

**Untersuchungen zur Ermittlung
der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts
von Kultursubstraten**

Am Fachbereich Gartenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung
des akademischen Grades eines

Doktors der Gartenbauwissenschaften

- Dr. rer. hort. -

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.- Ing. agr. Andreas Wrede

geboren am 07.03.1963 in Iserlohn

2001

Referentin: Prof. Dr. Heike Bohne

Koreferent: Prof. Dr. M. Schenk

Tag der Promotion: 18.06.2001

Anke
(Danke für alles)

und

meinem Vater
(† 19.10.1994)

gewidmet

Überprüfung und Neuentwicklung von Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten

Die physikalischen Substrateigenschaften werden neben der Größe und Form des Topfs bzw. Containers besonders durch das Volumengewicht beeinflusst und können im Kulturverlauf nicht mehr gezielt verändert werden (u.a. BRÜCKNER 1994; CARON und NKONGOLO 1999; FONTENO 1993). Die Kennwerte Luftkapazität (AC), Containerkapazität (CC) und verfügbares Wasser (AW) sind für den Gartenbau von steigender Bedeutung. Sie werden z.B. zur substratangepassten Steuerung einer Bewässerung (WREDE und BOHNE 2000a) oder auch zur Substratauswahl für gegenüber Luftmangel empfindliche Kulturen herangezogen.

Im Rahmen der RAL Gütesicherung von Kultursubstraten ist daher auch eine Deklaration der Kennwerte Luftkapazität (AC) und Wasserkapazität (WC) vorgesehen. Beide Kennwerte könnten mit der in dieser Arbeit beschriebenen Q-Methode (= quick = schnell) ermittelt werden, die sich an eine von SCHLICHTING und BLUME (1966) beschriebene Schnellmethode anlehnt. Im Gegensatz zur ISHS-Methode (DIN EN 13041) ist die Q-Methode schneller (sie dauert nur 48 h) und bietet den Vorteil, dass sie ein gezielt eingestelltes Volumengewicht bei der Messung berücksichtigen kann. Mit der Q-Methode kann allerdings keine komplette Wasserspannungskurve ermittelt werden, was mit der ISHS-Methode wiederum möglich ist. Die von BOHNE und WREDE (2000b) beschriebene M-ISHS-Methode (= modifizierte ISHS-Methode), die in dieser Arbeit nochmals kurz beschrieben wird, bietet den Vorteil, dass sie ein bestimmtes Volumengewicht bei der Ermittlung der kompletten Wasserspannungskurve berücksichtigen kann.

ISHS-Methode, M-ISHS-Methode und Q-Methode sind Labormethoden, die sich daher nicht zur schnellen Überwachung der Substratproduktion im Werk eignen. Aus diesem Grund wurde der Versuch unternommen, durch eine Siebung von Substraten Fraktionen zu erhalten, die über eine enge Korrelation zur Luftkapazität verfügen. Auf diese Weise sollten schnelle Rückschlüsse auf die Luftkapazität (AC) als der wichtigsten physikalischen Kenngröße der jeweils produzierten Substrate ermöglicht werden.

Kernfragen dieser Arbeit waren daher:

- Kann die Q-Methode als Alternative zur zeitaufwendigen ISHS-Methode (DIN EN 13041) bei der Ermittlung der Luft- und Wasserkapazität eingesetzt werden?
- Welche von vier überprüften Varianten des Volumengewichts (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) muss zum Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellt werden, damit Luft- und Wasserkapazität über die engste Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode (DIN EN 13041) verfügt?
- Mit welcher der vier Varianten des Volumengewichts wird ein möglichst minimaler Wert für die Luftkapazität (AC) mit der Q-Methode gemessen? Ein möglichst minimaler AC-Wert sollte deswegen gesucht werden, da dieser beim Gärtner nicht unterschritten wird und eine Produktdeklaration mit diesem Minimalwert dem Substratproduzenten Sicherheit vor Reklamationen durch die Gärtner gibt.
- Welche Unterschiede können bezüglich der jeweils gemessenen physikalischen Eigenschaften festgestellt werden, wenn sie zum einen mit der M-ISHS-Methode und zum anderen mit der ISHS-Methode gemessen werden?
- Ermöglicht die Fraktionierung von Kultursubstraten mittels Siebung Rückschlüsse auf deren Luftkapazität (AC)?

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind:

- Die Q-Methode kann als Alternative zur ISHS-Methode bei der Ermittlung von Wasser- und Luftkapazität eingesetzt werden.
- Die Q-Methode liefert mit der Variante VDLUFA physikalische Kennwerte, die über die engste Korrelation zu den Kennwerten der ISHS-Methode verfügen. Die Korrelationen der Varianten VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest waren nicht so eng.
- Die meisten Minimalwerte für die Luftkapazität werden mit der Q-Methode in dem Fall gemessen, in dem im Probenzylinder die Volumengewichtsvariante Topffest eingestellt wird.
- Die M-ISHS-Methode liefert physikalische Kennwerte, die sich von den entsprechenden Kennwerten, die mit der ISHS-Methode gemessen wurden, unterscheiden, besonders im Fall der Luftkapazität (AC).

- Mit der Fraktionierung von Kultursubstraten durch Siebung konnten keine Daten ermittelt werden, die einen Rückschluss auf die Luftkapazität ermöglichen.

Examination and development of methods to determine the air- and water characteristics of substrates

Physical properties of growing media are dependent on the size and form of the pot or container and particularly on the volume weight, factors which cannot be changed during cultivation (e.g. BRÜCKNER 1994; CARON und NKONGOLO 1999; FONTENO 1993). The properties air capacity (AC), container capacity (CC) and available water (AW) are of increasing importance for horticulture. They may be used for a substrate specific adaptation of irrigation or for the choice of substrate for plants sensitive to poor aeration.

Within the framework of RAL quality control of growing media a declaration of physical properties like air and water capacity is intended. These factors can be determined with the Q-method (= quick) described in this paper, which is a modification of a method from SCHLICHTING and BLUME (1966). In contrast to the ISHS-method (DIN EN 13041) the Q-method is faster (it takes only 48 h) and offers the advantage that you can consider a certain volume weight during the determination of physical properties. No complete water release curve can be determined with the Q-method. This is possible however, with the ISHS-method and with the M-ISHS-method (= modified-ISHS-method) described by WREDE und BOHNE (2000b). The M-ISHS-method is concisely described in this paper and it offers the possibility of making measurements of a complete water release curve at particular volume weights.

ISHS-method, M-ISHS-method and Q-method are laboratory methods, which are not suitable for the quick monitoring of substrate production at factory. For this reason an attempt was made to screen different sieve fractions having a good correlation to AC, which is the most important physical characteristic of a growing medium.

Therefore, central issues of this paper are:

- Is the Q-method suitable as an alternative to the time consuming ISHS-method for the examination of air and water capacity?
- Which variant of four different volume weights (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) show the best correlation to the air- and water

capacity as determined with the Q-method in comparison to the ISHS-method?

- Which variant of the different volume weights using the Q-method gives the lowest value for air capacity? This minimal value may not go lower with the growert. Therefore a declaration of growing media with the lowest value of air capacity is advantageous for the substrate industrie, because complaints on growing medium quality are less likely.
- What kind of implications has the consideration of volume weight during the determination air- and water capacity with the M-ISHS-method?
- If there is a possibility to predict air capacity by the investigation of particle size distribution by the way of screen analysis?

The following results were obtained:

- The Q-method is suitable as an alternative to the ISHS-method to examine air- and water capacity.
- The volume weight variant VDLUFA of the Q-method possesses physical properties with the strongest relation to the corresponding properties examined with the ISHS-method.
- The lowest values of air capacity are measured in that case, if the Q-method works with the volume weight variant Topffest.
- The M-ISHS-method possesses physical properties, which are different to the corresponding properties ascertained with the ISHS-method, particularly for air capacity (AC).
- There is no possibility of predicting air capacity by the way of screen analysis.

Schlagwörter

Kultursubstrate

Luftkapazität

Wasserkapazität

Neue Messmethoden

key words

growing media

air capacity

water capacity

new measuring methods

Gliederung

Abstract

Schlagwörter / key words

1 Einleitung	1
1.1 Zentrale Fragestellungen.....	6
2 Material und Methoden	8
2.1 Untersuchte Substrate.....	8
2.1.1 Standardsubstrate.....	8
2.1.2 Selbsterstellte Mischsubstrate.....	14
2.2 Methoden zur Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts...	17
2.2.1 Die ISHS-Methode.....	18
2.2.1.1 Aufbau der Unterdruckanlage.....	18
2.2.1.2 Arbeitsschritte der ISHS-Methode.....	18
2.2.1.3 Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (dF).....	23
2.2.1.4 Berechnung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts.....	24
2.2.2 Schnellmethode nach SCHLICHTING (= Q-Methode).....	28
2.2.2.1 Aufbau der Unterdruckanlage und der Probenzylinder.....	29
2.2.2.2 Bestimmung des Volumengewichts der Substratprobe.....	32
2.2.2.3 Arbeitsschritte der Q-Methode.....	37
2.2.2.4 Berechnung der Luft- und Wasserkapazität.....	40
2.2.3 Die M-ISHS-Methode.....	44
2.2.3.1 Gemeinsamkeiten von ISHS-Methode und M-ISHS-Methode.....	44
2.2.3.2 Unterschiede zwischen ISHS-Methode und M-ISHS-Methode.....	45
2.2.4 Siebmethode.....	47
2.2.4.1 Vorbehandlungen der Substratproben.....	48
2.2.4.2 Siebsätze.....	48
2.2.4.3 Arbeitsschritte der Siebmethode.....	49
2.5 Mathematische und statistische Auswertung.....	50
3 Ergebnisse	52
3.1 Dichte der Festsubstanz (dF).....	52
3.2 Ergebnisse der ISHS-Methode.....	54

3.2.1 Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts.....	55
3.2.1.1 Containerkapazität (CC).....	55
3.2.1.2 Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (PV).....	58
3.2.1.3 Verfügbares Wasser (AW) und weitere Kennwerte.....	63
3.3 Ergebnisse der Schnellmethode nach SCHLICHTING (= Q-Methode).....	78
3.3.1 Varianten des Volumengewichts (dB_A) der Substratproben.....	78
3.3.2 Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E).....	93
3.3.3 Wasserkapazität (WC).....	114
3.3.4 Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (AC).....	133
3.3.5 Zusammenstellung der Ergebnisse zur Q-Methode.....	152
3.4 Ergebnisse der M-ISHS-Methode.....	155
3.4.1 Ergebnisse der M-ISHS-Methode (Variante Topffest).....	155
3.4.2 Ergebnisse der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA).....	158
3.5 Ergebnisse der Siebmethode.....	163
4 Diskussion.....	170
4.1 Die ISHS-Methode als Referenzmethode.....	170
4.1.1 Möglichkeiten und Grenzen der ISHS-Methode.....	170
4.2 Die M-ISHS-Methode.....	174
4.2.1 Möglichkeiten und Grenzen.....	174
4.2.2 Das Volumengewicht zum Anfang (dB_A) und zum Ende der Messung (dB_E).....	176
4.2.3 Die Luftkapazität (AC).....	182
4.2.4 Das verfügbare Wasser (AW).....	190
4.3 Die Q-Methode.....	193
4.3.1 Möglichkeiten und Grenzen.....	193
4.3.2 Die Q-Methode als Instrument der Gütesicherung.....	195
4.3.2.1 Luftkapazität (AC).....	197
4.3.3 Schwachpunkte der Q-Methode.....	200
4.4 Andere Methoden zur Bestimmung physikalischer Kennwerte.....	202
4.5 Einfluss steigender Zuschlagstoffanteile auf die physikalischen Eigen- schaften.....	204
4.6 Siebung.....	208
5 Zusammenfassung.....	216

6 Literaturverzeichnis.....	222
7 Verzeichnisse.....	239
7.1 Verzeichnis der Tabellen.....	239
7.2 Verzeichnis der Abbildungen.....	245
7.3 Verzeichnis der Formeln.....	255
...7.4 Abkürzungsverzeichnis.....	257
8 Anhang.....	259

Lebenslauf / curriculum vitae

Danksagung

1 Einleitung

Im europäischen Erwerbs- und Hobbygartenbau werden jährlich (Stand: 2000) ca. 16.000.000 m³ Torf verbraucht. Aus dem größten Teil dieses Torfes werden Kultursubstrate und Blumenerden hergestellt. In Deutschland werden ca. 8.700.000 m³ Substrate produziert (5,6 Mio. m³ Kultursubstrate und 3,1 Mio. m³ Blumenerden), wovon ca. 5.600.000 m³ in den Export gehen. Dabei wird nicht nur in die EU-Länder exportiert, sondern auch bis nach Australien und Japan. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung rechnet in einem im September 1999 veröffentlichten Gutachten damit, dass die bodenunabhängige Pflanzenproduktion in den nächsten Jahren noch weiter zunehmen wird, so dass auch mit einem weiter steigenden Bedarf an Kultursubstraten zu rechnen ist (GÜNTHER 2000).

Neben Hochmoortorf in unterschiedlichen Zersetzungsgraden als Hauptkomponente (60 – 100 Vol. %), werden organische und mineralische Zuschlagstoffe in Anteilen von 5 – 25 Vol. % in den handelsüblichen Substraten eingesetzt (GÜNTHER 2000). Zu den organischen Substratzuschlagstoffen zählen nach Angaben von SCHMILEWSKI (1992) u.a.:

- Rindenhumus
- Holzfasern
- Reisspelzen
- Flachsschäben
- Kokosfasern
- Kokosmehl
- Kompost

Als mineralische Zuschlagstoffe werden u.a. folgende Stoffe verwendet:

- Tone (feucht, trocken und granuliert, gebrannt)
- Perlite
- Vermiculite
- Steinwolle
- Bims
- Lava
- Quarzsand
- Hygromull
- Styromull

Da in der modernen Jungpflanzenanzucht in den sogenannten Plugs pro m³ Kultursubstrat bis zu 360.000 Pflanzen kultiviert werden, ist eine gleichbleibend gute Substratqualität unbedingt notwendig. Wertbestimmende Eigenschaften sind u.a.:

- chemische (pH-Wert, Salzgehalt, Nährstoffgehalt, Pufferung, Gehalt an supressiven und pflanzenschädigenden Stoffen u.a.).
- biologische (mikrobielle Tätigkeit, Lagerfähigkeit, Besatz mit Krankheitserregern, Schädlingen und Unkrautsamen u.a.).
- wirtschaftliche (Verfügbarkeit, Preis, Qualitätsbeständigkeit u.a.).
- physikalische (Struktur, Strukturstabilität, Rohdichte (Volumengewicht), Porenvolumen, Wasser- und Luftkapazität, Wiederbenetzbarkeit u.a.)(TERKAMP 1995).

Die physikalischen Substrateigenschaften und ihre Bedeutung

Die physikalischen Eigenschaften der Kultursubstrate sind abhängig von der stofflichen Zusammensetzung der Substratbestandteile, also von ihrer Größe, Form und Dichte. Sie wirken sich unter anderem auf das Porenvolumen eines Substrats aus sowie auf seine Porengrößenverteilung und damit auch auf seinen Wasser- und Lufthaushalt. Für den Gartenbau sind besonders die Menge an Wasser und Luft, die vom Substrat gespeichert werden können, sowie seine Wiederbenetzbarkeit nach Austrocknung wichtige Kriterien für die physikalische Qualität von Substraten (BARTELS 1999; BRÜCKNER 1994; NKONGOLO und CARON 1999; PENNINGSFELD 1988). Solange der pH-Wert und der Salzgehalt eines Substrats in akzeptablen Bereichen liegen, beschränken die chemischen Substrateigenschaften selten das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen, da die notwendigen Pflanzennährstoffe entweder durch kontinuierliche (Flüssig-) oder diskontinuierliche Düngung (Kopfdüngung) zugeführt bzw. ergänzt werden können (ALLAIRE et al. 1996) bzw. durch Bevorratung des Substrats mit Depotdüngern schon im Substrat vorhanden sind.

Im Gegensatz zu den chemischen Substrateigenschaften können die physikalischen Substrateigenschaften im Verlauf einer Kultur jedoch nicht mehr gezielt verändert werden. Sie liegen schon mit der Wahl des Substrats zum größten Teil fest. Daher ist es für den Substratproduzenten und den Substratverwender wichtig, die physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Kultursubstrats zu kennen, zumal die zunehmende Automatisierung in der Verarbeitung und der Kulturführung höchste Anforderungen an die physikalische Qualität eines Substrats stellt (BRÜCKNER 1994; REHME 1995).

Den physikalischen Substrateigenschaften kommt aber auch aus einem weiteren Grund eine steigende Bedeutung zu. Für eine ressourcenschonende und die Umwelt nicht bzw. nur sehr gering belastende Kulturführung ist nicht nur eine an dem Bedarf der Pflanze orientierte Düngung erforderlich, sondern auch eine an den Speichereigenschaften des Kultursubstrats angepasste Bewässerungssteuerung. Nur auf diese Weise ist ein sparsamer Wassereinsatz bei gleichzeitiger Minimierung der Auswaschungsverluste möglich, was neben ökologischen auch ökonomische Vorteile birgt (BOHNE und GÜNTHER, 1997; BOHNE et al. 1998; GRUDA und SCHNITZLER 1999).

Methoden zur Ermittlung der physikalischen Substrateigenschaften

Zur Ermittlung der physikalischen Substrateigenschaften stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Neben der sehr aufwendigen europäischen Normmethode

(DIN EN 13041; CEN /TC 223; GABRIELS und VERDONCK 1991 und 1992), die häufig, wie auch in dieser Arbeit, ISHS-Methode genannt wird (siehe dazu auch SCHMILEWSKI 1994), sind u.a. auch die R.H.P. Methode (DIJK und DE BES 1987; WEVER und POON 1990) oder ältere Methoden, wie die nach DEBOODT et al. (1974), VERDONCK et al. (1978) oder die der Torf-Rohstoffprüfung nach DIN 11540 (BARTELS 2000) zu nennen. Die genannten Methoden unterscheiden sich u.a. im apparativen und zeitlichen Aufwand sowie in der Substratbehandlung im Verlauf der Messung, so dass die verschiedenen physikalischen Kennwerte, die mit den unterschiedlichen Methoden für ein Substrat ermittelt wurden, z.T. nicht miteinander verglichen werden können (GABRIELS et al. 1991; SCHMILEWSKI und GÜNTHER 1988).

BARTELS (1999) beschreibt u.a. eine Methode zur Beurteilung der Wiederbenetzbarkeit von Substraten nach Austrocknung, REHME (1995) verweist auf eine sogenannte „Methode Bartels“, mit der die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Wasserdurchfluss) von Kultursubstraten in vertikaler Fließrichtung bestimmt werden kann.

Deklaration und Gütesicherung

Die Substratausgangsstoffe und Kultursubstrate unterliegen als sogenannte Bodenhilfsstoffe den Bestimmungen der Düngemittelverordnung. Nach deren Überarbeitung sollen bis Ende 2001 alle Produkte europaweit einer einheitlichen Deklaration unterliegen. Laut der Resolution 93/C 110/01 des europäischen Rates muss diese Deklaration in jedem Fall auf den in den europäischen Normen (DIN EN 12579, DIN EN 12580, DIN EN 13037, 13038, 13039, 13040, 13041) genannten Methoden beruhen, zu der auch die ISHS-Methode (DIN EN13041) zählt (GÜNTHER 2000; SCHMILEWSKI 1996). Freiwillige Kennzeichnungen wie z.B. die Gütezeichen nach den RAL GZ 252 (Kultursubstrate), RAL GZ 253 (Dachgartensubstrate), RAL GZ 254 (Substratausgangsstoffe) und das RAL GZ für Blumenerden (BRUMM 2000), die das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL) in Zusammenarbeit mit der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V. erarbeitet und anerkannt hat, müssen reproduzierbar sein (SCHMILEWSKI 1996), d.h es muss eine Methode zur Ermittlung und Prüfung der freiwillig deklarierten Werte angegeben werden. Dazu werden die Güte- und Prüfbestimmungen im jeweiligen Anerkennungsverfahren erarbeitet und später veröffentlicht (RAL GZ 252, 253, 254).

Obwohl die Gütesicherung nach Meinung von SCHARPF (in SPRINGER 1995) unbedingt auch die physikalischen Eigenschaften der Kultursubstrate umfassen sollte und trotz der steigenden Bedeutung der physikalischen Merkmale im modernen Garten-

bau, liegt für die Gütesicherung der Kultursubstrate (RAL-GZ 252) und der Blumenerden (BRUMM 2000) der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V. noch keine eigene Methode zur Beurteilung der physikalischen Eigenschaften vor. Im Zweifelsfall wird also mit der ISHS-Methode (DIN EN13041) gearbeitet. Bei den Substratausgangsstoffen (RAL GZ 253) wird die Torf-Rohstoffprüfung zur Erfassung der physikalischen Eigenschaften herangezogen (BARTELS 2000), bei den Dachgartensubstraten (RAL GZ 254) die Methode nach FLL (1995).

Im Bezug auf die Gütesicherung der Kultursubstrate sind uns die holländischen Kollegen voraus. Die Stiftung R.H.P. (Regeling Handels Potgronden), die im Untertitel auch „Organisation für die Qualitätskontrolle von Substraten“ heißt (SCHIE 1995; WALZ 1995), vergibt ein Gütezeichen, bei dem neben der physikalischen Methodik auch Grenzwerte für Substrate aus Torf festgelegt sind (VERHAGEN 1996; SCHIE 1999).

Erarbeitung und Überprüfung von Methoden zur Bestimmung der Luft- und Wasserkapazität von Kultursubstraten im Labor

Vor dem oben geschilderten Hintergrund sollte daher im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsauftrags, den die Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V. an die Abteilung Baumschule der Universität Hannover vergeben hat, die sogenannte „Schnellmethode SCHLICHTING 16/8“ (basierend auf SCHLICHTING und BLUME 1966) auf ihre Eignung zur Ermittlung der Luft- und Wasserkapazität von Kultursubstraten im Labor getestet werden. Ein Ziel dieser Arbeit war es also, eine schnelle Labormethode zur Charakterisierung der Luft- und Wasserkapazität von Kultursubstraten zu finden, mit der die physikalischen Gütekriterien von Kultursubstraten ermittelt bzw. überprüft werden können. Dazu sollten die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten, die mit dieser, hier als Q-Methode (quick = schnell) bezeichneten Schnellmethode, erfasst wurden, über eine möglichst enge Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten verfügen, die mit der ISHS-Methode (GABRIELS und VERDONCK 1992, CEN/TC 223; DIN EN 13041) ermittelt wurden.

Da Ergebnisse zahlreicher Versuche zeigen, dass die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von dem Volumengewicht, das im Topf bzw. im Container vorliegt sowie von der Größe und Form der Container abhängig sind (u.a. BILDERBACK und FONTENO 1987; CARON und NKONGOLO 1999; FONTENO 1989, 1993; MILKS et al. 1989 a, b, c; PAQUET et al. 1993), sollten diese Kennwerte daher möglichst an Substratproben im ungestörten Zustand ermittelt werden bzw. unter Beachtung des

Volumengewichts, das in den Töpfen und Containern beim Gärtner gefunden wird. Im Zusammenhang mit der Q-Methode wurden daher vier unterschiedliche Varianten des Volumengewichts hinsichtlich ihres Einflusses auf die damit gemessene Luft- und Wasserkapazität untersucht. Dabei ging es nicht nur um die Klärung der Frage, mit welcher Variante des Volumengewichtes die engste Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode gefunden werden kann, sondern auch darum, mit welcher Variante des Volumengewichts die Q-Methode die kleinste Luftkapazität ermittelt. Die Suche nach einer Variante des Volumengewichts, bei der die Q-Methode einen möglichst kleinen Wert für die Luftkapazität ermittelt, lässt sich mit der Idee erklären, ein Substrat mit einem Wert für die Luftkapazität zu deklarieren, der in der Praxis (beim Gärtner) nicht unterschritten wird. Ein solcher Minimalwert würde dem Gärtner daher die Möglichkeit bieten, ein Substrat entsprechend den Ansprüchen seiner Kultur an die Luftkapazität auszuwählen, da die angegebene Luftkapazität dann nicht unterschritten werden kann. Die Luftkapazität in seinen Töpfen bzw. Containern liegt also in jedem Fall über dem deklarierten Wert. Außerdem gibt dieser Minimalwert dem Substratproduzenten Sicherheit vor Reklamationen und Schadenersatzansprüchen.

Erarbeitung und Überprüfung von Methoden zur Kontrolle des Produktionsprozesses vor Ort im Substratwerk

Vor dem Hintergrund, dass moderne Substratwerke eine Produktionskapazität von bis zu 200 m³ Substrat pro Stunde aufweisen (FLORAGARD ohne Jahr) und bis zu 4500 unterschiedliche Mischungen herstellen können (BACKHAUS-CYSYK 1995), wird der Ruf nach einer besonders schnellen Methode zur Bestimmung wichtiger physikalischer Kennwerte schon während des laufenden Produktionsprozesses verständlich, um gleich vor Ort im Werk die laufende Produktion überwachen und auf mögliche Mängel schnell reagieren zu können. In diesem Zusammenhang sind u.a. Arbeiten von BUNT (1984), WALLER und HARRISSON (1986) sowie GABRIELS et al. (1993) zu nennen, die jedoch für diesen Zweck als nicht geeignet bewertet werden. Aus diesem Grund sollten die Fraktionierung der Substrate mit den Siebsätzen nach DIN 11540 und R.H.P. (VERHAGEN 1995; WEVER und PON 1990; WEVER und VERHAGEN 1995a) auf ihre Eignung zur Überwachung des Produktionsprozesses von Kultursubstraten überprüft werden. Da Ergebnisse von MEYER (1996) und PUUSTJÄRVI (1982) andeuten, dass der Wassergehalt der Substrate einen Einfluss auf die jeweils durch Siebung ermittelte Korngrößenverteilung hat, wurden die

Substrate mit drei unterschiedlichen Wassergehalten gesiebt. Durch Berechnung der Korrelation der gewonnenen Kornfraktionen zur Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode, sollten die unterschiedlichen Varianten bewertet werden.

Ermittlung von Wasserspannungskurven unter Berücksichtigung des Volumengewichts

Mit Hilfe der ISHS-Methode ist es möglich eine Wasserspannungskurve zu erstellen, die es u.a. ermöglicht, den Luft- und Wassergehalt in einem Substrat in Abhängigkeit von der Höhe des Containers zu bestimmen. Daneben bildet sie die Grundlage zur ressourcenschonenden, an den Speichereigenschaften des Kultursubstrats angepassten Steuerung einer Bewässerung (= substratangepasste Bewässerungssteuerung). Im Gegensatz zur ISHS-Methode bietet die von Bohne et al. (1998) und Wrede und Bohne (2000b) entwickelte (modifizierte) M-ISHS-Methode die Möglichkeit, bei der Erstellung einer Wasserspannungskurve das Volumengewicht zu berücksichtigen. Um die Unterschiede zu quantifizieren, die durch die Beachtung eines gezielt eingestellten Volumengewichts bei der M-ISHS-Methode im Vergleich zur ISHS-Methode auftreten, wurden viele Substrate zusätzlich mit Hilfe der M-ISHS-Methode untersucht.

Welchen Einfluss haben steigende Anteile bestimmter Zuschlagstoffe auf die Luft- und Wasserkapazität von Substraten auf Torfbasis?

Eine weitere Fragestellung war, welche Luft- und Wasserkapazität Substrate aus unterschiedlichen Materialien aufweisen und wie sich die genannten Kenngrößen durch unterschiedliche Anteile eines Zuschlagstoffs zu Torf verändern lassen. Dazu wurden 23 selbsthergestellte Mischsubstrate mit der Schnellmethode SCHLICHTING 16/8 (Q-Methode) und mit der ISHS-Methode untersucht.

1.1 Zentrale Fragestellungen

Aus den bis jetzt angeführten Sachverhalten wird deutlich, dass mit der Anfertigung dieser Arbeit zur Klärung folgender Fragen beigetragen werden soll:

- Besitzen die mit Hilfe der Q-Methode ermittelten physikalischen Kennwerte eine Beziehung zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode und bei welcher der vier Varianten des Volumengewichts ist die Beziehung am engsten?
- Mit welcher der vier untersuchten Varianten des Volumengewichts ermittelt die Q-Methode die kleinste Luftkapazität, die als möglicher Minimalwert beim Gärtner

nicht unterschritten wird und damit dem Anwender und dem Produzenten Sicherheit geben?

- Ist es möglich, durch die Fraktionierung von Kultursubstraten mittels Siebung Rückschlüsse auf die Luftkapazität der Substrate zu ziehen? Mit welchem Siebsatz sollte eine solche Siebung erfolgen und auf welche Weise sollten die Substrate zuvor getrocknet werden?
- Wie groß sind die Unterschiede der physikalischen Kennwerte, die sich aus einer Wasserspannungskurve ablesen lassen, wenn die Wasserspannungskurve zum einen mit Hilfe der ISHS-Methode erstellt wird (also ohne Beachtung eines gezielt eingestellten Volumengewichts) und zum anderen mit Hilfe der M-ISHS-Methode, (also unter Beachtung eines gezielt eingestellten Volumengewichts)?
- Wie verändern sich die physikalischen Eigenschaften von Weißtorf durch Zumischung steigender Anteile von verschiedenen Zuschlagstoffen?

An dieser Stelle muss noch erwähnt werden, dass durch die lange Bearbeitungszeit Fehler aufgetreten sind, die sich häufig durch zu starke Austrocknung der Substrate und damit durch einen zu hohen Benetzungswiderstand erklären lassen. Auf diesen Sachverhalt wird an den entsprechenden Stellen dieser Arbeit noch genauer verwiesen.

Die Schreibweise der internationalen SI-Einheiten in dieser Arbeit orientiert sich an Kurzweil (1999). Eine wichtige Übersetzungshilfe vieler (aber nicht aller) englischer Fachbegriffe ermöglichte das Torfwörterbuch (IPS 1984).

2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit getesteten Substrate bzw. Substratmischungen genauer vorgestellt sowie die Methoden beschrieben, mit denen die Substrate untersucht wurden. Daneben wird auch die neu entwickelte Schnellmethode (= Q-Methode) beschrieben.

2.1 Untersuchte Substrate

In der Untersuchung wurden insgesamt 13 Standardsubstrate und 23 Substratmischungen aus unterschiedlichen Rohstoffen verwendet. Die Standardsubstrate bzw. die Rohstoffe, die zu Mischsubstraten zusammengestellt wurden, stammten von den Firmen, die den Forschungs- und Entwicklungsauftrag finanziert haben.

2.1.1 Standardsubstrate

Die Standardsubstrate basieren primär auf dem Rohstoff Weißtorf, zu dem, je nach Substratart, unterschiedliche Zuschlagstoffe zugemischt worden sind. In Tabelle 2.1 sind die 13 Standardsubstrate zusammengestellt und kurz charakterisiert. Daneben enthält Tabelle 2.1 auch die Kurzbezeichnungen, mit denen die Substrate benannt worden sind. Die Reihenfolge, in der die Standardsubstrate in den Tabellen dieses Kapitels sowie der folgenden Kapitel zusammengestellt sind, entspricht nicht der alphabetischen Folge. Vielmehr wurden die Substrate nach den Lieferfirmen zusammengestellt, die diese Substrate zur Verfügung gestellt haben. So erklärt sich z.B., dass die Substrate mit den Kurzbezeichnungen EP, EPr und ET (Einheitserde Werke) vor den Substraten mit den Kurzbezeichnungen CF und PH (Klasmann-Deilmann GmbH) aufgeführt sind, und diese wiederum vor den Substraten FT und RK (Archut/Hawitaflor).

Die Beschreibung der Eigenschaften und Verwendungszwecke der Standardsubstrate basiert meist auf den Produktinformationen, die auf die Verpackung aufgedruckt sind bzw. die aus Prospekten oder dem Internet entnommen sind. Vielfach wird hier keine wissenschaftlich korrekte Deklaration der Torfe vorgenommen, sondern meist vereinfachend von Weiß- oder Schwarztorf gesprochen. Die Angabe des Zersetzungsgrades nach POST und GRANLUND (1929) kann daher nur dort erfolgen, wo dieser vom Hersteller der Substrate angegeben wird, genau wie die chemischen Eigenschaften (pH-Wert und Salzgehalt) bzw. die Nährstoffgehalte.

Tabelle 2.1: Kurzbezeichnung, Lieferfirma, Verwendung und Zusammensetzung der untersuchten 13 Standardsubstrate. (P) = Gebr. Patzer GmbH und Co. KG; (S) = A. Stangenberg GmbH

Kurzbezeichnung	Lieferfirma	Bezeichnung / Verwendung	Zusammensetzung [Anteile in Vol. %]
EP	Einheitserde® Werke (P)	Einheitserde® zum Pikieren	70 Weißtorf (fein) 30 Montmorillonit
EPr	Einheitserde® Werke (S)	Einheitserde® für Primeln	75 Weißtorf (mittelgrob) 25 Montmorillonit
ET	Einheitserde® Werke (P)	Einheitserde® zum Topfen	70 Weißtorf (mittelgrob) 30 Montmorillonit
CF	Klasmann- Deilmann GmbH	Containerfasersubstrat Topfsubstrat Baumschule	ca. 33 Weißtorf (mittelgrob) 33 Schwarztorf 33 Fasertorf (grob)
PH	Klasmann- Deilmann GmbH	Potgrond H Presstopferde	ca. 80 Schwarztorf 20 Weißtorf (fein)
FT	Archut / Hawitaflor	Fruhstorfer Erde® EP 340 Topfsubstrat	70 Hochmoortorf 15 Vulkanton 15 Kokosfasern
RK	Archut / Hawitaflor	Lignostrat® Typ U Topfsubstrat	37 Rindenhumus 33 Hochmoortorf 15 Vulkanton 15 Reisspelzen
ST	Blumenerdenwerk Stender GmbH	Topfsubstrat	Hochmoortorf Granulierter Ton
SV	Blumenerdenwerk Stender GmbH	Vermehrungssubstrat	Hochmoortorf Granulierter Ton
SW1	Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG	Schwarz- Weißtorfsubstrat Topfsubstrat Typ 1	50 Weißtorf (mittelgrob) 50 Schwarztorf
SW3	Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG	Schwarz- Weißtorfsubstrat Vermehrungssubstrat Typ 3	50 Weißtorf (fein) 50 Schwarztorf
T1	Floragard Vertriebs GmbH	TKS® 1 Instant Vermehrungssubstrat	Weißtorf (fein)
T2	Floragard Vertriebs GmbH	TKS® 2 Instant Topfsubstrat	Weißtorf (mittelgrob)

EP (= Einheitserde® Typ P)

Die Kurzbezeichnung EP steht für ein Kultursubstrat, das hauptsächlich auf Weißtorf von feiner Struktur basiert, zu dem Montmorillonit-Ton im nicht genauer deklarierten Umfang zugemischt worden ist. Es dient hauptsächlich als Vermehrungssubstrat sowie zum Topfen von salzempfindlichen Kulturen. Der pH-Wert (CaCl_2) liegt zwischen 5.5 und 6.5, der Salzgehalt bei 1,5 g KCl / l. Als Nährstoffgehalte werden 100 – 250 mg N / l, 100 – 200 mg P_2O_5 / l, 100 – 250 mg K_2O / l sowie Spurenelemente angegeben (EINHEITSERDE 1999a). Das Substrat wurde von der Firma Einheitserde- und Humuswerke, Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, D-36291 Sinnatal-Jossa geliefert.

EPr (= Einheitserde® für Primeln)

EPr bezeichnet ein Kultursubstrat, das speziell zum Topfen von Arten und Sorten der Gattung *Primula* L. zusammengestellt worden ist. Neben Weißtorf von mittlerer Struktur besteht es zusätzlich aus 25 Vol. % Montmorillonit-Ton. Der Salzgehalt wird mit 1,5 g KCl / l angegeben, der pH-Wert (CaCl_2) mit 5.5 – 6.5. Der N-Gehalt liegt bei 100 – 300 mg N / l, der P_2O_5 -Gehalt bei 100 – 300 mg / l und der K_2O -Gehalt bei 150 – 300 mg / l (EINHEITSERDE 1999b). Zusätzlich ist dem Substrat Optifer® zugesetzt, wobei es sich um einen biologischen Eisendünger mit schneller Pflanzenverfügbarkeit handelt (EINHEITSERDE 1999d). Optifer® enthält 11% wasserlösliches, organisch gebundenes Eisen, und wird aus Tannennrinde gewonnen (EVERS ohne Jahr). Das Primelsubstrat wurde von der Firma Einheitserdewerk Hameln, A. Stangenberg GmbH, Kiebitzweg 3, D-31789 Hameln geliefert.

ET (= Einheitserde® Typ T)

Unter der Kurzbezeichnung ET wird in dieser Arbeit das Kultursubstrat Einheitserde® Typ T verstanden, bei dem es sich um ein Substrat zum Ein- und Umtopfen salzverträglicher Pflanzen handelt. Neben der Hauptkomponente mittel strukturierter Weißtorf besteht das Kultursubstrat zu 30 Vol. % aus Montmorillonit-Ton. Der pH-Wert (CaCl_2) ist auf 5.5 – 6.5 eingestellt, der Salzgehalt auf 3,0 g KCl / l. Entsprechend der Verwendung als Topfsubstrat für die Weiterkultur liegt der N-Gehalt bei 250 – 450 mg N / l, der P-Gehalt bei 250 – 450 mg P_2O_5 / l und der K-Gehalt bei 300 – 500 mg K_2O / l (EINHEITSERDE 1999c). Auch dieses Substrat wurde durch die

Einheitserde und Humuswerke Gebr. Patzer GmbH und Co. KG zur Verfügung gestellt.

CF (= Containerfasersubstrat)

Das Containerfasersubstrat ist nach Angaben von KLASMANN (1999a) ein Spezialsubstrat von mittlerer - grober Struktur zur Kultur von Koniferen, Sträuchern und Bodendeckern in Containern. Es besteht zu ungefähr gleichen Volumenanteilen aus Weißtorf, durchfrorenem Schwarztorf und Torffasern. Als chemische Eigenschaften werden ein Salzgehalt von 1,5 g KCl / l und ein pH-Wert (CaCl₂) von 5.3 angegeben. Neben 210 mg N / l, 240 mg P₂O₅ / l, 270 mg K₂O / l und 100 mg Mg / l, enthält das Substrat auch Spurenelemente in Form des Düngers Radigen® .

PH (= Potgrond H)

Bei dem Kultursubstrat Potgrond H handelt es sich um ein fein strukturiertes Pressstopfsubstrat, das zu ca. 80 Vol. % aus durchfrorenem Schwarztorf besteht und zu ca. 20 Vol. % aus Weißtorf. Der Weißtorfanteil sorgt für eine schnellere Abtrocknung der Presstopfoberfläche. Der pH-Wert (CaCl₂) des Presstopfsubstrats liegt bei 5.7, der Salzgehalt bei 1,5 g KCl / l. Potgrond H enthält 210 mg N / l, 240 mg P₂O₅ / l, 270 mg K₂O / l und 100 mg Mg / l sowie alle notwendigen Spurenelemente und Eisen in Chelatform (KLASMANN 1999b).

Potgrond H und das Containerfasersubstrat wurden von der Firma Klasmann-Deilmann GmbH, Georg-Klasmann-Str. 2-10, D-49744 Geeste - Groß Hesepe zur Verfügung gestellt.

FT (= Fruhstorfer Erde® Typ EP 340)

Dieses Kultursubstrat findet als Topferde zur Kultur bei automatischer Bewässerung Verwendung. Es besteht zu 70 Vol. % aus Weißtorf (H2 - H4) sowie Torf aus dem Schwarzweiß-Kontakt (H4 - H6), 15 Vol. % Vulkanton und 15 Vol. % Kokosfasern. Der pH-Wert (CaCl₂) liegt bei 6.0 - 6.5, Angaben zum Salzgehalt fehlen. Der Nährstoffgehalt wird mit 100 - 200 mg N / l, 80 - 150 mg P₂O₅ / l und 150 - 250 mg K₂O / l angegeben (ARCHUT 1999b).

RK (= Lignostrat® U (= Universal) Rindenkultursubstrat)

Lignostrat® U ist eine Topferde für Zierpflanzen und Baumschulware. Sie setzt sich aus 37 Vol. % Rindenumus, 33 Vol. % Weißtorf (H2 - H4) und Torf aus dem

Schwarzweiß-Kontakt (H4 - H6), 15 Vol. % Vulkanton und 15 Vol. % Reisspelzen zusammen. Als chemische Eigenschaften werden ein pH-Wert (CaCl_2) von 5.5 - 6.5 und eine Leitfähigkeit von maximal 2,5 mS / cm genannt. Neben 150 - 250 mg N / l und 200 - 300 mg P_2O_5 / l enthält Lignostrat® auch 200 - 400 mg K_2O / l (ARCHUT 1999a).

Die beiden letztgenannten Kultursubstrate werden durch die Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor, Industrie-Erdenwerk Archut GmbH und Co. KG, D-36341 Lauterbach vertrieben.

ST (= Stender Topfsubstrat)

Das Kultursubstrat besteht aus Hochmoortorf (H1 - H4) und granuliertem Ton, wobei die Volumenanteile der beiden Komponenten nicht genannt sind. Mit einem pH-Wert (CaCl_2) von 5.5 - 6.5 und einem Salzgehalt von 1,2 - 1,8 g KCl / l werden die chemischen Eigenschaften charakterisiert. Neben dem Dünger für Spurenelemente Radigen® enthält das Topfsubstrat der Firma Stender 200 - 300 mg N / l, 200 - 500 mg P_2O_5 / l und 300 - 600 mg K_2O / l. Damit eignet es sich zum Topfen von vorkultivierten Jungpflanzen mit höherem Nährstoffbedarf (STENDER 1999a).

SV (= Stender Vermehrungssubstrat)

Bei diesem zum Pikieren und Topfen von Kulturen mit niedrigem und mittlerem Nährstoffbedarf konzipierten Kultursubstrat handelt es sich um eine Mischung aus Hochmoortorf (H1 - H4) und granuliertem Ton mit unbekanntem Volumenanteilen. Das Vermehrungssubstrat ist durch einen pH-Wert (CaCl_2) von 5.5 - 6.5 und einen Salzgehalt von 0,4 - 0,8 g KCl / l charakterisiert. Entsprechend dem Verwendungszweck liegt der N-Gehalt unter 300 mg N / l, der P-Gehalt unter 300 mg P_2O_5 / l und der K-Gehalt unter 400 mg K_2O / l. Zusätzlich sind dem Substrat Spurenelemente in Form des Düngers Radigen® zugesetzt (STENDER 1999b). Der Lieferant von ST und SV ist das Blumenerdewerk Stender GmbH, Alte Poststraße 12, D-46514 Schermbeck.

SW1 (= Brill Topfsubstrat Typ 1 auf Schwarztorf- und Weißtorfbasis)

Dieses Schwarzweißtorf-Substrat ist eine Topferde aus 50 Vol. % Weißtorf (H3 - H5) und 50 Vol. % Schwarztorf (H5 - H8), die speziell für den Zierpflanzenbau geeignet ist und über eine mittelgrobe Struktur verfügt. Mit einem Nährstoffgehalt von 50 - 300 mg N / l, 80 - 300 mg P_2O_5 / l und 80 - 400 mg K_2O / l eignet sich das Substrat zur Kultur von Pflanzen mit geringem bis mittlerem Nährstoffbedarf (BRILL 1999a). Zusätzlich sind dem Substrat noch Spurenelemente zugesetzt (BRILL 1998). Daneben

zeichnet sich das Kultursubstrat durch einen pH-Wert (CaCl_2) von 5.5 - 6.0 und einen Salzgehalt von 1,1 - 1,7 g KCl / l aus (BRILL 1999a).

SW3 (= Brill Vermehrungssubstrat Typ 3 auf Schwarztorf- und Weißtorfbasis)

Das fein strukturierte Vermehrungssubstrat Typ 3 setzt sich aus jeweils 50 Vol. % Weißtorf (H3 - H5) und Schwarztorf (H5 - H8) zusammen. Das zur Aussaat sowie zum Stecken und Pikieren geeignete Substrat wird für die Verwendung im Zierpflanzenbau, Gemüsebau und der Baumschule empfohlen (BRILL 1998, 1999b). Entsprechend dem vorgesehenen Verwendungszweck als Vermehrungssubstrat liegt der Nährstoffgehalt bei ca. 100 mg N / l, 100 mg P_2O_5 / l und 120 mg K_2O / l (BRILL 1998) und der Salzgehalt bei 0,5 - 1,0 g KCl / l (BRILL 1999b). Der pH-Wert (CaCl_2) von 5.5 - 6.0 liegt im praxisüblichen Bereich. Dem Substrat sind Spurenelemente zugesetzt (BRILL 1998).

Lieferfirma für die zuletzt genannten zwei Substrate ist die Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG, Torfwerkstr. 11, D-49828 Georgsdorf.

T1 (= TKS® 1 Instant)

TKS® 1 Instant ist ein feines Weißtorfsubstrat mit Haupt- und Spurenelementen in niedriger Dosierung und sofort verfügbarer Form. Es wird zur Aussaat, zum Stecken und Pikieren aller Pflanzenarten empfohlen. Der Nährstoffgehalt wird mit 70 - 150 mg N / l, 80 - 180 mg P_2O_5 / l und 140 - 220 mg K_2O / l und der Salzgehalt mit 0,5 - 1,1 g KCl / l angegeben. Der pH-Wert (CaCl_2) liegt zwischen 5.2 und 6.0 (FLORAGARD 1999).

T2 (= TKS® 2 Instant)

TKS® 2 Instant ist ein Weißtorfsubstrat von mittelgrober Struktur mit Haupt- und Spurenelementen in höherer Dosierung. Es eignet sich zum Topfen von bewurzelten Jungpflanzen. Salzeempfindliche Pflanzen sollten nicht in diesem Substrat kultiviert werden. Der Nährstoffgehalt liegt mit 180 - 280 mg N / l, 210 - 350 mg P_2O_5 / l und 280 - 460 mg K_2O / l viel höher als bei TKS® 1 Instant. Weiterhin wird das Substrat chemisch durch einen Salzgehalt von 1,1 - 1,9 g KCl / l und einen pH-Wert (CaCl_2) von 5.2 - 6.0 charakterisiert (FLORAGARD 1999).

Die Firma Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Gerhard-Stalling-Str. 7, D-26135 Oldenburg stellte TKS® 1 Instant und TKS® 2 Instant zur Verfügung.

2.1.2 Selbsterstellte Mischsubstrate

Neben den oben beschriebenen 13 Standardsubstraten wurden zusätzlich 23 Mischsubstrate hergestellt, die mit den gleichen Methoden untersucht wurden wie die 13 Standardsubstrate.

Die Mischsubstrate wurden bei der Firma Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Gerhard-Stalling-Str. 7, D-26135 Oldenburg, auf einer Mischmaschine für Kleinmengen zusammengestellt. Dabei wurden 6 verschiedene Zuschlagstoffe (granulierter Ton, Grubenton, Kokosfasern, Rindenumus, gesiebter Schwarztorf und ungesiebter Schwarztorf) zu deutschem Weißtorf (Floratorf®) zugemischt, der zu 50 Vol. % grob (ungesiebt) und zu 50 Vol. % fein strukturiert (gesiebt) war. Dieser Torf wurde vor Ort zur Verfügung gestellt.

Da der Torf am Mischtermin (03. und 04. November 1998) sehr trocken war, musste während des jeweils fünfminütigen Mischvorgangs zusätzlich Wasser zugegeben werden. Trotz dieser Wasserzugabe waren die Mischsubstrate nach kurzer Zeit teilweise wieder so trocken, dass eine gleichmäßige Befeuchtung nicht bei allen Mischsubstraten gelungen ist.

granT (= granulierter Ton)

Der granuliert Ton wurde in Anteilen von 5, 10, 20, und 30 Vol. % dem Weißtorf zugemischt. Bei diesen vier Mischvarianten wurde besonders viel Wasser zugegeben, da der granuliert Ton die Eigenschaft besitzt, selbst relativ trockenem Torf noch Wasser zu entziehen. In Tabelle 2.2 sind die vier Mischvarianten mit granuliertem Ton zusammengestellt worden. Der granuliert Ton wurde von der Firma Blumenerdewerk Stender GmbH, Alte Poststraße 12, D-46514 Schermbeck zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2.2: Kurzbezeichnung und Tonanteil der vier Mischsubstrate mit granuliertem Ton

Kurzbezeichnung	Anteil granulierter Ton [Vol. %]
granT5%	5
granT10%	10
granT20%	20
granT30%	30

GT (= Grubenton (Montmorillonit)-Torf Vormischung)

Mit Hilfe der Grubenton-Torf Vormischung wurden 4 Mischvarianten hergestellt, indem 30, 40, 50 bzw. 60 Vol. % Grubenton-Torf Vormischung zu deutschem Weißtorf (Floratorf ®) gemischt wurden. Die Vormischung besteht nach Angaben von STANGENBERG (1998) zu ca. 40 Vol. % aus Torf und zu ca. 60 Vol. % aus Montmorillonit-Ton. Der Weißtorf bestand jeweils zur Hälfte aus einem feinen (gesiebten) und aus einem groben (ungesiebten) Anteil. In Anbetracht der Tatsache, dass die Vormischung lediglich zu 60 Vol. % aus Ton besteht, ist der reale Tonanteil geringer. In Tabelle 2.3 sind die vier Mischsubstrate mit der Grubenton-Torf Vormischung, der Anteil an Vormischung und der reale Tonanteil zusammengestellt.

