-0,1	≤ 0,4
Cobalt Co	[mg/kg]	10,1	1,4	2,9	5,5	32,0	
Chrom Cr	[mg/kg]	41,1	8,9	7,0	31,5	94,2	≤ 30
Kupfer Cu	[mg/kg]	12,8	2,5	4,4	7,6	79,8	≤ 20
Eisen Fe	[mg/kg]	27916,7	5618,6	12612,3	16396,6	55932,2	
Mangan Mn	[mg/kg]	441,5	87,8	155,3	290,5	709,3	
Molybdän Mo	[mg/kg]	-1,0	-1,0	-1,1	-1,0	-1,0	
Nickel Ni	[mg/kg]	20,6	2,9	4,7	16,3	77,9	≤ 15
Blei Pb	[mg/kg]	11,4	0,2	0,0	1,9	1,0	≤ 40
Schwefel S	[mg/kg]	1123,0	21,2	22,2	172,5	81,1	
Antimon Sb	[mg/kg]	0,9	0,1	-0,3	-0,4	2,5	
Zinn Sn	[mg/kg]	2,6	25,4	73,5	0,2	0,0	
Thallium Tl	[mg/kg]	-3,3	-1,5	-1,6	-1,3	-4,1	≤ 0,5
Vanadium V	[mg/kg]	42,6	2,2	3,6	24,2	126,5	
Zink Zn	[mg/kg]	90,5	21,3	70,3	51,1	45,1	≤ 60
Selen Se	[mg/kg]	-2,6	-1,7	-2,8	-1,5	-3,0	

6.3 Wasserspannungskurve von Baumsubstraten

Wasserspannungskurven von Baumsubstraten können nur mit einem zeitlich hohen Aufwand im Labor mit verschiedenen Verdichtungsgraden erstellt werden. Im Regelwerk erfolgt eine Beschränkung für Baumsubstrate daher auf die Bestimmung der Luftkapazität bei $pF_{1,8}$, verzichtet wird damit bewusst auf die Erstellung vollständiger Wasserspannungskurven. Wasserspannungskurven können aber einen Hinweis zur Verteilung der Poren im verdichteten Baumsubstrat in einem weiten Bereich oder zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Wassers liefern (vergleiche mit Bild 2):

- weite Grobporen (Luftkapazität) bei $pF_{1,8}$ untersucht bei -60 hPa
- enge Grobporen bei $pF_{1,8}$ bis $pF_{2,4}$ untersucht bei -300 hPa
- Mittelporen bei $pF_{2,4}$ bis $pF_{4,2}$ untersucht bei -15000 hPa
- Feinporen bei $> pF_{4,2}$

Der Anteil der weiten Grobporen ist wichtig für die Bestimmung der Luftkapazität und damit für die Ableitungsfähigkeit von Wasser in der Pflanzgrube. Der Anteil an Mittelporen ist ein Maß für die Speichermöglichkeit von pflanzenverfügbarem Wasser, um Trockenzeiten besser zu überstehen. Je höher der Mittelporenanteil, desto mehr Wasser kann ein Baumsubstrat bei Niederschlägen für die Versorgung der Bäume speichern und so dem Baum zur Verfügung stellen.

Da der Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt heute gemäß FLL für Baumsubstrate [FLL, 2010] am ‚großen Prüfkörper‘ mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 120 mm geprüft wird, liegt es nahe, diese Prüfkörper mit einem Volumen von mehr als 2.000 cm³ auch für die Bestimmung der Porengrößenverteilung zu nutzen. Dabei ist die Vorgehensweise für die Bestimmung der Luftkapazität = weite Grobporen bei $pF_{1,8}$ in der Prüfvorschrift [FLL, 2010] schon enthalten und muss lediglich um weitere pF -Druckstufen erweitert werden.

Zur Verfügung stehen drei mögliche Prüfmethoden:

- Überdruckmethode in Anlehnung an [HARDGE, HORN, 1989], beschrieben in [FLL 2010]
- Unterdruckmethode, pF -Prüfanlage ecoTech [ecoTech 2021],

die kombiniert bei einem Baumsubstrat angewendet werden. Ziel ist es bei dieser ersten Testreihe, ein überbaubares Baumsubstrat bezüglich des Bodenwasser- und Bodenlufthaushaltes in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad umfassender beschreiben zu können.

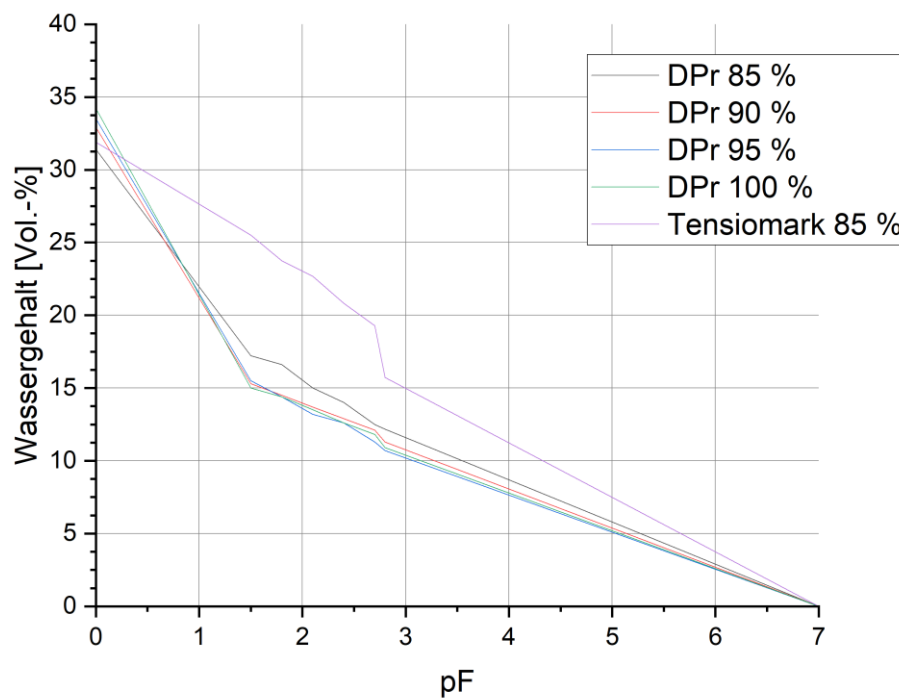


Bild 46: Porengrößenverteilung der Substrate aus [Kurkowski, Tobias, 2022]

Erste Ergebnisse solcher ermittelten Wasserspannungskurven in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sind in Bild 46 [KURKOWSKI, TOBIAS, 2022] enthalten.

Die ermittelten Wasserspannungskurven sind dabei ähnlich zu sandigen Böden zu bewerten, wobei der Luftgehalt mit steigendem Verdichtungsgrad ähnlich zu Böden sinkt. Bei weitergehenden Bewertungen, z.B. zur pflanzenverfügbaren Wasserkapazität, ist zu berücksichtigen, dass die Definitionen aus der Bodenkunde zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden und hier aus Baumsubstraten auf Basis von Untersuchungen an Sonnenblumen abgeleitet und definiert werden. Eine direkte Übertragung auf Bäume ist daher nur bedingt brauchbar, wenn nicht sogar falsch.

7 Modellbildung

7.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein praxisnahes Ingenieurmodell für die Konzeption und Optimierung von überbaubaren Baumsubstraten (Vegetationstragschichten) auf Basis der durchgeführten Untersuchungen aufgezeigt, welches auch auf andere vegetationstechnische Aufgabenstellungen übertragen und so verallgemeinert werden kann. Das Modell kann künftig die Reduzierung von empirischen Versuchen zur Optimierung von Vegetationsbaustoffen in der Vegetationstechnologie ermöglichen.

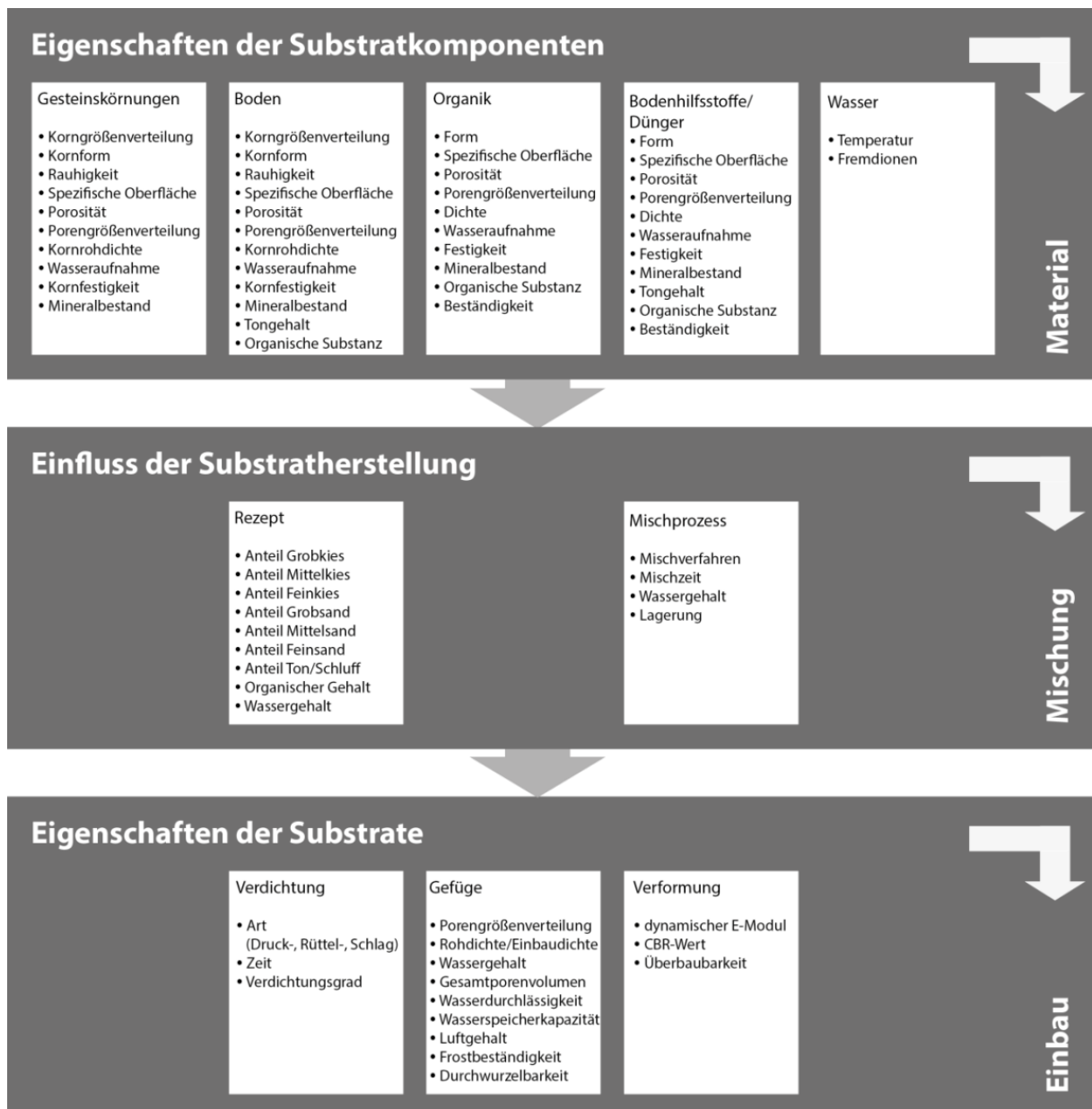


Bild 47: Einflussgrößen von Vegetationssubstraten auf die bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften (erweitert nach HEIDGER in Anlehnung von EDEN)

Die von HEIDGER, u.a. in [HEIDGER, KURKOWSKI, 2002], aufgezeigten Einflussparameter Material, Mischung, Einbau erzeugen aufgrund ihrer Vielfalt und

zahlreicher Wechselwirkungen ein komplexes System mit einzelnen Einflussparametern bezüglich der bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften (Bild 47). In dieser Zusammenstellung sind weitere Ziele oder Parameter zur Optimierung von Baumsubstraten, z.B. zur Nachhaltigkeit und des Klimaschutzes, noch nicht enthalten, können aber sicherlich ergänzt werden.

Das Modell mündet in einer Stoffraumrechnung, die erstmals anwendungstechnisch von der Konzeptionierung von Leichtbeton/Normalbeton auf die Vegetationstechnologie übertragen wird.

Die Stoffraumrechnung für Normalbeton unter Verwendung gefügedichter Gesteinskörnungen ist für den einfachsten Fall als ‚4-Stoff-System‘ – Gesteinskörnung, Zement, Wasser, Luft – wie folgt definiert:

$$V_{ges} = V_{GK} + V_Z + V_W + P$$

mit:

V_{ges}	Volumen des Betons in [dm ³]
V_{GK}	Volumen der Gesteinskörnungen (Feststoff) in [dm ³]
V_W	Volumen des Wassers in [dm ³]
V_Z	Volumen des Zementes in [dm ³]
P	Volumen des Luftgehaltes in [dm ³]

Ersetzt man das Volumen durch die Masse und Rohdichte, ergibt sich:

$$V_{ges} = \frac{m_{GKi}}{\rho_{GKi}} + \frac{m_Z}{\rho_Z} + \frac{m_W}{\rho_W} + P$$

mit:

V_{ges}	Volumen des Betons in [dm ³]
i	Zählindex (i = 1 bis n)
m_{GKi}	Masse der jeweiligen (dichten) Gesteinskörnung in [kg]
m_Z	Masse des Zementes in [kg]
m_W	Masse des Wassers in [kg]
ρ_{GKi}	Rohdichte der jeweiligen (dichten) Gesteinskörnung in [kg/dm ³]
ρ_Z	Rohdichte des Zementes in [kg/dm ³]
ρ_W	Rohdichte des Wassers in [kg/dm ³]
P	Luftgehalt in [dm ³]

Für den Bereich der Vegetationstechnik ergibt sich ein 4-Stoff-System, bestehend aus Gesteinskörnung, Wasser, Luft und organischer Substanz. Für die Konzeptionierung und Optimierung von Vegetationsbaustoffen muss die Gesteinskörnung in gefügedichte (z.B. Boden) und gefügeoffene, leichte (poröse) Gesteinskörnungen (z.B. Lava, Bims, Ziegel, Kalksandstein) unterteilt werden. Das Modell der Stoffraumrechnung für Vegetationsbaustoffe orientiert sich daher an der Stoffraumrechnung für einen gefügedichten (konstruktiven) Leichtbeton unter Verwendung leichter Gesteinskörnungen. Der Begriff ‚leichte Gesteinskörnungen‘ aus

der Betontechnik wird vegetationstechnisch in dieser Arbeit durch ‚poröse Gesteinskörnung‘ ersetzt. In der Betontechnologie ist der konstruktive Leichtbeton definiert als Beton mit einer Trockenrohdichte unter 2000 kg/m^3 . Er wird ähnlich wie Normalbeton eingesetzt und konzeptioniert, wobei die Verwendung leichter Gesteinskörnungen im Betonkonzept die geringere Trockenrohdichte im Vergleich zu Normalbeton bewirkt. Dagegen werden haufwerksporige Leichtbetone in betontechnischen Produkten, wie z.B. Wandbausteinen, verwendet. Hier liegen die Trockenrohdichten bei kleiner 1000 kg/m^3 . Durch gezieltes Auslassen oder Reduzieren einzelner Korngruppen beim Aufbau der Korngrößenverteilung oder den Einsatz nur einer Korngruppe (‚Einkornbeton‘) entsteht ein ‚Haufwerk‘. Das Haufwerk wird mit so wenig Zementleim verkittet, der gerade ausreicht, um die Gesteinskörner zu umhüllen, aber die Zwickel im Haufwerk noch frei bleiben.

Im Gegensatz zu Beton, welcher nach der Erhärtung des Bindemittels über ein starres Gefüge verfügt, bildet die Struktur einer verdichteten Vegetationstragschicht noch ein veränderliches System. Das veränderliche System zeichnet sich durch den Austausch von Luft, Wasser und das Wurzelwachstum aus.

7.2 Stoffraumrechnung für Vegetationstragschichten

Es ergibt sich folgende Stoffraumrechnung für eine Vegetationstragschicht (Vegetationsbaustoff):

$$V_{ges} = \frac{m_{GKi}}{\rho_{GKi}} + \frac{m_{PGKi}}{\rho_{PGKi}} + \frac{m_{Wi}}{\rho_{Wi}} + \frac{m_{OS}}{\rho_{OS}} + P_P$$

mit:

V	Volumen des Vegetationsbaustoffs in $[\text{dm}^3]$
i	Zählindex ($i = 1$ bis n)
m_{GKi}	Masse (ofentrocken) der jeweiligen (dichten) Gesteinskörnung in $[\text{kg}]$
m_{PGKi}	Masse (ofentrocken) der jeweiligen (porösen) leichten Gesteinskörnung in $[\text{kg}]$
m_{Wi}	Masse des jeweiligen Wassergehaltes der Gesteinskörnungen und der organischen Substanz in $[\text{kg}]$
m_{OS}	Masse der organischen Substanz in $[\text{kg}]$
ρ_{GKi}	Rohdichte (ofentrocken) der jeweiligen (dichten) Gesteinskörnung in $[\text{kg}/\text{dm}^3]$
ρ_{PGKi}	Rohdichte (ofentrocken) der jeweiligen (porösen) leichten Gesteinskörnung in $[\text{kg}/\text{dm}^3]$
ρ_{Wi}	Rohdichte des jeweiligen Wassergehaltes der Gesteinskörnungen und der organischen Substanz in $[\text{kg}/\text{dm}^3]$
ρ_{OS}	Rohdichte der organischen Substanz $[\text{kg}/\text{dm}^3]$
P_P	Luftgehalt des Primärporensystem – ohne die Porenanteile der porösen Gesteinskörnungen und der organischen Substanz – des definiert verdichteten Vegetationsbaustoffs in $[\text{dm}^3]$

Das folgende Bild 48 verdeutlicht das Modell grafisch.

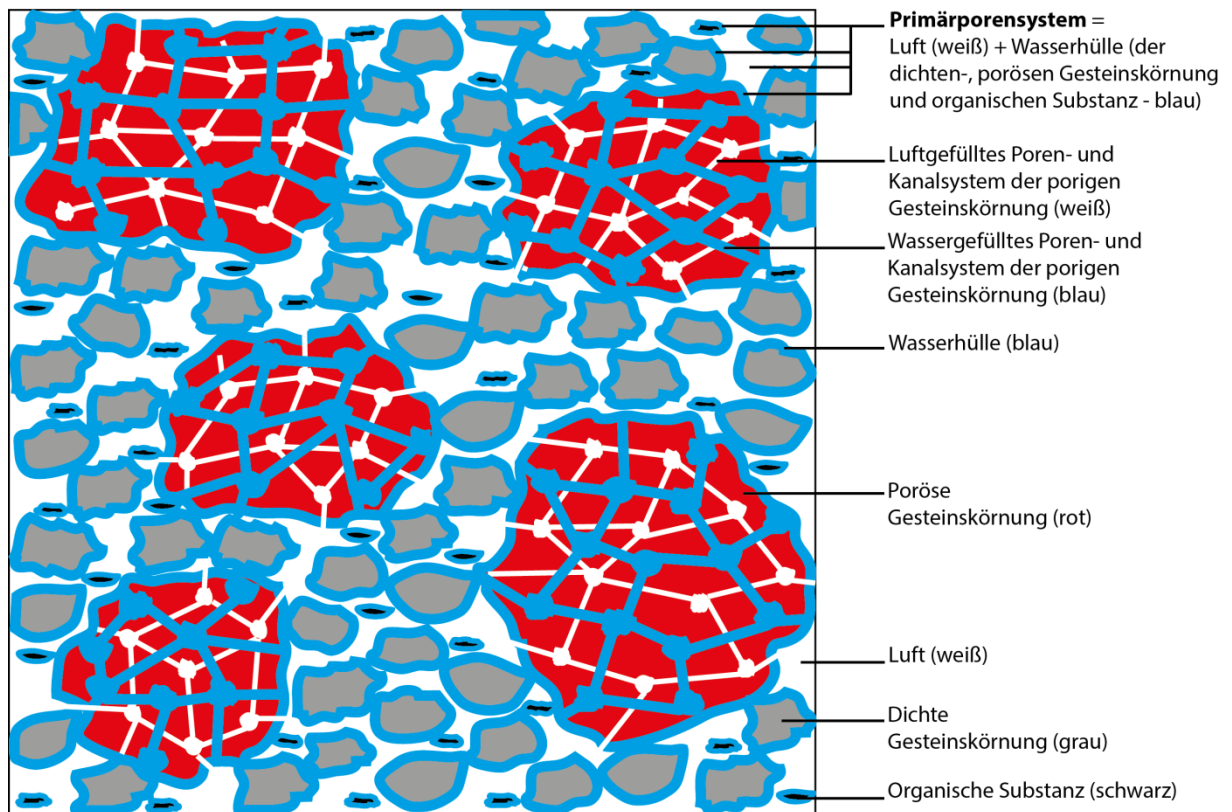


Bild 48: Vegetationstechnisches Modell für Vegetationstragschichten (überbaubare Baumsubstrate)

Das Modell setzt dabei voraus, dass in überbaubaren Baumsubstraten dichte und poröse Gesteinskörnungen sowie organische Substanz verwendet werden und diese einer definierten Verdichtung unterzogen werden. Dabei ergibt sich ein Primärporensystem, welches mit Wasser und/oder Luft gefüllt sein kann. Die Wasserhülle umgibt die organische Substanz und die Oberfläche der dichten und porigen Gesteinskörnungen. Die porösen Gesteinskörnungen sind durch eine innere Permeabilität gekennzeichnet, die zur weiteren Luft- und Wasserspeicherung des Primärporensystems beiträgt. Die wasserzugänglichen Poren, wie auch die wasserführenden Porenkanäle des korninneren Porensystems, sind in der porösen Gesteinskörnung aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers dabei größer als bei Zutritt von Luft. Im Korninneren der porösen Gesteinskörnung ist daher auch ein nur für Luft zugängliches Porensystem vorhanden.

Es ergeben sich zwei Extremfälle im Modell:

- Alle Primärporen sowie die wasserzugänglichen Poren der porösen Gesteinskörnung sind mit Wasser gefüllt.
- Das gesamte Primärporensystem, inklusive aller im Korninneren vorhandenen Poren der porösen Gesteinskörnung und der organischen Substanz, sind mit Luft gefüllt (vollständige Austrocknung).

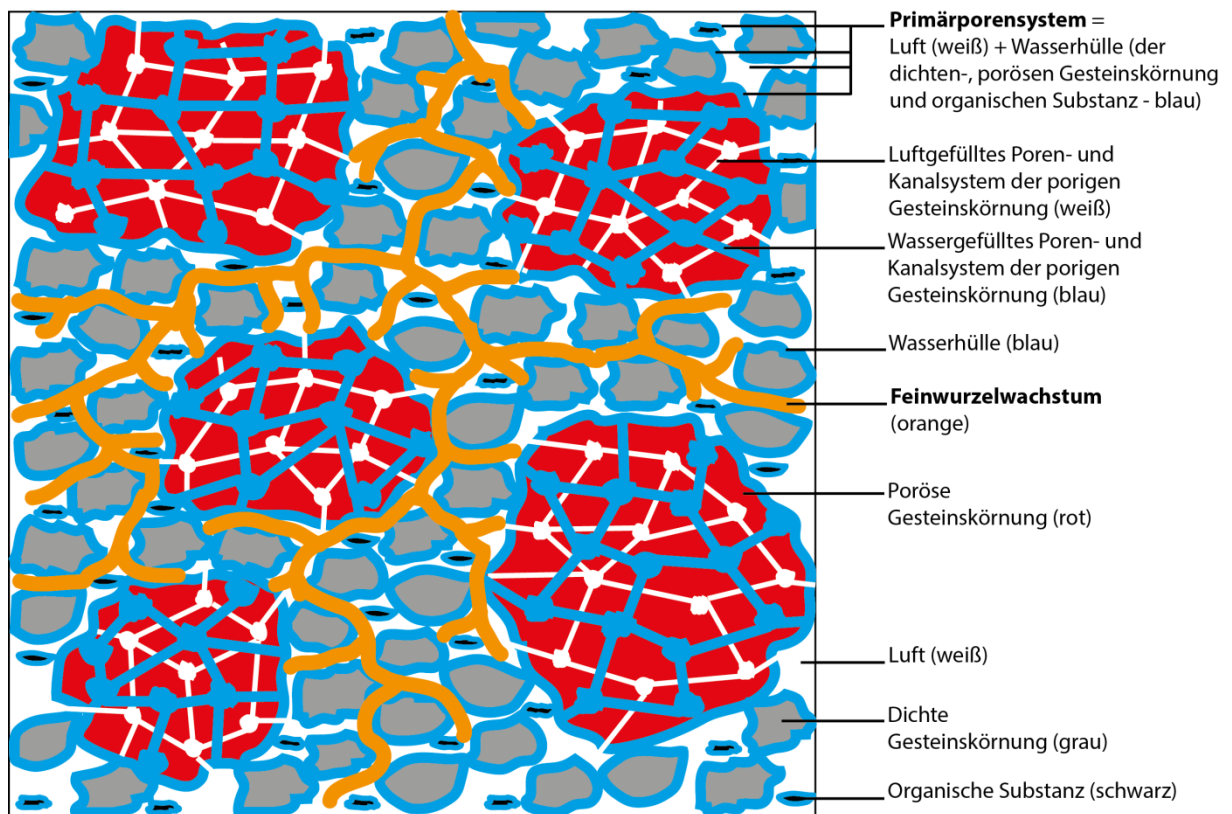


Bild 49: Vegetationstechnisches Modell für Vegetationstragschichten (überbaubare Baumsubstrate) mit Darstellung des Feinwurzelsystems

Bild 49 ergänzt das Modell um ein mögliches Feinwurzelsystem im Bereich der Grobporen des Primärporensystems. Dabei wird davon ausgegangen, dass die dichten und porösen Gesteinskörnungen aufgrund einer ausreichenden Kornfestigkeit nicht durchwurzelt werden können und nur das Grob- und das Mittelporensystem des Primärporensystems für eine Durchwurzelbarkeit zur Verfügung stehen. Grundsätzlich kann so durch den Einsatz poröser Gesteinskörnungen der Luft- und Wasserhaushalt von Vegetationstragschichten gesteuert, beeinflusst und gesteigert werden. Der teilweise oder vollständige Austausch der dichten Gesteinskörnung (z.B. aus Boden) wirkt sich dabei vegetationstechnisch positiv aus.

Die Verwendung poröser Gesteinskörnungen erhöht das Gesamtporenvolumen (GPV) und verändert den Wasser- und Lufthaushalt der Vegetationsbaustoffe, wie die maximale Wasserkapazität $WK_{max.}$, die Wasserdurchlässigkeit und den Luftgehalt bei $pF_{1,8}$ für die Grobporen.

Der Luftgehalt im Primärporensystem – ohne Berücksichtigung der Porenanteile der porösen Gesteinskörnungen und der organischen Substanz – kann dabei mit Hilfe von Packungsdichtealgorithmen berechnet und optimiert werden. Die allgemein definierte Porosität ε entspricht dabei dem vegetationstechnischen Gesamtporenvolumen (GPV).

Unter Anwendung von Packungsdichtealgorithmen kann das Primärporensystem für vegetationstechnische Untersuchungen berechnet werden und stellt somit keine Unbekannte mehr dar. Mit der zusätzlichen Berücksichtigung des Einsatzes von porösen Gesteinskörnungen ergibt sich das Gesamtporenvolumen (GPV) mit Berücksichtigung der Porenvolumen der porösen Gesteinskörnungen und der organischen Substanz.

$$GPV = 1 - \Phi + PV_{PGi} + PV_{OS}$$

mit:

GPV Gesamtporenvolumen in Vol.-%

Φ Packungsdichte in Vol.-%

PV_{PGi} Porenanteile der porösen Gesteinskörnungen in Vol.-%

PV_{OS} Porenanteil der organischen Substanz

Die ermittelte Vorgehensweise für die Stoffraumrechnung Vegetationstechnik ist in Bild 50 dargestellt und wird im folgenden Fallbeispiel exemplarisch erläutert.

Stoffraumrechnung Vegetationstechnik

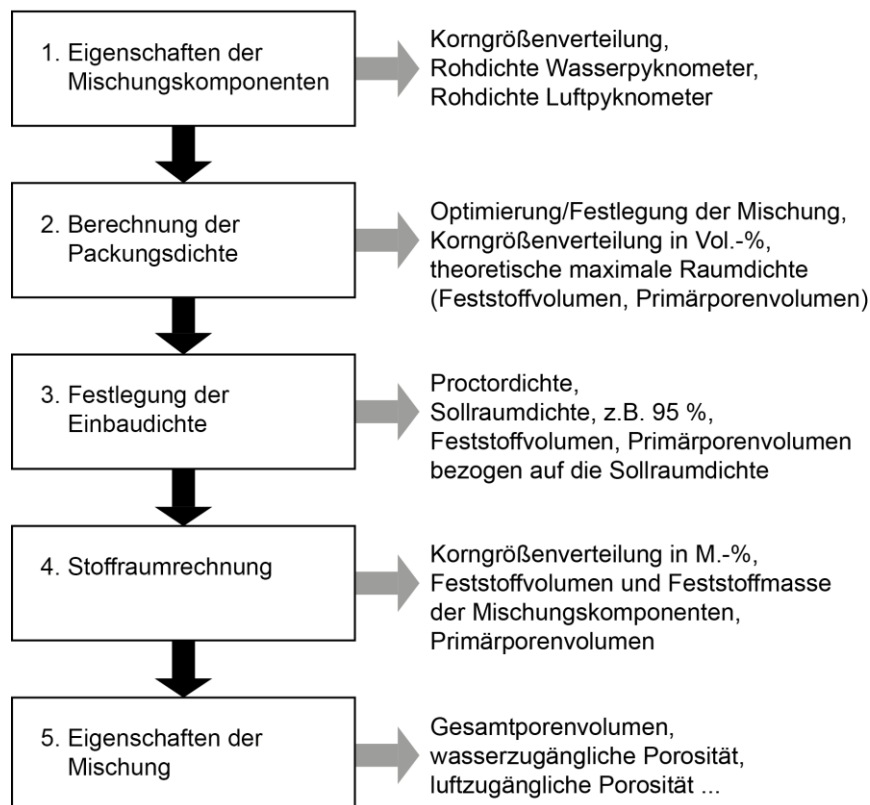


Bild 50: Vorgehensweise bei der Stoffraumrechnung Vegetationstechnik

7.3 Fallbeispiel Stoffraumrechnung Vegetationsbaustoffe

7.3.1 Eigenschaften der Mischungskomponenten

Als Fallbeispiel wird eine 3-Komponentenmischung aus Ziegel (0/8 mm und 8/16 mm) und einem sandigen Boden (0/2 mm) berechnet. Dazu wird im ersten Schritt die Korngrößenverteilung der drei Stoffe ermittelt (Tabelle 17 und Bild 51). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Rohdichte der Einzelkomponenten identisch ist. Es gilt daher M.-% = Vol.-%.

Tabelle 17: Korngrößenverteilung der Mischungskomponenten

Mischungskomponenten		Stoff 1		Stoff 2		Stoff 3	
		Ziegel 0/8 mm		Ziegel 8/16 mm		Boden 0/2 mm	
Korngröße [mm]		Anteil	Durchgang	Anteil	Durchgang	Anteil	Durchgang
von	M.-%	M.-%		M.-%		M.-%	
31,5	45	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
20	31,5	0,0	100,0	0,0	100,0	2,0	100,0
16	20	0,0	100,0	5,1	100,0	1,0	98,0
8	16	12,6	100,0	90,8	94,9	3,1	97,0
6,3	8	8,6	87,4	0,7	4,1	0,8	93,9
4	6,3	14,9	78,8	0,3	3,4	1,2	93,1
2	4	17,7	63,9	0,1	3,1	2,0	91,9
1	2	14,2	46,2	0,2	3,0	12,6	89,9
0,5	1	9,2	32,0	0,4	2,8	15,2	77,3
0,25	0,5	7,6	22,8	0,6	2,4	20,3	62,1
0,125	0,25	3,8	15,2	0,4	1,8	13,3	41,8
0,063	0,125	2,3	11,4	0,4	1,4	6,2	28,5
<	0,063	9,1	9,1	1,0	1,0	22,3	22,3

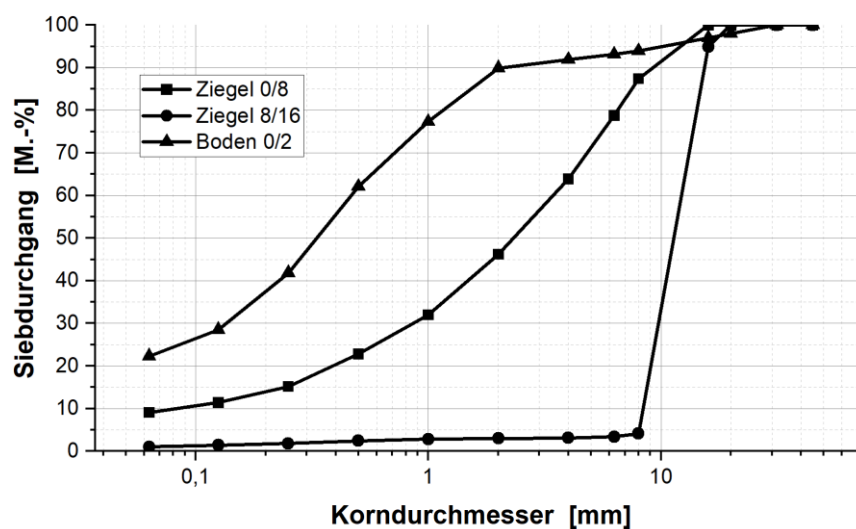


Bild 51: Korngrößenverteilung Stoff 1 bis Stoff 3

An den stofflichen Komponenten wird die Rohdichte (Tabelle 18) mit dem Wasser- und Luftpyknometer bestimmt.

Tabelle 18: Kornrohddichte der Stoffbestandteile

Verfahren	Stoff 1	Stoff 2	Stoff 3
	Ziegel 0/8 mm	Ziegel 8/16 mm	Boden 0/2 mm
	[g/cm ³]		
Luftpyknometer	2,534	2,517	2,624
Wasserpyknometer	2,352	2,250	2,610

Damit sind die für die Berechnung erforderlichen physikalischen Eigenschaften der Stoffmischung bekannt.

7.3.2 Berechnung der Packungsdichte (3-Stoff-System)

Für die drei Mischungskomponenten ergeben sich mit Hilfe der Packungsdichteberechnung folgende rechnerische Ergebnisse:

Packungsdichte der einzelnen Stoffe:

Stoff 1:	100 Vol.-% Ziegel 0/8 mm:	Packungsdichte $\Phi = 69,6 \%$
Stoff 2:	100 Vol.-% Ziegel 8/16 mm:	Packungsdichte $\Phi = 57,7 \%$
Stoff 3:	100 Vol.-% Boden 0/2 mm:	Packungsdichte $\Phi = 66,5 \%$

Packungsdichte des 3-Stoff-Systems:

Minimum:

Stoff 1 = 0 Vol.-%, Stoff 2 = 100 Vol.-%, Stoff 3 = 0 Vol.-%

Packungsdichte $\Phi = 57,7 \text{ Vol.-%}$

Maximum:

Stoff 1 = 0 Vol.-%, Stoff 2 = 60 Vol.-%, Stoff 3 = 40 Vol.-%

Packungsdichte $\Phi = 76,1 \text{ Vol.-%}$

Auf Basis der errechneten Packungsdichte-Matrix – grafisch dargestellt in Bild 52 – können ein Bereich und damit ein oder mehrere Mischungsverhältnisse gewählt werden, die aus bau- und vegetationstechnischer Sicht oder weiterer anderer

Parameter erfolgversprechend erscheinen. Berücksichtigt werden muss dabei u.a., dass:

- Bodenanteile, die tonhaltige Bestandteile enthalten, die Struktur des Baumsubstrates verändern. Das Quellverhalten wird bei der Packungsdichteberechnung nicht erfasst. Im folgenden Beispiel wird der Bodenanteil der Komponente Stoff 3 auf 10 Vol.-% festgelegt.
- der Anteil ≥ 2 mm und das Größtkorn in einem ausgewogenen Verhältnis zu dem Anteil < 2 mm (durchwurzelbarer Bereich) stehen, damit bau- und vegetationstechnische Vorgaben bestmöglich erreicht werden. Eine Hilfestellung geben dabei die Korngrößenverteilungsbereiche der Regelwerke der FLL [2010], FGSV [2006], HEIDGER [2006], die in den folgenden Matrizen der Tabellen 19 und 20 rechnerisch hinterlegt werden (M.-% = Vol.-%).

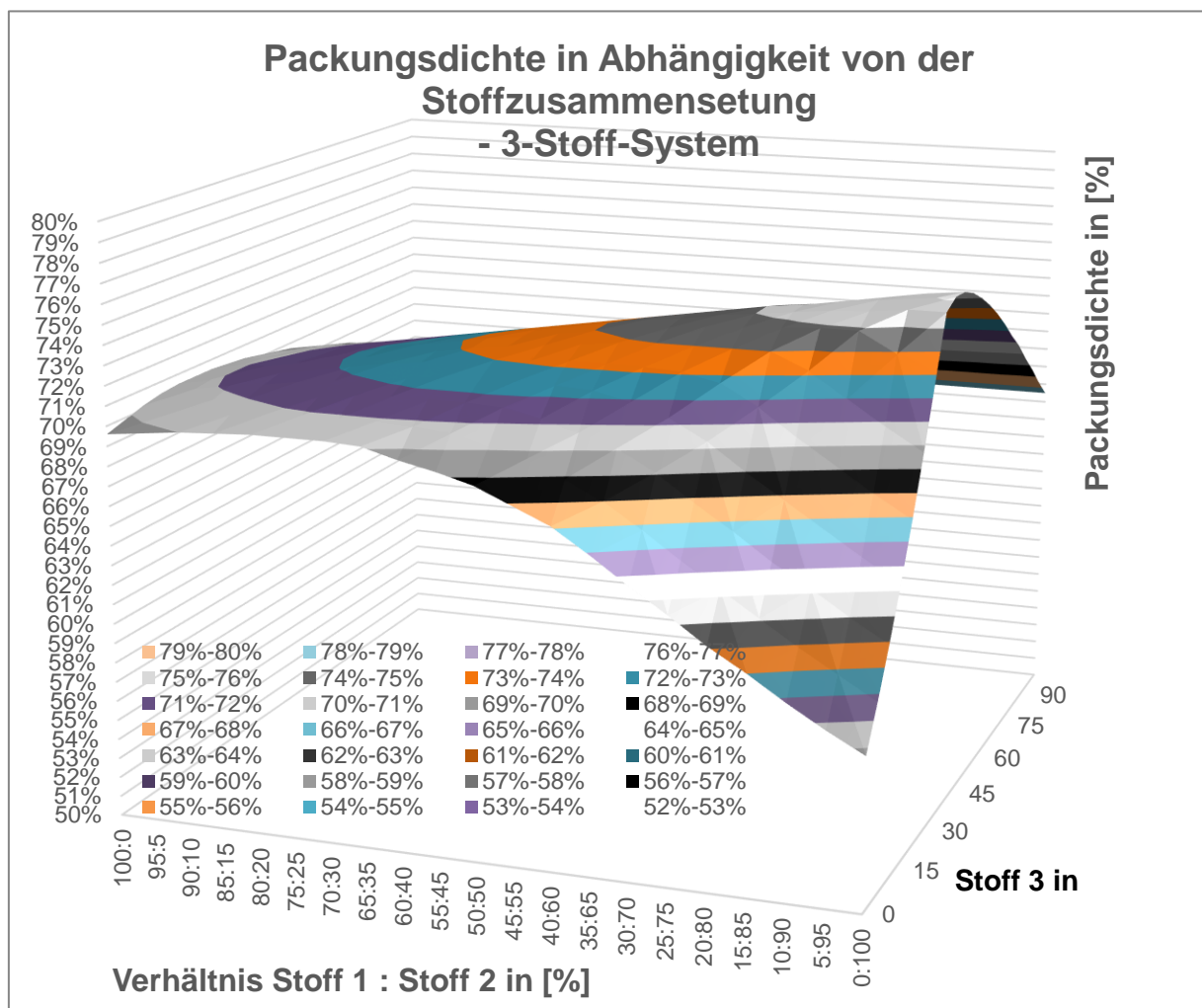


Bild 52: Packungsdichte in Abhängigkeit von der Stoffzusammensetzung

Tabelle 19: Packungsdichtematrix Ziegel-3-Stoff-Systems in Vol.-% mit Korngrößenverteilungsbereich [FLL, 2010]

Verhältnis in [%]		Ziegel 0/8 mm															Anteil				
		Ziegel 8/16 mm																			
		Ziegel 0/8 mm																			
Stoff 1:		Stoff 2:															Stoff 3:				
100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%		15%	10%	5%	0%
0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%		85%	90%	95%	100%
69,6%	69,8%	70,0%	70,1%	70,2%	70,2%	70,2%	70,1%	69,6%	69,2%	68,7%	67,9%	67,1%	65,9%	64,6%	63,4%	62,1%	61,0%	59,8%	58,7%	57,7%	0%
69,9%	70,2%	70,4%	70,6%	70,8%	70,9%	70,9%	70,9%	70,8%	70,6%	70,1%	69,7%	68,9%	68,0%	66,8%	65,5%	64,3%	63,1%	61,9%	60,8%	59,7%	5%
70,2%	70,5%	70,8%	71,0%	71,2%	71,4%	71,6%	71,7%	71,7%	71,7%	71,6%	71,2%	70,7%	70,1%	69,1%	67,8%	66,6%	65,3%	64,2%	63,0%	61,9%	15%
70,4%	70,8%	71,1%	71,3%	71,6%	71,8%	72,0%	72,2%	72,4%	72,4%	72,5%	72,4%	72,3%	71,9%	71,3%	70,3%	69,0%	67,8%	66,6%	65,4%	64,3%	15%
70,5%	70,9%	71,2%	71,5%	71,8%	72,1%	72,4%	72,6%	72,8%	73,0%	73,1%	73,2%	73,2%	73,2%	73,1%	72,7%	71,7%	70,4%	69,2%	68,0%	66,9%	20%
70,5%	70,9%	71,3%	71,6%	71,9%	72,2%	72,5%	72,8%	73,1%	73,3%	73,5%	73,7%	73,9%	74,0%	74,0%	74,0%	74,0%	73,2%	72,0%	70,8%	69,7%	25%
70,5%	70,9%	71,2%	71,5%	71,9%	72,2%	72,6%	72,9%	73,2%	73,4%	73,7%	74,0%	74,2%	74,4%	74,6%	74,7%	74,8%	74,9%	74,9%	73,9%	72,7%	30%
70,4%	70,8%	71,1%	71,4%	71,8%	72,1%	72,4%	72,8%	73,1%	73,4%	73,7%	74,0%	74,3%	74,5%	74,8%	75,0%	75,2%	75,4%	75,5%	75,7%	75,7%	35%
70,3%	70,6%	71,0%	71,3%	71,6%	71,9%	72,2%	72,6%	72,9%	73,2%	73,5%	73,8%	74,1%	74,4%	74,7%	75,0%	75,2%	75,5%	75,7%	75,9%	76,1%	40%
70,1%	70,5%	70,8%	71,1%	71,4%	71,7%	72,0%	72,3%	72,6%	72,9%	73,2%	73,5%	73,8%	74,1%	74,4%	74,7%	74,9%	75,2%	75,5%	75,8%	76,0%	45%
69,9%	70,2%	70,5%	70,8%	71,1%	71,4%	71,7%	72,0%	72,2%	72,5%	72,8%	73,1%	73,4%	73,7%	73,9%	74,2%	74,5%	74,8%	75,1%	75,3%	75,6%	50%
69,7%	70,0%	70,2%	70,5%	70,8%	71,1%	71,3%	71,6%	71,8%	72,1%	72,4%	72,6%	72,9%	73,2%	73,4%	73,7%	74,0%	74,2%	74,5%	74,7%	75,0%	55%
69,4%	69,7%	69,9%	70,2%	70,4%	70,6%	70,9%	71,1%	71,4%	71,6%	71,9%	72,1%	72,3%	72,6%	72,8%	73,1%	73,3%	73,6%	73,8%	74,0%	74,3%	60%
69,1%	69,3%	69,6%	69,8%	70,0%	70,2%	70,4%	70,6%	70,9%	71,1%	71,3%	71,5%	71,7%	71,9%	72,2%	72,4%	72,6%	72,8%	73,0%	73,3%	73,5%	65%
68,8%	69,0%	69,2%	69,4%	69,5%	69,7%	69,9%	70,1%	70,3%	70,5%	70,7%	70,9%	71,1%	71,2%	71,4%	71,6%	71,8%	72,0%	72,2%	72,4%	72,6%	70%
68,5%	68,8%	68,8%	68,9%	69,1%	69,2%	69,4%	69,6%	69,7%	69,9%	70,0%	70,2%	70,4%	70,5%	70,7%	70,8%	71,0%	71,2%	71,3%	71,5%	71,6%	75%
68,1%	68,2%	68,3%	68,5%	68,6%	68,7%	68,9%	69,0%	69,1%	69,2%	69,4%	69,5%	69,6%	69,8%	69,9%	70,0%	70,1%	70,3%	70,4%	70,5%	70,7%	80%
67,7%	67,8%	67,9%	68,0%	68,1%	68,2%	68,3%	68,4%	68,5%	68,6%	68,7%	68,8%	68,9%	69,0%	69,1%	69,2%	69,3%	69,4%	69,5%	69,6%	69,6%	85%
67,3%	67,4%	67,5%	67,5%	67,6%	67,7%	67,8%	67,8%	67,8%	67,9%	68,0%	68,0%	68,1%	68,2%	68,2%	68,3%	68,3%	68,4%	68,5%	68,5%	68,6%	90%
66,9%	67,0%	67,0%	67,0%	67,0%	67,1%	67,1%	67,1%	67,2%	67,2%	67,2%	67,3%	67,3%	67,3%	67,4%	67,4%	67,4%	67,5%	67,5%	67,5%	67,5%	95%
66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	100%

Legende:

Stoff 1: Ziegel 0/8 mm

Stoff 2: Ziegel 8/16 mm

Stoff 3: Boden 0/2 mm

Gelb hinterlegt: Minima und Maxima der Packungsdichteberechnung

Orange hinterlegt: Gewähltes Mischungsverhältnis in Vol.-%

Hellgrün hinterlegt: Korngrößenverteilungsbereich nach FLL

Tabelle 20: Packungsdichtematrix Ziegel-3-Stoff-Systems in Vol.-% mit Korngrößenverteilungsbereich [FGSV, 2006; HEIDGER, 2006]

Verhältnis in [%]		Ziegel 0/8 mm																			Anteil
		Stoff 1:																			Stoff 3:
		Stoff 2:																			
		Ziegel 8/16 mm																			
100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	0%	
0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	
69,6%	69,8%	70,0%	70,1%	70,2%	70,2%	70,2%	70,1%	69,6%	69,2%	68,7%	67,9%	67,1%	65,9%	64,6%	63,4%	62,1%	61,0%	59,8%	58,7%	57,7%	
69,9%	70,2%	70,4%	70,6%	70,8%	70,9%	70,9%	70,9%	70,8%	70,6%	70,1%	69,7%	68,9%	68,0%	66,8%	65,5%	64,3%	63,1%	61,9%	60,8%	59,7%	
70,2%	70,5%	70,8%	71,0%	71,2%	71,4%	71,6%	71,7%	71,7%	71,7%	71,6%	71,2%	70,7%	70,1%	69,1%	67,8%	66,6%	65,3%	64,2%	63,0%	61,9%	
70,4%	70,8%	71,1%	71,3%	71,6%	71,8%	72,0%	72,2%	72,4%	72,4%	72,5%	72,4%	72,3%	71,9%	71,3%	70,3%	69,0%	67,8%	66,6%	65,4%	64,3%	
70,5%	70,9%	71,2%	71,5%	71,8%	72,1%	72,4%	72,6%	72,8%	73,0%	73,1%	73,2%	73,2%	73,2%	73,1%	72,7%	71,7%	70,4%	69,2%	68,0%	66,9%	
70,5%	70,9%	71,3%	71,6%	71,9%	72,2%	72,5%	72,8%	73,1%	73,3%	73,5%	73,7%	73,9%	74,0%	74,0%	74,0%	74,0%	73,2%	72,0%	70,8%	69,7%	
70,5%	70,9%	71,2%	71,5%	71,9%	72,2%	72,6%	72,9%	73,2%	73,4%	73,7%	74,0%	74,2%	74,4%	74,6%	74,7%	74,8%	74,9%	74,9%	73,9%	72,7%	
70,4%	70,8%	71,1%	71,4%	71,8%	72,1%	72,4%	72,8%	73,1%	73,4%	73,7%	74,0%	74,3%	74,5%	74,8%	75,0%	75,2%	75,4%	75,5%	75,7%	75,7%	
70,3%	70,6%	71,0%	71,3%	71,6%	71,9%	72,2%	72,6%	72,9%	73,2%	73,5%	73,8%	74,1%	74,4%	74,7%	75,0%	75,2%	75,5%	75,7%	75,9%	76,1%	
70,1%	70,5%	70,8%	71,1%	71,4%	71,7%	72,0%	72,3%	72,6%	72,9%	73,2%	73,5%	73,8%	74,1%	74,4%	74,7%	74,9%	75,2%	75,5%	75,8%	76,0%	
69,9%	70,2%	70,5%	70,8%	71,1%	71,4%	71,7%	72,0%	72,2%	72,5%	72,8%	73,1%	73,4%	73,7%	73,9%	74,2%	74,5%	74,8%	75,1%	75,3%	75,6%	
69,7%	70,0%	70,2%	70,5%	70,8%	71,0%	71,3%	71,6%	71,8%	72,1%	72,4%	72,6%	72,9%	73,2%	73,4%	73,7%	74,0%	74,2%	74,5%	74,7%	75,0%	
69,4%	69,7%	69,9%	70,2%	70,4%	70,6%	70,9%	71,1%	71,4%	71,6%	71,9%	72,1%	72,3%	72,6%	72,8%	73,1%	73,3%	73,6%	73,8%	74,0%	74,3%	
69,1%	69,3%	69,6%	69,8%	70,0%	70,2%	70,4%	70,6%	70,9%	71,1%	71,3%	71,5%	71,7%	71,9%	72,2%	72,4%	72,6%	72,8%	73,0%	73,3%	73,5%	
68,8%	69,0%	69,2%	69,4%	69,5%	69,7%	69,9%	70,1%	70,3%	70,5%	70,7%	70,9%	71,1%	71,2%	71,4%	71,6%	71,8%	72,0%	72,2%	72,4%	72,6%	
68,5%	68,6%	68,8%	68,9%	69,1%	69,2%	69,4%	69,6%	69,7%	69,9%	70,0%	70,2%	70,4%	70,5%	70,7%	70,8%	71,0%	71,2%	71,3%	71,5%	71,6%	
68,1%	68,2%	68,3%	68,5%	68,6%	68,7%	68,9%	69,0%	69,1%	69,2%	69,4%	69,5%	69,6%	69,8%	69,9%	70,0%	70,1%	70,3%	70,4%	70,5%	70,7%	
67,7%	67,8%	67,9%	68,0%	68,1%	68,2%	68,3%	68,4%	68,5%	68,6%	68,7%	68,8%	68,9%	69,0%	69,1%	69,2%	69,2%	69,3%	69,4%	69,5%	69,6%	
67,3%	67,4%	67,5%	67,5%	67,6%	67,6%	67,7%	67,8%	67,8%	67,9%	68,0%	68,0%	68,1%	68,2%	68,2%	68,3%	68,3%	68,4%	68,5%	68,5%	68,6%	
66,9%	67,0%	67,0%	67,0%	67,0%	67,1%	67,1%	67,1%	67,2%	67,2%	67,2%	67,3%	67,3%	67,3%	67,4%	67,4%	67,4%	67,5%	67,5%	67,5%	67,5%	
66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	66,5%	

Legende:

Stoff 1: Ziegel 0/8 mm

Stoff 2: Ziegel 8/16 mm

Stoff 3: Boden 0/2 mm

Gelb hinterlegt: Minima und Maxima der Packungsdichteberechnung

Orange hinterlegt: Gewähltes Mischungsverhältnis in Vol.-%

Dunkelgrün hinterlegt: Korngrößenverteilungsbereich nach FGSV/HEIDGER

Für das aufgezeigte Fallbeispiel wird ein Mischungsverhältnis gewählt, in dem die drei Mischungskomponenten Stoff 1/Stoff 2 : Stoff 3 (orange in Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt) im Verhältnis von 85/15 : 10 stehen. Daraus resultiert das Ergebnis:

Packungsdichte $\Phi = 71,0 \text{ Vol.-%}$

Porenvolumen Primärporensystem = $100 - \Phi = 29,0 \text{ Vol.-%}$

Damit liegt das theoretische Porenvolumen des Primärporensystems um 5,1 Vol.-% unter dem theoretischen Maximalwert von 76,1 Vol.-%.

7.3.3 Mischungsberechnung

Korngrößenverteilung des Stoffgemischs in Vol.-%

(Stoff 1/Stoff 2 : Stoff 3 = 85/15 : 10 bezogen auf 100 %):

Stoff 1:	Ziegel 0/8 mm:	$85 \% \times 0,9 =$	76,5 Vol.-%
Stoff 2:	Ziegel 8/16 mm:	$15 \% \times 0,9 =$	13,5 Vol.-%
Stoff 3:	Boden 0/2 mm:		<u>10,0 Vol.-%</u>
			100,0 Vol.-%

Die Rezeptur fließt in die Mischungsberechnung (Tabelle 21) ein:

Tabelle 21: Mischungsberechnung Fallbeispiel in Vol.-%

Korngröße [mm]		Stoff 1	Stoff 2	Stoff 3	Anteil	Durchgang
von bis		Ziegel 0/8 mm	Ziegel 8/16 mm	Boden 0/2 mm	Vol.-%	Vol.-%
		Anteil in Anteile von 1				
		0,765	0,135	0,100		
20	31,5	0,0	0,0	2,0	0,2	100,0
16	20	0,0	5,1	1,0	0,8	99,8
8	16	12,6	90,8	3,1	22,2	99,0
6,3	8	8,6	0,7	0,8	6,8	76,8
4	6,3	14,9	0,3	1,2	11,6	70,1
2,0	4,0	17,7	0,1	2,0	13,8	58,5
1,0	2,0	14,2	0,2	12,6	12,2	44,7
0,50	1,0	9,2	0,4	15,2	8,6	32,6
0,25	0,50	7,6	0,6	20,3	7,9	24,0
0,125	0,25	3,8	0,4	13,3	4,3	16,1
0,063	0,125	2,3	0,4	6,2	2,4	11,8
<	0,063	9,1	1,0	22,3	9,3	9,3

Die Bestimmung der Rohdichte aus dem Luftpyknometerverfahren (aus Tabelle 18) und der festgelegten Rezeptur ergibt die folgende Rohdichte (Kornrohddichte) der Mischung:

Luftpyknometer

Stoff 1: Ziegel 0/8 mm 76,5 Vol.-% mit $\rho = 2,534 \text{ g/cm}^3 = 76,30 \text{ M.-%}$

Stoff 2: Ziegel 8/16 mm 13,5 Vol.-% mit $\rho = 2,517 \text{ g/cm}^3 = 13,37 \text{ M.-%}$

Stoff 3: Boden 0/2 mm 10,0 Vol.-% mit $\rho = \underline{2,624 \text{ g/cm}^3} = 10,33 \text{ M.-%}$

$2,541 \text{ g/cm}^3 = 100,00 \text{ M.-%}$

Analog kann die Rohdichte mit dem Wasserpyknometer bestimmt werden:

Wasserpyknometer:

Stoff 1: Ziegel 0/8 mm 76,5 Vol.-% mit $\rho = 2,352 \text{ g/cm}^3 = 76,11 \text{ M.-%}$

Stoff 2: Ziegel 8/16 mm 13,5 Vol.-% mit $\rho = 2,250 \text{ g/cm}^3 = 12,85 \text{ M.-%}$

Stoff 3: Boden 0/2 mm 10,0 Vol.-% mit $\rho = \underline{2,610 \text{ g/cm}^3} = 11,04 \text{ M.-%}$

$2,367 \text{ g/cm}^3 = 100,00 \text{ M.-%}$

Die Umrechnung der Korngrößenverteilung von Vol.-% in M.-% erfolgt in dem nachstehenden Beispiel exemplarisch nur mit der Kornrohddichte der Stoffbestandteile mittels Wasserpyknometer-Verfahren (Tabelle 22).

Tabelle 22: Mischungsberechnung Fallbeispiel in M.-% – Wasserpyknometer

Korngröße [mm]		Stoff 1	Stoff 2	Stoff 3	Rückstand	Durchgang
		Ziegel 0/8 mm	Ziegel 8/16 mm	Boden 0/2 mm	M.-%	M.-%
von	bis	Anteil in Anteile von 1				
		0,7611	0,1285	0,1104		
20	31,5	0,0	0,0	2,0	0,2	100,0
16	20	0,0	5,1	1,0	0,8	99,8
8	16	12,6	90,8	3,1	21,6	99,0
6,3	8	8,6	0,7	0,8	6,7	77,4
4	6,3	14,9	0,3	1,2	11,5	70,7
2,0	4,0	17,7	0,1	2,0	13,7	59,2
1,0	2,0	14,2	0,2	12,6	12,2	45,5
0,50	1,0	9,2	0,4	15,2	8,7	33,2
0,25	0,50	7,6	0,6	20,3	8,1	24,5
0,125	0,25	3,8	0,4	13,3	4,4	16,4
0,063	0,125	2,3	0,4	6,2	2,5	12,0
<	0,063	9,1	1,0	22,3	9,5	9,5

Um den Einfluss der Kornrohddichte in Vol.-% und M.-% auf die Korngrößenverteilung zu beurteilen, kann die Korngrößenverteilung der Mischungsberechnungen grafisch verglichen werden. In Bild 53 ist erkennbar, dass der Einfluss der Kornrohddichte auf die Korngrößenverteilung im gewählten Beispiel gering ist, da die verschiedenen Korngrößenverteilungen nahezu deckungsgleich sind (grün in Vol.-%, violett in M.-%, Wasserpyknometer).

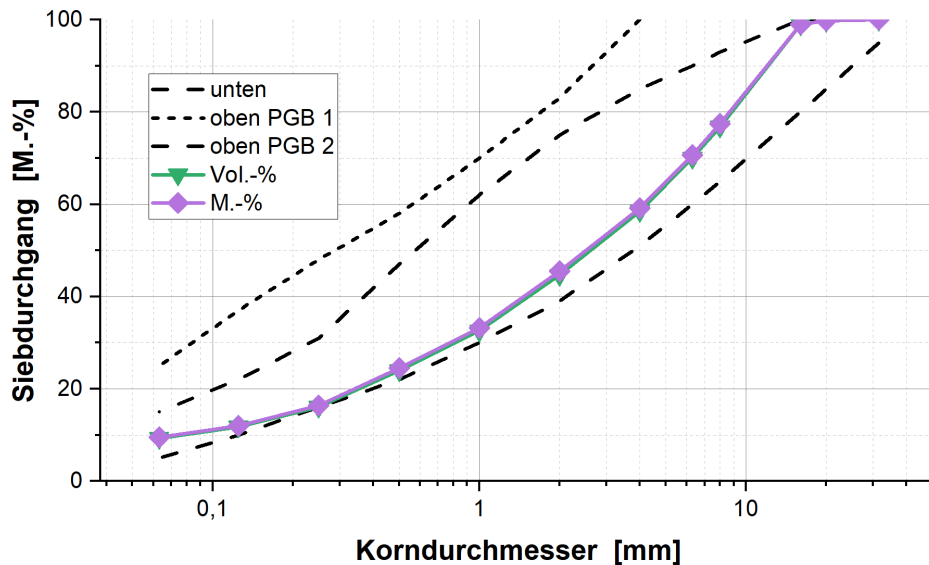


Bild 53: Rechnerische Korngrößenverteilung des Fallbeispiels in Vol.-% und M.-% im Vergleich zu den Orientierungswerten der FLL für PGB 1 und PGB 2 [FLL 2010]

7.3.4 Stoffraumrechnung

Die theoretische maximale Einbaudichte geht in die Rechnung mit dem Produkt aus Packungsdichte und ermittelter Rohddichte ein:

$$\text{Theoretische Einbaudichte}_{max.} = \Phi \times \rho_G$$

Φ Packungsdichte in Vol.-%
 ρ_G Rohddichte des Feststoffanteils in g/cm³

Im Rechenbeispiel beträgt sie:

$$\text{Theoretische Einbaudichte}_{max.} = 0,71 \times 2,364 \text{ g/cm}^3 = 1,678 \text{ g/cm}^3$$

Für die einzelnen stofflichen Bestandteile ergeben sich mittels Stoffraumrechnung folgende Anteile (Tabelle 23) analog:

Tabelle 23: Stoffraumrechnung Fallbeispiel Ziegelsubstrat für die theoretisch max. Einbaudichte

Mischungsbestandteile	Rezeptur			
	Anteil	Stoffraum	Rohdichte Wassерpyknometer	Trockenmasse
	[Vol.-%]	[dm ³ /m ³]	[kg/dm ³]	[kg/m ³]
Stoff 1: Ziegel 0/8 mm	76,5	543	2,352	1277,1
Stoff 2: Ziegel 8/16 mm	13,5	96	2,250	216,0
Stoff 3: Boden 0/2 mm	10,0	71	2,610	185,3
Porenvolumen Primärporensystem bei theoretischer Packungs- dichte für den Luft- und Wasserhaushalt	-	290	-	-
Summe	100	1000	2,364	1678,4

7.3.5 Modelleigenschaften der Stoffmischung

Mit Hilfe der ermittelten Regressionen aus Tabelle 12 können die Eigenschaften der Mischung rechnerisch ermittelt werden und ermöglichen auch weitere umfangreiche Analysen für Substratmischungen. Dabei stellen die rechnerischen Ergebnisse der Kornrohddichte, analysiert mit den unterschiedlichen Luft- oder Wassерpyknometerverfahren, alternative Ergebnisse in Tabelle 24 oder Tabelle 25 dar. In diesen spiegeln sich die Regressionseigenschaften für R^2 wieder.

Tabelle 24: Modelleigenschaften des Baumsubstrates ermittelt mit der Kornrohddichte des Luftpyknometers

Eigenschaft	Einheit	Regression	Ermittelter Wert
Kornrohddichte Luftpyknometer	[g/cm ³]	--	x = 2,541
Wasserkapazität WK _{max.}	[Vol.-%]	y=117,66-34,0832x	31,1
Wasserdurchlässigkeit	[m/s]	y=0,01266-0,00955x+0,00181x ²	0,000080
Gesamtporenvolumen GPV	[Vol.-%]	y=117,65-29,699x	42,2
Luftgehalt pF _{1,8}	[Vol.-%]	y=70,7014-19,3494x	21,5
Proctordichte 100 %	[g/cm ³]	y=-1,89116+1,356673x	1,556
Optimaler Wassergehalt	[%]	y=69,0525-20,05x	18,1
Proctordichte 95 %	[g/cm ³]	y=-1,79694+1,28907x	1,479
CBR-Wert	[%]	y=-53,9877+30,4036x	23,3

Tabelle 25: Modelleigenschaften des Baumsubstrates ermittelt mit der Kornrohddichte des Wasserpyknometers

Eigenschaft	Einheit	Regression	Ermittelter Wert
Kornrohddichte Wasserpyknometer	[g/cm ³]	--	X = 2,367
Wasserkapazität WK _{max}	[Vol.-%]	y=108,769-32,1945x	32,6
Wasserdurchlässigkeit	[m/s]	y=0,00551-0,00418x+8,0144E-4x ²	0,000106
Gesamtporenvolumen GPV	[Vol.-%]	y=109,265-29,0564x	40,5
Luftgehalt pF1,8	[Vol.-%]	y=64,3675-18,9727x	19,5
Proctordichte 100 %	[g/cm ³]	y=-1,64875+1,32723x	1,493
Optimaler Wassergehalt	[%]	y=63,136-18,6579x	19,0
Proctordichte 95 %	[g/cm ³]	y=-1,56686+1,26114x	1,418
CBR-Wert	[%]	y=-45,4685+28,5084x	22,0

7.3.6 Vergleich der Eigenschaften mit dem Anforderungsprofil für Baumsubstrate

In Tabelle 26 sind die ermittelten Modelleigenschaften aus den Tabellen 24 und 25 den Anforderungsprofilen des FLL- und des FGSV-Regelwerkes [FLL 2010, FGSV 2006] gegenübergestellt worden.

Bis auf die FGSV-Anforderung für die max. Wasserkapazität von 35 Vol.-% werden alle Anforderungen an den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt erfüllt. Damit werden nahezu alle Eigenschaften des erhöhten Anforderungsprofils der FGSV von der Modellmischung – unabhängig von der Bestimmung der Kornrohddichte mit dem Luft- oder Wasserpyknometer – erfüllt.

Auch der bestimmte CBR-Wert für den Nachweis der ausreichenden Tragfähigkeit ist auf einem Niveau, der eine Standfestigkeit von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ erwarten lässt.

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen der Regelwerke der FLL und der FGSV wird aber geraten, diese aufeinander abzustimmen.

Tabelle 26: Vergleich der Eigenschaften des Modells mit den Anforderungswerten

Eigenschaft	Einheit	Anforderung gemäß FLL- Baumpflanzung [FLL 2010]		Anforderung gemäß FGSV-Hin- weisen und HEIDGER [FGSV 2006]	Modell	
		PGB 1, nicht über- baubar	PGB 2, über- baubar	PGB 2, überbaubar	Luftpykno- meter	Wasser- pykno- meter
Korngrößenverteilung						
Prüfwassergehalt	%	-		-	-	
Körnung	mm	0/11 bis 0/32	0/16 bis 0/32	0/10 bis 0/20	0/16	
d = 0,063 bis 2 mm	M.-%	Soll ≥ 30	-	-	n.b.	35,9
Verdichtung						
Proctordichte	g/cm³	-	-	-	1,556	1,493
Proctorwassergehalt w _{opt}	%	-	-	-	18,1	19,0
Einbaudichte trocken	g/cm³	-	-	-	1,479	1,418
Verdichtungsgrad D _{Pr}	%	83 - 87	≤ 95	95	95	95
Bodenphysik – Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt bei definierter Verdichtung						
Kornrohddichte (Luftpyknometer)	g/cm³	-	-	-	2,541	2,367
Gesamtporenvolumen GPV	Vol.-%	-	-	≥ 40	42,2	40,5
Wasserdurchlässigkeit k _f	m/s	≥ 5,0 x 10-6 und Soll ≤ 5,0 x 10-4		≥ 1,0x10 ⁻⁶ u. ≤ 1,0x10 ⁻⁵	8,0x 10 ⁻⁵	10,6x 10 ⁻⁵
Maximale Wasserkapazität WK _{max}	Vol.-%	≥ 25		≥ 35 (30) ³⁾ und ≤ 40	31,1	32,6
Luftkapazität bei WK _{max} oder	Vol.-%	≥ 10 oder		-	11,1	7,9
Luftvolumen bei pF 1,8	Vol.-%	≥ 15		≥ 15 und < 2/3 GPV	21,5	19,5
Bodenchemie ¹⁾						
pH-Wert (CaCl ₂)	-	8,5		4,5 – 8,5	-	-
Salzgehalt (Wasserauszug) oder	mg/100 g	≤ 150 oder		(≤ 150)	-	-
Salzgehalt (gesättigte Gipslös.)	mg/100 g	≤ 100		-	-	-
Organische Substanz	M.-%	1 - 4	1 - 2	≤ 2	-	-
Tragfähigkeit ²⁾						
Verformungsmodul E _{v2}	MN/m²	-	≥ 45	≥ 45	-	-
CBR-Wert 95%	[%]	-	-	-	23,3	22,0

Legende: - keine Anforderung

¹⁾ Nährstoffgehalte: Deklaration nach DüV, Nährstoffzugabe erst bei Pflanzung²⁾ Prüfung im eingebauten Zustand³⁾ Anforderungsprofil von Heidger

Grau hinterlegt: Berechnet mit Regressionen

Die ermittelten Werte der Tabelle 26, insbesondere zum Wasser- und Lufthaushalt, liefern in dieser Modellrechnung ähnliche Werte, unabhängig ob die Wasser- oder Luftpyknometer-Prüfmethode angewandt wird.

7.3.7 Ermittlung und Bewertung der optimalen Eigenschaften des Baumsubstrates

Neben den ermittelten bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften wird es zukünftig erforderlich werden, Baumsubstrate interdisziplinär (Vgl. Bild 1) nach Bereichen zu bewerten. Damit ergibt sich für die interdisziplinäre Aufgabenstellung folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} &\text{Interdisziplinäre Aufgabenstellung Vegetationstechnik} = \\ &\quad \text{Ergebnisse oder Ziele der Vegetationstechnik} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Bodenkunde} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Bautechnik} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Siedlungswasserwirtschaft} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Nachhaltigkeit} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Ressourcenverwendung} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Kreislaufwirtschaft} \\ &\quad + \text{Ergebnisse oder Ziele Klimaschutz} \\ &\quad + \dots \\ &= \underline{\text{Gewichtetes Ergebnis der Aufgabenstellung}} \end{aligned}$$

Es wird vorgeschlagen, die ermittelten bau- und vegetationstechnischen Parameter (siehe Tabelle 26) den Bereichen einzeln zuzuordnen, zu ergänzen und entsprechend zu bewerten (z.B. mit einem prozentualen Schlüssel). Damit ist es möglich, eine Bewertung für die unterschiedlichen Bereiche durchzuführen, untereinander zu gewichten und so zu einem Gesamtergebnis der Optimierung zu kommen. Beispielsweise ist eine solche Wichtung auch bei der Bewertung einer Ausschreibung anwendbar, da viele Einflussfaktoren zu einem nachvollziehbaren Ergebnis führen. Damit können technische, wirtschaftliche und ökologische Faktoren nachvollziehbar bewertet werden gegenüber der reinen Bewertung einer Wirtschaftlichkeit oder Ökobilanz (siehe Bild 54).

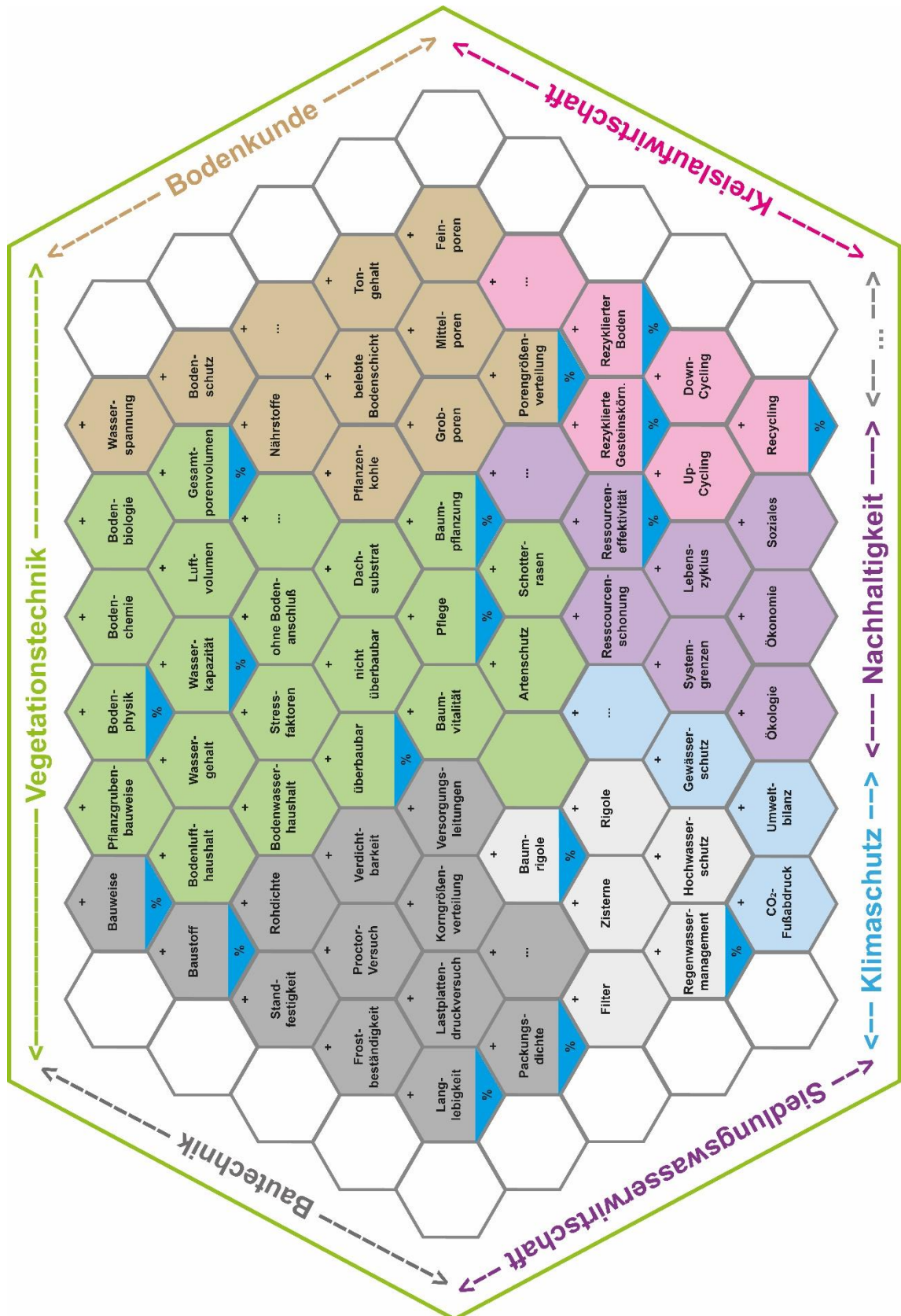


Bild 54: Interdisziplinäre Aufgabenstellung mit Wichtung ausgewählter Faktoren (blau)

7.3.8 Interdisziplinäre Pflanzgrubenbauweise mit Einleitung von Regenwasser

Die im Regelwerk enthaltenen Bauweisen können als Trend zu größeren Baumgruben gemäß dem Regelwerk der FLL [FLL 2010] und der FGSV [FGSV 2006] innerhalb der letzten Jahre bewertet werden und stellen daher für Baumpflanzungen an oder in Verkehrsflächen im direkten Vergleich zur Vergangenheit deutliche Verbesserungen für den Baumstandort dar. Aus Sicht des Verfassers werden jedoch wurzelraumerweiternde Maßnahmen, die im Regelwerk neben größeren Baumgruben aufgeführt sind, immer noch zu wenig beachtet.

Für den Anwender der Regelwerke ist es teilweise schwer nachvollziehbar, warum gewisse Anforderungen – wie an die Wasserkapazität – unterschiedlich geregelt sind. Auch die empfohlenen Korngrößenverteilungsbereiche unterscheiden sich für Baums substrate innerhalb der Regelwerke. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das Anforderungsprofil nach FGSV-Regelwerk von 2006 schärfere Anforderungen enthält im direkten Vergleich zu den FLL-Anforderungen von 2010 und dass hier eine Angleichung oder Erläuterung in der kommenden Überarbeitung der Regelwerke einfließen sollte. Das gilt zukünftig insbesondere auch unter dem Blickwinkel Klimaverschiebung und Beibehaltung eines möglichst pflegeleichten Standortes.

Aus den Bildern 58 bis 60 der Anlage 1.4 lassen sich daher folgende Elemente einer überbaubaren Baumpflanzung den folgenden Funktionen zuordnen:

1. Baumgrube $\geq 12 \text{ m}^3$: durchwurzelbarer Bodenraum, insbesondere für die Anwuchsphase des Baumes innerhalb der ersten zwei bis drei Jahre.
2. Belüftungsgraben, als wurzelraumerweiternde Maßnahme horizontal zwischen Bäumen oder zu erschließenden zugänglichen Bodenräumen innerhalb eines wünschenswerten durchwurzelbaren Bodenvolumens von langfristig 200 bis 300 m^3 .
3. Tiefbohrungen $\geq 1,5 \text{ m}$, als vertikale wurzelraumerweiternde Maßnahme in der Baumgrube analog zum Wurzelgraben. Die maximale Tiefenbegrenzung ist dabei der Grundwasserstand.
4. Der langfristig durchwurzelbare Bodenraum von bis zu 200 bis 300 m^3 , hier kann davon ausgegangen werden, dass sich mehrere Bäume z.B. in Alleen auch diesen Bodenraum je nach Abstand teilen.
5. Einsatz von Wurzellockstoff in einer Schicht von ca. 5 cm auf der Baumgrubensohle, dem Belüftungsgraben und im Bereich der Tiefbohrungen für das wurzellenkende Verhalten der Wurzeln in die Tiefe.

In Tabelle 27 wird der jeweilige Porenraum für die Einleitung von z.B. Regenwasser bei einer Baumpflanzung gemäß der Modellrechnung für einen Baumstandort zusammengestellt und um Annahmen bzw. Berechnungen für die mögliche Wasseraufnahme exemplarisch ergänzt.

Tabelle 27: Porenraum für Wasser bei Baumpflanzungen, oben in Vol.-%, unten pro Pflanzgrube

Nr.	Element	Poren- volumen Primär- poren- system	GPV	WK _{max.}	Differenz GPV- WK _{max.} bei 1m ³
		Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
1.	Baumsubstrat/ Wurzellockstoff Pflanzgrube	29,0	40,5	32,5	8,0
2.	Belüftungsgraben	ca. 38	ca. 38	ca. 5	ca. 33
3.	Tiefbohrung*	ca. 38	ca. 38	ca. 5	ca. 33
4.	Durchwurzelbarer umgebender Bodenraum, z.B. sandiger Boden	ca. 30	ca. 30	ca. 10	ca. 20

Nr.	Element	Volumen	Einleitbares Wasser pro Baumstandort trocken	Einleitbares Wasser pro Baumstandort bei WK _{max.}
		m ³	Liter	Liter
1.	Baumsubstrat/ Wurzellockstoff Pflanzgrube	12,0	12 x 405 Liter = 4.860	12 x 80 Liter = 960
2.	Belüftungsgraben**	7,3	7,3 x 380 Liter = 2.774	7,3 x 330 Liter = 2.409
3.	Tiefbohrung*	0,42	0,42 x 380 Liter = 160	0,42 x 330 Liter = 139
4.	Durchwurzelbarer umgebender Bodenraum, z.B. sandiger Boden	ca. 200	200 x 300 Liter = 60.000	200 x 200 Liter = 40.000
	Summe	220	67.794	43.508

** Annahme: 10 m x 0,5 m x 1,45 m = 7,3 m³

*** Annahme: Durchmesser 0,3 m x 1,5 m x 4 Stück = 0,42 m³, ohne Berücksichtigung des Belüftungsrohres

Für eine Einleitung von Regenwasser insbesondere bei Starkregenereignissen eignet sich daher insbesondere bei ausreichender Größe der Belüftungsgraben. Dieser ist in der Lage, den bestehenden Luftgehalt schnell durch Wasser auszutauschen. Durch den direkten Anschluss an die Baumgrube und den umgebenden durchwurzelbaren Bodenraum kann das aufzunehmende Wasser auch schnell an die umgebenden Elemente einer Baumpflanzung weitergeleitet werden. Das eingeleitete Wasser wirkt so später in der Tiefe für eine verbesserte Versorgung des Baumes mit Wasser.

Bei Betrachtung des ‚Stockholmer Modells‘ für die Einleitung und Nutzung von Regenwasser bei einer Baumpflanzung ergibt sich folgende Bilanz für den Bereich des Baumsubstrates:

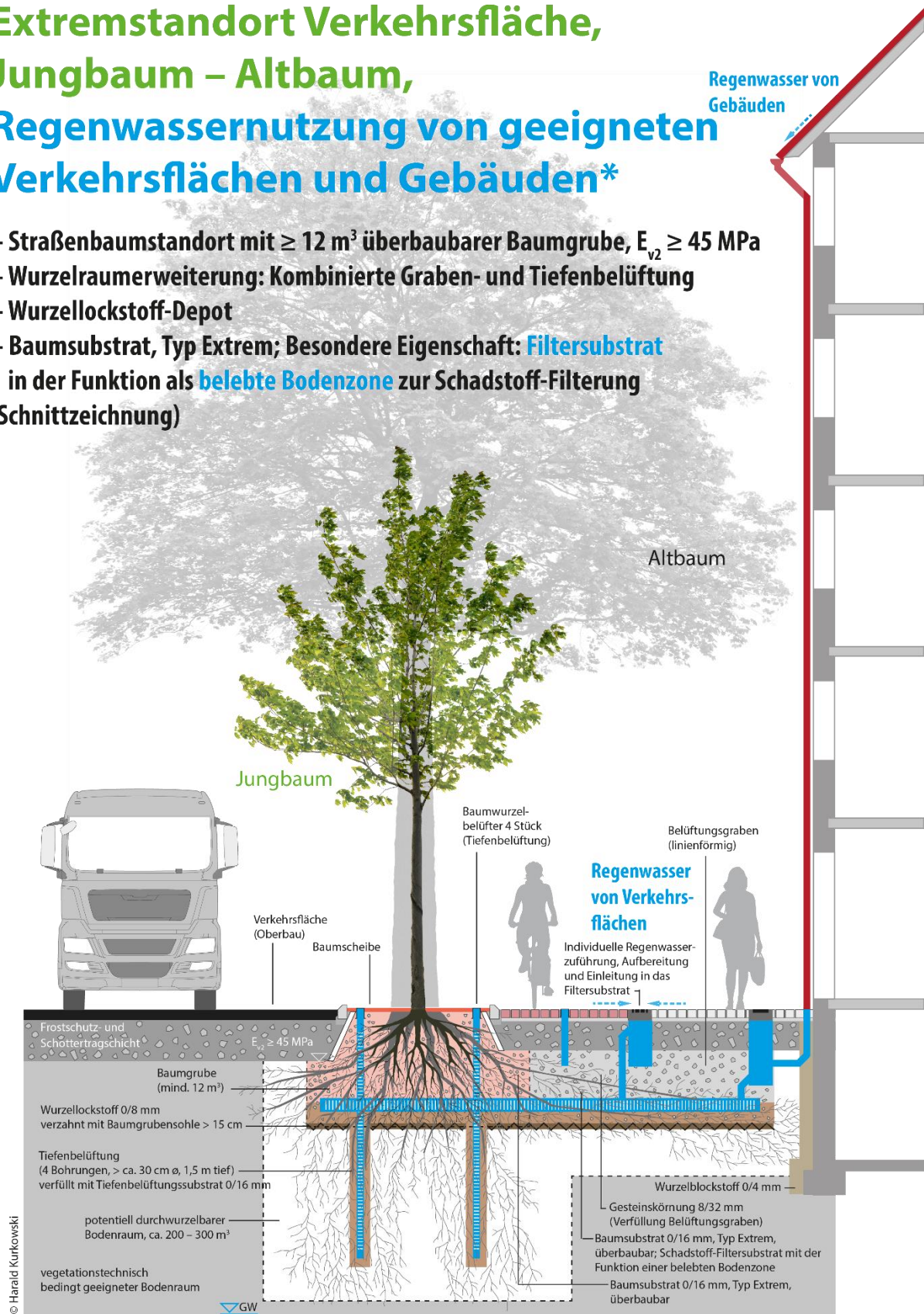
- | | |
|--|--------------------|
| • Baumgrubenvolumen | 12 m ³ |
| • Primärporensystem Stützgerüst = GPV | ca. 38 Vol.-% |
| • Platzbedarf Schlämmkorn ca. 50 Vol.-% | ca. 19 Vol.-% |
| • Einleitbares Wasser pro Baumstandort trocken | 2.280 Liter |

Daraus resultiert ein Porensystem für den Wasser- und Lufthaushalt von ebenfalls 19 Vol.-%. Neue Bauweisen, die ein Stützgerüst aus dichtem Gestein – wie in Stockholm Granit – nutzen, besitzen daher ein geringeres Hohlraumangebot für den Wasser- und Lufthaushalt als konventionelle überbaubare Baumsubstrate. Sie sollten daher auch nur mit ausreichend porösen Gesteinen, wie z.B. Lava in Deutschland, ausgeführt werden.

Bild 55 und 56 zeigt eine beispielhafte, erweiterte überbaubare Pflanzgrubenbauweise mit der Möglichkeit, Regenwasser von Gebäuden und Verkehrsflächen einzuleiten und so für die Versorgung des Baumes am Extremstandort zu nutzen. Hier ist für die Einleitung von der Dachfläche und der Verkehrsfläche jeweils ein Schmutzfilter vorgesehen. Schadstoffe werden in der Filterschicht gereinigt, die als belebte Bodenzone wirkt, um die Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes (Einleitung nur über Oberbodenschicht) in der Tiefe zu erfüllen.

Extremstandort Verkehrsfläche, Jungbaum – Altbaum, Regenwassernutzung von geeigneten Verkehrsflächen und Gebäuden*

- Straßenbaumstandort mit $\geq 12 \text{ m}^3$ überbaubarer Baumgrube, $E_{v2} \geq 45 \text{ MPa}$
- Wurzelraumerweiterung: Kombinierte Graben- und Tiefenbelüftung
- Wurzellockstoff-Depot
- Baumsustrat, Typ Extrem; Besondere Eigenschaft: **Filtersubstrat** in der Funktion als **belebte Bodenzone** zur Schadstoff-Filterung (Schnittzeichnung)



* Prinzipskizze, bei dessen Anwendung sich für einzelne Bauvorhaben, insbesondere je nach örtlichen Gegebenheiten, der Bemessung oder Vorgaben des Auftraggebers abweichende Erfordernisse ergeben können. Stand: 01/2023.

Bild 55: Multifunktionale überbaubare Pflanzgrubenbauweise für urbane Baumstandorte (Schnitt)

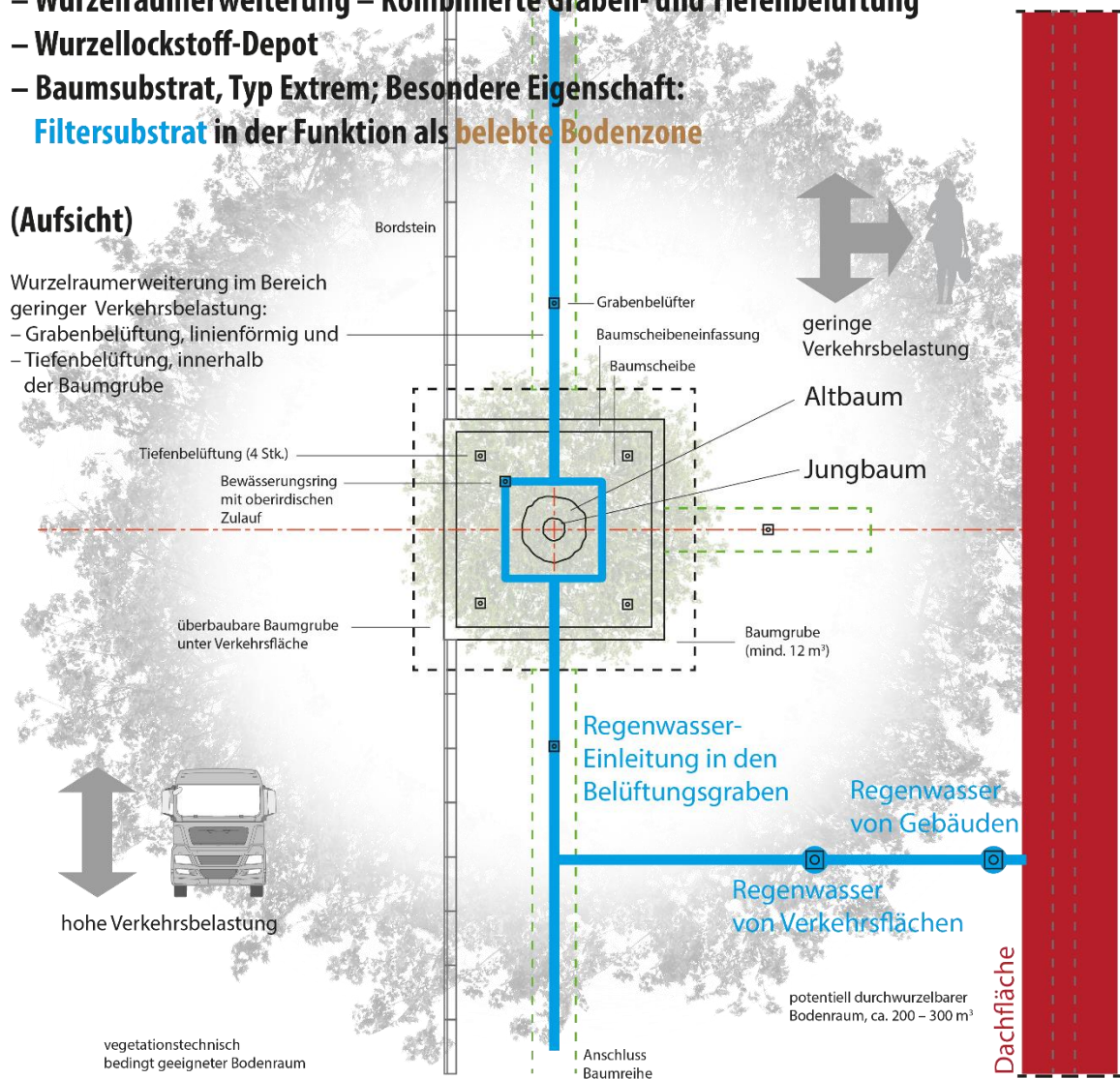
Extremstandort Verkehrsfläche, Jungbaum – Altbaum, Regenwassernutzung von geeigneten Verkehrsflächen und Gebäuden*

- Straßenbaumstandort mit 12 m³ überbaubarer Baumgrube, $E_{v2} \geq 45 \text{ MPa/m}^3$
- Wurzelraumerweiterung – Kombinierte Graben- und Tiefenbelüftung
- Wurzellockstoff-Depot
- Baums substrat, Typ Extrem; Besondere Eigenschaft:
Filtersubstrat in der Funktion als **belebte Bodenzone**

(Aufsicht)

Wurzelraumerweiterung im Bereich
geringer Verkehrsbelastung:

- Grabenbelüftung, linienförmig und
- Tiefenbelüftung, innerhalb
der Baumgrube



* Prinzipskizze, bei dessen Anwendung sich für einzelne Bauvorhaben, insbesondere je nach örtlichen Gegebenheiten, der Bemessung oder Vorgaben des Auftraggebers abweichende Erfordernisse ergeben können; Stand: 03/2024; © Harald Kurkowski

Bild 56: Multifunktionale überbaubare Pflanzgrubenbauweise für urbane Baumstandorte (Aufsicht)

8 Zusammenfassung

In Verkehrsflächen unterliegen Straßenbäume aufgrund der baulichen Gegebenheiten und der Nutzung vielfältigen Stressbedingungen, die die Vitalität und das Wachstum der Bäume an diesem Ort wesentlich beeinflussen. Verkehrsflächenstandorte stellen daher als Standort für Straßenbäume aus vegetationstechnischer Aufgabenstellung immer ‚Extremstandorte‘ dar. Viele Straßenbäume leiden in Verkehrsflächen nach wie vor an unterschiedlichen Stresssymptomen. Neben dem Luftmangel, der wesentlich auf unzureichende Boden-/Substrateigenschaften und ungeeignete Bauweisen zurückgeführt werden kann, zählt vielfach heute flankierend auch ein Wasser- und/oder Nährstoffmangel zu den Schadsymptomen. Der Luftmangel ist oftmals begründet durch die bautechnischen Vorgaben des Straßen- und Tiefbaus mit seinen aus vegetationstechnischer Sicht hohen Anforderungen an die regelkonforme Verdichtung des Untergrundes bzw. Oberbaus und der Versiegelung der Verkehrsfläche.

Die bautechnischen Anforderungen stehen gemäß HEIDGER [2006a] im Widerspruch zu den vegetationstechnischen Ansprüchen der Straßenbäume. Die Verkehrsfläche kann aufgrund der unterirdischen beengten Verhältnisse für das Wurzelwachstum später auch in Mitleidenschaft geraten. Überwindet der Straßenbaum die einengenden Boden- und Begleitumstände, nutzt der Straßenbaum jede zugängliche Pore und Ritze für sein Wurzelwachstum, um zu überleben und sich zu versorgen – meist mit den bekannten unerwünschten Auswirkungen auf die Belagsoberfläche und die Randeinfassungen der Verkehrsfläche.

Zukünftig werden sich aber auch durch die Prognosen zur Klimaverschiebung [z.B. NRW, 2011; WITT, 2020] die Standortverhältnisse von Straßenbäumen voraussichtlich noch weiter verschlechtern. Die systematische Anwendung neuer optimierter Bauweisen mit Baumsubstraten, die hohen technischen Anforderungen genügen, ist daher eine Grundlage für einen funktionierenden Baumstandort am Extremstandort Verkehrsfläche.

In den heutigen Regelwerken [z.B. FLL, 2004 und 2010 und FGSV, 2006] werden Bauweisen und Substrate beschrieben, die für Straßenbäume in und an Verkehrsflächen einen ausreichend großen durchwurzelbaren Untergrund beinhalten, um sich an diesem Standort etablieren zu können. Das Wurzelwachstum soll schadlos unter den Verkehrsflächenoberbau in die Tiefe gelenkt werden. Dazu werden Baumgrubenvolumen von mindestens 12 m³ definiert, die bei ungeeigneten Bodenverhältnissen für den Straßenbaum durch wurzelraumerweiternde Maßnahmen ergänzt werden müssen. Die Baumgruben werden mit überbaubaren Baumsubstraten

verfüllt und verdichtet (überbaubare Bauweise) und unterliegen einem Anforderungsprofil, welches sowohl bau- als auch vegetationstechnisch definiert ist.

Die Vegetationstechnologie ist eine im Vergleich zur Bautechnologie junge Wissenschaft, die in den letzten Jahrzehnten u.a. Bauweisen und Substrate für z.B. Dachbegrünungen und Baumpflanzungen entwickelt und regelt. Entsprechend werden auch Prüfverfahren für die jeweiligen Baustoffe und Bauweisen sukzessive festgelegt. Dabei wird auf Prüfverfahren, wie z.B. der Bodenkunde, dem Erd- und Straßenbau oder auch der Betontechnologie, zurückgegriffen. Heute existieren im Bereich der Vegetationstechnologie für die unterschiedlichen Baustoffe teilweise unterschiedliche Anforderungen und Prüfverfahren, die der allgemeinen Harmonisierung untereinander bedürfen. Dabei sind wie bei den überbaubaren Baumsubstraten unter Verkehrsflächen vegetationstechnische und ggf. auch bautechnische Aspekte zu berücksichtigen.

Auf Basis einer Untersuchung von in der Praxis erhältlichen überbaubaren Baumsubstraten werden die Leistungsfähigkeit sowie das Optimierungspotential verschiedener überbaubarer Baumsubstrate sowie deren mineralischer Stoffkomponenten bezüglich ihrer vegetationstechnischen bodenphysikalischen und bautechnischen Eigenschaften gemäß den heutigen Anforderungsprofilen untersucht, diskutiert und hinsichtlich des Optimierungspotentials hinterfragt.