Tabelle 2.3: Kurzbezeichnung, Vormischungsanteil und realer Montmorillonit-Ton Anteil der vier Mischsubstrate mit Grubenton-Torf Vormischung

Kurzbezeichnung	Anteil Grubenton-Torf Vormischung [Vol. %]	Realer Montmorillonit-Ton Anteil [Vol. %]
GT30%	30	ca. 20
GT40%	40	ca. 25
GT50%	50	ca. 30
GT60%	60	ca. 35

Die Grubenton-Torf Vormischung wurde von der Firma Einheitserde- und Humuswerke, Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, D-36291 Sinnatal-Jossa geliefert.

KF (= Kokosfasern)

Der Zuschlagstoff Kokosfasern wurde dem Weißtorf in den Volumenanteilen 10, 15, 20 und 25 Vol. % zugesetzt. Tabelle 2.4 enthält die Kurzbezeichnungen und die Volumenanteile der Kokosfasern in den vier Mischsubstraten.

Tabelle 2.4: Kurzbezeichnung und Anteil der Kokosfasern der vier Mischsubstrate mit Kokosfasern

Kurzbezeichnung	Anteil Kokosfasern [Vol. %]
KF10%	10
KF15%	15
KF20%	20
KF25%	25

Die Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor, Industrie-Erdenwerk Archut GmbH & Co. KG, D-36341 Lauterbach hat die Kokosfasern geliefert.

RH (= Rindenhumus)

Rindenumus, der ebenfalls durch die Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor geliefert wurde, wurde in den Anteilen von 10, 20, 30 und 40 Vol. % dem Floratorf® zugemischt. Kurzbezeichnung und Volumenanteile des Rindenumus am Weißtorf sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Tabelle 2.5: Kurzbezeichnung und Anteil des Rindenumus an den vier Mischsubstraten

Kurzbezeichnung	Anteil Rindenumus [Vol. %]
RH10%	10
RH20%	20
RH30%	30
RH40%	40

STf (= feiner (gesiebter) Schwarztorf)

Der gesiebte Schwarztorf wurde durch die Firma Klasmann-Deilmann GmbH, Georg-Klasmann-Str. 2-10, D-49744 Geeste - Groß Hesepe zu Verfügung gestellt. Die durch das Vermischen mit dem Weißtorf erstellten vier Mischsubstrate sind in Tabelle 2.6 zusammengestellt.

Tabelle 2.6: Kurzbezeichnung und Anteil des gesiebten Schwarztorfs an den vier Mischsubstraten

Kurzbezeichnung	Anteil gesiebter Schwarztorf [Vol. %]
STf20%	20
STf40%	40
STf60%	60
STf80%	80

STg (= grober (ungesiebter) Schwarztorf)

Als letzte Variante wurde dem Weißtorf ungesiebter Schwarztorf in drei unterschiedlichen Volumenanteilen zugemischt, der durch die Firma Gebr. Brill Substrate GmbH & Co. KG, Torfwerkstr. 11, D-49828 Georgsdorf geliefert wurde. Leider reichte der ungesiebte Schwarztorf nicht zur Herstellung einer 80 Vol. % Variante aus. In Tabelle 2.7 sind die Kurzbezeichnungen und die zugehörigen Volumenanteile des ungesiebten Schwarztorfs aufgelistet.

Tabelle 2.7: Kurzbezeichnung und Anteil des ungesiebten Schwarztorfs an den drei Mischsubstraten

Kurzbezeichnung	Anteil ungesiebter Schwarztorf [Vol. %]
STg20%	20
STg40%	40
STg60%	60

2.2 Methoden zur Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts

Die im Kapitel 2.1 beschriebenen 36 Substrate wurden hinsichtlich ihrer Luft- und Wasserkapazität mit unterschiedlichen Methoden untersucht. Neben der ISHS-Methode (GABRIELS und VERDONCK 1991, 1992) kamen auch unterschiedliche Varianten der zu testenden Schnellmethode SCHLICHTING, die in Anlehnung an eine von SCHLICHTING beschriebene Methode entwickelt wurde, zum Einsatz.

Sowohl bei der ISHS-Methode als auch bei der Schnellmethode SCHLICHTING handelt es sich vom Messprinzip um Unterdruckmethoden. Dabei werden die Kapillarmeniskn und Wasserfilme im Substrat einem Unterdruck (Saugkraft) ausgesetzt, der das gesamte Wasser aus der Substratprobe herauszieht, das mit einer geringeren Wasserspannung gehalten wird als es dem angelegten Unterdruck entspricht. Um einen Unterdruck bestimmter Größe zu erzeugen, wird eine Wassersäule bekannter Länge an die zuvor wassergesättigte Substratprobe gehängt. Damit die Substratprobe nicht den Kontakt zur angehängten Wassersäule verliert, steht sie auf einer Feinsandpackung, in die bei den jeweils angelegten Unterdrücken keine Luft

eindringen kann (HARTGE und HORN 1989; SCHACHTSCHABEL et al. 1998; SCHLICHTING und BLUME 1966; SCHLICHTING et al. 1995). Häufig wird vereinfachend die Länge der Wassersäule (cm WS) als Maß für den Unterdruck verwendet, obwohl 100 cm WS einem Unterdruck von lediglich 98,0665 hPa (= 9806,65 Pa) entsprechen (HARTGE und HORN 1999). Auch in dieser Arbeit wird 1 cm WS synonym zu 1 hPa verwendet.

2.2.1 Die ISHS-Methode

Die ISHS-Methode bzw. der Entwurf der europäischen Normmethode (CEN/TC 223) zur Ermittlung der Luft- und Containerkapazität von Substraten ist bei GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) und in der DIN EN 13041 beschrieben, wobei sich beide Beschreibungen in einigen Details unterscheiden. Auf einige Unterschiede zur ISHS-Methode wird im folgenden Text hingewiesen. Zum genauen Vergleich wird auf die Originalquellen verwiesen.

2.2.1.1 Aufbau der Unterdruckanlage

Die in der Unterdruckanlage als poröse Unterlage dienende ca. 12 cm hohe Feinsandpackung befindet sich in einer stabilen PVC Box mit den Maßen 25 x 35 x 55 cm (Höhe, Breite, Tiefe). Auf dem Boden dieser Box liegt ein PVC-Drainschlauch, der mit dem Wasserspannungsregler verbunden ist, der sich außerhalb der Messbox befindet. Der PVC-Schlauch hat einen inneren Durchmesser von 1 cm und ist mit Löchern von ca. 2 mm Durchmesser perforiert. Zusätzlich ist der Schlauch mit Nylonstoff umwickelt um zu verhindern, dass Feinsand aus der porösen Unterlage in den Drainschlauch gesogen wird. Die poröse Unterlage sollte aus einem Quarzsand aufgebaut sein, der einen Lufteintrittspunkt von mindestens 120 cm WS haben sollte (GABRIELS und VERDONCK 1991; 1992). Abb. 2.1 zeigt eine Skizze vom möglichen Aufbau einer Unterdruckanlage mit Wasserspannungsregler.

Der Aufbau der Unterdruckanlage, die in dieser Arbeit verwendet wurde, entspricht in ihren wesentlichen Eigenschaften dem bei GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) beschriebenen.

2.2.1.2 Arbeitsschritte der ISHS-Methode

Zur Bestimmung der kompletten Wasserspannungskurve mit den Kennwerten des Luft- und Wasserhaushalts, die in Tabelle 2.8 zusammengestellt sind, werden nach GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) ca. 10 l des Substrats benötigt. Dieses Substratvolumen wird auf 5 Probenzylinder aufgeteilt, die jeweils ein Fassungsvermögen

von ca. 2 l aufweisen und deren untere Öffnung mit einer wasserdurchlässigen Gaze bespannt ist.

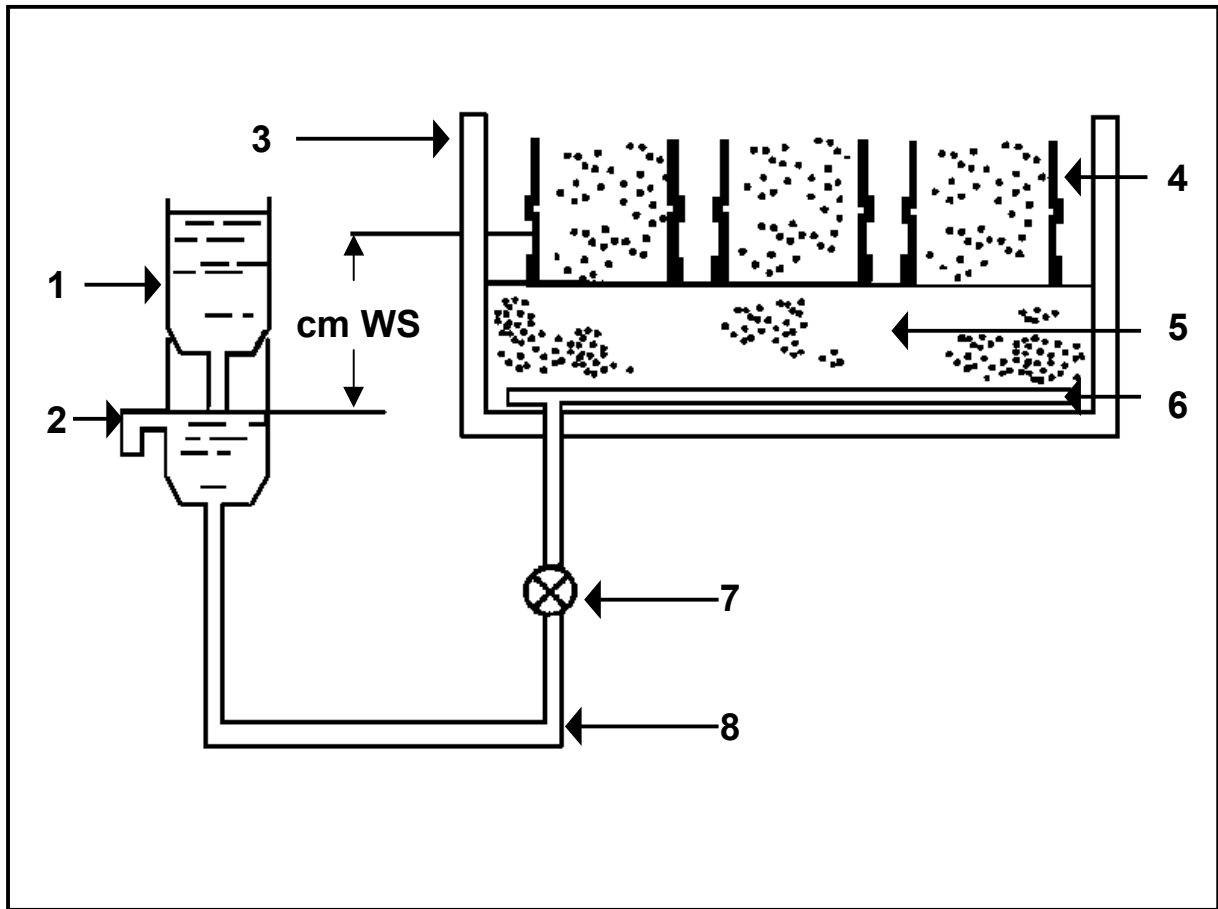


Abb. 2.1: Skizze vom möglichen Aufbau einer Unterdruckanlage (verändert nach DIN EN 13041)

1 = Ausgleichsgefäß; **2** = Wasserspannungsregler; **3** = PVC-Box; **4** = substratbefüllte Doppelzylinder; **5** = poröse Unterlage aus Feinsand; **6** = Drainschlauch; **7** = Hahn zum Wasserspannungsregler (2); **8** = biegsame Schlauchverbindung zwischen Drainschlauch (6) und Wasserspannungsregler (2); **cm WS** = Größe des eingestellten Unterdrucks in cm

Die befüllten Probenzylinder werden zur Wassersättigung auf einer perforierten Unterlage (z.B. ein Gitterrost) in einem Wasserbecken aufgestellt. Das Wasser wird erst nach dem Aufstellen der Probenzylinder langsam bis ca. 1 cm unterhalb der Probenzylinderoberkante aufgefüllt. Nach DIN EN 13041 sollte die Zeitspanne für das Befüllen des Wasserbeckens sogar ca. 30 min betragen. Damit die Probenzylinder mit dem Substrat nicht aufschwimmen, sollten sie beschwert werden. Zusätzlich sind sie mit einer synthetischen Gaze nach oben abgeschlossen. Die Probenzylinder verbleiben über Nacht im Wasserbad (nach DIN EN 13041 für 36 h)

und werden dann für 48 Stunden bei einem Unterdruck von 50 hPa (gemessen vom Boden der Probenzylinder) entwässert.

Tabelle 2.8: Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts, die in dieser Arbeit verwendeten Kurzbezeichnungen und Erklärungen zu den Kennwerten, die mit der ISHS-Methode (GABRIELS und VERDONCK 1991, 1992) ermittelt werden können

Kennwert, Kurzbezeichnung, Einheit	Erklärung
Containerkapazität (CC [Vol. %] = <u>C</u> ontainer <u>c</u> apacity)	Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 10 hPa
Wassergehalt bei 50 hPa (WV50 [Vol. %] = <u>W</u> ater <u>v</u> olume at <u>50</u> hPa)	Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 50 hPa
Wassergehalt bei 100 hPa (WV100 [Vol. %] = <u>W</u> ater <u>v</u> olume at <u>100</u> hPa)	Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 100 hPa
Verfügbares Wasser (AW [Vol. %] = <u>A</u> vailable <u>w</u> ater)	Wassermenge, die das Substrat zwischen 10 hPa und 100 hPa Wasserspannung speichern kann
Leicht verfügbares Wasser (EAW [Vol. %] = <u>E</u> asy <u>a</u> vailable <u>w</u> ater)	Wassermenge, die das Substrat zwischen 10 hPa und 50 hPa Wasserspannung speichern kann
Schwerer verfügbares Wasser (LRAW [Vol. %] = <u>L</u> ess <u>r</u> easily <u>a</u> vailable <u>w</u> ater)	Wassermenge, die das Substrat zwischen 50 hPa und 100 hPa Wasserspannung speichern kann
Porenvolumen (PV [Vol. %] = <u>P</u> ore <u>v</u> olume)	Anteil des mit Wasser und/oder Luft gefüllten Porenraums am Gesamtvolumen
Luftkapazität (AC [Vol. %] = <u>A</u> ir <u>c</u> apacity)	Anteil des Porenvolumens, der bei einer Wasserspannung von 10 hPa, also bei Containerkapazität, luftgefüllt ist

Nach Ablauf der 48 Stunden werden die Probenzylinder in ein ausreichend großes, sauberes Gefäß entleert und die Substratprobe leicht gemischt, wobei eine Veränderung der Probenstruktur zu vermeiden ist (GABRIELS und VERDONCK 1991, 1992).

Die Methodenbeschreibung von GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) schreibt weiterhin vor, dass die so behandelte Substratprobe zur weiteren Untersuchung in Doppelzylinder gefüllt wird, wobei pro Unterdruckstufe (10, 50, 100 hPa) jeweils 4 Doppelzylinder befüllt werden. Ein Doppelzylinder besteht aus zwei einfachen Zylindern, die jeweils einen Durchmesser von ca. 10 cm sowie eine Höhe von ca. 5 cm aufweisen und damit über ein Volumen von ca. 415 cm³ verfügen (= Volumen Zylinder). Der Boden des unteren Zylinders ist mit einer wasserdurchlässig perforierten Gaze bespannt. In Abb. 2.2 ist der Aufbau eines Doppelzylinders darge-

stellt. Das Substrat wird mit Hilfe eines großen Löffels so in die Doppelzylinder gefüllt, dass eine künstliche Verdichtung und eine künstliche Bildung von Luftporen vermieden wird. Die so befüllten Doppelzylinder werden zur Wassersättigung auf einer perforierten Unterlage (z.B. ein Gitterrost) in einem Wasserbecken aufgestellt. Auch hier wird das Wasser erst nach dem Aufstellen der Doppelzylinder langsam, bis ca. 1 cm unterhalb der Oberkante des Doppelzylinders aufgefüllt. Die Doppelzylinder verbleiben für mindestens 24 Stunden im Wasserbad. Damit die Substrate im Wasserbad nicht aufschwimmen, sind die Doppelzylinder nach oben durch eine synthetische Gaze abgeschlossen, die z.B. mit einem Gummiband befestigt wird.

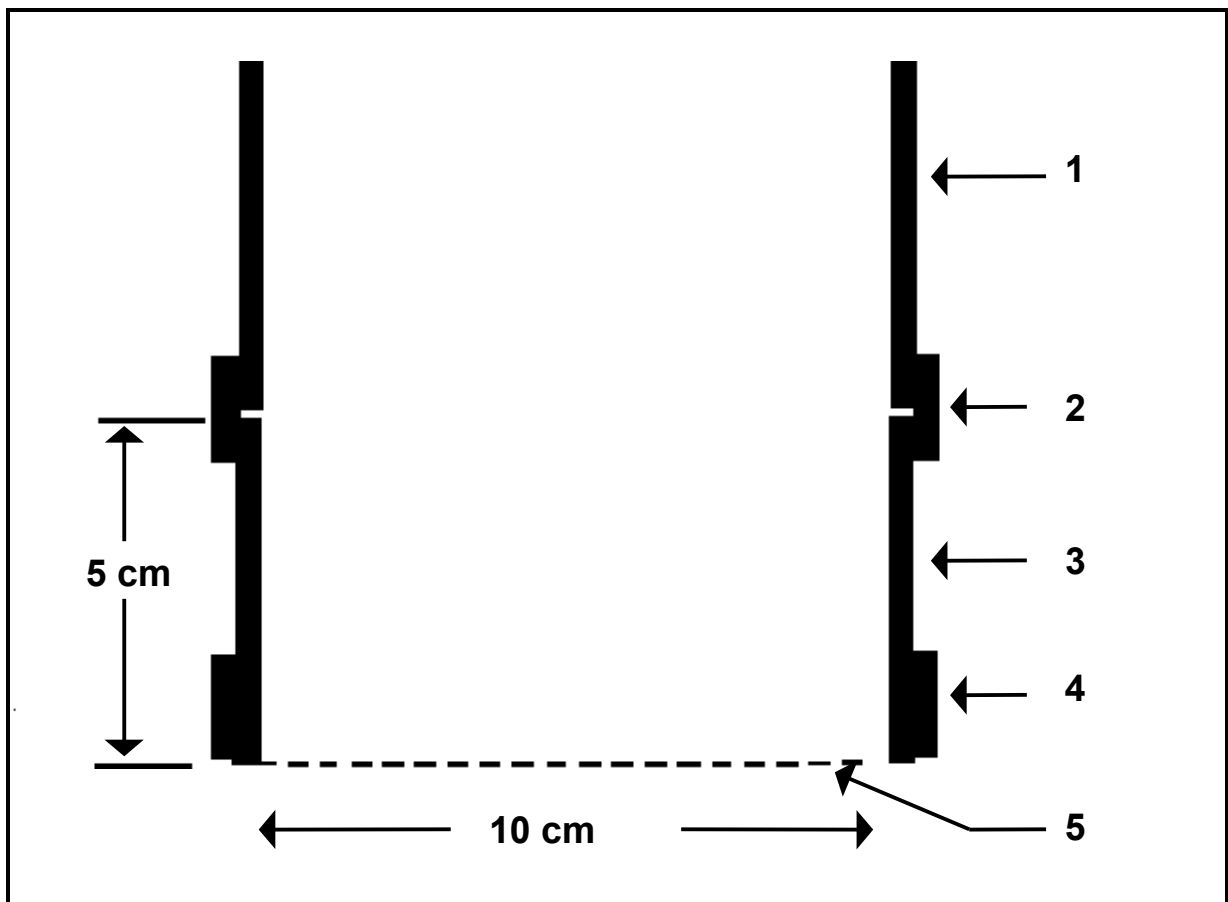


Abb. 2.2: Möglicher Aufbau eines Doppelzylinders (verändert nach DIN EN 13041)
1 = oberer Zylinder; **2** = Verbindungsring zwischen beiden Zylindern; **3** = unterer Probenzylinder; **4** = Haltering (abnehmbar) für die Gaze; **5** = synthetische Gaze

Anschließend werden die wassergesättigten Doppelzylinder für mindestens 48 Stunden auf die Unterdruckanlage gestellt, wobei jeweils 4 Doppelzylinder je Unterdruckstufe (10, 50 bzw. 100 hPa) aufgestellt werden. Nach DIN EN 13041 ist bei einigen Substraten bis zur Einstellung eines Gleichgewichts zwischen angelegtem

Unterdruck und der Wasserspannung in der Substratprobe sogar eine Verweildauer bis zu 72 Stunden auf der Unterdruckanlage notwendig.

Tabelle 2.9: Kurzübersicht der Arbeitsschritte der ISHS-Methode nach GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage (Zusätzlich ist die Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (dF [g / cm^3]) notwendig, siehe Kapitel 2.2.1.3)

Wochentag	Arbeitsschritt	Dauer
Montag	Einfüllen der Substratprobe (10 l) in 5 Probenzylinder zu jeweils 2 l Volumen	0,25 h
	Einstellen der befüllten Probenzylinder in das Wasserbecken und anschließende Wassersättigung der Substratproben	12 h (über Nacht)
Dienstag	Entwässern der 5 Probenzylinder auf der Unterdruckanlage bei einem Unterdruck von 50 hPa (Unterdruck wird <u>vom Boden</u> der Probenzylinder gemessen)	48 h
Donnerstag	Entleeren der 5 Probenzylinder, vorsichtiges Mischen der Substratprobe und Einfüllen des Substrates in Doppelzylinder . Je <u>Unterdruckstufe</u> (10, 50 bzw. 100 hPa) werden 4 <u>Doppelzylinder</u> befüllt	1 h
	Einstellen der befüllten Doppelzylinder in das Wasserbecken und anschließende Wassersättigung der Substratproben	24 h
Freitag	Entwässern der wassergesättigten Doppelzylinder auf der Unterdruckanlage. Es werden jeweils 4 Doppelzylinder je Unterdruckstufe (10, 50 bzw. 100 hPa) aufgestellt (Unterdruck wird <u>von der halben Höhe des unteren Zylinders</u> gemessen)	48 h – 72 h
Montag	Trennung des oberen Zylinders der Doppelzylinder vom unteren Zylinder, vorsichtiges Abschneiden des überstehenden Substrates am unteren Zylinder. Wiegen der unteren Zylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{feucht})	2 h
	Trocknen der unteren Probenzylinder mit Substrat bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz	24 h – 48 h
Mittwoch	Wiegen der trockenen Probenzylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{trocken})	0,5 h

In dieser Arbeit wurde zwar nach der hier geschilderten Methodenvorschrift vorgegangen, jedoch die Anzahl der Parallelen je Unterdruckstufe und Substratprobe auf zwei Parallelen reduziert, um die große Menge an unterschiedlichen Substraten (36) in einem vertretbaren Zeitrahmen in zweifacher Wiederholung untersuchen zu können.

Der Wasserspannungsregler wird zum Einstellen des Unterdrucks so eingestellt, dass der jeweils angestrebte Unterdruck von der halben Höhe des unteren Probenzylinders gemessen wird und nicht vom Boden aus. Während der Entwässerung werden die Unterdruckanlagen mit einem Deckel abgedeckt, um Verdunstung zu vermeiden.

Nachdem sich der angelegte Unterdruck und die Wasserspannung in der Substratprobe im Gleichgewicht befinden, werden die Doppelzylinder von der Unterdruckanlage genommen und der obere Zylinder vorsichtig entfernt. Im nächsten Arbeitsschritt muss der über dem unteren Probenzylinder überstehende Substratanteil vorsichtig mit einem scharfen Messer bzw. einer scharfen Schere entlang der Oberkante des unteren Probenzylinders abgeschnitten werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Substratlagerung im unteren Probenzylinder nicht verändert wird. Anschließend wird der untere Probenzylinder mit dem Substrat gewogen (= Probenzylinder_{feucht}), danach für 48 - 72 Stunden bei 105 °C in den Umlufttrockenschrank gestellt und abschließend nochmals gewogen (= Probenzylinder_{trocken}). Die Leergewichte (= Tara Probenzylinder) der unteren Probenzylinder werden vor jeder Messung neu bestimmt, das Volumen bleibt konstant.

In Tabelle 2.9 sind die Arbeitsschritte nach GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) nochmals zusammengefasst dargestellt. Abweichungen der DIN EN 13041 sind dort jedoch nicht aufgeführt.

2.2.1.3 Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (dF)

Die Dichte der Festsubstanz (dF) wurde nach den Vorgaben der DIN 11540 ermittelt. Dazu wurde der Glührückstand bzw. Glühverlust in der Trockenmasse durch trockene Veraschung für 4 Stunden bei 550 °C bestimmt. GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) schreiben eine Veraschung bei 600 °C vor.

Zuerst werden die benötigten Veraschungstiegel bei 550 °C im Muffelofen ausgeglüht, im Exsikkator abgekühlt und dann deren Masse auf 0,001 g erfasst (= Tiegel [g]). Zusätzlich ist es notwendig, die zu bestimmende Substratprobe für einige Stunden bei ca. 40 °C im Trockenschrank in den lufttrockenen Zustand zu bringen. Von dieser lufttrockenen Substratprobe werden mindestens 65 g mit Hilfe einer Haushaltsmühle so fein gemahlen, dass die ganze Probe ein Analysensieb mit der Maschenweite von 0,5 mm passieren kann.

2 bis 10 g (je nach Zusammensetzung der Substrate) der gemahlene, lufttrockene Substratprobe werden auf 0,001 g in die ausgeglühten Veraschungstiegel einge-

wogen und dann für 4 Stunden bei 105 °C getrocknet. Nachdem die Proben im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt sind, werden sie zurückgewogen (= Tiegel_{trocken} [g]). Die getrockneten Proben müssen dann für mindestens 4 Stunden (Ofen wurde über Nacht laufen gelassen) bei 550 °C im Muffelofen verascht werden. Die veraschten Proben verbleiben nach dem Abschalten des Muffelofens bei geöffneter Tür noch kurze Zeit im Verbrennungsraum, bevor sie im Exsikkator auf Raumtemperatur gebracht und dann zurückgewogen werden (= Tiegel_{verascht} [g]). Die Berechnung des Glührückstandes (= Anteil mineralische Substanz [%]) erfolgt dann anhand der Formel 1:

Formel (1):

$$\text{Anteil mineralische Substanz [\%]} = \frac{(\text{Tiegel}_{\text{verascht}} [\text{g}] - \text{Tiegel} [\text{g}])}{(\text{Tiegel}_{\text{trocken}} [\text{g}] - \text{Tiegel} [\text{g}])} * 100$$

Der Anteil der organischen Substanz errechnet sich dann wie folgt:

Formel (2):

$$\text{Anteil organische Substanz [\%]} = 100 - \text{Anteil mineralische Substanz [\%]}$$

Aus den Anteilen an mineralischer und organischer Substanz kann dann der Wert für die Dichte der Festsubstanz (dF) mit Hilfe der folgenden Formel errechnet werden:

Formel (3):

Dichte der Festsubstanz (dF [g / cm³])

$$dF [\text{g} / \text{cm}^3] = \frac{100}{\frac{\text{Anteil org. Substanz}}{1,65 [\text{g} / \text{cm}^3]} + \frac{\text{Anteil min. Substanz}}{2,65 [\text{g} / \text{cm}^3]}}$$

- org. = organisch
- min. = mineralisch

2.2.1.4 Berechnung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts

Aus den Werten für Probenzylinder_{feucht} [g] und Probenzylinder_{trocken} [g] (siehe Gliederungspunkt 2.2.1.2), dem Volumen der unteren Probenzylinder [cm³], deren Gewicht (= Tara Probenzylinder [g]) sowie dem Wert für die Dichte der Festsubstanz (dF) aus

Gliederungspunkt 2.2.1.3, lassen sich die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts berechnen.

Zuerst wird aus Probenzylinder_{feucht} und Probenzylinder_{trocken} der jeweiligen Wasserspannungsstufe i (i = 10, 50 oder 100 hPa) der Wert für Substrat_{feucht} und Substrat_{trocken} errechnet (jeweils Subtraktion von Tara Zylinder). Mit Hilfe von Substrat_{trocken} und dem Volumen der unteren Zylinder wird dann die Lagerungsdichte zum Ende der Messung im unteren Zylinder bei der jeweils angelegten Wasserspannung i (= dB_{Ei} [g / cm³]) berechnet (siehe Formel 4).

Formel (4):

Lagerungsdichte zum Ende der Messung im unteren Probenzylinder bei der Wasserspannung i (dB_{Ei} [g / cm³])

$$dB_{Ei} \text{ [g / cm}^3\text{]} = \frac{\text{Substrat}_{\text{trocken}i} \text{ [g]}}{\text{Volumen Probenzylinder [cm}^3\text{]}}$$

- i = 10, 50 oder 100 hPa Wasserspannung
- Substrat_{trocken}ⁱ = Probenzylinder_{trocken}ⁱ [g] - Tara Zylinder [g]

Der gravimetrische Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i (i = 10, 50 oder 100 hPa) errechnet sich mit Hilfe der Formel 5:

Formel (5):

Gravimetrischer Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i (W_{gi} [Gew. %])

$$W_{gi} \text{ [Gew. \%]} = \frac{\text{Substrat}_{\text{feucht}i} \text{ [g]} - \text{Substrat}_{\text{trocken}i} \text{ [g]}}{\text{Substrat}_{\text{trocken}i} \text{ [g]}} * 100$$

- i = 10, 50 oder 100 hPa Wasserspannung
- Substrat_{feucht}ⁱ = Probenzylinder_{feucht}ⁱ [g] - Tara Zylinder [g]
- Substrat_{trocken}ⁱ = Probenzylinder_{trocken}ⁱ [g] - Tara Zylinder [g]

Im Gegensatz zur DIN 11540 wird der gravimetrische Wassergehalt nicht auf die feuchte Substratprobe bezogen, sondern auf die bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Substratprobe (siehe auch unter 'Böden' bei VDLUFA 1991b).

Aus dem gravimetrischen Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i errechnet sich, unter Beachtung der Lagerungsdichte zum Ende der Messung im unteren Probenzylinder bei der Wasserspannung i (dB_{Ei}), der volumetrische Wassergehalt bei der Wasserspannung i (WVi [Vol. %]) nach Formel 6.

Formel (6):

Volumetrischer Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i (WVi [Vol. %])

$$WVi \text{ [Vol. \%]} = Wgi \text{ [Gew. \%]} \times dB_{Ei} \text{ [g / cm}^3\text{]}$$

- i = 10, 50 oder 100 hPa Wasserspannung
- dB_{Ei} = Lagerungsdichte im unteren Probenzylinder bei der Wasserspannung i [g / cm³]
- Wgi = gravimetrischer Wassergehalt bei der Wasserspannung i [Gew. %]

Der volumetrische Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 10 hPa (= WV_{10} [Vol. %]) wird als Containerkapazität ($CC = \underline{C}$ ontainer capacity [Vol. %]) bezeichnet (siehe auch Tabelle 2.8).

Eine weitere wichtige physikalische Größe im Hinblick auf die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Substraten ist das Porenvolumen (PV [Vol. %]). Unter dem Porenvolumen wird der Anteil des mit Wasser und / oder Luft gefüllten Volumens am Gesamtvolumen verstanden. Zur Berechnung des Porenvolumens dient die Formel 7.

Formel (7):

Porenvolumen (PV [Vol. %])

$$PV \text{ [Vol. \%]} = \left(1 - \frac{dB_{E10} \text{ [g / cm}^3\text{]}}{dF \text{ [g / cm}^3\text{]}} \right) \times 100$$

- dB_{E10} = Lagerungsdichte zum Ende der Messung bei einer Wasserspannung von 10 hPa [g / cm³]
- dF = Dichte der Festsubstanz [g / cm³]

Aus dem Porenvolumen (PV) und der Containerkapazität ($CC =$ der bei 10 hPa Wasserspannung mit Wasser gefüllte Anteil des Porenvolumens) läßt sich mittels Subtraktion die Luftkapazität ($AC = \underline{A}$ ir capacity = der bei einer Wasserspannung von 10 hPa mit Luft gefüllte Anteil des Porenvolumens [Vol. %]) berechnen.

Formel (8): Luftkapazität (AC = Air capacity [Vol. %])

$$AC \text{ [Vol. \%]} = PV \text{ [Vol. \%]} - CC \text{ [Vol. \%]}$$

- CC = Containerkapazität [Vol. %]
- PV = Porenvolumen [Vol. %]

Weitere Kennwerte des Luft- und Wasserhaushaltes von Kultursubstraten, die sich aus den oben erklärten Kennwerten errechnen lassen, sind das verfügbare Wasser (AW), der leichter verfügbare Anteil (EAW) und der schwerer verfügbare Anteil (LRAW) (BOHNE et al. 1998; BRÜCKNER 1997; WREDE und BOHNE 2000a, b).

Unter dem verfügbaren Wasser (AW) wird die Wassermenge [Vol. %] verstanden, die ein Substrat zwischen 10 hPa Wasserspannung (Containerkapazität) und 100 hPa Wasserspannung speichern kann. Natürlich ist auch noch verfügbares Wasser im Substrat, wenn die Wasserspannung 100 hPa übersteigt. Da jedoch häufig davon ausgegangen wird, dass bei Wasserspannungen über 100 hPa mit Ertragsverlusten bei der Kultur von Pflanzen im Topf oder Container gerechnet werden muss, wird im Bereich von 10 bis 100 hPa von dem verfügbarem Wasser gesprochen (BAILLY 1989a, b; BRÜCKNER 1997; DE BOODT und DE WAELE 1968).

Zur Berechnung des verfügbaren Wassers, das neben der Containerkapazität ein sehr wichtiger Kennwert zur substratangepassten Steuerung einer Topf- bzw. Containerkultur ist, dient folgende Formel 9.

Formel (9): Verfügbares Wasser (AW = Available water [Vol. %])

$$AW \text{ [Vol. \%]} = CC \text{ [Vol. \%]} - WV100 \text{ [Vol. \%]}$$

- CC = Containerkapazität [Vol. %]
- WV100 = Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 100 hPa [Vol. %]

Das leichter verfügbare Wasser (EAW), das die Wassermenge charakterisiert, die im Bereich zwischen 10 und 50 hPa Wasserspannung im Substrat gespeichert wird, berechnet sich aus der Differenz der volumetrischen Wassergehalte bei den

genannten Wasserspannungen im Substrat (DE BOODT und VERDONCK 1972; WHITE und MASTALERTZ 1966). Entsprechend berechnet sich das schwerer verfügbare Wasser (LRAW) aus der Differenz der volumetrischen Wassergehalte bei 50 und 100 hPa Wasserspannung (BOHNE et al. 1998). Nach BRÜCKNER (1997) wird diese Wassermenge auch Wasserspeicherkapazität (WBC = Water buffer capacity) genannt. Er spricht erst bei Wasserspannungen über 100 hPa von schwerer verfügbarem Wasser. Wie schon das Beispiel für das schwerer verfügbare Wasser verdeutlicht, ist es bis jetzt nicht gelungen, eine einheitliche Benennung (Definition) der verschiedenen physikalischen Kennwerte von Kultursubstraten zu erreichen. Um Produzenten und Anwender von Kultursubstraten nicht zu verunsichern und um unterschiedliche Forschungsergebnisse besser vergleichen zu können, erscheint es deswegen notwendig, eine international einheitliche Benennung (Definition) dieser Kennwerte zu erarbeiten und bei der Publikation von Forschungsergebnissen und der Charakterisierung von Substrateigenschaften zwingend zu verwenden.

2.2.2 Schnellmethode nach SCHLICHTING (= Q-Methode)

Die in der Abteilung Baumschule entwickelte Schnellmethode, die sich an eine Unterdruckmethode anlehnt, die von SCHLICHTING beschrieben (SCHLICHTING und BLUME 1966) und an der Lehr- und Versuchsanstalt in Hannover - Ahlem modifiziert wurde, ist zur Ermittlung der Luft- und Wasserkapazität der 36 Substrate herangezogen worden. Ziel bei der Entwicklung der Schnellmethode, die im folgenden kurz Q-Methode genannt wird (Quick method), ist die Verkürzung des notwendigen Zeitrahmens zur Bestimmung der Wasser- (WC) und Luftkapazität (AC) im Vergleich zur ISHS-Methode. Zusätzlich sollten die mit beiden Methoden ermittelten Kennwerte eine möglichst enge Korrelation zueinander aufweisen, damit die Q-Methode die ISHS-Methode bei der Ermittlung bzw. Überprüfung der Luft- und Wasserkapazität von Kultursubstraten ersetzen kann.

Im Zusammenhang mit der Q-Methode kann jedoch nicht von der Containerkapazität (CC) gesprochen werden, da die Substratproben zur Bestimmung des entsprechenden Kennwertes mit der Q-Methode nicht einem Unterdruck von 10 cm WS ausgesetzt werden (zwischen 7,5 cm WS und 12,5 cm WS), wie es bei der ISHS-Methode der Fall ist, sondern einem Unterdruck zwischen vier cm WS am unteren Ende und 14 cm WS am oberen Ende des 10 cm hohen Probenzylinders. Aus diesem Grund sollte bei der Q-Methode nicht von der Containerkapazität (CC) gesprochen werden, sondern von der Wasserkapazität (WC).

2.2.2.1 Aufbau der Unterdruckanlage und der Probenzylinder

Bei der Q-Methode handelt es sich ebenfalls um eine Unterdruckmethode. Im Gegensatz zur oben beschriebenen ISHS-Methode tropft das in einen Probenzylinder gefüllte, wassergesättigte Substrat durch eine ca. 4 cm starke, ebenfalls wassergesättigte Sandschicht, frei ab. So entsteht ein Unterdruck, der sich allein aus der Stärke der Sandschicht (4 cm) und der Höhe des Probenzylinders (10 cm) erklärt. Dieser Unterdruck beträgt 4 cm WS am unteren Ende und 14 cm WS am oberen Ende des 10 cm hohen Probenzylinders.

Die Unterdruckanlage der Q-Methode besteht im wesentlichen aus einer hier als Messbox bezeichneten PVC-Box mit perforiertem Boden, die die Maße 57 x 37 x 8 cm (Länge, Breite, Höhe) aufweist. Der perforierte Boden ist mit einer Gaze abgedeckt, damit die darauf befindliche 4 cm starke Sandschicht nicht ausgespült wird. Die Sandschicht, die als poröse Unterlage dient, besteht aus feinem Quarzsand, der z.B. in Gebinden von 5 kg als Spielsand im Baumarkt erhältlich ist. Zusätzlich ist die Sandschicht noch mit einer weiteren Gaze nach oben abgedeckt, damit mit den substratbefüllten Probenzylindern keine Verunreinigungen in die Sandschicht gelangen.

Zur Wassersättigung der Sandschicht in der Messbox ist eine weitere Box erforderlich, die keinen perforierten Boden aufweisen darf und so groß sein muss, dass die Messbox als Ganzes in diese, als Sättigungsbox bezeichnete Box, passt. Die Sättigungsbox sollte mindestens so hoch sein, dass die in der Messbox befindliche Sandschicht während der Wassersättigung leicht mit Wasser überstaut werden kann. Daher sind für die Sättigungsbox z.B. die Maße 58 x 38 x 8 cm (Länge, Breite, Höhe) sinnvoll. Zusätzlich sollte die Sättigungsbox so aufgebaut sein, dass ein Befüllen mit Wasser auch dann leicht möglich ist, wenn die Messbox zur Wassersättigung in der Sättigungsbox steht (z.B. mit Einfüllstutzen). In Abb. 2.3 ist der Aufbau von Mess- und Sättigungsbox schematisch dargestellt.

Während der Entwässerung der auf der Messbox stehenden, substratbefüllten und wassergesättigten Probenzylinder, wird die Messbox so aufgestellt, dass ein freies Abtropfen des Wassers aus der zuvor mit Wasser gesättigten Sandschicht möglich ist. Dazu wurde die Messbox in der Abteilung Baumschule z.B. auf einen Gitterrost gestellt, das über einem Abfluß bzw. über einem Wasserbecken gelegen hat.

Die Probenzylinder, in die das Substrat zur Bestimmung der Luft- und Wasserkapazität gefüllt wird, sollten aus wärmebeständigem (120 °C) Kunststoff bestehen,

damit eine Trocknung der mit dem angelegten Unterdruck ins Gleichgewicht gebrachten Substratproben im Probenzylinder bei 105 °C möglich ist.

Wie Untersuchungen in der Abteilung Baumschule gezeigt haben, sollten die Probenzylinder eine Höhe von 10 cm und einen Durchmesser von 7 cm aufweisen, so dass das Volumen ca. 380 cm³ beträgt. Probenzylinder mit anderen Maßen (Höhe, Durchmesser) sollten nicht verwendet werden, da sie zu physikalischen Kennwerten führen, die nicht so eng mit den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode (CEN/TC223) korrelieren.

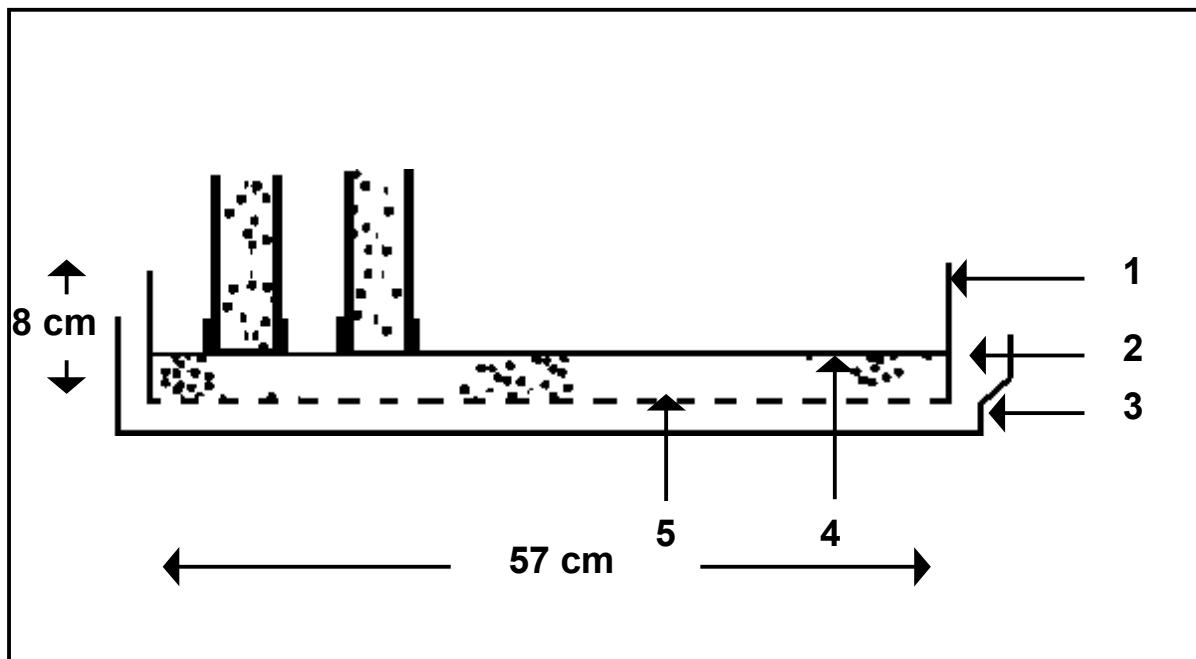


Abb. 2.3: Unterdruckanlage der Q-Methode mit Messbox, Sättigungsbox und Probenzylinder (möglicher Aufbau)

1 = Messbox; **2** = Einfüllstutzen der Sättigungsbox für Wasser; **3** = Sättigungsbox; **4** = feiner Quarzsand als poröse Unterlage, 4 cm Schichthöhe, darüber wasserdurchlässige Gaze; **5** = perforierter Boden der Messbox, darüber wasserdurchlässige Gaze

Am unteren Ende sind die Probenzylinder mit einem Sieb oder feinem Netz verschlossen. Auf dieses Sieb wird vor dem Einfüllen des Substrats ein Stück Filterpapier gelegt, damit das Substrat nicht aus dem Probenzylinder gespült werden kann. Es ist aber auch eine Bauweise denkbar, bei der, analog zum unteren Probenzylinder der ISHS-Methode, eine wasserdurchlässige Gaze mit einem Haltering am Boden befestigt wird. In dieser Arbeit wurde jedoch die oben genannte Bauweise mit feinem Netz und Filterpapier verwendet. In Abb. 2.4 ist der Aufbau des Proben-

zylinders schematisch dargestellt. Als Filterpapier wurde jeweils ein rundes Stück Küchenpapier (Küchenrolle) verwendet, das den gleichen Durchmesser aufwies, wie der entsprechende Probenzylinder. Das Filterpapier sollte nur einlagig verwendet werden, damit das feuchte Papier nicht zu schwer wird und so den Messwert für die Wasserkapazität des untersuchten Substrats verfälscht. Ein zu schweres, feuchtes Filterpapier würde zur Überschätzung der Wasserkapazität und zur Unterschätzung der Luftkapazität führen.

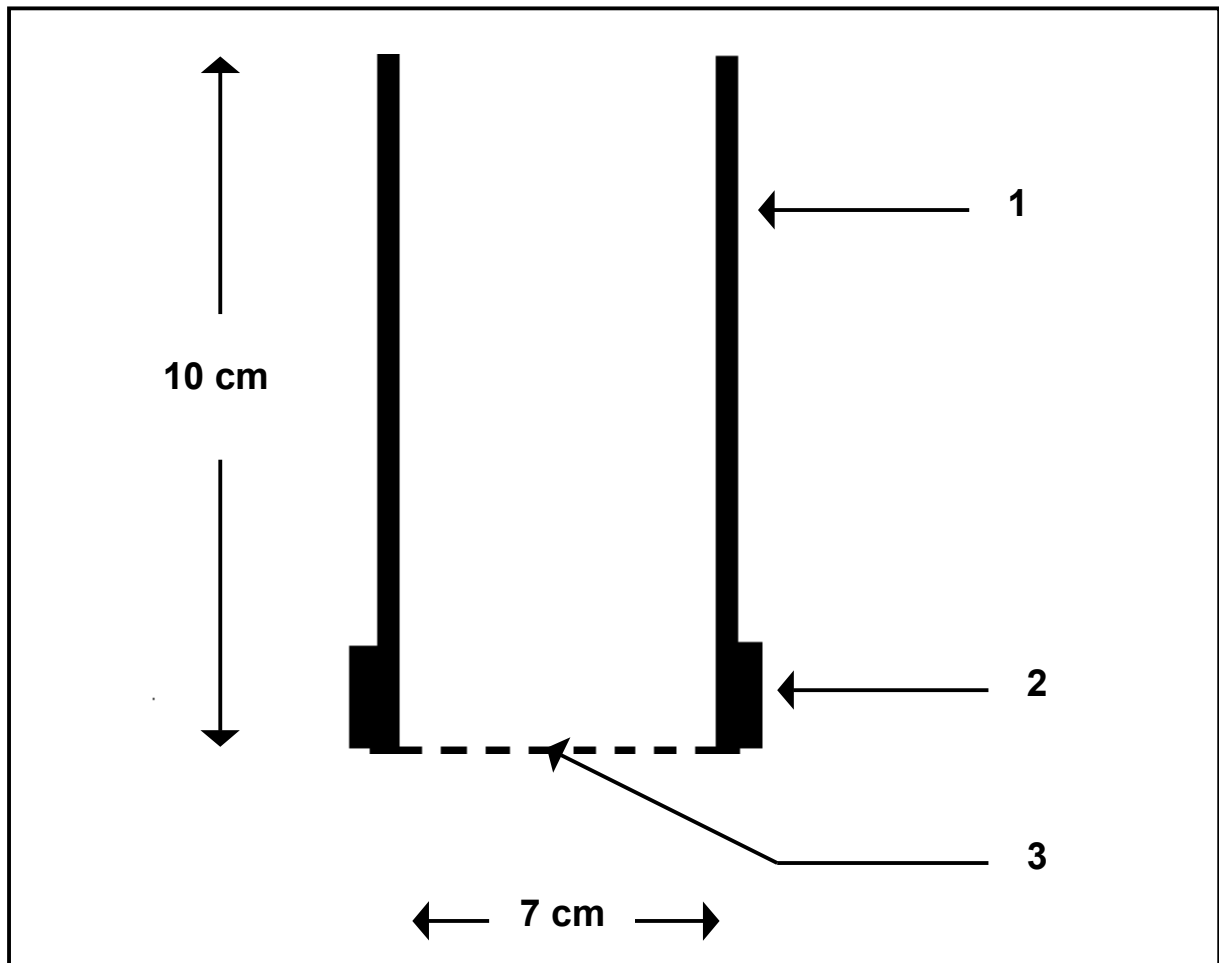


Abb. 2.4: Aufbau des Probenzylinders der Q-Methode; **1** = Probenzylinder aus hitzebeständigem (bis mind. 120 °C) Kunststoff; **2** = Haltevorrichtung für das feine Sieb bzw. Netz; **3** = feines Sieb bzw. Netz auf das zusätzlich ein Stück einlagiges Filterpapier gelegt wird

Zur Ermittlung des Leergewichtes der Probenzylinder (= Tara Probenzylinder) muss die Masse der Probenzylinder mit dem Filterpapier bestimmt werden. Daher ist vor jeder neuen Messung die erneute Bestimmung der Leergewichte der verwendeten Probenzylinder mit Filterpapier notwendig. Das Volumen der Zylinder muss dagegen nur einmalig ermittelt werden.