Dabei fließen neue Untersuchungsmethoden in die Untersuchung mit ein, wie die Packungsdichteberechnung und die Bestimmung kornformabhängiger Parameter mittels fotooptischem CPA-Analyseverfahren. Die rechnerische Bestimmung der Packungsdichte ist im Bereich der Baustoffe schon seit längerem aus der Betontechnologie bekannt und wird z.B. von EDEN [2010] mit Erfolg auch auf die Kalksandsteintechnologie zur Prognose der Scherbenrohdichte übertragen. In bekannten Baustoffbereichen geht es primär darum, ein Packungsdichteoptimum eines Stoffgemisches rechnerisch zu ermitteln, um eine hohe Festigkeit und damit Rohdichte des Baustoffs zu erzielen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein transferierbares Ingenieurmodell für die Konzeption und Optimierung von überbaubaren Baumsubstraten (Vegetationstragschichten) anhand der hierfür erarbeiteten ‚Stoffraumrechnung Vegetationsbaustoffe‘ abgeleitet. Dabei geht es im Gegensatz zur Vorgehensweise in der Beton- oder Kalksandsteintechnologie vorrangig nicht um die Bestimmung eines Packungsdichteoptimums, sondern um Rezepturenentwicklungen, die ein möglichst hohes Gesamtporenvolumen zur Steigerung der Durchwurzelbarkeit und des Wasserhaltevermögens von Vegetationsbaustoffen bewirken. Hierbei sind bau- und vegetationstechnische Belange zu berücksichtigen, um einen baustofflichen

Kompromiss zwischen Bautechnik und Vegetationstechnik gemäß HEIDGER und ggf. weiteren Zielstellungen z.B. zur Ressourceneffektivität zu erlangen. Da der empirische Laboraufwand zur Lösung einer solchen Aufgabenstellung in der Praxis sehr hoch ist, um einen Überblick der Eigenschaften zu bekommen und daher meist unterbleibt, soll das in dieser Arbeit ermittelte Ingenieurmodell für die Konzeption und Optimierung von überbaubaren Baumsubstraten (Vegetationstragschichten) den Aufwand zu minimieren helfen. Der Ansatz ist dabei auch auf ähnliche Aufgabenstellungen transferierbar, wie z.B. die Entwicklung von Schotterrassen für begrünbare Flächen, aber auch für Dachflächenbegrünungen.

Auf Basis durchgeführter Untersuchungen stellt sich heraus, dass mit dem Modell das Gesamtporenvolumen und die Proctordichte auf der Basis der Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Rohdichte der jeweiligen Stoffbestandteile mittels Packungsdichteberechnung berechnet werden kann, während weitergehende Ableitungen oder Abschätzungen, z.B. zur Prognose der Wasserdurchlässigkeit oder der Maximalen Wasserkapazität, aus den durchgeführten Untersuchungen noch einen weiteren Forschungsbedarf erfordern zur Erhöhung der Aussagekraft (R^2) und der Präzision. Die ermittelten Ergebnisse, u.a. zur Kornformanalyse (Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis) mittels CPA-Analysegerät, führen hier noch nicht zu präziseren Ergebnissen. Darüber hinaus kann noch keine ausreichende Regression gefunden werden zu den Tragfähigkeitseigenschaften der untersuchten Substrate. Es zeigt sich jedoch, dass der aus der Straßenbautechnik bekannte CBR-Versuch geeignet erscheint, die Tragfähigkeitseigenschaften eines überbaubaren Baumsubstrats schon im Labor zu beurteilen. Alle regelgerecht hergestellte untersuchten Substrate wiesen einen ausreichenden CBR-Wert bei 95-prozentigem Verdichtungsgrad auf. Mit Hilfe der Regression von WEINGART [1998] kann so der Nachweis geführt werden, dass diese Anforderung dem in der Praxis gebräuchlichen E_{v2} -Wert von 45 MN/m² (Plattendruckversuch) entspricht. Weiterhin ist die Anwendung des dynamischen Plattendruckversuchs auf der Baustelle zu empfehlen. Auch hierfür gibt die Regression von WEINGART eine gute Hilfestellung zur Vereinfachung des Aufwandes z.B. bei Kontrollprüfungen.

Damit stellt die ‚Stoffraumrechnung Vegetationstechnik‘ einen ersten Schritt dar, mit einfachen Ausgangsanalysen wie der Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Kornrohichte und der anschließenden Packungsdichteberechnung in Form einer Matrixberechnung und der Anwendung erarbeiteter Regressionen eine möglichst optimale Rezeptur auf Basis multifunktionaler Anforderungen für die Mischung zu ermitteln.

Der Arbeit liegen umfangreiche Untersuchungen zur Brechtechnik von Ziegel-Gesteinskörnungen und zur anschließenden Bestimmung und Beurteilung der Kornrohddichte nach dem Wasser- und Luftpyknometerverfahren zugrunde. In Abhängigkeit von der Rohddichte der Ziegel-Gesteinskörnungen wird hier die Korngrößenverteilung durch die jeweilige Zerkleinerungstechnik mit dem Prall- oder Backenbrecher erwartungsgemäß beeinflusst. Die festgestellten Massenanteile der Kornanteile Kies, Sand und Schluff/Ton unterscheiden sich bedeutsam. Auswertbare technologische Unterschiede bei der Untersuchung der Sand- und Kiesfraktion mittels CPA-Analysegerät zur Kornformanalyse können noch nicht abgeleitet werden. Auch Unterschiede in der Wasserspeicherfähigkeit der einzelnen Körnungen können ,am Korn‘ zwischen Prall- und Backenbrecher nicht ermittelt werden.

Die erarbeitete Modellrechnung für den Eignungsnachweis von Baumsubstraten ist auch für die Bewertung von interdisziplinären Aufgabenstellungen, wie z.B. der Regenwassereinleitung an Baumstandorten unter Klimagesichtspunkten, eine Hilfe. Hierzu werden Anregungen gegeben für ihre Anwendung und ihrer Umsetzung in erweiterten ,interdisziplinären‘ Pflanzgrubenbauweisen.

9 Ausblick

9.1 Optimierung von Vegetationssubstraten

Für die vielfältigen Einflussparameter zur Optimierung der bau- und vegetationstechnischen Eigenschaften von Vegetationssubstraten und der eingesetzten porösen Gesteinskörnungen kann das abgeleitete Modell im Rahmen dieser Arbeit noch nicht verifiziert werden. Die endgültige Verifizierung muss somit der Anwendung in der Praxis und künftigen Forschungsarbeiten vorbehalten bleiben. Folgender Forschungsbedarf wird angeregt:

- Ausdehnung der Untersuchungen auf Mehrstoffgemische
- getrennte Bestimmung der Wasser- und Luftaufnahme von unterschiedlich porösen Gesteinskörnungen ≤ 2 mm und > 2 mm
- Bestimmung der Packungsdichte an 2-Stoff- bis X-Stoff-Systemen (das genutzte Packungsdichte-Programm berücksichtigt derzeit bis zu fünf Stoffkomponenten)
- Berücksichtigung der organischen Substanz und Pflanzenkohle als Stoffkomponente und CO₂-Speicher
- Berücksichtigung von Ausfallkörnungen zur Steigerung der Durchwurzelbarkeit
- Ermittlung weiterer praxistauglicher Regressionen zur Präzisierung der Berechnung der bodenphysikalischen, bodenchemischen und bautechnischen Eigenschaften
- Bestimmung/Berechnung der Porengrößenverteilung oder Wasserspannungskurve zur Ableitung des pflanzenverfügbaren Wassers von Vegetationsbaustoffen bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden

Für den allgemeinen Bereich der Vegetationstechnik wird angeregt, alle vegetationstechnischen Baustoffe, wie z.B. Baumsubstrate, Schotterrassen, Dachsubstrate im Rahmen einheitlicher technischer Prüfverfahren weiter zu harmonisieren. HEIDGER weist bereits 2006 auf diese Notwendigkeit hin. Ähnlich wie in der Straßenbautechnik bei der FGSV üblich, sollte auch bei der FLL/FGSV für die Vegetationstechnik ein abgestimmtes Regelwerk vorhanden sein, welches die technischen Prüfbedingungen und ggf. auch Lieferbedingungen einheitlich regelt. Die jeweiligen Verdichtungsanforderungen nach Proctor sind hierbei eine Grundvoraussetzung für die Bestimmung des Wasser- und Lufthaushaltes der Substrate. Zusätzlich können weitere bautechnische Anforderungen festgelegt werden. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Prüfungen und Anforderungen auch unter den einzelnen Vegetationsbaustoffen möglich.

Neben der Optimierung der Bau- und Vegetationstechnik für Vegetationssubstrate treten zukünftig im Rahmen der Kreislaufwirtschaft und zum Schutz des Klimas

Nachhaltigkeitsaspekte, wie Ressourcenschutz mit z.B. der Verwendung rezyklierter poriger Gesteinskörnungen, noch stärker in den Vordergrund der Verwendung. Diese sind vollständig gesetzlich hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit zu regeln, um ihre Anwendbarkeit im direkten Vergleich zu natürlichen Mineralstoffen kreislaufgerecht zu ermöglichen.

9.2 Umsetzbarkeit der Erkenntnisse in die Praxis und neue Bauweisen

Die Berechnung der vorherbarsehbaren Eigenschaften von überbaubaren Baumsubstraten auf Basis des aufgezeigten Modells kann in der Praxis sofort genutzt werden. Dazu sind nur wenige Laborvoruntersuchungen als Eingangsgrößen erforderlich. Die verifizierten Ergebnisse können genutzt werden, um die Regressionen für überbaubare Baumsubstrate zu verifizieren und diese auch auf andere Vegetationsbaustoffe analog anzuwenden, z.B. auf nicht überbaubare Baumsubstrate und Schotterrasen. Mit geringem Laboraufwand lässt sich so ein Eigenschaftsprofil eines Vegetationssubstrates abschätzen und vergleichen und kontrollieren.

Die Nutzung der Packungsdichteberechnung in der Vegetationstechnik erfolgt auf der Basis eines Transfers der Erkenntnisse aus der Beton- und Kalksandsteinindustrie. Hier ist die Aufgabenstellung aber nicht ‚finde das Festigkeits- oder Dichtemaximum‘ sondern besteht in einem Prozess, in dem zahlreiche Einflussfaktoren angemessen berücksichtigt werden, um den bestmöglichen Kompromiss für die Aufgabenstellung zu erzielen.

Die Lebensbedingungen von Straßenbäumen an Extremstandorten können auch heute schon deutlich verbessert werden, wenn bei der Planung neben einer ausreichend groß bemessenen Baumgrube auch wurzelraumerweiternde Maßnahmen vorgesehen werden. Früher war ein ausreichender Bodenlufthaushalt für Straßenbäume oft der limitierende Faktor, heute tritt zusätzlich eine ausreichende Wasserversorgung wieder stärker in den Fokus. Aufgabenstellungen verändern sich im Laufe der Zeit. Der Überblick sollte aber nicht verlorengehen.

Jedes zugängliche Wasser in urbanen Zentren, wie z.B. Regenwasser von Gebäuden, sollte in der Stadt für Stadtbäume genutzt werden, um das Leben eines Stadtbaumes in der Stadt zu verbessern. Bei sogenannten Baumrigolenbauweisen, die im Zuge der Umsetzung der ‚Schwammstadt‘ an Bedeutung gewinnen, sollte (auch) auf bekannte und erprobte Vegetationsbauweisen aus dem vorhandenen Regelwerk der Baumpflanzungen – bei hohen Qualitätsanforderungen an Baustoff und Einbau – gesetzt werden. Gerade Belüftungsgräben oder Tiefbohrungen sollten erprobt werden zum Einleiten von Regenwasser. Die Baumgrube und der Baum können so über dieses ‚Netz‘ mit Wasser besser versorgt werden.

Der Anwendung der neuen Bauweisen mit optimierten Baumsubstraten, die einem hohen technischen Standard genügen müssen, sind daher auch für die Zukunft eine unabdingbare Grundlage für einen funktionierenden Baumstandort am Extremstandort Verkehrsfläche, ebenso wie die notwendige Abwägung der dabei zu postulierenden Zielkriterien.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind weiterhin erforderlich, wie auch die Umsetzung deren Erkenntnisse und Ergebnisse in Regelwerke. Hier ist ein einheitliches Regelwerk zwischen DWA, FGSV und FLL auf Basis praktikabler und nachvollziehbarer gesetzlicher Regelungen eine notwendige interdisziplinäre Zukunftsaufgabe.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG Boden, 2005 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.): Bodenkundliche Kartieranleitung. 2005, Hannover, 5. Auflage.
- ANDREASEN/
ANDERSON, 1930 ANDREASEN, A.H.M.; ANDERSON, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift, 1930, Bd. 50, 1930, Seiten 217 – 228.
- ATTERBERG, 1912 ATTERBERG, A.: Die rationelle Klassifizierung der Sande und Kiese. 1912, Che. Ztg. 29, Seiten 195 – 198.
- BALDER et. al., 2018 BALDER, H.; GOLL, L.; NICKEL, D.; REHFELD-KLEIN, M.: Befunde zur Verwendung von Bäumen in Muldensystemen im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung. ProBaum Heft 4/2018, Seite 15 – 21.
- BALDER, 2020 BALDER, H.: Gehölzentwicklung in strukturstabilen Substraten. ProBaum Heft 2/2020, Seite 12 – 18.
- BÄZ/DÖRING, 2012 BÄZ, R.; DÖRING, J.: Programm zur Berechnung von Packungsdichten, Version BdP v. 3.03, Release 10.02.2012, Kassel, Freiburg.
- BENNNERSCHIEDT, 2007 BENNNERSCHIEDT, C.: Betriebs- und Sanierungsmaßnahmen bei Wurzelschäden in öffentlichen und privaten Abwasserleitungen und -kanälen – Inspektionen. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), 2007.
- BENNNERSCHIEDT et. al., 2007 BENNNERSCHIEDT, C.; SCHMIEDENER, H.; STRECKENBACH, M.; HÜBEN, S.; SCHUNICH, J.; STRÖCKER, K.: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „ergänzende Feldversuche“. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), Juni 2007.
- BENNNERSCHIEDT et. al., 2011 BENNNERSCHIEDT, C.; BLUDAU, F.; SCHMIEDENER, H.; SCHRÖDER, K.; STRECKENBACH, M.; STÜTZEL, T.: Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil 1: Verpflanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), Februar 2011.
- BERTRAND/
KOHNE, 1957 BERTRAND, A.R.; KOHNE, H.: Suboil conditions and their effects on oxygen supply and growth of corn roots. Proc. Soil sci. 1957, Soc. Am. 23, Seiten 135 – 140.
- BGS, 2022 BlueGreenStreets – Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, Projektleitung: HafenCity Universität Hamburg, Herr Prof. Wolfgang Dickhaut, www.hcu-hamburg.de/bluegreenstreets, 05/2022
- BGS-TBA, 2022 BlueGreenStreets (Hrsg.) (2022): BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Praxisleitfaden, Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, März 2022, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z).
- BGS-TBB, 2022 BlueGreenStreets (Hrsg.) (2022): BlueGreenStreets Toolbox – Teil B. Steckbriefe, Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, März 2022, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z).

- BIBER, 2017 BIBER, C.: Advanced Urban Trees. How street trees can be part of the solution, an advanced System of urban tree pits to be included in decentralized stormwater management. Masterarbeit im Studiengang REHP, HafenCity Universität Hamburg, 2017.
- BISCHOFF et. al., 2014 BISCHOFF, G., et. al.: Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk. Hannover: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, 2014. Bd. Forschungsbericht Nr. 116, Februar 2014.
- BOSSELER et. al., 2001 BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.; BARTEL, M.: Ökologische Auswirkungen des Wurzeleinwuchses in Abwasserkanälen und -leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT). Endbericht März 2001.
- BBodSchV, 2021 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 16. Juli 2021, BGBl I Teil I S. 2716.
- Bundesregierung, 2021 Die Bundesregierung: Bericht über die Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Freiwilliger Staatenbericht Deutschlands zum Hochrangigen Politischen Forum für Nachhaltige Entwicklung 2021. www.bundesregierung.de/publikationen.
- Bundesverband, 2000 Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V.: Der Bedarf an mineralischen Baustoffen, Gutachten über den zukünftigen Bedarf an mineralischen Rohstoffen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Recycling-Baustoffen. Frankfurt, 2000.
- DE LARRARD, 1986 DE LARRARD, F.: Ultrafine particles for the making of very high strength concrete by the use on packing model. Cement and Concrete Research, 1986. Bd. Vol. 19, Seite 161 – 172.
- DE LARRARD/ SEDRAN, 1994 DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.: Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. Cement and Concrete Research. 1994. Bd. Vol 24, Seite 997 – 1009.
- DENNECKE, 1999 DENNECKE, O.: Einfluß von maschinentechnischen Parametern am Prallbrecher auf das Zerkleinerungsergebnis, Diplomarbeit.: Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1999.
- DIN 18035-5, 2007 DIN 18035-5: Sportplätze – Teil 5: Tennendecken. Berlin: Beuth-Verlag, August 2007.
- DIN 18121-1, 1998 DIN 18121-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Berlin: Beuth-Verlag, April 1998.
- DIN 18123, 1996 DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung. Berlin: Beuth-Verlag, November 1996.
- DIN 18124, 1997 DIN 18124: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte, Kapillarpyknometer-Weithalspyknometer. Berlin: Beuth Verlag, Juli 1997.
- DIN 18127, 1997 DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Proctorversuch. Berlin: Beuth-Verlag, November 1997.
- DIN 18134, 2012 DIN 18134: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Plattendruckversuch. Berlin: Beuth-Verlag, April 2012.

DIN 18196, 2006	DIN 18196: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2006.
DIN 18915, 2002	DIN 18915: Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag, August 2002.
DIN 18915, 2016	DIN 18915: Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag, August 2016.
DIN 18916, 2002	DIN 18916: Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Pflanzen und Pflanzarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag, August 2002.
DIN 18916, 2016	DIN 18916: Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Pflanzen und Pflanzarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag, August 2016.
DIN EN 1097-6, 2005	DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2005.
DIN EN 12350-7, 2000	DIN EN 12350-7 Prüfung von Frischbeton, Teil 7: Luftgehalte - Druckverfahren. Berlin: Beuth-Verlag, November 2000.
DIN EN 933-3, 2008	DIN EN 933-3: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 3: Bestimmung der Plattigkeitskennzahl, 2008.
DIN EN 933-4, 2008	DIN EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl, 2008.
DIETRICH/WILHELM, 2019	DIETRICH, J; WILHELM, L.: Sieben Jahre online: Die GALK-Straßenbaumliste – fit für den Klimawandel? ProBaum Heft 4/2019, Seite 8 – 16.
DüV, 2017	Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV, Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.
DWA, 2013	DWA-M 162: Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle. Gemeinschaftsausgabe des Merkblattes mit der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswege (FGSV) und dem Deutschen Verein des Gas- Wasserfaches (DVGW), Ausgabe Februar 2013.
DWD, 2023	Deutscher Wetterdienst: 2022 war das sonnenscheinreichste Jahr seit 1881, Neue Landschaft Heft 2/2023, Seite 7.
EBV, 2021	Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 9. Juli 2021, 2598 Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 43, ausgegeben zu Bonn am 16. Juli 2021.
EMBRÈM et. al., 2009	EMBRÈM, B. et. al.: Pflanzgruben der Stadt Stockholm, ein Handbuch, 2009 herausgegeben von der Stadt Stockholm auf Initiative von Björn Embrém.

- EDEN, 2010 EDEN, W.: Einfluß der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen. Hannover, 2010.
- EuroLightCon, 1998 EuroLightCon. LWAC Material Properties. State of the Art. Document BE96-3942/R2, December 1998.
- FAUST, 2003 FAUST, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, 2003.
- FELLMER, 2017 FELLMER, M.: Stadtbäume im Klimawandel, Newsletter No 5, HafenCity Universität Hamburg, März 2017.
- FGSV, 2006 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV). Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten. Köln: FGSV-Verlag, Ausgabe 2006
- FGSV, 2019 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV). Merkblatt für die Erhaltung von Verkehrsflächen mit Baumbestand. Köln: FGSV-Verlag, Ausgabe 2019.
- FLL, 2004 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn, Ausgabe 2004.
- FLL, 2010 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn, FLL-Eigenverlag, Ausgabe 2010.
- FLL, 2019 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). Fachbericht: Erhaltung von Verkehrsflächen mit Baumbestand. Bonn, FLL-Eigenverlag, Ausgabe 2019.
- FLOCKER et. al., 1959 FLOCKER, W.J., VOMOGIL, J.A., und F.D. HOWARD: Some growth responses of tomatoes to soil compaction. 1959, Proc. Soil Sci. Soc. Am. 23, Seiten 188 – 191.
- FULLER/THOMSON, 1907 FULLER, W.B. und S.E. THOMSON: The laws of proportioning concrete. s.l. : American society of civil engineers., 1907. Bd. 33, Seite 223 – 298.
- FURNAS, 1928 FURNAS, C.C.: Relations between Specific Volume, Voids and Size Composition in Systems of Broken Solids and Mixed Sizes. U.S. Bureau of Mines Reports of Investigations. 1928. Bd. 2894.
- GAERTIG, 2022 GAERTIG, T.: Nutzbare Wasserspeicherkapazität von Baumsubstraten vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen - Unter welchen Voraussetzungen können Baumsubstrate die Anforderungen der FLL erfüllen? 43. SVK-Gehölzseminar, 04.04.2022–06.04.2022.
- GEISENHANSLÜKE, 2008 GEISENHANSLÜKE, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Universität Kassel, 2008. Bd. Dissertation.
- GILL, MILLER, 1956 GILL, W. R.; MILLER, R. O.: A method of study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. 1956, Proc. Soil Sci. Soc. Am. 20, Seite 154 – 157.

- GRAUPNER et. al., 2006 GRAUPNER, C.-A.; PROSKE, T.; RAMGE, P. Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte von Gesteinskörnungen: Beton, 2006. Bd. 09/2006, Seite 398 – 404.
- HARTGE/HORN, 1989 HARTGE, K.-H.; HORN, R.: Die physikalische Untersuchung von Böden. 1989, Stuttgart, Enke-Verlag, 2. Auflage.
- HARTGE/HORN, 1999 HARTGE, K.-H.; HORN, R. Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart, 1999, Enke Verlag, 3. Auflage.
- HONDS, 2011 HONDS, M.: Baumwurzeln und erdverlegte Leitungsanlagen. Ursachen und Folgen einer komplexen Koexistenz, Heft 11/2011, Seite B25 – B29.
- Haver, 2017 Firmenprospekt zum Partikelanalysengerät HAVER-CPA-4. Haver & Boecker Drahtweberei und Maschinenfabrik. Oelde, www.haver-partikelanalyse.com, 29.05.2017.
- HEIDGER, 2006a HEIDGER, C.: Standortvorbereitungen bei Neupflanzungen; Anforderungen an Pflanzgruben, Bauweisen und Substrate; Neue Pflanzgrubenbauweise für Gehölzpflanzungen in Verkehrsflächen als Durchwurzelungsschutz von Oberbau und Decke. Baumzeitung Heft 1/2006, 2006.
- HEIDGER, 2006b HEIDGER, C., ö.b.v. Sachverständiger für Garten- und Landschaftsbau, Hannover. FLL-Fachtagung. Leipzig, 2006.
- HEIDGER/ KRÜCKEN, 2006 HEIDGER, C.; KRÜCKEN, R.: Baumstandorte und unterirdischen Ver- und Entsorgungsanlagen. Straßen- und Tiefbau, Heft 1/2006, Seite 3 – 9.
- HEIDGER/ KURKOWSKI, 2002 HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Multifunktionaler recyclinggerechter und ökologischer Straßenbau. Heft 6, 2002, Straßen- und Tiefbau, Seite 18 – 21.
- HEIDGER/ KURKOWSKI, 2003 HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Tragschichten mit vegetations-technischen Eigenschaften, Begriffsdefinitionen, Bauweisen und technische Voraussetzungen. 2003, Recycling + Deponietechnik, Seite 38 – 42.
- HEIDGER/ KURKOWSKI, 2019a HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Regelwerke der FGSV für Straßenbäume - Neupflanzung 2006/Baumbestand M EVB 2019 – Teil 1, Straße- und Autobahn, Heft 7.2019, Seite 570 – 577.
- HEIDGER/ KURKOWSKI, 2019b HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Regelwerke der FGSV für Straßenbäume - Neupflanzung 2006/Baumbestand M EVB 2019 – Teil 2, Straße- und Autobahn, Heft 8.2019, Seite 679 – 686.
- HEIDGER/ KURKOWSKI, 2004 HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Neue Bauweisen bei der Pflanzung von Bäumen an Straßen. 2004, Straßen- und Tiefbau, Seite 3 – 8.
- HERRMANN et. al., 2003 HERRMANN, H.; MAHMOODI, R.; WACKENHUT, M.: Searching for the perfect packing. Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, 2003.
- HERRMANN/ LUDING, 1998 HERRMANN, H.; LUDING, S.: Modeling Granular Media on the Computer. Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, 1998.

- HERRMANN/
MAHMOODI, 2004 HERRMANN, H.; MAHMOODI, R.: Space-Filling Bearings in Three Dimensions. Universität Stuttgart, Institut for Computational Physics, 2004. Bde. Physical Review Letters, Vol. 92, No. 4, Seite 044031-1 - 044301-4.
- HUMMEL, 1959 HUMMEL, A.: Das Beton-ABC. Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 1959. Seite 73 – 76 und 241 – 243.
- IKEN et. al., 2003 IKEN, H.-W., et. al.: Handbuch der Betonprüfung, Anleitungen und Beispiele. Düsseldorf, Verlag Bau+Technik, 2003. ISBN 3-7640-0317-0.
- JESCHKE, 2006 JESCHKE, H.: Zerkleinerung von Beton im Prallbrecher. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006.
- JESCHKE/POPPY,
2004 JESCHKE, H.; POPPY, W.: Prallzerkleinerung von Beton. 2004. Bd. Aufbereitungstechnik 45, Seite 25 – 32.
- KESSLER, 1994 KESSLER, H.-G.: Kugelmodell für Ausfallkörnungen dichter Betone 1994, Betonwerk + Fertigteiltechnik. Bd. Heft 11, Seite 63 – 66.
- KOHLER, 1997 KOHLER, G.: Recyclingpraxis Baustoffe. Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1997. Bd. 3. Auflage.
- KRIETER/
MALKUS,1989 KRIETER, M.; MALKUS, A.: Standortoptimierung von Straßenbäumen, Teil 1. 1989. [Hrsg.]: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL).
- KRIETER/
MALKUS,1996 KRIETER, M.; MALKUS, A.: Untersuchungen zur Standortoptimierung von Straßenbäumen. [Hrsg.] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 1996.
- KRUSE et al., 2019 KRUSE, E.; BIEBER, C; DICKHAUT, W.: Straßenbäume als Komponente der Überflutungs- und Hitzevorsorge in Städten. ProBaum, Heft 1/2019, Seite 2 – 9.
- KURKOWSKI, 2010 KURKOWSKI, H.: Extremstandorte von Straßenbäumen erfordern Extremsubstrate - die Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate. [Hrsg.] LVG Erfurt. [Tagungsband]. Erfurt, 2010.
- KURKOWSKI et. al.,
2022 KURKOWSKI, H.; BAUM, G.; KETZLER, J.; ZABEK, M.: Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit von Verkehrsflächen für zukunftsfähige Quartiere, Studie erarbeitet im Zuge des EFRE-geförderten Forschungsvorhabens ReBAU, 2022
- KURKOWSKI, Tobias,
2022 Ergebnisse von Wasserspannungskurven von Baumsubstraten am großem Prüfzylinder, unveröffentlicht.
- LEOPOLDSEDER,
2019 LEOPOLDSEDER, T.: FLL-Richtlinien „Begrünbare Flächenbefestigungen“. Neue Landschaft, Heft 10/2019, Seite 23 – 27.
- LESON/
KURKOWSKI 2022 LESON, M.; KURKOWSKI, H.: Hochofenstückschlacken zur Verwendung in Baumsubstraten, IGF-Forschungsvorhaben Nr. 19890 N, Schlussbericht 2022
- LIESEKE/HEIDGER,
1994 LIESEKE, H.-J.; HEIDGER, C.: Bäume in Stadtstraßen. [Hrsg.] Bundesministerium für Verkehr. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Universität Hannover. 1994. Bd. Heft 670.

- MACHT/NISCHER, 2006 MACHT, J.; NISCHER, P.: Weiche Betone - kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung. 2006. Bd. Zement und Beton, Seite 24 – 29.
- MANDELBROT, 1987 MANDELBROT, B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser Verlag, 1987.
- MC GEARY, 1961 MC GEARY, R.K.: Mechanical Packing of Spherical Particles. Journal of the American Ceramic Society, 1961. Bd. 44 (10), Seite 513 – 522.
- MÜLLER, 2018 MÜLLER, A.: Baustoffrecycling, Entstehung - Aufbereitung – Verwertung. Springer Vieweg-Verlag, 2018.
- MÜLLER/STARK, 1996 MÜLLER, A.; STARK, U.: Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen und ihr Potenzial für die Betonforschung, Beton, 09/1996, Seite 390 – 397.
- NOLAN/KAVANAGH, 2003 NOLAN, G.T.; KAVANAGH, P.E.: Computer simulation of random packing of hard spheres. Powder Technology. 2003. Bd. 130 (1-3), Seite 70 – 76.
- NRW, 2011 Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz, NRW: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. 2011. Januar 2011.
- OGER/TROADEC, 1986 OGER, L.; TROADEC, F.: Properties of disordered sheer packings, I. Geometric structure: statistical model, numerical simulations and experimental results. Powder Technology, 1986. Bd. Band 46, Seite 121 – 131.
- POWELL, 1980 POWELL, M. J.: Computer-simulated random packing of spheres, Powder Technology, Vol. 25, 1980, Seite 45 – 52.
- REICHWEIN, 2002 REICHWEIN, S.: Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung. Hannover: Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur, Universität Hannover, 2002. Bd. Heft 66. ISBN 3-9235 17-53-X.
- RESCHKE, 2000 RESCHKE, T.: Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und Festigkeit von Beton. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2001. Bde. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62/2000, Dissertation.
- RESCHKE/SIEBEL, 1999 RESCHKE, T.; SIEBEL, E.: Einfluss der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeit- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton. Beton, 1999. Bd. Teil 1, Seite 718 – 724.
- RESCHKE/SIEBEL, 2000 RESCHKE, T.; SIEBEL, E.: Einfluss der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeit- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton. Beton, 2000. Bd. Teil 2, Seite 47 – 50.
- ROTH-KLEYER, 2020 ROTH-KLEYER, S.: Kesselsande für Vegetationssubstrate im GaLaBau, Neue Landschaft, Heft 4/2020, Seite 48 – 55.

- RStO, 2001 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV).: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen - RStO 01. Köln: FGSV-Verlag, Ausgabe 2001.
- RStO, 2012 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV).: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen - RStO 12. Köln: FGSV-Verlag, Ausgabe 2012.
- RUGE, 1972 RUGE, U.: Ursache des Straßenbaumsterbens und mögliche Gegenmaßnahmen. 1972, Sonderdruck aus Garten und Landschaft, H. 10; Callwey-V., München.
- SCHEFFER/
SCHACHTSCHABEL,
2002 SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., et. al.: Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2002. 15. Auflage.
- SCHIESSL, 2005 SCHIESSL, P.: Gesteinskörnung, Skriptum zur Grundvorlesung Baustoffkunde. München: Technische Universität München, 2005.
- SCHLÜSSER/
MCEDLOV-
PETROSJAN, 1990 SCHLÜSSER, K.H.; MCEDLOV-PETROSJAN, O.P.: Der Baustoff Beton- Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1990. Seite 141 – 64.
- SCHÖNFELD, 2006 SCHÖNFELD, P.: Baumpflanzung in der Stadt nach den Regelwerken der FLL und der ZTV-Vegtra-Mü. Veitshöchheimer Berichte aus der Landespflege, 2006. Bd. Heft 94, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Seite 11 – 20.
- SCHÖNFELD, 2018 SCHÖNFELD, P.: Stadtbäume der Zukunft – Standortvoraussetzungen, Baumqualität und fachgerechte Pflanzung, ProBaum Heft 4/2018, Seite 7 – 14.
- SCHÖNFELD/BÖLL,
2020 SCHÖNFELD, P.; BÖLL, S.: Stadtbäume nach dem Trockensommer 2018, ProBaum Heft 1/2020, Seite 18 – 26.
- SCHRÖDER, 1997 SCHRÖDER, K.: Untersuchungen zum Einfluß standardisierter Substrate auf das Wachstum von Laubbäumen. Grünflächenamt Stadt Osnabrück. Wurzelraumoptimierung – Beispiele aus Osnabrück. 1997. Seite 5 – 47.
- SCHWANDA, 1956 SCHWANDA, F.: Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. Der Bauingenieur. 1956. Bd. 31, Seite 41 – 46.
- SCOTT, 1960 SCOTT, G.D.: Packing of spheres. Nature. 1960. Bd. 188, Seite 908-909.
- STARK, 2003 STARK, U.: Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen - schnelle und effektive Methode zur Beurteilung. 2003, Tagung Recycling 2003, Forschungsprojekte zum Recycling an der Bauhaus-Universität Weimar.
- STATISTIK, 2003 Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2; Erkennen und Behandeln von Ausreißern, FGSV Verlag, Köln, 2003.
- STRECKENBACH et.
al., 2013 STRECKENBACH, M.; SCHRÖDER, K.; BENNERSCHIEDT, C.: Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), 2013.

- STÜTZEL et. al., 2004 STÜTZEL, T.; BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.; SCHMIEDENER, H.: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), Juli 2004.
- STÜTZEL et. al., 2007 STÜTZEL, T.; BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.; SCHMIEDENER, H.; STRECKENBACH, M.: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „Ergänzungsvorhaben“. Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT), Juni 2007.
- TACKHEIT/
PEARSON, 1964 TACKHEIT, J. L.; PEARSON, R.W.: Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. 1964, Proc. Soil Sci. Soc. Am. 28, Seite 600 – 605.
- THIENEL, 2010 THIENEL, K.-C.; KUSTERMANN, A.: Sonderbetone, Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Frühjahrssemester 2010.
- TL Gestein, 2004 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04). Köln, FGSV-Verlag, Ausgabe 2004/Fassung 2007. FGSV 613.
- TP Boden, CBR, 2009 Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 7.1: CBR-Versuch. Köln, FGSV-Verlag, August 2009.
- TP Boden, EVD, 2003 Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit leichten Fallgewichtsgesetz. Köln, FGSV-Verlag, Ausgabe 2003.
- TB Boden,
Luftpyknometer, [1988] Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 3.3: Korndichte mit Luftpyknometer. Köln, FGSV-Verlag, Ausgabe 1988.
- UN, 2022 United Nations: The Sustainable Development Goals Report 2022. United Nations publication issued by the Department of Economic and Social Affairs (DESA), ISBN: 978-92-1-101448-8.
- WEINGART, 1998 WEINGART, W.: Einfluss des Natursand- und Brechsandanteils auf die Standfestigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel. Straße und Autobahn Nr. 49, 1998. Nr. 9, Seite 474 – 478.
- WELTECKE/
STRECKENBACH
2022 WELTECKE, K.; STRECKENBACH, M.: Erkenntnisse über die Ausbreitung und Speicherung von Wasser in Baums substraten, erschienen in BI Galabau Nr. 1+2, Februar 2022, Seite 62 – 65.
- WHG, 2021 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes – Wasserhaushaltsgesetz – WHG vom 31. Juli 2009 mit den Änderungen vom 14.12.2021
- WITT, 2020 WITT, R.: Der Klimawandel: Eine unberechenbare Zukunft. Neue Landschaft Heft 1/2020, Seite 34 – 40.
- WÖHLER, 2008 WÖHLER, J.: Mathematik und konkrete Kunst - Verbindungen zwischen scheinbar fremden Welten. Würzburg, 2008.
- ZTV E, 2009 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTV E-StB 2009. Köln, FGSV-Verlag, 2009.

-
- | | |
|---------------------|---|
| ZTVT, 1995 | Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau – ZTVT-StB 1995. Köln, FGSV-Verlag, 1995/1998. |
| ZTV-Vegtra-Mü, 2002 | Landeshauptstadt München, Baureferat, Gartenbau: Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten (ZTV-Vegtra-Mü). 2002. |
| ZTV-Vegtra-Mü, 2008 | Landeshauptstadt München, Baureferat, Gartenbau. Zusätzliche technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten – ZTV-Vegtra-Mü. München, 2008. |
| ZTV-Vegtra-Mü, 2016 | Landeshauptstadt München, Baureferat, Gartenbau. Zusätzliche technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten – ZTV-Vegtra-Mü. München, Juli 2016. |

Anlage 1: Historische Entwicklung der Regelwerke und der Anforderungsprofile für Baumsubstrate**Inhalt**

A1.1	DIN 18915 und DIN 18916, Fassung 2002 und 2016
A1.2	FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2004
A1.3	Anforderungsprofil von HEIDGER, 2006
A1.4	FGSV-Hinweise, 2006
A1.5	ZTV-Vegtra-MÜ, 2008 und 2016
A1.6	FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2010
A1.7	FGSV-Merkblatt für die Erhaltung von Baumstandorten in Verkehrsflächen
A1.8	Baumwurzeln in der Nähe von Leitungen und Kanälen
A1.9	Tabelle 28: Historische Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate im tabellarischen Überblick

Bilder

Bild 57:	Pflanzung nach DIN 18916 in Pflanzloch und Pflanzgrube bei für die Baumpflanzung bedingt geeigneten Bodenverhältnissen [FLL, 2010]
Bild 58:	Weiterentwickelte Pflanzgrubenbauweise nach FGSV-Hinweisen
Bild 59:	Pflanzgrubenbauweise mit mindestens 12 m ³ Pflanzgrubengröße und Belüftungsgraben als wurzelraumerweiternde Maßnahme [FGSV 2006]
Bild 60:	Pflanzgrubenbauweise mit mindestens 12 m ³ Pflanzgrubengröße und Belüftungsbohrungen als Wurzelraum erweiternde Maßnahme [FGSV 2006]
Bild 61:	Einzelbaumstandort mit geschlossener Belagsfläche nach ZTV-Vegtra-Mü [2008]
Bild 62:	Pflanzgrubenbauweise 1 nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2010]
Bild 63:	Pflanzgrubenbauweise 2 nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2010]

Tabelle

Tabelle 28:	Historische Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate im tabellarischen Überblick
-------------	---

A1.1 DIN 18915 und DIN 18916, Fassung 2002 und 2016

Grundsätzlich gilt für die Pflanzung von Straßenbäumen in Verkehrsflächen die DIN 18915: ‚Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten‘ [DIN 18915, 2016] in Kombination mit DIN 18916: ‚Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Pflanzen und Pflanzarbeiten‘ [DIN 18916, 2016]. Diese Normen regeln allgemein Boden- und Pflanzarbeiten für das Pflanzen von Gehölzen, Stauden und Blumen im Landschaftsbau.

Hinsichtlich der technischen Anforderungen sind dabei in DIN 18915 [2002] enthalten:

"Für die vorgesehene Nutzung ungeeigneter Boden ist auszutauschen, wenn die Eignung durch Bodenverbesserungsmaßnahmen nicht erreicht werden kann"

und zu mineralischen Stoffe zur Bodenverbesserung:

"Mineralische Stoffe zur Bodenverbesserung, z.B. Kalk, Sand, Kies, Splitt, Bims, Lava, Steinmehl, Blähton, Silikat-Kolloid, müssen für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet sein, z.B. zur Verringerung oder Stärkung der Plastizität, Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit, Erhöhung der Belastbarkeit, zur Porenverteilung und zur Strukturstabilisierung. Stoffe, die wegen rascher Verwitterung die Kornzusammensetzung und oder den pH-Wert des Bodens ungünstig beeinflussen, sollten nicht verwendet werden."

In DIN 18916 [2002] ist die Vorbereitung der Herstellung der Vegetationstragschicht wie folgt beschrieben:

"Die Vegetationstragschicht sowie auch gegebenenfalls der Baugrund sind nach DIN 18915 vorzubereiten. Bei Baumpflanzungen an Standorten, deren Durchwurzelungsbereich begrenzt ist (z.B. in Plätzen, an Straßen) muss die offene oder mit einem dauerhaft luft- und wasserdurchlässigen Belag versehene Fläche mindestens 6 m² betragen. Der durchwurzelbare Raum sollte eine Grundfläche von mindestens 16 m² und eine Tiefe von 80 cm haben."

und

"Pflanzlöcher und -gruben sind in einer Breite auszuheben, die dem 1,5-fachen Durchmesser des Wurzelwerkes oder des Ballens entspricht."

An dieser prinzipiellen Zuordnung von Stoffen und Abmessungen ändert sich auch in der DIN 18915, Fassung 2016, nichts. Eine Pflanzung nach DIN 18916 ist im folgendem Bild 57 [entnommen FLL, 2010] dargestellt.

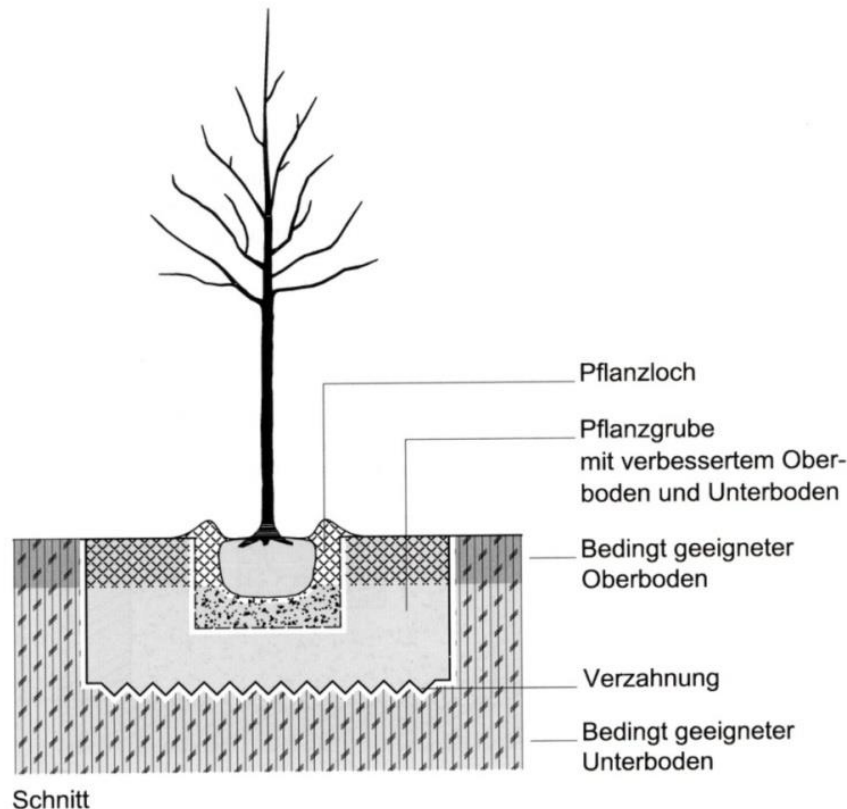


Bild 57: Pflanzung nach DIN 18916 in Pflanzloch und Pflanzgrube bei für die Baumpflanzung bedingt geeigneten Bodenverhältnissen [FLL, 2010]

Als Anforderungen, die die gärtnerischen Belange regeln, ergeben sich nach diesen DIN-Normen folgende wesentliche Vorgaben:

- Ober- und Unterboden werden getrennt gewonnen und bei der Pflanzung entsprechend wiedereingesetzt.
- Die ‚offene‘ Baumscheibe soll in Verkehrsflächen mindestens 6 m² groß sein.
- Für die Baumgrubengröße wird ein Pflanzgrubenvolumen von mindestens 16 m² Fläche x 0,8 m Tiefe = mind. 12,8 m³ gefordert.

Ein Anforderungsprofil für Böden oder Substrate, wie z.B. für den Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt, ist in den aufgeführten DIN-Normen nicht enthalten. Gemäß DIN sind diese im Regelfall in Zweifelsfällen zu untersuchen.

Die zitierten Normen in der Fassung von 2002 werden den Anforderungen für Straßenbaumpflanzungen in Verkehrsflächen nicht gerecht und können daher insbesondere bei Straßenbaumpflanzungen in Verkehrsflächen nicht direkt angewendet werden, sodass auch unter diesen Aspekten eine Überarbeitung notwendig wird (DIN 18915 [2016] und DIN 18915 [2016]).

A1.2 FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2004

Die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) erkennt diese anfängliche Lücke im Bereich der DIN-Normung. Erstmals mit Veröffentlichung der ‚Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate‘ [FLL, 2004] werden weitergehende Anforderungen für Baumpflanzungen und verwendete Substrate in Ergänzung zu den zuvor aufgeführten DIN-Normen definiert. Neu ist hier insbesondere:

- Es werden zwei Pflanzgrubenbauweisen mit einem Baumgrubenvolumen von mindestens 12 m³ bei einer Tiefe im Regelfall von 1,50 m definiert.
- Die Pflanzgrubenbauweise 1 stellt eine Bauweise dar ohne oder für eine nur freitragende Überbauung. Die Anwendung ist daher insbesondere für Baumpflanzungen in Grünflächen mit geringem Nutzungsdruck geeignet.
- Die Pflanzgrubenbauweise 2 wird ganz oder teilweise mit dem Verkehrsflächen-Oberbau überbaut. Die Pflanzgrubenbauweise 2 stellte daher im Rahmen dieser FLL-Empfehlungen die vorgesehene Bauweise für Baumpflanzungen in und an Verkehrsflächen dar.
- Pflanzgrubenbauweise 1 und 2 erfolgen einschichtig.
- Der Einbau des Substrates hat lagenweise, wie im Straßenbau üblich, zu erfolgen mit definierter Verdichtung, um eine nachträgliche Setzung zu vermeiden.
- Neben den Bauweisen wurden auch jeweils ein konkretes Anforderungsprofil sowie Prüfverfahren für die Baumsubstrate vorgegeben.
- Weiterhin wurden wurzelraumerweiternde Maßnahmen wie Graben- und Tiefenbelüftungsverfahren beschrieben, um den Wurzeln der Straßenbäume das Herauswurzeln aus der Baumgrube zu erleichtern. Damit sollte der ‚Blumentopfeffekt‘ vermieden und ein tiefgründiges Wurzelwachstum erreicht werden.

Die Pflanzgrubenbauweise 2 stellt mit Ihrem konkreten Anforderungsprofil an das Baumsubstrat, wie z.B. an Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt und Standfestigkeit im definierten verdichteten Zustand, erstmals konkrete Anforderungen aus vegetationstechnischer und bautechnischer Sicht für die Nutzung in Verkehrsflächen. Ein solcher Baustoff stellt straßenbautechnisch auch ein geeignetes Planum für den Überbau mit dem Verkehrsflächen-Oberbau nach RStO [2001] und später von [2012] dar. Dabei ist zu beachten, dass wurzelraumerweiternde Maßnahmen bei ungeeigneten Bodenverhältnissen – wie sie im Straßen- und Tiefbau nahezu immer

vorliegen – grundsätzlich notwendig sind, damit nach anfänglicher Durchwurzelung des Baumsubstrates in der Pflanzgrube sich der Baum auch mit Hilfe weiterer wurzelraumerweiternder Maßnahmen entsprechend weiterentwickeln kann.

A1.3 Anforderungsprofil von HEIDGER, 2006

HEIDGER stellt bereits 2006 ein verschärftes Anforderungsprofil für Baumsubstrate der Pflanzgrubenbauweise 2 [HEIDGER, 2006b] vor. Er erkennt, dass das Anforderungsprofil der FLL-Empfehlungen von 2004 [FLL, 2004] seit Einführung des neuen Regelwerkes insbesondere für den Bodenwasserhaushalt – wie der max. Wasserkapazität und der Wasserdurchlässigkeit für überbaute Baumstandorte – zu geringe Anforderungswerte enthält und belegt dies mit gegenwärtigen Schadensfällen, die nachträglich nur noch durch einen erhöhten Pflegeaufwand kompensiert werden können.

HEIDGER beschreibt die Festlegung der Anforderungen der Substrateigenschaften der damaligen FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, als „gemeinsamen Kompromiss in der Regelwerksarbeit“ und definiert aus seinen langjährigen Praxiserfahrungen ein „Verschärftes Anforderungsprofil“ [HEIDGER, 2006b] mit höheren Anforderungswerten an den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt. Er hält somit die Anforderungen für die Pflanzgrubenbauweise 2 für unzureichend.

Die Festlegungen für das „Verschärfte Anforderungsprofil nach HEIDGER“ bei der Wasserdurchlässigkeit mit $\leq 1,0 \times 10^{-5}$ und $\geq 1,0 \times 10^{-6}$ m/s begründet er damit, dass eine Begrenzung nach unten notwendig sei, da ansonsten bei natürlichen oder landschaftspflegerischen Bewässerungsvorgängen das Wasser durch das Substrat ‚rauscht‘. Gemeint ist damit, dass aufgrund des verbundenen hohen Anteils an dränwirksamen Grobporen das Wasser zu schnell abfließt und die Pflanze es nicht aufnehmen kann.

Für die maximale Wasserkapazität max. WK und das Gesamtporenvolumen GPV fordert HEIDGER mit 30- und 40 Vol.-% um 5 Vol.-% höhere Werte als die FLL-Empfehlungen mit 25- und 35 Vol.-%. Er begründet die höheren Anforderungen für max. WK und GPV damit, dass auch Substrate, die ausschließlich mit natürlichen ‚dichten‘ Gesteinskörnungen und Böden zusammengesetzt werden, die zu geringen Anforderungen der FLL erreichen. Für unterbaufähige Vegetationstragschichten ist es aus seiner Sicht erforderlich, poröse Gesteinskörnungen im Substrat zu verwenden, um so eine Standortoptimierung am Extremstandort Verkehrsfläche im Vergleich zu Boden zu erreichen.

Das Luftvolumen bei pF 1,8, welches gemäß Bodenkunde die weiten Grobporen mit einem Porenäquivalent $> 50 \mu\text{m}$ beschreibt, begrenzt HEIDGER [2006b] auf mind. 15 Vol.-% und begründet diese Anforderung wie folgt:

„Um an verfügbares Bodenwasser zu gelangen, müssen die Wurzeln der Bäume in die Bodenschichten eindringen können und diese durchwurzeln. Die größtmögliche Aufnahme des im Untergrund gespeicherten Perkulationswassers ist bei vollständiger Wurzelerschließung des zur Verfügung gestellten unterirdischen Entwicklungsraumes möglich. Voraussetzung dafür ist ein ausreichend mit Luft versorgter Bodenraum. Daher wird von durchwurzelungsfähigen Substraten ein Luftvolumen von mindestens 11 Vol.-% als Nachweis der vegetationstechnischen Eignung erwartet. Im Hinblick auf die Untersuchungen von FLOCKER; VOMOGEL und HOWARD [1959], BERTRAND und KOHNKE [1957], GILL und MILLER [1956] sowie TACKHEIT und PEARSON [1964] und RUGE [1972] kommt es bei Unterschreitung dieses als kritisch beurteilten Grenzwertes zu Schäden an der Vegetation. Funktionserfüllende Substrate, die als Stand- und Entwicklungsraum bei Baumpflanzungen in Städten dienen, müssen im eingebauten und verdichteten Zustand diese grundlegende Anforderung an das Bodenluftvolumen erfüllen.“ [Vgl. HEIDGER, 2006b]

Wenn gemäß FLL-Empfehlungen von 2004 [FLL, 2004] ein Substrat ein GPV von lediglich 35 Vol.-% erreicht und die Anforderung an das Luftvolumen mindestens ein Drittel und maximal zwei Drittel vom GPV gefordert wird, ergibt sich rechnerisch ein Wert von 11,7 Vol.-%. Um einen ausreichenden Abstand zum Bereich des ‚Wurzeltods‘ mit ca. 10 Vol.-% zu erhalten, rät HEIDGER deshalb schon früh zu einem Grenzwert von mind. 15 Vol.-%.

A1.4 FGSV-Hinweise, 2006

Innerhalb der ‚Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten‘ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV, 2006] wird auch aufgrund der Erfahrungen von HEIDGER für Baumpflanzungen in Verkehrsflächen das Anforderungsprofil für ein überbaubares Baumsubstrat weitestgehend aus dem ‚verschärften Anforderungsprofil‘ von HEIDGER abgeleitet. Es enthält daher insbesondere für den Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt höhere Anforderungen als die FLL-Empfehlungen von 2004 und auch später von 2010 [FLL, 2004 und 2010], während die Pflanzgrubenbauweisen 2 und die Maßnahmen zur Wurzelraumerweiterung den FLL-Empfehlungen von 2004 folgen. Darüber hinaus enthalten die FGSV-Hinweise schon weiterentwickelte Bauweisen mit Schutzmaßnahmen des Verkehrsflächenoberbaus vor Durchwurzelung durch den Einsatz monolithischer Wurzelglocken im Oberbau sowie dem Einsatz von

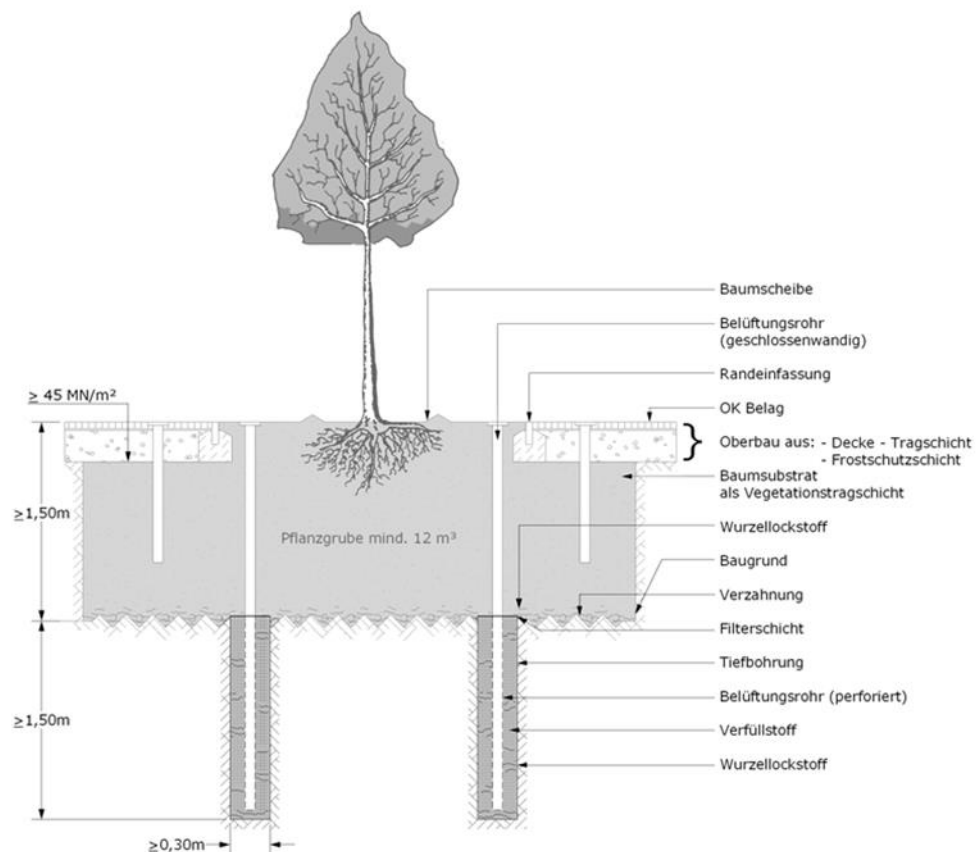


Bild 60: Pflanzgrubenbauweise mit mindestens 12 m³ Pflanzgrubengröße und Belüftungsbohrungen als Wurzelraum erweiternde Maßnahme [FGSV 2006]

A1.5 ZTV-Vegtra-MÜ, 2008 und 2016

Unter anderem in Süddeutschland werden bei Baumpflanzungen auch ‚Zusätzliche technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten – ZTV-Vegtra-MÜ‘ [2008] angewendet. Es werden hier zwei Substrate unterschieden:

- Substrat A nach Sieblinie A für den offenen nicht überbauten Wurzelraum einer Pflanzgrube/Pflanzgraben, nicht verdichtbar.
- Substrat B nach Sieblinie B für den Einsatz unter Tragschichten des Oberbaus von Verkehrsflächen, verdichtbar. Substrat B dient nicht als Pflanzsubstrat im unmittelbaren Wurzelbereich.

Substrat B wird bei den verschiedenen Bauweisen nach ZTV-Vegtra-MÜ lediglich unter den Tragschichten der Verkehrsfläche als weiterer durchwurzelbarer Bodenraum genutzt.

Für Großbäume fordert die ZTV-Vegtra-Mü eine offene Bodenfläche von mindestens 24 m² und eine Baumgrubentiefe von mindestens 1,5 m, was einem Mindestvolumen von 36 m³ entspricht. Die Verfüllung erfolgt in der Regel mit Substrat A und mit offener Baumscheibe. Wenn eine offene Baumscheibe von 24 m² nicht gebaut werden kann, werden in der ZTV-Vegtra-Mü Bauweisen vorgeschlagen, die eine Kombination des Substrates A für die direkte Pflanzung und den erweiterten durchwurzelbaren Bodenraum mit Substrat B vorschlagen (Bild 61).

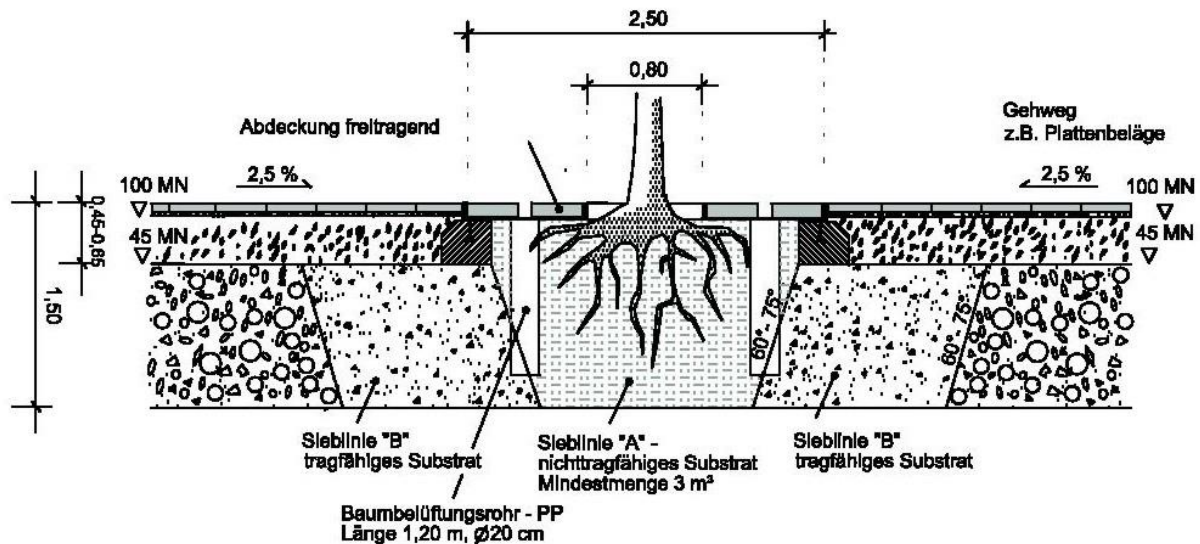


Bild 61: Einzelbaumstandort mit geschlossener Belagsfläche nach ZTV-Vegtra-Mü [2008]

Mit Einführung der ZTV-Vegtra-Mü [2016] in der überarbeiteten Form von 2016 werden die Anforderungen an die Baumsubstrate an die FLL [2010] weitgehend angepasst.

A1.6 FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, 2010

Im September 2010 werden die ‚Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate‘ der FLL [2010] in überarbeiteter Form veröffentlicht. Dabei steht u.a. im Vordergrund, sich den Anforderungen an die Substrate der ZTV-Vegtra-Mü [2008] anzugleichen. Seitens FLL ist es wünschenswert, dass die ZTV-Vegtra-Mü hinsichtlich der Substrateigenschaften und Bauweisen Bezug auf die FLL-Empfehlungen nehmen können, um eine deutschlandweite Anwendung zu erreichen. Die ZTV-Vegtra-Mü sollte nur noch im Sinne von Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) wirksam sein. Dabei sollten die Erfahrungswerte der ZTV-Vegtra-Mü nicht verloren gehen, sondern in die überarbeiteten FLL-Empfehlungen einfließen. Insbesondere erfolgt dies, indem man erweiterte Vorgaben für die Anforderungen an das Substrat der Pflanzgrubenbauweise 1 festlegt sowie auch auf

größere Baumgruben als 12 m^3 hinweist. Das Anforderungsprofil für die verschiedenen Baumsubstrate wird daher an mehreren Stellen erweitert oder angepasst.

Die Beziehung zur DIN 18916 [2002] wird in den FLL-Empfehlungen von 2010 umfassender erläutert, wobei zahlreiche weitere Zeichnungen aufgenommen werden, um verschiedene Varianten der Pflanzgrubenbauweisen 1 und 2 für ähnliche Situationen breiter aufzuzeigen (siehe Bild 62 und 63).

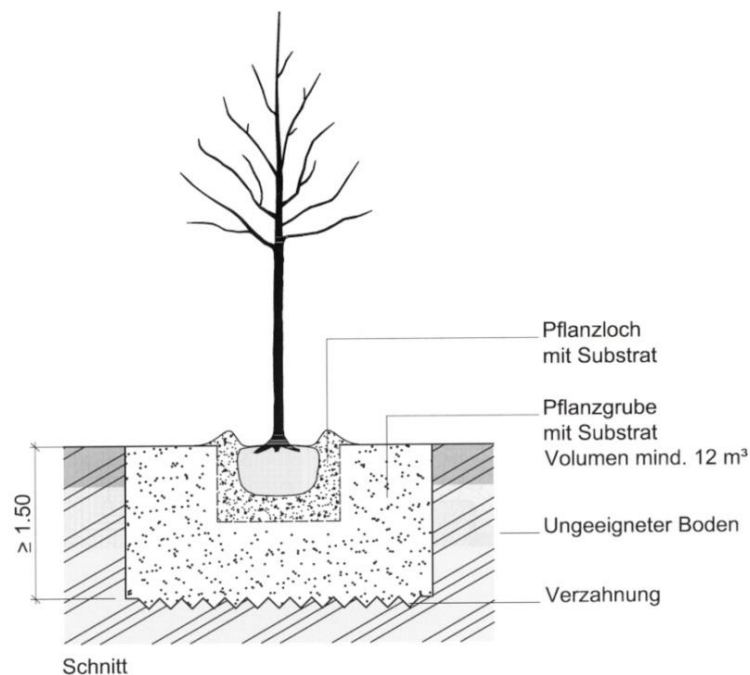


Bild 62: Pflanzgrubenbauweise 1 nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2010]

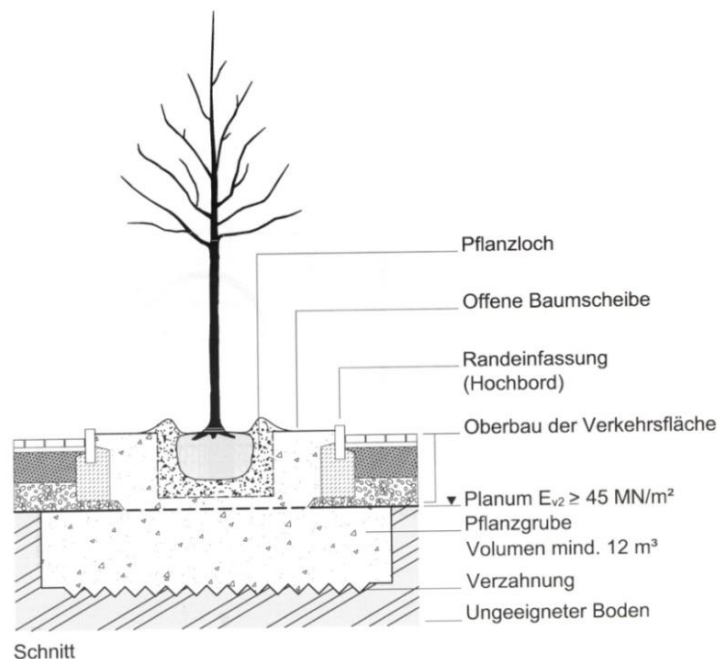


Bild 63: Pflanzgrubenbauweise 2 nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2010]

A1.7 FGSV-Merkblatt für die Erhaltung von Baumstandorten in Verkehrsflächen

Das ‚Merkblatt über die Erhaltung von Verkehrsflächen mit Baumbestand‘ – M EVB, wird 2019 von der FGSV veröffentlicht [FGSV 2019], wobei es auch als Fachbericht von der FLL gleichlautend publiziert wird [FLL 2019]. Das Merkblatt zeigt Möglichkeiten der Sanierung von schadhafte Verkehrsflächen mit Baumstandorten auf, mit dem Ziel beide Nutzungen – als Verkehrsfläche und als Baumstandort – zu erhalten und zu verbessern. Es beschreibt Sanierungsbauweisen für bestehende Baumstandorte in Verkehrsflächen und ergänzt so das zuvor diskutierte Regelwerk.

Hinsichtlich der Eigenschaften der einzusetzenden Substrate und Baustoffe verweist das Merkblatt auf die bestehenden Regelwerke für Neupflanzungen.

A1.8 Baumwurzeln in der Nähe von Leitungen und Kanälen

Am Institut für unterirdische Infrastruktur geht man schon seit längerer Zeit Fragestellungen zum Wurzeleinwuchs von Straßenbäumen in Abwasserkanälen und -leitungen und Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung nach. Die Forschungsarbeiten werden durch die Feststellung notwendig, dass Wurzeln von Bäumen insbesondere in Hausanschlussleitungen einwachsen können. Es werden Schäden bekannt, die bis zu einem vollständigen Verschluss der Abwasserleitung führen. Bei der Untersuchung dieser Schäden und möglicher Abhilfemaßnahmen erfolgt eine intensive Beschäftigung mit dem natürlichen Wurzelwachstum, der Wurzelentwicklung in städtischen Bereichen und dem Auftreten von Wurzeln im Bereich von Ver- und Entsorgungsleitungen mit den umgebenden Bodenverhältnissen. [Vgl. BOSSELER et. al. 2001]

STÜTZEL et. al. untersuchen [2004] die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen in Abhängigkeit vom Anpressdruck der Dichtung oder des Dichtungsmittels. Dabei können schon geringste Spaltbildungen zu einem Einwuchs von Baumwurzeln führen. 2007 werden von BENNERSCHIEDT Möglichkeiten der Sanierungsverfahren zur Entfernung von Wurzeleinwuchs untersucht. Die Untersuchungen werden durch ergänzende Feldversuche [BENNERSCHIEDT et. al. 2007] und Untersuchungen für wurzelfeste Rohrverbindungen ergänzt [STÜTZEL et. al. 2007]. 2011 folgen Versuche mit einer wurzelfesten Bettung der Rohre sowie der Verpflanzung von Großbäumen im Rahmen einer Versuchsanlage [BENNERSCHIEDT et. al. 2011].

STRECKENBACH et.al. berichten [2013] über die Anlage einer Rehabilitationszone auf der zuvor aufgeführten Probemaßnahme in Osnabrück. Sie verweisen darauf, dass während der Phase des Vorhabens gewonnene Erkenntnisse auch wichtige Hinweise zu den Möglichkeiten einer gezielten Führung von Wurzeln unter Zuhilfenahme von

Substraten liefern. Darüber hinaus soll das Hauptaugenmerk künftiger Untersuchungen auf der praktischen Anwendbarkeit porenarmer Verfüllmaterialien zum Leitungsschutz ‚Leitungsgraben neben Baumstandort‘ in Kombination mit porenreichen Substraten zur Förderung des Wurzelwachstums liegen. In der Folge soll die Probemaßnahme für weitere Forschungen im Bereich Wirksamkeit von Leitungsschutzmaterialien dienen. STRECKENBACH bestätigt damit die Erkenntnisse von HEIDGER aus früheren Veröffentlichungen, dass Wurzeln über die Porosität des eingesetzten Substrates lenkbar sind.

HEIDGER und KRÜCKEN veröffentlichen [2006] auch Erkenntnisse für Gas- und Wasserleitungen sowie für Kabeltrassen neben Abwasserleitungen. Insbesondere machen Sie aufmerksam auf die Möglichkeit, dass Baumwurzeln sich als Zugschlinge oder Druckstempel im Leitungsbereich ausbilden können, was insbesondere bei Gasleitungen auch zu Unfällen führen kann. HONDS berichtet [2011] in diesem Zusammenhang auch von vorgefundenen Spiralwurzeln.

Tabelle 28: Historische Entwicklung der Anforderungsprofile für Baumsubstrate im tabellarischen Überblick

Eigenschaften	Einheit	FLL-Empfehlungen [FLL, 2004]		HEIDGER, [2006b]	FGSV- Hinweise, [FGSV, 2006]	ZTV- <i>Vedtra</i> -Mü [2008]		FLL-Empfehlungen [FLL, 2010]		ZTV- <i>Vedtra</i> -Mü [2016]			
		Pflanz- gruben- bauweise 1	Pflanz- gruben- bauweise 2			Pflanzgruben- bauweise 2	überbaubar	Substrat A, nicht überbaubar	Substrat B, überbaubar	**	Pflanz- gruben- bauweise 1	Pflanz- gruben- bauweise 2	Substrat A, nicht überbaubar
Korngrößenverteilung/Anforderungen an die Gesteinskörnungen													
Korngrößenverteilung der Regelwerke	mm	0/8 - 0/32	0/16 - 0/32	0/11 - 0/22	0/11 - 0/22	0/12 - 0/32	0/32	0/11 - 0/32	0/16 - 0/32	0/8 - 0/32	0/16 - 0/32		
Anteil d ≤ 0,063 mm	Masse-%	5 - 25	5 - 15	5 - 15	5 - 15	10 - 25	max. 15 (F 2)	5 - 25	5 - 15	5 - 25	≥ 10		
Anteil d = 0,063 - 2 mm	Masse-%	-	-	-	-	≥ 35	Gemäß	≥ 30	≥ 30	≥ 30	≥ 30		
Anteil d = 2 - 31,5 mm	Masse-%	-	-	-	35 - 70	-	ZTV T - <i>SIB</i> 95, Kiestragschicht	-	-	-	-		
Großkorn d	mm	31,5	31,5	-	-	45	45	-	-	83	83		
Gesteinskörnung (TL der FGSV)	-	TL Min- <i>SIB</i> / Nachweis	TL Min- <i>SIB</i> / Nachweis	TL Gestein- <i>SIB</i>	TL Gestein- <i>SIB</i>	-	TL Gestein- <i>SIB</i>	-	-	TL Gestein- <i>SIB</i>	TL Gestein- <i>SIB</i>		
Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt (bei definierter Verdichtung)													
Proctordichte der Prüfkörper	%	-	95	95	95	80	95	85	95	85	95		
Wasserdurchlässigkeit <i>k_v</i>	m/s	-	≥ 1,0 x 10 ⁻⁶	≤ 1,0 x 10 ⁻⁵ und ≥ 1,0 x 10 ⁻⁶	≤ 1,0 x 10 ⁻⁵ und ≥ 1,0 x 10 ⁻⁶	> 0,001 cm/s (1,0 x 10 ⁻⁵ m/s)	> 0,001 cm/s (1,0 x 10 ⁻⁵ m/s)	≤ 5,0 x 10 ⁻⁴ (Soll) und ≥ 5,0 x 10 ⁻⁶	≤ 5,0 x 10 ⁻⁴ (Soll) und ≥ 5,0 x 10 ⁻⁶	≤ 5,0 x 10 ⁻⁴ (Soll) und ≥ 5,0 x 10 ⁻⁶	≤ 5,0 x 10 ⁻⁴ (Soll) und ≥ 5,0 x 10 ⁻⁶		
Maximale Wasserkapazität (max. WK)	Vol.-%	-	≥ 25	≥ 30	≥ 35 - < 40	≥ 50 % des GPV	≥ 35 % des GPV	≥ 25	≥ 25	≥ 25	≥ 25		
Gesamtporenvolumen (GPV)	Vol.-%	-	≥ 35	≥ 40	≥ 40	> 35	> 20	-	-	> 35	> 35		
Luftkapazität bei max. WK oder	Vol.-%	-	-	-	-	-	-	≥ 10 oder	≥ 10 oder	≥ 10 oder	≥ 10 oder		
Luftkapazität bei <i>p_e</i> 1,8 (weite Grobporen)	Vol.-%	-	1/3 bis 2/3 vom GPV	≥ 15	≥ 15	> 10 und ≤ 50 % des GPV	> 10 und ≤ 65 % des GPV	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15		
Bodenchemie													
Bodenreaktion - pH-Wert	-	Ist anzugeben	Ist anzugeben	-	4,5 - 8,5	5,5 - 7,9	5,5 - 7,9	5,0 - 8,5	5,0 - 8,5	5,5 - 8,2	5,5 - 8,2		
Organische Substanz	Masse-%	2,0 - 4,0	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	1,5 - 4,0	≤ 1,5	1,0 - 4,0	1,0 - 2,0	2,0 - 4,0	1,0 - 2,0		
Salzgehalt im Wasserauszug oder	mg/100 g	≤ 150	≤ 150	≤ 150	-	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 150		
Salzgehalt in gesättigter Gipslösung	mg/100 g	≤ 150	≤ 150	≤ 150	-	-	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100		
Kalkgehalt nur für Sonderfälle	-	-	-	-	-	zu definieren	zu definieren	-	-	zu definieren	zu definieren		
Tragfähigkeit und Verdichtungsgrad													
Verformungsmodul	MN/m ²	-	≥ 45*	≥ 45*	≥ 45*	-	≥ 45 und ≤ 80	-	≥ 45	-	≥ 45 und ≤ 80		
E _{vd} /E _{vd}	-	-	≤ 2,5	≤ 2,5	≤ 2,5	-	≤ 2,5	-	-	-	-		
Einbau-Wassergehalt w _{opt}	Masse-%	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	95 - 100	erdfleucht	erdfleucht	≤ 100	≤ 0,8 x <i>w_{lim}</i> 93 - 87		
Verdichtungsgrad <i>D_{rel}</i>	%	-	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	95 - 100	93 - 87	93 - 87	93 - 87	93 - 87		

* Substrat sollte nicht wesentlich über ein Verformungsmodul von $EV_2 \geq 45 \text{ MN/m}^2$ verdichtet werden, da die bodenphysikalischen Eigenschaften (Wasser- und Lufthaushalt) beeinträchtigt werden können.

* Substrat B nach ZTV-Vedtra-Mü darf nicht als Pflanzsubstrat im unmittelbaren Wurzelbereich eingesetzt werden.

Anlage 2: Prüfungen für Vegetationstragschichten

	FLL [2004]				FLL [2010]	ZTV-Vegtra-Mü [2008]		ZTV-Vegtra-Mü [2016]
Prüfung	Durchführung	Eignungs- prüfung	Prüf- verfahren	Kontroll- prüfung ¹⁾	Prüfverfahren			
Korngrößenverteilung	DIN 18123	X	X	X	DIN 18123/DIN EN 933-1/ DIN EN 933-4/DIN EN 932-3	DIN 18123	DIN 18123	
Frostbeständigkeit	TL Min	-	-	-	-	DIN 52103/DIN 4220, Teil 3/ DIN 52104, Teil 1 nur in Sonderfällen	TL Gestein	
Wassergehalt	DIN 18121-1		X		-	DIN 18121-1	DIN 18121-1	
Proctordichte mit <u>w_{opt}</u>	DIN 18127	X			DIN 18127	DIN 18127 (Stahlplatte)	DIN 18127 (Stahlplatte)	
Maximale Wasserkapazität	nach normativen Anhang 1 der FLL für Baum- pflanzungen	X			nach normativen Anhang 1 der FLL für Baumpflanzungen	Probekörperherstellung nach DIN 18035, Durchführung der Prüfung nach ZTV-Vegtra-Mü, <u>www.fll.de</u> Kapitel 3.7, 3.8	FLL [2010]	
Wasserdurchlässigkeit		X					FLL [2010]	
Kornrohdichte zur rechnerischen Bestimmung des GPV		X					FLL [2010]	
Luftvolumen		X					FLL [2010]	
pH-Wert	VDLUFA A 5.1.1	X	X	X	VDLUFA A 5.1.1 mit mind. 3-facher Einwaage	VDLUFA A 5.1.1	VDLUFA A 5.1.1 mit mind. 3-facher Einwaage	
Salzgehalt	VDLUFA A 10.1.1/VDLUFA A 13.4.2	X	X	X	VDLUFA A 10.1.1	VDLUFAA 10.1.1	VDLUFAA 10.1.1	
Gehalt an organischer Substanz	DIN 18128/ VDLUFA A 15.2	X	X	X	DIN EN 13039	DIN 18128/VDLUFA A 15.2	DIN 18128/VDLUFA A 15.2	
Kalkgehalt	-	-	-	-	-	DIN 18129 nach Scheibler in Sonderfällen	DIN 18129 nach Scheibler in Sonderfällen	
Nährstoffgehalt	-	-	-	-	Deklaration nach Düngemittelverordnung	-	-	
Verdichtungsgrad	DIN 18125-2		X ²⁾	X ³⁾	DIN 18125-2	DIN 18125-2	DIN 18125-2	
Verformungsmodul	DIN 18134		X ²⁾	X ³⁾	DIN 18134/ TP BF- <u>StB</u> , Teil B	DIN 18134	DIN 18134 oder DIN EN ISO 22476-2 (leichte Rammsonde DPL-10)	
Einbaudicke	-		X ²⁾	X	-	-	-	

1) Im Zweifelsfall werden die übrigen Parameter der Eignungsprüfung untersucht, insbesondere dann, wenn das Ergebnis der Kontrollprüfung der Korngrößenverteilung erheblich von den Ergebnissen der Eignungsprüfung abweicht.

2) bei Bedarf

3) Verdichtungsgrad oder Verformungsmodul

Anlage 3: Mauer- und Dachziegelproben unterschiedlicher Provenienzen für die Technikums-Brecherversuche

Nr.	Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Provenienz	Brecher	Schlag- leisten- geometrie	Beschreibung
1.	1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	Dresden	Prallbrecher	kantig	rot, gebraucht, gemischt
2.	2.		MZ 1b DD PB	Dresden			rot, neu, historische Anwendung
3.	3.		MZ 2a L PB	Leipzig			rot, gebraucht, gemischt
4.	4.		MZ 2b L PB	Leipzig			rot, gebraucht, gemischt
5.	5.		MZ 3 WEI PB	Weimar			rot, gebraucht, gemischt
6.	6.		MZ 4a RO PB	Rostock			rot, gebraucht, gemischt
7.	7.		MZ 4b RO PB	Rostock			gelb, gebraucht, mit Mörtel
8.	8.		MZ 5 KA PB	Kassel			rot, gebraucht, gelocht, mit Mörtel, porosiert
9.	9.		MZ 5a FR PB	Friedland			rot, neu, gelocht, porosiert
10.	10.		MZ 6 SO PB	Soest			rot, gebraucht, mit Mörtel
11.	11.		MZ 7 BO PB	Bochum			Klinker, neu
12.	12.		MZ 8 DO PB	Dortmund			Klinker, gebraucht
13.	13.		MZ 9 HU PB	Hanau			rot, gebraucht, gemischt
14.	1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB S	Dresden	Prallbrecher	rund	rot, gebraucht, gemischt
15.	2.		MZ 1b DD PB S	Dresden			rot, neu, historische Anwendung
16.	6.		MZ 4a RO PB S	Rostock			rot, gebraucht, gemischt
17.	9.		MZ 6 SO PB S	Soest			rot, gebraucht, mit Mörtel
18.	10.		MZ 7 BO PB S	Bochum			Klinker, neu
19.	1.	Mauerziegel	MZ 1a DD BB	Dresden	Backenbrecher	-	rot, gebraucht, gemischt
20.	2.		MZ 1b DD BB	Dresden			rot, neu, historische Anwendung
21.	3.		MZ 2a L BB	Leipzig			rot, gebraucht, gemischt
22.	4.		MZ 2b L BB	Leipzig			rot, gebraucht, gemischt
23.	5.		MZ 3 WEI BB	Weimar			rot, gebraucht, gemischt
24.	6.		MZ 4a RO BB	Rostock			rot, gebraucht, gemischt
25.	7.		MZ 4b RO BB	Rostock			gelb, gebraucht, mit Mörtel
26.	8.		MZ 5 KA BB	Kassel			rot, gebraucht, gelocht, mit Mörtel, porosiert
27.	9.		MZ 5a FR BB	Friedland			rot, neu, gelocht, porosiert
28.	10.		MZ 6 SO BB	Soest			rot, gebraucht, mit Mörtel
29.	11.		MZ 7 BO BB	Bochum			Klinker, neu
30.	12.		MZ 8 DO BB	Dortmund			Klinker, gebraucht
31.	13.		MZ 9 HU BB	Hanau			rot, gebraucht, gemischt
32.	1.	Dachziegel	DZ 2a L PB	Leipzig	Prallbrecher	kantig	rot, neu, gemischt
33.	2.		DZ 2b L PB	Leipzig			rot, neu
34.	3.		DZ 2c L PB	Leipzig			gelb, gebraucht, Biber, mit Mörtel
35.	4.		DZ 3 WEI PB	Weimar			rot, gebraucht, gemischt, mit Mörtel
36.	5.		DZ 5 KA PB	Kassel			rot/braun, gebraucht, gemischt, mit Mörtel
37.	6.		DZ 7 BO PB	Bochum			rot/braun, neu
38.	7.		DZ 9 HU PB	Hanau			rot, gebraucht, gemischt
39.	1.	Dachziegel	DZ 2a L BB	Leipzig	Backenbrecher	-	rot, neu, gemischt
40.	2.		DZ 2b L BB	Leipzig			rot, neu
41.	3.		DZ 2c L BB	Leipzig			gelb, gebraucht, Biber, mit Mörtel
42.	4.		DZ 3 WEI BB	Weimar			rot, gebraucht, gemischt, mit Mörtel
43.	5.		DZ 5 KA BB	Kassel			rot/braun, gebraucht, gemischt, mit Mörtel
44.	6.		DZ 7 BO BB	Bochum			rot/braun, neu
45.	7.		DZ 9 HU BB	Hanau			rot, gebraucht, gemischt

Anlage 4: Korngrößenverteilungen der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19

Korngröße [mm]		Durchgang in [M.-%]																			Solle Sieblinie [M.-%]		
von		bis																				unten	oben
			BS 1	BS 2	BS 3	BS 4	BS 5	BS 6	BS 7	BS 8	BS 9	BS 10	BS 11	BS 12	BS 13	BS 14	BS 15	BS 16	BS 17	BS 18	BS 19		
31,5		45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
20		31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,1	100,0	97,3	100,0	97,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
16		20	100,0	94,1	100,0	100,0	100,0	100,0	89,7	100,0	90,9	94,6	89,8	100,0	100,0	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	85	100
8,0		16	98,9	91,5	99,7	97,6	100,0	100,0	83,2	99,7	88,3	89,7	86,6	100,0	98,5	98,2	100,0	99,5	100,0	99,6	99,7	79	100
6,3		8,0	80,8	75,0	87,0	83,6	90,2	89,9	65,3	79,6	74,6	77,2	68,9	97,7	69,8	86,6	87,9	87,6	89,6	83,7	78,1	64	93
4,0		6,3	79,3	68,6	80,8	79,6	86,7	81,2	59,5	71,7	70,6	69,5	63,9	91,3	62,9	83,0	84,3	80,6	85,8	75,9	69,6	59	90
2,0		4,0	76,7	60,7	71,6	73,2	79,0	72,1	50,4	56,7	61,8	59,7	60,5	79,4	53,4	76,1	75,9	69,2	75,4	63,6	58,1	50	85
0,63		2,0	70,2	52,8	60,2	63,8	67,4	60,3	42,7	46,7	49,6	45,3	57,2	59,4	41,9	66,0	63,3	55,8	59,3	51,3	45,8	40	75
0,20		0,63	51,7	36,4	37,2	47,5	46,5	40,2	28,3	35,9	33,8	27,3	52,6	34,0	24,7	50,1	45,0	38,1	38,9	32,8	29,3	30	47
0,1		0,2	22,8	15,6	24,0	23,0	23,2	20,4	18,9	20,9	18,8	16,1	31,0	17,8	15,5	22,9	21,9	20,4	19,8	15,6	14,7	15	28
0,063		0,1	11,8	12,4	18,0	15,8	17,7	15,2	16,1	16,0	15,6	12,4	14,1	13,0	12,7	15,1	15,0	15,4	13,6	9,9	10,1	8	19
<		0,063	8,7	11,4	14,9	12,9	15,6	13,9	14,8	14,6	14,7	10,7	11,5	11,4	11,6	12,9	11,9	13,4	11,7	8,1	8,5	5	15

**Anlage 5: Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate:
Korngrößenverteilungen (KGV), Proctorversuch**

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Wasser- gehalt [%]	Korngrößenverteilung			Proctorversuch		
	> 2 mm	≤ 2 mm		Kies [M.-%]	Sand [M.-%]	Schluff [M.-%]	100 % [g/cm³]	Wopt. [%]	95 % [g/cm³]
BS 1	Kies, Lava	Natursand	9,6	29,8	61,5	8,7	1,865	10,5	1,772
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	6,0	47,2	41,4	11,4	1,965	12,1	1,867
BS 3	Ziegel	Ziegel	11,5	39,8	45,5	14,9	1,761	15,0	1,673
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	15,0	36,2	50,9	12,9	1,710	18,0	1,625
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	12,4	32,6	51,8	15,6	1,695	17,0	1,610
BS 6	Ziegel	Ziegel	15,6	39,7	46,4	13,9	1,722	17,5	1,636
BS 7	Ziegel	Ziegel	9,4	57,3	27,9	14,8	1,827	14,0	1,736
BS 8	Ziegel	Natursand	12,6	53,3	32,1	14,6	1,783	15,0	1,694
BS 9	Lava	Bims, Lava	13,1	50,4	34,9	14,7	1,631	16,0	1,549
BS 10	Lava	Bims, Lava	9,7	54,8	33,4	11,8	1,663	14,2	1,580
BS 11	Lava	Natursand	11,4	42,8	45,7	11,5	1,660	15,0	1,577
BS 12	Rostasche	Rostasche	23,8	40,6	48,0	11,4	0,957	23,8	0,909
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	16,4	58,1	30,2	11,6	1,357	22,0	1,289
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	14,3	34,0	53,2	12,9	1,720	18,0	1,634
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	12,4	36,7	51,4	11,9	1,442	22,0	1,370
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	10,4	44,2	42,4	13,4	1,460	22,0	1,387
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	11,5	40,7	47,6	11,7	1,590	16,0	1,511
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	11,1	48,7	43,1	8,1	1,264	23,0	1,201
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	12,6	54,2	37,3	8,5	1,168	23,0	1,110
Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Wasser- gehalt [%]	KGV nach Proctor					
	> 2 mm	≤ 2 mm		Kies [M.-%]	Sand [M.-%]	Schluff [M.-%]			
BS 1	Kies, Lava	Natursand	1,5	27,2	64,3	8,6			
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	1,3	43,6	44,0	12,4			
BS 3	Ziegel	Ziegel	5,4	38,9	46,9	14,2			
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	1,6	36,8	50,8	12,4			
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	10,5	31,2	52,7	16,2			
BS 6	Ziegel	Ziegel	2,8	38,0	46,0	16,0			
BS 7	Ziegel	Ziegel	0,8	53,0	31,8	15,2			
BS 8	Ziegel	Natursand	3,7	53,5	33,4	13,1			
BS 9	Lava	Bims, Lava	6,8	52,4	33,1	14,4			
BS 10	Lava	Bims, Lava	2,5	54,7	34,5	10,7			
BS 11	Lava	Natursand	9,5	42,2	46,0	11,8			
BS 12	Rostasche	Rostasche	18,0	40,5	47,3	12,2			
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	12,6	57,8	30,9	9,7			
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	8,3	34,3	52,3	13,4			
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	5,1	34,4	53,3	12,3			
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	1,2	44,7	41,8	13,5			
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	12,1	40,6	47,7	11,8			
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	-	-	-	-			
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	-	-	-	-			

**Anlage 6: Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate:
Korngrößenverteilungen – Schluff-, Sand- und Kiesanteile**

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Wasser- gehalt [%]	Korngrößenverteilung						
	> 2 mm	≤ 2 mm		Schluff [M.-%]	Sand [M.-%]			Kies [M.-%]		
					Fein- [M.-%]	Mittel- [M.-%]	Grob- [M.-%]	Fein- [M.-%]	Mittel- [M.-%]	Grob- [M.-%]
BS 1	Kies, Lava	Natursand	9,6	8,7	14,0	28,9	18,5	9,1	20,8	0,0
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	6,0	11,4	4,3	20,8	16,4	15,8	25,4	5,9
BS 3	Ziegel	Ziegel	11,5	14,9	9,1	13,3	23,0	20,6	19,1	0,0
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	15,0	12,9	10,1	24,4	16,4	15,8	20,4	0,0
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	12,4	15,6	7,7	23,3	20,9	19,3	13,3	0,0
BS 6	Ziegel	Ziegel	15,6	13,9	6,5	19,8	20,0	20,9	18,8	0,0
BS 7	Ziegel	Ziegel	9,4	14,8	4,1	9,4	14,4	16,8	30,1	10,2
BS 8	Ziegel	Natursand	12,6	14,6	6,3	15,0	10,9	25,0	28,4	0,0
BS 9	Lava	Bims, Lava	13,1	14,7	4,0	15,1	15,8	20,9	20,4	9,1
BS 10	Lava	Bims, Lava	9,7	11,8	4,9	10,1	18,4	24,3	19,7	10,9
BS 11	Lava	Natursand	11,4	11,5	19,5	21,6	4,6	6,7	25,9	10,2
BS 12	Rostasche	Rostasche	23,8	11,4	6,3	16,3	25,4	31,8	8,7	0,0
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	16,4	11,6	3,8	9,2	17,2	21,0	37,1	0,0
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	14,3	12,9	10,1	27,2	15,9	16,9	16,5	0,5
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	12,4	11,9	10,0	23,1	18,3	20,9	15,8	0,0
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	10,4	13,4	7,0	17,7	17,7	24,8	19,4	0,0
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	11,5	11,7	8,1	19,1	20,4	26,5	14,2	0,0
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	11,1	8,1	7,5	17,2	18,5	24,7	24,1	0,0
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	12,6	8,5	6,2	14,5	16,5	23,9	30,3	0,0

**Anlage 7: Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate:
Rohdichte, Wasser- und Lufthaushalt**

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Max. WK [Vol.-%]	Rohdichte Luft-Pykno. [g/cm³]	GPV [Vol.-%]	Luftvolumen bei pF 1,8 [Vol.-%]	GPV/LV [%]
	> 2 mm	≤ 2 mm					
BS 1	Kies, Lava	Natursand	24,2	2,782	36,3	20,3	55,9
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	23,0	2,609	28,4	10,3	36,1
BS 3	Ziegel	Ziegel	30,3	2,649	36,9	18,8	51,0
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	26,4	2,590	37,3	15,3	41,1
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	29,8	2,639	39,0	17,6	45,1
BS 6	Ziegel	Ziegel	29,3	2,706	39,6	14,0	35,4
BS 7	Ziegel	Ziegel	20,3	2,870	39,5	28,2	71,3
BS 8	Ziegel	Natursand	27,6	2,593	34,7	12,9	37,1
BS 9	Lava	Bims, Lava	15,7	2,573	39,9	19,7	49,5
BS 10	Lava	Bims, Lava	26,5	2,707	41,6	24,0	57,7
BS 11	Lava	Natursand	20,9	2,655	40,6	27,2	67,0
BS 12	Rostasche	Rostasche	43,7	2,209	58,8	35,0	59,5
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	33,6	2,489	48,2	27,7	57,5
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	30,7	2,636	38,0	8,1	21,2
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	40,9	2,457	44,2	23,6	53,3
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	34,4	2,438	43,1	20,5	47,5
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	38,8	2,580	41,4	18,9	45,5
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	36,5	2,347	48,8	28,9	59,1
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	40,6	2,244	50,6	28,6	56,6
Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Wasserdurch- lässigkeit [x 10 ⁻⁶ m/s]	Rohdichte Wasser- Pyknometer [g/cm³]	GPV [Vol.-%]	Luftvolumen bei pF 1,8 [Vol.-%]	GPV/LV [%]
	> 2 mm	≤ 2 mm					
BS 1	Kies, Lava	Natursand	23,6	2,655	33,3	17,2	51,8
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	2,7	2,570	27,4	9,2	33,6
BS 3	Ziegel	Ziegel	32,7	2,579	35,1	17,1	48,6
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	8,0	2,565	36,7	14,7	40,1
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	22,7	2,508	35,8	14,4	40,2
BS 6	Ziegel	Ziegel	13,1	2,500	34,6	9,0	26,1
BS 7	Ziegel	Ziegel	75,2	2,685	35,4	24,0	67,9
BS 8	Ziegel	Natursand	41,9	2,508	32,5	10,6	32,7
BS 9	Lava	Bims, Lava	33,9	2,415	33,4	15,8	44,0
BS 10	Lava	Bims, Lava	396,1	2,578	38,7	21,1	54,5
BS 11	Lava	Natursand	114,7	2,528	37,6	24,2	64,4
BS 12	Rostasche	Rostasche	223,6	1,964	53,7	29,9	55,6
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	139,1	2,409	46,5	26,0	55,9
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	19,9	2,464	33,7	3,7	11,1
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	61,1	2,319	40,9	20,3	49,5
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	58,4	2,357	41,2	18,5	45,0
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	36,6	2,435	38,0	15,4	40,5
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	138,9	2,239	46,4	26,4	56,9
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	609,0	2,109	47,3	25,4	53,7

**Anlage 8: Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate:
CBR-Versuch, Dynamischer Lastplattendruckversuch**

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		CBR 100 % [%]	CBR 95 % [%]	CBR- Abfall [%]
	> 2 mm	≤ 2 mm			
BS 1	Kies, Lava	Natursand	50,0	16,0	32,0
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	18,4	16,7	90,8
BS 3	Ziegel	Ziegel	65,3	45,4	69,5
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	39,1	28,7	73,4
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	37,8	23,3	61,6
BS 6	Ziegel	Ziegel	38,1	24,0	63,0
BS 7	Ziegel	Ziegel	60,4	46,3	76,7
BS 8	Ziegel	Natursand	38,8	29,3	75,5
BS 9	Lava	Bims, Lava	37,6	29,8	79,3
BS 10	Lava	Bims, Lava	38,9	25,7	66,1
BS 11	Lava	Natursand	34,7	20,4	58,8
BS 12	Rostasche	Rostasche	20,2	10,5	52,0
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	34,7	20,4	58,8
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	35,0	15,7	44,9
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	31,5	23,1	73,4
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	35,3	24,7	70,0
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	43,1	25,5	59,2
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	-	-	-
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	-	-	-

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		EVD 1		EVD 2		EVD MW	
	> 2 mm	≤ 2 mm	[MN/m²]	Setzung [mm]	[MN/m²]	Setzung [mm]	[MN/m²]	Setzung [mm]
BS 1	Kies, Lava	Natursand	22,6	0,997	22,0	1,022	22,3	1,010
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	6,5	3,455	6,6	3,429	6,5	3,442
BS 3	Ziegel	Ziegel	18,9	1,189	18,6	1,210	18,8	1,200
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	16,4	1,374	16,3	1,381	16,3	1,378
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	15,1	1,493	13,7	1,640	14,4	1,567
BS 6	Ziegel	Ziegel	15,9	1,415	18,6	1,212	17,2	1,314
BS 7	Ziegel	Ziegel	21,2	1,063	21,0	1,087	21,1	1,075
BS 8	Ziegel	Natursand	13,9	1,621	14,1	1,598	14,0	1,610
BS 9	Lava	Bims, Lava	16,9	1,325	14,0	1,613	15,4	1,469
BS 10	Lava	Bims, Lava	17,3	1,302	17,2	1,311	17,2	1,307
BS 11	Lava	Natursand	25,6	0,879	23,5	0,956	24,5	0,918
BS 12	Rostasche	Rostasche	7,7	2,927	8,2	2,761	7,9	2,844
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	15,2	1,480	13,9	1,617	14,6	1,549
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	19,8	1,134	18,7	1,202	19,3	1,168
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	6,0	3,772	6,8	3,326	6,4	3,549
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	8,1	2,786	8,0	2,820	8,0	2,803
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	15,2	1,479	15,6	1,447	15,4	1,463
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	-	-	-	-	-	-
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	-	-	-	-	-	-