2.2.2.2 Bestimmung des Volumengewichts der Substratprobe

Im Gegensatz zum Entwurf zur europäischen Normmethode (CEN/TC 223) / ISHS-Methode arbeitet die Q-Methode unter Beachtung eines definierten Volumengewichts [g / l] der Substratprobe im Probenzylinder. Das bedeutet, dass die Substratprobe zur Messung mit einem definierten Volumengewicht bzw. einer definierten Lagerungsdichte (dB_A [g / l]) in die Probenzylinder eingewogen wird. Diese, zum Anfang der Messung mit der Q-Methode im Probenzylinder erzeugte Lagerungsdichte, wird mit dB_A (= Volumengewicht bzw. Lagerungsdichte am Anfang) abgekürzt. In dieser Arbeit wurden vier verschiedene Varianten des Volumengewichts (dB_A) getestet, die in Tabelle 2.10 kurz vorgestellt werden.

Tabelle 2.10: Geprüfte Varianten des Volumengewichts bzw. der Lagerungsdichte zum Anfang der Messung (dB_A [g/l]) im Probenzylinder der Q-Methode sowie deren Kurzbezeichnung

Kurzbezeichnung	Beschreibung
Topffest [g/l]	Zur Ermittlung der sog. <u>praxisüblichen Topffestigkeit</u> wurde die Substratprobe von 2 Gärtnern des Versuchsbetriebes in Ruthe jeweils 10 mal ohne Pflanzen in 1 l Vierecktöpfe getopft. Das arithmetische Mittel aus den 20 Einzelwerten wurde als Variante <u>Topffest</u> in die Untersuchung aufgenommen
VDLUFA-5 [g/l]	Zur Ermittlung der Volumengewichtsvariante <u>VDLUFA-5</u> wurde die Substratprobe so behandelt, wie es der VDLUFA zur Ermittlung des Volumengewichts vorschreibt (VDLUFA1991a). Einziger Unterschied: Nur 5 Fallvorgänge aus 10 cm Höhe in dreifacher Wiederholung
VDLUFA [g/l]	Zur Ermittlung der Volumengewichtsvariante <u>VDLUFA</u> wurde die Substratprobe so behandelt, wie es der VDLUFA zur Ermittlung des Volumengewichts vorschreibt (VDLUFA1991a), d.h. 10 Fallvorgänge aus 10 cm Höhe in dreifacher Wiederholung
VDLUFA+5 [g/l]	Zur Ermittlung der Volumengewichtsvariante <u>VDLUFA+5</u> wurde die Substratprobe so behandelt, wie es der VDLUFA zur Ermittlung des Volumengewichts vorschreibt (VDLUFA1991a). Einziger Unterschied: 15 Fallvorgänge aus 10 cm Höhe in dreifacher Wiederholung

Bei der ersten Volumengewichtsvariante handelt es sich um die so genannte praxisübliche Topffestigkeit, die mit der Kurzbezeichnung Topffest in Tabelle 2.10 aufgeführt ist. Zur Ermittlung der Variante Topffest wurde jede Substratvariante von 2 Gärtnern des Versuchsbetriebs in Ruthe jeweils 10 mal ohne Pflanzen in 1 l Vierecktöpfe getopft. Das Volumen der Töpfe betrug genau 1080 ml. Aus den 20 Einzelwerten wurde das arithmetische Mittel gebildet, das dann als Volumengewichtsvariante Topffest in die Untersuchung mit der Q-Methode eingegangen ist.

Die drei Volumengewichtsvarianten VDLUFA-5, VDLUFA und VDLUFA+5 wurden jeweils in dreifacher Wiederholung mit Hilfe einer Spezialmaschine zur Ermittlung des Volumengewichts nach den Vorgaben des VDLUFA (VDLUFA 1991a) bestimmt. Die Spezialmaschine wird von der Firma Albert Zubrögel Maschinenbau GmbH, Industriering 7, D-49393 Lohne gebaut und vertrieben. Die drei genannten Varianten, die auch in Tabelle 2.10 kurz erklärt sind, unterscheiden sich bezüglich der Arbeitsvorschrift zu ihrer Bestimmung lediglich in der Anzahl an Fallvorgängen aus 10 cm Höhe. Zur Bestimmung der Variante VDLUFA-5 wurden lediglich 5 Fallvorgänge ausgeführt, bei der Variante VDLUFA 10 Fallvorgänge und bei der Variante VDLUFA+5 schließlich 15 Fallvorgänge. Die Ermittlung des Volumens, das die durch die Fallvorgänge gesetzte Substratprobe einnimmt sowie die anderen Arbeitsschritte entsprechen VDLUFA (1991a). Aus den jeweils drei Messwerten je Substrat- und Volumengewichtsvariante wurde der Mittelwert gebildet, der in der weiteren Untersuchung mit der Q-Methode verwendet wurde.

Die so ermittelten Werte des Volumengewichts_{feucht} bzw. der Lagerungsdichte_{feucht} (= $dB_{Afeucht}$) sind vom Wassergehalt der Substratprobe abhängig. Sie sind daher nicht als unveränderlich anzusehen. Je feuchter die Substratprobe ist, desto höher ist auch das resultierende Volumengewicht_{feucht} und umgekehrt. Die alleinige Bestimmung von $dB_{Afeucht}$ ist also nur dann ausreichend, wenn zwischen der Bestimmung von $dB_{Afeucht}$ und der Einstellung dieses Wertes im Probenzylinder der Q-Methode nur ein kurzer Zeitraum liegt und sich der Wassergehalt der Substratprobe nicht ändert. Da die Bestimmung der vier Volumengewichtsvarianten zum Anfang der Untersuchung erfolgte, ist jedoch davon auszugehen, dass sich der Wassergehalt der Substratproben zwischen dem Bestimmungstermin des Volumengewichts und der Untersuchung mit der Q-Methode ändert. Es war daher notwendig, das Volumengewicht_{feucht} ($dB_{Afeucht}$) in das Volumengewicht_{trocken} (dB_A) umzurechnen, damit das anfänglich bestimmte Volumengewicht zu einem späteren Zeitpunkt auch mit dem

dann trockeneren Substrat im Probenzylinder der Q-Methode erzeugt werden kann. Da das Volumengewicht_{trocken} eine vom Wassergehalt der Substratprobe unabhängige Größe ist, kann mit Hilfe dieses Wertes und dem zum Untersuchungszeitpunkt der Q-Methode aktuellen Wassergehalt der Substratprobe auf das dann jeweils einzustellende aktuelle Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht}) umgerechnet werden.

Zur Bestimmung von Volumengewicht_{trocken} bzw. Lagerungsdichte_{trocken} (dB_A), muss die Substratprobe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet werden und dann deren Masse (Substrat_{trocken}) ermittelt werden (VDLUFA1991b). Die Werte dB_{Afeucht} und dB_A können unter Verwendung der Formeln 10, 11 und 14 errechnet werden.

Formel (10):

Lagerungsdichte_{feucht} bzw. Volumengewicht_{feucht} (dB_{Afeucht} [g / l])

$$dB_{Afeucht} [g / l] = \frac{\text{Substrat}_{feucht} [g]}{\text{VolSg} [ml]} \times 1000$$

- Substrat_{feucht} = Masse der gesetzten Substratprobe [g]
- VolSg = Volumen der gesetzten Substratprobe [ml]

Formel (11):

Lagerungsdichte_{trocken} bzw. Volumengewicht_{trocken} (dB_A [g / l])

$$dB_A [g / l] = \frac{\text{Substrat}_{trocken} [g]}{\text{VolSg} [ml]} \times 1000$$

- Substrat_{trocken} = Masse der bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Substratprobe [g]
- VolSg = Volumen der gesetzten Substratprobe [ml]

Nach VDLUFA (1991a) kann zur Ermittlung von dB_A [g / l] auch der Trockenmassegehalt (TM [%]) der Substratprobe herangezogen werden, der nach VDLUFA (1991b) bestimmt wird. Dazu wird die Substratprobe ebenfalls bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der Trockenmassegehalt (TM [%]) errechnet sich dann mit Hilfe der Formel 12.

Außer unter Verwendung von Formel 12 kann TM auch mit Formel 13 berechnet werden, wenn zuvor der gravimetrische Wassergehalt (Wg [Gew. %]) der Substratprobe bestimmt wurde. Wg wird aus $\text{Substrat}_{\text{feucht}}$ [g] und $\text{Substrat}_{\text{trocken}}$ [g] analog zu Formel 5 berechnet. Der Trockenmassegehalt (TM [%]) berechnet sich dann aus dem gravimetrischen Wassergehalt (Wg [Gew. %]) der Substratprobe mit Hilfe der Formel 13.

Formel (12): Trockenmassegehalt der Substratprobe (TM [%])

$$\text{TM [\%]} = \frac{\text{Substrat}_{\text{trocken}} [\text{g}]}{\text{Substrat}_{\text{feucht}} [\text{g}]} \times 100$$

- $\text{Substrat}_{\text{trocken}}$ = Masse der bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Substratprobe [g]
- $\text{Substrat}_{\text{feucht}}$ = Masse der gesetzten Substratprobe [g]

Formel (13): Trockenmassegehalt (TM [%])

$$\text{TM [\%]} = \frac{100}{100 + \text{Wg} [\text{Gew. \%}]} \times 100$$

- Wg = gravimetrischer Wassergehalt der Substratprobe in [Gew. %]

Formel (14):

Volumengewicht_{trocken} bzw. Lagerungsdichte_{trocken} (dB_A [g / l])

$$\text{dB}_A [\text{g / l}] = \frac{\text{dB}_{\text{Afeucht}} [\text{g / l}]}{100} \times \text{TM} [\%]$$

- $\text{dB}_{\text{Afeucht}}$ = Volumengewicht_{feucht} bzw. Lagerungsdichte_{feucht} [g / l]
- TM = Trockenmassegehalt [%]

Nachdem der Trockenmassegehalt (TM [%]) bestimmt wurde, kann die Lagerungsdichte_{trocken} bzw. das Volumengewicht_{trocken} (dB_A [g / l]) unter Verwendung von Formel 14 ermittelt werden.

Um zum Zeitpunkt der Untersuchung mit der Q-Methode das im Probenzylinder einzustellende aktuelle Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht}) mit aktueller Substratfeuchte aus der zu einem früheren Termin bestimmten Lagerungsdichte_{trocken} (dB_A) berechnen zu können, ist es notwendig, zuerst den aktuellen Wassergehalt der Substratprobe (akt.Wg [Gew. %]) zu bestimmen. Dieses geschieht erneut in Anlehnung an VDLUFA (1991b), die Berechnung von akt.Wg [Gew. %] erfolgt wieder analog zur Formel 5. Das einzustellende aktuelle Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht} [g / l]) berechnet sich dann unter Verwendung von Formel 15 oder Formel 16.

Formel (15):

**Im Probenzylinder der Q-Methode einzustellendes aktuelles
Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht} [g / l])**

$$\text{akt.dB}_{\text{Afeucht}} [\text{g / l}] = \text{dB}_A [\text{g / l}] \times \left(1 + \frac{\text{akt.Wg} [\text{Gew. \%}]}{100} \right)$$

- akt.Wg = aktueller gravimetrischer Wassergehalt der Substratprobe [Gew. %] (nach Formel 5)
- dB_A = Volumengewicht_{trocken} bzw. Lagerungsdichte_{trocken} [g / l]

Formel (16):

**Im Probenzylinder der Q-Methode einzustellendes aktuelles
Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht} [g / l])**

$$\text{akt.dB}_{\text{Afeucht}} [\text{g / l}] = \frac{\text{dB}_A [\text{g / l}] \times 100}{\text{akt.TM}}$$

- akt.TM = aktueller Trockenmassegehalt der Substratprobe [%] (nach Formel 12)
- dB_A = Volumengewicht_{trocken} bzw. Lagerungsdichte_{trocken} [g / l]

Die Substratmasse (SM [g / Zylinder]), die in den Probenzylinder der Q-Methode eingefüllt werden muss, um das notwendige Volumengewicht zu erzeugen, berechnet sich, indem das aktuelle Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht} [g / l]) auf das

Volumen des Probenzylinders der Q-Methode umgerechnet wird, also auf ca. 380 ml. In Formel 17 ist der Zusammenhang nochmals dargestellt.

Formel (17):

**Substratmasse, die in die Probenzylinder der Q-Methode einzufüllen ist
(SM [g / Zylinder])**

$$\text{SM [g / Zylinder]} = \frac{\text{akt. dB}_{\text{Afeucht}} [\text{g / l}] \times V_{\text{Zyl.}} [\text{ml}]}{1000}$$

- akt. dB_{Afeucht} = Im Probenzylinder einzustellendes aktuelles Volumengewicht_{feucht} [g / l]
- V_{Zyl.} = Volumen des Probenzylinders [ml]

2.2.2.3 Arbeitsschritte der Q-Methode

Die im folgenden Abschnitt beschriebene Vorgehensweise bei der Durchführung der Q-Methode sowie die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Bauweisen der Unterdruckanlage und der Probenzylinder sind Ergebnisse der diesem Projekt vorangegangenen Forschungsarbeit an der Abteilung Baumschule. Dieses gilt insbesondere für die angegebenen Zeitspannen für die Be- und Entwässerung der Substratproben und für die Höhe und den Durchmesser des Probenzylinders.

Zur Bestimmung der physikalischen Kennwerte Luft- und Wasserkapazität mit Hilfe der Q-Methode werden ca. 5 l Substrat im eintopffähigen Zustand benötigt.

Bevor mit dem Einfüllen des Substrats in die Probenzylinder begonnen werden kann, muss zuerst das Volumengewicht_{feucht} (dB_{Afeucht}) bestimmt werden, das im Probenzylinder erzeugt werden soll. Erfolgt die Bestimmung direkt bevor das Substrat in die Probenzylinder eingefüllt wird, so reicht die Bestimmung von dB_{Afeucht} aus, um SM (Formel 17) zu berechnen. Liegt eine längere Zeitspanne zwischen der Bestimmung des Volumengewichts_{feucht} und dem Einfüllen der Substratprobe in die Probenzylinder, ist davon auszugehen, dass sich der Wassergehalt der Substratprobe ändert. Daher ist es notwendig, das Volumengewicht_{feucht} (dB_{Afeucht}) in das Volumengewicht_{trocken} (dB_A) umzurechnen. In diesem Fall muss direkt vor dem Einwiegen der Substratprobe in die Probenzylinder der aktuelle Wassergehalt bestimmt werden, um dann vom Volumengewicht_{trocken} (dB_A) auf das aktuelle Volumengewicht_{feucht}

(akt.dB_{Afeucht}) umzurechnen, das dann zur Berechnung von SM (Formel 17) verwendet wird.

Die Bestimmung des Volumengewichts_{feucht} dauert bei 3 Parallelen ca. 0,5 Stunden je Substratprobe. Ist zusätzlich die Bestimmung des Volumengewichts_{trocken} (dB_A) notwendig, so werden nochmals ca. 48 Stunden benötigt, um den Wassergehalt der Substratprobe zu bestimmen und daraus dB_A zu berechnen. Im Kapitel 2.2.2.2 sind die notwendigen Arbeitsschritte zur Bestimmung des Volumengewichts beschrieben. Ist das Volumengewicht_{feucht} (dB_{Afeucht}) bzw. aktuelle Volumengewicht_{feucht} (akt.dB_{Afeucht}) für die jeweiligen Substratproben bestimmt, so wird die einzufüllende Substratmasse (SM [g / Zylinder]) berechnet (Formel17).

Bevor die berechnete Substratmasse (SM) in die Zylinder eingefüllt (eingewogen) wird, ist die Bestimmung der Leergewichte der Probenzylinder mit dem Filterpapier notwendig (= Tara Probenzylinder [g]). Anschließend wird die errechnete Substratmasse (SM) im Probenzylinder durch Einwiegen der Substratprobe erzeugt, und zwar so, dass mit der errechneten Masse genau das ganze Volumen des Probenzylinders ausgefüllt ist. Nur auf diese Weise wird im Zylinder das vorher ermittelte Volumengewicht der Substratprobe eingestellt. Je Substratprobe sollten 4 Probenzylinder (= 4 Parallelen) befüllt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden jedoch lediglich 2 Probenzylinder je Substratprobe und Messung befüllt, damit die 36 Substrate in einem vertretbaren Zeitrahmen in zweifacher Wiederholung untersucht werden konnten. Für das Befüllen der 4 Probenzylinder je Substratprobe muss mit einem Zeitaufwand von ca. 0,5 h gerechnet werden.

Die befüllten Probenzylinder werden zur Wassersättigung auf einer perforierten Unterlage (z.B. ein Gitterrost) in einem Wasserbecken aufgestellt. Das Wasser wird erst nach dem Aufstellen der Probenzylinder langsam bis ca. 1 cm unterhalb der Probenzylinderoberkante aufgefüllt. Die Probenzylinder verbleiben für 16 Stunden im Wasserbad. Arbeitstechnisch ist es daher zu empfehlen, dass die Probenzylinder ab 16.00 Uhr (bzw. 15.00 Uhr) im wasserbefüllten Becken stehen, damit die Proben am nächsten Morgen um 08.00 Uhr (bzw. 07.00 Uhr) weiter bearbeitet werden können. Um zu verhindern, dass die Substrate im Wasserbad aufschwimmen, sind die Probenzylinder nach oben durch eine synthetische Gaze abgeschlossen, die z.B. mit einem Gummiband befestigt wird.

Nachdem die Substratproben für 16 Stunden im Wasserbad verblieben sind, werden sie auf die zuvor ebenfalls wassergesättigte Sandschicht der Unterdruckanlage gestellt. Erst wenn alle Probenzylinder mit gutem Kontakt zur Sandschicht (leichtes

Andrücken der Probenzylinder) aufgestellt sind, wird die Messbox aus der Sättigungsbox genommen und zum freien Abtropfen auf ein Gitterrost über einem Ablauf bzw. einem Wasserbecken aufgestellt. Die Substratproben bleiben für 8 Stunden auf der Sandschicht der Messbox.

Tabelle 2.11: Kurzübersicht der Arbeitsschritte der Q-Methode und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage (Zusätzlich ist die Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (dF [g / cm^3]) notwendig -> siehe Kapitel 2.2.1.3)

Wochentag	Arbeitsschritt	Dauer
Montag (nachmittags)	Bestimmung des Volumengewichts_{feucht} ($dB_{Afeucht}$) der Substratprobe	0,5 h
(nachmittags)	Einfüllen der Substratprobe mit dem gewünschten Volumengewicht _{feucht} ($dB_{Afeucht}$) in die Probenzylinder (Die Substratprobe entsprechend der mit Formel 17 errechneten Substratmasse (SM) in die Probenzylinder einwiegen)	0,5 h
(nachmittags)	Einstellen der befüllten Probenzylinder in das Wasserbecken und anschließende Wassersättigung der Substratproben Gleichzeitig sollte auch die Sandschicht der Messbox wassergesättigt werden (Einstellen der Messbox in die Sättigungsbox, die dann mit Wasser aufgefüllt wird, bis die Sandschicht Wasserglanz zeigt)	16 h
Dienstag (morgens)	Entwässern der wassergesättigten Probenzylinder auf der Unterdruckanlage (Messbox)	8 h
(nachmittags)	Erfassen der Fehlstelle , die durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder eingetreten ist (Messen der Differenz zwischen oberem Rand des Probenzylinders und der Substratoberfläche an drei Stellen entlang des Durchmessers des Probenzylinders)	0,25 h
(nachmittags)	Wiegen der mit dem angelegten Unterdruck ins Gleichgewicht gebrachten Probenzylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{feucht})	0,25 h
(nachmittags)	Trocknen der Probenzylinder mit Substrat bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz	24 h – 48 h
Donnerstag	Wiegen der trockenen Probenzylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{trocken})	0,25 h

Nach Ablauf der 8 Stunden ist davon auszugehen, dass sich ein Gleichgewicht zwischen angelegtem Unterdruck und der Wasserspannung in den Substratproben eingestellt hat. Möglichst noch auf der Messbox muss jetzt das Ausmaß von Sackung und Schrumpfung der Substratprobe im Probenzylinder gemessen werden, um die Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Ende der Messung (= dB_E [g / cm^3])

berechnen zu können. Dazu sollte die Differenz zwischen Substratoberfläche und dem oberen Rand des Probenzylinders an drei Stellen entlang des Durchmessers (rechter Rand, Zylindermitte, linker Rand) gemessen werden. Aus den drei Einzelwerten je Probenzylinder wird der Mittelwert errechnet (= h_{Sack} [cm]), der später zur Berechnung des Volumens der durch die Sackung entstandenen Fehlstelle dient. Nachdem die Fehlstelle bestimmt ist, werden die substratbefüllten Probenzylinder gewogen (= Probenzylinder_{feucht}). Danach werden die Substratproben in den Zylindern für 24 - 48 Stunden bei 105 °C im Umlufttrockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Abschließend werden die substratbefüllten Probenzylinder erneut gewogen (= Probenzylinder_{trocken}).

Um aus den so ermittelten Werten auch das Porenvolumen (PV) und die Luftkapazität (AC) berechnen zu können, ist es notwendig, zusätzlich die Dichte der Festsubstanz der Substratprobe (d_F) zu bestimmen. Die dazu notwendigen Arbeitsschritte sind im Kapitel 2.2.1.3 beschrieben.

In Tabelle 2.11 ist die Arbeitsvorschrift der Q-Methode nochmals in Kurzform zusammengetragen, die bei Bestimmung der Luft- und Wasserkapazität eingehalten werden sollte.

2.2.2.4 Berechnung der Luft- und Wasserkapazität

Mit Hilfe der mit der Q-Methode ermittelten Daten einer Substratprobe lässt sich lediglich deren Wasserkapazität direkt berechnen. Zur Bestimmung der Luftkapazität muss zusätzlich noch das Porenvolumen (PV) bestimmt werden.

Für die Berechnung der Wasserkapazität (WC [Vol. %]) wird das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (d_{B_E}) benötigt. Dazu muss zunächst das Ausmaß der Sackung und Schrumpfung der Substratprobe im Probenzylinder berechnet werden.

Formel (18):

Volumen der Fehlstelle, die durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder entstanden ist (V_{Sack} [ml bzw. cm^3])

$$V_{\text{Sack}} [\text{ml bzw. cm}^3] = h_{\text{Sack}} [\text{cm}] \times r^2 [\text{cm}] \times \pi$$

- h_{Sack} = Mittelwert der drei Höhenmessungen [cm] zwischen dem oberen Rand des Probenzylinders und der Substratoberfläche [cm]
- r = Radius des Probenzylinders [cm]

Aus den drei Höhenmessungen (cm) zwischen dem oberen Rand des Probenzylinders und der Substratoberfläche wird durch Bildung des Mittelwertes zuerst h_{Sack} [cm] berechnet. Mit Hilfe von h_{Sack} kann dann das Volumen der Fehlstelle (V_{Sack} [ml]) berechnet werden (Formel 18). Um schließlich die Lagerungsdichte der Substratprobe im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) berechnen zu können, ist es notwendig, das um das Volumen der Fehlstelle (V_{Sack} [ml]) korrigierte substratbefüllte Volumen des Probenzylinders (V_{Subs} [ml]) zu ermitteln. Dieses ist mit Hilfe der Formel 19 möglich.

Formel (19):

Substratbefülltes Volumen des Probenzylinders zum Ende der Messung

(V_{Subs} [ml])

$$V_{\text{Subs}} [\text{ml}] = V_{\text{Zyl}} [\text{ml}] - V_{\text{Sack}} [\text{ml}]$$

- V_{Zyl} = Volumen des Probenzylinders, hier z.B. 380 ml [ml]
- V_{Sack} = Volumen der Fehlstelle, die durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder entstanden ist [ml]

Aus dem substratbefüllten Volumen des Probenzylinders (V_{Subs} [ml]) zum Ende der Messung und der nach der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz ermittelten Masse

Formel (20):

Lagerungsdichte der Substratprobe zum Ende der Messung im Probenzylinder

(dB_E [g / cm³])

$$dB_E [\text{g} / \text{cm}^3] = \frac{\text{Substrat}_{\text{trocken}} [\text{g}]}{V_{\text{Subs}} [\text{ml bzw. cm}^3]}$$

- $\text{Substrat}_{\text{trocken}} = \text{Probenzylinder}_{\text{trocken}} [\text{g}] - \text{Tara Zylinder} [\text{g}]$
- V_{Subs} = Substratbefülltes Volumen des Probenzylinders zum Ende der Messung [ml bzw. cm³]

des trockenen Substrats ($\text{Substrat}_{\text{trocken}} [\text{g}] = \text{Probenzylinder}_{\text{trocken}} [\text{g}] - \text{Tara Zylinder} [\text{g}]$), kann dann die Lagerungsdichte der Substratprobe zum Ende der Messung im Probenzylinder (dB_E [g / cm³]) berechnet werden (siehe Formel 20). Aus der

Lagerungsdichte der Substratprobe zum Ende der Messung (dB_E) und dem gravimetrischen Wassergehalt (Wg [Gew. %]) der Substratprobe, der sich nach Formel 21 berechnet, lässt sich durch Multiplikation der volumetrische Wassergehalt (Wv [Vol. %]) bzw. die Wasserkapazität der Substratprobe (WC [Vol. %]) errechnen (Formel 22).

Formel (21):

Gravimetrischer Wassergehalt (Wg [Gew. %])

$$Wg \text{ [Gew. \%]} = \frac{\text{Substrat}_{\text{feucht}} \text{ [g]} - \text{Substrat}_{\text{trocken}} \text{ [g]}}{\text{Substrat}_{\text{trocken}} \text{ [g]}} \times 100$$

- $\text{Substrat}_{\text{feucht}}$ = Probenzylinder_{feucht} [g] - Tara Zylinder [g]
- $\text{Substrat}_{\text{trocken}}$ = Probenzylinder_{trocken} [g] - Tara Zylinder [g]

Formel (22):

Volumetrischer Wassergehalt (Wv [Vol. %])

Wasserkapazität ($WC = \underline{W}$ ater \underline{c} apacity [Vol. %])

$$Wv \text{ bzw. } WC \text{ [Vol. \%]} = Wg \text{ [Gew. \%]} \times dB_E \text{ [g / cm}^3\text{]}$$

- dB_E = Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Ende der Messung [g / cm³]
- Wg = gravimetrischer Wassergehalt der Substratprobe [Gew. %]

Formel (23):

Porenvolumen (PV [Vol. %])

$$PV \text{ [Vol. \%]} = \left(1 - \frac{dB_E \text{ [g / cm}^3\text{]}}{dF \text{ [g / cm}^3\text{]}} \right) \times 100$$

- dB_E = Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Ende der Messung [g / cm³]
- dF = Dichte der Festsubstanz [g / cm³] => siehe Kapitel 2.2.1.3

Zur Berechnung der Luftkapazität (AC [Vol. %]) ist es notwendig das Porenvolumen der Substratprobe zu bestimmen. Dazu muss, gemäß der in Kapitel 2.2.1.3 geschilderten Vorgehensweise, zuerst die Dichte der Festsubstanz (dF) der Substratprobe bestimmt werden, bevor dann, zusammen mit der Lagerungsdichte zum Ende der Messung (dB_E) und unter Verwendung der Formel 23, das Porenvolumen (PV) errechnet werden kann.

Die Luftkapazität (AC) berechnet sich aus der Differenz von Porenvolumen (PV) und Wasserkapazität (WC), wie aus Formel 24 zu ersehen ist.

Formel (24):

Luftkapazität (AC = Air capacity [Vol. %])

$$\text{AC [Vol. \%]} = \text{PV [Vol. \%]} - \text{WC [Vol. \%]}$$

- PV = Porenvolumen [Vol. %]
- WC = Wasserkapazität [Vol. %]

Mit der Luftkapazität ist der letzte Kennwert des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten ermittelt worden, der mit Hilfe der Daten der Q-Methode bestimmt werden kann. Die Erstellung einer kompletten Wasserspannungskurve und damit die Ermittlung wichtiger Kennwerte zur Steuerung einer Bewässerung, wie das verfügbare Wasser (AW), das leicht verfügbare Wasser (EAW) und das schwerer verfügbare Wasser (LRAW), ist auf diese Weise nicht möglich. Dazu bedarf es der oben beschriebenen ISHS-Methode bzw. der ebenfalls in der Abteilung Baumschule entwickelten M-ISHS-Methode, die im Gegensatz zur ISHS-Methode ein bestimmtes Volumengewicht bzw. eine bestimmte Lagerungsdichte der Substratprobe (z.B. die Topffestigkeit im Topf bzw. Container) im Probengefäß bei der Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten berücksichtigen kann (WREDE und BOHNE 2000b).

Um zu überprüfen, ob die mit der Q-Methode ermittelten Werte für die Luftkapazität (AC) und die Wasserkapazität (WC) der 36 Substrate in Beziehung zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode stehen, wurden der dazugehörige Pearsonsche Korrelationskoeffizient (r) bzw. das Bestimmtheitsmaß ($R = r^2$) ermittelt. Ein hohes Bestimmtheitsmaß deutet auf einen engen Zusammenhang der entsprechenden Kennwerte hin, die mit den beiden Methoden ermittelt wurden.

2.2.3 Die modifizierte ISHS-Methode (M-ISHS-Methode)

Die M-ISHS-Methode (BOHNE et al. 1998; WREDE et al. 1999; WREDE und BOHNE 2000b) bietet die Möglichkeit, das Volumengewicht, das im Topf bzw. im Container vorliegt, bei der Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts zu berücksichtigen, wodurch sie sich deutlich von der ISHS-Methode unterscheidet. Beiden Methoden ist jedoch gemeinsam, dass sie die Möglichkeit bieten, eine komplette Wasserspannungskurve für Substrate zu erstellen, wobei die M-ISHS-Methode dabei jedoch die Verhältnisse im Topf bzw. Container berücksichtigt. Dadurch bietet die M-ISHS-Methode die Möglichkeit, eine Bewässerung so zu steuern, dass die Speichereigenschaften des Substrats für Wasser und Luft berücksichtigt werden können, wodurch überschüssige Wassergaben und eine Auswaschung von Nährstoffen vermindert werden, was unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten von Vorteil ist. WREDE und BOHNE (1999, 2000a) beschreiben eine auf den physikalischen Kennwerten der M-ISHS-Methode basierende Steuerung einer Bewässerung.

2.2.3.1 Gemeinsamkeiten von ISHS und M-ISHS-Methode

Da die M-ISHS-Methode durch Modifizierungen aus der ISHS-Methode hervorgegangen ist, weist sie zahlreiche Gemeinsamkeiten mit der ISHS-Methode auf.

Zunächst ist es mit der M-ISHS-Methode möglich, die gleichen physikalischen Kennwerte zu ermitteln, die auch mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt werden können (siehe Tabelle 2.8), allerdings bei der M-ISHS-Methode unter Berücksichtigung eines bestimmten Volumengewichts. Daneben entspricht der Aufbau der Unterdruckanlage (siehe Kapitel 2.2.1.1 und Abb. 2.1) dem der ISHS-Methode. Außerdem werden auch die gleichen Probenzylinder verwendet, wobei für die M-ISHS-Methode jedoch lediglich der untere Probenzylinder mit abnehmbarem Haltering für die Gaze und der synthetischen Gaze (siehe Abb. 2.2 unter den Punkten 3, 4 und 5) benötigt wird.

Genau wie bei der ISHS-Methode verbleiben die substratbefüllten, zuvor wassergesättigten Probenzylinder für 48 Stunden auf der Unterdruckanlage, wo sie mit einem Unterdruck von 10, 50 oder 100 hPa bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes entwässert werden. Außerdem entspricht die Ermittlung der Dichte der Festsubstanz und die darauf basierende Berechnung des Porenvolumens der bei der ISHS-Methode geschilderten Vorgehensweise (Kapitel 2.2.1.3). Im Prinzip wird auch mit den gleichen Formeln zur Berechnung der Kennwerte der Luft- und Wasserkapazität

gearbeitet, nur dass zur Berechnung des Volumengewichts im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) bei der M-ISHS-Methode die im Verlauf der Messung aufgetretene Sackung und Schrumpfung des Substrats erfasst werden muss (siehe auch BOHNE et al. 1998; WREDE et al. 1999; WREDE und BOHNE 2000b).

2.2.3.2 Unterschiede zwischen ISHS und M-ISHS-Methode

Sollen die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten mit Hilfe der M-ISHS-Methode ermittelt werden, so wird im Gegensatz zur ISHS-Methode auf die Vorentwässerung der zuvor für 12 Stunden wassergesättigten Substratproben in einem 2 l Probenzylinder bei 50 hPa verzichtet (siehe auch Tab. 2.9 die ersten 4 Arbeitsschritte). Außerdem werden die Substratproben nicht in Doppelzylinder gefüllt, wobei möglichst eine künstliche Verdichtung des Substrats verhindert werden muss. Vielmehr ist es zur Durchführung der M-ISHS-Methode notwendig, dass zuvor ein Volumengewicht bestimmt wird, das dann durch Einwiegen der Substratprobe in den unteren Probenzylinder hergestellt wird. Es kann mit einem beliebigen Volumengewicht gearbeitet werden. Für die praxisrelevante Aussagekraft der so ermittelten Kennwerte sollte jedoch möglichst mit einem Volumengewicht gearbeitet werden, das dem Volumengewicht entspricht, das beim Gärtner im Topf oder Container gefunden wird. In dieser Arbeit wurde neben der praxisüblichen Topffestigkeit auch das Volumengewicht VDLUFA bei der Messung berücksichtigt (siehe auch Tab.2.10).

Bei der ISHS-Methode werden die substratbefüllten Doppelzylinder für 24 Stunden in einem Wasserbad zur Wassersättigung aufgestellt. Da bei der M-ISHS-Methode jedoch auf die anfängliche Wassersättigung und die Vorentwässerung für 48 Stunden bei 50 hPa verzichtet wird (siehe oben), werden die substratbefüllten Probenzylinder für 72 Stunden im Wasserbad belassen.

Nachdem sich im Verlauf der Entwässerung auf der Unterdruckanlage ein Gleichgewicht zwischen dem jeweils angelegten Unterdruck (10, 50, 100 hPa) und der Wasserspannung in der Substratprobe eingestellt hat, wird die Sackung und Schrumpfung der Substratprobe durch Erfassung der Fehlstelle bestimmt (siehe Formel 18) und das substratbefüllte Volumen des Probenzylinders zum Ende der Messung berechnet (siehe Formel 19). Die Lagerungsdichte der Substratprobe zum Ende der Messung im Probenzylinder (dB_E) ergibt sich dann gemäß Formel 19. Im Prinzip entsprechen die notwendigen Arbeitsschritte zur Berechnung von dB_E den im Kapitel 2.2.2.4 geschilderten Arbeitsschritten der Q-Methode, wobei sich lediglich

Höhe und Durchmesser des Probenzylinders von dem der Q-Methode unterscheiden. Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen M-ISHS-Methode und ISHS-Methode ist, dass zur Durchführung der M-ISHS-Methode lediglich sieben Tage benötigt werden. In der Tabelle 2.12 sind die notwendigen Arbeitsschritte der M-ISHS-Methode zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 2.12: Kurzübersicht der Arbeitsschritte der M-ISHS-Methode (BOHNE et al. 1998; WREDE et al. 1999; WREDE und BOHNE 2000b) und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage (Zusätzlich ist die Bestimmung der Dichte der Festsubstanz ($dF [g / cm^3]$) notwendig -> siehe Kapitel 2.2.1.3)

Wochentag	Arbeitsschritt	Dauer
Donnerstag (vormittags)	Bestimmung des Volumengewichts_{feucht} ($dB_{Afeucht}$) der Substratprobe	0,5 h
(vormittags)	Einfüllen der Substratprobe mit dem gewünschten Volumengewicht _{feucht} ($dB_{Afeucht}$) in die Probenzylinder (Die Substratprobe entsprechend der mit Formel 17 errechneten Substratmasse (SM) in die Probenzylinder einwiegen; siehe auch Kapitel 2.2.2.2)	0,5 h
(vormittags)	Einstellen der befüllten Probenzylinder in das Wasserbecken und anschließende Wassersättigung der Substratproben	72 h
Montag (vormittags)	Entwässern der wassergesättigten Probenzylinder auf der Unterdruckanlage. Es werden jeweils 4 Probenzylinder je Unterdruckstufe (10, 50, 100 hPa) aufgestellt (Unterdruck wird <u>von der halben Höhe</u> des Probenzylinders gemessen)	48 h
Mittwoch (vormittags)	Erfassen der Fehlstelle , die durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder eingetreten ist (Messen der Differenz zwischen oberem Rand des Probenzylinders und der Substratoberfläche an drei Stellen entlang des Durchmessers des Probenzylinders)	0,25 h
(vormittags)	Wiegen der mit dem angelegten Unterdruck ins Gleichgewicht gebrachten Probenzylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{feucht})	0,25 h
(vormittags)	Trocknen der Probenzylinder mit Substrat bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz	24 h – 48 h
Freitag (vormittags)	Wiegen der trockenen Probenzylinder mit Substrat (= Probenzylinder _{trocken})	0,25 h

In dieser Arbeit wurde nach der in Tabelle 2.12 geschilderten Methodenvorschrift vorgegangen, die Anzahl der Parallelen je Unterdruckstufe und Substratprobe wurde aber auf zwei reduziert.

Die Berechnung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts kann sinngemäß den Kapiteln 2.2.1.4 und 2.2.2.4 entnommen werden. Weitere Informationen geben BOHNE et al. (1998), WREDE et al. (1999) sowie WREDE und BOHNE (2000b).

2.2.4 Siebmethode

Analog zu den Böden bildet ein zusammenhängendes Porensystem auch bei Erden und Substraten die räumliche Voraussetzung zum Wachstum der Pflanzenwurzel. Für den Wasser- und Lufthaushalt eines Substrats ist jedoch nicht nur das Porenvolumen (PV) von entscheidender Bedeutung, sondern viel mehr die Porengrößen- oder Porenraumverteilung, also der Anteil an Poren, der bei einer bestimmten Wasserspannung mit Luft oder Wasser gefüllt ist. Für die Luftkapazität sind besonders die Grobporen wichtig, da diese schon bei geringen Wasserspannungen entwässern und damit luftführend sind (GEISLER 1978; MOHR 1978; 1980; AUGUSTIN und GÜNTHER 1989; SCHLICHTING et al. 1995).

Aus der Bodenkunde ist bekannt, dass die Porengrößenverteilung wesentlich durch die Größe und Form der Partikel, also durch die Korngrößenverteilung, beeinflusst wird. Diese lässt sich für die Kies- und Sandfraktionen (Untergrenze liegt bei einer Korngröße von ca. 100 µm) durch Siebung bestimmen (HARTGE und HORN 1999; SCHLICHTING et al. 1995).

Auch bei Torfen und einigen Kultursubstraten wurde in der Vergangenheit häufiger der Versuch unternommen, über die Ermittlung der Korngrößenverteilung durch Siebung auf die Luft- und Containerkapazität der untersuchten Substratproben schließen zu können (z.B. LIMBERS und REHME 1997; SCHARPF 1997; VERHAGEN 1995; 1997b ; WEVER und VERHAGEN 1995). Dabei sind in einigen Fällen relativ enge Beziehungen zwischen einzelnen Siebfraktionen und der Luft- bzw. der Containerkapazität gefunden worden.

Aus diesem Grund wurde auch in dieser Arbeit der Versuch unternommen, über die Analyse der Korngrößenverteilung der 36 Substrate eine enge Korrelation einzelner Siebfraktionen zur Luft- bzw. Containerkapazität zu finden. Das Ziel dabei war es, eine Siebmethode zu finden, die den Substratproduzenten in die Lage versetzt, den laufenden Produktionsprozess hinsichtlich der Luftkapazität des Substrats schnell kontrollieren zu können, ohne auf eine zeitaufwendige Labormethode zurückgreifen zu müssen. Dazu wurden die Substrate mit zwei verschiedenen Siebsätzen und nach unterschiedlichen Vorbehandlungen gesiebt.

2.2.4.1 Vorbehandlungen der Substratproben

Vor der Siebung wurden die 13 Standardsubstrate auf drei unterschiedlichen Wegen getrocknet, was in dieser Arbeit als Vorbehandlung bezeichnet wird. Ziel war es, die optimale Vorbehandlung zu finden, d. h. die Vorbehandlung, die zu den engsten Korrelationen zur Luft- bzw. Containerkapazität führt.

Die erste Vorbehandlungsvariante zeichnet sich dadurch aus, dass die Substratproben zur Siebung direkt ohne Trocknung aus dem Substratsack genommen wurden (= **Vorbehandlung_{feucht}**). Bei der **Vorbehandlung_{schrantrocken}** wurden die Substratproben für 48 Stunden bei 25 °C im Trockenschrank getrocknet, wobei die Proben täglich dreimal umgerührt wurden. Je Substratprobe wurden dazu jeweils ca. 1000 ml in einer Pikierschale ausgebreitet und in den Trockenschrank gestellt. Mit **Vorbehandlung_{lufttrocken}** wird die Vorbehandlung bezeichnet, bei der ca. 1000 ml Substrat im Juni 1998 für 48 Stunden im Gewächshaus getrocknet wurde. Dazu wurden die Substratproben in 4 - 5 cm starker Schicht auf einer Papierunterlage ausgebreitet.

Die drei geschilderten Vorbehandlungen wurden nur an den 13 Standardsubstraten und nur bei der Siebung mit dem Siebsatz nach R.H.P (WEVER und VERHAGEN 1995) getestet.

2.2.4.2 Siebsätze

Zur Siebung der 36 Substrate wurden zwei unterschiedliche Siebsätze untersucht. Mit dem Siebsatz nach DIN 11540, der im Folgenden DIN-Siebsatz genannt wird, wurden alle 36 Substrate lediglich nach der Vorbehandlung_{schrantrocken} gesiebt. Der Siebsatz setzt sich aus sieben Sieben zusammen, die einen Durchmesser von 20 cm aufweisen. Die unterschiedlichen Siebe weisen eine Maschenweite von 0,2 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 5,0 mm, 10,0 mm und 16,0 mm auf. Die Siebe wurden nach ihrer Maschenweite von grob (oben) nach fein übereinander gestapelt, wobei unter dem Sieb mit der feinsten Maschenweite noch eine Auffangschale eingebaut war, die den gleichen Durchmesser aufweist wie die Siebe. Je Substratvariante und Vorbehandlung wurde mit lediglich drei Wiederholungen gesiebt, da die Siebung mit dem DIN-Siebsatz erst nachträglich in die Arbeit aufgenommen wurde, nachdem Arbeiten in der Abteilung Baumschule gezeigt haben, dass häufig die kleinen Fraktionen unter 1,0 mm Maschenweite, verglichen mit den Fraktionen größerer Maschenweite, eine engere Korrelation zur Luft- bzw. Containerkapazität zeigen.

Der Siebsatz nach R.H.P. (WEVER und VERHAGEN 1995), der im folgenden RHP-Siebsatz genannt wird, besteht aus lediglich sechs Sieben und einer Auffangschale.

Die Siebe wurden entsprechend der oben genannten Reihenfolge nach ihrer Maschenweite zusammengestellt, wobei die Auffangschale wieder den unteren Abschluss bildet. Der Durchmesser der Siebe und der Auffangschale des RHP-Sieb-satzes beträgt ebenfalls 20 cm, wobei die unterschiedlichen Siebe durch Maschen-weiten von 1,0 mm, 2,0 mm, 4,0 mm, 8,0 mm, 16,0 mm und 31,5 mm gekennzeich-net sind. Alle 36 Substrate wurden nach der Vorbehandlung_{schranktrocken} gesiebt. Zu-sätzlich wurden die 13 Standardsubstrate auch nach der Vorbehandlung_{lufttrocken} und der Vorbehandlung_{feucht} gesiebt. Je Substratvariante und Vorbehandlung wurde mit jeweils vier Wiederholungen gesiebt.

2.2.4.3 Arbeitsschritte der Siebmethode

Die Siebung der Substratproben erfolgte mit einer Analysensiebmaschine der Firma RETSCH (Typ: AS 200 basic) bei einer Siebfrequenz von 3000 / min, also höchster Amplitude. Die Dauer der Siebung pro Substratvariante, Vorbehandlung und Wiederholung betrug 10 min, wobei jeweils 30 g von den lufttrockenen und schranktrockenen Substratproben bzw. 50 g der feuchten Substratproben auf 0,1 g genau eingewogen wurden.

Vor jedem neuen Siebdurchgang wurden die einzelnen Siebe und die Auffangschale gewogen und deren Masse notiert (= Tara Sieb). Nach Ablauf der 10 min erfolgte eine erneute Feststellung des Gewichts der einzelnen Siebe mit der entsprechenden Substratfraktion (= Sieb mit Sf). Die Masse der Substratfraktion auf einem Sieb (Sf) errechnet sich aus der Differenz beider Größen (siehe Formel 25).

Formel (25):

Masse der Substratfraktion in einem Sieb (Sf [g])

$$\mathbf{Sf [g] = Sieb\ mit\ Sf [g] - Tara\ Sieb [g]}$$

- Sieb mit Sf = Masse des Siebs mit der entsprechenden Substratfraktion [g]

- Tara Sieb = Masse des Siebs [g]

Der Anteil einer Substratfraktion (= Fraktionsanteil [Gew. %]) an der Substratprobe errechnet sich nach Formel 26, wobei der Mittelwert der Masse der Substratfraktion

(Sf) aus drei bzw. vier Wiederholungen je Substratprobe, Vorbehandlung und Siebsatz in die Berechnung eingeht.

Als Maß für den Zusammenhang zwischen einer Substratfraktion bzw. deren Fraktionsanteil [Gew. %] und den physikalischen Kennwerten Luftkapazität (AC) bzw. Containerkapazität (CC) diente der Pearsonsche Korrelationskoeffizient (r) bzw. das Bestimmtheitsmaß ($R = r^2$).

Formel (26):

Anteil einer Substratfraktion an der Substratprobe (= Fraktionsanteil [Gew. %])

$$\text{Fraktionsanteil [Gew. \%]} = \frac{\overline{Sf} [\text{g}] \times 100}{\sum Sfi [\text{g}]}$$

- \overline{Sf} = Mittelwert der Masse einer Siebfraktion aus 3 bzw. 4 Wiederholungen [g]
- $\sum Sfi$ = Summe aller Fraktionen [g]

Die Regressionsgerade, die über die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate ermittelt wurde, zeigt den graphischen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen physikalischen Kennwert und der betrachteten Siebfraktion, die Gleichung der Regressionsgeraden zeigt den rechnerischen Zusammenhang zwischen beiden Größen.

2.5 Mathematische und statistische Auswertung

Die Berechnung der einzelnen physikalischen Kennwerte aus den Messdaten sowie die Berechnung des arithmetischen Mittels und des Medians erfolgten mit Hilfe der Software MS Excel 97 (MICROSOFT INC.). Obwohl die geringe Anzahl an Wiederholungen die Berechnung und Angabe der Kennwerte als Median nahelegt (KÖHLER et al. 1984, WEBER 1988, WEICHERT 2000), wurde, auch auf Anraten von WEICHERT (2000), doch dem arithmetischen Mittel der Vorrang gegeben, da die varianzanalytische Prüfung signifikanter Unterschiede (ANOVA = Analysis of Variance) zwischen den physikalischen Kennwerten, die mit den unterschiedlichen getesteten Methoden ermittelt wurden, mit dem arithmetischen Mittel arbeitet (KÖHLER et al. 1984; MÜHLBACH 1988, WEICHERT 2000).

Korrelations- und regressionsanalytische Berechnungen sowie die graphische Darstellung der Ergebnisse dieser Berechnungen wurden mit MS Excel 97 (MICROSOFT INC.) durchgeführt.

Die oben erwähnte ANOVA zur Prüfung signifikanter Unterschiede zwischen den Mess- und Kennwerten erfolgte jeweils anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse. Diese varianzanalytischen Berechnungen und Adjustierungen erfolgten mit Hilfe der Software SAS (Statistical Analysis System) PC Version 6.12 (SAS INSTITUT INC.) sowie mit MS Excel 97 (MICROSOFT INC.).

Allen statistischen Berechnungen lag eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ zugrunde, und sie erfolgten unter Beratung von Herrn Dr. M. WEICHERT vom Lehrgebiet für Bioinformatik der Universität Hannover. Als weitere Hilfsmittel zur statistischen Auswertung und graphischen Darstellung aller Ergebnisse müssen DUFNER et al. (1992), KAMENZ und VONHOEGEN (1998), KÖHLER et al. (1984), MÜHLBACH (1988), PRECHT (1987) sowie WEBER (1986) genannt werden, die damit im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr gesondert erwähnt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Dichte der Festsubstanz (dF)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in diesem Kapitel die Ergebnisse für die 13 Standardsubstrate und die 23 Mischsubstrate getrennt vorgestellt.

Wie aus Abb. 3.1 zu entnehmen ist, zeichnen sich die Substrate, die einen höheren Gehalt an mineralischen Komponenten (insbesondere Ton) besitzen, auch durch eine höhere Dichte der Festsubstanz (dF) aus. Mit einem dF Wert von $1,69 \text{ g / cm}^3$ weist das Weißtorfsubstrat T1 die geringste Dichte der Festsubstanz auf. Auch die anderen reinen Torfsubstrate CF, PH, SW1, SW3 und T2 zeichnen sich durch geringe dF Werte zwischen $1,70$ und $1,72 \text{ g / cm}^3$ aus.

Die größte Dichte der Festsubstanz wurde für das tonhaltige Substrat ET ermittelt, bei dem der dF Wert bei $2,19 \text{ g / cm}^3$ liegt. Ähnlich hohe Werte wurden auch für die ebenfalls tonhaltigen Substrate EP ($2,11 \text{ g / cm}^3$) und EPr ($2,10 \text{ g / cm}^3$) bestimmt.