**Anlage 9: Bodenphysikalische Eigenschaften der überbaubaren Baumsubstrate:
CPA-Analyse – Sphärizität, Länge-Breite-Verhältnis**

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Sphärizität 0,063/2 mm				Länge/Breite 0,063/2 mm			
	> 2 mm	≤ 2 mm	Fein- 0,063/0,2	Mittel- 0,2/0,63	Grob- 0,63/2	Sand 0,063/2	Fein- 0,063/0,2	Mittel- 0,2/0,63	Grob- 0,63/2	Sand 0,063/2
BS 1	Kies, Lava	Natursand	1,050	1,092	1,174	1,111	1,549	1,516	1,547	1,533
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	1,094	1,153	1,247	1,187	1,682	1,577	1,715	1,640
BS 3	Ziegel	Ziegel	1,055	1,112	1,160	1,131	1,559	1,562	1,545	1,552
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	1,073	1,104	1,159	1,122	1,715	1,555	1,529	1,570
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	1,062	1,091	1,146	1,109	1,607	1,512	1,647	1,578
BS 6	Ziegel	Ziegel	1,053	1,083	1,126	1,097	1,553	1,483	1,519	1,507
BS 7	Ziegel	Ziegel	1,063	1,127	1,196	1,146	1,619	1,649	1,642	1,640
BS 8	Ziegel	Natursand	1,066	1,120	1,199	1,141	1,628	1,624	1,649	1,634
BS 9	Lava	Bims, Lava	1,090	1,143	1,159	1,142	1,793	1,746	1,563	1,678
BS 10	Lava	Bims, Lava	1,064	1,111	1,141	1,123	1,607	1,566	1,449	1,504
2/6,3	Lava	Natursand	1,042	1,079	1,188	1,079	1,467	1,466	1,478	1,468
BS 12	Rostasche	Rostasche	1,125	1,185	1,209	1,194	1,960	1,724	1,632	1,691
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	1,081	1,148	1,238	1,183	1,703	1,703	1,709	1,706
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	1,062	1,096	1,223	1,119	1,621	1,522	1,889	1,630
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	1,064	1,091	1,163	1,134	1,583	1,485	1,606	1,571
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	1,096	1,120	1,167	1,130	1,838	1,582	1,608	1,652
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	1,076	1,113	1,175	1,130	1,705	1,589	1,584	1,611
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	-	-	-	-	-	-	-	-
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	-	-	-	-	-	-	-	-
Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Sphärizität 2/32 mm				Länge/Breite 2/32 mm			
	> 2 mm	≤ 2 mm	Fein- 2/6,3	Mittel- 0,2/0,63	Grob- 0,63/2	Kies 0,063/2	Fein- 2/6,3	Mittel- 6,3/20	Grob- 6,3/20	Kies 20/32
BS 1	Kies, Lava	Natursand	1,154	1,162	1,212	1,161	1,517	1,463	1,499	1,477
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	1,188	1,181	1,189	1,184	1,925	1,651	1,529	1,733
BS 3	Ziegel	Ziegel	1,132	1,143	1,199	1,139	1,584	1,520	1,818	1,544
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	1,147	1,156	1,236	1,156	1,579	1,524	1,419	1,542
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	1,140	1,167	1,266	1,155	1,581	1,566	1,554	1,573
BS 6	Ziegel	Ziegel	1,128	1,135	1,118	1,131	1,578	1,531	1,577	1,555
BS 7	Ziegel	Ziegel	1,155	1,161	1,179	1,165	1,618	1,498	1,446	2,454
BS 8	Ziegel	Natursand	1,137	1,147	1,163	1,143	1,576	1,524	1,675	1,549
BS 9	Lava	Bims, Lava	1,124	1,162	1,185	1,150	1,482	1,458	1,490	1,535
BS 10	Lava	Bims, Lava	1,130	1,166	1,198	1,153	1,410	1,417	1,483	1,594
BS 11	Lava	Natursand	1,144	1,173	1,223	1,172	1,478	1,412	1,441	1,515
BS 12	Rostasche	Rostasche	1,176	1,199		1,183	1,546	1,595		1,580
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	1,153	1,149	1,155	1,150	1,593	1,505	1,229	1,532
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	1,151	1,181	1,214	1,171	1,563	1,544	1,492	1,552
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	1,152	1,172	1,176	1,161	1,553	1,537	1,402	1,543
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	1,142	1,156	1,166	1,149	1,549	1,528	1,711	1,539
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	1,149	1,189	1,510	1,173	1,557	1,482	1,479	1,518
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	-	-	-	-	-	-	-	-
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	-	-	-	-	-	-	-	-

Anlage 10: Körngrößenverteilungen der Ziegel-Gesteinskörnungen bei den Aufbereitungsversuchen im Technikum

Inhalt: Systematik der Versuche und Auswertung im Überblick

A10.1 Mauer- und Dachziegel Weimar, Prallbrecher (siehe auch Anlage 12)

Bild 64: Körngrößenverteilung Mauerziegel 3, Weimar, Prallbrecher bei unterschiedlichen Rotorgeschwindigkeiten

Bild 65: Körngrößenverteilung Dachziegel 3, Weimar, Prallbrecher bei unterschiedlichen Rotorgeschwindigkeiten

A10.2 Mauer- und Dachziegel Weimar, Backenbrecher (siehe auch Anlage 13)

Bild 66: Körngrößenverteilung Mauerziegel 3, Weimar, Backenbrecher bei unterschiedlichen Spaltbreiteneinstellungen

Bild 67: Körngrößenverteilung Dachziegel 3, Weimar, Backenbrecher bei unterschiedlichen Spaltbreiteneinstellungen

A10.3 Mauerziegel verschiedener Provenienzen

Bild 68: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers (siehe auch Anlage 14)

Bild 69: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Backenbrechers siehe auch Anlage 15)

A10.4 Dachziegel verschiedener Provenienzen (siehe auch Anlage 16)

Bild 70: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Dachziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers

Bild 71: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Dachziegel verschiedener Provenienzen des Backenbrechers

A10.5 Mauerziegel verschiedener Provenienzen, Prallbrecher, eckige/runde Schlagleiste (siehe auch Anlage 17)

Bild 72: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers mit eckigen Schlagleisten

Bild 73: Bandbreite und Mittelwert der Körngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers mit runden Schlagleisten

A10.1 Mauer- und Dachziegel Weimar, Prallbrecher

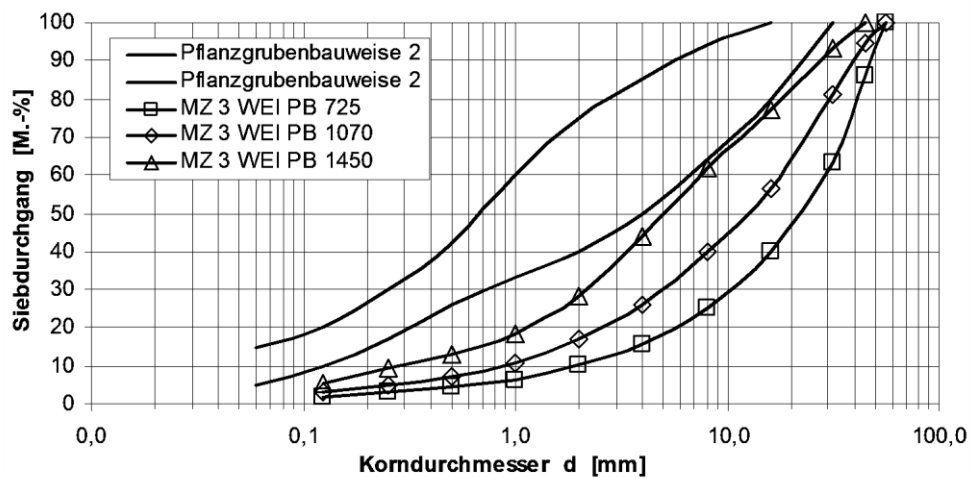


Bild 64: Korngrößenverteilung Mauerziegel 3, Weimar, Prallbrecher bei unterschiedlichen Rotorgeschwindigkeiten

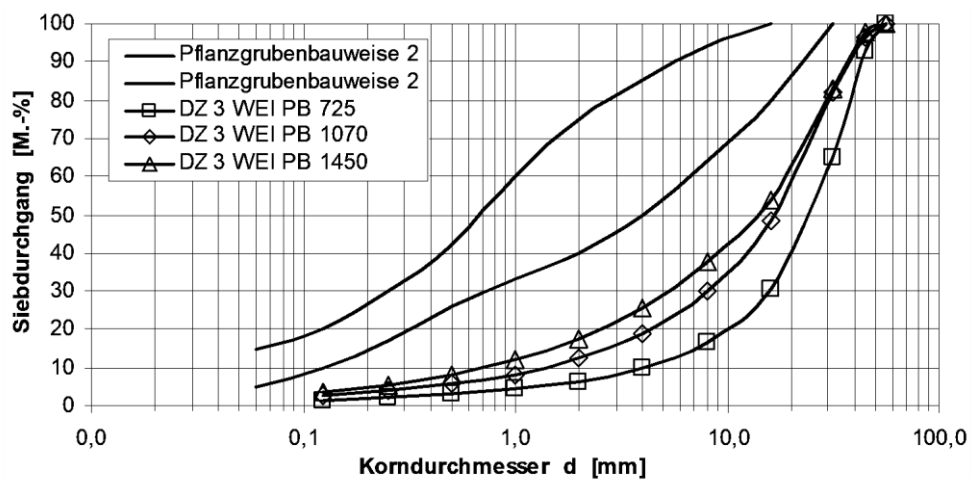


Bild 65: Korngrößenverteilung Dachziegel 3, Weimar, Prallbrecher bei unterschiedlichen Rotorgeschwindigkeiten

A10.2 Mauer- und Dachziegel Weimar, Backenbrecher

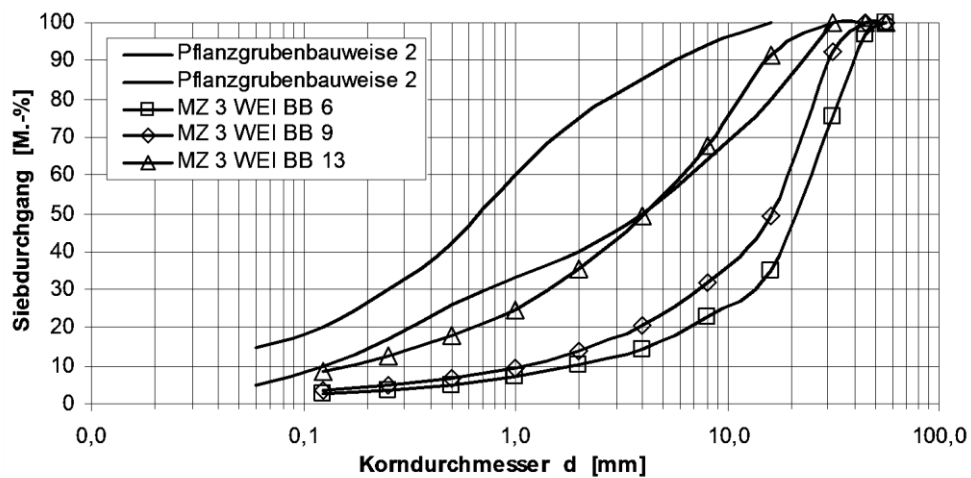


Bild 66: Korngrößenverteilung Mauerziegel 3, Weimar, Backenbrecher bei unterschiedlichen Spaltbreiteneinstellungen

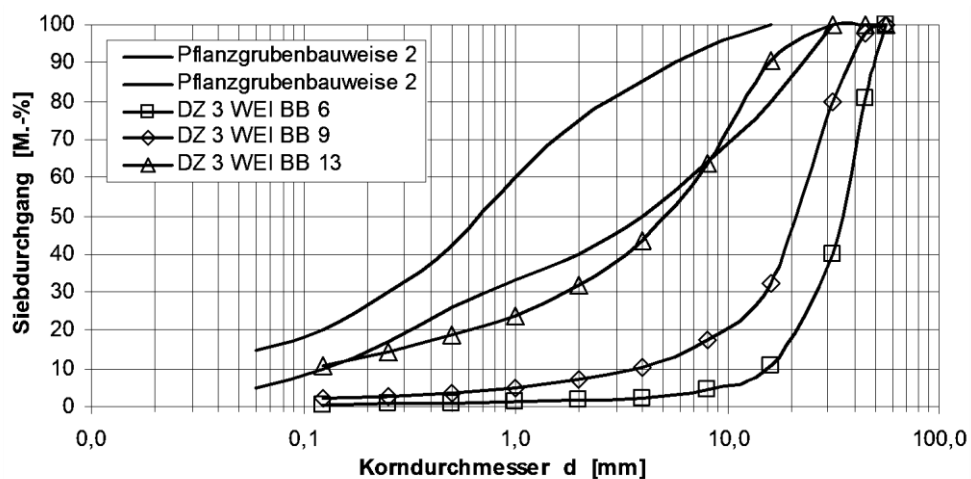


Bild 67: Korngrößenverteilung Dachziegel 3, Weimar, Backenbrecher bei unterschiedlichen Spaltbreiteneinstellungen

A10.3 Mauerziegel verschiedenen Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

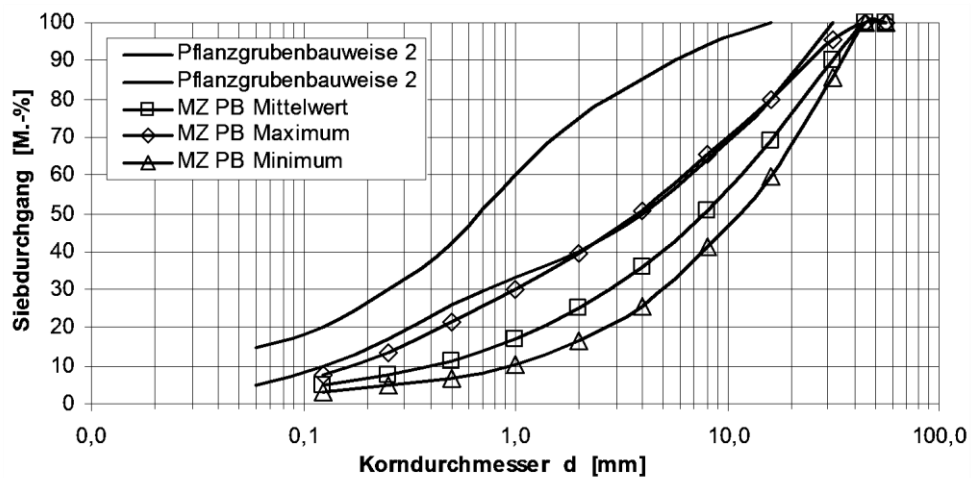


Bild 68: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers

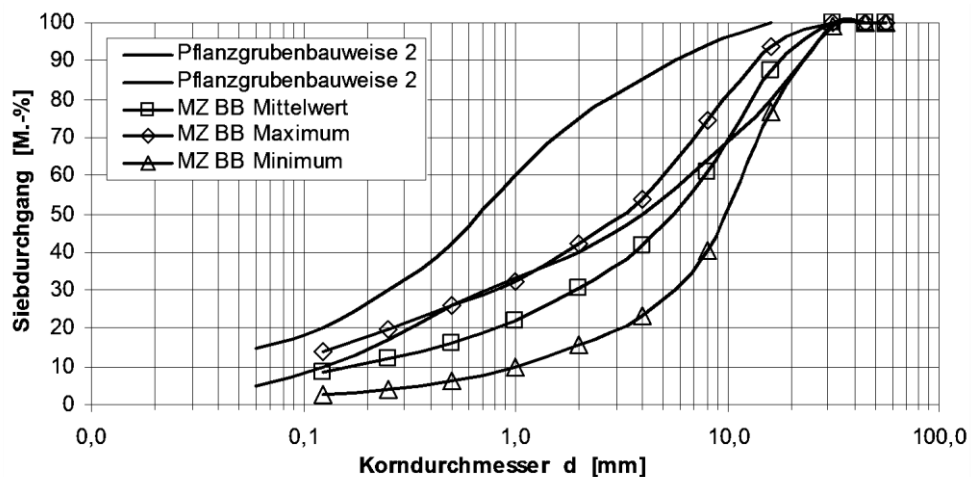


Bild 69: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Backenbrechers

A10.4 Dachziegel verschiedenen Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

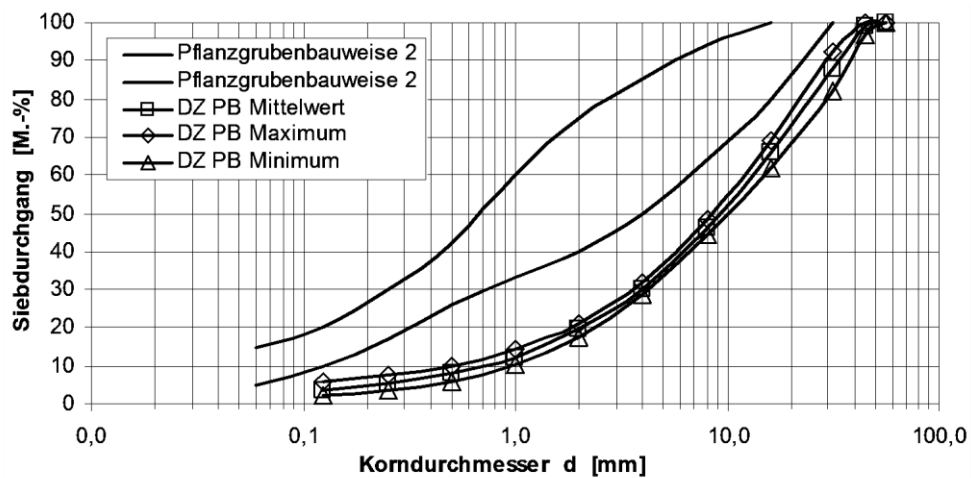


Bild 70: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Dachziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers

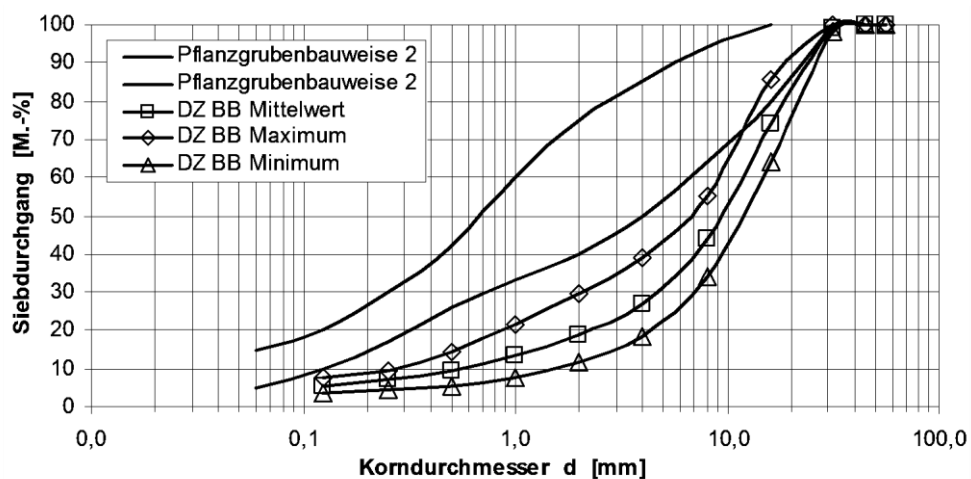


Bild 71: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Dachziegel verschiedener Provenienzen des Backenbrechers

A10.5 Mauerziegel verschiedener Provenienzen, Prallbrecher, eckige/runde Schlagleiste

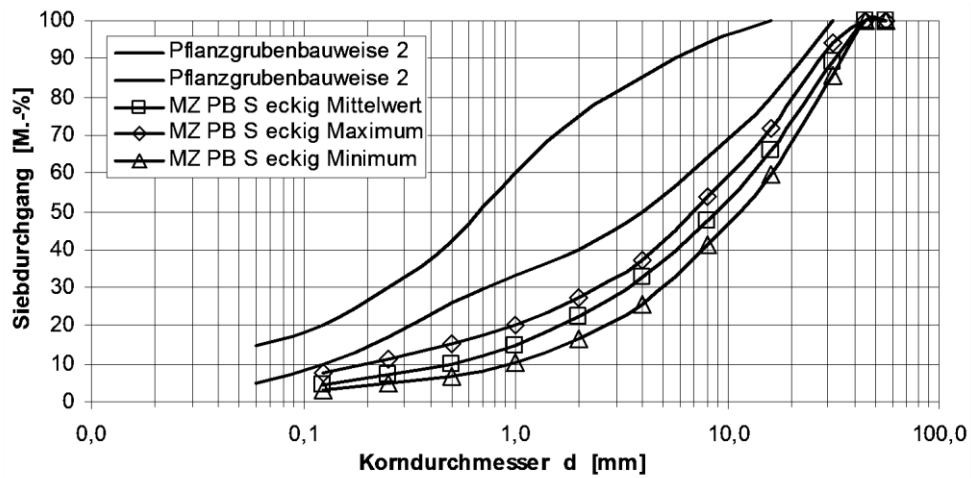


Bild 72: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers mit eckigen Schlagleisten

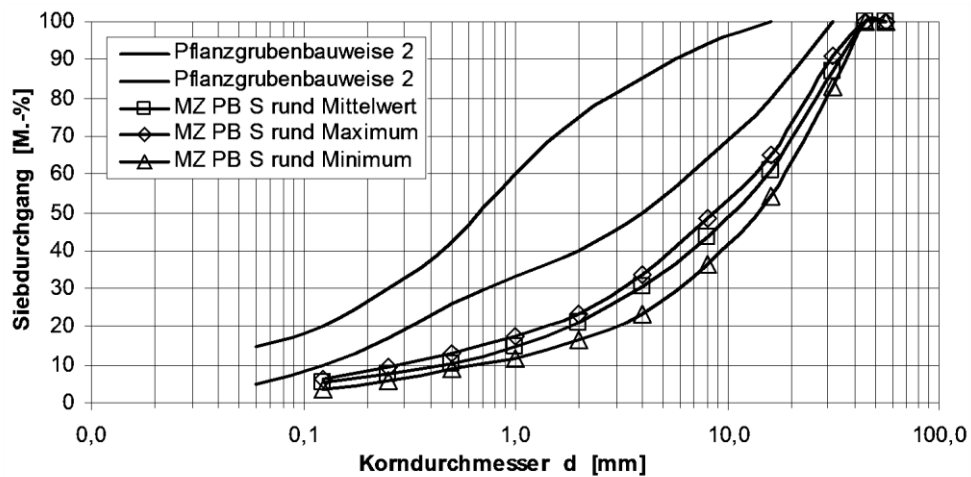


Bild 73: Bandbreite und Mittelwert der Korngrößenverteilungen der Mauerziegel verschiedener Provenienzen des Prallbrechers mit runden Schlagleisten

Anlage 11: Korndichte/Rohdichte der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum

Inhalt: Systematik der Versuche und Auswertung im Überblick:

A11.1 Rohdichte der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum

- Bild 74: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 19)
- Bild 75: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 19)
- Bild 76: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 20)
- Bild 77: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 20)
- Bild 78: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste (siehe auch Anlage 21)
- Bild 79: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste (siehe auch Anlage 21)

A11.2 Wasseraufnahme der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum

- Bild 80: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 22)
- Bild 81: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher (siehe auch Anlage 23)
- Bild 82: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste (siehe auch Anlage 24)

A11.1 Rohdichte der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum

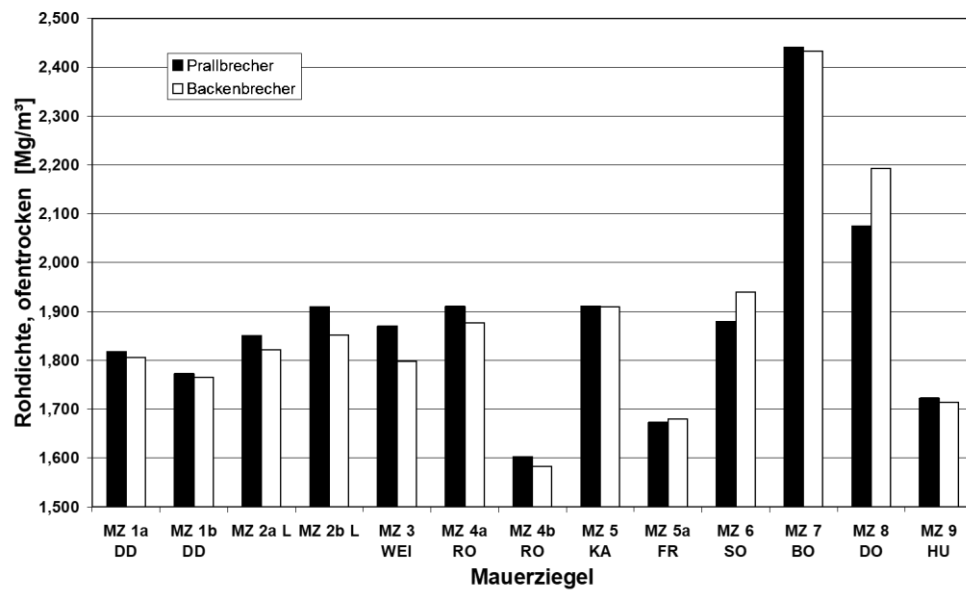


Bild 74: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

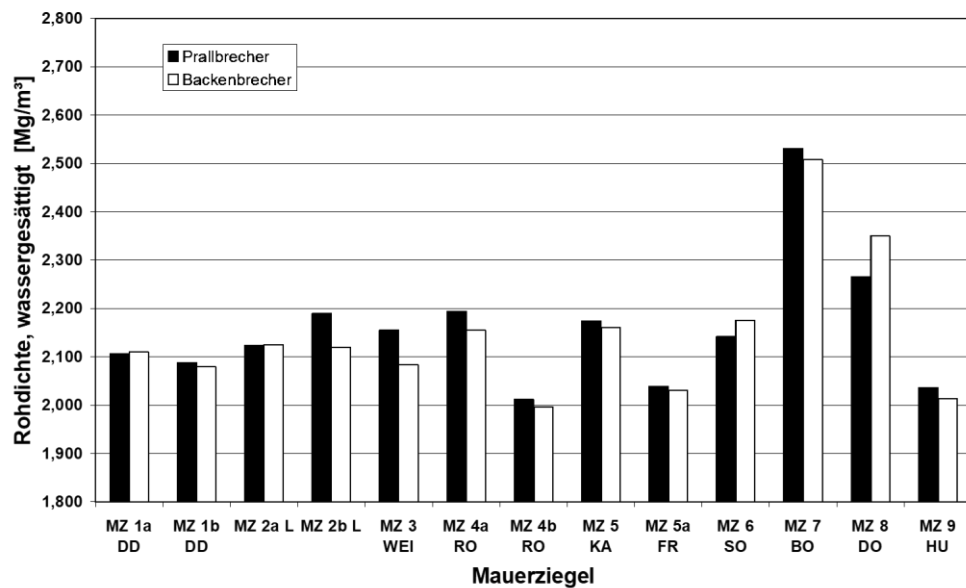


Bild 75: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

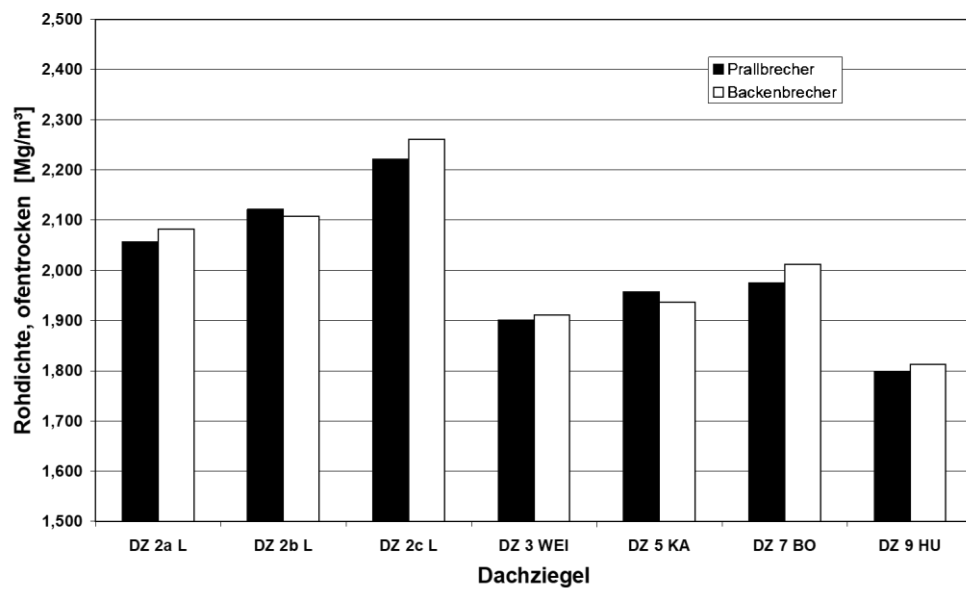


Bild 76: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

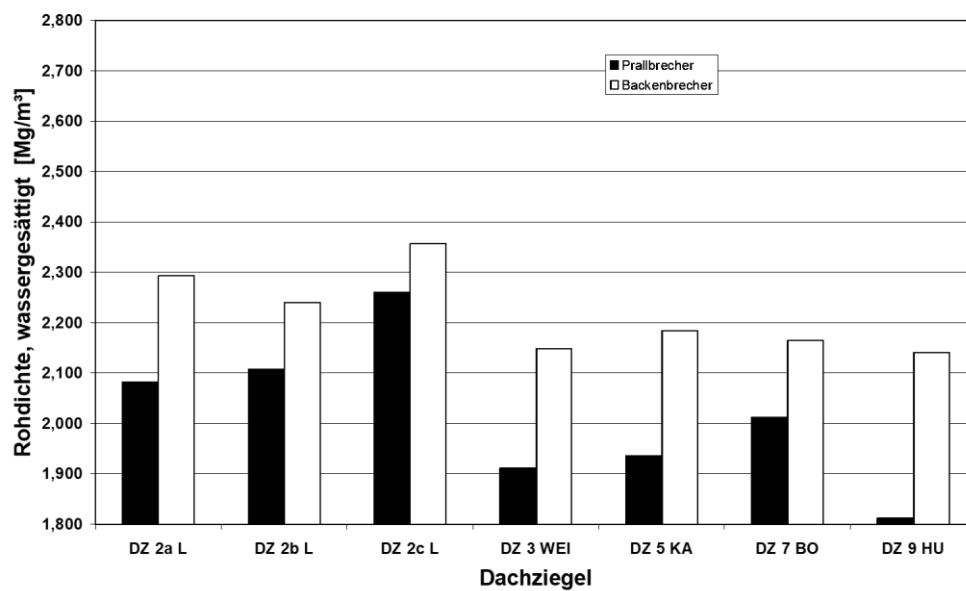


Bild 77: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

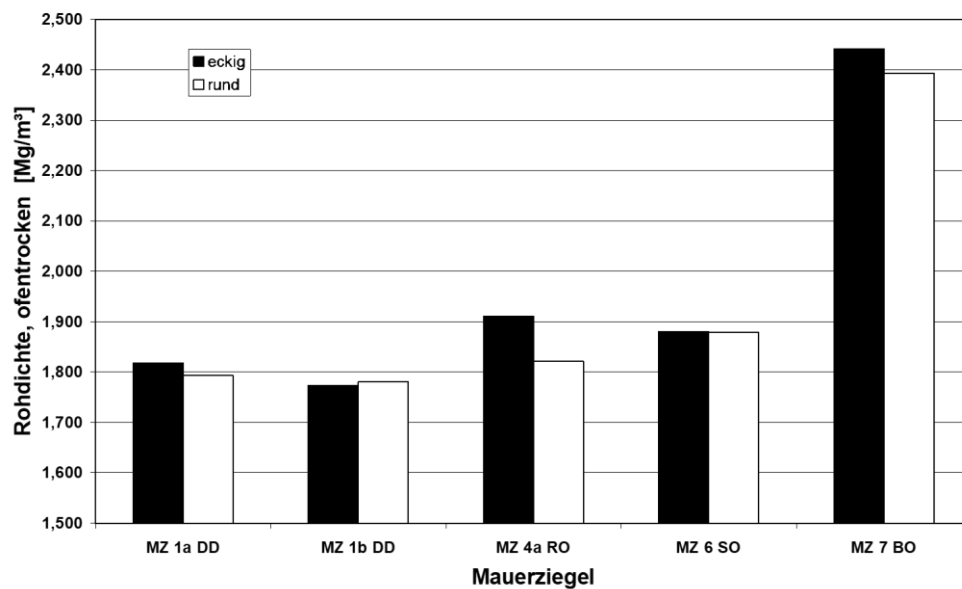


Bild 78: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, ofentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste

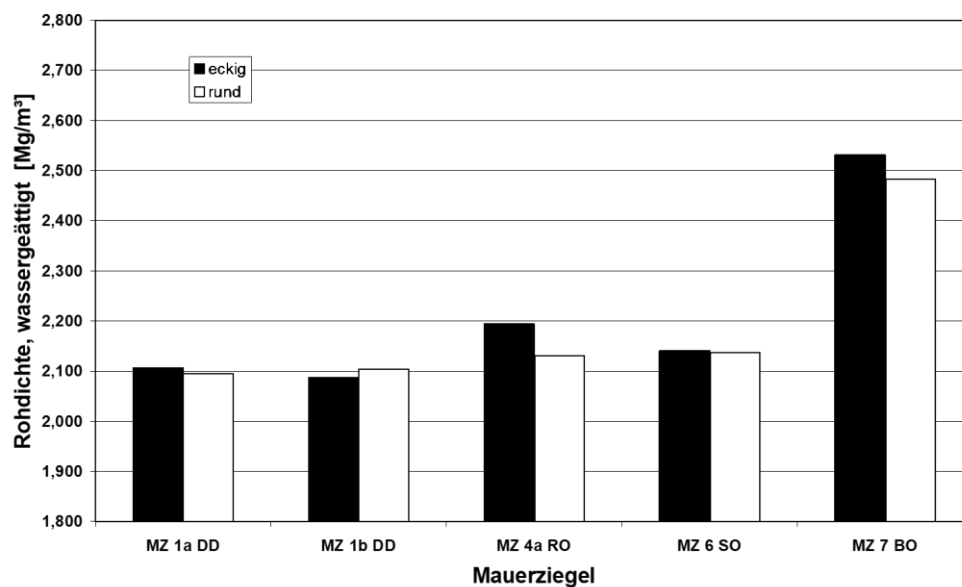


Bild 79: Arithmetisches Mittel der Rohdichte, wassergesättigt, oberflächentrocken der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste

A11.2 Wasseraufnahme der Ziegel-Gesteinskörnungen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikum

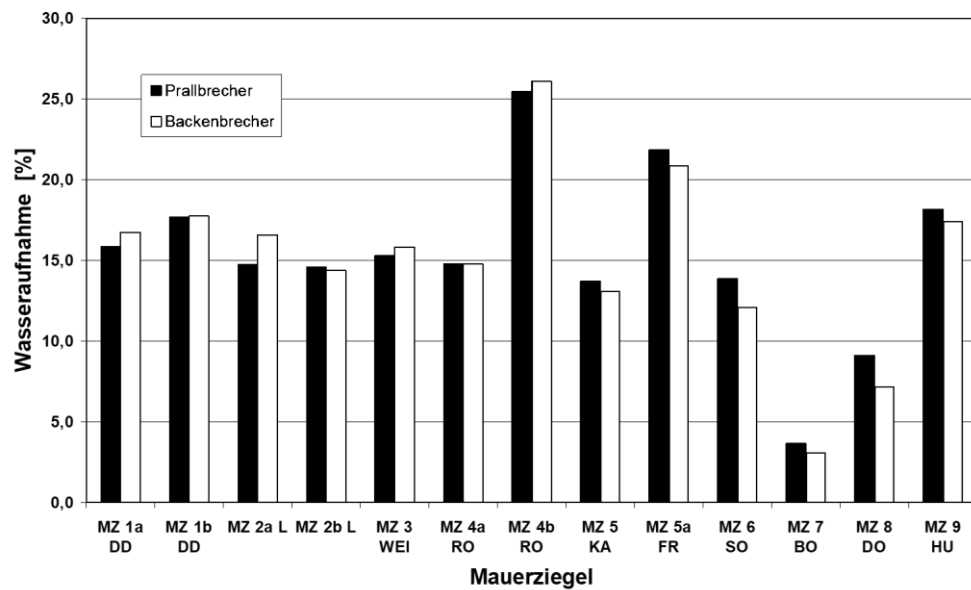


Bild 80: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Mauerziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

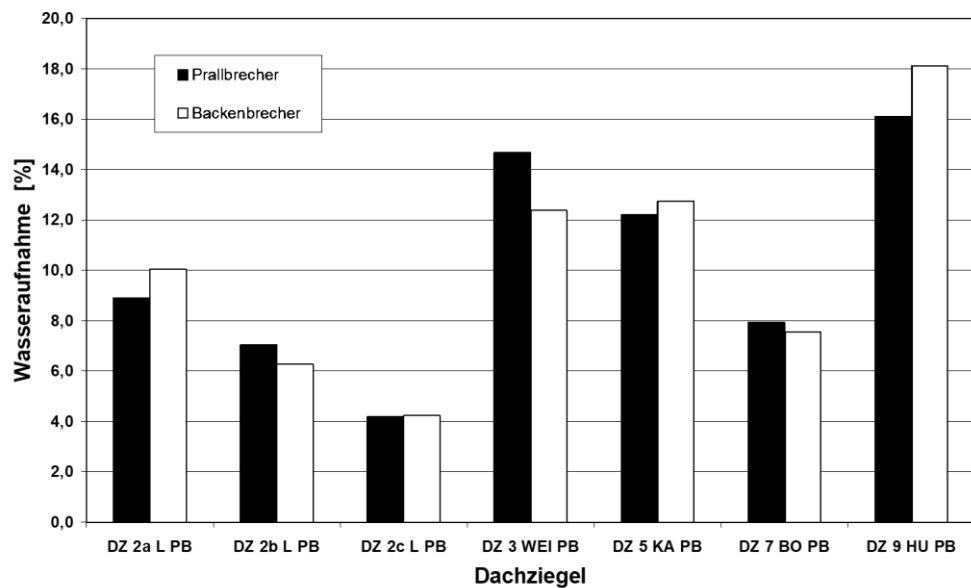


Bild 81: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Dachziegel, aufbereitet mit Prall- oder Backenbrecher

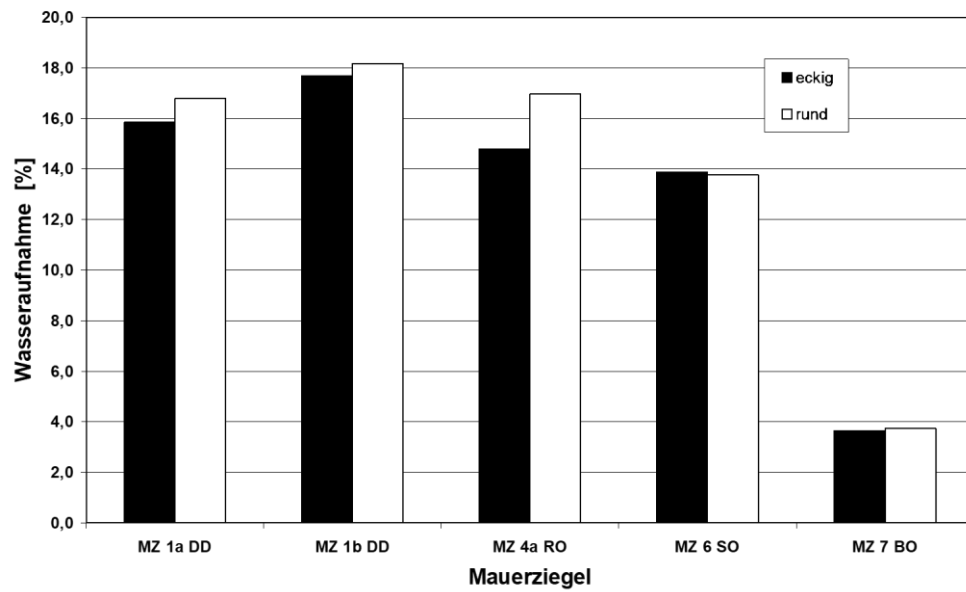


Bild 82: Arithmetisches Mittel der Wasseraufnahme der Mauerziegel, aufbereitet mit dem Prallbrecher, eckige und runde Pralleiste

Anlage 12: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauer- und Dachziegel Weimar, Prallbrecher

Korngruppe	MZ 3 WEI PB 725					MZ 3 WEI PB 1070					MZ 3 WEI PB 1450				
	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang
[mm]	[g]					[g]					[g]				
				[M.-%]					[M.-%]					[M.-%]	
> 45,0	1654,0	1375,0	1514,5	14,1	100,0	574,0	446,0	510,0	5,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
31,5 - 45,0	2711,0	2179,0	2445,0	22,8	85,9	1309,0	1336,0	1322,5	13,5	94,8	619,0	516,0	567,5	6,8	100,0
16,0 - 31,5	2693,0	2354,0	2523,5	23,5	63,2	2578,0	2249,0	2413,5	24,7	81,3	1051,0	1626,0	1338,5	16,0	93,2
8,0 - 16,0	1595,0	1536,0	1565,5	14,6	39,7	1711,0	1558,0	1634,5	16,7	56,6	1098,0	1479,0	1288,5	15,4	77,2
4,0 - 8,0	1010,0	1035,0	1022,5	9,5	25,1	1378,0	1361,0	1369,5	14,0	39,9	1424,0	1601,0	1512,5	18,1	61,8
2,0 - 4,0	523,0	641,0	582,0	5,4	15,6	818,0	885,0	851,5	8,7	25,9	1219,0	1377,0	1298,0	15,5	43,8
1,0 - 2,0	345,0	435,0	390,0	3,6	10,2	631,0	641,0	636,0	6,5	17,2	560,0	1087,0	823,5	9,8	28,3
0,5 - 1,0	190,0	270,0	230,0	2,1	6,5	348,0	365,0	356,5	3,6	10,7	324,0	594,0	459,0	5,5	18,4
0,25 - 0,5	131,0	175,0	153,0	1,4	4,4	220,0	220,0	220,0	2,2	7,0	250,0	348,0	299,0	3,6	12,9
0,125 - 0,25	88,0	115,0	101,5	0,9	3,0	144,0	154,0	149,0	1,5	4,8	396,0	257,0	326,5	3,9	9,4
< 0,125	203,0	234,0	218,5	2,0	2,0	294,0	344,0	319,0	3,3	3,3	397,0	519,0	458,0	5,5	5,5
	11143,0	10349,0	10746,0	107,5		10005,0	9559,0	9782,0	97,8		7338,0	9404,0	8371,0	83,7	
Korngruppe	DZ 3 WEI PB 725					DZ 3 WEI PB 1070					DZ 3 WEI PB 1450				
	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang
[mm]	[g]					[g]					[g]				
				[M.-%]					[M.-%]					[M.-%]	
> 45,0	774,0	735,0	754,5	7,3	100,0	415,0	123,0	269,0	3,5	100,0	169,0	146,0	157,5	2,3	100,0
31,5 - 45,0	2357,0	3393,0	2875,0	27,8	92,7	1295,0	915,0	1105,0	14,4	96,5	868,0	1145,0	1006,5	14,8	97,7
16,0 - 31,5	2991,0	4085,0	3538,0	34,2	64,9	2190,0	2985,0	2587,5	33,7	82,1	1951,0	2025,0	1988,0	29,2	82,9
8,0 - 16,0	1214,0	1707,0	1460,5	14,1	30,7	1250,0	1549,0	1399,5	18,2	48,4	1100,0	1121,0	1110,5	16,3	53,8
4,0 - 8,0	535,0	857,0	696,0	6,7	16,5	785,0	943,0	864,0	11,3	30,2	839,0	805,0	822,0	12,1	37,5
2,0 - 4,0	246,0	432,0	339,0	3,3	9,8	420,0	564,0	492,0	6,4	18,9	554,0	511,0	532,5	7,8	25,4
1,0 - 2,0	149,0	278,0	213,5	2,1	6,5	264,0	394,0	329,0	4,3	12,5	400,0	378,0	389,0	5,7	17,6
0,5 - 1,0	86,0	166,0	126,0	1,2	4,5	152,0	210,0	181,0	2,4	8,2	255,0	246,0	250,5	3,7	11,9
0,25 - 0,5	72,0	136,0	104,0	1,0	3,2	118,0	160,0	139,0	1,8	5,9	185,0	178,0	181,5	2,7	8,2
0,125 - 0,25	53,0	97,0	75,0	0,7	2,2	93,0	116,0	104,5	1,4	4,1	137,0	131,0	134,0	2,0	5,6
< 0,125	130,0	183,0	156,5	1,5	1,5	209,0	206,0	207,5	2,7	2,7	269,0	224,0	246,5	3,6	3,6
	8607,0	12069,0	10338,0	103,4		7191,0	8165,0	7678,0	76,8		6727,0	6910,0	6818,5	68,2	

Anlage 13: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauer- und Dachziegel Weimar, Backenbrecher

Korngruppe		MZ 3 WEI BB 6						MZ 3 WEI BB 9						MZ 3 WEI BB 11								
[mm]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]	
		[g]								[g]						[g]						
>	45,0	211,0	388,0	299,5	3,1	100,0			0,0	0,0	0,0	0,0	100,0			0,0	0,0	0,0	0,0	100,0		
31,5	- 45,0	1696,0	2487,0	2091,5	21,7	96,9			814,0	704,0	759,0	7,7	100,0			0,0	0,0	0,0	0,0	100,0		
16,0	- 31,5	3889,0	3818,0	3853,5	40,0	75,2			4315,0	4217,0	4266,0	43,0	92,3			906,0	966,0	936,0	8,7	100,0		
8,0	- 16,0	1142,0	1248,0	1195,0	12,4	35,2			1730,0	1701,0	1715,5	17,3	49,3			2093,0	2981,0	2537,0	23,5	91,3		
4,0	- 8,0	880,0	746,0	813,0	8,4	22,8			1029,0	1255,0	1142,0	11,5	32,0			1671,0	2316,0	1993,5	18,5	67,8		
2,0	- 4,0	444,0	386,0	415,0	4,3	14,4			632,0	656,0	644,0	6,5	20,5			1174,0	1784,0	1479,0	13,7	49,3		
1,0	- 2,0	336,0	261,0	298,5	3,1	10,1			439,0	440,0	439,5	4,4	14,0			887,0	1444,0	1165,5	10,8	35,6		
0,5	- 1,0	208,0	154,0	181,0	1,9	7,0			276,0	264,0	270,0	2,7	9,6			568,0	900,0	734,0	6,8	24,7		
0,25	- 0,5	141,0	111,0	126,0	1,3	5,1			199,0	180,0	189,5	1,9	6,8			425,0	740,0	582,5	5,4	17,9		
0,12	- 0,25	106,0	81,0	93,5	1,0	3,8			135,0	117,0	126,0	1,3	4,9			368,0	544,0	456,0	4,2	12,5		
	< 0,125	292,0	251,0	271,5	2,8	2,8			365,0	360,0	362,5	3,7	3,7			790,0	997,0	893,5	8,3	8,3		
		9345,0	9931,0	9638,0	96,4				9934,0	9894,0	9914,0	99,1				8882,0	12672,0	10777,0	107,8			
Korngruppe		DZ 3 WEI BB 6						DZ 3 WEI BB 9						DZ 3 WEI BB 11								
[mm]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]		Siebung 1	Siebung 2	im Mittel	Rück-stand	Durch-gang	[M.-%]	
		[g]								[g]						[g]						
>	45,0	1036,0	1657,0	1346,5	19,5	100,0			344,0	0,0	172,0	2,4	100,0			0,0	0,0	0,0	0,0	100,0		
31,5	- 45,0	3169,0	2457,0	2813,0	40,7	80,5			1645,0	912,0	1278,5	17,8	97,6			0,0	0,0	0,0	0,0	100,0		
16,0	- 31,5	1839,0	2175,0	2007,0	29,0	39,8			3380,0	3402,0	3391,0	47,3	79,8			698,0	724,0	711,0	9,6	100,0		
8,0	- 16,0	426,0	471,0	448,5	6,5	10,8			1236,0	916,0	1076,0	15,0	32,5			2204,0	1754,0	1979,0	26,9	90,4		
4,0	- 8,0	105,0	164,0	134,5	1,9	4,3			572,0	445,0	508,5	7,1	17,4			1513,0	1431,0	1472,0	20,0	63,5		
2,0	- 4,0	44,0	64,0	54,0	0,8	2,4			267,0	208,0	237,5	3,3	10,3			863,0	838,0	850,5	11,5	43,5		
1,0	- 2,0	24,0	36,0	30,0	0,4	1,6			162,0	128,0	145,0	2,0	7,0			621,0	583,0	602,0	8,2	32,0		
0,5	- 1,0	13,0	20,0	16,5	0,2	1,2			94,0	76,0	85,0	1,2	5,0			390,0	365,0	377,5	5,1	23,8		
0,25	- 0,5	12,0	18,0	15,0	0,2	0,9			78,0	61,0	69,5	1,0	3,8			340,0	309,0	324,5	4,4	18,7		
0,12	- 0,25	10,0	16,0	13,0	0,2	0,7			63,0	51,0	57,0	0,8	2,9			277,0	264,0	270,5	3,7	14,3		
	< 0,125	29,0	45,0	37,0	0,5	0,5			169,0	126,0	147,5	2,1	2,1			803,0	760,0	781,5	10,6	10,6		
		6707,0	7123,0	6915,0	69,2				8010,0	6325,0	7167,5	71,7				7709,0	7028,0	7368,5	73,7			