Die Substrate FT ($2,02 \text{ g / cm}^3$) und SV ($2,06 \text{ g / cm}^3$) weisen ebenfalls dF Werte von mehr als $2,0 \text{ g / cm}^3$ auf, während die Dichte der Festsubstanz von RK und ST mit $1,99$ bzw. $1,94 \text{ g / cm}^3$ etwas unterhalb von $2,0 \text{ g / cm}^3$ liegt. Die vier zuletzt genannten Substrate weisen, genau wie die drei Einheitserden (EP, EPr, ET), neben

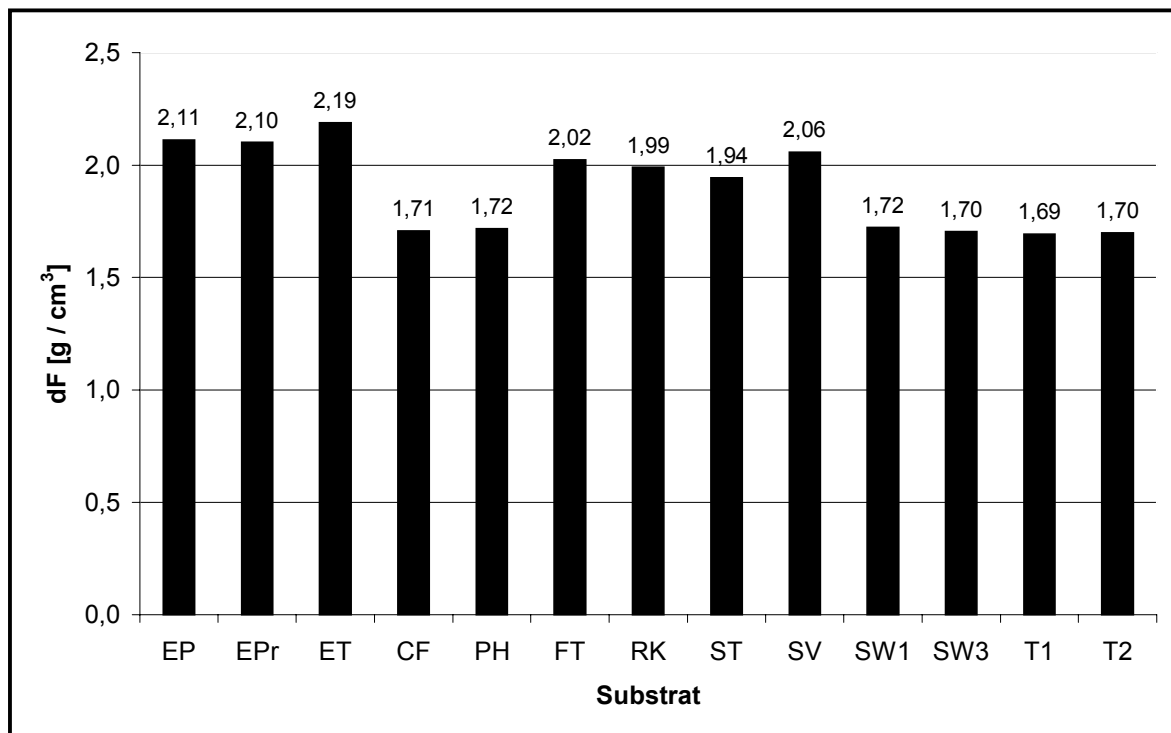


Abb. 3.1: Dichte der Festsubstanz (dF) der untersuchten 13 Standardsubstrate (Mittelwerte, n = 2)

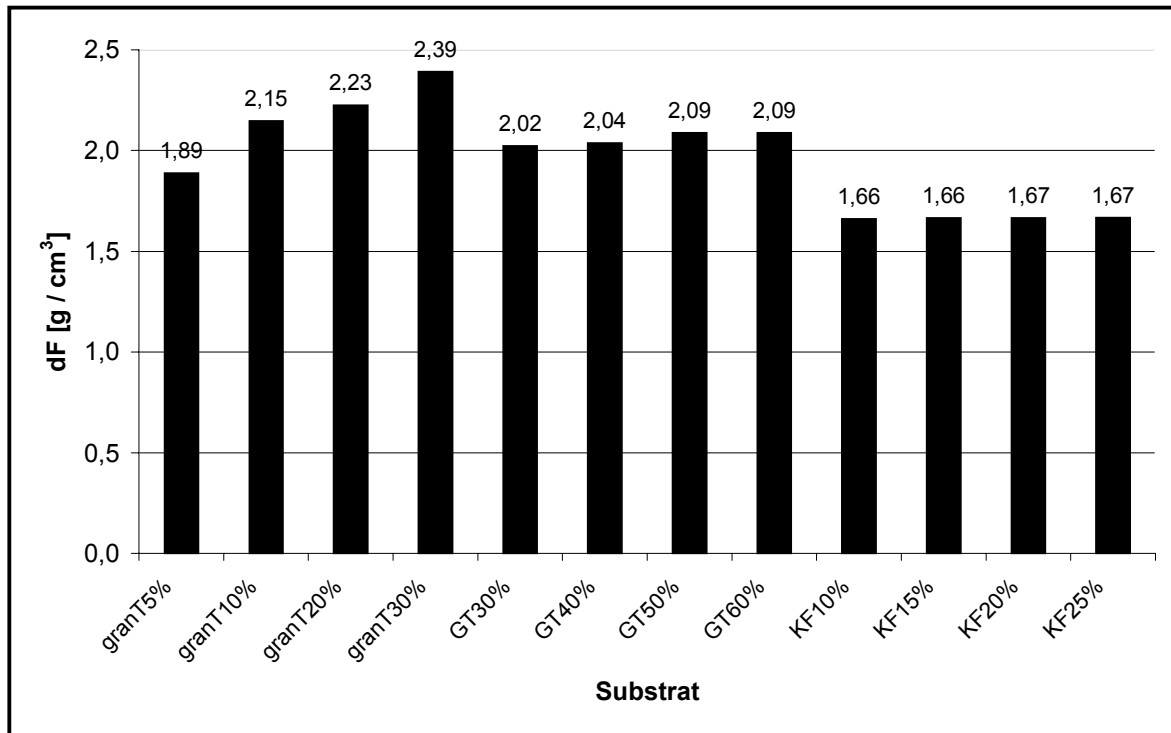


Abb. 3.2: Dichte der Festsubstanz (dF) von 12 der untersuchten 23 Mischsubstrate (Mittelwerte, n = 2)

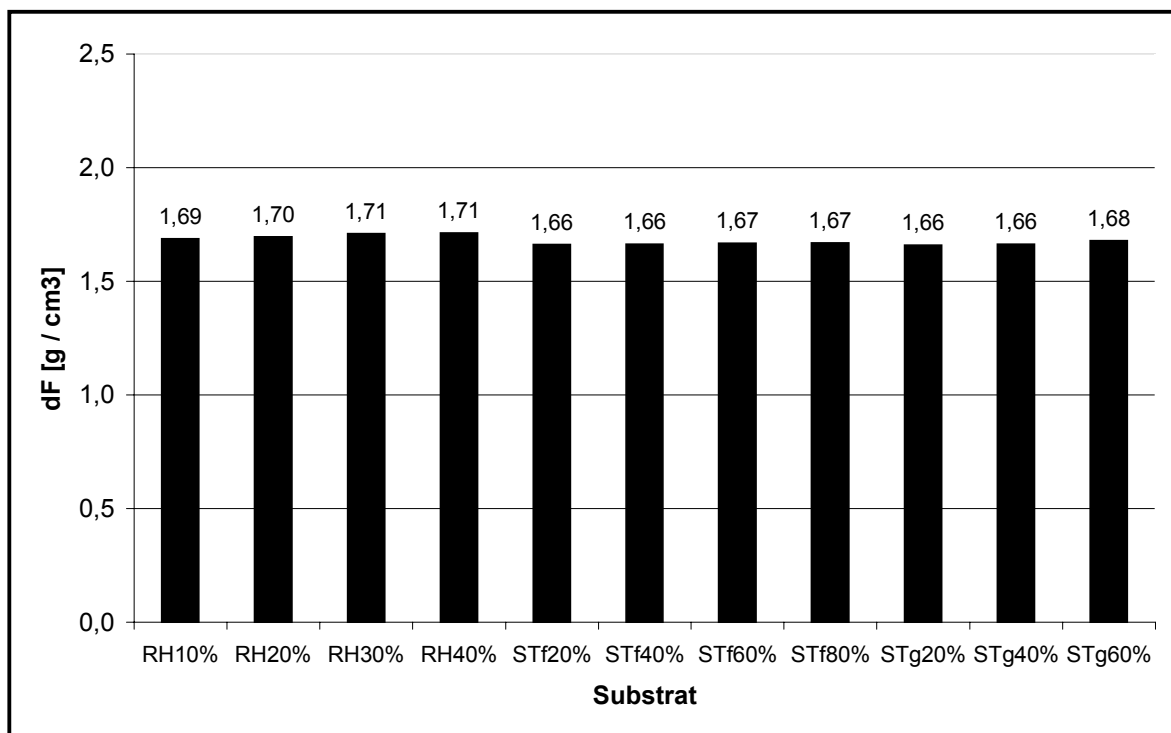


Abb. 3.3: Dichte der Festsubstanz (dF) von 11 der untersuchten 23 Mischsubstrate (Mittelwerte, n = 2)

Weißtorf u.a. auch Ton als Zuschlagstoff auf.

Auch unter den 23 Mischsubstraten zeichnen sich die tonhaltigen Mischungen durch eine große Dichte der Festsubstanz (dF) aus (Abb. 3.2). Obwohl sich der Tongehalt bei den Mischungen mit GT von GT30% auf GT60% verdoppelt, verändern sich die ermittelten dF-Werte jedoch kaum (GT30% = 2,02 g / cm³; GT60% = 2,09 g / cm³). Bei den Mischungen mit granuliertem Ton (granT) nehmen die dF-Werte dagegen mit dem Tongehalt deutlich zu (granT5% = 1,89 g / cm³; granT30% = 2,39 g / cm³). Allerdings fällt bei den granT-Mischungen auf, dass die dF-Werte nicht mit der Gleichmäßigkeit zunehmen wie der Tongehalt. Besonders zwischen den Substraten granT10% und granT20% wird deutlich, dass sich der dF-Wert nur wenig verändert, obwohl der Tongehalt bei granT20% doppelt so hoch ist. Zwischen granT5% und granT10% führte eine Verdoppelung des Tongehalts dagegen zu einem deutlichen Anstieg des dF-Werts (siehe auch Abb. 3.2). Eine mögliche Erklärung für das uneinheitliche Verhalten der tonhaltigen Mischsubstrate bezüglich ihrer dF-Werte könnte eine Schwachstelle in der Methode zur Bestimmung der dF-Werte sein. Da die Veraschung bei 550°C zu einem Wasserverlust (Kristallwasser) aus dem Ton und damit zu einem zusätzlichen Gewichtsverlust führt, wird dadurch der Anteil an mineralischer Substanz und damit auch die Dichte der Festsubstanz (dF) unterschätzt (siehe auch Formeln 1, 2 und 3 Seite 19). Außerdem könnte das geringe Probenvolumen (2 – 10 g einer gemahlenden, lufttrockenen Probe) dazu führen, dass die Probe, an der die Bestimmung von dF erfolgt, weniger Ton enthält als die Laborprobe an sich, insbesondere bei dem stark aggregierten Grubenton (GT), der nicht gleichmäßig über die Substratprobe verteilt ist.

Die Substrate KF, RH, STf und STg verfügen über deutlich kleinere dF Werte, die sich im Bereich von 1,66 g / cm³ und 1,71 g / cm³ bewegen, wie aus den Abbildungen 3.2 und 3.3 deutlich wird. In allen vier Fällen handelt es sich um rein organische Substrate, mit Kokosfaser (KF), Rindenhumus (RH) oder unterschiedlich strukturiertem Schwarztorf (STf und STg) als Mischkomponente zum Weißtorf.

3.2 Ergebnisse der ISHS-Methode

Die Untersuchung der 13 Standardsubstrate und 23 Mischsubstrate mit Hilfe der ISHS-Methode ermöglicht die Bestimmung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts der einzelnen Substrate sowie die graphische Darstellung dieser Kennwerte in Form einer Wasserspannungskurve. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden auch hier zuerst die Ergebnisse der 13 handelsüblichen Standardsubstrate

vorgestellt, bevor auf die entsprechenden Ergebnisse der 23 Mischsubstrate eingegangen wird.

3.2.1. Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts

Da im Rahmen der Gütesicherung der Kultursubstrate vor allen Dingen die Luft- (AC) und Container- (CC) bzw. Wasserkapazität (WC) der Substrate eine große Rolle spielen, werden die Ergebnisse zu diesen beiden Kennwerten in eigenen Kapiteln vorgestellt, bevor dann, u.a. in Form von Wasserspannungskurven, auf die übrigen Kennwerte eingegangen wird. Die Porenvolumina (PV) der einzelnen Substrate werden zusammen mit ihren Werten für die Luftkapazität vorgestellt, da zur Berechnung der Luftkapazität neben der Containerkapazität auch das Porenvolumen des betreffenden Substrats benötigt wird. In Tabelle A1 des Anhangs sind alle wichtigen Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts der untersuchten 36 Substrate zusammenhängend aufgeführt, wobei dort sowohl der Median als auch der Mittelwert sowie die Standardabweichung (s) der Kennwerte angegeben sind.

3.2.1.1 Containerkapazität (CC)

Die Werte für die Containerkapazität der 13 untersuchten Standardsubstrate bewegen sich im Bereich von 83,5 Vol. % bei PH als Maximalwert der Standardsubstrate und 56,6 Vol. % bei RK als Minimalwert (Abb. 3.4). Bei den anderen 10 Standardsubstraten wurde eine Containerkapazität zwischen 77 und 82 Vol. % ermittelt. Einen niedrigen Wert weist auch FT mit 68,1 Vol. % auf. Die Containerkapazität von 77,9 Vol. % von EPr basiert offenbar auf einem Messfehler (siehe Tabelle A1), so dass der hier angegebene Mittelwert aus vier Messungen die tatsächliche Containerkapazität des Substrats durch den falschen, zu hohen Messwert überschätzt.

In Abb. 3.5 und Abb. 3.6 sind die Werte der 23 untersuchten Mischsubstrate abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Containerkapazität der Mischsubstrate zwischen 86,2 Vol. % (STg60%) und 54,1 Vol. % (granT30%) bewegt. Damit ist bei der Containerkapazität der 23 Mischsubstrate eine Differenz von 32,1 Vol. % zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert zu beobachten.

Die acht tonhaltigen Mischungen, und unter diesen besonders die vier Substrate mit granuliertem Ton (granT), weisen eine Containerkapazität von deutlich unter 70 Vol. % auf. Aber auch die Werte für die vier Mischungen mit Kokosfasern (KF) liegen deutlich unter 70 Vol. %, die von KF25% mit 59,4 Vol.% sogar unter 60 Vol. % (Abb.3.5).

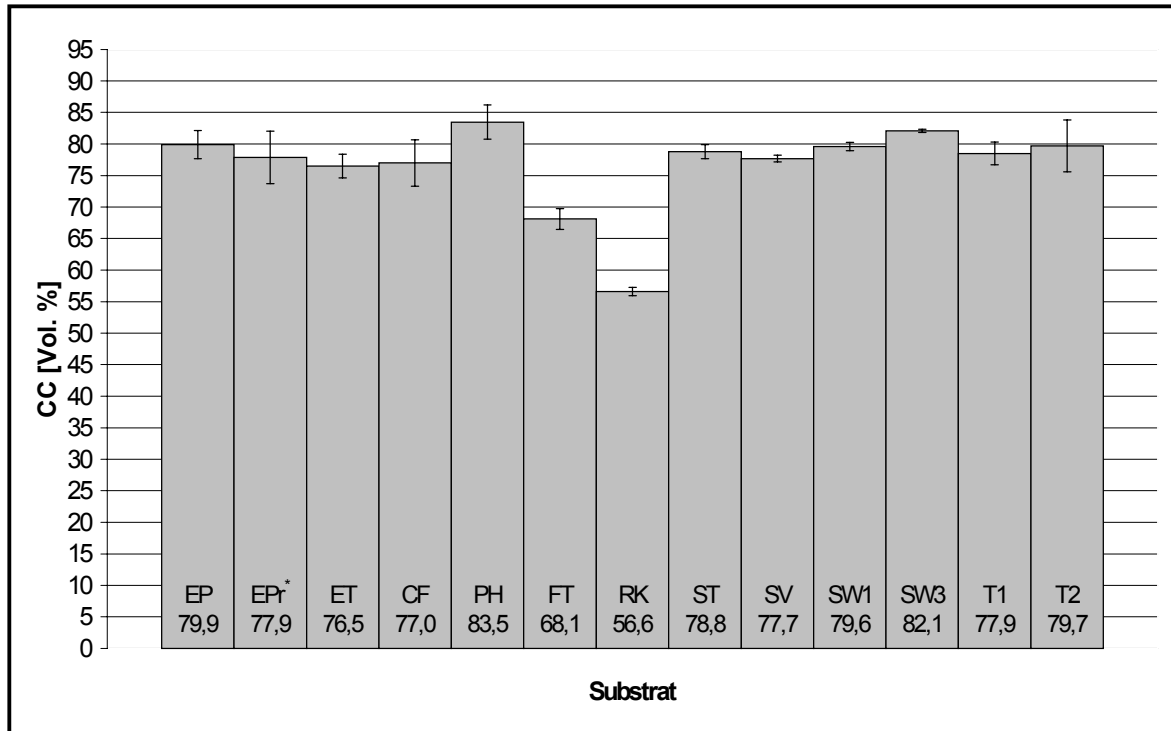


Abb. 3.4: Containerkapazität (CC [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Wert beinhaltet Messfehler; n = 4)

Mischsubstrate mit Rindenhumus (RH), gesiebttem, feinem Schwarztorf (STf) und ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg) besitzen eine Containerkapazität, die z.T. deutlich über 70 Vol % liegt, in sechs Fällen (RH30%, STf40%, STf60%, STf80%, STg40% und STg60%) sogar über 80 Vol. % (Abb. 3.6).

Viele Mischsubstrate zeichnen sich durch eine sehr hohe Standardabweichung (s) bezüglich ihrer Containerkapazität aus, was durch das einleitend erwähnte Problem des schon zum Mischtermin sehr trockenen Weißtorfs erklärt werden könnte, der trotz der bei der ISHS-Methode vorgeschriebenen zweifachen Wassersättigung nur noch unzureichend und ungleichmäßig mit Wasser aufgesättigt werden konnte (hoher Benetzungswiderstand). Dies gilt insbesondere für die tonhaltigen Substrate (granT und GT), bei denen die Standardabweichung (s) besonders hoch ist. Mit s-Werten zwischen 5,9 und 7,6 ist die Standardabweichung (s) gerade bei den granT-Substraten sehr hoch, die Werte für die Containerkapazität extrem niedrig. Eine Aussage mit ähnlichem Wortlaut wie bei den granT-Mischungen lässt sich in abgeschwächter Form auch für die GT-Mischungen formulieren.

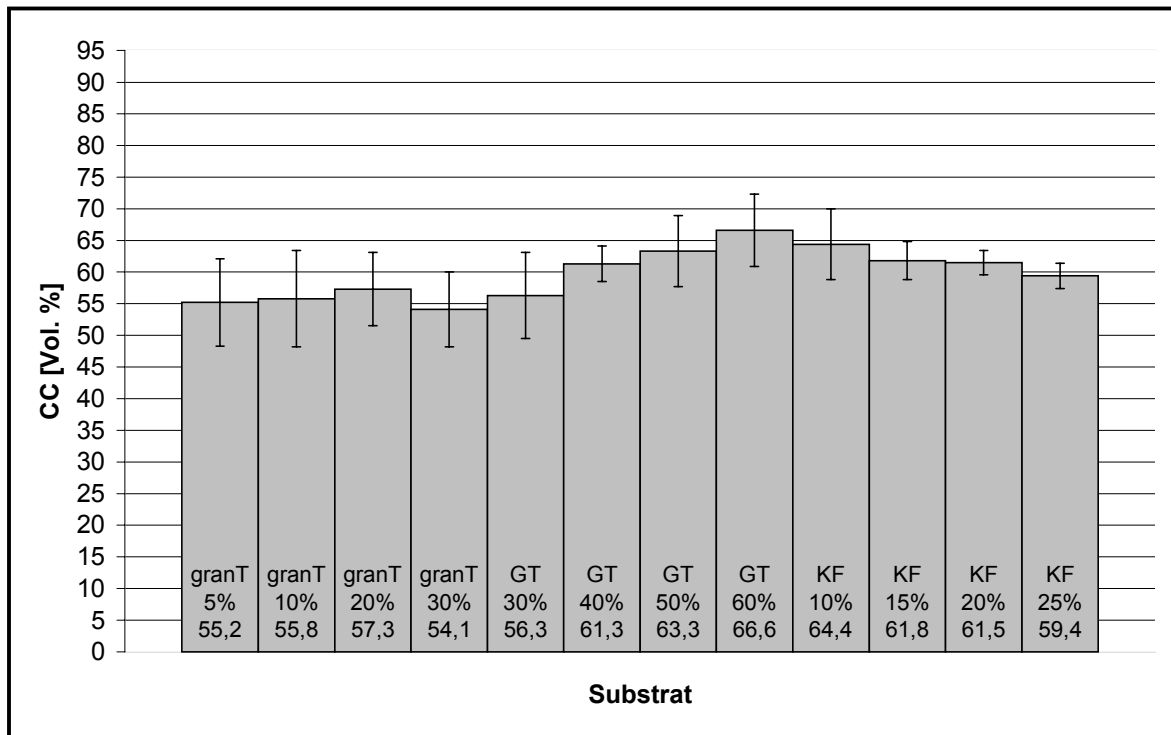


Abb. 3.5: Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

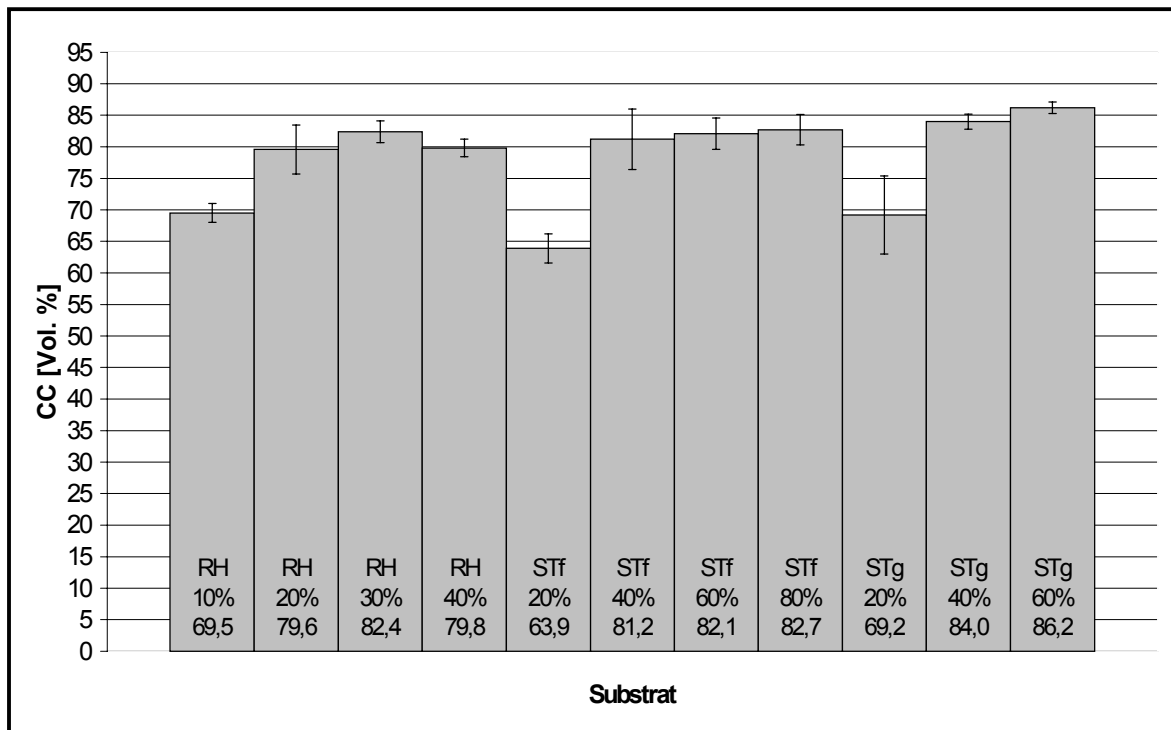


Abb. 3.6: Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Mit steigendem Tongehalt lässt sich bei den Substraten granT und GT eine leichte Zunahme der Containerkapazität feststellen, wobei granT30% unter den Mischsubstraten mit dem Minimalwert von 54,1 Vol. % eine Ausnahme von diesem Trend darstellt, so dass bei den granT-Mischungen keine einheitliche Tendenz festzustellen ist. Für die KF Substrate lässt sich eine Abnahme der Containerkapazität mit steigendem Kokosfasergehalt registrieren, im Gegensatz zu den Mischsubstraten mit Rindenumus (RH), bei denen die Containerkapazität mit dem Rindenumusgehalt von RH10% bis RH30% ansteigt, dann aber bei RH40% wieder abfällt. Die Schwarztorfsubstrate (STf und STg) verhalten sich wieder sehr einheitlich, bei ihnen wurde eine Zunahme der Containerkapazität mit steigendem Schwarztorfgehalt festgestellt.

3.2.1.2 Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (AC)

Zur Berechnung der Luftkapazität (AC) eines Substrats wird neben seiner Containerkapazität (CC) zusätzlich noch sein Porenvolumen (PV) benötigt (Formel 8).

Porenvolumen (PV)

In Abbildung 3.7 sind die Porenvolumina der untersuchten 13 Standardsubstrate aufgetragen. Das größte Porenvolumen weist das Substrat T2 mit 94,3 Vol. % auf. Aber auch viele der anderen Standardsubstrate zeichnen sich durch ein Porenvolumen zwischen 90,1 und 92,8 Vol. % aus. Lediglich für die Einheitserden (ET, EPr und EP) wurden Porenvolumina von unter 90 Vol. % ermittelt. Die Differenz zwischen dem größten Porenvolumen mit 94,3 Vol. % bei T2 und dem kleinsten Porenvolumen mit 87,0 bei EPr beträgt 7,3 Vol. %. Die Spannweite verringert sich auf 6,4 Vol. %, wenn der wahrscheinlich fehlerhafte Wert für EPr unberücksichtigt bleibt und statt dessen der Wert für EP mit 87,9 Vol. % als untere Grenze angesehen wird.

Die Porenvolumina von 12 der untersuchten 23 Mischsubstrate sind in Abb. 3.8 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei den tonhaltigen Substraten das Porenvolumen mit steigendem Tonanteil abnimmt. Bei dem Mischsubstraten mit granuliertem Ton (granT) nimmt das Porenvolumen von 91,9 Vol. % bei granT5% bis auf 79,9 Vol. % bei granT30% ab. Ähnliches gilt auch für das Mischsubstrat GT, bei dem das Porenvolumen von 91,1 Vol. % (GT30%) auf 88,5 Vol. % (GT60%) abnimmt. Allerdings ist die Differenz zwischen Maximum und Minimum des Porenvolumens bei GT mit 2,6 Vol. % wesentlich geringer als bei granT mit 12,0 Vol. %.

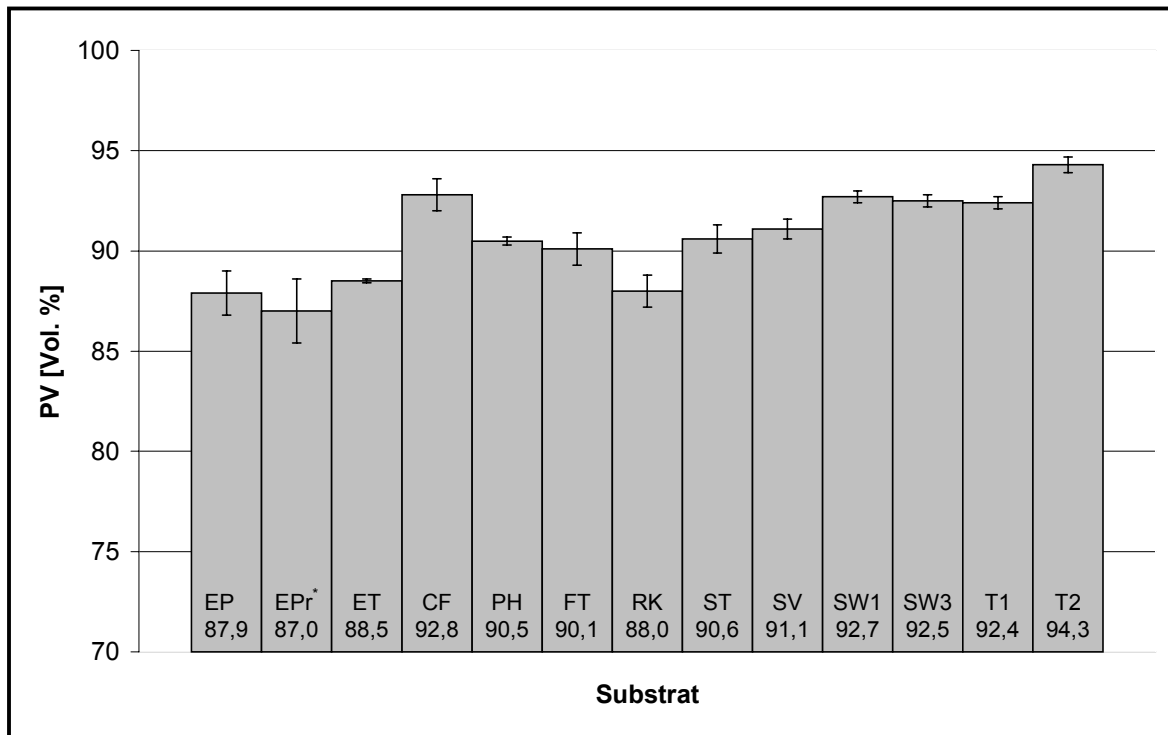


Abb. 3.7: Porenvolumina (PV [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Wert beinhaltet Messfehler; n = 4)

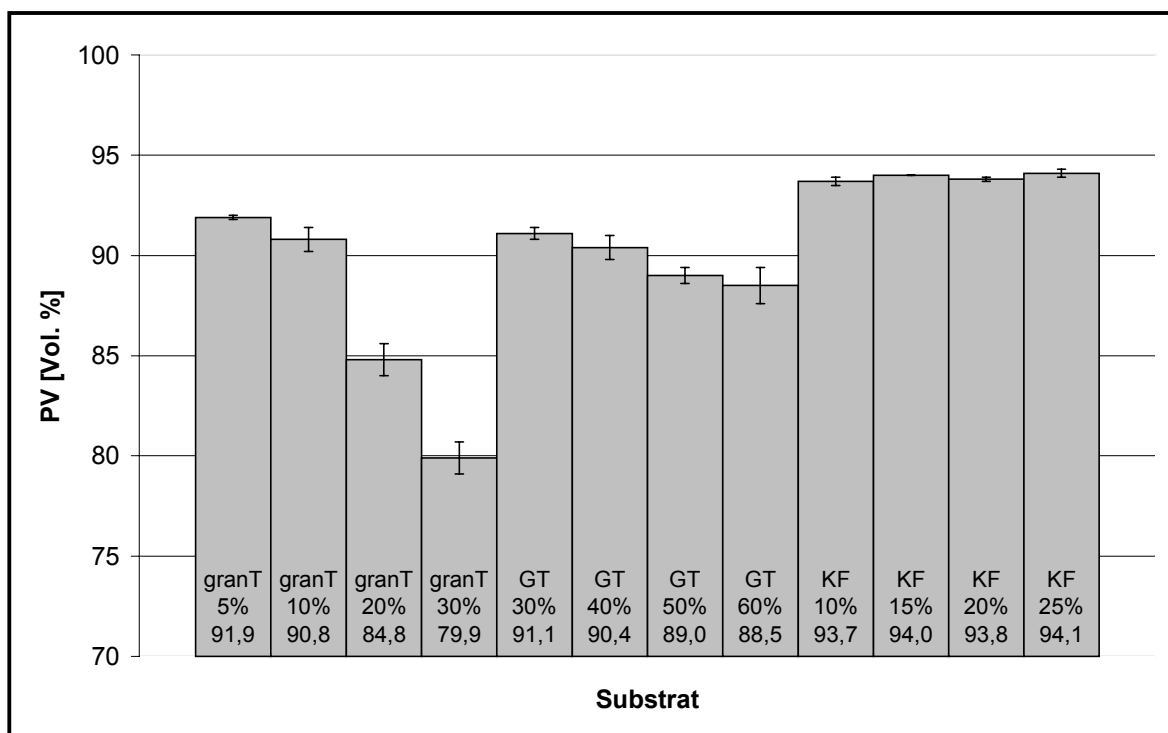


Abb. 3.8: Porenvolumina (PV [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Die Porenvolumina der vier Mischsubstrate, die neben Weißtorf auch Kokosfasern enthalten (KF) unterscheiden sich kaum. Sie liegen im Bereich von 93,7 Vol. % (Minimum) bis 94,1 Vol. % (Maximum).

Die Porenvolumina der restlichen 11 Mischsubstrate, die genau wie die vier KF Mischsubstrate tonfrei sind, liegen in allen Fällen über 90 % (Abb. 3. 9).

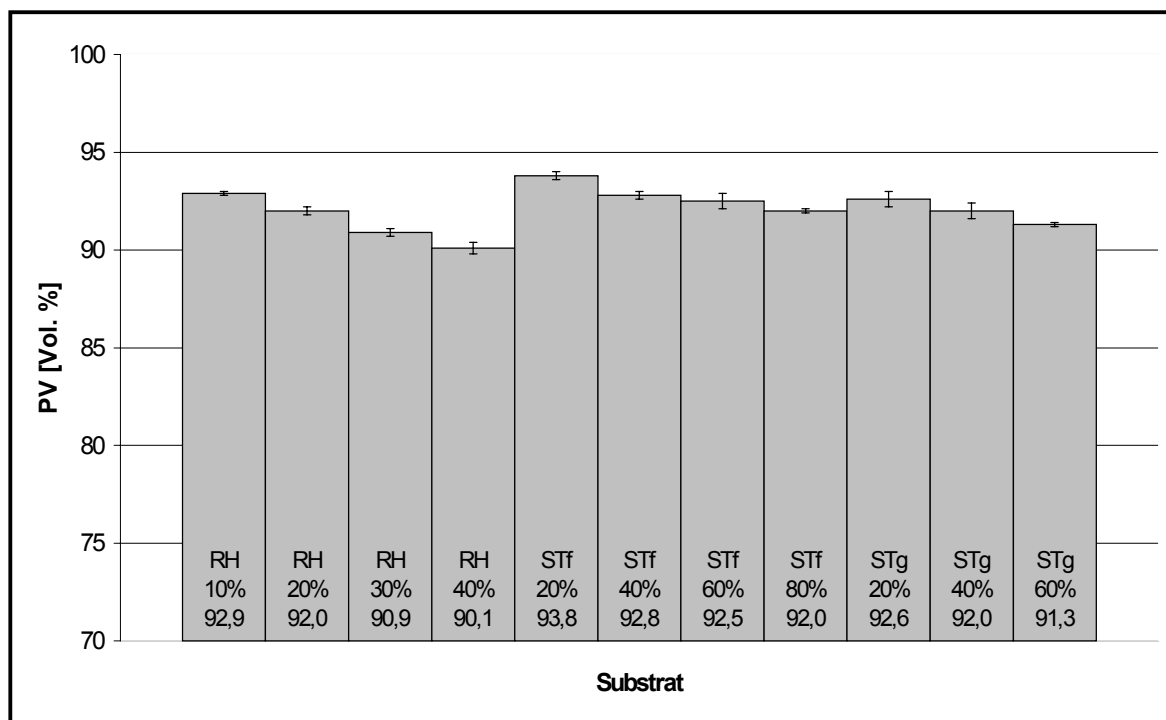


Abb. 3.9: Porenvolumina (PV [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Bei den Mischsubstraten mit Rindenumus (RH) nimmt das Porenvolumen von 92,9 Vol. % (RH10%) mit steigendem Rindenumusgehalt auf 90,1 Vol. % (RH40%) ab. Bei den Mischsubstraten STf (gesiebter, feiner Schwarztorf) und STg (ungesiebter, grober Schwarztorf) nehmen die Porenvolumina ebenfalls mit steigendem Schwarztorfanteil ab (STf von 93,8 Vol. % auf 92,0 Vol. %; STg von 92,6 auf 91,3 Vol. %).

Von allen 23 Mischsubstraten wurde bei KF25% das höchste Porenvolumen mit 94,1 Vol. % ermittelt. Das geringste Porenvolumen weist das Substrat granT30% mit 79,9 Vol. % auf. Damit ist bei den Mischsubstraten eine Spannweite von 14,2 Vol. % zu verzeichnen. Genau wie bei den 13 Standardsubstraten wurde auch bei den Mischsubstraten das geringste Porenvolumen für die tonhaltigen Substrate ermittelt.

Luftkapazität (AC)

Die Luftkapazität (AC) berechnet sich aus der Differenz von Porenvolumen (PV) und

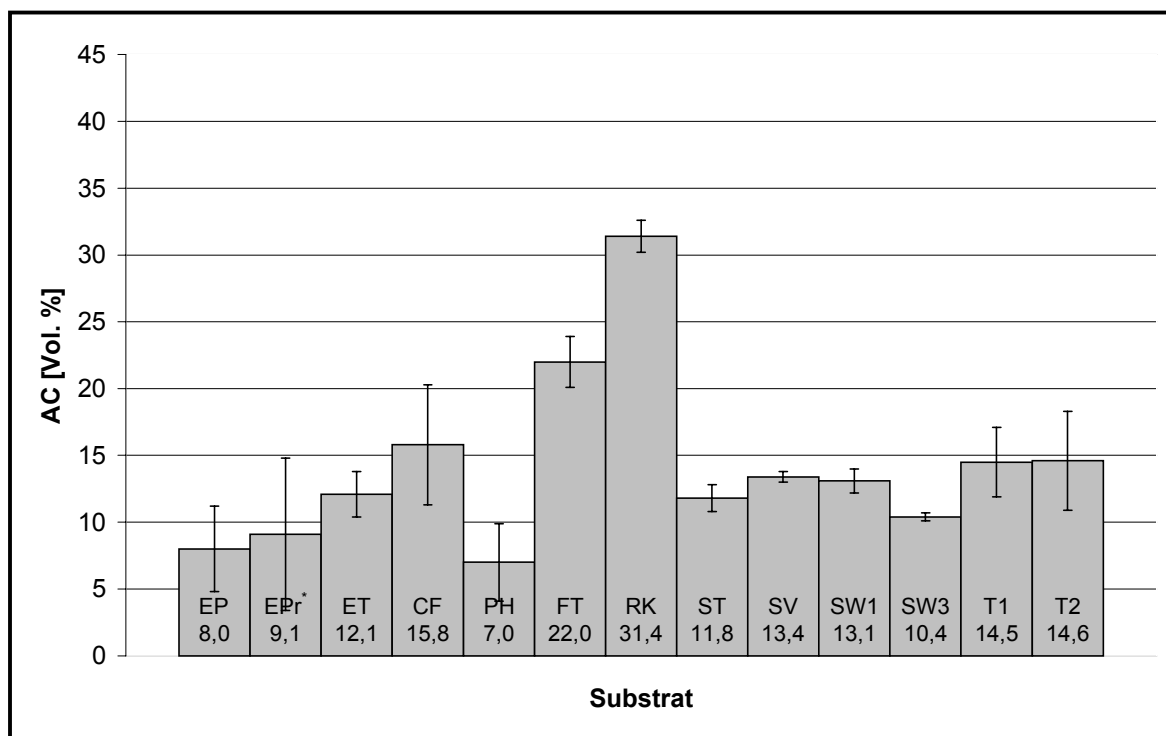


Abb. 3.10: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Wert beinhaltet Messfehler; n = 4)

der Containerkapazität (CC). Abb. 3.10 zeigt die Werte für die Luftkapazität der 13 Standardsubstrate.

Das Substrat RK weist mit 31,4 Vol. % die höchste Luftkapazität auf, gefolgt von FT mit 22,0 Vol. % und CF mit 15,8 Vol. %.

Die Gruppe mit der geringsten Luftkapazität bilden die Substrate EP (8,0 Vol. %), EPr (9,1 Vol. %) und PH (7,0 Vol. %). Der Wert von EPr sollte allerdings nur unter Vorbehalt betrachtet werden, da dieser einen Messfehler enthält, was auch durch die hohe Standardabweichung (s = 5,7) dokumentiert wird.

Die Luftkapazität der 23 Mischsubstrate ist besonders bei den Mischungen, die Ton oder Kokosfasern enthalten, sehr hoch (siehe Abb. 3.11). Insbesondere die Substrate granT5% und granT10% verfügen über eine sehr hohe Luftkapazität von 36,7 Vol. % bzw. 35,0 Vol. %. Aber auch für die Mischungsvariante mit 10 Vol. % Grubenton (GT10%) wurde eine Luftkapazität ermittelt, die mit 34,8 Vol. % im sehr hohen Bereich einzuordnen ist. Die Luftkapazität der Kokosfasersubstrate (KF) liegt nur bei KF10% (29,3 Vol %) unter 30 Vol. %, bei den übrigen drei KF Varianten wurden wieder sehr hohe Werte zwischen 32,3 Vol % und 34,7 Vol. % festgestellt.

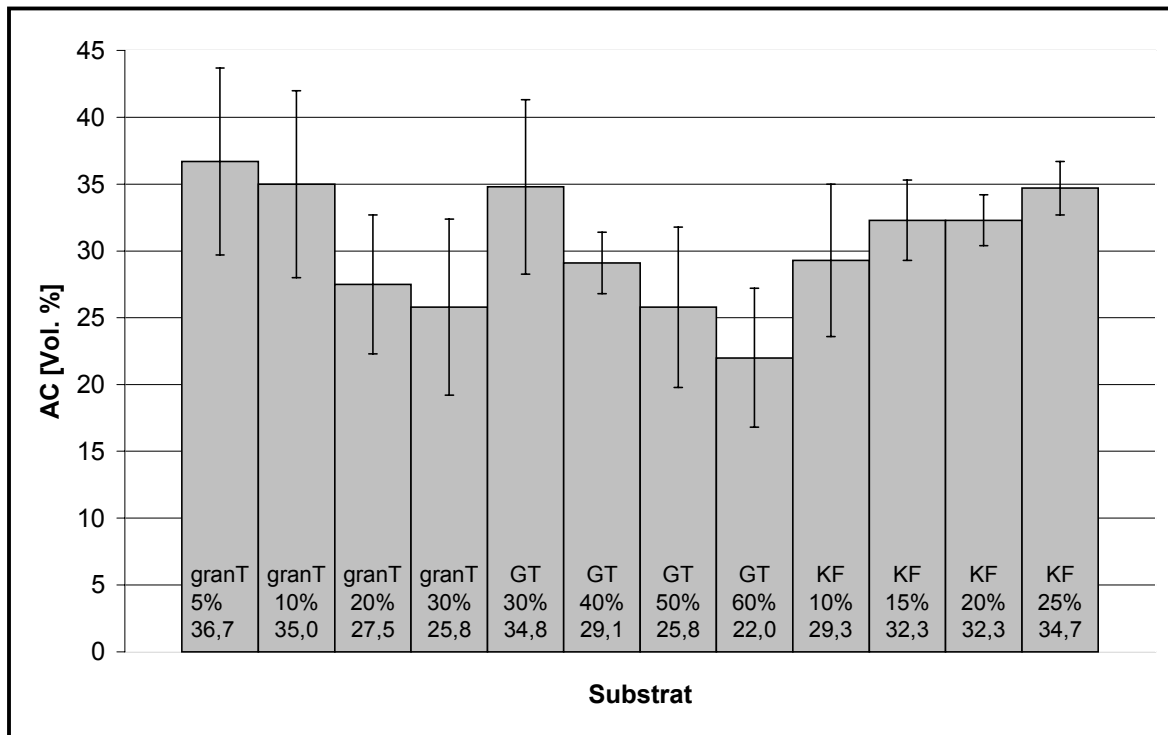


Abb. 3.11: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Bei den 12 Mischsubstraten aus Abb. 3.11 fällt auf, dass die Standardabweichung (s) in acht Fällen mit Werten über 5,0 sehr hoch liegt, die einzelnen Messwerte also sehr stark schwanken. Dieser Sachverhalt, genau wie die extrem hohen Werte für die Luftkapazität, könnte durch den schon öfter angesprochenen geringen Wassergehalt der Mischsubstrate erklärt werden, der einen hohen Benetzungswiderstand der Substrate mit sich bringt. Dieser wiederum sorgt für eine unvollständige (hohe Werte für AC) und ungleichmäßige Wassersättigung (hohe Standardabweichung s) der Substrate während des Messvorgangs.

In Abb. 3.12 sind lediglich die Mischsubstrate mit geringem Zuschlagstoffanteil (RH10% = 23,4 Vol %, STf20% = 29,9 Vol % und STg20% = 23,4 Vol. %), also sehr hohem Weißtorfanteil, durch hohe Werte für die Luftkapazität gekennzeichnet. Da u.a. auch die Standardabweichung (s) bei den selben Substraten hohe Werte annimmt, könnte daraus geschlossen werden, dass auch in diesen Fällen der geringe Wassergehalt der Mischsubstrate, bedingt durch den schon zum Mischtermin sehr trockenen Weißtorf, zu unvollständiger und ungleichmäßiger Durchfeuchtung der Substrate bei der Messung geführt hat. Die Luftkapazitätswerte der übrigen acht Substrate aus Abb. 3.12 liegen im Bereich um 10 Vol. %, wobei STg 60% mit einem Wert von 5,1 Vol. % hier eine Ausnahme darstellt.

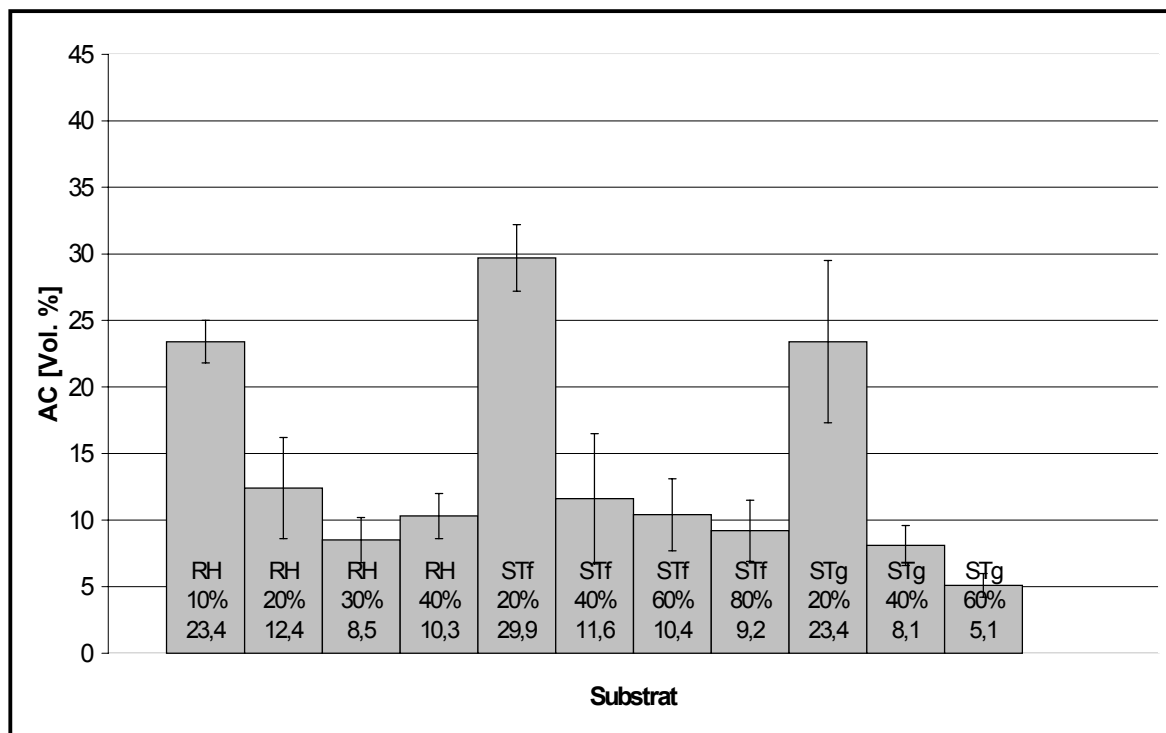


Abb. 3.12: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Unter den Substraten mit Kokosfaser (KF) ist eine Zunahme der Luftkapazität mit dem Kokosfaseranteil festzuhalten (Abb. 3.11). Dagegen ist bei den Mischungen von Ton zu Weißtorf (granT und GT) sowie bei den Substraten mit Schwarztorf zu Weißtorf (STf und STg) (Abb. 3.12) eine einheitliche Verringerung der Luftkapazität mit steigendem Ton- / Schwarztorfanteil festgestellt worden. Lediglich für die Substrate, bei denen Rindenumus zum Weißtorf zugemischt wurde, ist kein einheitliches Verhalten bezüglich ihrer Luftkapazität zu verzeichnen. Zunächst verringert sich die Luftkapazität mit steigendem Rindenumusanteil bis zur Variante RH30%, bevor sie dann bei RH40% wieder geringfügig zunimmt.