Anlage 14: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher

[illegible]

Anlage 15: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Backenbrecher

[illegible]

Anlage 16: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

[illegible]

Anlage 17: Korngrößenverteilung der Technikumsversuche, Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, eckige/runde Schlagleiste

[illegible]

Anlage 18: Reindichte und Rohdichte – Heliumpyknometer

Kurz- bezeichnung	Reindichte PB	Reindichte BB	Reindichte Mittelwert	Rohdichte PB	Rohdichte BB	Rohdichte Mittelwert
	0/0,063 mm	0/0,063 mm	0/0,063 mm	0,063/2 mm	0,063/2 mm	0,063/2 mm
MZ 1a DD	2,7256	2,7304	2,7280	2,6972	2,6956	2,6964
MZ 1b DD	2,7347	2,7286	2,7317	2,7046	2,6922	2,6984
MZ 2a L	2,7425	2,7397	2,7411	2,7046	2,7016	2,7031
MZ 2b L	2,7339	2,7411	2,7375	2,6924	2,6945	2,6935
MZ 3 WEI	2,7415	2,7455	2,7435	2,6973	2,7196	2,7085
MZ 4a RO	2,7739	2,7549	2,7644	2,7075	2,7062	2,7069
MZ 4b RO	2,7546	2,7477	2,7512	2,7139	2,7178	2,7159
MZ 5 KA	2,7458	2,7541	2,7500	2,6923	2,7015	2,6969
MZ 5a FR	2,7612	2,7514	2,7563	2,7146	2,7189	2,7168
MZ 6 SO	2,7100	2,7051	2,7076	2,6446	2,6098	2,6272
MZ 7 BO	2,7544	2,7483	2,7514	2,7085	2,6996	2,7041
MZ 8 DO	2,7522	2,7456	2,7489	2,7017	2,7019	2,7018
MZ 9 HU	2,8109	2,8102	2,8106	2,7206	2,7165	2,7186
DZ 2a L	2,7498	2,7424	2,7461	2,6988	2,6921	2,6955
DZ 2b L	2,7362	2,7351	2,7357	2,6971	2,6956	2,6964
DZ 2c L	2,7291	2,7284	2,7288	2,6256	2,6267	2,6262
DZ 3 WEI	2,7989	2,8055	2,8022	2,7290	2,7359	2,7325
DZ 5 KA	2,7551	2,7519	2,7535	2,6974	2,7001	2,6988
DZ 7 BO	2,7495	2,7480	2,7488	2,7251	2,7231	2,7241
DZ 9 HU	2,7814	2,8110	2,7962	2,7476	2,7350	2,7413

Anlage 19: Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			ofentrocken					wassergesättigt				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	1,876	1,864	1,781	1,750	1,818	2,203	2,165	2,057	2,001	2,107
2.		MZ 1b DD PB	1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,207	2,123	2,043	1,977	2,088
3.		MZ 2a L PB	1,905	1,877	1,825	1,795	1,851	2,227	2,170	2,079	2,019	2,124
4.		MZ 2b L PB	1,971	1,942	1,884	1,840	1,909	2,321	2,241	2,141	2,053	2,189
5.		MZ 3 WEI PB	2,012	1,882	1,823	1,762	1,870	2,317	2,179	2,100	2,024	2,155
6.		MZ 4a RO PB	1,986	1,927	1,858	1,872	1,911	2,293	2,226	2,133	2,124	2,194
7.		MZ 4b RO PB	1,666	1,589	1,584	1,571	1,603	2,096	2,010	1,981	1,959	2,012
8.		MZ 5 KA PB	2,000	1,928	1,856	1,862	1,912	2,287	2,205	2,110	2,092	2,174
9.		MZ 5a FR PB	1,706	1,672	1,669	1,645	1,673	2,082	2,045	2,025	2,001	2,038
10.		MZ 6 SO PB	1,893	1,896	1,910	1,821	1,880	2,214	2,168	2,153	2,031	2,142
11.		MZ 7 BO PB	2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,685	2,580	2,453	2,406	2,531
12.		MZ 8 DO PB	2,155	2,011	2,100	2,035	2,075	2,383	2,231	2,267	2,178	2,265
13.		MZ 9 HU PB	1,802	1,734	1,681	1,673	1,723	2,167	2,067	1,972	1,939	2,036
	Mittelwert		1,954	1,892	1,853	1,820	1,880	2,268	2,185	2,116	2,062	2,158
	Standardabweichung		0,225	0,213	0,203	0,196	0,207	0,153	0,139	0,128	0,123	0,133
	Maximum		2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,685	2,580	2,453	2,406	2,531
	Minimum		1,666	1,589	1,584	1,571	1,603	2,082	2,010	1,972	1,939	2,012
	Anzahl		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Backenbrecher												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD BB	1,878	1,812	1,783	1,753	1,807	2,216	2,134	2,071	2,017	2,110
2.		MZ 1b DD BB	1,843	1,779	1,718	1,724	1,766	2,184	2,105	2,016	2,011	2,079
3.		MZ 2a L BB	1,874	1,821	1,805	1,787	1,822	2,226	2,147	2,082	2,043	2,125
4.		MZ 2b L BB	1,940	1,907	1,837	1,725	1,852	2,243	2,191	2,088	1,953	2,119
5.		MZ 3 WEI BB	1,901	1,825	1,765	1,702	1,798	2,220	2,126	2,039	1,948	2,083
6.		MZ 4a RO BB	1,930	1,890	1,842	1,847	1,877	2,250	2,181	2,105	2,086	2,156
7.		MZ 4b RO BB	1,639	1,570	1,546	1,576	1,583	2,082	1,996	1,949	1,957	1,996
8.		MZ 5 KA BB	2,006	1,918	1,861	1,855	1,910	2,281	2,180	2,099	2,082	2,161
9.		MZ 5a FR BB	1,700	1,679	1,672	1,669	1,680	2,066	2,039	2,015	2,001	2,030
10.		MZ 6 SO BB	2,024	1,931	1,925	1,881	1,940	2,289	2,186	2,134	2,093	2,176
11.		MZ 7 BO BB	2,515	2,446	2,385	2,386	2,433	2,613	2,525	2,450	2,443	2,508
12.		MZ 8 DO BB	2,295	2,206	2,151	2,119	2,193	2,479	2,379	2,296	2,246	2,350
13.		MZ 9 HU BB	1,760	1,716	1,698	1,683	1,714	2,127	2,031	1,964	1,932	2,014
	Mittelwert		1,947	1,885	1,845	1,824	1,875	2,252	2,171	2,101	2,062	2,146
	Standardabweichung		0,236	0,227	0,216	0,215	0,222	0,150	0,143	0,136	0,142	0,141
	Maximum		2,515	2,446	2,385	2,386	2,433	2,613	2,525	2,450	2,443	2,508
	Minimum		1,639	1,570	1,546	1,576	1,583	2,066	1,996	1,949	1,932	1,996
	Anzahl		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Anlage 20: Rohdichte Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			ofentrocken					wassergesättigt				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher												
1.	Dachziegel	DZ 2a L PB	2,117	2,072	2,038	1,998	2,056	2,347	2,272	2,201	2,140	2,240
2.		DZ 2b L PB	2,169	2,137	2,085	2,095	2,122	2,337	2,294	2,229	2,223	2,271
3.		DZ 2c L PB	2,269	2,244	2,203	2,168	2,221	2,401	2,346	2,284	2,226	2,314
4.		DZ 3 WEI PB	1,976	1,937	1,871	1,820	1,901	2,291	2,233	2,136	2,061	2,180
5.		DZ 5 KA PB	2,025	1,978	1,935	1,891	1,957	2,321	2,234	2,147	2,085	2,197
6.		DZ 7 BO PB	1,972	1,994	1,983	1,950	1,975	2,179	2,162	2,118	2,066	2,131
7.		DZ 9 HU PB	1,848	1,816	1,792	1,741	1,799	2,185	2,118	2,059	1,997	2,090
	Mittelwert	2,054	2,025	1,987	1,952	2,004	2,294	2,237	2,168	2,114	2,203	
	Standardabweichung	0,141	0,140	0,137	0,150	0,141	0,084	0,078	0,075	0,086	0,078	
	Maximum	2,269	2,244	2,203	2,168	2,221	2,401	2,346	2,284	2,226	2,314	
	Minimum	1,848	1,816	1,792	1,741	1,799	2,179	2,118	2,059	1,997	2,090	
	Anzahl	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
Backenbrecher												
1.	Dachziegel	DZ 2a L BB	2,189	2,087	2,049	2,005	2,083	2,428	2,319	2,251	2,172	2,293
2.		DZ 2b L BB	2,190	2,110	2,085	2,044	2,107	2,346	2,253	2,205	2,154	2,240
3.		DZ 2c L BB	2,316	2,276	2,219	2,232	2,261	2,444	2,385	2,300	2,296	2,356
4.		DZ 3 WEI BB	2,001	1,907	1,870	1,867	1,911	2,279	2,156	2,082	2,075	2,148
5.		DZ 5 KA BB	2,006	1,940	1,914	1,885	1,936	2,309	2,209	2,138	2,081	2,184
6.		DZ 7 BO BB	2,078	2,024	2,011	1,936	2,012	2,249	2,193	2,155	2,060	2,164
7.		DZ 9 HU BB	1,855	1,813	1,782	1,800	1,813	2,222	2,167	2,094	2,080	2,141
	Mittelwert	2,091	2,022	1,990	1,967	2,018	2,325	2,240	2,175	2,131	2,218	
	Standardabweichung	0,153	0,153	0,147	0,143	0,148	0,086	0,085	0,081	0,084	0,082	
	Maximum	2,316	2,276	2,219	2,232	2,261	2,444	2,385	2,300	2,296	2,356	
	Minimum	1,855	1,813	1,782	1,800	1,813	2,222	2,156	2,082	2,060	2,141	
	Anzahl	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	

Anlage 21: Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher – eckige und runde Schlagleiste

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			ofentrocken					wassergesättigt				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher mit eckiger Schlagleiste												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	1,876	1,864	1,781	1,750	1,818	2,203	2,165	2,057	2,001	2,107
2.		MZ 1b DD PB	1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,207	2,123	2,043	1,977	2,088
6.		MZ 4a RO PB	1,986	1,927	1,858	1,872	1,911	2,293	2,226	2,133	2,124	2,194
9.		MZ 6 SO PB	1,893	1,896	1,910	1,821	1,880	2,214	2,168	2,153	2,031	2,142
10.		MZ 7 BO PB	2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,685	2,580	2,453	2,406	2,531
	Mittelwert		2,037	1,992	1,933	1,896	1,965	2,320	2,252	2,168	2,108	2,212
	Standardabweichung		0,299	0,279	0,255	0,257	0,272	0,207	0,187	0,166	0,176	0,183
	Maximum		2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,685	2,580	2,453	2,406	2,531
	Minimum		1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,203	2,123	2,043	1,977	2,088
	Anzahl		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Prallbrecher mit abgerundeter Schlagleiste												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB S	1,875	1,821	1,765	1,710	1,793	2,209	2,138	2,052	1,979	2,095
2.		MZ 1b DD PB S	1,863	1,802	1,748	1,708	1,780	2,197	2,143	2,073	2,004	2,104
6.		MZ 4a RO PB S	1,903	1,843	1,809	1,729	1,821	2,247	2,169	2,100	2,004	2,130
9.		MZ 6 SO PB S	1,957	1,883	1,855	1,819	1,879	2,248	2,160	2,101	2,041	2,138
10.		MZ 7 BO PB S	2,454	2,406	2,357	2,356	2,393	2,571	2,500	2,438	2,425	2,484
	Mittelwert		2,010	1,951	1,907	1,864	1,933	2,294	2,222	2,153	2,091	2,190
	Standardabweichung		0,251	0,256	0,255	0,279	0,260	0,156	0,156	0,161	0,188	0,165
	Maximum		2,454	2,406	2,357	2,356	2,393	2,571	2,500	2,438	2,425	2,484
	Minimum		1,863	1,802	1,748	1,708	1,780	2,197	2,138	2,052	1,979	2,095
	Anzahl		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Anlage 22: Wasseraufnahme Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Wasseraufnahme [%] der Körnung [mm]				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher							
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	17,4	16,2	15,5	14,3	15,9
2.		MZ 1b DD PB	18,3	18,5	17,3	16,6	17,7
3.		MZ 2a L PB	17,0	15,6	13,9	12,5	14,8
4.		MZ 2b L PB	17,7	15,4	13,7	11,6	14,6
5.		MZ 3 WEI PB	15,2	15,8	15,2	15,0	15,3
6.		MZ 4a RO PB	15,4	15,5	14,8	13,5	14,8
7.		MZ 4b RO PB	25,8	26,5	25,0	24,6	25,5
8.		MZ 5 KA PB	14,4	14,4	13,7	12,4	13,7
9.		MZ 5a FR PB	22,0	22,3	21,4	21,7	21,9
10.		MZ 6 SO PB	16,9	14,3	12,8	11,5	13,9
11.		MZ 7 BO PB	4,6	3,9	3,3	2,8	3,7
12.		MZ 8 DO PB	10,6	10,9	7,9	7,1	9,1
13.		MZ 9 HU PB	20,3	19,2	17,3	15,9	18,2
	Mittelwert		16,6	16,0	14,8	13,8	15,3
	Standardabweichung		5,2	5,4	5,4	5,6	5,3
	Maximum		25,8	26,5	25,0	24,6	25,5
	Minimum		4,6	3,9	3,3	2,8	3,7
	Anzahl		13	13	13	13	13
Backenbrecher							
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD BB	18,0	17,8	16,1	15,1	16,8
2.		MZ 1b DD BB	18,5	18,4	17,4	16,7	17,8
3.		MZ 2a L BB	18,8	17,9	15,3	14,3	16,6
4.		MZ 2b L BB	15,7	14,9	13,7	13,2	14,4
5.		MZ 3 WEI BB	16,8	16,5	15,5	14,5	15,8
6.		MZ 4a RO BB	16,6	15,4	14,3	12,9	14,8
7.		MZ 4b RO BB	27,0	27,1	26,1	24,2	26,1
8.		MZ 5 KA BB	13,7	13,6	12,8	12,3	13,1
9.		MZ 5a FR BB	21,5	21,5	20,5	19,9	20,9
10.		MZ 6 SO BB	13,1	13,2	10,9	11,2	12,1
11.		MZ 7 BO BB	3,9	3,3	2,7	2,4	3,1
12.		MZ 8 DO BB	8,0	7,9	6,7	6,0	7,2
13.		MZ 9 HU BB	20,8	18,4	15,7	14,8	17,4
	Mittelwert		16,3	15,8	14,4	13,7	15,1
	Standardabweichung		5,9	5,9	5,8	5,5	5,7
	Maximum		27,0	27,1	26,1	24,2	26,1
	Minimum		3,9	3,3	2,7	2,4	3,1
	Anzahl		13	13	13	13	13

Anlage 23: Wasseraufnahme Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Wasseraufnahme [%] der Körnung [mm]				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher							
1.	Dachziegel	DZ 2a L PB	10,8	9,7	8,0	7,1	8,9
2.		DZ 2b L PB	7,8	7,3	6,9	6,1	7,0
3.		DZ 2c L PB	5,8	4,5	3,7	2,7	4,2
4.		DZ 3 WEI PB	15,9	15,3	14,2	13,3	14,7
5.		DZ 5 KA PB	14,6	13,0	10,9	10,3	12,2
6.		DZ 7 BO PB	10,5	8,4	6,8	6,0	7,9
7.		DZ 9 HU PB	18,2	16,6	14,9	14,7	16,1
	Mittelwert		11,9	10,7	9,3	8,6	10,1
	Standardabweichung		4,5	4,4	4,1	4,3	4,3
	Maximum		18,2	16,6	14,9	14,7	16,1
	Minimum		5,8	4,5	3,7	2,7	4,2
	Anzahl		7	7	7	7	7
Backenbrecher							
1.	Dachziegel	DZ 2a L BB	10,9	11,1	9,9	8,3	10,1
2.		DZ 2b L BB	7,1	6,8	5,8	5,4	6,3
3.		DZ 2c L BB	5,5	4,8	3,7	2,9	4,2
4.		DZ 3 WEI BB	13,9	13,0	11,4	11,2	12,4
5.		DZ 5 KA BB	15,1	13,8	11,7	10,4	12,8
6.		DZ 7 BO BB	8,2	8,4	7,2	6,4	7,6
7.		DZ 9 HU BB	19,8	19,5	17,5	15,6	18,1
	Mittelwert		11,5	11,1	9,6	8,6	10,2
	Standardabweichung		5,1	4,9	4,6	4,2	4,7
	Maximum		19,8	19,5	17,5	15,6	18,1
	Minimum		5,5	4,8	3,7	2,9	4,2
	Anzahl		7	7	7	7	7

**Anlage 24: Wasseraufnahme Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen,
Prallbrecher – eckige und runde Schlagleiste**

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Wasseraufnahme [%] der Körnung [mm]				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher mit eckiger Schlagleiste							
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	7,4	16,2	15,5	14,3	15,9
2.		MZ 1b DD PB	18,3	18,5	17,3	161,6	17,7
6.		MZ 4a RO PB	15,4	15,5	14,8	13,5	14,8
9.		MZ 6 SO PB	16,9	14,3	12,8	11,5	13,9
10.		MZ 7 BO PB	4,6	3,9	3,3	2,8	3,7
	Mittelwert		14,5	13,7	12,7	11,7	13,2
	Standardabweichung		5,6	5,7	5,5	5,3	5,5
	Maximum		18,3	18,5	17,3	16,6	17,7
	Minimum		4,6	3,9	3,3	2,8	3,7
	Anzahl		5	5	5	5	5
Prallbrecher mit abgerundeter Schlagleiste							
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB S	17,8	17,4	16,3	15,7	16,8
2.		MZ 1b DD PB S	17,9	18,9	18,6	17,3	18,2
6.		MZ 4a RO PB S	18,1	17,7	16,1	16,0	17,0
9.		MZ 6 SO PB S	14,9	14,7	13,3	12,2	13,8
10.		MZ 7 BO PB S	4,8	3,9	3,4	2,9	3,8
	Mittelwert		14,7	14,5	13,5	12,8	13,9
	Standardabweichung		5,7	6,1	6,0	5,9	5,9
	Maximum		18,1	18,9	18,6	17,3	18,2
	Minimum		4,8	3,9	3,4	2,9	3,8
	Anzahl		5	5	5	5	5

Anlage 25: Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher – Vergleich Wasser- mit Luftpiknometer

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			Wasserpyknometer, ofentrocken					Luftpiknometer, ofentrocken				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	1,876	1,864	1,781	1,750	1,818	2,528	2,537	2,479	2,464	2,502
2.		MZ 1b DD PB	1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,489	2,482	2,464	2,466	2,475
3.		MZ 2a L PB	1,905	1,877	1,825	1,795	1,851	2,581	2,568	2,555	2,546	2,563
4.		MZ 2b L PB	1,971	1,942	1,884	1,840	1,909	2,598	2,565	2,602	2,556	2,580
5.		MZ 3 WEI PB	2,012	1,882	1,823	1,762	1,870	2,534	2,525	2,509	2,500	2,517
6.		MZ 4a RO PB	1,986	1,927	1,858	1,872	1,911	2,562	2,536	2,541	2,534	2,543
7.		MZ 4b RO PB	1,666	1,589	1,584	1,571	1,603	2,595	2,595	2,615	2,552	2,589
8.		MZ 5 KA PB	2,000	1,928	1,856	1,862	1,912	2,549	2,540	2,540	2,523	2,538
9.		MZ 5a FR PB	1,706	1,672	1,669	1,645	1,673	2,553	2,529	2,519	2,522	2,531
10.		MZ 6 SO PB	1,893	1,896	1,910	1,821	1,880	2,600	2,584	2,595	2,582	2,590
11.		MZ 7 BO PB	2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,602	2,585	2,568	2,533	2,572
12.		MZ 8 DO PB	2,155	2,011	2,100	2,035	2,075	2,634	2,632	2,614	2,604	2,621
13.		MZ 9 HU PB	1,802	1,734	1,681	1,673	1,723	2,636	2,616	2,590	2,575	2,604
	Mittelwert	1,954	1,892	1,853	1,820	1,880	2,574	2,561	2,553	2,535	2,556	
	Standardabweichung	0,225	0,213	0,203	0,196	0,207	0,043	0,041	0,050	0,042	0,043	
	Maximum	2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,636	2,632	2,615	2,604	2,621	
	Minimum	1,666	1,589	1,584	1,571	1,603	2,489	2,482	2,464	2,464	2,475	
	Anzahl	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
Backenbrecher												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD BB	1,878	1,812	1,783	1,753	1,807	2,515	2,504	2,493	2,450	2,491
2.		MZ 1b DD BB	1,843	1,779	1,718	1,724	1,766	2,519	2,493	2,493	2,470	2,494
3.		MZ 2a L BB	1,874	1,821	1,805	1,787	1,822	2,575	2,542	2,545	2,554	2,554
4.		MZ 2b L BB	1,940	1,907	1,837	1,725	1,852	2,581	2,536	2,517	2,463	2,524
5.		MZ 3 WEI BB	1,901	1,825	1,765	1,702	1,798	2,505	2,486	2,456	2,439	2,472
6.		MZ 4a RO BB	1,930	1,890	1,842	1,847	1,877	2,554	2,538	2,516	2,502	2,528
7.		MZ 4b RO BB	1,639	1,570	1,546	1,576	1,583	2,647	2,607	2,575	2,562	2,598
8.		MZ 5 KA BB	2,006	1,918	1,861	1,855	1,910	2,539	2,545	2,532	2,521	2,534
9.		MZ 5a FR BB	1,700	1,679	1,672	1,669	1,680	2,512	2,497	2,496	2,487	2,498
10.		MZ 6 SO BB	2,024	1,931	1,925	1,881	1,940	2,569	2,563	2,556	2,575	2,566
11.		MZ 7 BO BB	2,515	2,446	2,385	2,386	2,433	2,625	2,605	2,580	2,541	2,588
12.		MZ 8 DO BB	2,295	2,206	2,151	2,119	2,193	2,633	2,615	2,602	2,597	2,612
13.		MZ 9 HU BB	1,760	1,716	1,698	1,683	1,714	2,610	2,577	2,542	2,553	2,571
	Mittelwert	1,947	1,885	1,845	1,824	1,875	2,568	2,547	2,531	2,516	2,541	
	Standardabweichung	0,236	0,227	0,216	0,215	0,222	0,049	0,045	0,041	0,052	0,045	
	Maximum	2,515	2,446	2,385	2,386	2,433	2,647	2,615	2,602	2,597	2,612	
	Minimum	1,639	1,570	1,546	1,576	1,583	2,505	2,486	2,456	2,439	2,472	
	Anzahl	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	

Anlage 26: Rohdichte Dachziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prall- und Backenbrecher – Vergleich Wasser- mit Luftpyknometer

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			Wasserpyknometer, ofentrocken					Luftpyknometer, ofentrocken				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher												
1.	Dachziegel	DZ 2a L PB	2,117	2,072	2,038	1,998	2,056	2,556	2,536	2,492	2,439	2,506
2.		DZ 2b L PB	2,169	2,137	2,085	2,095	2,122	2,604	2,593	2,564	2,502	2,566
3.		DZ 2c L PB	2,269	2,244	2,203	2,168	2,221	2,485	2,458	2,396	2,353	2,423
4.		DZ 3 WEI PB	1,976	1,937	1,871	1,820	1,901	2,564	2,550	2,531	2,502	2,537
5.		DZ 5 KA PB	2,025	1,978	1,935	1,891	1,957	2,478	2,433	2,342	2,235	2,372
6.		DZ 7 BO PB	1,972	1,994	1,983	1,950	1,975	2,632	2,587	2,561	2,529	2,577
7.		DZ 9 HU PB	1,848	1,816	1,792	1,741	1,799	2,524	2,506	2,468	2,405	2,476
	Mittelwert		2,054	2,025	1,987	1,952	2,004	2,549	2,523	2,479	2,424	2,494
	Standardabweichung		0,141	0,140	0,137	0,150	0,141	0,058	0,061	0,084	0,104	0,076
	Maximum		2,269	2,244	2,203	2,168	2,221	2,632	2,593	2,564	2,529	2,577
	Minimum		1,848	1,816	1,792	1,741	1,799	2,478	2,433	2,342	2,235	2,372
	Anzahl		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Backenbrecher												
1.	Dachziegel	DZ 2a L BB	2,189	2,087	2,049	2,005	2,083	2,616	2,586	2,533	2,452	2,547
2.		DZ 2b L BB	2,190	2,110	2,085	2,044	2,107	2,644	2,605	2,556	2,507	2,578
3.		DZ 2c L BB	2,316	2,276	2,219	2,232	2,261	2,505	2,451	2,413	2,350	2,430
4.		DZ 3 WEI BB	2,001	1,907	1,870	1,867	1,911	2,554	2,543	2,526	2,476	2,525
5.		DZ 5 KA BB	2,006	1,940	1,914	1,885	1,936	2,501	2,463	2,377	2,252	2,398
6.		DZ 7 BO BB	2,078	2,024	2,011	1,936	2,012	2,626	2,580	2,558	2,520	2,571
7.		DZ 9 HU BB	1,855	1,813	1,782	1,800	1,813	2,496	2,519	2,469	2,397	2,470
	Mittelwert		2,091	2,022	1,990	1,967	2,018	2,563	2,535	2,490	2,422	2,503
	Standardabweichung		0,153	0,153	0,147	0,143	0,148	0,065	0,061	0,072	0,096	0,071
	Maximum		2,316	2,276	2,219	2,232	2,261	2,644	2,605	2,558	2,520	2,578
	Minimum		1,855	1,813	1,782	1,800	1,813	2,496	2,451	2,377	2,252	2,398
	Anzahl		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Anlage 27: Rohdichte Mauerziegel unterschiedlicher Provenienzen, Prallbrecher – eckige/runde Schlagleiste – Vergleich Wasser- mit Luftpyknometer

Nr.	Ziegel	Kurz- bezeichnung	Rohdichte [Mg/m³] der Körnung [mm]									
			Wasserpyknometer, ofentrocken					Luftpyknometer, ofentrocken				
			2/4	4/8	8/16	16/32	2/32	2/4	4/8	8/16	16/32	2/32
Prallbrecher mit eckiger Schlagleiste												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB	1,876	1,864	1,781	1,750	1,818	2,528	2,537	2,479	2,464	2,502
2.		MZ 1b DD PB	1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,489	2,482	2,464	2,466	2,475
6.		MZ 4a RO PB	1,986	1,927	1,858	1,872	1,911	2,562	2,536	2,541	2,534	2,543
9.		MZ 6 SO PB	1,893	1,896	1,910	1,821	1,880	2,600	2,584	2,595	2,582	2,590
10.		MZ 7 BO PB	2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,602	2,585	2,568	2,533	2,572
	Mittelwert		2,037	1,992	1,933	1,896	1,965	2,540	2,507	2,488	2,489	2,506
	Standardabweichung		0,299	0,279	0,255	0,257	0,272	2,480	2,492	2,491	2,468	2,483
	Maximum		2,565	2,484	2,375	2,340	2,441	2,600	2,583	2,562	2,558	2,576
	Minimum		1,865	1,791	1,742	1,695	1,773	2,624	2,597	2,579	2,537	2,584
	Anzahl		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Prallbrecher mit abgerundeter Schlagleiste												
1.	Mauerziegel	MZ 1a DD PB S	1,875	1,821	1,765	1,710	1,793	2,556	2,545	2,529	2,516	2,537
2.		MZ 1b DD PB S	1,863	1,802	1,748	1,708	1,780	0,048	0,043	0,056	0,050	0,048
6.		MZ 4a RO PB S	1,903	1,843	1,809	1,729	1,821	2,602	2,585	2,595	2,582	2,590
9.		MZ 6 SO PB S	1,957	1,883	1,855	1,819	1,879	2,489	2,482	2,464	2,464	2,475
10.		MZ 7 BO PB S	2,454	2,406	2,357	2,356	2,393	5	5	5	5	5
	Mittelwert		2,010	1,951	1,907	1,864	1,933	2,574	2,555	2,542	2,528	2,550
	Standardabweichung		0,251	0,256	0,255	0,279	0,260	0,063	0,052	0,048	0,049	0,052
	Maximum		2,454	2,406	2,357	2,356	2,393	2,624	2,598	2,588	2,586	2,599
	Minimum		1,863	1,802	1,748	1,708	1,780	2,480	2,492	2,488	2,468	2,483
	Anzahl		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Anlage 28: Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Proctordichte – Rohdichte Wasserpyknometer zu Luftpyknometer

Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Packungs-Dichte PD	Rohdichte Wasser-Pykn.	PD x Rohdichte	Proctordichte [g/cm³]	
	> 2 mm	≤ 2 mm	[%]	[g/cm³]	[g/cm³]	100 %	95 %
BS 1	Kies, Lava	Natursand	68,53	2,655	1,8195	1,865	1,772
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	71,85	2,570	1,8465	1,965	1,867
BS 3	Ziegel	Ziegel	71,71	2,579	1,8494	1,761	1,673
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	70,35	2,565	1,8045	1,710	1,625
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	69,84	2,508	1,7516	1,695	1,610
BS 6	Ziegel	Ziegel	70,45	2,500	1,7613	1,722	1,636
BS 7	Ziegel	Ziegel	75,69	2,685	2,0323	1,827	1,736
BS 8	Ziegel	Natursand	73,67	2,508	1,8476	1,783	1,694
BS 9	Lava	Bims, Lava	73,73	2,415	1,7806	1,631	1,549
BS 10	Lava	Bims, Lava	71,89	2,578	1,8533	1,663	1,580
BS 11	Lava	Natursand	72,76	2,528	1,8394	1,660	1,577
BS 12	Rostasche	Rostasche	68,77	1,964	1,3506	0,957	0,909
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	72,23	2,409	1,74	1,357	1,289
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	69,56	2,464	1,714	1,720	1,634
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	69,75	2,319	1,6175	1,442	1,370
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	71,19	2,357	1,6779	1,460	1,387
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	69,84	2,435	1,7006	1,590	1,511
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	70,09	2,239	1,5693	1,264	1,201
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	70,89	2,107	1,4937	1,168	1,110
Nr.	Stoffliche Hauptbestandteile		Packungs-dichte	Rohdichte Luftpyknometer	PD x Rohdichte	Proctordichte [g/cm³]	
	> 2 mm	≤ 2 mm	[%]	[g/cm³]	[g/cm³]	100 %	95 %
BS 1	Kies, Lava	Natursand	68,53	2,782	1,9065	1,865	1,772
BS 2	Naturstein, Kompost	Naturstein, Natursand	71,85	2,609	1,8746	1,965	1,867
BS 3	Ziegel	Ziegel	71,71	2,649	1,8996	1,761	1,673
BS 4	Ziegel	Ziegel, Natursand	70,35	2,590	1,8221	1,710	1,625
BS 5	Ziegel	Ziegel, Natursand	69,84	2,639	1,8431	1,695	1,610
BS 6	Ziegel	Ziegel	70,45	2,706	1,9064	1,722	1,636
BS 7	Ziegel	Ziegel	75,69	2,870	2,1723	1,827	1,736
BS 8	Ziegel	Natursand	73,67	2,593	1,9103	1,783	1,694
BS 9	Lava	Bims, Lava	73,73	2,573	1,8971	1,631	1,549
BS 10	Lava	Bims, Lava	71,89	2,707	1,9461	1,663	1,580
BS 11	Lava	Natursand	72,76	2,655	1,9318	1,660	1,577
BS 12	Rostasche	Rostasche	68,77	2,209	1,5191	0,957	0,909
BS 13	Ziegel, Rostasche	Ziegel	72,23	2,489	1,7978	1,357	1,289
BS 14	Ziegel, Rostasche	Natursand	69,56	2,636	1,8336	1,720	1,634
BS 15	Ziegel, Rostasche	Natursand, Rostasche	69,75	2,457	1,7138	1,442	1,370
BS 16	Ziegel, Rostasche	Ziegel, Natursand, Rostasche	71,19	2,438	1,7356	1,460	1,387
BS 17	Ziegel, Lava	Natursand, Ziegel	69,84	2,580	1,8019	1,590	1,511
BS 18	Bims, Lava	Natursand, Lava	70,09	2,347	1,645	1,264	1,201
BS 19	Bims, Lava	Lava, Bims	70,89	2,244	1,5908	1,168	1,110

Anlage 29: Optimierungspotential der Baumsubstrate BS 1 bis BS 19 als rechnerisches 2-Stoff-System im Vergleich zum Praxisgemisch (1-Stoff-System) in Vol.-%

2/X	0/2	BS 1	BS 2	BS 3	BS 4	BS 5	BS 6	BS 7	BS 8	BS 9	BS 10	BS 11	BS 12	BS 13	BS 14	BS 15	BS 16	BS 17	BS 18	BS 19
75,0 %	25,0 %	67,8	69,2	70,2	68,8	69,0	69,1	71,7	70,3	70,9	70,2	68,3	68,1	71,1	68,3	68,4	69,4	68,5	68,1	68,8
Maxima		71,6	72,2	71,9	71,9	71,0	70,9	75,9	73,7	73,7	72,1	76,8	68,8	72,7	71,4	70,8	71,4	70,2	70,2	70,9
25,0 %	75,0 %	68,4	68,8	67,2	68,1	66,7	66,7	71,1	69,1	69,5	67,9	72,9	64,4	68,3	67,6	66,8	67,0	66,0	66,6	67,2
Optimierung																				
Standfestigkeit		3,8	3,0	1,7	3,1	2,0	1,8	4,2	3,4	2,8	1,9	8,5	0,7	1,6	3,1	2,4	2,0	1,7	2,1	2,1
Optimierung																				
Durchwurzelbarkeit		3,2	3,4	4,7	3,8	4,3	4,2	4,8	4,6	4,2	4,2	3,9	4,4	4,4	3,8	4,0	4,4	4,2	3,6	3,7
Packungsdichte																				
1-Stoff-System		68,5	71,9	71,7	70,4	69,8	70,5	75,7	73,7	73,7	71,9	72,8	68,8	72,2	69,6	69,8	71,2	69,8	70,1	70,9

Anlage 30: Packungsdichte von BS 1 bis BS 19 als 2-Stoff-System 0/2 mm : 2/X mm im gewählten Bereich von 25 – 75 % für den Anteil der Fraktion 0/2 mm

2/X	0/2	BS 1	BS 2	BS 3	BS 4	BS 5	BS 6	BS 7	BS 8	BS 9	BS 10	BS 11	BS 12	BS 13	BS 14	BS 15	BS 16	BS 17	BS 18	BS 19
75	25	67,8	69,2	70,2	68,8	69,0	69,1	71,7	70,3	70,9	70,2	68,3	68,1	71,1	68,3	68,4	69,4	68,5	68,1	68,8
74	26	67,9	69,3	70,4	69,0	69,1	69,2	72,0	70,5	71,0	70,3	68,5	68,1	71,2	68,5	68,5	69,5	68,6	68,2	68,9
73	27	68,1	69,5	70,5	69,1	69,2	69,3	72,2	70,7	71,2	70,5	68,8	68,2	71,3	68,6	68,6	69,6	68,7	68,3	69,0
72	28	68,2	69,6	70,6	69,2	69,4	69,4	72,5	70,8	71,3	70,6	69,0	68,3	71,4	68,7	68,8	69,8	68,8	68,4	69,2
71	29	68,4	69,8	70,7	69,4	69,5	69,5	72,8	71,0	71,5	70,7	69,3	68,3	71,5	68,9	68,9	69,9	68,9	68,5	69,3
70	30	68,6	69,9	70,8	69,5	69,6	69,6	73,0	71,2	71,7	70,8	69,5	68,4	71,7	69,0	69,0	70,0	69,0	68,7	69,4
69	31	68,7	70,0	71,0	69,7	69,7	69,7	73,3	71,4	71,8	70,9	69,8	68,4	71,8	69,2	69,1	70,1	69,1	68,8	69,5
68	32	68,9	70,2	71,1	69,8	69,8	69,8	73,5	71,5	72,0	71,0	70,0	68,5	71,9	69,3	69,2	70,2	69,2	68,9	69,6
67	33	69,0	70,3	71,2	69,9	69,9	69,9	73,7	71,7	72,1	71,1	70,3	68,5	72,0	69,4	69,3	70,3	69,3	69,0	69,7
66	34	69,2	70,4	71,3	70,1	70,0	70,0	73,9	71,8	72,2	71,2	70,5	68,6	72,1	69,5	69,5	70,4	69,3	69,1	69,8
65	35	69,3	70,5	71,3	70,2	70,1	70,1	74,1	72,0	72,4	71,3	70,8	68,6	72,1	69,7	69,6	70,5	69,4	69,2	69,9
64	36	69,5	70,7	71,4	70,3	70,1	70,2	74,3	72,1	72,5	71,4	71,0	68,6	72,2	69,8	69,7	70,6	69,5	69,3	70,0
63	37	69,6	70,8	71,5	70,4	70,2	70,3	74,5	72,3	72,6	71,5	71,3	68,7	72,3	69,9	69,8	70,7	69,6	69,3	70,1
62	38	69,7	70,9	71,6	70,6	70,3	70,3	74,6	72,4	72,7	71,6	71,5	68,7	72,4	70,0	69,9	70,8	69,6	69,4	70,2
61	39	69,9	71,0	71,6	70,7	70,4	70,4	74,8	72,5	72,8	71,6	71,8	68,7	72,4	70,1	70,0	70,8	69,7	69,5	70,3
60	40	70,0	71,1	71,7	70,8	70,5	70,5	74,9	72,6	73,0	71,7	72,0	68,8	72,5	70,2	70,0	70,9	69,8	69,6	70,4
59	41	70,2	71,2	71,8	70,9	70,5	70,6	75,1	72,8	73,1	71,8	72,3	68,8	72,6	70,3	70,1	71,0	69,8	69,7	70,4
58	42	70,3	71,4	71,8	71,0	70,6	70,6	75,2	72,9	73,2	71,8	72,6	68,8	72,6	70,4	70,2	71,0	69,9	69,8	70,5
57	43	70,4	71,5	71,8	71,1	70,7	70,7	75,3	73,0	73,2	71,9	72,8	68,8	72,6	70,5	70,3	71,1	70,0	69,8	70,6
56	44	70,5	71,6	71,9	71,2	70,7	70,7	75,4	73,1	73,3	71,9	73,1	68,8	72,7	70,6	70,4	71,2	70,0	69,9	70,7
55	45	70,7	71,7	71,9	71,3	70,8	70,8	75,5	73,2	73,4	72,0	73,3	68,8	72,7	70,7	70,4	71,2	70,1	70,0	70,7
54	46	70,8	71,8	71,9	71,4	70,8	70,8	75,6	73,3	73,5	72,0	73,6	68,8	72,7	70,8	70,5	71,3	70,1	70,0	70,8
53	47	70,9	71,8	71,9	71,5	70,9	70,9	75,7	73,3	73,6	72,0	73,8	68,7	72,7	70,9	70,6	71,3	70,1	70,1	70,8
52	48	71,0	71,9	71,9	71,6	70,9	70,9	75,8	73,4	73,6	72,1	74,1	68,7	72,7	71,0	70,6	71,4	70,1	70,1	70,8
51	49	71,1	72,0	71,9	71,6	70,9	70,9	75,8	73,5	73,7	72,1	74,3	68,7	72,7	71,1	70,7	71,4	70,2	70,1	70,9
50	50	71,2	72,0	71,9	71,7	71,0	70,9	75,8	73,5	73,7	72,1	74,6	68,6	72,7	71,1	70,7	71,4	70,2	70,1	70,9
49	51	71,3	72,1	71,9	71,8	71,0	70,9	75,9	73,6	73,7	72,0	74,8	68,6	72,7	71,2	70,8	71,4	70,2	70,2	70,9
48	52	71,4	72,1	71,8	71,8	71,0	70,9	75,9	73,6	73,7	72,0	75,1	68,5	72,7	71,3	70,8	71,4	70,1	70,2	70,9
47	53	71,4	72,2	71,8	71,9	71,0	70,9	75,9	73,7	73,7	72,0	75,3	68,5	72,6	71,3	70,8	71,4	70,1	70,2	70,9
46	54	71,5	72,2	71,7	71,9	70,9	70,9	75,9	73,7	73,7	72,0	75,5	68,4	72,6	71,3	70,8	71,4	70,1	70,1	70,9
45	55	71,5	72,2	71,7	71,9	70,9	70,8	75,8	73,7	73,7	71,9	75,8	68,4	72,5	71,4	70,8	71,3	70,0	70,1	70,9
44	56	71,6	72,2	71,6	71,9	70,9	70,8	75,8	73,7	73,7	71,9	76,0	68,3	72,4	71,4	70,7	71,3	70,0	70,1	70,8
43	57	71,6	72,2	71,5	71,9	70,8	70,7	75,7	73,7	73,6	71,8	76,1	68,2	72,4	71,4	70,7	71,2	69,9	70,1	70,8
42	58	71,6	72,2	71,4	71,9	70,7	70,7	75,6	73,6	73,6	71,7	76,3	68,1	72,3	71,3	70,7	71,1	69,9	70,0	70,7
41	59	71,6	72,2	71,3	71,8	70,7	70,6	75,5	73,6	73,5	71,6	76,4	68,0	72,2	71,3	70,6	71,1	69,8	70,0	70,7
40	60	71,6	72,1	71,2	71,8	70,6	70,5	75,4	73,5	73,4	71,5	76,5	67,9	72,1	71,3	70,5	71,0	69,7	69,9	70,6
39	61	71,6	72,1	71,0	71,7	70,5	70,4	75,3	73,4	73,3	71,4	76,6	67,8	71,9	71,2	70,5	70,9	69,6	69,8	70,5
38	62	71,5	72,0	70,9	71,7	70,4	70,3	75,2	73,3	73,2	71,3	76,7	67,6	71,8	71,1	70,4	70,7	69,5	69,7	70,4
37	63	71,5	71,9	70,7	71,6	70,2	70,1	75,0	73,2	73,1	71,2	76,8	67,5	71,6	71,1	70,3	70,6	69,3	69,6	70,3
36	64	71,4	71,8	70,6	71,5	70,1	70,0	74,8	73,0	72,9	71,0	76,8	67,3	71,5	70,9	70,1	70,4	69,2	69,5	70,2
35	65	71,3	71,7	70,4	71,3	69,9	69,8	74,6	72,8	72,8	70,8	76,8	67,2	71,3	70,8	69,9	70,3	69,0	69,3	70,0
34	66	71,1	71,5	70,2	71,1	69,7	69,6	74,4	72,6	72,6	70,7	76,7	67,0	71,1	70,6	69,8	70,1	68,8	69,2	69,9
33	67	71,0	71,3	69,9	70,9	69,5	69,4	74,2	72,4	72,3	70,5	76,6	66,8	70,9	70,4	69,6	69,8	68,6	69,0	69,7
32	68	70,8	71,1	69,7	70,7	69,3	69,2	73,9	72,1	72,1	70,3	76,5	66,6	70,7	70,2	69,4	69,6	68,4	68,8	69,5
31	69	70,6	70,9	69,5	70,5	69,0	69,0	73,7	71,8	71,9	70,0	76,2	66,4	70,5	70,0	69,1	69,4	68,2	68,6	69,3
30	70	70,2	70,6	69,1	70,1	68,6	68,6	73,2	71,3	71,4	69,7	75,7	66,0	70,1	69,6	68,7	69,0	67,8	68,3	68,9
29	71	69,8	70,2	68,7	69,7	68,3	68,2	72,8	70,8	71,0	69,3	75,2	65,7	69,7	69,2	68,3	68,6	67,5	67,9	68,6
28	72	69,5	69,8	68,3	69,3	67,9	67,8	72,4	70,4	70,6	68,9	74,7	65,4	69,3	68,8	68,0	68,2	67,1	67,6	68,2
27	73	69,1	69,5	67,9	68,9	67,5	67,4	71,9	69,9	70,2	68,6	74,2	65,0	69,0	68,4	67,6	67,8	66,7	67,2	67,9
26	74	68,8	69,1	67,5	68,5	67,1	67,1	71,5	69,5	69,8	68,2	73,5	64,7	68,6	68,0	67,2	67,4	66,4	66,9	67,5
25	75	68,4	68,8	67,2	68,1	66,7	66,7	71,1	69,1	69,5	67,9	72,9	64,4	68,3	67,6	66,8	67,0	66,0	66,6	67,2
Packungs- dichte 1-Stoffsystem		68,5	71,9	71,7	70,4	69,8	70,5	75,7	73,7	73,7	71,9	72,8	68,8	72,2	69,6	69,8	71,2	69,8	70,1	70,9

Anlage 31: Prüfverfahren nach FLL und FGSV für Baumsubstrate**Inhalt****A31.1 Vegetationstechnische Untersuchungsmethoden**

- A31.1.1 Bestimmung der Korndichte (Rohdichte)
- A31.1.2 Einfluss der Korndichte auf das Gesamtporen- und Luftvolumen

A31.2 Straßenbautechnische Untersuchungsmethoden

- A31.2.1 Verdichtbarkeit nach Proctor
- A31.2.2 Lastplattendruckversuch
- A31.2.3 Dynamischer Lastplattendruckversuch
- A31.3.4 CBR-Versuch

A31.1 Vegetationstechnische Untersuchungsverfahren

Für Baumsubstrate nach FLL-Empfehlungen [FLL, 2004, 2010] sind im normativen Anhang 1, Anhang 1a die Beschreibungen der Prüfverfahren für die Bestimmung des Wasser- und Lufthaushalts für die Parameter:

- Wasserkapazität
- Luftvolumens bei maximaler Wasserkapazität
- Wasserdurchlässigkeit
- Gesamtporenvolumen
- Luftvolumen bei pF 1,8

aufgeführt.

Die Prüfungen erfolgen an Prüfkörpern mit definiertem Verdichtungsgrad von 85 % oder 95 % für die Pflanzgrubenbauweisen 1 oder 2. Hierzu ist zu Beginn der Proctorversuch nach DIN 18127 [1997] mit Bestimmung der Proctordichte und des dazugehörigen optimalen Wassergehaltes durchzuführen. Mit der Bestimmung der Proctordichte bei 100 % Verdichtung kann die Proctordichte bei 95 % berechnet werden und der dazugehörige Wassergehalt der ermittelten Proctorkurve entnommen werden. Der Proctorversuch wird normgemäß in Stahl-Prüfzylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 125 mm durchgeführt. Die Prüfkörper sind hierbei jeweils in drei Lagen mit 22 Schlägen und einem Fallgewicht von 4,5 kg zu verdichten.