3.2.1.3 Verfügbares Wasser (AW) und weitere Kennwerte

In diesem Kapitel werden die weiteren Kennwerte dargestellt, die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt bzw. berechnet wurden. Dazu gehören die Wassergehalte bei 50 hPa (WV50) und 100 hPa (WV100) Wasserspannung sowie auch die verfügbare Wassermenge (AW), das leicht verfügbare Wasser (EAW) und das schwerer verfügbare Wasser (LRAW). Insbesondere AW ist ein Kennwert, der für die Steuerung einer Bewässerung von großer Bedeutung ist. Zusätzlich werden auch die

Wasserspannungskurven der untersuchten Substrate präsentiert, die erstellt werden, indem die Wasserspannung [hPa] gegen den zugehörigen volumetrischen Wassergehalt [Vol. %] abgetragen wird. Aus diesen Wasserspannungskurven lassen sich neben der Luftkapazität (AC) auch die oben genannten Kennwerte AW, EAW und LRAW einfach ablesen. Die Kurven für Substrate eines Herstellers werden, genau wie die Mischsubstrate mit den gleichen Zuschlagstoffen, zusammen in einer Abbildung präsentiert. Diese Darstellungsweise birgt, neben dem Nachteil der herabgesetzten Übersichtlichkeit, den Vorteil, dass sich Änderungen in den physikalischen Eigenschaften, die durch unterschiedliche Anteile eines Zuschlagsstoffs im Substrat hervorgerufen werden, direkt erfassen lassen. Auf die Darstellung der Standardabweichung (s) wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Abbildungen verzichtet, zumal die Standardabweichung (s) von Containerkapazität (CC), Porenvolumen (PV), und Luftkapazität (AC) schon in den entsprechenden Kapiteln vorgestellt wurden. Daneben sind die Standardabweichungen der genannten Kennwerte und die der volumetrischen Wassergehalte bei 50 hPa (WV50) und 100 hPa (WV100) Wasserspannung in Tabelle A1 im Anhang aufgeführt.

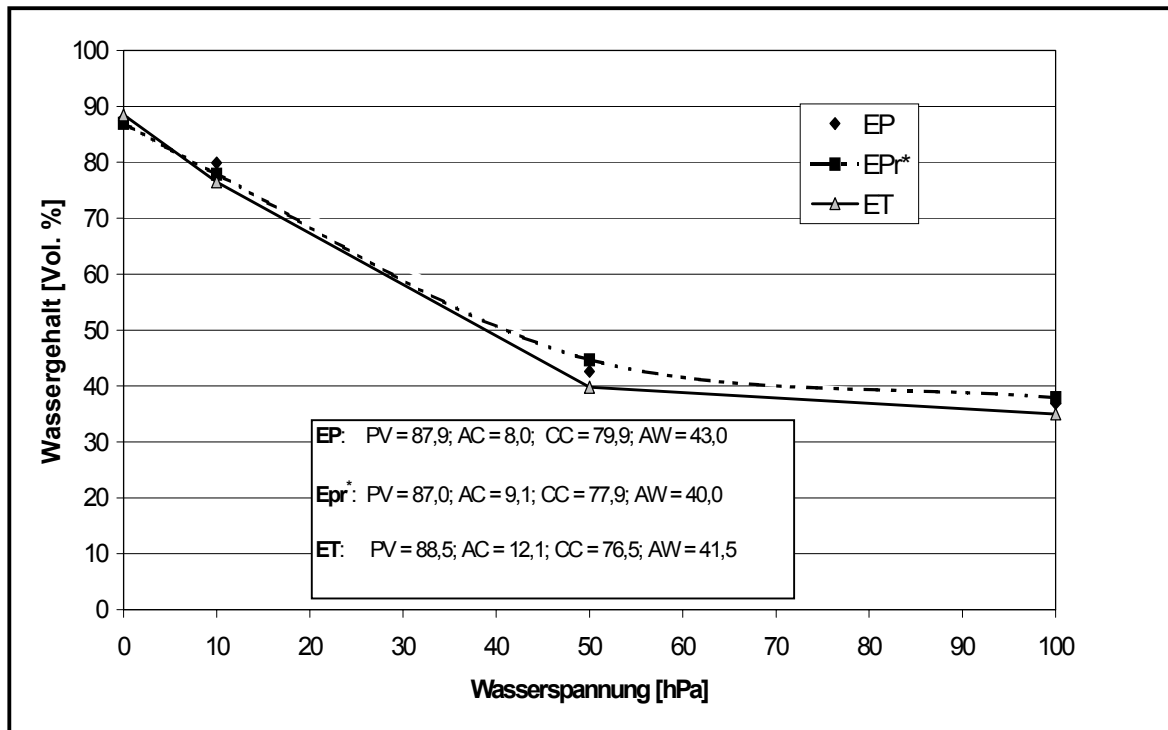


Abb. 3.13: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate EP, EPr und ET, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %]; * = Werte beinhalten Messfehler)

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln wird auch hier zunächst auf die Ergebnisse der 13 Standardsubstrate eingegangen, bevor dann die genannten Kennwerte der 23 Mischsubstrate vorgestellt werden.

Abb. 3.13 zeigt Wasserspannungskurven der Substrate EP, EPr und ET. Bei EPr ist jedoch zu beachten, dass die Kurve mit Fehler behafteten Werten erstellt wurde. Die abgebildeten Substrate weisen eine verfügbare Wassermenge (AW) zwischen 40,0 Vol. % und 43,0 Vol. % auf, d.h. sie können mit dem Volumengewicht (dB), das im Probenzylinder der ISHS-Methode vorliegt (siehe unter dB_E in Tabelle A1), zwischen 400 und 430 ml Wasser pro l Substrat verfügbar speichern. Der leicht verfügbare Anteil (EAW) der verfügbaren Wassermenge liegt bei den drei Einheitserden zwischen 33,2 und 37,3 Vol. %, der schwerer verfügbare Anteil (LRAW) zwischen 4,8 und 6,8 Vol. %. Tabelle 3.1 enthält die genannten Kennwerte u.a. für diese drei Substrate.

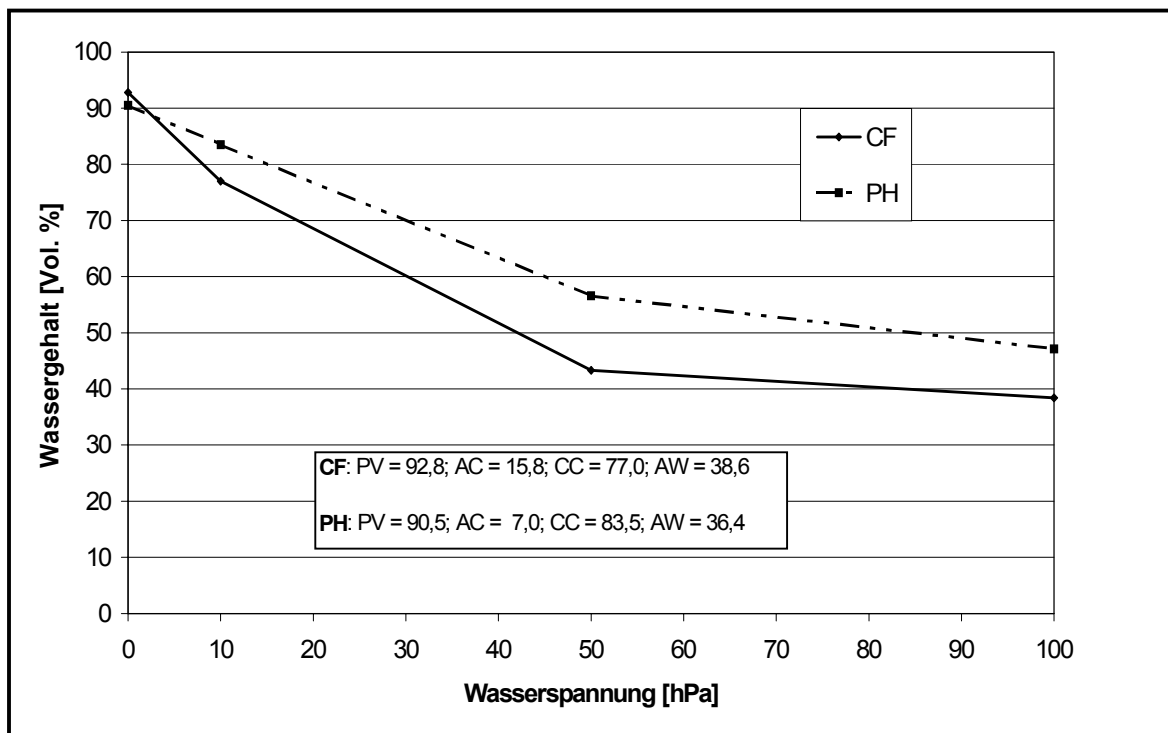


Abb. 3.14: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate CF und PH, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ($n = 4$) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Anhand der in Abb. 3.14 gezeigten Wasserspannungskurven der Substrate CF und PH kann das verfügbare Wasser (AW) abgelesen werden. Es beträgt bei dem grob strukturierten Weißtorfsubstrat CF 38,6 Vol. %, bei dem feinen Schwarztorfsubstrat

(PH) 36,4 Vol. %. Aus der Differenz von Containerkapazität [Vol. %] und dem volumetrischen Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 50 hPa (WV50 [Vol. %]) kann das leicht verfügbare Wasser (EAW) berechnet werden. Da WV50 für das Substrat CF mit 43,3 Vol. % bestimmt wurde und die Containerkapazität 77,0 Vol. % beträgt, errechnet sich das leicht verfügbare Wasser (EAW) für CF zu 33,7 Vol. %. Obwohl das Substrat PH, verglichen mit den anderen 13 Substraten, mit 83,5 Vol. % über eine hohe Containerkapazität verfügt, ist die verfügbare Wassermenge (AW) mit 36,4 Vol. % eher klein, genau wie das leicht verfügbare Wasser (EAW) mit 26,9 Vol. %. Dagegen ist das schwerer verfügbare Wasser (LRAW) bei PH mit 9,5 Vol. % als hoch einzustufen. Weitere Kennwerte der in Abb. 3.14 behandelten Standardsubstrate finden sich in Tabelle 3.1.

Die Wasserspannungskurven der Substrate FT und RK (Abb. 3.15) zeigen eine verfügbare Wassermenge (AW) von 35,5 Vol. % (FT) bzw. von 25,6 Vol. % (RK) an.

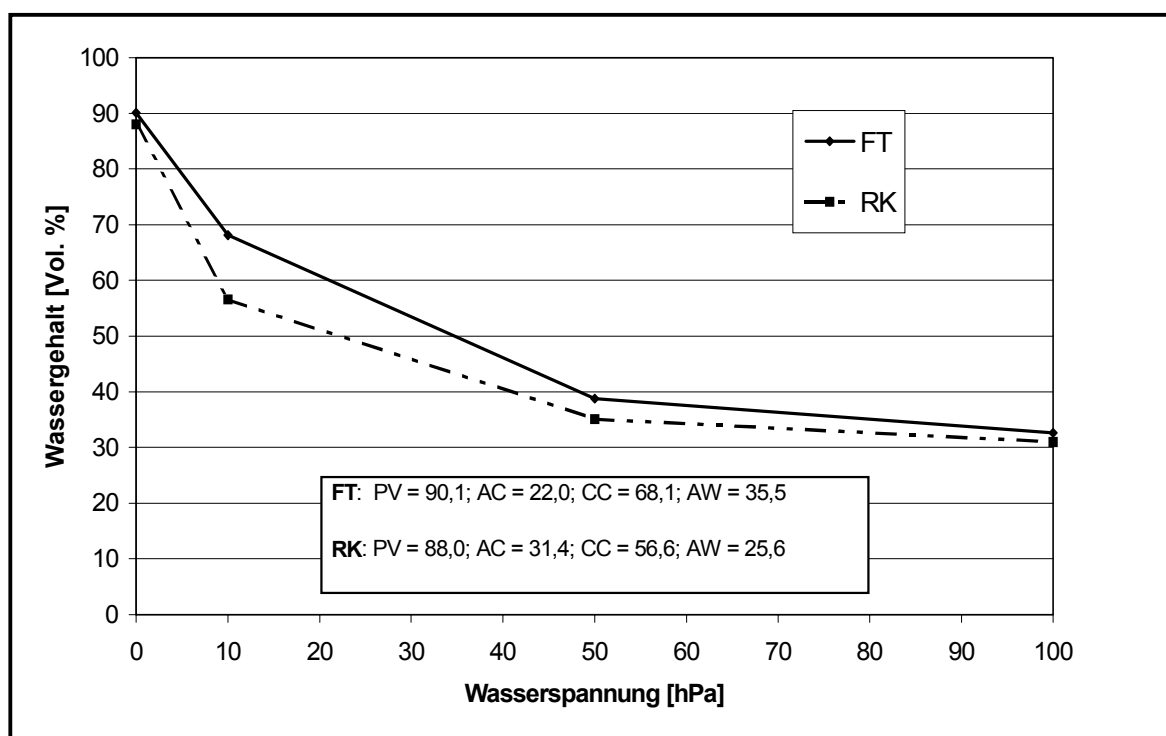


Abb. 3.15: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate FT und RK, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4)
(PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Damit ist das verfügbare Wasser von FT um fast 10 Vol. % (fast 39 %) größer als das von RK. Das leicht verfügbare Wasser (EAW) von FT ist mit 29,3 Vol. % bedeutend

höher als das von dem Rindenkultursubstrat (RK), das mit lediglich 21,5 Vol. % den geringsten Wert unter allen Standardsubstraten einnimmt. Aber auch die Kennwerte zur Wasserspeicherung von FT sind unter den 13 Standardsubstraten als klein einzustufen, wie aus Tabelle 3.1 hervorgeht. Lediglich bezüglich des schwerer verfügbaren Wassers (LRAW) ist das Substrat FT mit 6,2 Vol. % im mittleren Bereich der Standardsubstrate einzuordnen, während RK auch hier mit 4,1 Vol. % das Schlusslicht bildet.

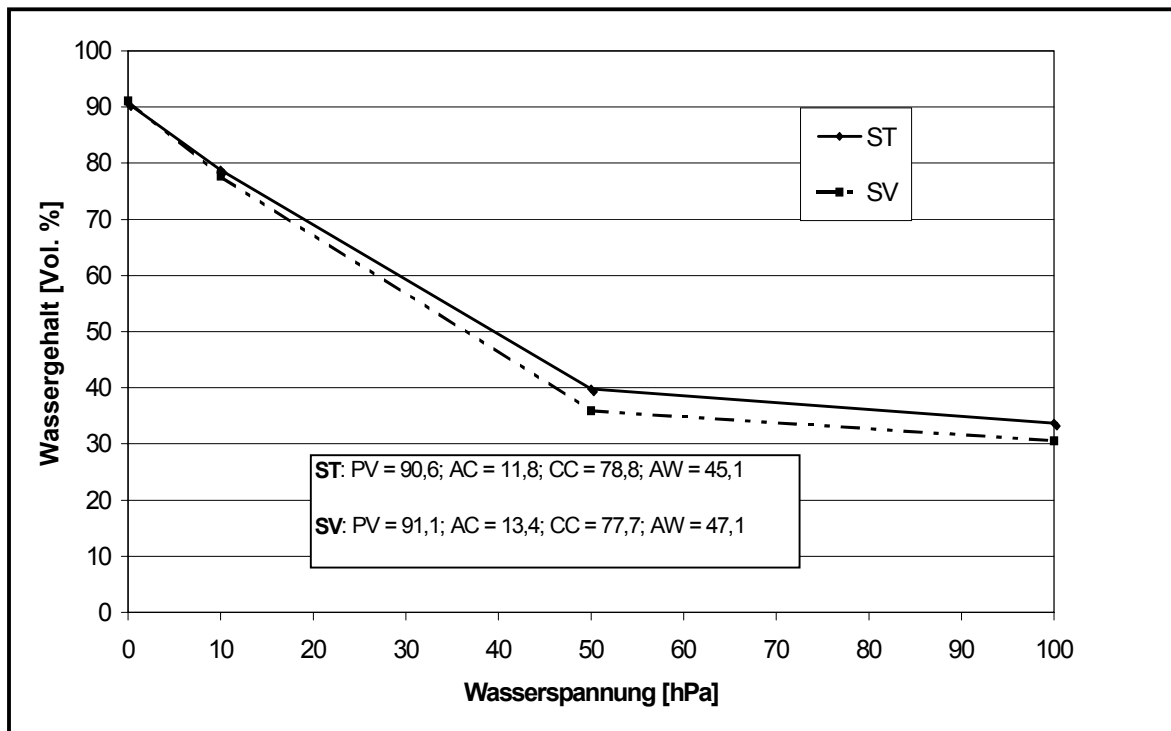


Abb. 3.16: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate ST und SV, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ($n = 4$) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Im Gegensatz zu den Substraten RK und KF weisen die Kennwerte zur Wasserspeicherung der Standardsubstrate ST und SV wesentlich höhere Werte auf (Abb. 3.16). Das verfügbare Wasser (AW) nimmt bei SV mit 47,1 Vol. % den zweithöchsten Wert unter den in Tabelle 3.1 zusammengefassten Substratvarianten ein. Bezüglich des leicht verfügbaren Wassers (EAW) besitzt SV mit 41,8 Vol. % unter den Standardsubstraten den Spitzenwert. Mit Werten von 45,1 Vol. % für AW und

39,0 Vol. % für EAW sind die Kennwerte der Wasserspeicherung von ST ebenfalls im oberen Drittel unter den 13 Standardsubstraten einzuordnen.

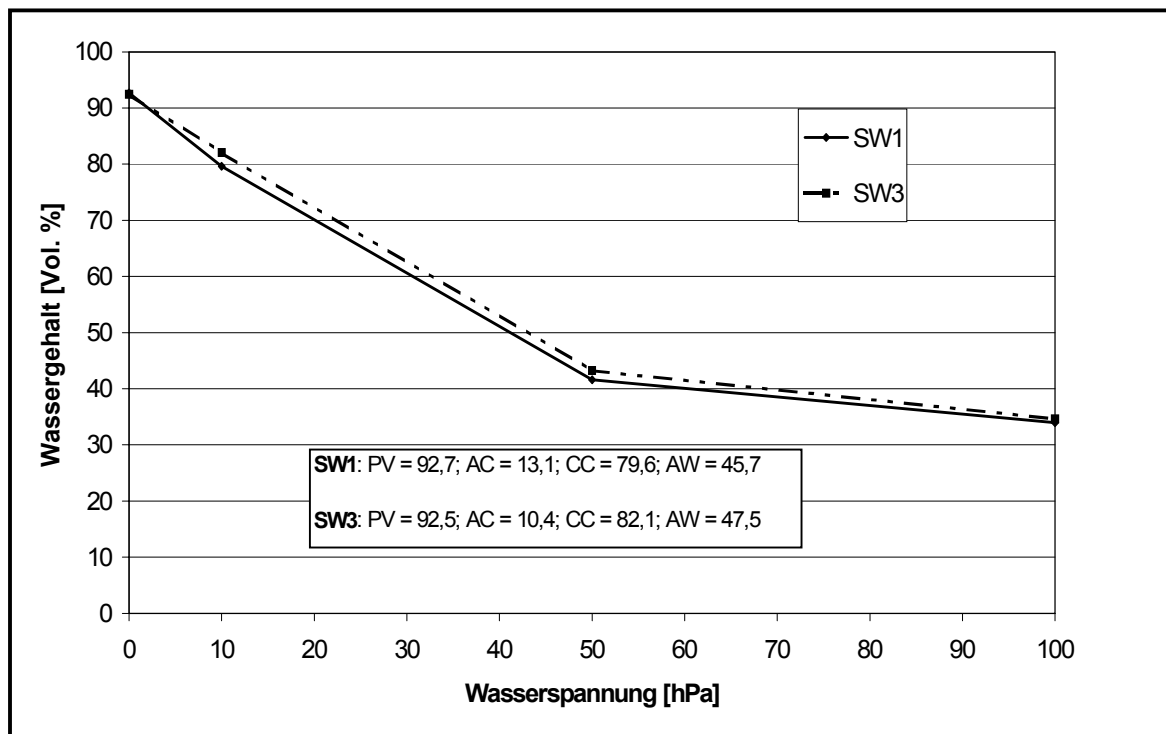


Abb. 3.17: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate SW1 und SW3, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Anhand der in Abb. 3.17 präsentierten Wasserspannungskurven kann abgeleitet werden, dass die Fähigkeiten zur Speicherung von verfügbarem Wasser der Substrate SW1 und SW3 ebenfalls sehr gut sind. Mit 45,7 Vol. % (SW1) bzw. 47,5 Vol. % (SW3) wurde für das verfügbare Wasser (AW) dieser Substrate der höchste bzw. dritthöchste Wert unter den 13 handelsüblichen Substraten errechnet (Tabelle 3.1). Das schwerer verfügbare Wasser (LRAW) erreicht bei SW1 mit 7,7 Vol. % und SW3 mit 8,6 Vol. % die absoluten Höchstwerte, die nur noch von PH mit 9,5 Vol. % übertroffen werden. Damit können die genannten Substrate bei einem Volumengewicht (dB), das vergleichbar mit dem Volumengewicht im Probenzylinder der ISHS-Methode ist (siehe unter dB_E in Tabelle A1), 77 ml bzw. 86 ml Wasser pro l Substrat bei Wasserspannungen zwischen 50 und 100 hPa verfügbar speichern.

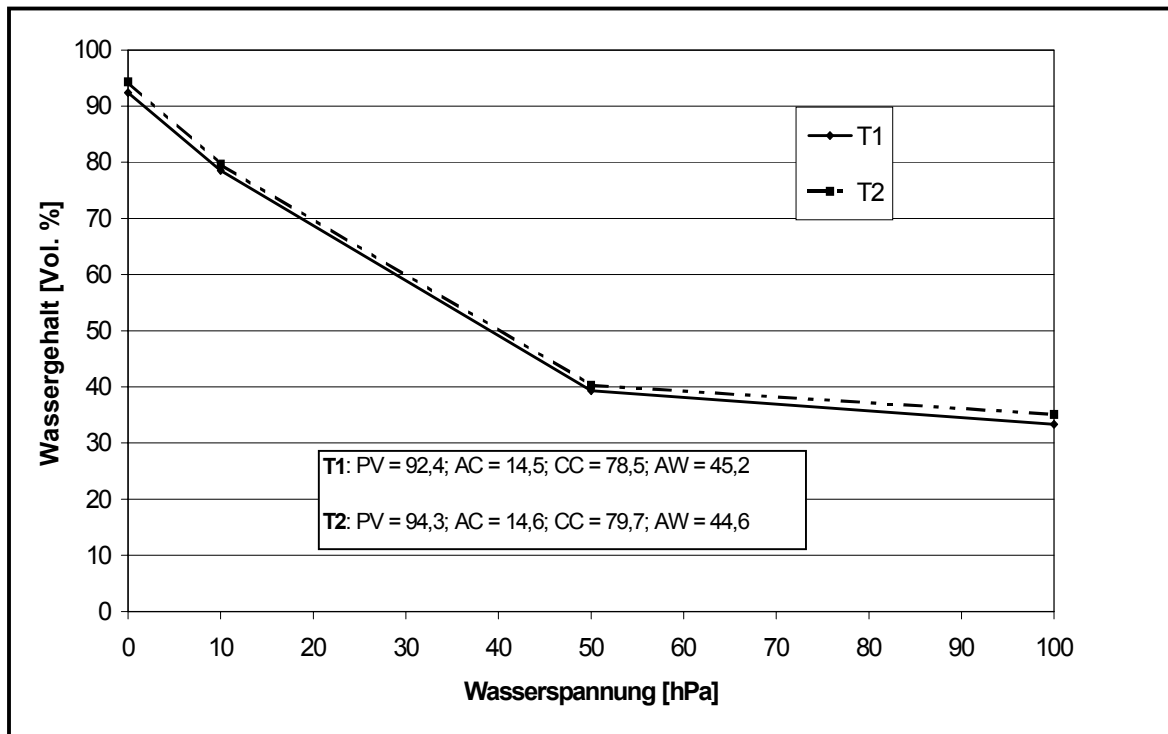


Abb. 3.18: Wasserspannungskurven der Standardsubstrate T1 und T2, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Zum Abschluss der 13 handelsüblichen Substrate sind die Wasserspannungskurven der Varianten T1 und T2 in Abb. 3.18 dargestellt. Mit einer verfügbaren Wassermenge (AW) von 45,2 Vol. % bzw. 44,6 Vol. % sind beide Substrate im oberen Drittel der Standardsubstrate zu finden. Auffällig sind beide Substrate auch bezüglich ihres leicht verfügbaren Wassers (EAW). Mit 39,2 Vol. % (T1) und 39,4 % besitzen sie die zweit- und dritthöchsten Werte unter den handelsüblichen Substraten. Aus Tabelle 3.1 können zusätzlich zu den hier genannten Werten noch weitere Kennwerte zur Wasserspeicherung der Substrate T1 und T2 entnommen werden. Daneben sind dort auch die volumetrischen Wassergehalte bei 50 hPa (WV50) und 100 hPa Wasserspannung (WV100) aller untersuchten 13 Standardsubstrate enthalten.

Abb. 3.19 zeigt die Wasserspannungskurven der vier Mischsubstrate, die neben Weißtorf granulierten Ton als Zuschlagstoff enthalten (granT). Trotz der steigenden Menge an granuliertem Ton im Substrat ändern sich die Kennwerte der Wasserspeicherung nur wenig.

Tabelle 3.1: Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= **WV50**) und 100 hPa (= **WV100**) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= **AW**), leicht verfügbares Wasser (= **EAW**) und schwerer verfügbares Wasser (= **LRAW**) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4)

(* = Werte beinhalten Messfehler; **s** = Standardabweichung)

Substrat	WV50 [Vol. %]	s	WV100 [Vol. %]	s	AW [Vol. %]	EAW [Vol. %]	LRAW [Vol. %]
EP	42,6	1,5	36,9	1,9	43,0	37,3	5,7
EPr *	44,7	2,6	37,9	1,4	40,0	33,2	6,8
ET	39,8	2,5	35,0	1,7	41,5	36,7	4,8
CF	43,3	0,6	38,4	4,0	38,6	33,7	4,9
PH	56,6	2,0	47,1	1,8	36,4	26,9	9,5
FT	38,8	0,6	32,6	0,4	35,5	29,3	6,2
RK	35,1	1,1	31,0	1,3	25,6	21,5	4,1
ST	39,8	1,5	33,7	1,7	45,1	39,0	6,1
SV	35,9	0,6	30,6	1,6	47,1	41,8	5,3
SW1	41,6	0,7	33,9	0,9	45,7	38,0	7,7
SW3	43,2	1,6	34,6	1,3	47,5	38,9	8,6
T1	39,3	1,1	33,3	1,7	45,2	39,2	6,0
T2	40,3	2,2	35,1	2,9	44,6	39,4	5,2

Das Substrat granT5% kann 28,1 Vol. % Wasser verfügbar speichern, granT10% 28,0 Vol. % und granT20% 27,3 Vol. %. Die Variante granT30% verfügt mit 23,6 Vol. % über die kleinste verfügbar speicherbare Wassermenge. Damit wurde für die Mischsubstrate mit granuliertem Ton die geringste verfügbare Wassermenge (AW) unter den 23 Mischsubstraten ermittelt. Lediglich das Substrat GT30% ist mit einem Angebot von 27,7 Vol. % verfügbarem Wasser noch unter granT5% und granT10% einzuordnen. Vergleicht man das verfügbare Wasser (AW) der Mischsubstrate mit granuliertem Ton mit dem der 13 Standardsubstrate (Tabelle 3.1), so wird deutlich, dass kein Standardsubstrat, abgesehen von RK, eine so geringe verfügbare Wassermenge aufweist, wie die granT-Substrate (siehe auch Tabelle 3.2), die damit die geringste Wassermenge unter den 36 untersuchten Substraten verfügbar

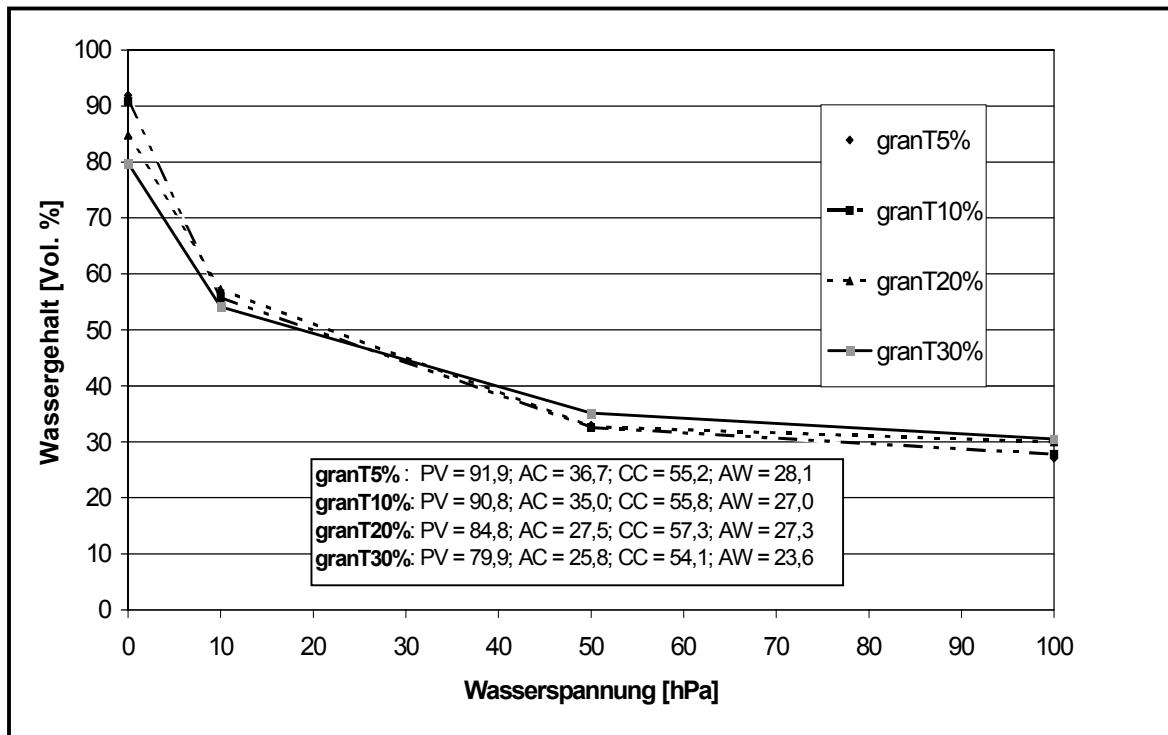


Abb. 3.19: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit granuliertem Ton (granT), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

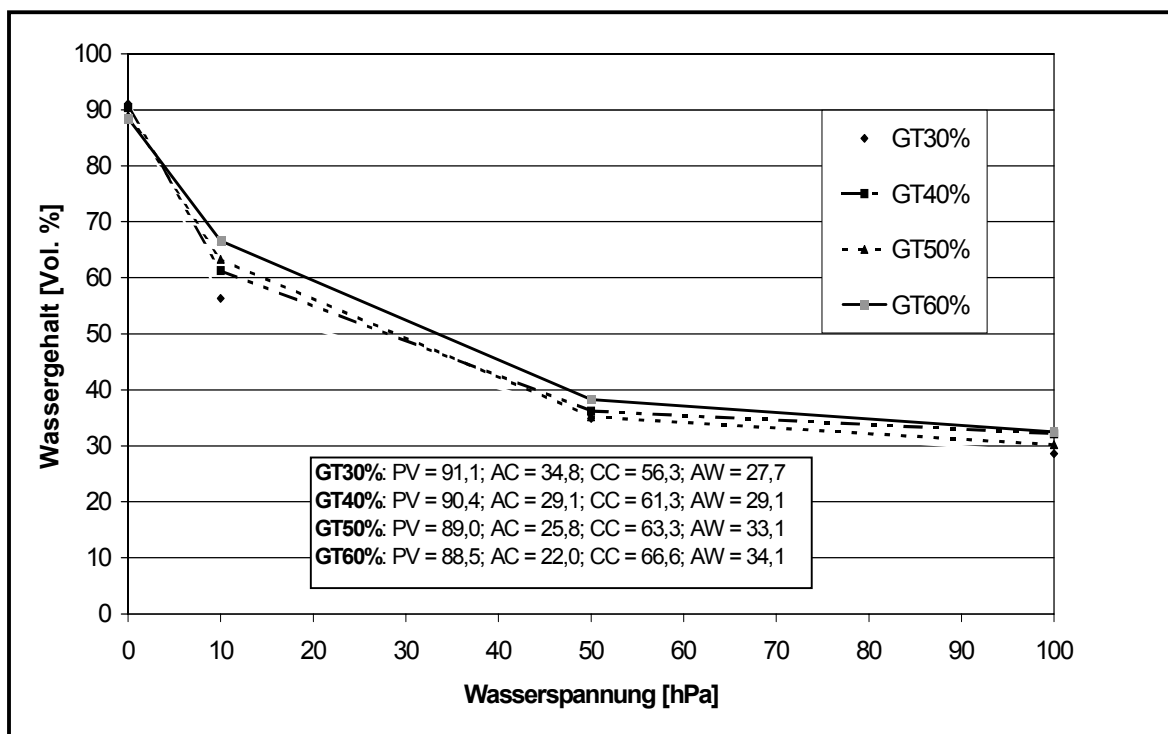


Abb. 3.20: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Grubenton-Torf Vormischung (GT), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

speichern können. Auch hinsichtlich des leicht verfügbaren Wassers (EAW) und des schwerer verfügbaren Wassers (LRAW), liegt die Leistungsfähigkeit der Mischsubstrate mit granuliertem Ton im unteren Bereich, verglichen mit den anderen 19 Mischsubstraten, aber auch verglichen mit den 13 Standardsubstraten. Diese niedrigen Werte können sicher auch im Zusammenhang mit dem trockenen Weißtorf zum Mischtermin gesehen werden, der durch den ebenfalls relativ trockenen granulierten Ton zusätzlich entwässert wurde, wodurch der Benetzungswiderstand des Torfs bzw. des Mischsubstrats nochmals erhöht wurde. Trotz der schlechten Speicherfähigkeit bezüglich des verfügbaren Wassers kann jedoch ein einheitlicher Trend zur Verringerung des verfügbaren Wassers mit zunehmendem Tonanteil beobachtet werden, wobei die Abnahme zwischen granT20% und granT30% besonders auffällig ist.

Das verfügbare Wasser (AW) der Substrate mit der Grubenton-Torf Vormischung (GT) zeigt Abb. 3.20. Insbesondere GT30% und GT40% fallen durch eine verfügbare Wassermenge von unter 30 Vol. % auf. GT50% und GT60% können verfügbares Wasser (AW) in einer Menge von 33,1 bzw. 34,1 Vol. % bereitstellen. Im Vergleich mit den übrigen Mischsubstraten müssen die GT-Substrate hinsichtlich des verfügbaren Wassers (AW), des leicht verfügbaren Wassers (EAW) und des schwerer verfügbaren Wassers (LRAW) im unteren Drittel der Leistungsfähigkeit der Mischsubstrate eingeordnet werden, wie auch aus Tabelle 3.2 hervorgeht. Auch im Vergleich zu den 13 Standardsubstraten ist das Vermögen der GT-Mischsubstrate zur Speicherung von verfügbarem Wasser als gering einzustufen. Im Gegensatz zu den Substraten mit granuliertem Ton (granT) ist bei den GT-Mischsubstraten, bei denen Ton mit hoher Eigenfeuchte zum trockenen Weißtorf zugemischt wurde, eine Zunahme des verfügbaren Wassers (AW) mit dem Tongehalt zu beobachten.

Mit Hilfe von Abb. 3.21 ist es möglich, die Fähigkeit der Mischsubstrate mit Kokosfasern (KF) zur Wasserspeicherung zu beurteilen. Das verfügbare Wasser (AW) aller KF-Mischsubstrate ist mit Werten zwischen 32,1 und 36,0 Vol. % im Vergleich zu den übrigen Mischsubstraten als gering einzustufen. Lediglich die Werte von 36,0 Vol. % für AW, 28,7 Vol. % für EAW und 7,3 Vol. % für LRAW von KF10%, brauchen den Vergleich mit den übrigen Mischsubstraten nicht zu scheuen (Tabelle 3.2).

Anhand der in Abb. 3.22 dargestellten Wasserspannungskurven der Mischsubstrate, die neben Weißtorf auch Rindenumus enthalten (RH), lässt sich erkennen, dass

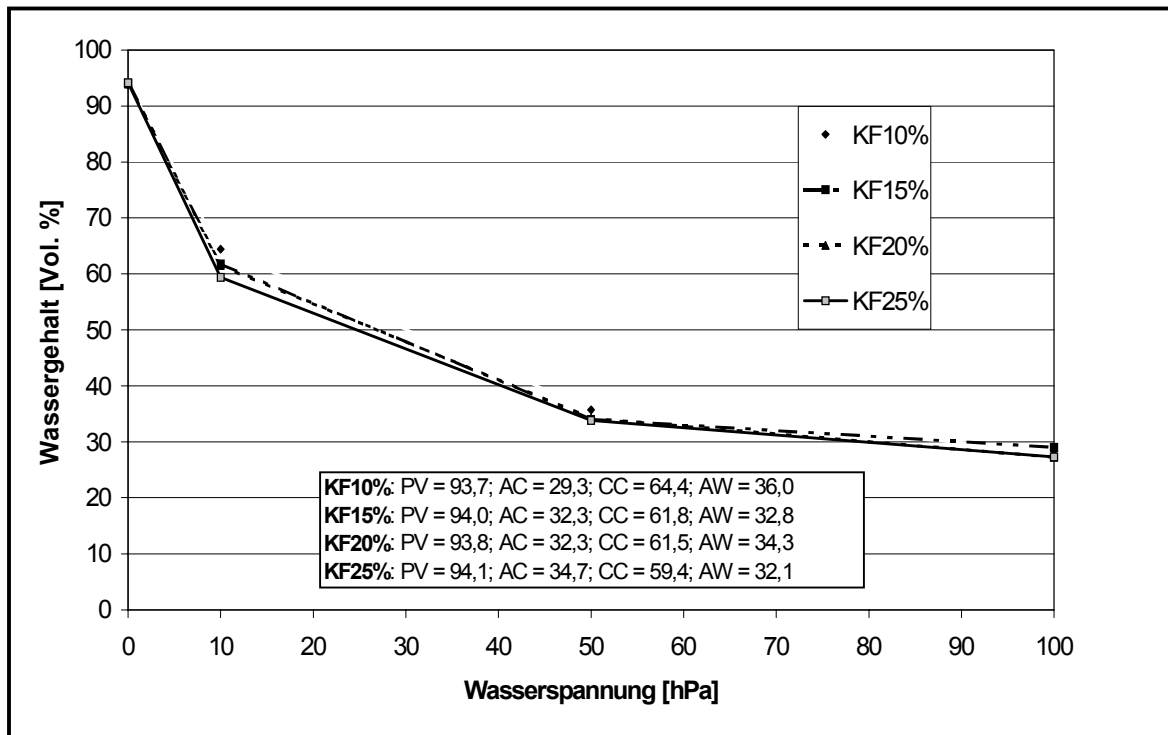


Abb. 3.21: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Kokosfasern (KF), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

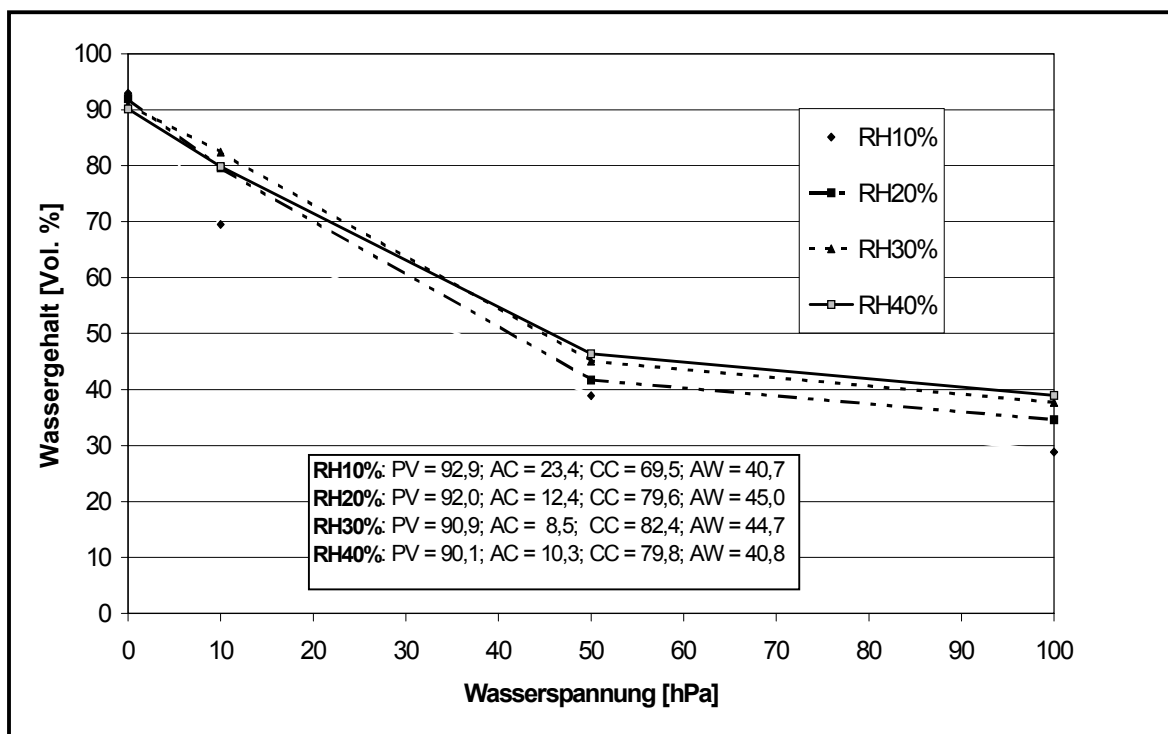


Abb.3.22: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Rindenhumus (RH), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

das verfügbare Wasser (AW) zwischen 40,7 Vol. % bei RH10% und 45,0 Vol. % bei RH20% liegt. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass mit der Zunahme des Anteils an Rindenumus keine gleichmäßige Zu- oder Abnahme des verfügbaren Wassers zu verzeichnen ist. Ganz im Gegenteil nimmt die verfügbare Wassermenge von RH10% (40,7 Vol. %) auf RH20% um 4,7 Vol. % zu, verändert sich bei RH30% kaum, um schließlich bei RH40% wieder auf 40,8 Vol. % zu sinken. Eine mögliche Erklärung könnte auch hier der schon öfter angesprochenen Sachverhalt sein, dass der Weißtorf schon zum Mischtermin sehr trocken war. Die kleine Menge Rindenumus in der Mischung RH10% reichte offenbar nicht aus, um seinen hohen Benetzungswiderstand zu überwinden, wodurch das verfügbare Wasser bei RH10% unterschätzt wurde. Ähnliche Tendenzen können auch hinsichtlich der leicht verfügbaren Wassermenge (EAW) und der schwerer verfügbaren Wassermenge (LRAW) aus Tabelle 3.2 und der Abb. 3.22 abgelesen werden. Wird das verfügbare Wasser der RH-Substrate im Vergleich zu dem der übrigen Mischsubstrate gesehen, so lässt sich eindeutig feststellen, dass sie damit weit im oberen Drittel einzuordnen sind und auch im Vergleich zu den 13 Standardsubstraten eine gute Speicherfähigkeit für verfügbares Wasser aufweisen.

Die Substrate STf40% und STf60% müssen bezüglich ihrer Fähigkeit, Wasser verfügbar zu speichern, zu den besten Substraten unter den 23 Mischsubstraten gezählt werden. Die vier STf-Substrate besitzen eine verfügbare Wassermenge (AW) zwischen 33,4 Vol. % bei STf20% und 44,0 Vol. % bei STf40%. Genau wie bei den Mischsubstraten mit Rindenumus ist auch bei den STf-Substraten kein einheitlicher Trend in der Abhängigkeit des verfügbaren Wassers (AW) vom Anteil an gesiebttem, feinem Schwarztorf zu erkennen (siehe Abb. 3.23). Von STf20% (33,4 Vol. %) nimmt das verfügbare Wasser um 10,6 Vol. % auf 44,0 Vol. % bei STf40% zu, bevor es dann auf 41,5 Vol. % (STf60%) und zuletzt auf 36,3 Vol. % bei STf80% abfällt. Auch in diesem Fall könnte der geringe Wassergehalt des Weißtorfs und der damit einhergehende hohe Benetzungswiderstand eine Erklärung für das nicht dem Trend entsprechende Verhalten des Mischsubstrats STf20% liefern. Die Menge von 20 Vol. % gesiebttem, feinem Schwarztorf reichte offenbar nicht aus, um den hohen Benetzungswiderstand des trockenen Weißtorfs zu überwinden. Damit erfolgte eine unvollständige Wassersättigung im Verlauf der Messung und damit eine Unterschätzung von AW. Einen Überblick über die Kennwerte verfügbares Wasser (AW),

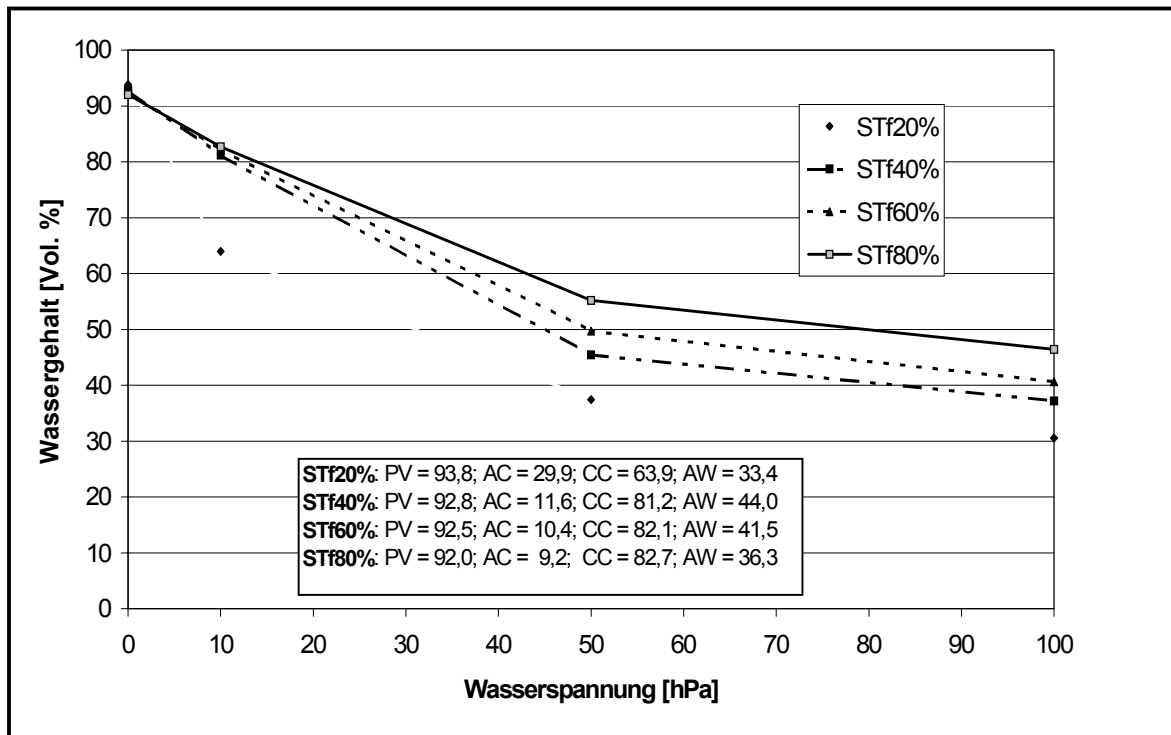


Abb. 3.23: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit gesiebttem, feinem Schwarztorf (STf), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

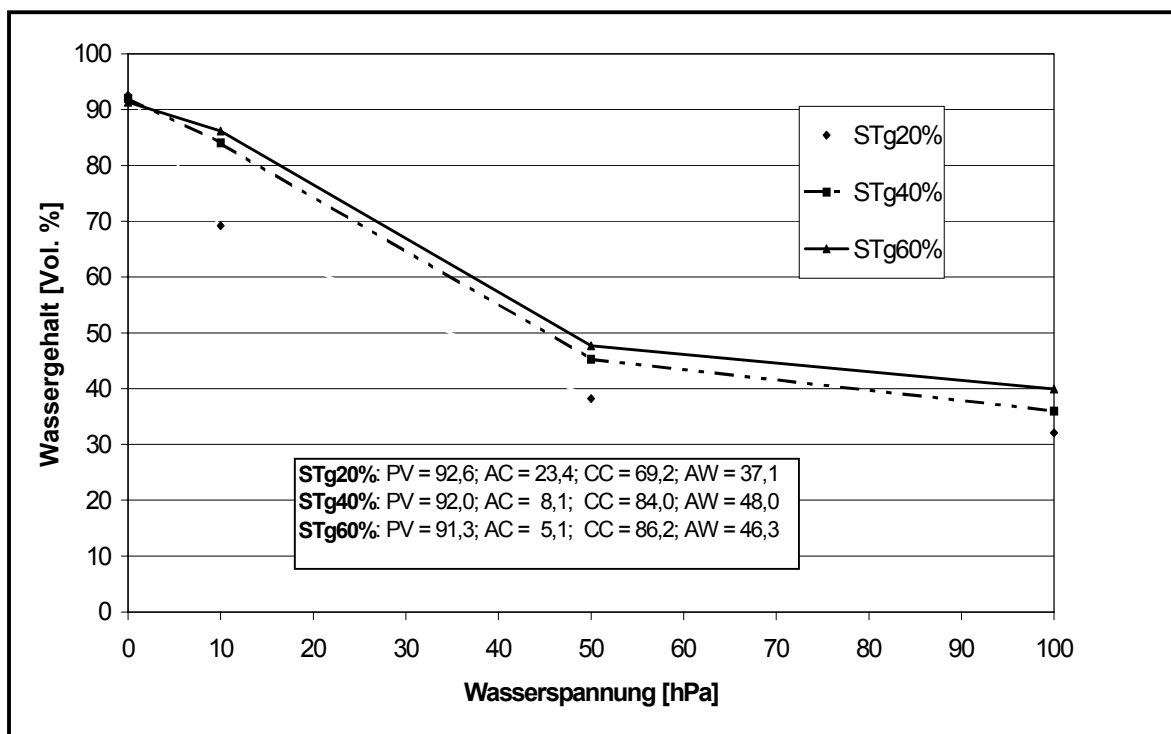


Abb. 3.24: Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (n = 4) (PV = Porenvolumen [Vol. %]; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %]; AW = verfügbares Wasser [Vol. %])

Tabelle 3.2: Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= **WV50**) und 100 hPa (= **WV100**) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= **AW**), leicht verfügbares Wasser (= **EAW**) und schwerer verfügbares Wasser (= **LRAW**) der untersuchten 23 selbsterstellten Mischsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (**s** = Standardabweichung; ¹ = AW, EAW, LRAW verhalten sich nicht gleichsinnig zum Anteil des Zuschlagsstoffs am Mischsubstrat) (n = 4)

Substrat	WV50 [Vol. %]	s	WV100 [Vol. %]	s	AW [Vol. %]	EAW [Vol. %]	LRAW [Vol. %]
granT5%	33,0	2,1	27,1	1,2	28,1	22,2	5,9
granT10%	32,6	2,2	27,8	1,4	28,0	23,2	4,8
granT20%	32,7	2,2	30,0	1,6	27,3	24,6	2,7
granT30%	35,1	2,3	30,5	2,3	23,6	19,0	4,6
GT30%	34,9	1,5	28,6	1,4	27,7	21,4	6,3
GT40%	36,2	1,5	32,2	0,8	29,1	25,1	4,0
GT50%	35,2	2,0	30,2	0,5	33,1	28,1	5,0
GT60%	38,3	1,2	32,5	0,5	34,1	28,3	5,8
KF10%	35,7	2,6	28,4	2,5	36,0	28,7	7,3
KF15%	34,0	2,6	29,0	3,8	32,8	27,8	5,0
KF20%¹	34,2	2,1	27,2	1,0	34,3	27,3	7,0
KF25%	33,8	2,2	27,3	2,6	32,1	25,6	6,5
RH10%¹	38,9	2,2	28,8	1,4	40,7	30,6	10,1
RH20%	41,7	1,1	34,6	1,7	45,0	37,9	7,1
RH30%	45,1	0,7	37,7	1,7	44,7	37,3	7,4
RH40%	46,4	0,9	39,0	2,3	40,8	33,4	7,4
STf20%¹	37,4	1,0	30,5	1,3	33,4	26,5	6,9
STf40%	45,4	0,7	37,2	1,1	44,0	35,8	8,2
STf60%	49,7	1,9	40,6	2,5	41,5	32,4	9,1
STf80%	55,2	3,8	46,4	3,8	36,3	27,5	8,8
STg20%¹	38,2	3,4	32,1	2,3	37,1	31,0	6,1
STg40%	45,3	0,1	36,0	0,8	48,0	38,7	9,3
STg60%	47,7	1,3	39,9	0,8	46,9	38,5	7,8

leicht verfügbares Wasser (EAW) und schwerer verfügbares Wasser (LRAW) ermöglicht Tabelle 3.2.

Werden die Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg) betrachtet (Abb. 3.24) so zeigt sich, dass auch hier eine ähnliche Tendenz bezüglich des verfügbaren Wassers (AW) in Abhängigkeit von dem Anteil des Schwarztorfs im Mischsubstrat auszumachen ist, wie schon zuvor bei den RH- und STf-Mischsubstraten. Wieder tritt der niedrigste Wert mit 37,1 Vol. % für das verfügbare Wasser (AW) bei dem Mischsubstrat mit nur 20 Vol. % ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg20%) auf (Tabelle 3.2). Offensichtlich war auch in diesem Fall das Volumen an Schwarztorf zu gering, um den hohen Benetzungswiderstand des Weißtorfs zu überwinden. Ein Vergleich der Werte des verfügbaren Wassers (AW) der STg-Mischsubstrate mit den übrigen Mischsubstraten zeigt jedoch die höchsten Werte bei STg60% (46,9 Vol. %) und bei STg40% (48,0 Vol. %). Damit wurde bei STg40% sogar die größte verfügbare Wassermenge aller 36 untersuchten Substrate ermittelt. Die Kennwerte leicht verfügbares Wasser (EAW) und schwerer verfügbares Wasser finden sich in Tabelle 3.2.

Auf die Vorstellung der Werte für das Volumengewicht der einzelnen Substrate, das sich zum Ende der Messung im Probenzylinder der ISHS-Methode eingestellt hat (dB_E [g / cm³]) und mit dem die Containerkapazität (CC) und das Porenvolumen (PV) berechnet wurden (siehe Formel 6 und Formel 7), wird an dieser Stelle verzichtet. Im Verlauf der Vorstellung der Ergebnisse, die mit Hilfe der Q-Methode ermittelt wurden und deren Vergleich mit der ISHS-Methode, werden die mit der ISHS-Methode erhaltenen Werte das Volumengewicht (dB_E) dargestellt und in Beziehung zu den mit anderen Methoden erhaltenen entsprechenden Kennwerten gesetzt. Daneben können die Kennwerte des Volumengewichts der Substrate, die sich im Verlauf der Messung im Probenzylinder der ISHS-Methode eingestellt haben (dB_E), auch aus der Tabelle A1 im Anhang entnommen werden, wo neben den vier Einzelwerten aus 2 Messungen auch der daraus errechnete Median, das arithmetische Mittel und die Standardabweichung (s) aufgeführt sind.

3.3 Ergebnisse der Schnellmethode nach SCHLICHTING **(= Q-Methode)**

3.3.1 Varianten des Volumengewichts (dB_A) der Substratproben

Wie im Kapitel 2.2.2.2 dargelegt wurde, arbeiten die Q-Methode und die M-ISHS-Methode mit einem bestimmten Volumengewicht im Probenzylinder (dB_A), das vor der Messung im Probenzylinder durch Einwiegen des Substrats erzeugt wird (dB_A = Volumengewicht bzw. Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Anfang der Messung [g / l]). Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier unterschiedliche Varianten der Ermittlung des Volumengewichtes (dB_A) und deren Einfluss auf die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts getestet. In diesem Kapitel werden daher zunächst die Ergebnisse der unterschiedlichen Ermittlungsvarianten (Topffest, VDLUFA-5, VDLUFA und VDLUFA+5) von dB_A vorgestellt, bevor in den dann folgenden Kapiteln auf die damit ermittelten Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts eingegangen wird.

Um bessere Vergleichsmöglichkeiten zu bieten, werden die Ergebnisse der vier Ermittlungsvarianten des Volumengewichtes bzw. der Lagerungsdichte zum Anfang der Messung (dB_A) zuerst für die 13 Standardsubstrate vorgestellt und im Anschluss daran für die 23 Mischsubstrate. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in den folgenden Abbildungen zum Volumengewicht (dB_A) maximal fünf verschiedene Substrate und deren Volumengewicht in Abhängigkeit von der Ermittlungsvariante zusammengefasst. Zusätzlich wurde in den Abbildungen in allen Fällen mit der gleichen Skalierung der Ordinate (y-Achse) gearbeitet, um zu verdeutlichen, welche Spannweite hinsichtlich des Volumengewichtes innerhalb der 36 untersuchten Substratvarianten auftritt. In der Tabelle 3.3 sind nochmals alle 13 Standardsubstrate und deren Volumengewichte (dB_A) mit den dazugehörigen Standardabweichungen (s) zusammengestellt worden. Für die 23 Mischsubstrate erfolgte eine entsprechende Zusammenstellung in Tabelle 3.4. Genauere Tabellen, die neben den in den Tabellen und Abbildungen dieses Kapitels benutzten Mittelwerten auch die entsprechenden Einzelwerte enthalten, sind im Anhang in den Tabellen A2 und A3 zu finden.

Der Vergleich der vier unterschiedlichen Ermittlungsmethoden des Volumengewichtes (dB_A) wurde mit dem Ziel durchgeführt, eine Methode zu finden, die zu einem möglichst hohen Volumengewicht (dB_A) führt. Der Grund dafür war die Annahme,

dass ein hohes Volumengewicht im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A), auch zu einem möglichst hohen Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) führen würde. Je höher das Volumengewicht bzw. die Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) ist, desto geringer ist auch die damit ermittelte Luftkapazität (AC), wie z.B. FONTENO (1993) zeigen konnte. Die Luftkapazität (AC), die bei einem Volumengewicht (dB_E) ermittelt wurde, das höher ist als die in der gärtnerischen Praxis anzutreffenden Volumengewichte in den Töpfen / Containern (Topffestigkeit), wird in der gärtnerischen Praxis auch nicht unterschritten. Die unter diesen Vorgaben ermittelte Luftkapazität (AC) stellt also ein denkbares Minimum für diesen Kennwert dar, das beim Anwender nicht unterschritten wird und dem Produzenten daher Sicherheit vor Reklamationen gibt.

In Abb. 3.25 sind die Volumengewichte, die zum Anfang der Messung im Probenzylinder eingestellt werden (dB_A [g / l]), für die drei Einheitserden (EP, EPr, ET) sowie für die Substrate CF und PH, in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren des Volumengewichts (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) dargestellt.

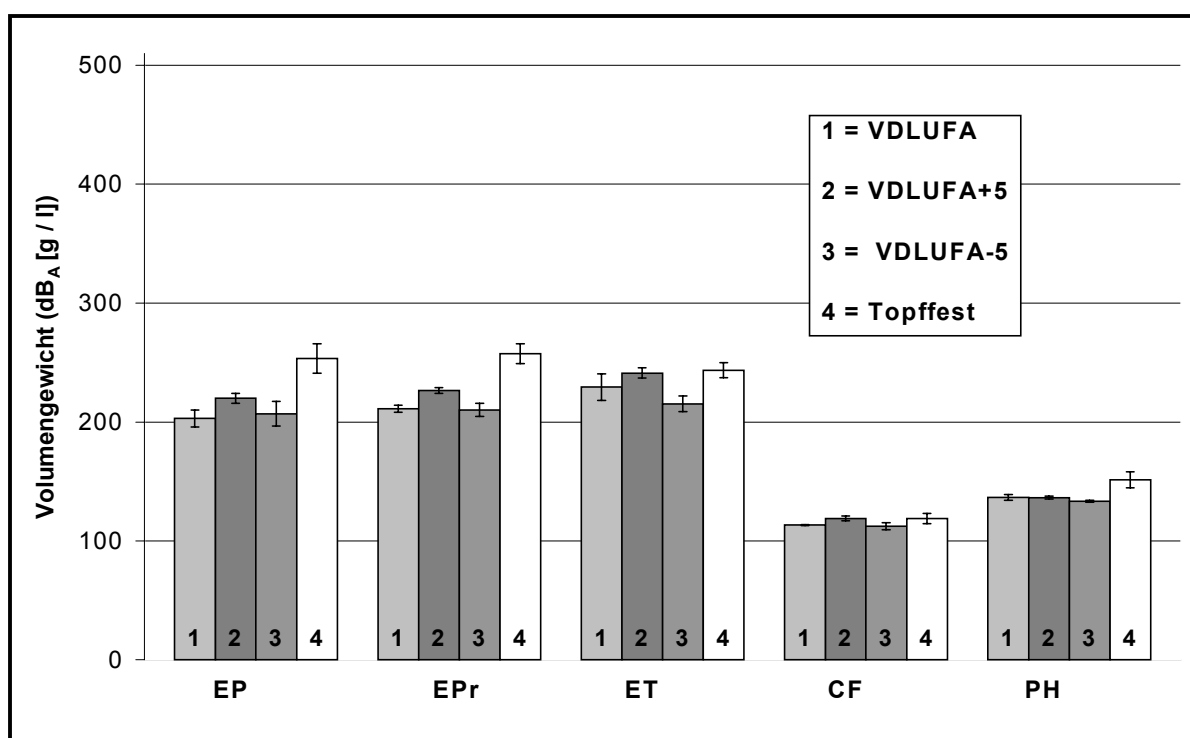


Abb. 3.25: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate EP, EPr, ET, CF und PH in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 3, bei Topffest n = 20)

Wie zu erkennen ist, ermittelt das Verfahren Topffest bei vier der fünf dargestellten Standardsubstrate das höchste Volumengewicht, nämlich bei den Substraten EP (253,4 g / l), EPr (257,5 g / l), ET (243,5 g / l) und PH (151,4 g / l). Lediglich bei dem Substrat CF liefert die Variante VDLUFA+5 mit 119,0 g / l den höchsten Wert für dB_A . Werden die zweithöchsten Werte für dB_A betrachtet, so liefert die Variante VDLUFA+5 bei 3 Substraten (EP, EPr und ET) entsprechende Werte, VDLUFA (PH) und Topffest (CF) bei jeweils einem Substrat. Hinsichtlich der Standardabweichung (s) fällt auf, dass in vier Fällen die größte Streuung der Einzelwerte bei der Variante Topffest gefunden wird und in einem Fall bei der Variante VDLUFA¹. Die genauen Volumengewichte der 5 besprochenen Standardsubstrate sind zusammen mit der jeweiligen Standardabweichung (s) in Tabelle 3.3 zu finden.

(¹ Anmerkung: Topffest n = 20; VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5 n = 3)

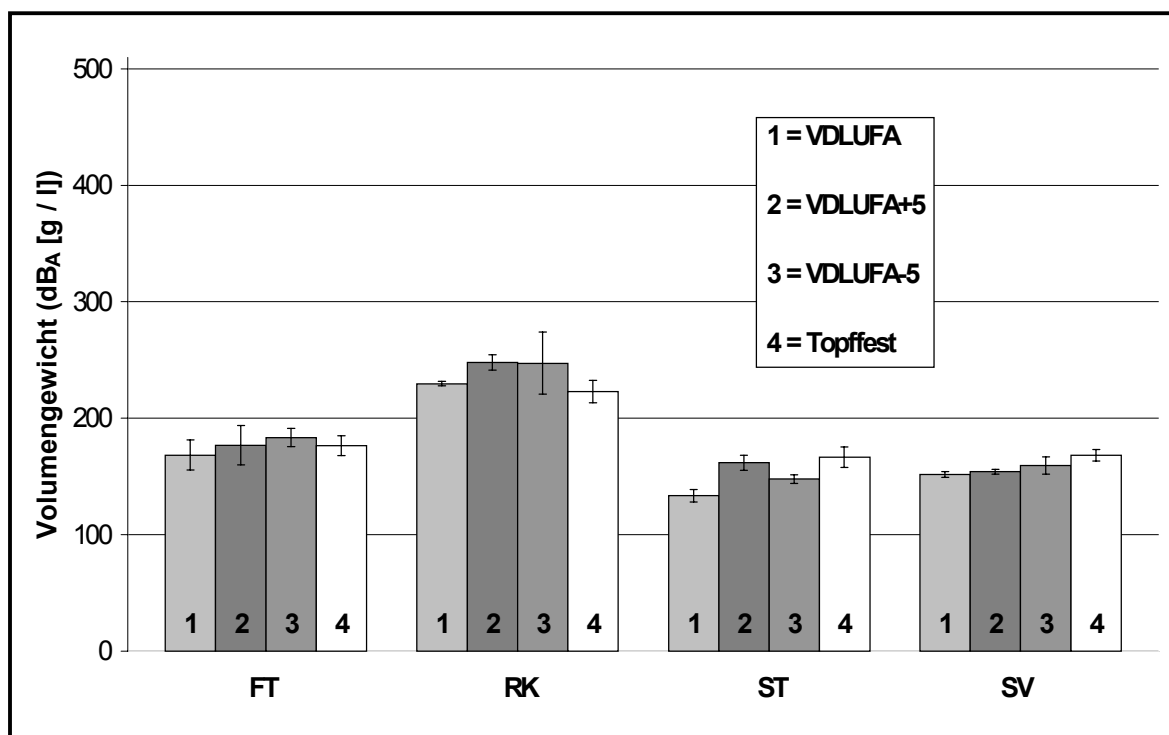


Abb. 3.26: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate FT, RK, ST und SV in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 3, bei Topffest n = 20)

Aus Tabelle 3.3 und Abb. 3.26 geht hervor, dass die Varianten VDLUFA+5 (RK = 248 g / l) und VDLUFA-5 (FT = 183,5 g / l) bei jeweils einem Substrat zum höchsten Volumengewicht führen. Das Verfahren Topffest bewirkt bei ST (166,7 g / l) und bei

SV (168,4 g / l) die Einstellung des höchsten dB_A -Wertes. Werden die Varianten betrachtet, die zu den meisten zweithöchsten Volumengewichten führen, so sind VDLUFA+5 und VDLUFA-5 mit jeweils zwei Substraten zu nennen. Beide Varianten führen ebenfalls zu den höchsten Standardabweichungen. Für VDLUFA+5 ist das Streuungsmaß (s) bei dem Substrat FT maximal, im Fall VDLUFA-5 bei den Standardsubstraten RK und SV. Lediglich bei ST zeigt die Variante Topffest den höchsten Wert für s.

Bezüglich der Volumengewichte (dB_A) der vier Substratvarianten aus Abb. 3.27 führt die Methode Topffest zu den höchsten dB_A -Werten (SW1 = 120,9 g / l; SW3 = 118,8 g / l; T1 = 133,4 g / l; T2 = 110,0 g / l). Zusätzlich findet sich auch die höchste Standardabweichung (s) bei der Methode Topffest. Mit den Methoden VDLUFA+5 (SW1, SW3, T1) und VDLUFA-5 (T2) wurden die zweithöchsten Werte für das Volumengewicht ermittelt. Genaueres Zahlenmaterial für diese vier Substrate liefert Tabelle 3.3.

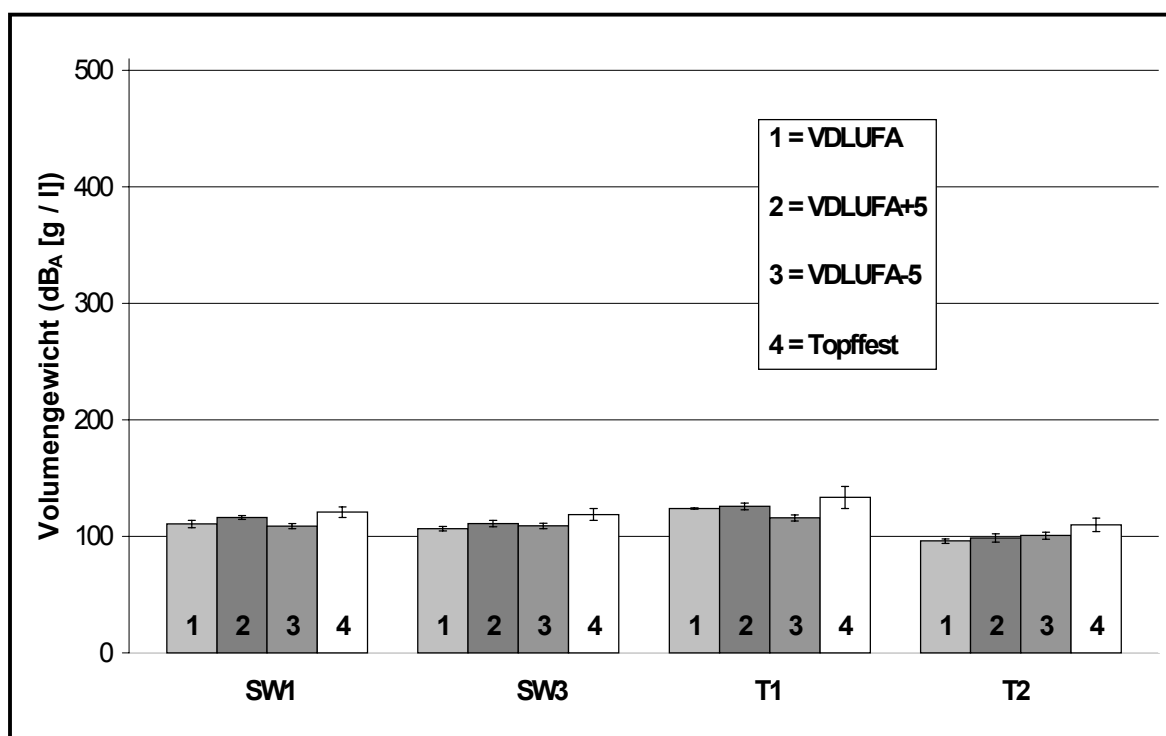


Abb. 3.27: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate SW1, SW3, T1 und T2 in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 3, bei Topffest n = 20)

Tabelle 3.3: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) (fett = maximale Werte von dB_A ; grau unterlegt = minimale Werte von dB_A ; unterstrichen = höchste Werte der Standardabweichung (s); n = 3, bei Topffest n = 20)

Substrat	VDLUFA [g / l]	s	VDLUFA+5 [g / l]	s	VDLUFA-5 [g / l]	s	Topffest [g / l]	s
EP	203,0	7,2	219,9	4,2	206,9	10,3	253,4	12,3
EPr	211,2	2,9	226,5	2,3	210,1	5,5	257,5	8,3
ET	229,3	11,1	241,2	4,3	215,2	6,6	243,5	6,3
CF	113,4	0,4	119,0	1,9	112,3	2,9	118,8	4,4
PH	136,5	2,4	136,3	1,2	133,4	0,7	151,4	6,7
FT	168,5	12,8	176,8	16,9	183,5	7,7	176,4	8,4
RK	229,8	1,9	248,0	6,6	247,3	26,6	222,9	9,5
ST	133,4	5,2	161,9	6,6	147,9	3,7	166,7	8,8
SV	151,8	2,6	154,1	2,0	159,5	7,4	168,4	5,0
SW1	110,6	3,0	116,3	1,8	108,8	2,0	120,9	4,5
SW3	106,6	2,0	110,8	2,8	109,1	2,3	118,8	5,1
T1	123,9	0,6	125,6	2,8	115,8	2,7	133,4	9,5
T2	96,1	1,9	98,7	3,6	100,6	3,0	110,0	5,6

Die Volumengewichte, die mit den vier unterschiedlichen Methoden für die Mischsubstrate mit granT ermittelt wurden, sind in Abb. 3.28 sowie in Tabelle 3.4 aufgeführt. Es fällt auf, dass das Volumengewicht (dB_A) erwartungsgemäß bei allen vier getesteten Ermittlungsvarianten mit dem Gehalt an granuliertem Ton zunimmt. Zusätzlich zeigt ein Vergleich mit den anderen 32 untersuchten Substratvarianten, dass bei keinem anderen Substrat ein so hohes Volumengewicht erzeugt werden konnte, wie bei den Varianten granT20% und granT30%, was über alle Ermittlungsmethoden gilt. Mit der Methode VDLUFA+5 wurde in drei der vier Fälle das höchste Volumengewicht eingestellt (granT5% = 155,8 g / l; granT20% = 327,2 g / l; granT30% = 465,7 g / l) und in einem Fall mit Hilfe der Methode Topffest (granT10% = 198,2 g / l). Zusätzlich führt die Variante VDLUFA+5 bei dem Mischsubstrat granT10% zum zweithöchsten Wert für dB_A . Daneben liefern die Methoden VDLUFA (granT20% und granT30%) und Topffest (granT5%) die verbleibenden drei zweithöchsten Volumengewichte (dB_A). Insbesondere für die Mischungen granT20% und granT30% werden sehr hohe Standardabweichungen (s) registriert. Dabei liefert die Methode VDLUFA die höchsten s-Werte, gefolgt von VDLUFA+5 und VDLUFA-5. Die Ermittlungsvari-

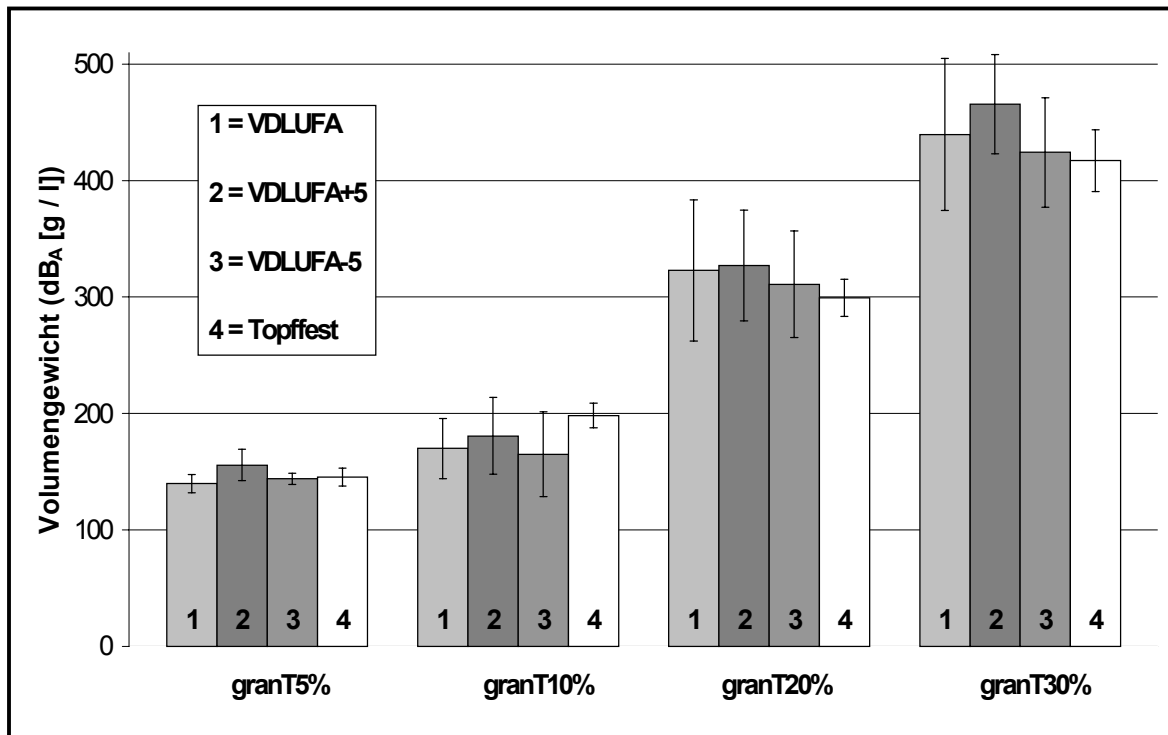


Abb. 3.28: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); $n = 3$, bei Topffest $n = 20$)

ante Topffest zeichnet sich zwar auch durch relativ hohe Standardabweichungen aus, es werden aber bei weitem nicht so hohe Standardabweichungen erzielt, wie bei den anderen drei Methoden (vergleiche auch Tabelle 3.4).

Ein möglicher Erklärungsansatz für diese starken Schwankungen der Einzelwerte um den Mittelwert ist der, dass das sehr trockene Substrat zur Entmischung neigt, was zusätzlich noch durch die Kugelform des granulierten Tons gefördert wird. Dadurch wurde offenbar nicht bei allen Wiederholungen die gleiche Menge granulierten Tons in die Messzylinder zur Bestimmung des Volumengewichtes eingefüllt, obwohl immer mit dem gleichen Substratvolumen gearbeitet wurde. Da die Mischsubstrate zum Zeitpunkt der Ermittlung der Variante Topffest durch Mitarbeiter im Versuchsbetrieb in Ruthe noch feuchter waren, neigten die Substrate zu diesem Termin auch nicht so stark zum Entmischen (kleinere s-Werte). Die Bestimmung der Varianten VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5 konnte dagegen erst nach Abschluss des Umzuges der Abteilung Baumschule ermittelt werden (also ca. sechs Monate später),

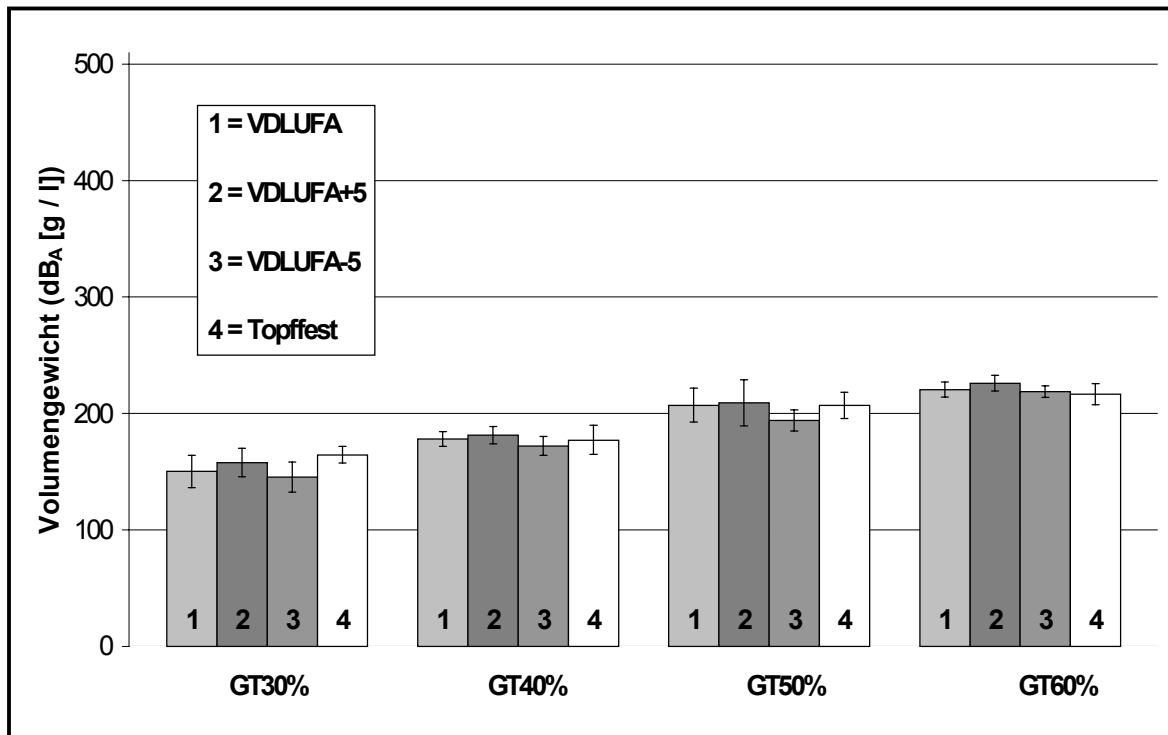


Abb. 3.29: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s), $n = 3$, bei Topffest $n = 20$)

was dazu führte, dass zu diesem Zeitpunkt besonders das Mischsubstrat mit dem granulierten Ton (granT) schon wesentlich trockener war (starke Entmischung, hohe s-Werte).

Ein Blick in die Abb. 3.29, in der die Volumengewichte der vier Mischsubstrate mit Grubenton-Torf-Vormischung (GT) aufgetragen sind, verdeutlicht, dass bei diesen vier Substraten bei weitem nicht so hohe dB_A -Werte erreicht werden wie bei den granT-Substraten. Die mit dem Gruben- oder Montmorillonit-Ton erstellten Mischsubstrate enthalten geringere Tonanteile als die Substrate mit dem granulierten Ton, da lediglich eine Grubenton-Torf-Vormischung in den angegebenen Volumenanteilen zum Weißtorf zugemischt wurde (siehe auch Tabelle 2.3, S.15). Dadurch erklären sich auch die wesentlich geringeren Volumengewichte von GT50% und GT60% verglichen mit granT20% und granT30%. Da es sich bei dem Grubenton um feuchten Ton handelt, ist der Wassergehalt bei diesen Mischsubstraten nicht so gering wie bei den Mischsubstraten mit granuliertem Ton. Dadurch ist es offenbar nicht zu einer so starken Entmischung der Substrate gekommen, zumal der Grubenton im Vergleich zum granulierten Ton auch nicht die ausgesprochene Kugelform aufweist. Dieser

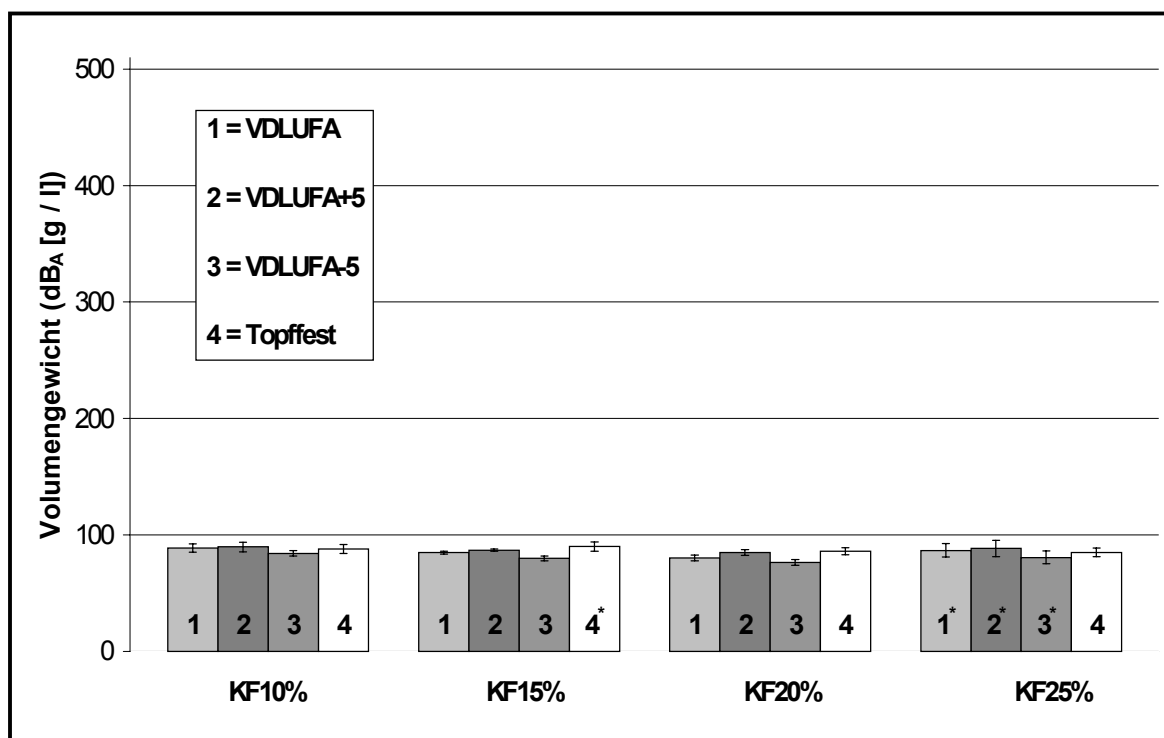


Abb. 3.30: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate KF10%, KF15%, KF20% und KF25% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Werte enthalten offenbar Messfehler; n = 3, bei Topffest n = 20)

Sachverhalt erklärt auch die wesentlich geringeren Werte für die Standardabweichung (s) der GT-Substrate verglichen mit den granT-Varianten.

Im Fall der GT-Mischsubstrate führt die Methode VDLUFA+5 in drei der vier Fälle zu den höchsten Werten des Volumengewichts (dB_A) (GT40% = 181,3 g / l; GT50% = 209,2 g / l; GT60% = 226,0 g / l). Im Fall der Substratvariante GT30% wird mit Hilfe von VDLUFA+5 der zweithöchste Wert erreicht, während Topffest bei diesem Substrat mit 164,6 g / l den höchsten dB_A -Wert liefert. Über alle getesteten Ermittlungsvarianten und Mischsubstrate mit Grubenton lässt sich beobachten, dass das Volumengewicht erwartungsgemäß mit dem Grubenton-Torf-Vormischungsanteil zunimmt.

Aufgrund der Natur und Beschaffenheit des Rohstoffs Kokosfasern war zu erwarten, dass bei den Mischsubstraten, die aus Weißtorf und Kokosfasern (KF) erstellt wurden, mit allen getesteten Ermittlungsvarianten von dB_A die geringsten Volumengewichte unter den 36 untersuchten Substraten erzielt würden. Dies bestätigen die Werte in Tabelle 3.3 und 3.4 sowie in Abb. 3.30. Werden die vier getesteten Methoden und Substratvarianten verglichen, bleibt festzuhalten, dass sie sich kaum unterscheiden.

Im Gegensatz zu den zuletzt besprochenen Mischsubstraten mit Kokosfasern, lässt sich bei den Mischungsvarianten mit Rindenumus (RH) ein eindeutiger Trend des Volumengewichts (dB_A) in Abhängigkeit vom Gehalt an Rindenumus über alle vier getesteten Ermittlungsmethoden festhalten (Abb. 3.31). Das Volumengewicht steigt mit dem Rindenumusgehalt im Mischsubstrat an, was auch aus Tabelle 3.4 hervorgeht. Mit drei maximalen (RH10% = 113,3 g / l; RH20% = 132,9 g / l; RH30% = 147,6 g / l) und einem zweithöchsten dB_A -Wert zeichnet sich wieder die Methode VDLUFA+5 aus. Den vierten Maximalwert unter den RH-Substraten liefert die Variante Topffest (RH40% = 148,6 g / l). Hohe Standardabweichungen treten besonders bei RH40% auf.

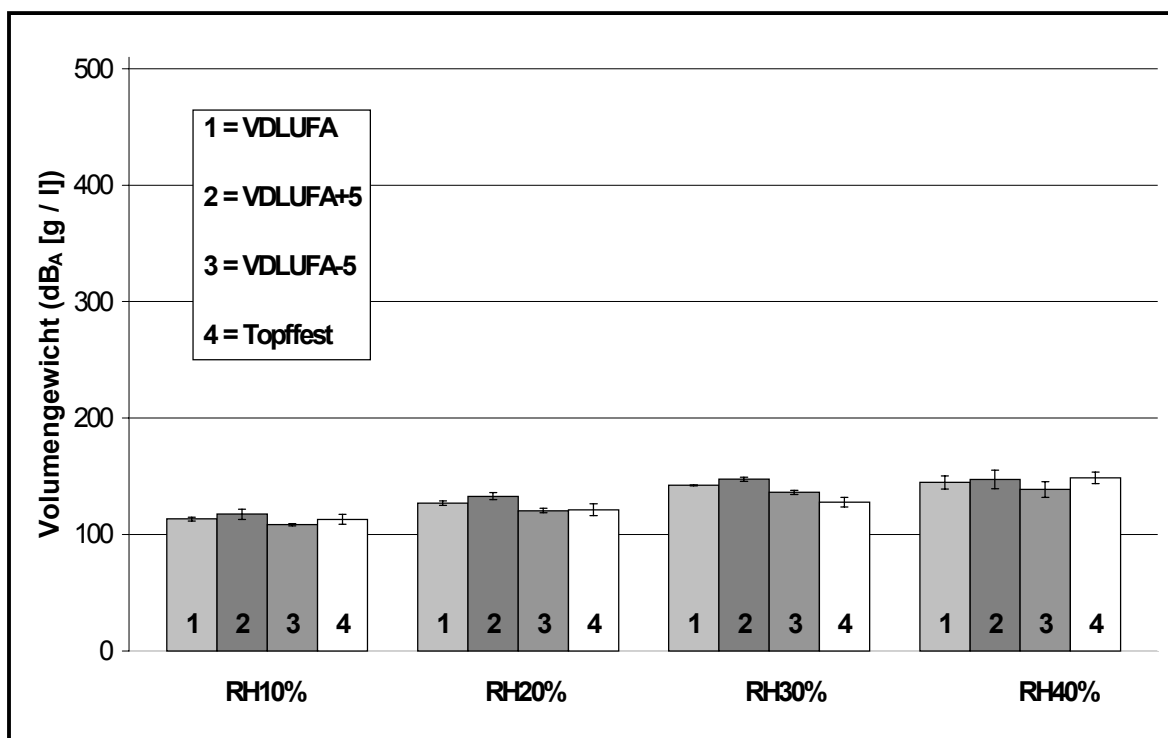


Abb. 3.31: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate RH10%, RH20%, RH30% und RH40% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 3, bei Topffest n = 20)

Das Volumengewicht (dB_A), das sich in Abhängigkeit von dem Ermittlungsverfahren bei den Mischsubstraten mit gesiebttem, feinem Schwarztorf (STf) einstellt, nimmt jeweils zwei Höchstwerte mit Hilfe von Topffest (STf20% = 96,6 g / l; STf40% = 101,6 g / l) und VDLUFA+5 (STf60% = 143,6 g / l; STf80% = 123,2 g / l) an. Alle zweit-

höchsten dB_A -Werte wurden mit der Methode VDLUFA ermittelt. Tabelle 3.4 und Abb. 3.32 verdeutlichen, dass es bezüglich des Volumengewichtes bei den drei standardisierten Ermittlungsmethoden (VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5) keinen eindeutigen Trend in Abhängigkeit vom Schwarztorfanteil zu beobachten gibt. Zunächst steigt der dB_A -Wert bei allen drei maschinellen Ermittlungsmethoden von STf20% bis STf60% an, um dann bei STf80% wieder kleiner zu werden.

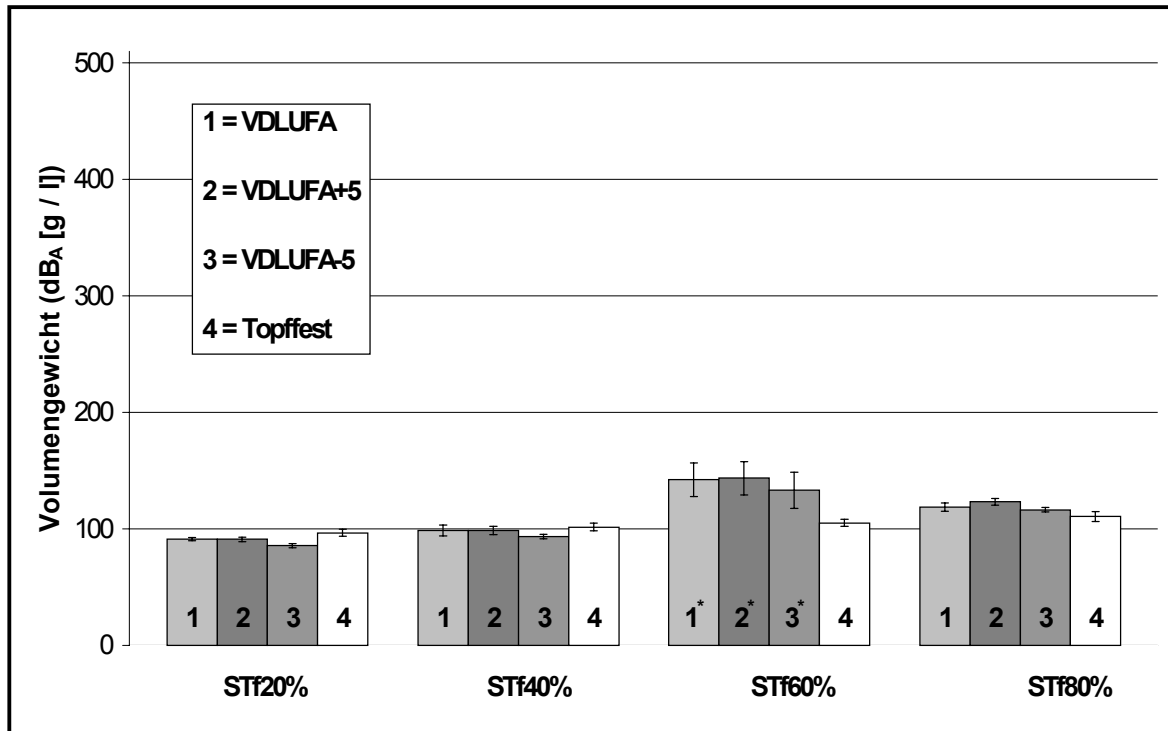


Abb. 3.32: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate STf20%, STf40%, STf60% und STf80% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Werte enthalten offenbar Messfehler; n = 3, bei Topffest n = 20)

Wird dagegen der Trend von dB_A bei dem Verfahren Topffest betrachtet, so lässt sich feststellen, dass das Volumengewicht mit dem Schwarztorfanteil zunimmt. Wertet man die Werte des Volumengewichts (dB_A), die mit den Methoden VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5 bei der Mischungsvariante STf60% ermittelt wurden, als Messfehler, eine Auffassung, die durch die hohen Werte für die Standardabweichung (s) gestützt wird, so könnte auch bei diesen drei Ermittlungsverfahren eine Zunahme des Volumengewichts mit dem Schwarztorfgehalt unterstellt werden.

Die Auffassung, dass es bei den dB_A -Werten von STf60% durch Messfehler zur Überschätzung des tatsächlichen Volumengewichts gekommen ist, wird durch einen Blick in die entsprechenden Zeilen der Tabelle A2 im Anhang bestätigt, wo für alle drei Ermittlungsverfahren jeweils einer von drei Einzelwerten besonders hoch ermittelt wurde. Da aber auch die jeweils zwei anderen Einzelwerte von dB_A bei STf60% (Tabelle A2) bei allen drei Ermittlungsvarianten höher sind als die entsprechenden Messwerte bei STf80%, muss offenbar noch eine weitere Fehlerquelle für die hohen Werte des Volumengewichts (dB_A) von STf60% verantwortlich sein.

Eine Bestätigung der Hypothese, dass es im Fall von STf60% zur Überschätzung des Volumengewichts (dB_A) bei den Verfahren VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5 gekommen ist, liefert auch der Vergleich mit den Substraten mit ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg), deren Volumengewichte in Abb. 3.33 dargestellt sind. Während bei STg20% und STg40% die Volumengewichte leicht höher sind als bei STf20% und STf40%, ist das Verhältnis bei STg60% und STf60% umgekehrt, d.h. STf60% zeigt die wesentlich höheren dB_A -Werte.

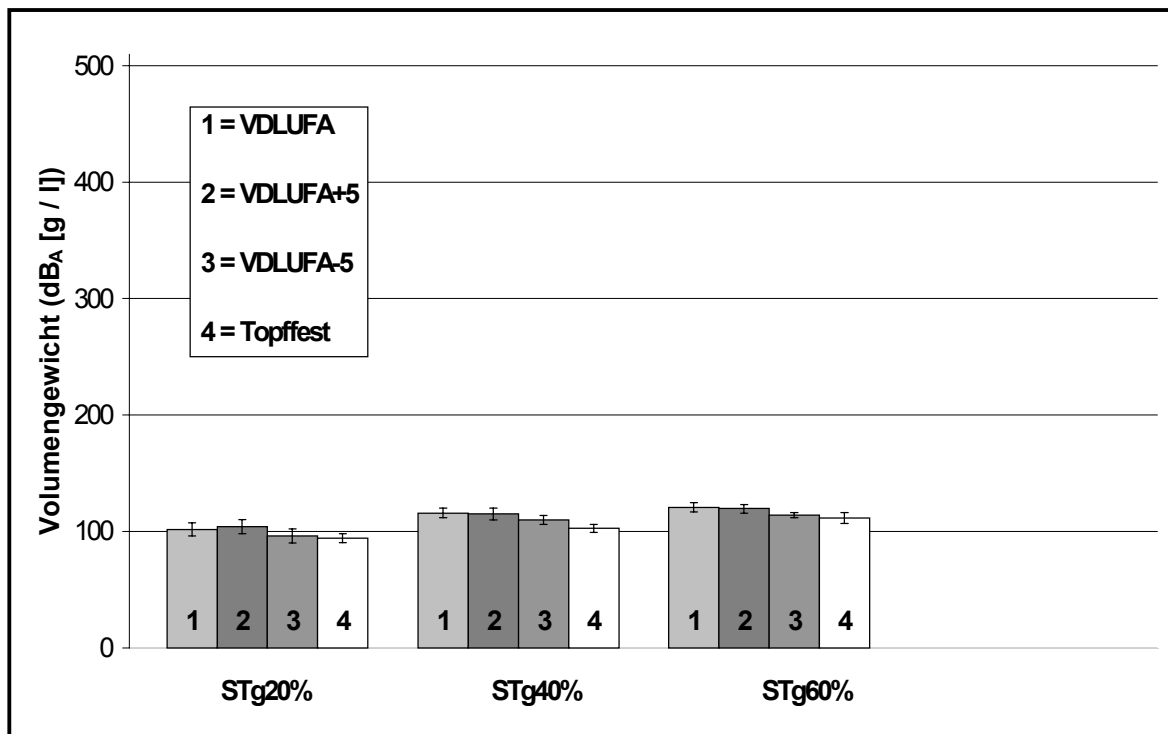


Abb. 3.33: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate STg20%, STg40% und STg60% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); $n = 3$, bei Topffest $n = 20$)

Der Vergleich der Ermittlungsverfahren des Volumengewichts (dB_A) zeigt, dass mit Hilfe von VDLUFA die höchsten Werte bei STg40% (116,0 g / l) und STg60% (120,8 g / l) erzielt werden. Bei STg20% (104,3 g / l) liefert VDLUFA+5 das höchste Volumengewicht, bei STg40% und STg60% die zweithöchsten Werte für dB_A . Die niedrigsten dB_A -Werte werden im Fall von STg mit dem Verfahren Topffest ermittelt. Anhand der Abb. 3.33 ist der Trend zur Zunahme des Volumengewichts mit dem Schwarztorfanteil abzulesen.