Die Bestimmung des Wasser- und Lufthaushalts wird an insgesamt neun Prüfkörpern nach [FLL, 2004] bzw. sechs Prüfkörpern nach [FLL, 2010] durchgeführt. Jeweils drei Prüfkörper werden für die Bestimmung der Wasserkapazität, der Wasserdurchlässigkeit und des Gesamtporenvolumens/Luftvolumens bei pF 1,8 benötigt. In den FLL-Empfehlungen von 2010 darf nach der Bestimmung der Wasserkapazität an den gleichen Prüfkörpern die Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden, sodass sich hier der Herstellungsaufwand für die Anzahl der Prüfkörper reduziert hat. Die Prüfungen werden im Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 120 mm durchgeführt. In den FLL-Empfehlungen von 2010 dürfen auch Stahlzylinder eingesetzt werden. Hierzu ist das Prüfgut auf den Wassergehalt einzustellen, der sich bei 95 %iger Proctordichte ergeben hat.

Die Prüfgutmenge wird nach folgender Formel berechnet:

$$m_f = D_{Pr} \times \rho_{Pr} \left(1 + \frac{W_p}{100} \right) \times V_f$$

mit:

- m_f Masse des Prüfguts (Substrat) bei Prüfwassergehalt [g]
 ρ_{Pr} Proctordichte [g/cm³]
 W_p Prüfwassergehalt aus der Proctorkurve bei $D_{Pr} = 0,95$ abgelesen [%]
 V_f Volumen des Prüfkörpers [cm³]
 D_{Pr} Verdichtungsgrad, auf den das Substrat verdichtet wird. Pflanzgrubenbauweise 1: $D_{Pr} = 0,85$ und Pflanzgrubenbauweise 2: $D_{Pr} = 0,95$

Das Prüfgut wird in den Prüfcylinder eingefüllt und in einer Lage in Anlehnung an DIN 18035-5 [2007] mit Hilfe einer Stahlplatte auf genau 120 mm Probekörperhöhe verdichtet. Die hergestellten Prüfkörper werden dann auf einem Lochblech mit aufliegendem Gazematerial in einem Wasserbad von unten aufwärts langsam mit Wasser aufgesättigt und anschließend 24 Stunden im Wasserüberstau gehalten. Danach können die Prüfungen zum Wasser- und Lufthaushalt durchgeführt werden.

Die maximale Wasserkapazität wird an drei Prüfkörpern nach 24-stündiger Überstau-Wasserlagerung bestimmt. Dazu werden sie auf der Lochplatte aus dem Wasserbad entnommen und zwei Stunden zum Abtropfen gebracht. Nach Wägung kann WK_{max} berechnet werden:

$$m_w = m_{wk} - m_B - m_d$$

mit:

- m_w Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) bei maximaler Wassersättigung [g]
 m_{wk} Masse des Prüfkörpers bei maximaler Wassersättigung [g]
 m_B Masse des Prüfcylinders [g]
 m_d Trockenmasse des Substrates nach Trocknung bei 105°C [g]

und

$$WK_{max} = \frac{m_w}{V_f} \times 100$$

mit:

- WK_{max} maximale Wasserkapazität [Vol.-%]
 m_w Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) bei maximaler Wassersättigung [g]
 V_f Volumen des Prüfkörpers [cm³]

Die Berechnung des Luftvolumens bei maximaler Wasserkapazität kann im Anschluss an die Ermittlung der maximalen Wasserkapazität erfolgen:

$$V_{LV} = PV - m_w$$

und

$$LV = \frac{V_{LV}}{V} \times 100$$

mit:

- V_{LV} Volumen der Luft bei maximaler Wasserkapazität [cm³]
 V Volumen des Prüfkörpers [cm³]
 PV Porenvolumen bei maximaler Wasserkapazität [cm³]
 LV Luftvolumen bei maximaler Wasserkapazität bezogen auf das Prüfkörpervolumen [cm³]

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit erfolgt nach FLL [2010] in Anlehnung nach DIN 18035-5 [2007] im Anschluss an die Bestimmung der maximalen Wasserkapazität im mit Wasser gesättigten Zustand. Dazu wird eine Muffe mit Dichtring mit einer Mindestmesshöhe von 70 mm auf die Prü fzylinder aufgesetzt. Die Oberfläche des Prüfkörpers wird mit einem Filtervlies abgedeckt, worauf die Messspitzen für die Zeitmessung gestellt werden. Danach werden die Prüfkörper wieder in eine Wanne gestellt. In die Wanne wird langsam Wasser eingelassen, bis die Messspitzen um ca. 10 – 20 mm mit Wasser bedeckt sind. Dann wird das Wasser aus der Wanne bis 10 mm über Probenboden abgelassen, wobei der Überstau in den Muffen durch Wasserzugabe erhalten bleiben muss. Die eigentliche Messung beginnt, sobald gleichmäßig Wasser aus dem Substrat/Boden austritt. Es wird dann die Zeit gemessen, die der Wasserspiegel benötigt, um von der oberen Messspitze auf die untere Messspitze (Pegelabsenkung um 10 mm) abzusinken. Diese Messung wird mindestens dreimal durchgeführt, bis die gemessenen Zeiten annähernd konstant bleiben und der Mittelwert gebildet werden kann. Die Berechnung der Wasserdurchlässigkeit erfolgt nach:

$$k_f = \left(\frac{1}{t} \times \frac{h}{h + 4} \right) / 100$$

mit:

k_f Wasserdurchlässigkeit [m/s]
 t Zeit für das Absinken des Wasserspiegels
 h Höhe des Prüfkörpers [cm]

Das Gesamtporenvolumen und das Luftvolumen werden an den weiteren drei verbleibenden Prüfkörpern ermittelt. Die Bestimmung des Gesamtporenvolumens setzt dabei die Bestimmung der Rohdichte (Korndichte) ρ_s voraus. Für die Bestimmung des Gesamtporenvolumens wird zunächst das Porenvolumen berechnet:

$$PV = V_f - \frac{m_d}{\rho_s}$$

mit:

PV Porenvolumen [cm³]
 m_d Trockenmasse des Substrates nach Trocknung bei 105°C [g]
 ρ_s Rohdichte der festen Einzelbestandteile (Körner) des Bodens [g/cm³]
 V_f Volumen des Prüfkörpers [cm³]

Das Gesamtporenvolumen wird berechnet als prozentualer Anteil des Porenvolumens am Volumen des Probekörpers:

$$GPV = \frac{PV}{V_f} \times 100$$

mit:

GPV Gesamtporenvolumen [Vol.-%]
 PV Porenvolumen [cm³]
 V_f Volumen des Prüfkörpers [cm³]

Die Bestimmung des Luftvolumens bei pF 1,8 erfolgt mit Hilfe eines Druckpatten-Extraktors (Drucktopf). Hierzu wird die vorgewässerte Keramik-Druckplatte in den Drucktopf gelegt und darauf wird der zuvor wassergesättigte Prüfkörper gestellt. Der Topf wird verschlossen und mit einem Druck von 0,06 bar (= 60 hPa) beaufschlagt. Der Druck wird so lange stabil gehalten, bis kein Wasser mehr austritt. Danach wird der Druck abgelassen und der Prüfkörper kann zur Wägung aus dem Drucktopf entnommen werden. Die Bestimmung des Luftgehalts erfolgt rechnerisch wie folgt:

$$m_{w1,8} = m_{pF1,8} - m_B - m_d$$

mit:

$m_{w1,8}$	Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]
m_{wk}	Masse des Prüfkörpers nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]
m_B	Masse des Prüfzylinders [g]
m_d	Trockenmasse des Substrates nach Trocknung bei 105°C [g]

Die Berechnung des Luftvolumens bei pF 1,8 erfolgt mit der Gleichung:

$$V_{LV} = PV - m_{w1,8}$$

mit:

V_{LV}	Volumen der Luft bei pF 1,8 [cm³]
PV	Porenvolumen [cm³]
$m_{w1,8}$	Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]

Die Berechnung des Luftvolumens bezogen auf das Porenvolumen ergibt sich aus:

$$LV = \frac{V_{LV}}{V_f} \times 100$$

mit:

LV	Luftvolumen bei pF 1,8 bezogen auf das Prüfkörpervolumen [Vol.-%]
V_{LV}	Volumen der Luft bei pF 1,8 [cm³]
V_f	Volumen des Prüfkörpers [cm³]

A31.1.1 Bestimmung der Korndichte (Rohdichte)

Die Bestimmung des Gesamtporenvolumens und des Luftvolumens nach normativem FLL-Anhang 1 [FLL, 2004] setzt die Bestimmung der Korndichte ρ_s voraus. Die Korndichte kann gemäß der Fassung 2004 noch alternativ nach folgenden Verfahren bestimmt werden:

- DIN 18124 im Weithalspyknometer [DIN 18124, 1997]
- DIN EN 1097-6 im Wassерpyknometer [DIN EN 1097-6, 2005]
- DIN EN 12350-7 im Luftpyknometer [DIN EN 12350-7, 2000]

Gemäß FLL [2010], Anhang A1, wird seit der Fassung von 2010 die Bestimmung der Korndichte nur noch im Luftpyknometer gemäß TP Boden, Luftpyknometer, [1988] ermittelt.

U.a. aufgrund der einzusetzenden Probemenge nach DIN 18124 [1997] von lediglich 40 g bei einer vorgegebenen Korngröße bis etwa 10 mm in einem 50 cm³-Pyknometer ist die Methode für die Prüfung von Baumsubstraten bis zu einem Größtkorn von 32 mm nicht geeignet und wird daher in der FLL [2010] nicht mehr aufgeführt.

Die Rohdichte von Gesteinskörnungen nach DIN EN 1097-6 [2005] unterscheidet die ‚Rohdichte auf ofentrockener Basis‘ (Trockenrohichte) und wird hier definiert als: „Verhältnis der ofentgetrockneten Masse einer Probe von Gesteinskörnung zu dem Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich innerer geschlossener Hohlräume, aber ausschließlich wasserzugänglicher Hohlräume.“ [DIN EN 1097-6, 2005]

Weiterhin kann nach DIN EN 1097-6 [2005] die scheinbare Rohdichte als „Verhältnis der ofentgetrockneten Masse einer Probe von Gesteinskörnungen zu dem Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich innerer geschlossener Hohlräume, aber ausschließlich wasserzugänglicher Hohlräume“ bestimmt werden. Sie ermöglicht auch die Bestimmung der Wasseraufnahme einer groben Gesteinskörnung.

Das Verfahren der DIN EN 1097-6 [2005] ist grundsätzlich geeignet für Körnungen im Bereich von 0,063 bis 63 mm und definiert in Abhängigkeit von der Korngröße unterschiedliche Prüfverfahren. Dazu muss eine Gesteinskörnung im Regelfall in die Kornfraktionen 0,063/4 mm (Pyknometerverfahren nach Abschnitt 9 der DIN), 4/31,5 mm (Pyknometerverfahren nach Abschnitt 8 der DIN) und 31,5/63 mm (Drahtkorbverfahren nach Abschnitt 7 der DIN) aufgetrennt werden und getrennt nach den angegebenen normierten Verfahren untersucht werden.

Mit Hilfe der DIN EN 12350-7 [2000] wird innerhalb der Betontechnologie üblicherweise der Luftgehalt von Frischbeton ermittelt. Dabei wird mit dem Druckausgleichsverfahren zwischen einem mit Beton und einem mit Druckluft gefüllten Behälter ein Druckausgleich hergestellt. Der dabei durch die Luftporen des Betons bedingte Druckabfall wird auf einem kalibrierten Manometer als prozentualer Luftgehalt der Probe abgelesen. [IKEN, et. al., 2003]

Das Messverfahren kann auch genutzt werden zur Bestimmung der Rohdichte von Substraten nach FLL-Empfehlungen für Baumsubstrate [FLL, 2010]. Das Luftpyknometer wird für diesen Zweck vorab mit unterschiedlich bekannten Volumina, z.B. mit Hilfe von Wasser, auf die Skala des Manometers geeicht. Die Prüfung erfolgt, indem eine Substratprobe in einer Masse von ca. 700 – 1300 g in den Ein-Liter-Probenbehälter eingebracht wird. Bei feuchten Proben ist parallel der Wassergehalt nach DIN 18123 [1996] zu bestimmen und im Ergebnis zu berücksichtigen. Das Luftpyknometer wird verschlossen, der Luftdruck in der Druckkammer aufgebracht und der Druckausgleich der zwei Kammern hergestellt. Anschließend kann der Wert auf der Skala des Druckmanometers abgelesen werden und im Vergleich mit der Eichung

das Feststoffvolumen bestimmt werden. Die Vorgehensweise gleicht damit der Vorgehensweise im Luftpyknometer gemäß TP Boden, Luftpyknometer, [1988].

A31.1.2 Einfluss der Korndichte auf das Gesamtporen- und Luftvolumen

Das Ergebnis der Bestimmung der Rohdichte des Substrates hat Einfluss auf die Bestimmung des Gesamtporen- und Luftvolumens. Das Gesamtporenvolumen nach FLL [2010] wird in zwei Schritten nachfolgenden Gleichungen ermittelt.

Berechnung des Porenvolumens PV:

$$PV = V - \frac{m_d}{\rho_s}$$

mit:

PV	Porenvolumen [cm ³]
V	Volumen des Prüfkörpers [cm ³]
m _d	Trockenmasse des Substrates nach Trocknung bei 105°C [g]
ρ _s	Rohdichte der festen Einzelbestandteile (Körner) des Substrates [g/cm ³]

Berechnung des Gesamtporenvolumens GPV:

$$GPV = \frac{PV}{V} \times 100$$

mit:

GPV	Gesamtporenvolumen [Vol.-]
PV	Porenvolumen [cm ³]
V	Volumen des Prüfkörpers [cm ³]

Das Luftvolumen bei pF 1,8 wird nach FLL [2010] an drei Prüfkörpern nach der Überdruckmethode im Drucktopf in Anlehnung an HARTGE und HORN [1989] aus der Differenz zwischen dem Gesamtvolumen und der Wasserbindung bei pF ≤ 1,8 bestimmt. Die Berechnung des Luftvolumens erfolgt in drei Schritten. Dabei werden teilweise Masse und Volumen von Wasser zahlenmäßig gleichgesetzt (1 g = 1 cm³).

Berechnung des Luftgehalts in [g]:

$$m_{w1,8} = m_{pF1,8} - m_B - m_d$$

mit:

$m_{w1,8}$ Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]

$m_{pF1,8}$ Masse des Prüfkörpers nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]

m_B Masse des Prüfzylinders [g]

m_d Trockenmasse des Substrates nach Trocknung bei 105°C [g]

Berechnung des Luftvolumens bei pF 1,8 [g]:

$$V_{LV} = PV - m_{w1,8}$$

mit:

V_{LV} Volumen der Luft bei pF 1,8 [cm³]

PV Porenvolumen [cm³]

$m_{w1,8}$ Masse des Wassers im Prüfgut (Substrat) nach Entwässerung bei pF 1,8 (60 hPa) [g]

Berechnung des Luftvolumens bezogen auf das Porenvolumen in [Vol.-%]:

$$LV = \frac{V_{LV}}{V} \times 100$$

mit:

LV Luftvolumen bei pF 1,8 [Vol.-%]

V_{LV} Volumen der Luft bei pF 1,8 [cm³]

V Volumen des Prüfkörpers [cm³]

Damit geht über die Berechnung des Porenvolumens PV die Rohdichte der Substratbestandteile auch in das Luftvolumen bei pF 1,8 mit ein.

A31.2 Straßenbautechnische Untersuchungsmethoden

Die Prüfungen und Prüfverfahren der FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2 [FLL, 2004 und 2010], greifen im Bereich der Bodenphysik auf bewährte Prüfverfahren des Erdbaus zurück, um für dieses ‚vegetationstechnische Regelwerk‘ eine möglichst breite Akzeptanz im Bereich des Erd- und Straßenbaus zu erlangen. So werden die Prüfungen zur Korngrößenverteilung, zum Verdichtungsverhalten und zum Nachweis der Tragfähigkeit nach gebräuchlichen erdbautechnischen Verfahren durchgeführt. Die Durchführung des Lastplattendruckversuchs nach DIN 18134 [2012] stellt in der Praxis zur Beurteilung einer ausreichenden Tragfähigkeit des Untergrundes bei Baumpflanzungen eine mit hohem Aufwand durchführbare Prüfung dar, sodass an dieser Stelle auch die Verfahren zur Bestimmung des Dynamischen Plattendruckversuchs und des CBR-Versuchs aufgeführt werden.

A31.2.1 Verdichtbarkeit nach Proctor

Die Ermittlung der Verdichtungsfähigkeit der unterbaufähigen Vegetationstragschicht für Baumpflanzungen erfolgt mit dem Proctorversuch [DIN 18127, 1997] und steht am Beginn des Eignungsnachweises. Mit Hilfe des Proctor-Versuchs nach DIN 18127 wird die sogenannte Proctordichte bei 100 % bestimmt. Verdichtungsanforderung und den dazugehörigen optimalen Wassergehalt. Die vegetationstechnischen Untersuchungen werden an hergestellten Probekörpern nach FLL-Anhang [FLL, 2004 und 2010] bestimmt mit einem Verdichtungsgrad von 95 %, der rechnerisch zuvor vom 100 %-Wert abgeleitet wurde.

Die Proctordichte stellt nach FLL [2004] keine Anforderung dar. Eine Anforderung wird nur für den Einbauwassergehalt des zu liefernden Substrates vorgegeben. Er muss kleiner sein als der optimale Wassergehalt nach Proctor, um einen Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve problemlos zu ermöglichen. Nach FLL [2010] und ZTV-Vegtra-Mü [2008, 2016] ist die Angabe der Proctordichte notwendig, da die Einbaudichte den Boden- und Wasserhaushalt beeinflusst.

Bei Durchführung des Proctorversuchs kann bei Gesteinskörnungen mit geringer Kornfestigkeit, wie z.B. Bims, in Substraten eine Kornzertrümmerung und damit ggf. eine Veränderung der Korngrößenverteilung bewirken.

Bei hohen Anteilen von porigen Bestandteilen in Baumsubstraten ergibt sich oftmals nicht der typische parabelförmige Verlauf der Proctorkurve als Abhängigkeit zum Wassergehalt.

A31.2.2 Lastplattendruckversuch

Der Nachweis der Tragfähigkeit mit einem Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ und einem Verhältniswert von $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ erfordert die für Baumpflanzungen relativ aufwendige Prüfung des Lastplattendruckversuchs nach DIN 18134 [2012]. Dieser Versuch kann bei vielen Baumpflanzungen in der Praxis oftmals gar nicht durchgeführt werden, da die Umgebungsverhältnisse eine Befahrung mit einem schweren Fahrzeug, welches als Widerlager für die Durchführung des Versuchs benötigt wird, dies vielfach nicht zulassen.

Die aufgebrachte Bodenpressung wird bei der Versuchsdurchführung zweimal auf die Prüffläche zur Ermittlung des E_{v1} - und E_{v2} -Wertes aufgebracht, sodass auch der rechnerische Verhältniswert von E_{v2}/E_{v1} mit der Anforderung $\leq 2,5$ verglichen werden kann. Der Verhältniswert erlaubt, zusätzlich zur Tragfähigkeitsbeurteilung über den E_{v2} -Wert zu ermitteln, ob eine ausreichende Verdichtung beim Einbau der Schicht erfolgt.

A31.2.3 Dynamischer Lastplattendruckversuch

Zum Nachweis der Standfestigkeit im Einbauzustand der Vegetationstragschichten für Baumpflanzungen bei Eignungs-, Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen kann zukünftig vermehrt auch der dynamische E-Modul geprüft werden.

Dieser hat den Vorteil bei der Versuchsdurchführung, dass kein statisches Gegengewicht benötigt wird. Die dynamische E-Modulprüfung kann auch in beengten Verhältnissen wie Gräben oder Baumgruben durchgeführt werden. Im Erd- und Straßenbau können vergleichende Prüfungen zum statischen Lastplattendruckversuch den Prüfaufwand durch Einsatz der dynamischen E-Modul-Prüfung gemäß ZTV E-StB 09 [2009] deutlich reduzieren.

A31.2.4 CBR-Versuch

Der CBR-Versuch nach TP BF-StB [2009] stellt eine straßenbautechnische Prüfung dar, bei der die Standfestigkeitseigenschaften eines Baustoffs an einem nach Proctor hergestellten Prüfkörper ermittelt werden kann. Er eignet sich daher insbesondere für die Durchführung von Eignungsprüfungen im Labor. Damit wäre es zukünftig möglich, schon im Labor den Nachweis der vegetationstechnischen und bautechnischen Anforderungen im Vorfeld bei der Durchführung des Eignungsnachweises zu führen. Es gibt hinsichtlich der Anwendung im Erd- und Straßenbau Erfahrungen zu seiner prüftechnischen Anwendung und zu seiner Regression zum statischen und dynamischen Lastplattendruckversuch.

Bei der Durchführung des CBR-Versuchs [TP BF-StB, 2009] wird ein in Anlehnung an das Proctor-Verfahren verdichteter Prüfkörper auf seine Standfestigkeitseigenschaften untersucht. Hierzu belastet ein Stempel einer Druckprüfmaschine mit definierter Eindringgeschwindigkeit die Prüfkörper. Das Maß des Widerstandes bei einer Eindringtiefe von 2,5 oder 5 mm wird prozentual zu einem Vergleichsboden bewertet.

Anlage 32: Theoretische Grundlagen zur Packungsdichteermittlung

Inhalt

A32.1 Kugelpackungen

- A32.1.1 Kugel-Einkornpackungen
- A32.1.2 Kugel-Zweikornpackungen (Binärpackungen)
- A32.1.3 Kugel-Mehrkornpackungen
- A32.1.4 Apollonische Packungen

A32.2 Packungsdichte bei realen Kornformen

- A32.2.1 Hohlraum und Reichweite zur Teilchenbehinderung
- A32.2.2 Koordinationszahl
- A32.2.3 Kornform und Packungsdichte

A32.1 Kugelpackungen

A32.1.1 Kugel-Einkornpackungen

Bei Kugel-Einkornpackungen werden die kubische, oktaedrische und die tetraedrische Mittelpunktstellung unterschieden. Zwei Tetraeder können zu einem Oktaeder verknüpft werden (Spatelement). Mit dem Spatelement ist die Ausfüllung eines Raumes im Gegensatz zum Oktaeder- und Tetraedermodell möglich. Die größte Packungsdichte ergibt sich beim Spatelement mit $\Phi \approx 0,74$ im Vergleich zur kubischen Mittelpunktstellung von $\Phi \approx 0,524$ [HUMMEL, 1959 und KESSLER, 1994]. In der dichtesten Kugelpackung ergeben sich je Kugel zwölf direkte Nachbarkugel und somit auch zwölf Kontaktstellen.

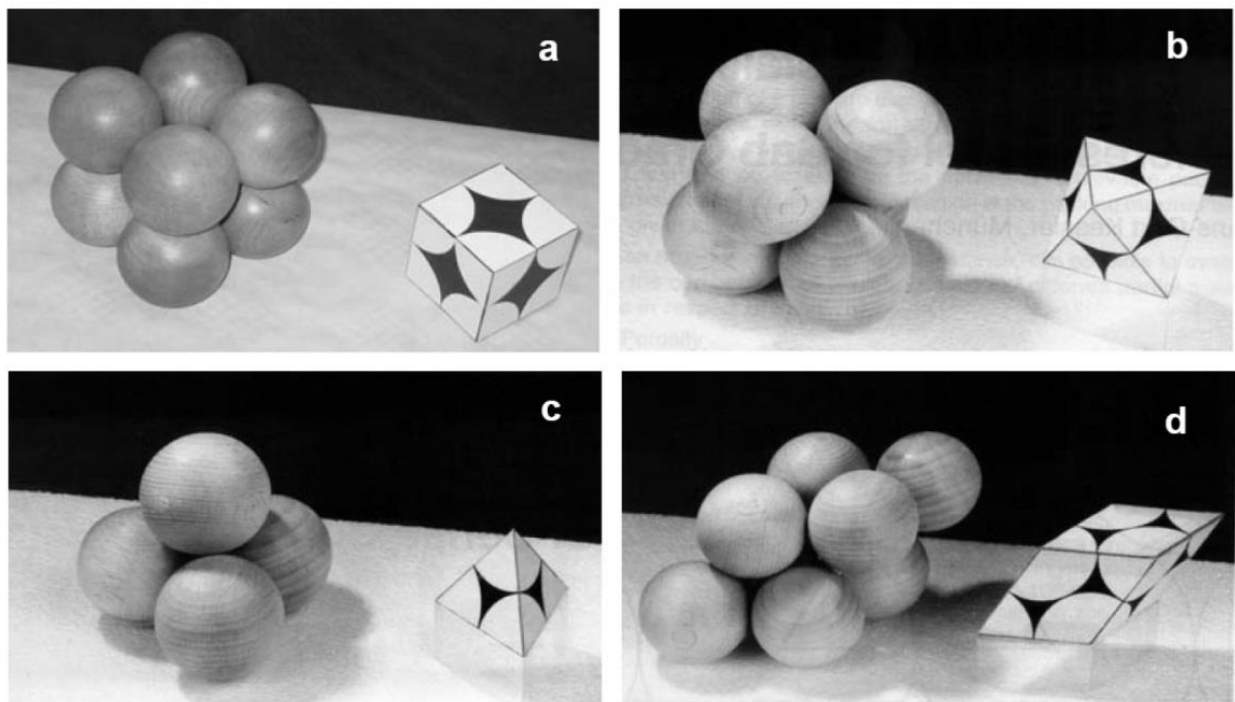


Bild 83: Beispiel für Einkorn-Kugelpackungen nach [HUMMEL, 1959; KESSLER, 1994]

- a) kubische Mittelpunktstellung
- b) oktaedrische Mittelpunktstellung
- c) tetraedrische Mittelpunktstellung
- d) Spatelement

NOLAN und KAVANAGH [2003] unterscheiden in ihren Computersimulationen stabile und nicht stabile Kugelpackungsbereiche und damit Hohlräume mit stabilen und unstabilen Brückenlagen. Durch Energieeintrag (z.B. durch Verdichtung) können nicht stabile in stabile Kugelpackungsbereiche überführt werden. Dabei erhöht sich die Anzahl der Kontaktstellen. Dieser Effekt tritt auch bei der Verdichtung von Vegetationssubstraten auf.

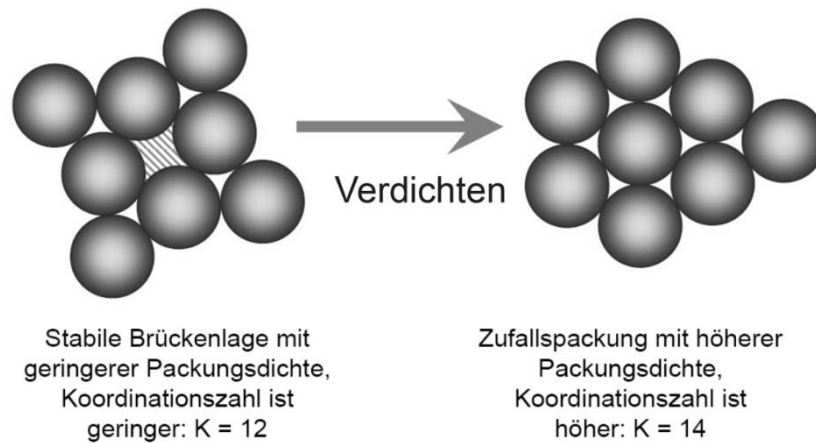


Bild 84: Auflösung stabiler Brückenlagen durch Verdichtung [EDEN, 2010, geändert]

SCOTT [1960] verweist darauf, dass mit kleiner werdendem Kugeldurchmesser der Hohlraumgehalt aufgrund zunehmender interpartikulärer abstoßender elektrostatischer Kräfte stark ansteigt. Geringere Hohlraumgehalte können nur durch Mehrkornpackungen erreicht werden. Van-der-Waals'sche Bindungskräfte können auch zur Agglomeratbildung anziehend wirken.

A32.1.2 Kugel-Zweikornpackungen (Binärpackungen)

Bei zwei Komponenten mit unterschiedlichem Partikeldurchmesser spricht man von Binärpackungen. Bei einem Volumenverhältnis von beispielsweise $v \approx 0,27$ zwischen den zwei benachbarten Kugelgrößen mit einem Durchmesser Verhältnis von $d_2 : d_1 = 4 : 1$ tritt nach OGER und TROADEC [1986] das Porositätsminimum auf. Bei anderen Durchmesserrelationen liegt das Porositätsminimum und damit auch das Packungsdichtemaximum an entsprechend anderer (geringerer) Stelle.

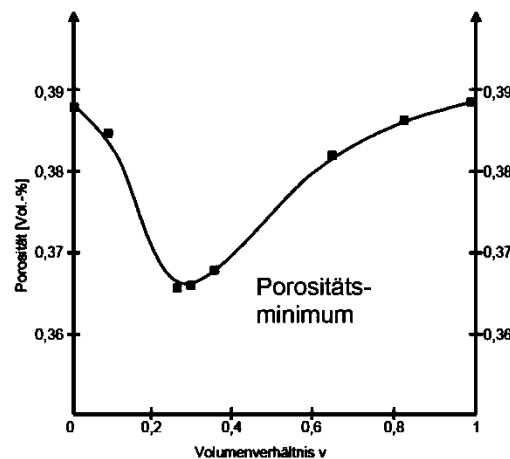


Bild 85: Einfluss der Volumenverhältnisse einer binären Kugelpackung mit einem Durchmesser Verhältnis von $d_2 : d_1 = 4 : 1$ [OGER und TROADEC, 1986]

A32.1.3 Kugel-Mehrkornpackungen

Für Kugel-Mehrkornpackungen liegen verschiedene weiterführende Forschungsarbeiten vor. MC GEARY [1961] ermittelt für eine Vier-Komponenten-Mischung eine theoretische maximale Packungsdichte von $\Phi = 95,1$ – wenn die Verhältnisse der Kugeldurchmesser folgende Abstufung aufweisen und die Anteile der Einzelkomponenten wie in der folgenden Tabelle gewählt werden:

Tabelle 29: Größenverhältnis und Volumenanteile einer maximalen Packungsdichte aus vier Kugelkomponenten [MC GEARY, 1961]

Kugelkomponente	Verhältnis der Kugeldurchmesser	Volumenanteile der Kugelkomponenten in Vol.-%
1	1	6,1
2	7	10,2
3	38	23,0
4	316	60,7
1 - 4		100,0

A32.1.4 Apollonische Packungen

Ideale 2-D-/3-D-Packungen von Kugeln werden in der Mathematik als Apollonische Kreispackungen beschrieben [MANDELBROT, 1987; HERRMANN, et. al., 2003; HERRMANN und MAHMOODI, 2004; HERRMANN und LUDING, 1998]. Eine Folge von stufenweise kleiner werdenden Kreis- oder Kugel-Radien wird innerhalb eines Kreises oder einer Kugel platziert, wobei sie diese Fläche bzw. die Kugel theoretisch zu 100 % ausfüllen. Damit strebt das Porenvolumen gegen Null. Aufgrund interpartikulärer Wechselwirkungen durch Oberflächenkräfte ist dies in der Realität jedoch nicht möglich.

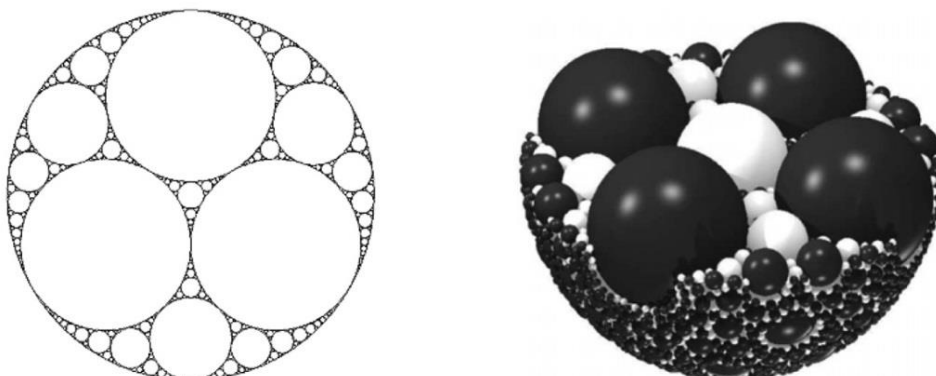


Bild 86: 2-D-Apollonische Kreispackung, Ausgangsbasis: 3-Kreissystem und 3-D-Apollonische Kugelpackung, Ausgangsbasis: 4-Kugelsystem [MANDELBROT, 1987; HERRMANN, et. al., 2003; HERRMANN und MAHMOODI, 2004; HERRMANN und LUDING, 1998]

Der sukzessive Ausfüllvorgang zwischen drei Kreisflächen ist im folgenden Bild anschaulich dargestellt [WÖHLER, 2008].

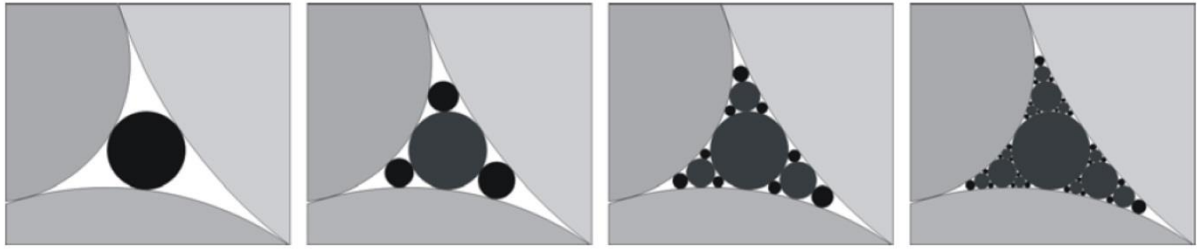


Bild 87: Stufenweise Auffüllung eines Hohlraums einer Apollonischen Kreispackung durch kleinere Kreise [WÖHLER, 2008]

A32.2 Packungsdichte bei realen Kornformen

Natürliche, künstliche oder rezyklierte Gesteinskörnungen fallen im Regelfall (außer z.B. Blähton, Perlite) bei Aufbereitung oder Produktion nicht in der idealen Kugelform an. Sie unterscheiden sich in ihrer Kornform und in ihrer Oberflächenrauheit. Das hat Einfluss auf die erreichbare Packungsdichte. Theoretische Betrachtungen oder Experimente an Kugeln sind daher auf reale Gesteinskörnungen nicht direkt übertragbar.

Unterschieden werden Berechnungsverfahren

- ohne Teilchenbehinderung und
- mit Teilchenbehinderung.

Eine höchstmögliche Packungsdichte entsteht (wie bei der apollonischen Kreispackung), wenn die zwischen den größeren Partikeln vorliegenden Hohlräume (Zwickelräume) gerade mit hineinpassenden kleineren Partikeln komplett ausgefüllt werden.

A32.2.1 Hohlraum und Reichweite zur Teilchenbehinderung

GEISENHANSLÜKE [2008] und EDEN [2010] verweisen auf die Definitionen von GRAUBNER, et. al. [2006] und RESCHKE [2000] zum Hohlraum , k ' und zur Reichweite der Teilchenbehinderung , w ':

$$k = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$$

mit:

ε Porosität in [Vol.-%]

Der Hohlraumgehalt ist hier definiert als der Quotient aus der Porosität ε und dem Feststoffgehalt $(1 - \varepsilon)$.

$$w = \log(x_s/x_w)$$

mit:

x_s Größe des Grundkorns in [mm]

x_w Größe des Grenzkorns in [mm]

Die Teilchenbehinderung ist dabei als Logarithmus aus dem Quotienten aus der Größe des Grundkorns und des Grenzkorns definiert. Sie gibt an, inwieweit das Feinmaterial aufgrund der Korngrößenverhältnisse und der Korngeometrie nicht mehr in die Zwickelräume der größeren Partikel gelangt. Die Grenzkorngröße gibt den Wert an, bei dem gerade keine Teilchenbehinderung mehr auftritt [RESCHKE, 2000].

Für binäre reale Partikelmischungen ermittelt RESCHKE [2000] an verschiedenen Feinstoffen unterschiedlicher Kornform z.B. die Abhängigkeit:

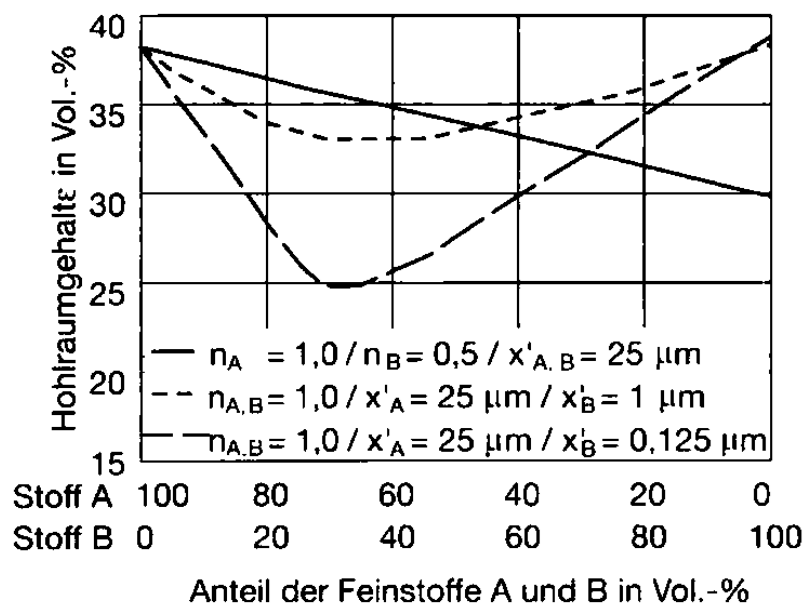


Bild 88: Hohlraumgehalte von Mischungen zweier Feinstoffe A und B unterschiedlicher Korngrößenverteilung [RESCHKE, 2000]

Die Wirkung der Partikelmischung auf die Packungsdichte ist umso größer, je weiter sich die Korngrößen der zwei Stoffe voneinander unterscheiden in Abhängigkeit von der Zugabemenge.

Bei der Steigerung der Packungsdichte von Beton sind sogenannte ‚Schlüpfkörner‘ besonders günstig. Der Durchmesser der Schlüpfkörner muss dabei so bemessen sein, dass sie gerade durch die Kornzwischenräume der angrenzenden Partikel hindurchpassen. Sperrkörner hingegen verringern die Packungsdichte durch einen Auseinanderdrängungseffekt. Füllkörner füllen den Hohlraum gerade aus.

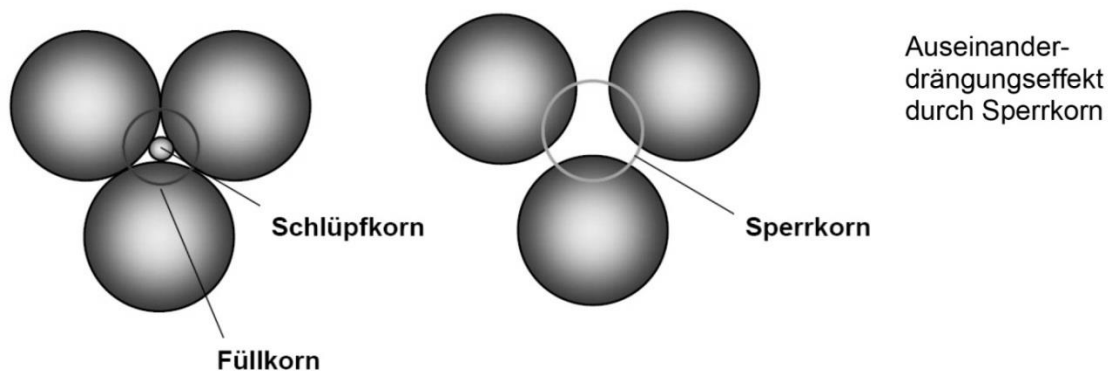


Bild 89: Füllkorn, Schlüpfkorn und Sperrkorn sowie Auseinanderdrängungseffekt am Beispiel der Kugelform [SCHIESSL, 2005 aus EDEN, 2010]

Eine höchstmögliche Packungsdichte entsteht, wenn zwischen den Hohlräumen (Zwickel) größerer Partikel gerade hineinpassende kleinere Partikel verwendet werden. Man kann sich theoretisch so dem Grenzwert der Packungsdichte von 1 nähern. Der Zusammenhang kann rechnerisch ohne Berücksichtigung einer Teilchenbehinderung nachfolgender Formel [SCHÜSSLER, MCEDLOV-PETROSIAN, 1990] berechnet werden:

$$\Phi_{\max(n)} = 1 - \left(\frac{\epsilon_0}{100} \right)^n = 1 - (1 - \Phi_0)^n$$

mit:

Φ_{\max} (n) Maximale Packungsdichte der Mischung aus n-Komponenten in [Vol.-%]

Φ_0 Packungsdichte der einzelnen Komponenten in [Vol.-%]

ϵ_0 Hohlraumgehalt der Komponenten in [Vol.-%]

n Anzahl der Komponenten

Der Einfluss der Anzahl der Komponenten auf die Packungsdichte kann folgender Abbildung entnommen werden. Die für die komplette Ausfüllung der jeweiligen Hohlräume lassen sich nach der zuvor erläuterten Gleichung schrittweise berechnen.

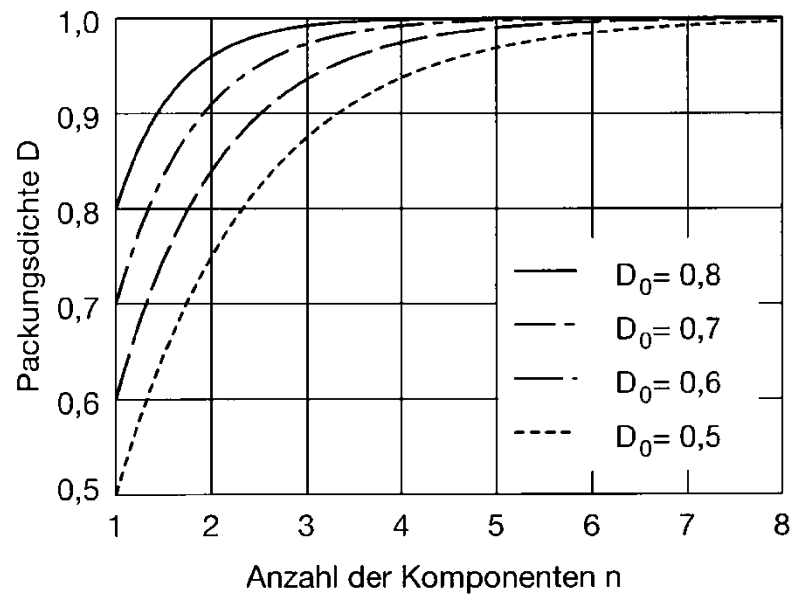


Bild 90: Einfluss der Anzahl der Partikelkomponenten n auf die Packungsdichte [RESCHKE, 2000]

RESCHKE und SIEBEL [1999] unterscheiden die folgenden Fälle:

- Fall 1: Der Feinkornanteil dominiert. Der Anteil feiner Partikel ist zu hoch, sodass die groben Partikel im Feinkorn ‚schwimmen‘ (sog. Auseinanderdrängungseffekt des Grobkorngerüsts).
- Fall 2: Der Grobkornanteil dominiert. Der zu geringe Feinkornanteil füllt nicht alle Hohlräume zwischen der groben Partikel aus.
- Fall 3: Maximale Packungsdichte. Der Anteil der feinen Partikel füllt gerade die Hohlräume der groben Partikel aus.

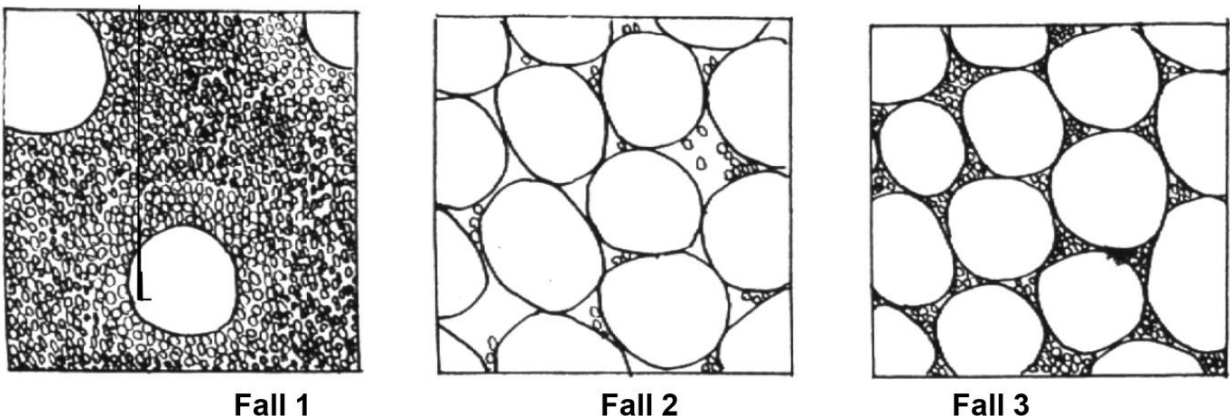


Bild 91: Einfluss des Volumenverhältnisses bei einer Binärpackung auf die Packungsdichte [RESCHKE, SIEBEL, 1999]

DE LARRAD und SEDRAN [1994] unterscheiden bei binären Packungen folgende Fälle der Wechselwirkung und hinterlegen diese mit rechnerischen Formeln:

Fall A: Keine Wechselwirkung: $d_1 \gg d_2$

Fall A1: Die Grobfraction dominiert. Die Position der Grobpartikel wird von den relativ wenigen Feinpartikeln nicht beeinflusst.

Fall A2: Die Feinfraction dominiert. Die Grobfraction schwimmt in der Feinfraction.

Fall B: Teilweise Wechselwirkung: $d_1 > d_2$

Fall B1: Die grobe Komponente dominiert. Die feine Komponente passt räumlich nicht in die Zwickel, das Korngefüge wird auseinander gedrängt.

Fall B2: Die feine Komponente dominiert. In unmittelbarer Wandnähe ist keine dichte Feinkornpackung möglich.

Fall C: Volle Wechselwirkung: $d_1 = d_2$

Bei identischen Partikeldurchmessern liegt bei binären Packungen eine vollständige Wechselwirkung vor, wenn die Packungsdichte der beiden Komponenten unterschiedlich ist.