Werden die vier Ermittlungsmethoden des Volumengewichts (dB_A) über alle 36 untersuchten Substratvarianten miteinander verglichen, so ist selbst ohne zusätzliche statistische Auswertung ein deutliches Ergebnis abzulesen (dieses geht auch aus den Abbildungen 3.34 und 3.35 hervor):

- Die meisten Maximalwerte des Volumengewichts (dB_A) werden mit Hilfe der Methode Topffest (17 Maxima) erzeugt, gefolgt von VDLUFA+5 (16 Maxima).
- Mit der Methode VDLUFA-5 wurde erwartungsgemäß lediglich ein Maximum erzeugt, mit der Methode VDLUFA aber auch nur zwei Maxima.
- Die Variante VDLUFA erzeugt bei 16 Substraten die zweithöchsten Werte für dB_A , gefolgt von VDLUFA+5 (15 Substrate), VDLUFA-5 (3) und Topffest (2).
- Die größte Standardabweichung (s) wird bei dem Verfahren Topffest in 19 Fällen registriert, gefolgt von VDLUFA+5 in sieben Fällen und den Methoden VDLUFA und VDLUFA-5 mit fünf Fällen. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da es sich bei der Methode Topffest um eine Methode handelt, die nicht standardisiert ist. Im Gegensatz dazu bewirkt die maschinelle und standardisierte Ermittlung des Volumengewichtes (dB_A) bei den Methoden VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5, bei denen die durchführende Person nur noch wenig Einfluss auf das Ergebnis hat, eine geringere Standardabweichung (s).
- Mit Hilfe der Methode VDLUFA+5 wird bei keinem der untersuchten 36 Substrate ein minimaler dB_A -Wert erzeugt (siehe Abb. 3.35).
- Die meisten Minima des Volumengewichtes (dB_A) werden mit Hilfe der Methode VDLUFA-5 ermittelt (19), gefolgt von Topffest mit 10 Fällen und VDLUFA mit sieben Fällen (siehe Abb. 3.35).

Wird das Ziel des Vergleichs der vier Ermittlungsmethoden von dB_A nochmals ins Blickfeld gerufen, so kann es aufgrund der hier dargestellten Ergebnisse nur eine

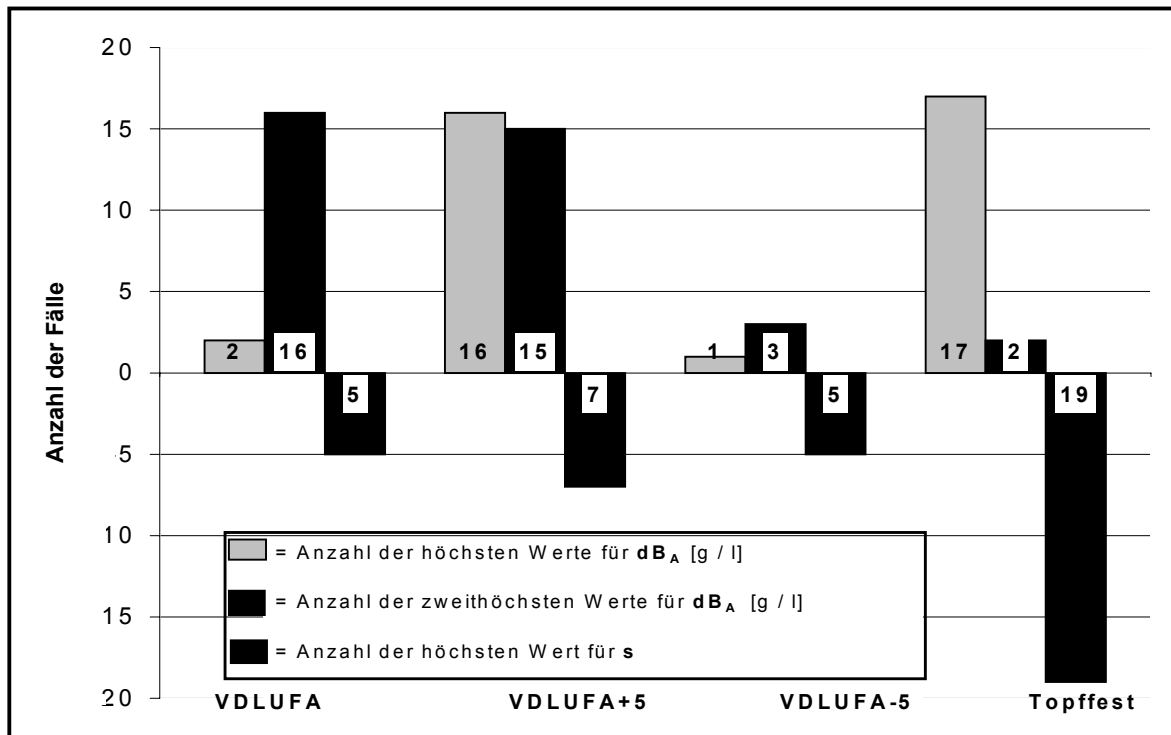


Abb. 3.34: Anzahl der Fälle mit den höchsten Werten (Maxima) des Volumengewichts (dB_A) [g / l], Anzahl der Fälle mit den zweithöchsten Werten für dB_A sowie Anzahl der Fälle mit der höchsten Standardabweichung (s) der vier getesteten Ermittlungsmethoden von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), bei den 36 untersuchten Substraten

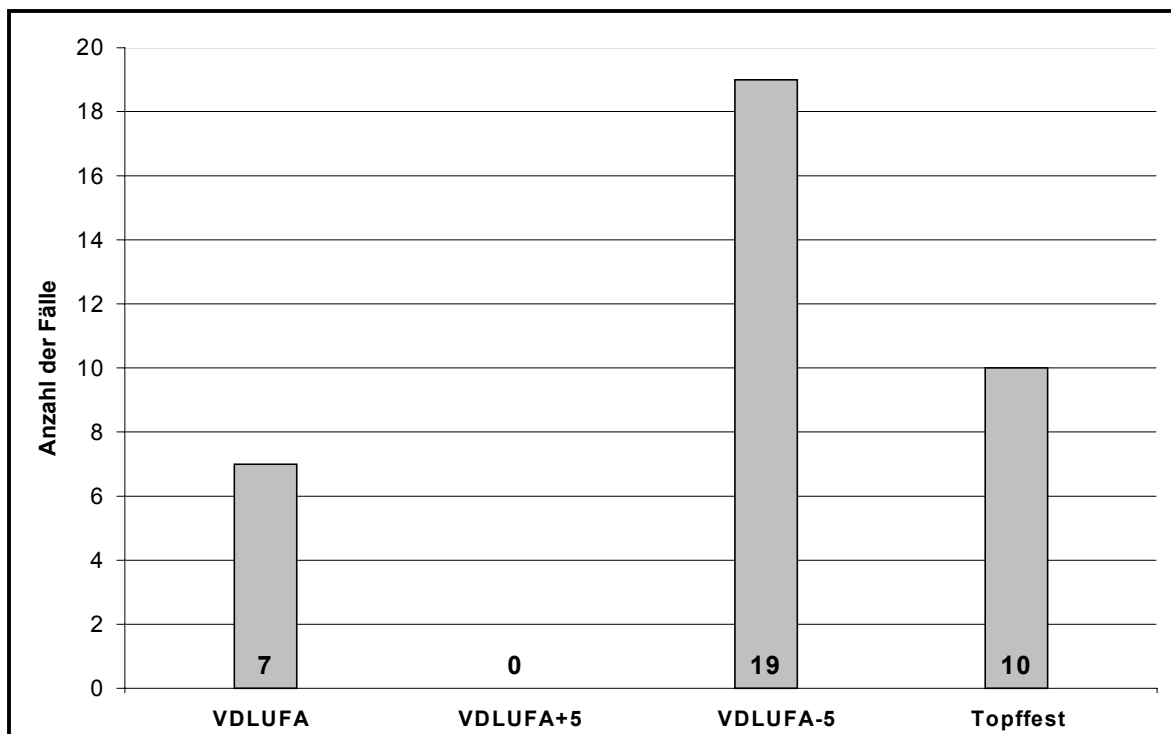


Abb. 3.35: Anzahl der Fälle mit den kleinsten Werten (Minima) des Volumengewichts (dB_A) der vier getesteten Ermittlungsmethoden von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), bei den 36 untersuchten Substraten

Tabelle 3.4: Volumengewicht (dB_A [g / l]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) (fett = maximale Werte von dB_A ; grau unterlegt = minimale Werte von dB_A ; unterstrichen = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Werte enthalten offenbar Messfehler; n = 3, bei Topffest n = 20)

Substrat	VDLUFA [g / l]	s	VDLUFA+5 [g / l]	s	VDLUFA-5 [g / l]	s	Topffest [g / l]	s
granT5%	139,7	7,7	155,8	13,6	143,9	4,8	145,4	7,8
granT10%	170,1	25,9	180,8	32,9	165,0	36,4	198,2	10,5
granT20%	323,0	60,6	372,2	47,6	311,0	45,8	299,5	15,8
granT30%	439,7	<u>65,4</u>	465,7	42,7	424,3	47,0	417,2	26,5
GT30%	150,3	<u>13,9</u>	157,9	12,1	145,5	13,1	164,6	7,2
GT40%	178,1	6,3	181,3	7,4	172,3	8,1	177,3	12,4
GT50%	207,2	14,6	209,2	<u>19,8</u>	194,0	9,2	207,0	11,3
GT60%	220,6	6,6	226,0	6,7	218,8	4,9	<u>216,5</u>	<u>9,1</u>
KF10%	88,9	3,5	89,7	4,0	84,3	2,3	88,1	<u>4,0</u>
KF15%	84,8	1,2	87,1	1,1	79,9	2,1	90,0*	<u>4,0</u>
KF20%	80,4	2,5	85,0	2,5	76,3	2,5	86,1	<u>3,0</u>
KF25%	86,7*	5,8	88,4*	<u>7,0</u>	80,8*	5,4	85,0	3,6
RH10%	113,3	1,5	117,5	<u>4,3</u>	108,6	1,0	113,1	4,2
RH20%	127,0	1,9	132,9	2,9	120,6	1,8	121,2	<u>5,1</u>
RH30%	142,4	0,4	147,6	1,8	136,4	1,8	127,9	<u>4,1</u>
RH40%	144,7	5,7	147,3	<u>7,9</u>	138,7	6,7	146,6	5,0
STf20%	91,2	1,3	91,1	1,9	85,7	1,8	96,9	<u>3,0</u>
STf40%	98,6	<u>4,6</u>	98,6	3,4	93,4	2,0	101,6	3,5
STf60%	142,3*	14,6	143,6*	14,3	133,3*	<u>15,5</u>	105,0	3,0
STf80%	118,7	3,5	123,2	2,8	116,4	2,3	110,5	<u>4,3</u>
STg20%	101,7	5,7	104,3	5,9	96,1	<u>6,0</u>	94,4	3,8
STg40%	116,0	4,1	115,0	<u>5,0</u>	109,9	3,9	102,7	3,4
STg60%	120,8	3,8	119,6	3,6	114,1	2,2	111,5	<u>4,6</u>

Schlussfolgerung geben. Von den vier getesteten Methoden erscheint die Methode VDLUFA+5 am besten geeignet zu sein, ein möglichst hohes Volumengewicht (dB_A) zu ermitteln. Obwohl mit dieser Methode nur in 16 Fällen das maximale Volumengewicht ermittelt wurde (gegenüber 17 bei Topffest), sprechen die 15 Fälle, in denen der zweithöchste Wert für dB_A erzeugt wurde (gegenüber lediglich 2 Fällen bei Topffest) und die Tatsache, dass in keinem Fall ein minimaler Wert ermittelt wurde (gegenüber 10 bei Topffest), ganz eindeutig für die Methode VDLUFA+5. Da die Methode Topffest auf Grund der geringen Standardisierung und Mechanisierung zusätzlich noch zu hohen Standardabweichungen neigt, wodurch sie schlecht reproduzierbar wird, muss sie in der hier getesteten Form als Instrument zur Einstellung eines möglichst hohen Volumengewichts (dB_A) verworfen werden.

Die Ermittlungsmethoden VDLUFA und VDLUFA-5 erscheinen durch die geringe Anzahl an maximalen und der großen Anzahl an minimalen Werten für das Volumengewicht (dB_A) ungeeignet zu sein, ein möglichst hohes Volumengewicht zu ermitteln.

Tabelle 3.5: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Ermittlungsmethoden des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)

(Angegeben sind jeweils die adjustierten p-Werte ($= p_{\text{adj}}$). Die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$. Ein signifikanter Unterschied liegt vor, wenn $p_{\text{adj}} < \alpha$ ist. Die Adjustierung der p-Werte erfolgte nach TUKEY; Werte für p_{adj} , die signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Methoden anzeigen, sind grau unterlegt)

Ermittlungsmethoden von dB_A	VDLUFA	VDLUFA+5	VDLUFA-5	Topffest
VDLUFA	_____	0,0182	0,5965	0,1816
VDLUFA+5	0,0182	_____	0,0003	0,7778
VDLUFA-5	0,5965	0,0003	_____	0,0074
Topffest	0,1816	0,7778	0,0074	_____

In Tabelle 3.5 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse (ANOVA) aufgeführt, die die Frage klären soll, ob sich die vier unterschiedlichen Ermittlungsmethoden von dB_A auch statistisch gesichert, d.h. signifikant, unterscheiden.

Es wird deutlich, dass sich die Methoden, mit denen die wenigsten Maxima ermittelt wurden (VDLUFA und VDLUFA-5) nicht signifikant unterscheiden. Ebenso konnte kein statistisch gesicherter Unterschied zwischen den beiden Methoden gefunden werden, die zu den meisten Maxima von dB_A geführt haben. Zusätzlich wird deutlich, dass sich die Methode VDLUFA+5 sehr wohl signifikant von VDLUFA-5 und VDLUFA unterscheidet, die Methode Topffest dagegen lediglich von VDLUFA-5. Damit unterstützt auch die varianzanalytische Verrechnung der Messwerte das Ergebnis,

dass die Methode VDLUFA+5 unter den vier getesteten Methoden die höchsten Werte für das Volumengewicht (dB_A) liefert.

3.3.2 Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E)

Am Ende eines Messdurchgangs mit der Schnellmethode nach SCHLICHTING (= Q-Methode), ist die Lagerungsdichte bzw. das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) einer der ersten Kennwerte, die errechnet werden müssen, um die Wasserkapazität (WC [Vol. %]) und die Luftkapazität (AC [Vol. %]) bestimmen zu können.

Durch Sackung und Schrumpfung im Verlauf der Messung nimmt das Volumen des Substrats im Probenzylinder ab, und es entsteht eine Fehlstelle. Das Volumen dieser Fehlstelle wird bestimmt (Formel 18) und für die Berechnung des Substratvolumens am Ende der Messung verwendet (Formel 19). Mit diesem Wert wird die Lagerungsdichte bzw. das Volumengewicht der Substratprobe zum Ende der Messung im Probenzylinder (dB_E) berechnet (Formel 20).

Es wurde schon darauf hingewiesen, dass die Lagerungsdichte bzw. das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) einen besonders starken Einfluss auf die Luftkapazität hat. Mit steigendem Volumengewicht (dB_E) wird nämlich besonders die Luftkapazität (AC) kleiner, wie FONTENO (1993) zeigen konnte. Aus diesem Grund sollen die dB_E -Werte, die mit den vier getesteten Varianten der Q-Methode (die vier dB_A -Varianten) erzielt wurden, in einem eigenen Kapitel vorgestellt werden. Dabei wird, nach der Vorstellung der Daten, auch die Frage nach der Korrelation der dB_E -Werte zu den zu Anfang der Messung im Probenzylinder eingestellten dB_A -Werten beantwortet.

Die Vorstellung der Werte für dB_E , die sich im Probenzylinder in Abhängigkeit von dem zum Anfang der Messung durch Einwiegen der Substratprobe eingestellten Volumengewicht (dB_A) ergeben haben, wird wieder zuerst für die 13 Standardsubstrate und dann für die 23 Mischsubstrate erfolgen. Da hier lediglich die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen (s) besprochen werden, sei auf Tabelle A4 im Anhang verwiesen, in der zusätzlich auch der Median und die Einzelwerte für dB_E aufgeführt sind sowie, zur besseren Orientierung, auch die Werte von dB_A .

Das Ziel der Überprüfung der Q-Methode mit den vier unterschiedlich erzeugten dB_A -Werten war es, eine Form der Q-Methode zu finden, die, vor allem bezüglich der Luftkapazität (AC), aber auch bezüglich der Wasserkapazität (WC), über alle 36 Substrate eine besonders enge Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode (CEN/TC 223) aufweist. In diesem Kapitel werden daher, neben der schon angesprochenen Korrelation zwischen dB_A und dB_E bei den vier getesteten Varianten der Q-Methode, auch die Korrelationen zwischen den dB_E -Werten, die mit den vier Varianten der Q-Methode ermittelt wurden und den dB_E -Werten, die sich bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) eingestellt haben, vorgestellt. In Tabelle A5 im Anhang wurden die Werte von dB_A und dB_E in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) zusammengestellt und den dB_E -Werten der ISHS-Methode (CEN/TC 223) gegenübergestellt. Bei der ISHS-Methode wird im Gegensatz zur Q-Methode nicht mit gezielt eingestellten dB_A -Werten gearbeitet.

Die Abbildungen 3.36 – 3.38 zeigen die Volumengewichte bzw. die Lagerungsdichten im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) für die 13 Standardsubstrate. Zum Vergleich sind dort, neben den dB_E -Werten aus den vier bekannten Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) auch die dB_E -Werte der jeweiligen Substrate aufgetragen, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden.

Erwartungsgemäß stellen sich bei den drei Einheitserden (Abb. 3.36) und den anderen vier tonhaltigen Substraten FT, RK, ST und SV (Abb. 3.38) die höchsten Lagerungsdichten im Probenzylinder zum Ende der Messung ein. Bei den genannten Standardsubstraten mit Ton ist zu beobachten, dass sich die vier Varianten (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bezüglich der eingestellten dB_E -Werte im Probenzylinder zum Teil deutlich unterscheiden.

Die kleinsten Werte für dB_E wurden bei den reinen Torfsubstraten SW1, SW3, T1 und T2 (Abb. 3.38) sowie CF und PH (Abb. 3.37) registriert. Es fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den vier getesteten Varianten zur Ermittlung von dB_A bei den Torfsubstraten kaum Unterschiede bei dB_E bewirken.

Der Vergleich der maximalen dB_E -Werte mit den zu Anfang der Messung in den Probenzylindern der Q-Methode erzeugten Volumengewichten (dB_A) über alle 13 Standardsubstrate zeigt, dass nur bei dem Standardsubstrat CF ein maximaler dB_A -Wert auch zu einem maximalen dB_E -Wert führt (Tabelle 3.6). Bei allen anderen Standardsubstraten war der Rangplatz des jeweils zu Anfang im Probenzylinder der

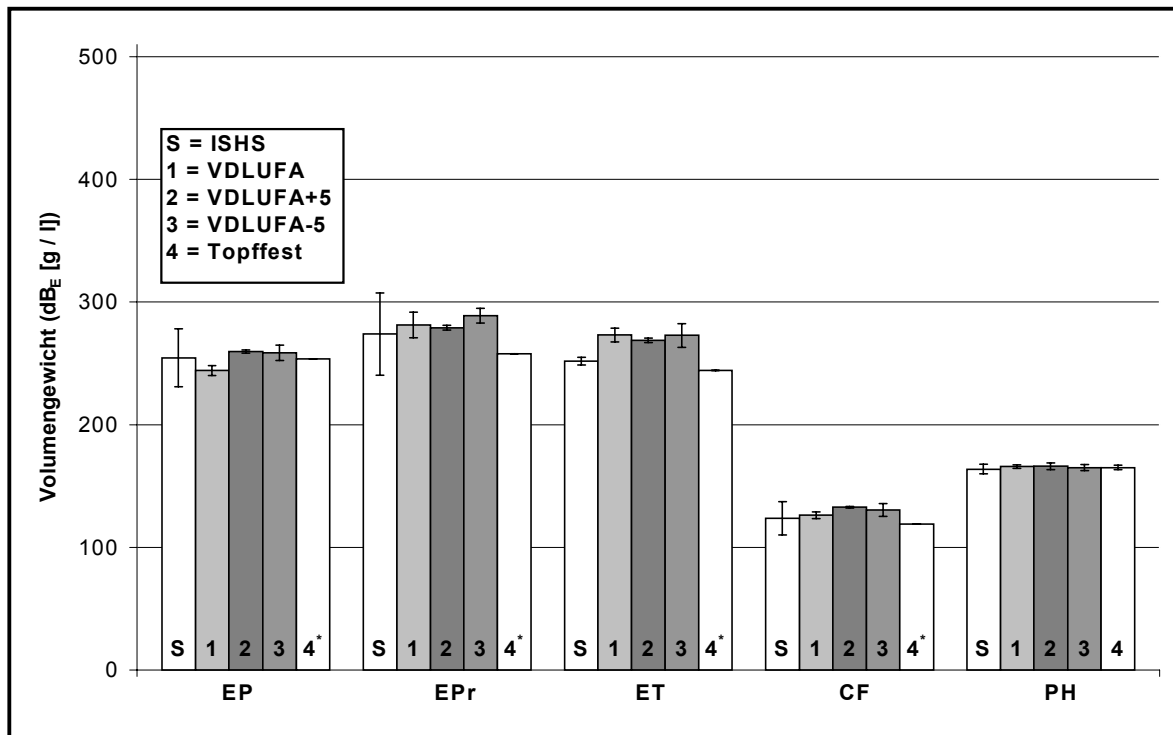


Abb. 3.36: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten ET, EPr, ET, CF und PH. Zum Vergleich der jeweilige dB_E-Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Werte enthalten Messfehler; n = 4)

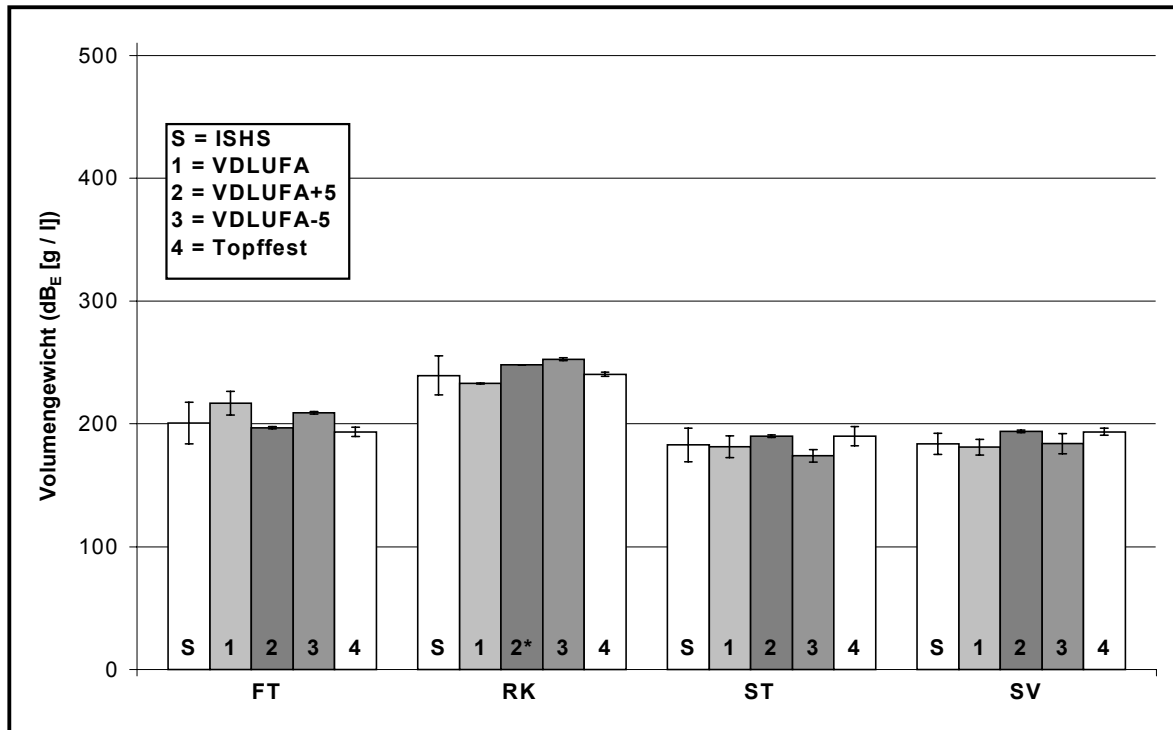


Abb. 3.37: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten FT, RK, ST und SV. Zum Vergleich der jeweilige dB_E-Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; n = 4)

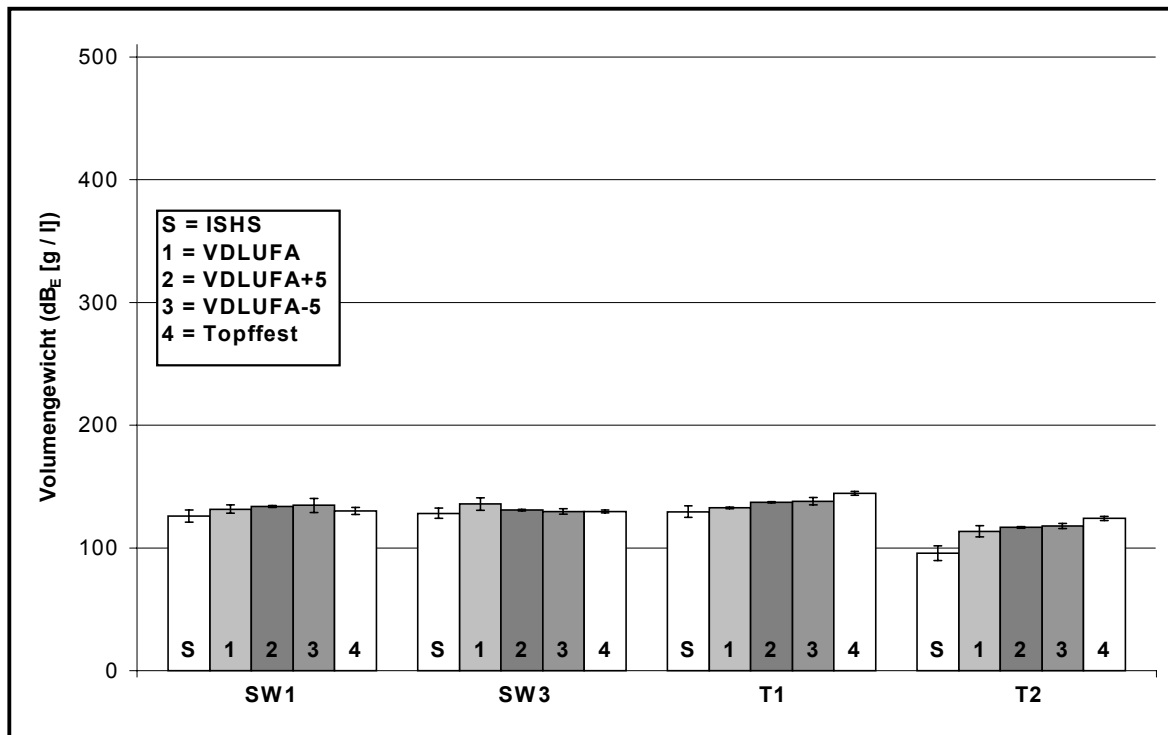


Abb. 3.38: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten SW1, SW3, T1 und T2. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Tabelle 3.6: Rangplatz der zu Anfang der Messung im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die zum höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung der Q-Methode (dB_E [g / l]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat (**1** = höchster dB_A -Wert, **2** = zweithöchster dB_A -Wert, **3** = zweitkleinster dB_A -Wert, **4** = kleinster dB_A -Wert)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den höchsten dB_E -Wert zeigte	höchster dB_E -Wert [g / l]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_A
EP	VDLUFA+5	259,8	2
EPr	VDLUFA-5	279,1	4
ET	VDLUFA	273,2	3
CF	VDLUFA+5	132,8	1
PH	VDLUFA+5	166,1	3
FT	VDLUFA	216,8	4
RK	VDLUFA-5	252,6	2
ST	VDLUFA+5	190,0	2
SV	VDLUFA+5	194,0	3
SW1	VDLUFA-5	134,6	4
SW3	VDLUFA	135,7	4
T1	VDLUFA-5	137,9	4
T2	VDLUFA-5	117,8	2

Q-Methode eingestellten dB_A -Werts, der letztlich zum höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung führte, höher. In acht von 13 Fällen (61,5 %) führte der zweitkleinste bzw. kleinste dB_A -Wert (Rangplatz 3 bzw. Rangplatz 4) zum höchsten dB_E -Wert.

Tabelle 3.7: Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit von der zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) für die 13 Standardsubstrate

(**fett** = maximale Werte von dB_E ; **grau** unterlegt = minimale Werte von dB_E ; unterstrichen = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; n = 4)

Substrat	VDLUFA [g / l]	s	VDLUFA+5 [g / l]	s	VDLUFA-5 [g / l]	s	Topffest [g / l]	s
EP	244,2	3,9	259,8	1,3	258,7	<u>6,3</u>	253,7*	0,0
EPr	281,3	<u>10,5</u>	279,1	2,0	288,9	5,9	<u>257,9*</u>	0,0
ET	273,2	5,5	268,8	1,7	272,8	<u>9,7</u>	<u>244,1*</u>	0,0
CF	126,2	2,7	132,8	0,6	130,5	<u>5,2</u>	<u>118,9*</u>	0,0
PH	165,8	1,3	166,1	<u>2,6</u>	<u>165,1</u>	2,3	165,2	1,8
FT	216,8	<u>9,6</u>	196,7	1,0	209,0	1,0	<u>193,4</u>	3,7
RK	<u>232,9</u>	0,4	248,1*	0,0	252,6	1,2	240,4	<u>1,7</u>
ST	181,3	<u>8,9</u>	190,0	1,0	<u>173,9</u>	5,0	189,9	7,8
SV	<u>181,0</u>	6,5	194,0	1,1	183,9	<u>8,3</u>	193,5	2,8
SW1	131,6	3,3	133,6	0,7	134,6	<u>5,7</u>	<u>130,1</u>	2,7
SW3	135,7	<u>5,1</u>	130,9	0,7	<u>129,7</u>	2,2	129,8	1,2
T1	<u>132,5</u>	0,7	137,1	0,5	137,9	<u>3,0</u>	144,4	1,6
T2	<u>113,4</u>	<u>4,6</u>	116,7	0,6	117,8	2,0	124,1	1,7

In Tabelle 3.7 sind die Volumengewichte (dB_E) der vier getesteten Varianten der Q-Methode nochmals für die 13 Standardsubstrate zusammengestellt worden. Es ist zu sehen, dass die Variante VDLUFA+5 kein Minimum aber fünf Maxima hinsichtlich dB_E besitzt. Dagegen zeichnet sich VDLUFA-5 durch drei Minima und drei Maxima aus. Überraschend ist die geringe Anzahl der Maxima (2) und die große Anzahl an Minima (5) bei der Variante Topffest, die sogar noch weniger maximale dB_E -Werte zum Ende der Q-Methode im Probenzylinder erzeugt als die Methode VDLUFA mit drei Maxima. Da es sich bei drei der fünf Minima, die die Variante Topffest erzeugt um augenscheinliche Messfehler handelt, bei denen es zu einer Unterschätzung des Volumengewichts zum Ende der Messung im Probenzylinder (dB_E) gekommen ist (Unterschätzung von Schrumpfung und Sackung), ist anzunehmen, dass die

wirkliche Anzahl der Minima der Variante Topffest kleiner als fünf ist. Dies gilt jedoch nicht für die Variante VDLUFA, die zu fünf reellen Minima des Volumengewichts im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) geführt hat und damit die meisten Minima der vier Methoden erzeugt.

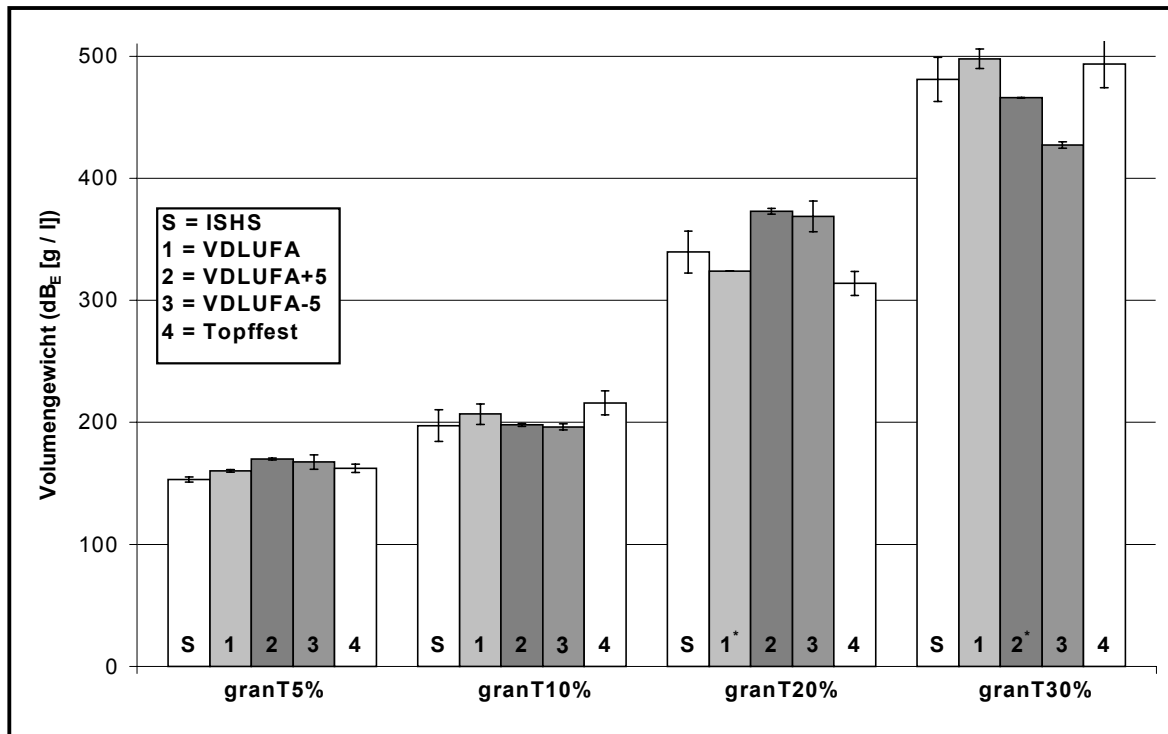


Abb. 3.39: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten granT5%, granT10%, granT20% und granT30%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Werte enthalten Messfehler; n = 4)

Die Volumengewichte der 23 Mischsubstrate im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) sind in den Abbildungen 3.29 – 3.44 dargestellt. Wie schon bezüglich dB_A festgestellt werden konnte, nehmen die Mischsubstrate mit granuliertem Ton (granT) auch bezüglich dB_E die höchsten Werte an (Abb. 3.39). Dies gilt nicht nur für die 23 Mischsubstrate allein sondern für alle 36 untersuchte Substrate.

Mit 479,8 g / l verfügt das Substrat granT30% bei der Variante VDLUFA über den höchsten dB_E -Wert aller 36 Substrate und vier Varianten der Q-Methode.

Die Mischsubstrate mit Grubenton-Torf Vormischung (GT) weisen mit dB_E -Werten, die zwischen ca. 180 g / l und ca. 250 g / l liegen, ebenfalls sehr hohe Werte auf,

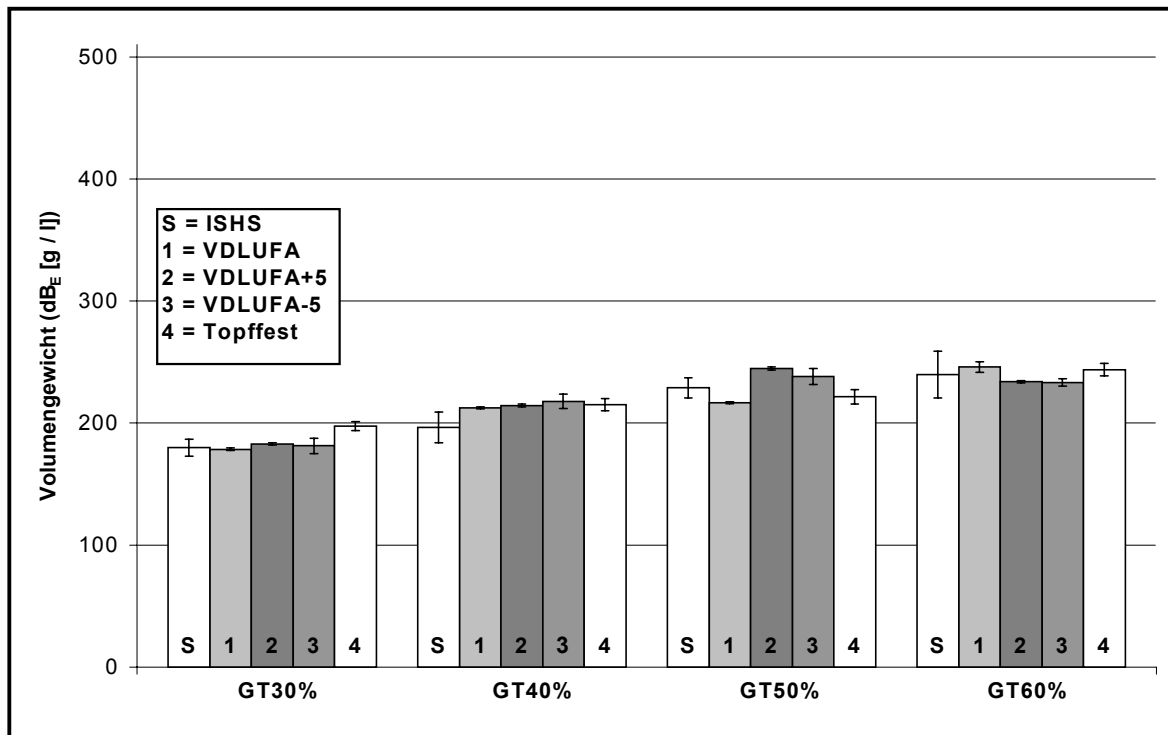


Abb. 3.40: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten GT-30%, GT40%, GT50% und GT60%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); $n = 4$)

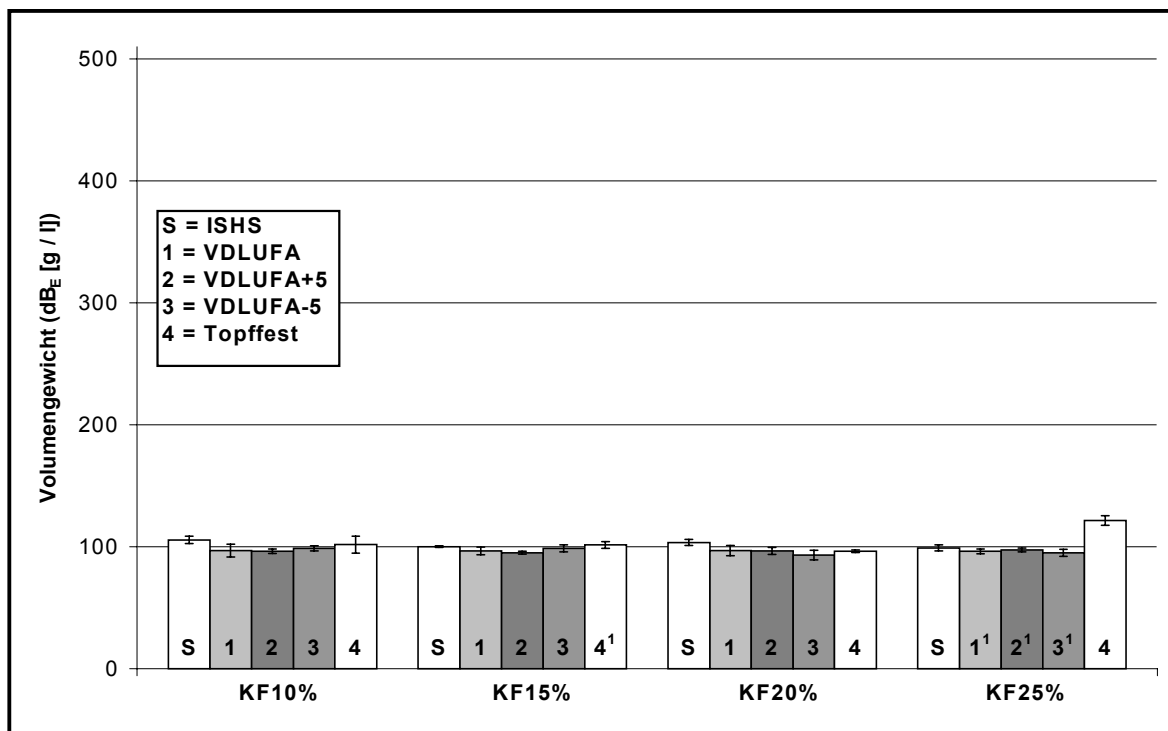


Abb. 3.41: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten KF-10%, KF15%, KF20% und KF25%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ¹ = der dB_A -Wert, mit dem der dB_E -Wert erzeugt wurde, war ein Messfehler; $n = 4$)

während das Volumengewicht zum Ende der Messung bei den Substraten mit Kokosfasern (KF) die kleinsten Werte unter allen 36 Substraten annimmt (siehe Abb. 3.40 und 3.41). Außerdem fallen die Mischsubstrate mit Kokosfasern dadurch auf, dass sich die dB_E -Werte der einzelnen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) kaum unterscheiden. Eine Ausnahme ist in diesem Fall die Variante Topffest bei KF25%, die einen Wert von 121,5 g / l aufweist. Dieser ist damit deutlich größer als 100 g / l und liegt damit um ca. 20% über den restlichen dB_E -Werten der KF-Substrate.

Bezüglich der Mischsubstrate mit Rindenhumus (RH) kann festgehalten werden, dass das Volumengewicht zum Ende der Messung im Probenzylinder der Q-Methode mit steigendem Rindenhumusgehalt tendenziell zunimmt. Zwischen den vier Varianten der Q-Methode sind jedoch lediglich geringe Unterschiede zu beobachten (Abb. 3.42).

Genau wie bei den KF-Substraten (Abb. 3.41) führt auch bei den RH-Substraten in zwei Fällen die ISHS-Methode zu den höchsten dB_E -Werten, obwohl diese Methode

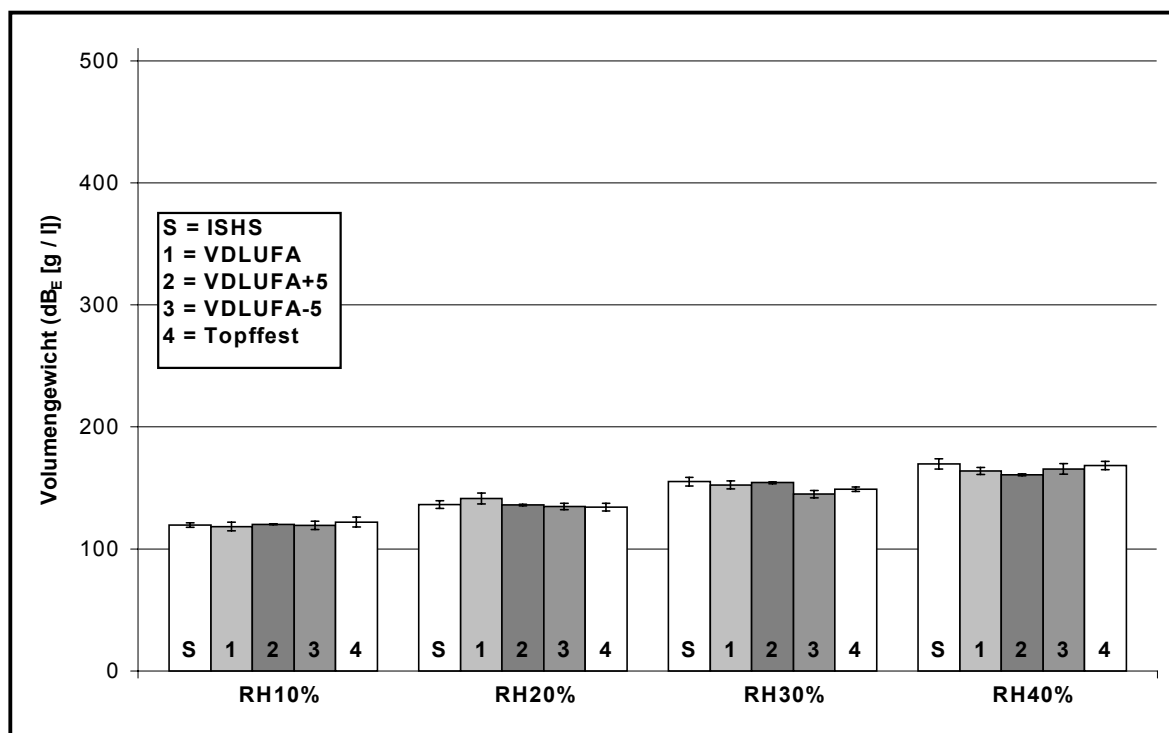


Abb. 3.42: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten RH-10%, RH20%, RH30% und RH40%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

ohne eine gezielte Einstellung eines Volumengewichts zum Anfang der Messung im Probenzylinder (dB_A) arbeitet.

In Abb. 3.43 ist zu erkennen, dass die vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode bei den Substraten mit feinem, gesiebttem Schwarztorf (STf) zu deutlichen Unterschieden bezüglich des dB_E -Werts im Probenzylinder zum Ende der Messung führen. Dies gilt besonders bei den Mischsubstraten mit hohem Schwarztorfanteil (STf60% und STf80%). Im Zusammenhang mit den STf-Substraten sollte noch auf den dB_E -Wert von STf60% (VDLUFA) eingegangen werden, der mit 126,5 g / l kleiner ist als das zum Anfang der Messung eingestellte Volumengewicht dB_A .

Offenbar ist es hier beim Einwiegen des Substrats in die Probenzylinder, also bei der Einstellung von dB_A , zu einem Fehler gekommen. Daneben scheint das Ausmaß der Fehlstelle im Probenzylinder, die durch Sackung und Schrumpfung während der Messung entstanden ist, unterschätzt worden zu sein, da die Fehlstelle in allen vier

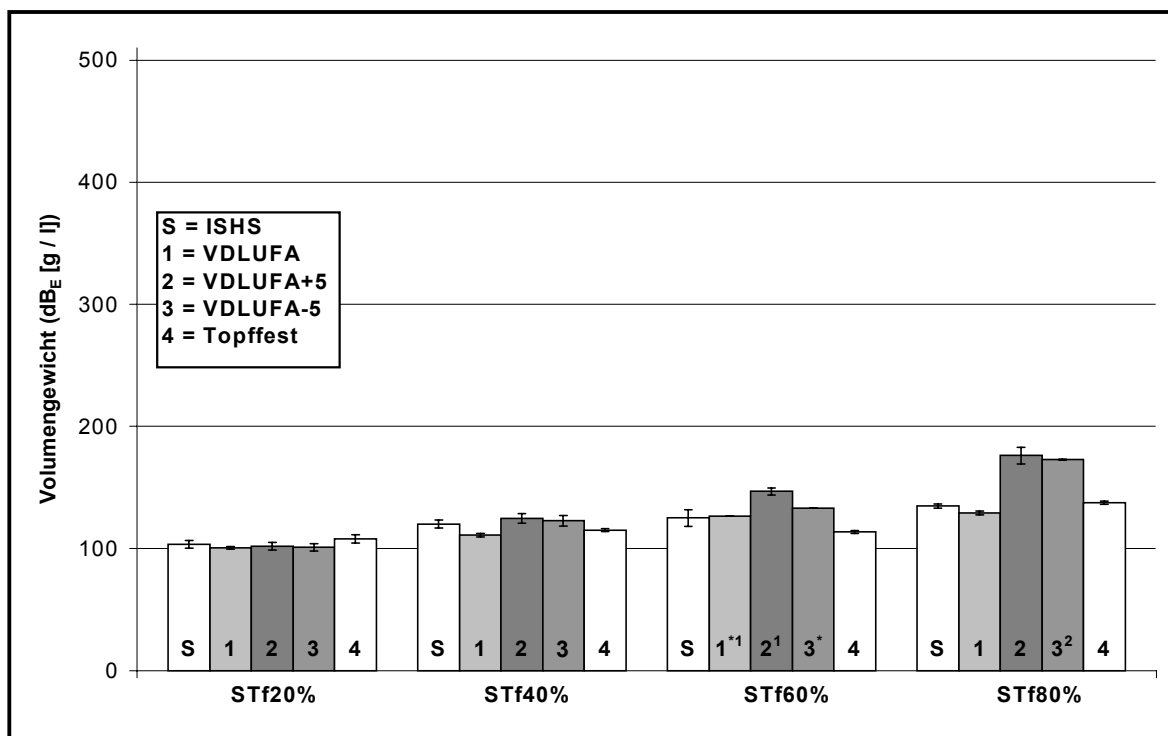


Abb. 3.43: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten STf-20%, STf40%, STf60% und STf80%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ¹ = der dB_A -Wert, mit dem der dB_E -Wert erzeugt wurde, war ein Messfehler; ² = Wert setzt sich aus nur zwei Einzelwerten zusammen (n = 2); * = Werte enthalten Messfehler; n = 4)

Fällen mit dem Wert Null (0) angegeben wurde. Ein Gewichtsverlust (Substratverlust aus dem Probenzylinder) im Verlauf der Messung, z.B. durch zu schnelles Auffüllen des Wasserbads oder durch Verschütten von Substrat, erscheint dagegen nicht denkbar, da die Standardabweichung (s) des dB_E -Werts null (0) beträgt. Das würde bedeuten, dass in allen vier Fällen die gleiche Menge Substrat durch Verschütten oder zu schnelles Auffüllen des Wasserbads verloren gegangen sein müsste.