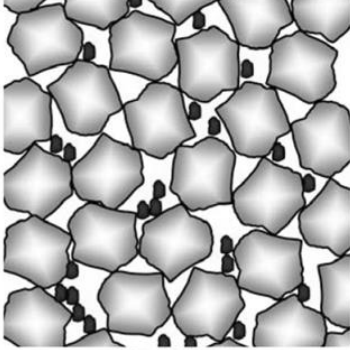
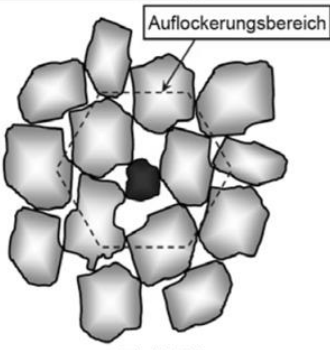
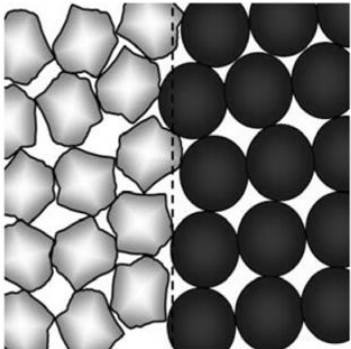
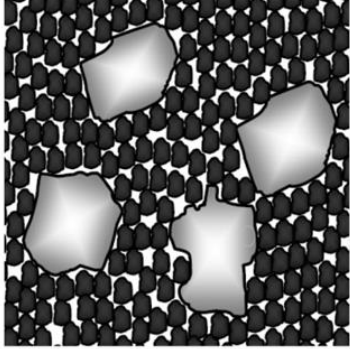
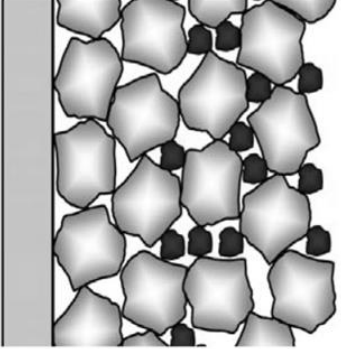
Fall A: Keine Wechselwirkung $d_1 \gg d_2$	Fall B: Teilweise Wechselwirkung $d_1 > d_2$	Fall C: Volle Wechselwirkung $d_1 = d_2$
 <p>Fall A1 Dominanz der Grobfraktion: Die Position der Grobpartikel wird nicht von den Feinpartikeln beeinflusst.</p> <p>Berechnung der Packungsdichte, (Gleichungen 2.11 und 2.12)</p> $\gamma = \frac{\sum_{i=1}^2 F_{v,i}}{V}$ $\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} = \frac{\beta_1}{y_1}$	 <p>Fall B1 Dominanz der Grobfraktion: Auflockerungseffekt um ein feines Korn</p> <p>Berechnung der Packungsdichte: (Gleichung 14)</p> $\gamma = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - a_{12} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)\right) y_2}$	 <p>Die Packungsdichten sind unterschiedlich.</p> <p>Berechnung der Packungsdichte: (Gleichung 2.16)</p> $\gamma = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)\right) y_2}$
 <p>Fall A2 Dominanz der Feinfraktion: Die Grobfraktion "schwimmt" in der Feinfraktion</p> <p>Berechnung der Packungsdichte: (Gleichung 2.13)</p> $\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2) y_1}$	 <p>Fall B2 Dominanz der Feinfraktion Wandeffekt: keine dichte Feinkornpackung in der Nähe der Wand möglich</p> <p>Berechnung der Packungsdichte: (Gleichung 2.15)</p> $\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21} \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1}\right)\right] y_1}$	

Bild 92: Wechselwirkungsfälle bei binären Packungen nach DE LARRAD und SEDRAN [1994], geändert aus EDEN [2010]

A32.2.2 Koordinationszahl

Nach POWELL [1980] ist die Koordinationszahl ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Partikelpackungen. Sie zeigt die mittlere Anzahl der Kontaktstellen von einem Partikel zu benachbarten Partikeln auf.

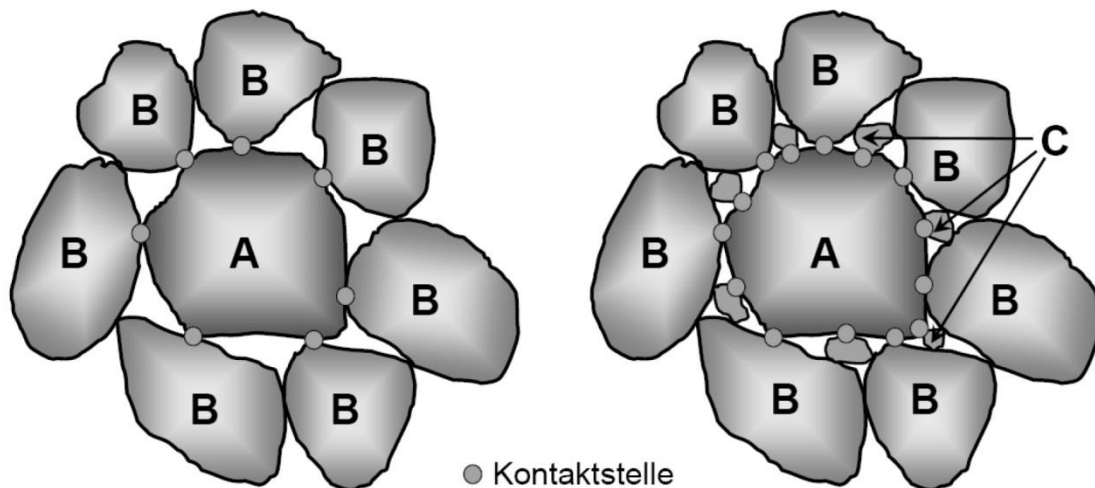


Bild 93: Kontaktstellen/Koordinationszahl aus [EDEN, 2010]

Die Anzahl der Kontaktstellen hat einen großen Einfluss auf die Festigkeit und die innere Reibung im Partikelsystem. Bei ungebundenen Baustoffgemischen erhöht sich die Kontaktzahl mit steigender Verdichtung.

Für Vegetationssubstrate kann ein Auseinandertreiben der Partikel die bodenphysikalischen Eigenschaften (z.B. Wasserkapazität und Wasserdurchlässigkeit) zu Lasten der Standfestigkeit verbessern.

A32.2.3 Kornform und Packungsdichte

Die Kornform hat einen deutlichen Einfluss auf die Packungsdichte von Partikelgemischen:

- Runde Partikel lassen sich einfacher verdichten als splittrige oder plattige Partikel
- Kugelige Packungen benötigen weniger Feinstoff für eine höhere Packungsdichte bei Beton [MACHT und NISCHER, 2006]

GEISENHANSLÜKE [2008] unterscheidet die Kornform von groben und feinen Gesteinskörnungen von der Kornform bei Feinststoffen.

MÜLLER und STARK [1996] ermitteln den folgenden Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Sphärizität (SPHT) und Fullerexponent an Natur- und Brechsanden:

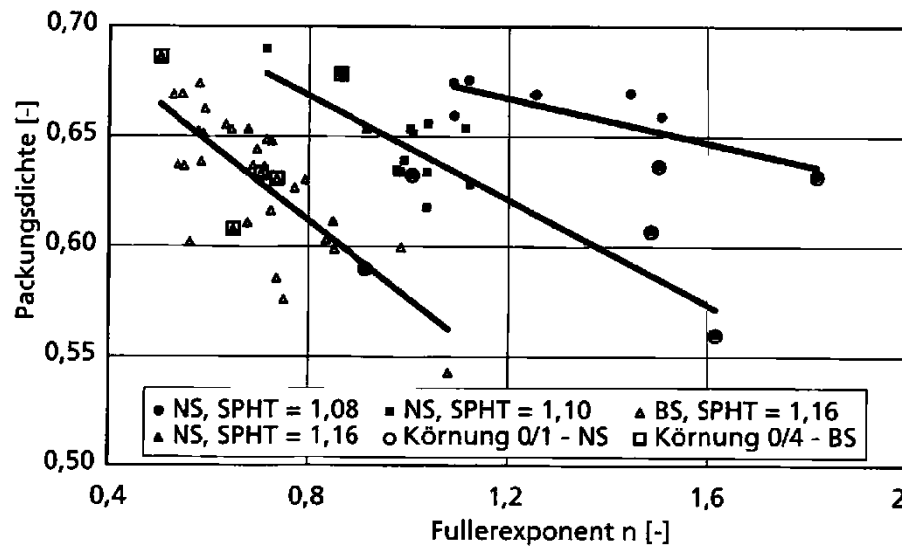


Bild 94: Packungsdichte, Fullerexponent n für untersuchten Natur- und Brechsande in Abhängigkeit vom Kornformparameter SPHT nach MÜLLER und STARK [1996]

Sie erläutern dabei, dass die Packungsdichte von der Breite der Korngrößenverteilung (Parameter = Fullerexponent n) und der Kornform abhängen. Dabei können sich die Einflüsse der Kornform und der Korngrößenverteilung überlagern.

Grundsätzlich abgeleitet werden kann:

- Natursande: Hohe Packungsdichten bei Natursanden können mit engen Korngrößenverteilungen (hoher n -Wert des Fullerexponenten) und gut gerundeten Kornformen (niedrige SPHT-Wert) erreicht werden.
- Brechsande: Bei Brechsanden mit kantigen Kornformen lassen sich gleich hohe Packungsdichten mit breiten Verteilungen (niedrige n -Werte, hohe SPHT-Werte) erzielen.

Damit kann die ungünstigere Kornform der Brechsande durch eine breitere Korngrößenverteilung kompensiert werden.

Insgesamt ist der Einfluss der Kornform auf die erreichbare Packungsdichte jedoch im Vergleich zu den Korngrößenverteilungen der Komponenten nach Mengenanteilen eher gering.

Anlage 33: Fotodokumentation Überbaubare Baumsubstrate**Inhalt**

- A33.1 Baumsubstrat 1 (BS 1) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.2 Baumsubstrat 2 (BS 2) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.3 Baumsubstrat 3 (BS 3) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.4 Baumsubstrat 4 (BS 4) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.5 Baumsubstrat 5 (BS 5) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.6 Baumsubstrat 6 (BS 6) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.7 Baumsubstrat 7 (BS 7) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.8 Baumsubstrat 8 (BS 8) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.9 Baumsubstrat 9 (BS 9) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.10 Baumsubstrat 10 (BS 10) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.11 Baumsubstrat 11 (BS 11) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.12 Baumsubstrat 12 (BS 12) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.13 Baumsubstrat 13 (BS 13) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.14 Baumsubstrat 14 (BS 14) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.15 Baumsubstrat 15 (BS 15) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.16 Baumsubstrat 16 (BS 16) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A33.17 Baumsubstrat 17 (BS 17) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm

- A33.1 Baumsubstrat 1 (BS 1) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 95: Baumsubstrat 1 (Lieferzustand)

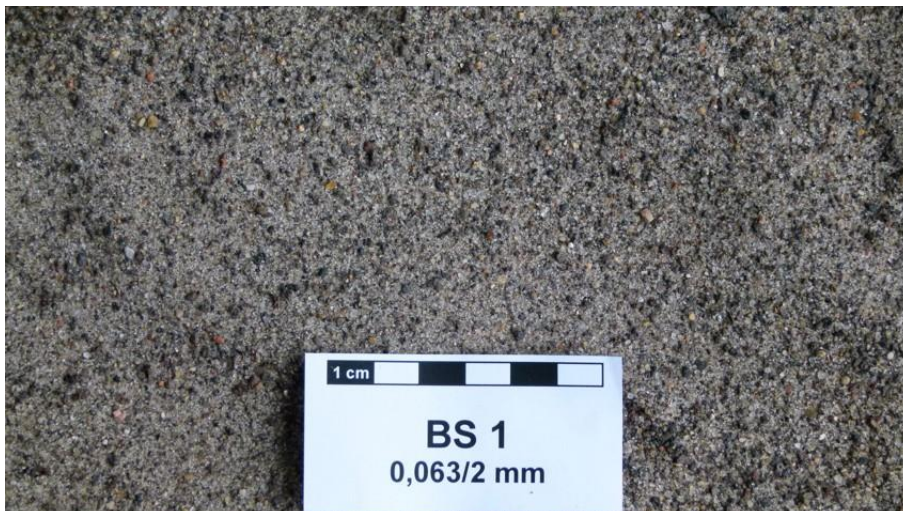


Bild 96: Baumsubstrat 1, 0,063/2 mm



Bild 97: Baumsubstrat 1, 2/X mm

A33.2 Baumsubstrat 2 (BS 2) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 98: Baumsubstrat 2 (Lieferzustand)



Bild 99: Baumsubstrat 2, 0,063/2 mm



Bild 100: Baumsubstrat 2, 2/X mm

A33.3 Baumsubstrat 3 (BS 3) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 101: Baumsubstrat 3 (Lieferzustand)



Bild 102: Baumsubstrat 3, 0,063/2 mm



Bild 103: Baumsubstrat 3, 2/X mm

A33.4 Baumsubstrat 4 (BS 4) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 104: Baumsubstrat 4 (Lieferzustand)



Bild 105: Baumsubstrat 4, 0,063/2 mm



Bild 106: Baumsubstrat 4, 2/X mm

A33.5 Baumsubstrat 5 (BS 5) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 107: Baumsubstrat 5 (Lieferzustand)



Bild 108: Baumsubstrat 5, 0,063/2 mm



Bild 109: Baumsubstrat 5, 2/X mm

A33.6 Baumsubstrat 6 (BS 6) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 110: Baumsubstrat 6 (Lieferzustand)



Bild 111: Baumsubstrat 6, 0,063/2 mm



Bild 112: Baumsubstrat 6, 2/X mm

A33.7 Baumsubstrat 7 (BS 7) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 113: Baumsubstrat 7 (Lieferzustand)



Bild 114: Baumsubstrat 7, 0,063/2 mm



Bild 115: Baumsubstrat 7, 2/X mm

A33.8 Baumsubstrat 8 (BS 8) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 116: Baumsubstrat 8 (Lieferzustand)



Bild 117: Baumsubstrat 8, 0,063/2 mm



Bild 118: Baumsubstrat 8, 2/X mm

A33.9 Baumsubstrat 9 (BS 9) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 119: Baumsubstrat 9 (Lieferzustand)



Bild 120: Baumsubstrat 9, 0,063/2 mm



Bild 121: Baumsubstrat 9, 2/X mm

A33.10 Baumsubstrat 10 (BS 10) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 122: Baumsubstrat 10 (Lieferzustand)



Bild 123: Baumsubstrat 10, 0,063/2 mm



Bild 124: Baumsubstrat 10, 2/X mm

A33.11 Baumsubstrat 11 (BS 11) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 125: Baumsubstrat 11 (Lieferzustand)

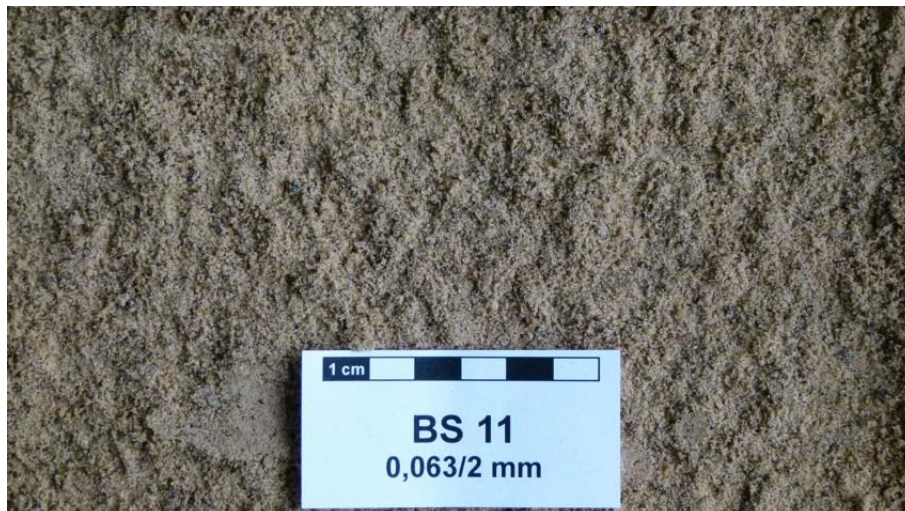


Bild 126: Baumsubstrat 11, 0,063/2 mm



Bild 127: Baumsubstrat 11, 2/X mm

A33.12 Baumsubstrat 12 (BS 12) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 128: Baumsubstrat 12 (Lieferzustand)



Bild 129: Baumsubstrat 12, 0,063/2 mm



Bild 130: Baumsubstrat 12, 2/X mm

A33.13 Baumsubstrat 13 (BS 13) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 131: Baumsubstrat 13 (Lieferzustand)



Bild 132: Baumsubstrat 13, 0,063/2 mm



Bild 133: Baumsubstrat 13, 2/X mm

A33.14 Baumsubstrat 14 (BS 14) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen
als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 134: Baumsubstrat 14 (Lieferzustand)



Bild 135: Baumsubstrat 14, 0,063/2 mm

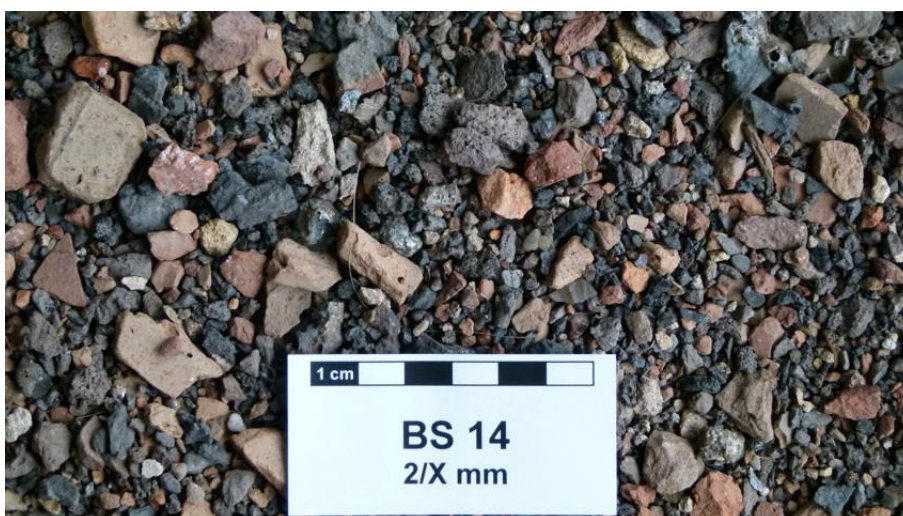


Bild 136: Baumsubstrat 14, 2/X mm

A33.15 Baumsubstrat 15 (BS 15) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 137: Baumsubstrat 15 (Lieferzustand)



Bild 138: Baumsubstrat 15, 0,063/2 mm



Bild 139: Baumsubstrat 15, 2/X mm

A33.16 Baumsubstrat 16 (BS 16) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 140: Baumsubstrat 16 (Lieferzustand)



Bild 141: Baumsubstrat 16, 0,063/2 mm

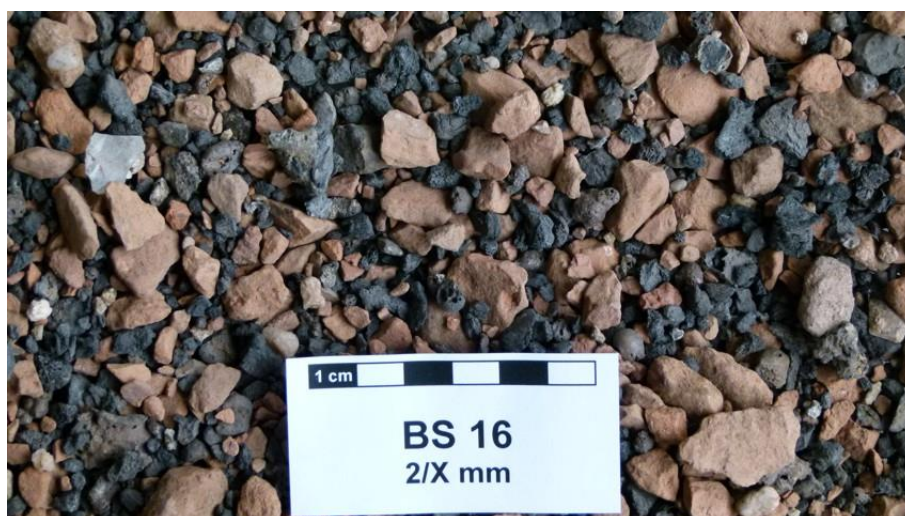


Bild 142: Baumsubstrat 16, 2/X mm

A33.17 Baumsubstrat 17 (BS 17) im Lieferzustand und nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 143: Baumsubstrat 17 (Lieferzustand)



Bild 144: Baumsubstrat 17, 0,063/2 mm



Bild 145: Baumsubstrat 17, 2/X mm

Anlage 34: Fotodokumentation Technikumsversuche Ziegel-Gesteinskörnungen**Inhalt**

- A34.1 Mauerziegel 1a DD (MZ 1a DD) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.2 Mauerziegel 1b DD (MZ 1b DD) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.3 Mauerziegel 2a L (MZ 2a L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.4 Mauerziegel 2b L (MZ 2b L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.5 Mauerziegel 3 WEI (MZ 3 WEI) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.6 Mauerziegel 4a RO (MZ 4a RO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.7 Mauerziegel 4b RO (MZ 4b RO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.8 Mauerziegel 5 KA (MZ 5 KA) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.9 Mauerziegel 5a FR (MZ 5a FR) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.10 Mauerziegel 6 SO (MZ 6 SO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.11 Mauerziegel 7 BO (MZ 7 BO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.12 Mauerziegel 8 DO (MZ 8 DO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.13 Mauerziegel 9 HU (MZ 9 HU) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.14 Dachziegel 2a L (DZ 2a L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.15 Dachziegel 2b L (DZ 2b L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm

-
- A34.16 Dachziegel 2c L (DZ 2c L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.17 Dachziegel 3 WEI (DZ 3 WEI) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.18 Dachziegel 5 KA (DZ 5 KA) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.19 Dachziegel 7 BO (DZ 7 BO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm
- A34.20 Dachziegel 9 HU (DZ 9 HU) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm

- A34.1 Mauerziegel 1a DD (MZ 1a DD) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 146: Mauerziegel 1a, Dresden



Bild 147: Mauerziegel 1a, Dresden, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 148: Mauerziegel 1a, Dresden, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 149: Mauerziegel 1a, Dresden, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 150: Mauerziegel 1a, Dresden, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.2 Mauerziegel 1b DD (MZ 1b DD) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 151: Mauerziegel 1b, Dresden



Bild 152: Mauerziegel 1b, Dresden, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 153: Mauerziegel 1b, Dresden, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 154: Mauerziegel 1b, Dresden, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 155: Mauerziegel 1b, Dresden, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.3 Mauerziegel 2a L (MZ 2a L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 156: Mauerziegel 2a, Leipzig



Bild 157: Mauerziegel 2a, Leipzig, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 158: Mauerziegel 2a, Leipzig, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 159: Mauerziegel 2a, Leipzig, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 160: Mauerziegel 2a, Leipzig, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.4 Mauerziegel 2b L (MZ 2b L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 161: Mauerziegel 2b, Leipzig



Bild 162: Mauerziegel 2b, Leipzig, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 163: Mauerziegel 2b, Leipzig, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 164: Mauerziegel 2b, Leipzig, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 165: Mauerziegel 2b, Leipzig, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.5 Mauerziegel 3 WEI (MZ 3 WEI) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 166: Mauerziegel 3, Weimar



Bild 167: Mauerziegel 3, Weimar, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 168: Mauerziegel 3, Weimar, Prallbrecher, 2/X mm

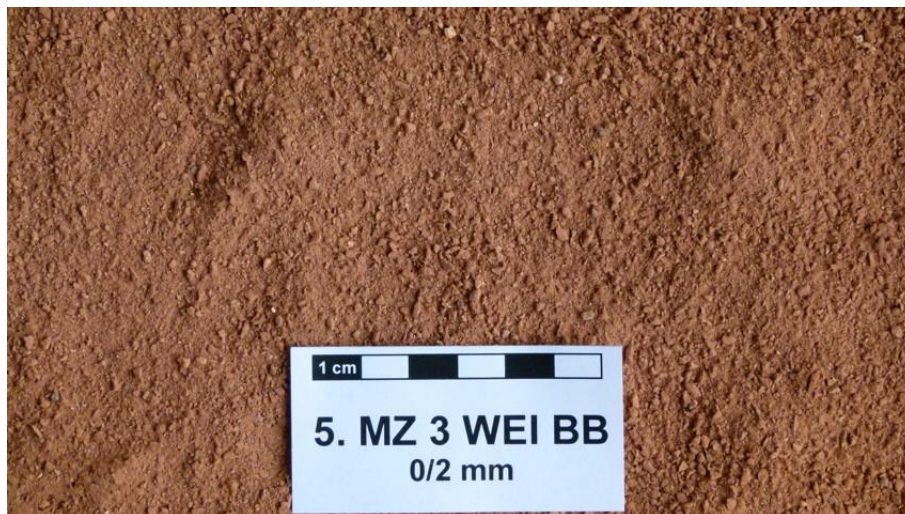


Bild 169: Mauerziegel 3, Weimar, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 170: Mauerziegel 3, Weimar, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.6 Mauerziegel 4a RO (MZ 4a RO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 171: Mauerziegel 4a, Rostock



Bild 172: Mauerziegel 4a, Rostock, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 173: Mauerziegel 4a, Rostock, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 174: Mauerziegel 4a, Rostock, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 175: Mauerziegel 4a, Rostock, Backenbrecher, 2/X mm

A34.7 Mauerziegel 4b RO (MZ 4b RO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 176: Mauerziegel 4b, Rostock



Bild 177: Mauerziegel 4b, Rostock, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 178: Mauerziegel 4b, Rostock, Prallbrecher, 2/X mm

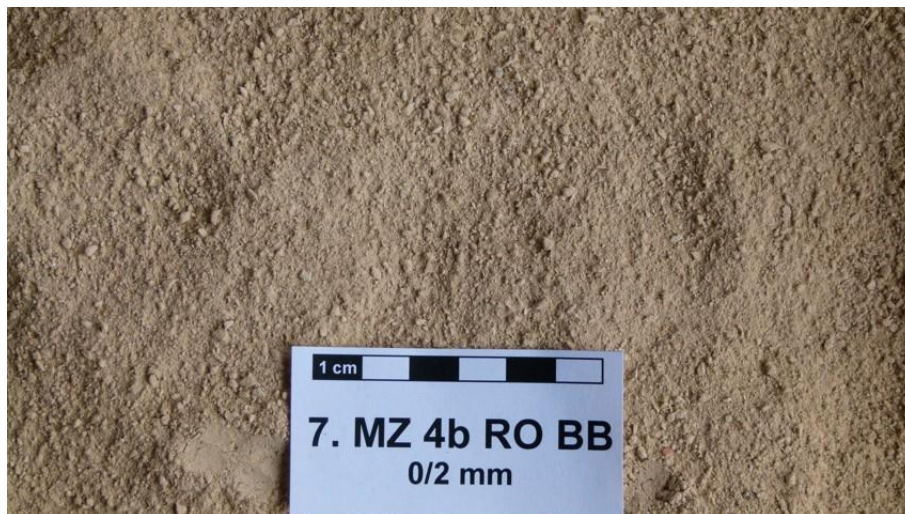


Bild 179: Mauerziegel 4b, Rostock, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 180: Mauerziegel 4b, Rostock, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.8 Mauerziegel 5 KA (MZ 5 KA) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 181: Mauerziegel 5, Kassel



Bild 182: Mauerziegel 5, Kassel, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 183: Mauerziegel 5, Kassel, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 184: Mauerziegel 5, Kassel, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 185: Mauerziegel 5, Kassel, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.9 Mauerziegel 5a FR (MZ 5a FR) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm

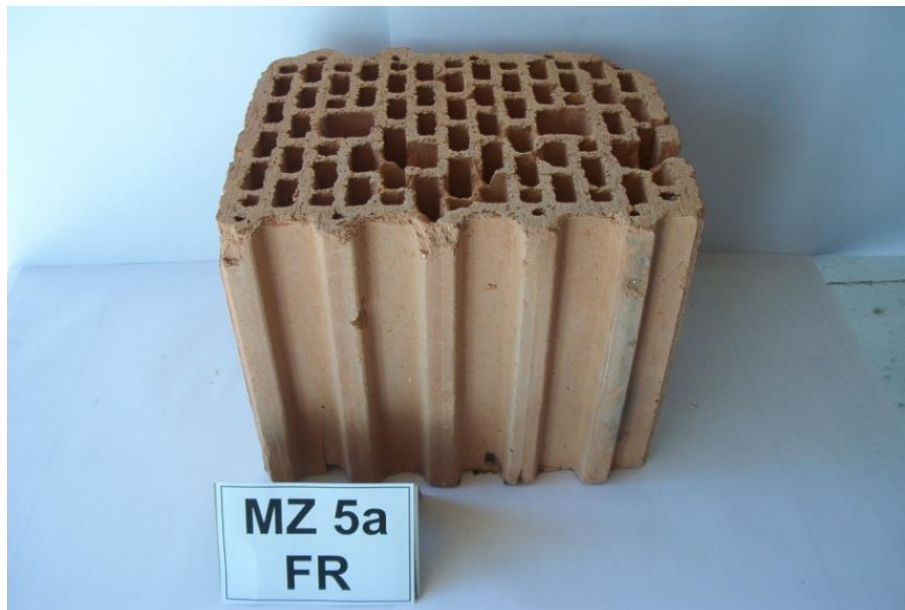


Bild 186: Mauerziegel 5a, Friedland



Bild 187: Mauerziegel 5a, Friedland, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 188: Mauerziegel 5a, Friedland, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 189: Mauerziegel 5a, Friedland, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 190: Mauerziegel 5a, Friedland, Backenbrecher, 2/X mm

A34.10 Mauerziegel 6 SO (MZ 6 SO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 191: Mauerziegel 6, Soest



Bild 192: Mauerziegel 6, Soest, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 193: Mauerziegel 6, Soest, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 194: Mauerziegel 6, Soest, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 195: Mauerziegel 6, Soest, Backenbrecher, 2/X mm

A34.11 Mauerziegel 7 BO (MZ 7 BO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 196: Mauerziegel 7, Bochum



Bild 197: Mauerziegel 7, Bochum, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 198: Mauerziegel 7, Bochum, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 199: Mauerziegel 7, Bochum, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 200: Mauerziegel 7, Bochum, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.12 Mauerziegel 8 DO (MZ 8 DO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 201: Mauerziegel 8, Dortmund



Bild 202: Mauerziegel 8, Dortmund, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 203: Mauerziegel 8, Dortmund, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 204: Mauerziegel 8, Dortmund, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 205: Mauerziegel 8, Dortmund, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.13 Mauerziegel 9 HU (MZ 9 HU) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 206: Mauerziegel 9, Hanau



Bild 207: Mauerziegel 9, Hanau, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 208: Mauerziegel 9, Hanau, Prallbrecher, 2/X mm

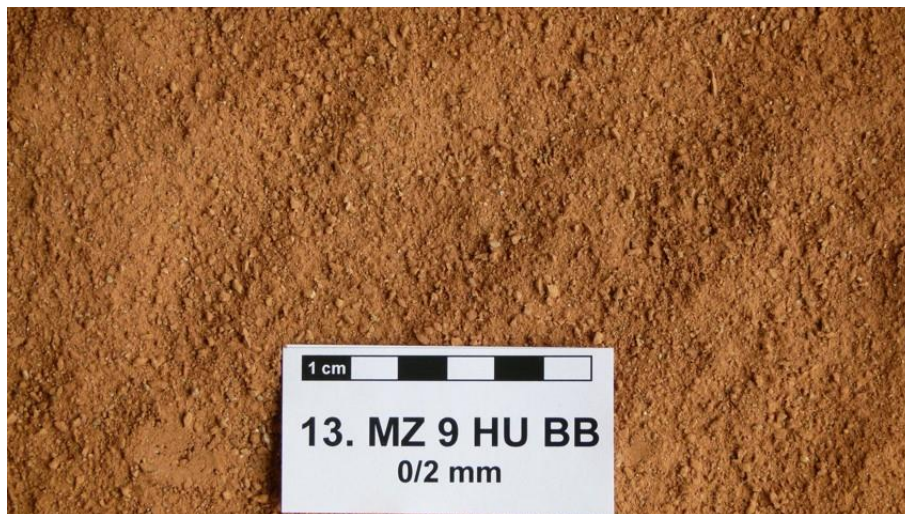


Bild 209: Mauerziegel 9, Hanau, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 210: Mauerziegel 9, Hanau, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.14 Dachziegel 2a L (DZ 2a L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 211: Dachziegel 2a, Leipzig



Bild 212: Dachziegel 2a, Leipzig, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 213: Dachziegel 2a, Leipzig, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 214: Dachziegel 2a, Leipzig, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 215: Dachziegel 2a, Leipzig, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.15 Dachziegel 2b L (DZ 2b L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 216: Dachziegel 2b, Leipzig



Bild 217: Dachziegel 2b, Leipzig, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 218: Dachziegel 2b, Leipzig, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 219: Dachziegel 2b, Leipzig, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 220: Dachziegel 2b, Leipzig, Backenbrecher, 2/X mm

A34.16 Dachziegel 2c L (DZ 2c L) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 221: Dachziegel 2c, Leipzig

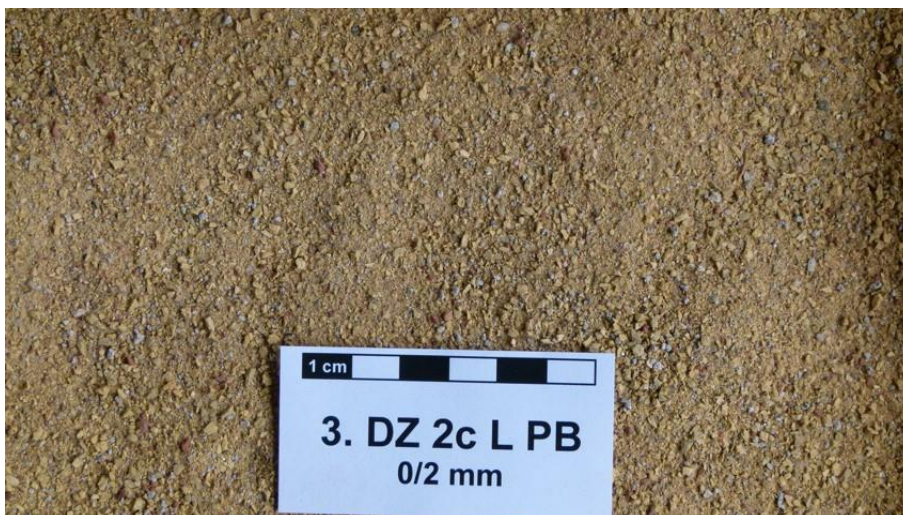


Bild 222: Dachziegel 2c, Leipzig, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 223: Dachziegel 2c, Leipzig, Prallbrecher, 2/X mm

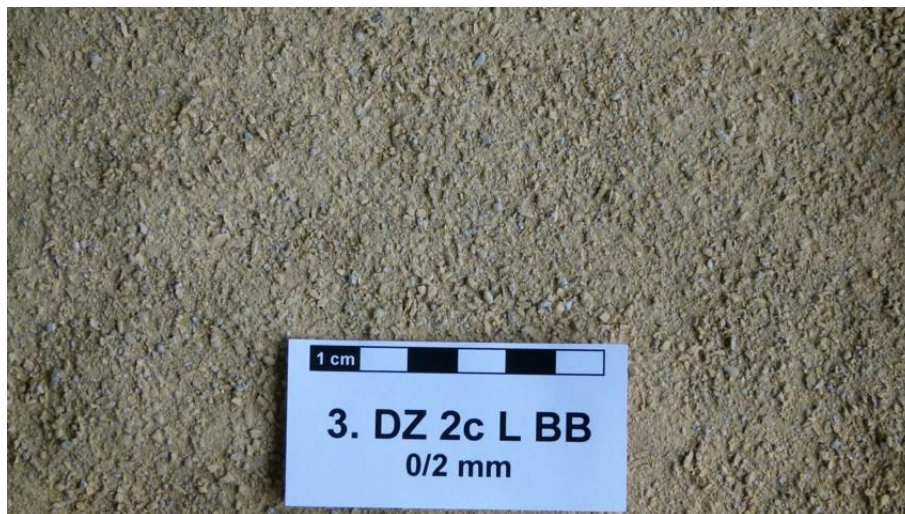


Bild 224: Dachziegel 2c, Leipzig, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 225: Dachziegel 2c, Leipzig, Backenbrecher, 2/X mm

A34.17 Dachziegel 3 WEI (DZ 3 WEI) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 226: Dachziegel 3, Weimar



Bild 227: Dachziegel 3, Weimar, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 228: Dachziegel 3, Weimar, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 229: Dachziegel 3, Weimar, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 230: Dachziegel 3, Weimar, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.18 Dachziegel 5 KA (DZ 5 KA) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 231: Dachziegel 5, Kassel



Bild 232: Dachziegel 5, Kassel, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 233: Dachziegel 5, Kassel, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 234: Dachziegel 5, Kassel, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 235: Dachziegel 5, Kassel, Backenbrecher, 2/X mm

- A34.19 Dachziegel 7 BO (DZ 7 BO) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 236: Dachziegel 7, Bochum



Bild 237: Dachziegel 7, Bochum, Prallbrecher, 0/2 mm



Bild 238: Dachziegel 7, Bochum, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 239: Dachziegel 7, Bochum, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 240: Dachziegel 7, Bochum, Backenbrecher, 2/X mm

A34.20 Dachziegel 9 HU (DZ 9 HU) vor der Zerkleinerung mit dem Prall- oder Backenbrecher nach dem Auswaschen als 0,063/2 mm und 2/X mm



Bild 241: Dachziegel 9, Hanau



Bild 242: Dachziegel 9, Hanau, Prallbrecher, 0/2 mm

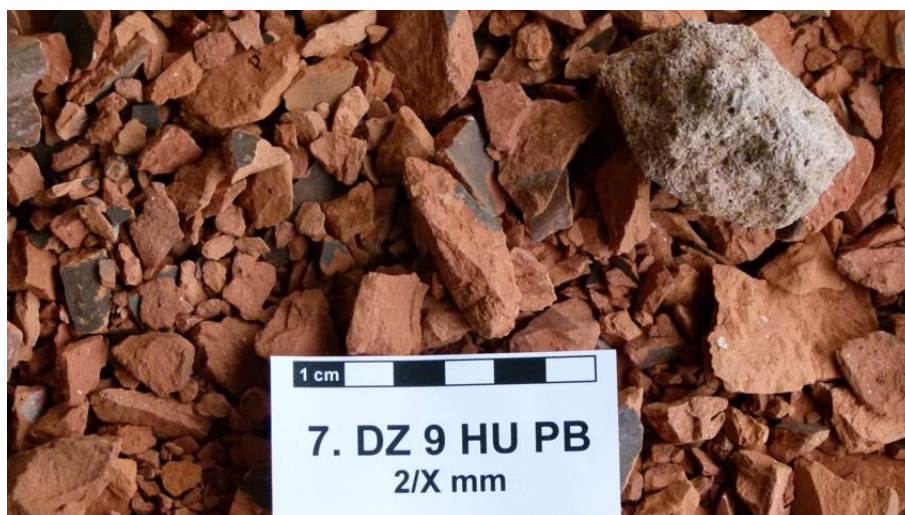


Bild 243: Dachziegel 9, Hanau, Prallbrecher, 2/X mm



Bild 244: Dachziegel 9, Hanau, Backenbrecher, 0/2 mm



Bild 245: Dachziegel 9, Hanau, Backenbrecher, 2/X mm

Anlage 35: Bilddokumentation Straßenbäume und Baumpflanzungen**Inhalt****A35.1 Bäume und Grünflächen prägen das Stadtbild für Mensch und Tier**

Bild 234: Ein Knotenpunkt in Dresden aus der Vogelperspektive im Jahr 2023

Bild 235: Promenade in Karlsbad (Tschechien) im September 2023

Bild 236: Altbäume in der Fußgängerpassage von Weimar 2023

Bild 237: Ein junger Straßenbaum in Bernburg im Mai 2023

A35.2 Straßenbauarbeiten an einer Verkehrsfläche mit Straßenbäumen im Bestand

Bild 238: Straßenbauarbeiten im Bereich von Altbäumen

A35.3 Oberirdisches Wurzelwachstum

Bild 239: Oberirdisches Wurzelwachstum eines Stadtbaumes

**A35.4 Schäden an Verkehrsflächen durch Wurzelwachstum
im Verkehrsflächenoberbau**

Bild 340: Wurzelwachstum innerhalb des Oberbaus eines Radweges mit Rissbildung

Bild 241: 'Sprungschanzenbildung', Radweg in Asphaltbauweise

Bild 242: Befahrene und verformte Baumscheibe eines Jungbaumes

Bild 243: Aufklaffende Randeinfassung eines Baumes in einer Verkehrsfläche

**A35.5 Zehnjährige Erprobung von porösen Ziegel-Baumsubstraten in verschiedenen
Pflanzgrubenbauweisen in Dresden**

Bild 244: Dresden, Erprobung Dohnaer. Str. – Anlage des Belüftungsgrabens im Jahr 2002

Bild 245: Dresden, Erprobung Dohnaer. Str. – Nachweis der Durchwurzelung einer Tiefenbelüftungsbohrung im Jahr 2011

Bild 246: Straßenbäume Dohnaer Str. im Jahr 2017 nach 15 Jahren Erprobung

Bild 247: Straßenbäume Dohnaer Str. im Jahr 2017 nach 15 Jahren Erprobung

A35.6 Straßenbaumpflanzung Dresden Altmarkt im Jahr 2022

- Bild 248: Vorerkundung ‚Bodenverhältnisse‘ Altmarkt Dresden
- Bild 249: Bodenaushub mit Trümmerschutt
- Bild 250: Sandig-lehmiger Bodenaushub
- Bild 251: Schonendes Freilegen einer Baumgrube mit dem ‚Saugbagger‘
- Bild 252: Verfüllte und verdichtete Baumgrube
- Bild 253: Entferntes Baumsustrat aus der Pflanzgrube der Pflanzlöcher
- Bild 254: Einmischen von Bodenhilfsstoffen in das Pflanzsubstrat zum Verfüllen der Pflanzlöcher
- Bild 255: Einbringen eines Bodenhilfsstoff auf der Pflanzlochsohle
- Bild 256: Angelieferte Großbäume
- Bild 257: Mit dem Hebegerät in das Pflanzloch gesetzter Baum
- Bild 258: Baumballen im Pflanzloch in der Nähe der Belüfter und der Baumpfähle
- Bild 259: Fertig gepflanzter Baum
- Bild 260: Gepflanzte Bäume in der Nähe der Altmarktgalerie
- Bild 261: Baumblüte im Juni 2023
- Bild 262: Gepflanzter Baum in der Anwuchsphase

A35.1 Bäume und Grünflächen prägen das Stadtbild für Mensch und Tier

Bild 246: Ein Knotenpunkt in Dresden aus der Vogelperspektive im Jahr 2023



Bild 247: Promenade in Karlsbad (Tschechien) im September 2023



Bild 248: Altbäume in der Fußgängerpassage von Weimar 2023



Bild 249: Ein junger Straßenbaum in Bernburg im Mai 2023

A35.2 Straßenbauarbeiten an einer Verkehrsfläche mit Straßenbäumen im Bestand**Bild 250:** Straßenbauarbeiten im Bereich von Altbäumen

A35.3 Oberirdisches Wurzelwachstum

Bild 251: Oberirdisches Wurzelwachstum eines Stadtbaumes

A35.4 Schäden an Verkehrsflächen durch Wurzelwachstum im Verkehrsflächenoberbau



Bild 252: Wurzelwachstum innerhalb des Oberbaus eines Radweges mit Rissbildung



Bild 253: ‚Sprungschanzenbildung‘, Radweg in Asphaltbauweise



Bild 254: Befahrene und verformte Baumscheibe eines Jungbaumes



Bild 255: Aufklaffende Randeinfassung eines Baumes in einer Verkehrsfläche

A35.5 Zehnjährige Erprobung von porösen Ziegel-Baumsubstraten in verschiedenen Pflanzgrubenbauweisen in Dresden



Bild 256: Dresden, Erprobung Dohnaer. Str. – Anlage des Belüftungsgrabens, 2002



Bild 257: Dresden, Erprobung Dohnaer. Str. – Nachweis der Durchwurzelung einer Tiefenbelüftungsbohrung im Jahr 2011



Bild 258: Straßenbäume Dohnaer Str. im Jahr 2017 nach 15 Jahren Erprobung



Bild 259: Straßenbäume Dohnaer Str. im Jahr 2017 nach 15 Jahren Erprobung

A35.6 Straßenbaumpflanzung Dresden Altmarkt im Jahr 2022



Bild 260: Vorerkundung „Bodenverhältnisse“ Altmarkt Dresden



Bild 261: Bodenaushub mit Trümmerschutt



Bild 262: Sandig-lehmiger Bodenaushub



Bild 263: Schonendes Freilegen einer Baumgrube mit dem 'Saugbagger'



Bild 264: Verfüllte und verdichtete Baumgrube



Bild 265: Entferntes Baums substrat aus der Pflanzgrube der Pflanzlöcher



Bild 266: Einmischen von Bodenhilfsstoffen in das Pflanzsubstrat zum Verfüllen der Pflanzlöcher



Bild 267: Einbringen eines Bodenhilfsstoffs auf der Pflanzlochsohle



Bild 268: Angelieferte Großbäume



Bild 269: Mit dem Hebegerät in das Pflanzloch gesetzter Baum



Bild 270: Baumballen im Pflanzloch in der Nähe der Belüfter und der Baumpfähle



Bild 271: Fertig gepflanzter Baum



Bild 272: Gepflanzte Bäume in der Nähe der Altmarktgalerie im September 2022

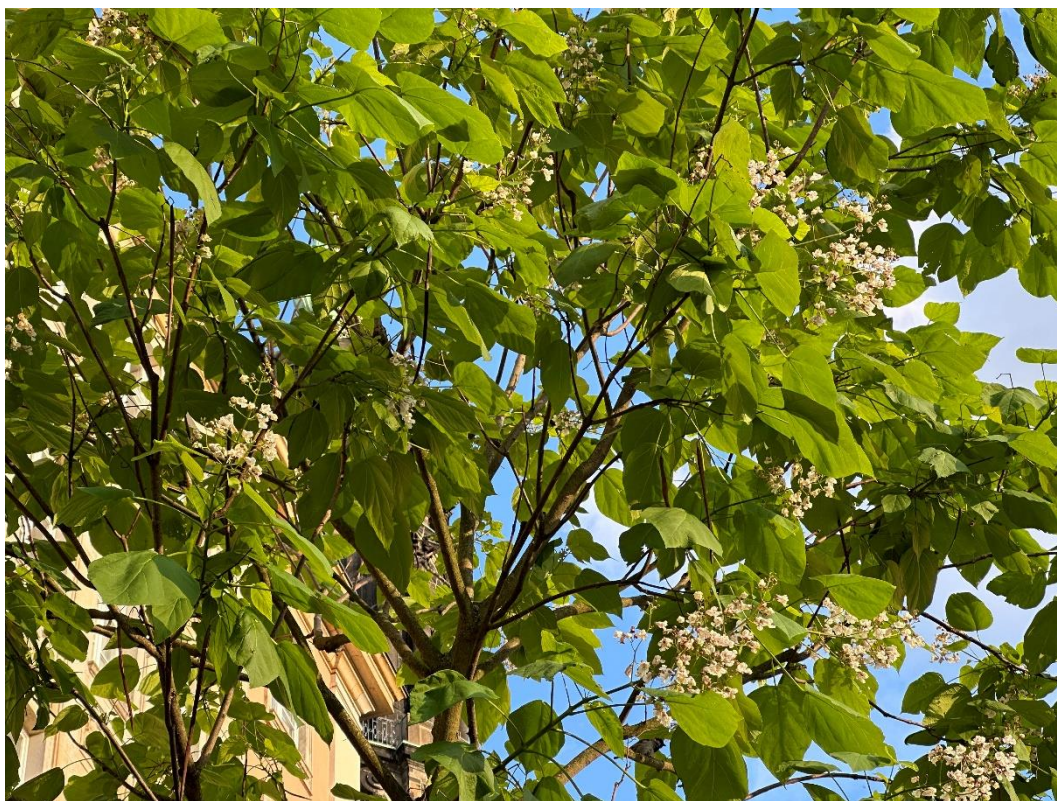


Bild 273: Baumblüte im Juni 2023



Bild 274: Gepflanzter Baum im Juni 2023

Erklärung des Verfassers

Die vorliegende Arbeit wurde von mir selbstständig verfasst. Alle über die selbstständige Arbeit hinausgehenden Hilfsmittel sowie wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet und die zugrundeliegenden Quellen angegeben.

Es gibt keine früheren Promotionsanträge des Verfassers an in- oder ausländischen Hochschulen.

Soest, 21.06 2024

Harald Kurkowski

Der Lebenslauf ist in der elektronischen Fassung der Dissertation aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Der Lebenslauf ist in der elektronischen Fassung der Dissertation aus Datenschutzgründen nicht enthalten.