Mit dB_E -Werten von 114,4 (VDLUFA) und 112,7 g / l (VDLUFA-5) sind bei dem Substrat STg60% ebenfalls zwei Werte ermittelt worden, die unterhalb des zu Anfang der Messung im Probenzylinder eingestellten Volumengewichts (dB_A) liegen. Da die Standardabweichung in beiden Fällen nicht gleich null ist, könnte hier auf ein Aufschwimmen einzelner Probenzylinder im Wasserbad geschlossen werden, wodurch es zu einem Substratverlust gekommen ist. Daneben könnte aber auch wieder ein Fehler beim Befüllen der Probenzylinder unterstellt werden.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die ISHS-Methode bei den drei STg-Varianten zu den höchsten dB_E -Werten führt (Abb. 3.44). Daneben lässt sich fest-

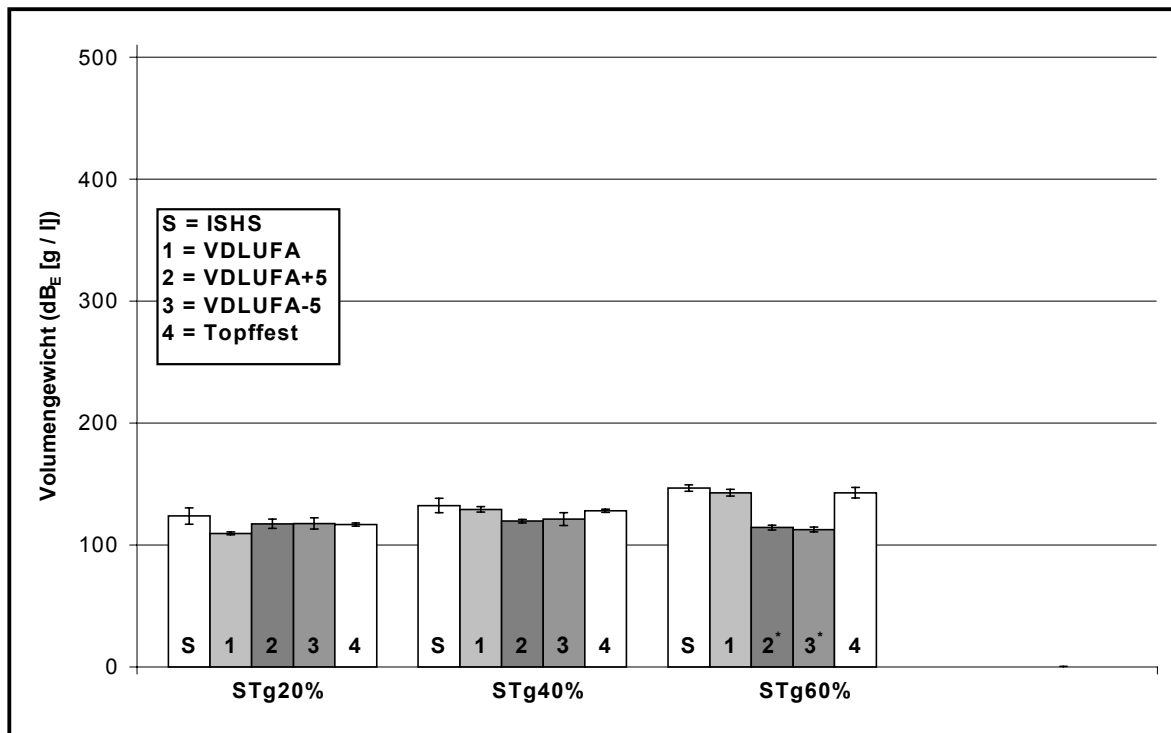


Abb. 3.44: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten STg-20%, STg40% und STg60%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Werte enthalten Messfehler; n = 4)

halten, dass sich die vier Varianten der Q-Methode besonders beim Mischsubstrat STg60% deutlich unterscheiden. Bei den beiden Mischsubstraten mit geringerem Schwarztorfanteil sind die Unterschiede zwischen den vier Varianten dagegen gering.

In Tabelle 3.8 sind nochmals alle dB_E -Werte zusammengestellt worden, die für die 23 Mischsubstrate mit den vier Varianten der Q-Methode ermittelt wurden sowie die Werte für die Standardabweichung (s). Es ist zu erkennen, dass bei den Mischsubstraten granT, RH, STf und STg ein einheitlicher Trend zur Zunahme des Volumengewichts dB_E mit dem Anteil des Zuschlagstoffs am Mischsubstrat beobachtet

Tabelle 3.8: Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit von der zum Anfang im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) für die 23 Mischsubstrate

(**fett** = maximale Werte von dB_E ; **grau** unterlegt = minimale Werte von dB_E ; **unterstrichen** = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; ¹ = dB_A -Wert war Messfehler; ² = Wert ermittelt sich aus nur 2 Einzelwerten (n = 2); n = 4)

Substrat	VDLUFA [g / l]	s	VDLUFA+5 [g / l]	s	VDLUFA-5 [g / l]	s	Topffest [g / l]	s
granT5%	160,1	1,1	169,9	0,8	167,4	<u>6,0</u>	162,2	3,4
granT10%	206,7	8,4	198,0	1,2	196,2	2,5	215,9	<u>9,9</u>
granT20%	324,0*	0,0	373,0	2,4	368,6	<u>12,5</u>	313,8	9,9
granT30%	479,8	8,0	466,0*	0,0	427,1	2,5	493,5	<u>19,4</u>
GT30%	178,5	0,9	182,7	0,9	181,2	<u>6,3</u>	197,5	3,7
GT40%	212,4	0,8	214,3	1,1	217,7	5,9	215,0	5,1
GT50%	216,6	0,7	247,7	1,3	238,0	<u>6,7</u>	221,5	<u>6,0</u>
GT60%	245,9	4,4	233,7	1,0	233,1	3,0	243,7	<u>5,1</u>
KF10%	96,8	5,1	96,2	1,9	98,5	2,1	101,1	<u>7,0</u>
KF15%	96,5	3,1	95,0	1,1	98,5	<u>2,9</u>	101,4 ¹	2,8
KF20%	96,7	<u>4,3</u>	96,5	2,8	93,1	3,9	96,3	1,1
KF25%	96,1 ¹	2,0	97,3 ¹	1,5	95,0 ¹	2,8	121,5	<u>3,8</u>
RH10%	118,3	3,6	120,2	0,5	119,3	3,4	122,0	<u>4,1</u>
RH20%	141,4	<u>4,5</u>	135,9	0,6	134,6	2,6	134,2	4,0
RH30%	152,4	<u>3,2</u>	154,2	<u>0,7</u>	144,9	3,0	149,0	1,8
RH40%	163,8	2,9	160,6	0,8	165,5	<u>4,4</u>	168,4	3,4
STf20%	100,5	1,0	101,8	3,2	101,0	3,0	107,9	<u>3,5</u>
STf40%	111,0	1,5	124,7	3,8	122,7	<u>4,3</u>	115,1	1,2
STf60%	126,5*	0,0	146,8 ¹	2,8	133,3*	0,0	113,6	1,3
STf80%	129,2	1,6	176,2	<u>6,7</u>	172,7 ²	0,9	137,5	2,7
STf20%	109,5	1,2	117,5	3,7	117,8	<u>4,5</u>	116,9	1,3
STf40%	129,2	2,3	119,5	1,3	121,2	<u>5,2</u>	128,1	1,3
STf60%	143,0	2,9	114,4*	1,9	112,7*	2,0	142,9	<u>4,2</u>

werden kann, wenn die beiden Messwerte von STg60% nicht beachtet werden, bei denen der dB_E-Wert unter dem zuvor eingestellten dB_A-Wert liegt. Lediglich bei den GT-Substraten ergibt sich kein einheitliches Bild. Werden die Varianten VDLUFA+5 und VDLUFA-5 betrachtet, so ist eine Abnahme des Volumengewichts zwischen GT50% und GT60% zu beobachten, obwohl von GT30% zu GT40% die dB_E-Werte mit dem Tongehalt erwartungsgemäß zugenommen haben. Im Fall von KF kann weder ein Trend zur Zunahme noch ein Trend zur Abnahme von dB_E beobachtet werden (siehe Tabelle 3.8).

Tabelle 3.9: Rangplatz der zu Anfang der Messung im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die zum höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung der Q-Methode (dB_E [g / l]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat (1 = höchster dB_A-Wert, 2 = zweithöchster dB_A-Wert, 3 = zweitkleinster dB_A-Wert, 4 = kleinster dB_A-Wert; ¹ = dB_A-Wert war ein Messfehler)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den höchsten dB_E-Wert zeigte	höchster dB_E-Wert [g / l]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_A
granT5%	VDLUFA+5	169,9	1
granT10%	Topffest	215,9	1
granT20%	VDLUFA+5	373,0	1
granT30%	VDLUFA	497,0	2
GT30%	Topffest	197,5	1
GT40%	VDLUFA-5	217,7	4
GT50%	VDLUFA+5	247,7	1
GT60%	VDLUFA	245,9	2
KF10%	Topffest	101,1	3
KF15%	Topffest	101,4 ¹	1
KF20%	VDLUFA	96,7	3
KF25%	Topffest	121,5	3
RH10%	Topffest	122,0	3
RH20%	VDLUFA	141,4	2
RH30%	VDLUFA+5	154,2	1
RH40%	Topffest	168,4	1
STf20%	Topffest	107,9	1
STf40%	VDLUFA+5	124,7	2
STf60%	VDLUFA+5	146,8 ¹	1
STf80%	VDLUFA+5	176,2	1
STg20%	VDLUFA-5	117,8	3
STg40%	VDLUFA	129,2	1
STg60%	VDLUFA	143,0	1

Der Vergleich der maximalen dB_E -Werte mit den zum Anfang der Messung in den Probenzylindern der Q-Methode erzeugten Volumengewichten (dB_A) zeigt, dass unter den 23 Mischsubstraten bei 13 Substratvarianten ein maximaler dB_E -Wert festgehalten werden konnte, wo zuvor auch ein maximaler dB_A -Wert ermittelt wurde. Bei weiteren vier Mischsubstraten war zuvor der zweithöchste dB_A -Wert zu beobachten (Tabelle 3.9). Lediglich bei GT40% bewirkte ein minimaler dB_A -Wert den höchsten dB_E -Wert, in vier Fällen verursachten die zweitkleinsten dB_A -Werte maximale Werte für dB_E . Damit ergibt sich für die Mischsubstrate ein anderes Bild als es für die Standardsubstrate ermittelt wurde, bei denen in immerhin acht von 13 Fällen der kleinste bzw. zweitkleinste dB_A -Wert zum maximalen dB_E -Wert führte (siehe auch Tabelle 3.6).

Wird ein Vergleich von dB_E in Abhängigkeit von der dB_A -Variante über alle 36 Substrate durchgeführt, so ergibt sich das in den Abbildungen 3.45 und 3.46 dargestellte Bild, in dem die Messfehler allerdings nicht als solche betrachtet wurden, da nicht in allen Fällen ersichtlich war, welchen Wert die entsprechenden Varianten ohne Fehler angenommen hätten.

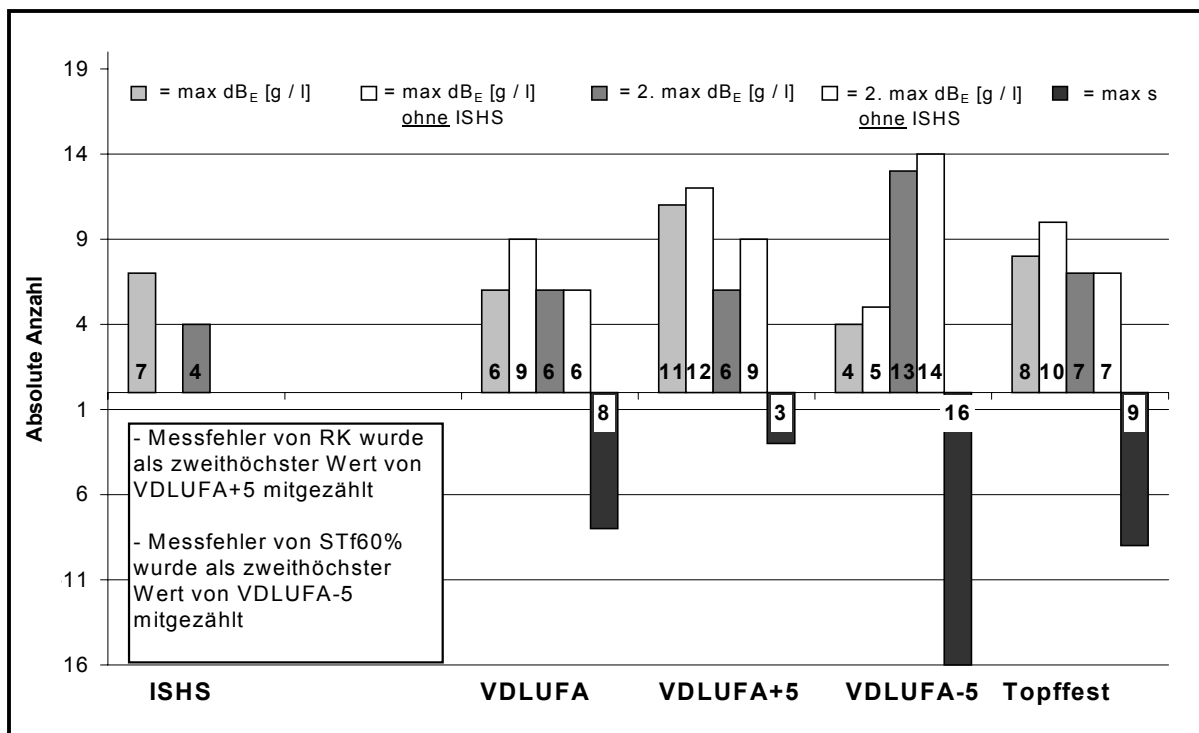


Abb. 3.45: Anzahl der höchsten (= max) und zweithöchsten (= 2. max) Werte für dB_E [g / l] in Abhängigkeit von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichung (= max s) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der dB_E -Werte der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben

Die Einbeziehung der ISHS-Methode in den Vergleich macht deutlich, dass sie bei sieben Substratvarianten den höchsten dB_E -Wert, bei vier weiteren Substraten den zweithöchsten Wert bewirkt. Damit erzeugt die ISHS-Methode bei mehr Substratvarianten maximale Volumengewichte zum Ende der Messung, als die Varianten VDLUFA (6 Maxima) und VDLUFA-5 (4 Maxima) der Q-Methode. Lediglich die Varianten VDLUA+5 (11 Maxima) und Topffest (8 Maxima) führen zu mehr Höchstwerten bezüglich des Volumengewichts dB_E .

Der alleinige Vergleich der vier Varianten der Q-Methode verdeutlicht:

- Wie schon bei der Ermittlung des dB_A -Werts erzeugt die Methode VDLUFA+5 die meisten Höchstwerte für dB_E (12 Maxima und 9 zweithöchste Werte).

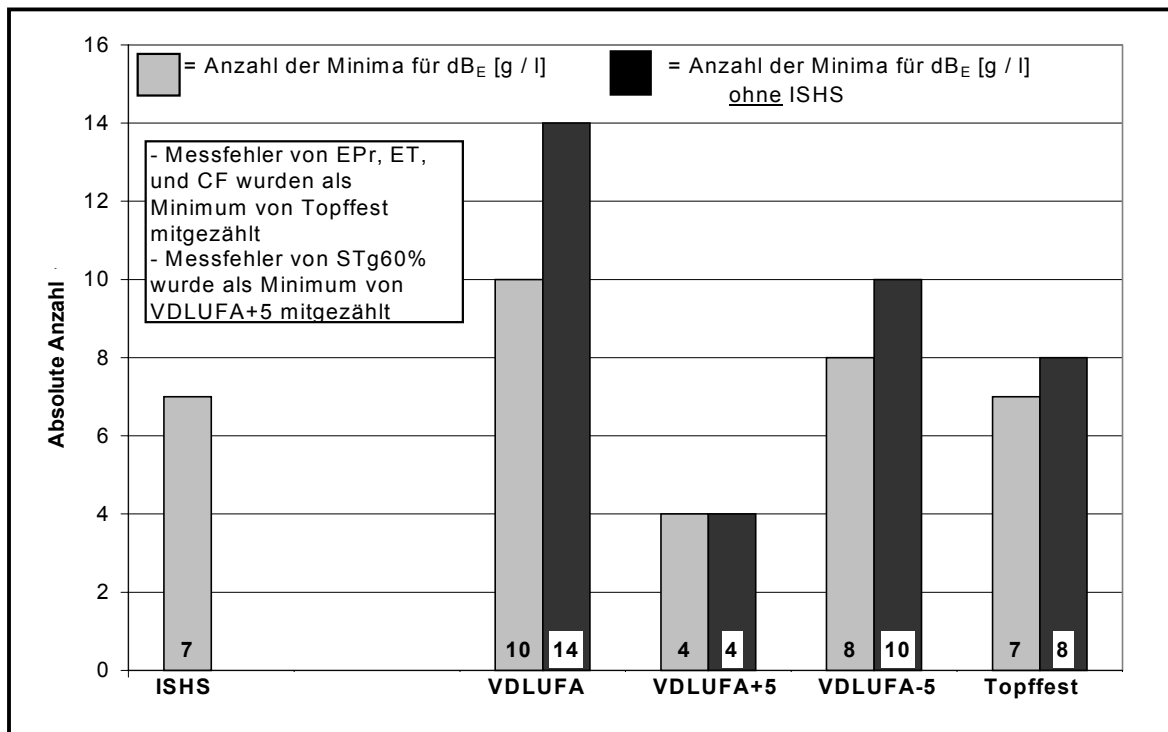


Abb. 3.46: Anzahl der niedrigsten Werte von dB_E [g / l] in Abhängigkeit von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der dB_E -Werte der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben

- Die Methode VDLUFA-5 erzeugt zwar auch in Bezug auf dB_E die wenigsten (4) Höchstwerte, anders als bei dB_A führt diese Variante der Q-Methode jedoch zu 14 zweithöchsten dB_E -Werten.
- Topffest und VDLUFA erzeugen jeweils 10 bzw. neun Höchstwerte und sieben bzw. sechs zweithöchste Werte für dB_E .

- Die größte Streuung der Einzelwerte zeigt in 16 von 36 Fällen die Methode VDLUFA-5, gefolgt von Topffest (9) und VDLUFA (8). Auch in dieser Beziehung muss VDLUFA+5 mit nur drei höchsten Werten für die Standardabweichung (s) positiv hervorgehoben werden.

Die ISHS-Methode erzeugt nur sieben minimale Werte für das Volumengewicht zum Ende der Messung im Probenzylinder. Damit erzeugt sie weniger minimale dB_E -Werte als die Varianten VDLUFA (10 Minima) und VDLUFA-5 (8 Minima) und genau so viele Minima wie die Variante Topffest. Lediglich die Variante VDLUFA+5 führt mit nur vier kleinsten Werten für das Volumengewicht dB_E zu weniger Minima als die ISHS-Methode (siehe Abb. 3.46).

Werden nur die vier Varianten der Q-Methode miteinander verglichen, ergibt sich folgendes Bild:

- VDLUFA+5 erzeugt die wenigsten (4) Minima für dB_E .
- VDLUFA (14) und VDLUFA-5 (10) führen zu den meisten kleinsten Werten für das Volumengewicht (dB_E).
- Die Variante Topffest verursacht mit acht Minima immer noch doppelt so viele Minima wie die Methode VDLUFA+5.

Werden die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse also allein unter dem Aspekt ausgewertet, mit welcher Methode die meisten Maxima und die wenigsten Minima bezüglich des Volumengewichts (dB_E) zum Ende der Messung im Probenzylinder der Q-Methode erzeugt werden, so kann nur die Variante VDLUFA+5 genannt werden, die im Vergleich mit den anderen drei Varianten die meisten maximalen und zweithöchsten dB_E -Werte unter den 36 Substraten erzeugt und dabei nur eine relativ geringe Standardabweichung (s) zeigt. Zusätzlich zeichnet sich VDLUFA+5 durch die geringste Anzahl an minimalen dB_E -Werten aus. Tabelle 3.10 zeigt die Ergebnisse der varianzanalytischen Berechnung der vier getesteten Varianten der Q-Methode und der daraus hervorgegangenen Volumengewichte (dB_E [g / l]). Es zeigt sich, dass sich die Volumengewichte zum Ende der Messung (dB_E), die mit den Methoden VDLUFA+5 und Topffest gemessen wurden, signifikant von denen unterscheiden, die mit den Methoden VDLUFA und VDLUFA-5 erzeugt wurden. Zusätzlich konnten auch signifikante Unterschiede zwischen VDLUFA und VDLUFA-5 nachgewiesen werden. Damit zeigt auch das Ergebnis der Varianzanalyse, dass die Variante der Q-

Tabelle 3.10: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) und den damit ermittelten dB_E -Werten

(Angegeben sind jeweils die adjustierten p-Werte (= p_{adj}). Die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$. Ein signifikanter Unterschied liegt vor, wenn $p_{adj} < \alpha$ ist. Die Adjustierung der p-Werte erfolgte nach TUKEY-KRAMER; Werte für p_{adj} , die signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Methoden anzeigen, sind grau unterlegt)

Variante der Q-Methode	VDLUFA	VDLUFA+5	VDLUFA-5	Topffest
VDLUFA	_____	0,0001	0,0001	0,0001
VDLUFA+5	0,0001	_____	0,0001	0,7478
VDLUFA-5	0,0001	0,0001	_____	0,0001
Topffest	0,0001	0,7478	0,0001	_____

Methode, die mit dem Volumengewicht (dB_A) VDLUFA+5 im Probenzylinder zu Anfang der Messung arbeitet, bei den 36 untersuchten Substraten zu den höchsten Volumengewichten (dB_E) im Probenzylinder zum Ende der Messung führt. Obwohl sich VDLUFA+5 nicht signifikant von der Variante Topffest unterscheiden lässt, zeigt sich in der absoluten Anzahl an höchsten und zweithöchsten Werten für dB_E , dass VDLUFA+5 der Variante Topffest überlegen ist.

Die Abbildungen 3.47 bis 3.50 zeigen die Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l]) und dem Volumengewicht zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) für die vier Varianten VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest. Bei allen vier Varianten konnte eine positive lineare Korrelation festgestellt werden. Mit Korrelationskoeffizienten von $r = 0,991$ (Topffest) und $r = 0,983$ (VDLUFA+5) zeigen die beiden genannten Methoden die engste Beziehung zwischen dB_A und dem damit erzeugten dB_E -Wert im Probenzylinder zum Ende der Messung mit der Q-Methode. Für die Methoden VDLUFA ($r = 0,966$) und VDLUFA-5 ($r = 0,976$) konnten nicht so enge Beziehungen zwischen dB_A und dB_E errechnet werden.

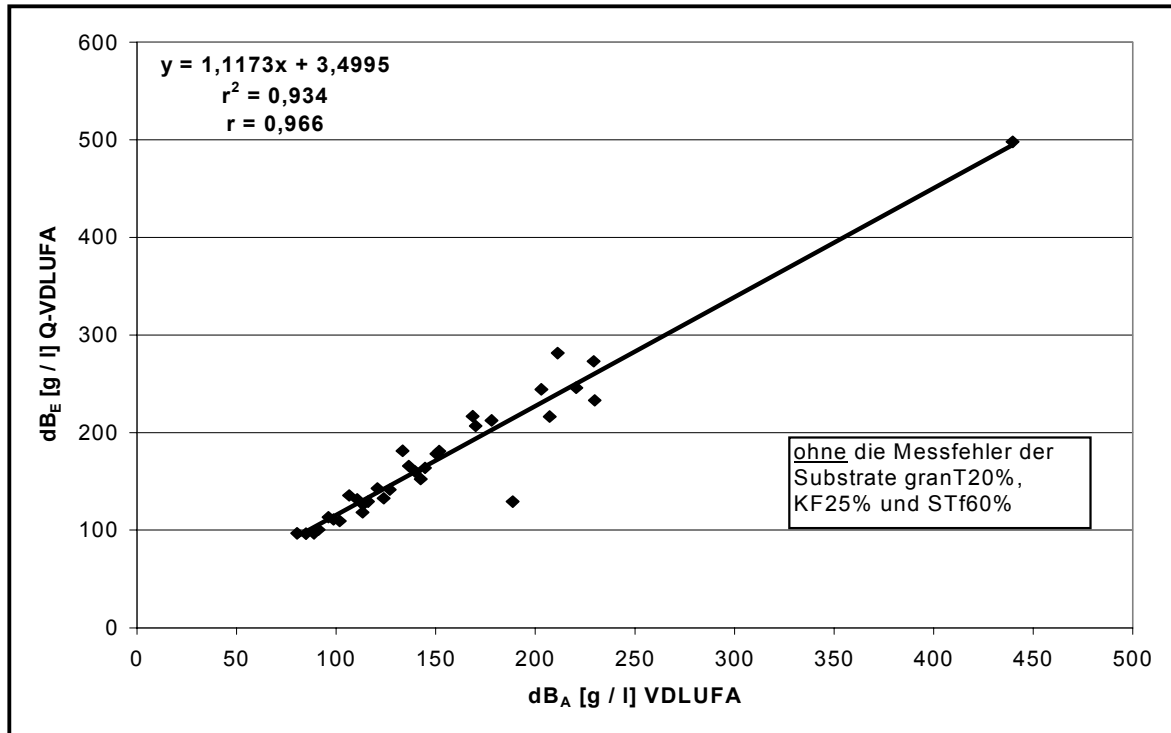


Abb. 3.47: Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) für 33 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

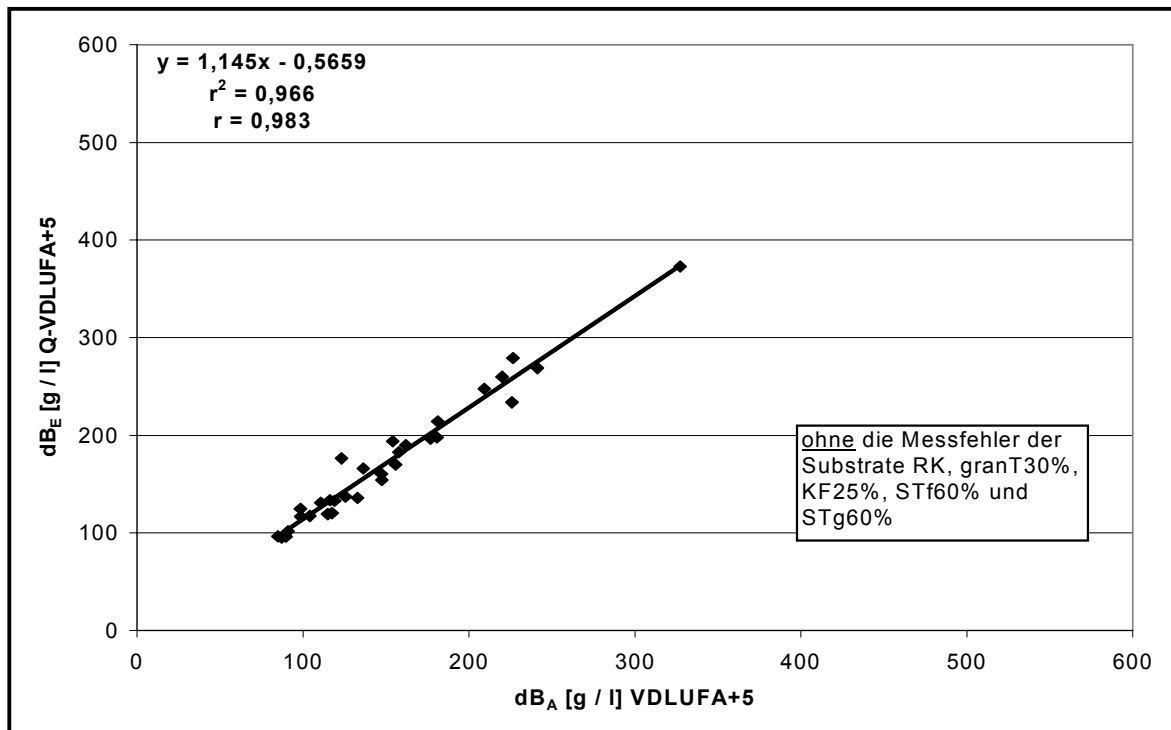


Abb. 3.48: Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA+5) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA+5) für 32 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

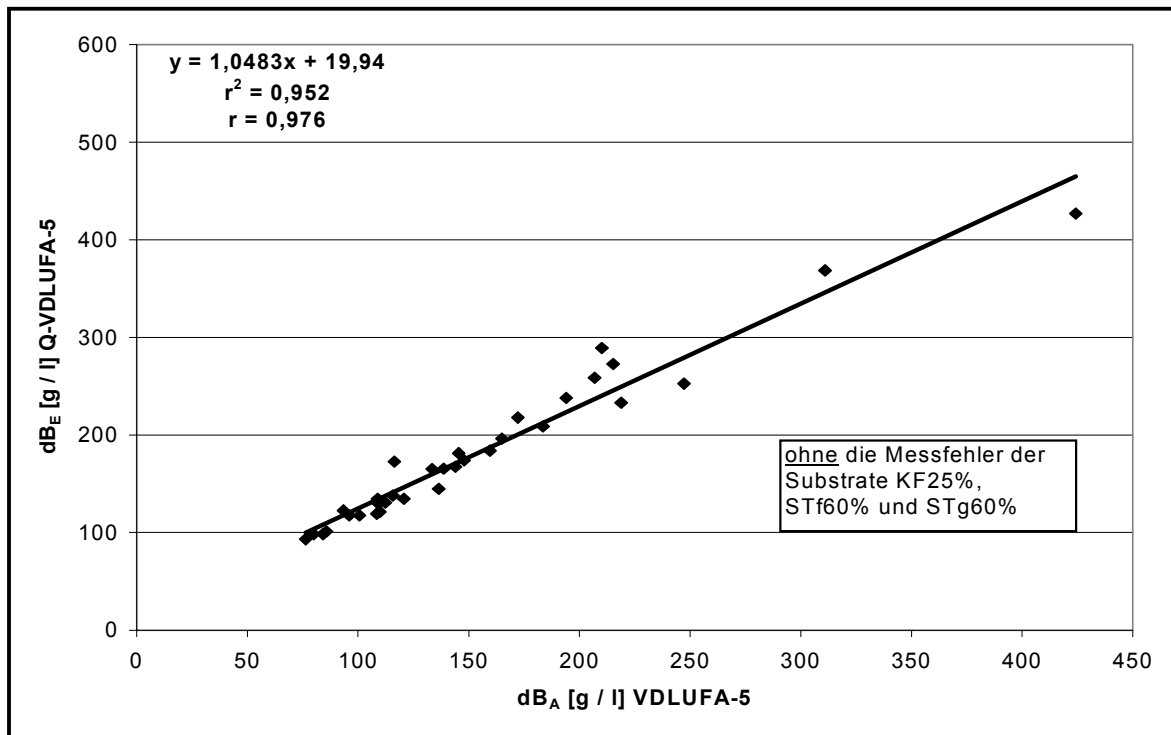


Abb. 3.49: Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA-5) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA-5) für 33 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

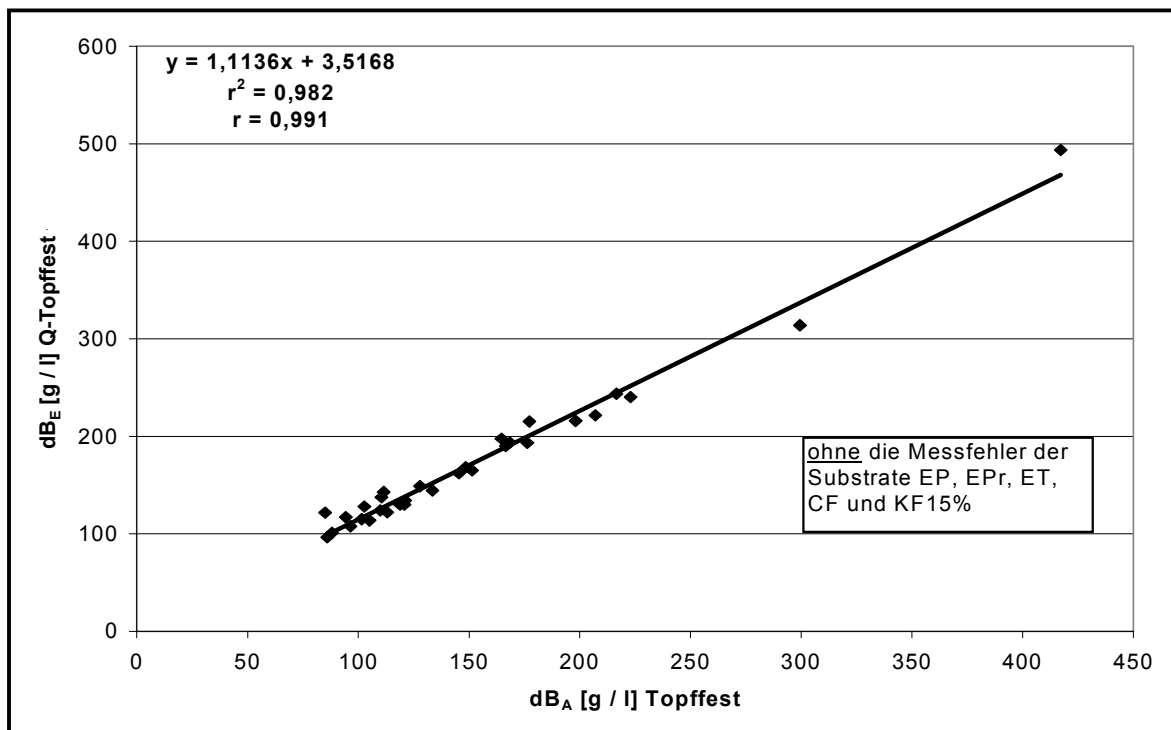


Abb. 3.50: Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] Topffest) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-Topffest) für 31 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

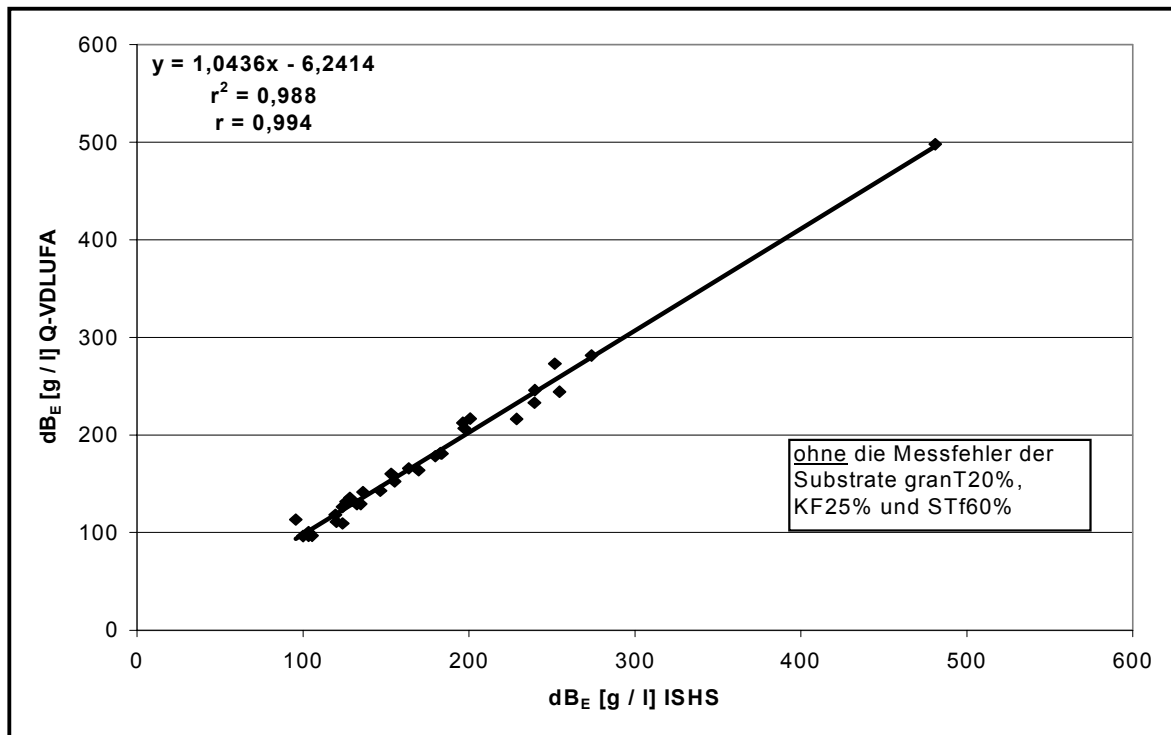


Abb. 3.51: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 33 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

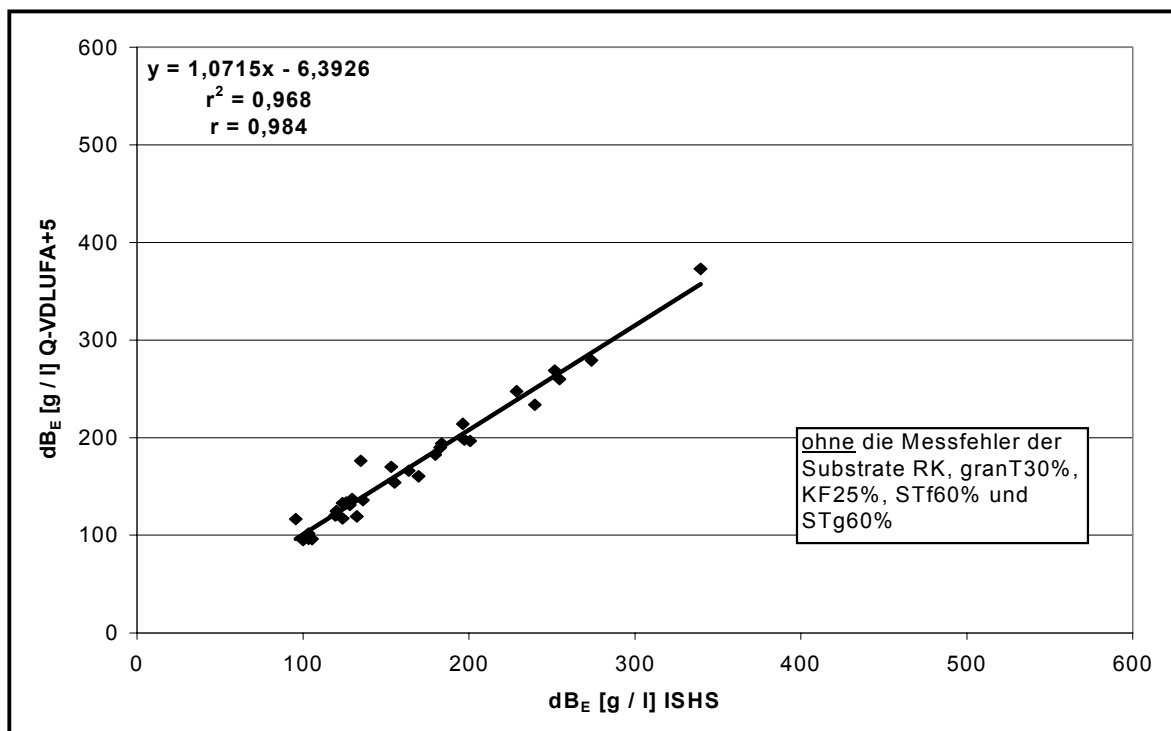


Abb. 3.52: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA+5) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 31 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

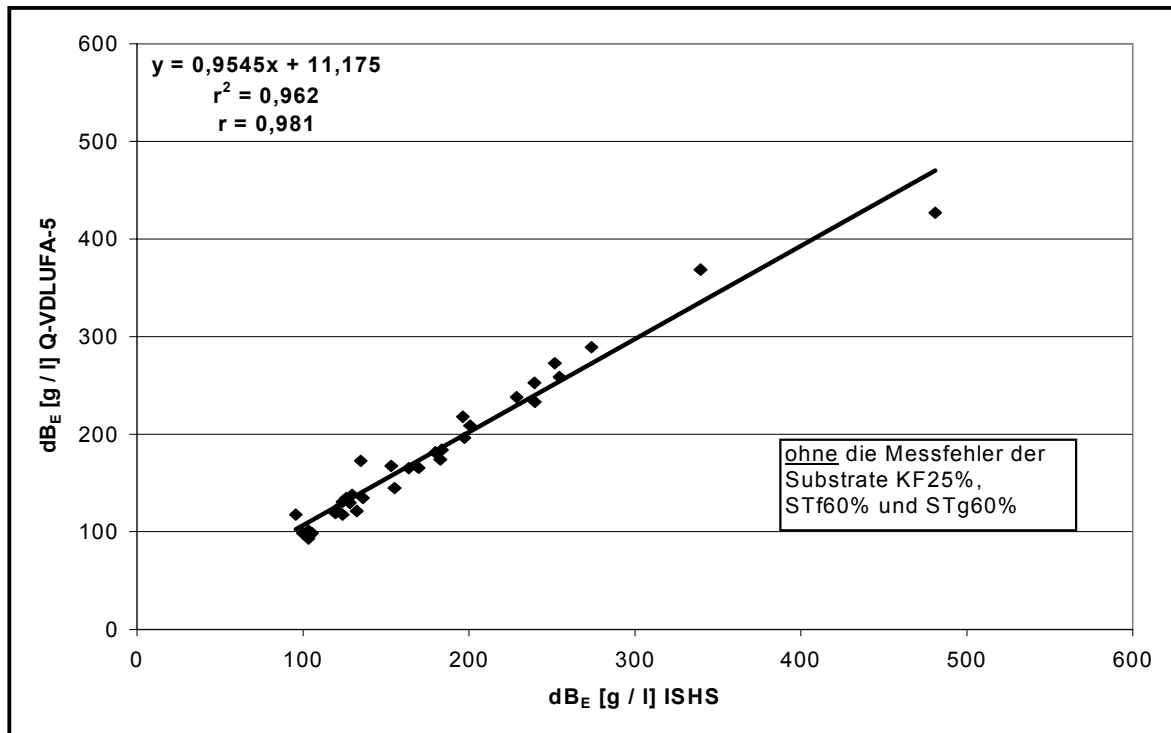


Abb. 3.53: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA-5) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 33 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

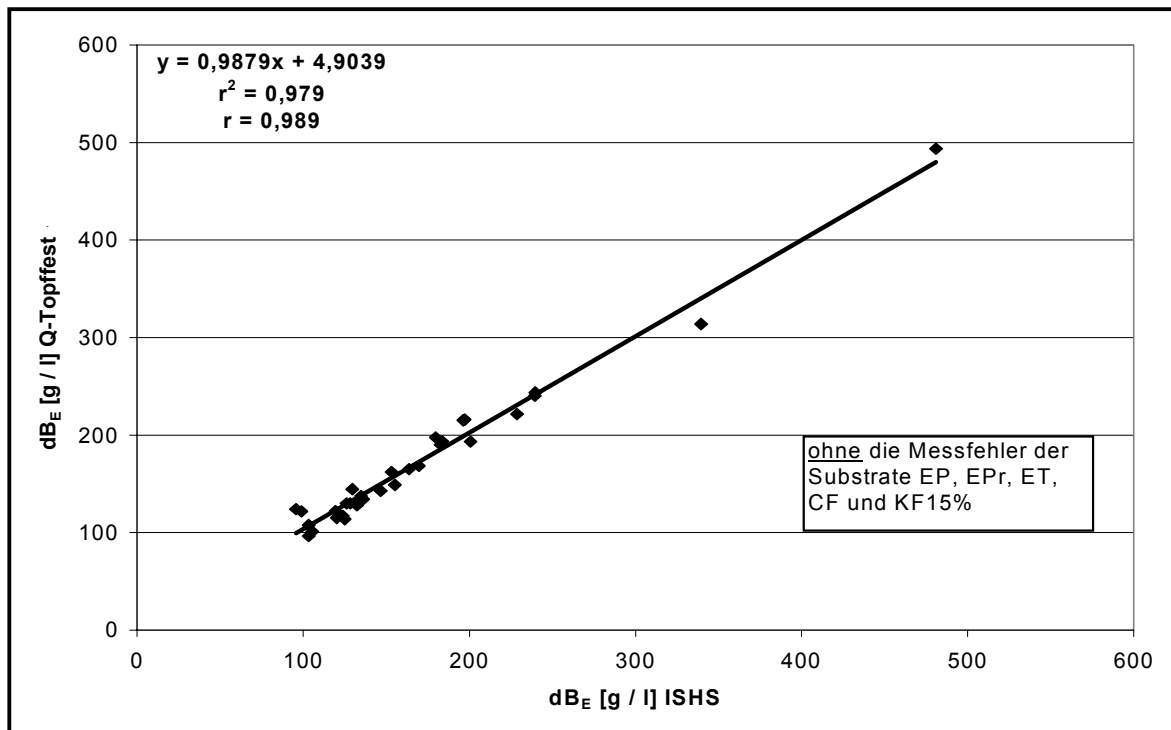


Abb. 3.54: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante Topffest) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-Topffest) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 31 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Alle genannten Korrelationen sind nach Prüfung mit der von STUDENT eingeführten t-Verteilung (t-Test) signifikant. Damit führt die Methode VDLUFA+5 nicht nur zu den höchsten Werten für dB_E zum Ende der Messung im Probenzylinder der Q-Methode, sondern bei der Methode VDLUFA+5 besteht auch der zweitengste Zusammenhang zwischen dB_A und dB_E .

Werden die Werte des Volumengewichts (dB_E [g / l]) unter dem Aspekt ausgewertet, mit welcher der vier getesteten Varianten von dB_A [g / l] (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) die erzeugten dB_E -Werte eine besonders enge Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode (CEN/TC 223) haben, so ergibt sich das in den Abbildungen 3.51 bis 3.54 dargestellte Bild. In allen vier Fällen konnten wieder positive lineare Korrelationen zwischen den dB_E -Werten der Q-Methode und den dB_E -Werten der ISHS-Methode ermittelt werden. Mit $r = 0,994$ zeigen die dB_E -Werte der Variante VDLUFA die engste Beziehung zu den entsprechenden dB_E -Werten der ISHS-Methode, gefolgt von Topffest ($r = 0,989$), VDLUFA+5 ($r = 0,984$) sowie VDLUFA-5 ($r = 0,981$). Alle Korrelationen unterscheiden sich signifikant von null. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass mit Hilfe der Methode VDLUFA die dB_E -Werte im Probenzylinder der Q-Methode erzeugt werden, die die engste Beziehung zu den dB_E -Werten der ISHS-Methode aufweisen. Da sich die errechneten Korrelationskoeffizienten von VDLUFA und VDLUFA+5 zu den dB_E -Werten der ISHS-Methode jedoch kaum unterscheiden und VDLUFA+5 außerdem die meisten maximalen Werte und weniger kleinste Werte für dB_E liefert, sollte genau überlegt werden, welcher Variante der Q-Methode in Bezug auf die erzeugten dB_E -Werte der Vorzug zu geben ist, zumal die dB_A -Werte der Variante VDLUFA+5 eine engere Beziehung zu den erzeugten dB_E -Werten aufweisen.

Ob und in welcher Form sich die hier festgestellten Unterschiede der dB_E -Werte auf die damit errechneten Kennwerte Wasserkapazität (WC), Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (AC) auswirken, kann den folgenden Kapiteln entnommen werden.

3.3.3 Wasserkapazität (WC)

Die Lagerungsdichte bzw. das Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E) beeinflusst die physikalischen Kennwerte Luftkapazität (AC [Vol. %]), Porenvolumen (PV [Vol. %]) und Wasserkapazität (WC [Vol. %]) (siehe Formeln 22, 23, 24). Nachdem im vorangegangenen Kapitel das Volumengewicht dB_E in Abhängigkeit von der jeweiligen Variante der Q-Methode ausführlich besprochen wurde, soll in diesem Kapitel auf die Wasserkapazität (WC) eingegangen werden, die mit Hilfe der vier getesteten Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest) ermittelt wurde.

Zur Messung der Containerkapazität (CC [Vol. %]) wird eine Wasserspannung von 10 hPa in halber Höhe des unteren Probenzylinders der ISHS-Methode bzw. der M-ISHS-Methode vorgeschrieben. Bei der Q-Methode stellt sich dagegen nur eine Wasserspannung von 9 hPa in halber Höhe des Probenzylinders ein. Aus diesem Grund sollte im Zusammenhang mit der Q-Methode auch nicht von der Containerkapazität (CC) gesprochen werden, sondern richtiger von der Wasserkapazität (WC).

Um die Güte der mit den vier Varianten der Q-Methode ermittelten Werte für WC beurteilen zu können, sollen die Werte untereinander verglichen und zusätzlich den entsprechenden Werten der ISHS-Methode (CEN/TC 223) gegenübergestellt werden. Daneben wird die Variante der Q-Methode gesucht, mit der die meisten Maxima für die Wasserkapazität (WC) gemessen werden. Außerdem soll die Frage geklärt werden, ob das höchste Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E) auch immer die höchste Wasserkapazität bewirkt. Zum Abschluss dieses Kapitels wird mit Hilfe der Varianz- und der Korrelationsanalyse der Versuch unternommen, die Variante der Q-Methode zu finden, deren Wasserkapazität (WC) die engste Beziehung bzw. den geringsten Unterschied zur Containerkapazität (CC) der ISHS-Methode aufweist.

Aus Tabelle 3.11 und Abb. 3.55 ist zu erkennen, dass das Substrat PH mit WC-Werten zwischen 84,0 und 88,9 Vol. % über die höchste Wasserkapazität unter den 13 Standardsubstraten verfügt, gefolgt von SW3 und T1 (Abb. 3.57), die ebenfalls über eine Wasserkapazität von ca. 80 Vol. % verfügen (außer VDLUFA bei T1). Die kleinste Wasserkapazität weist das Substrat RK mit WC-Werten zwischen 54,9 und 60,2 Vol. % auf (Abb. 3.56). Aus den drei Abbildungen ist zu erkennen, dass sich die WC-Werte der Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode

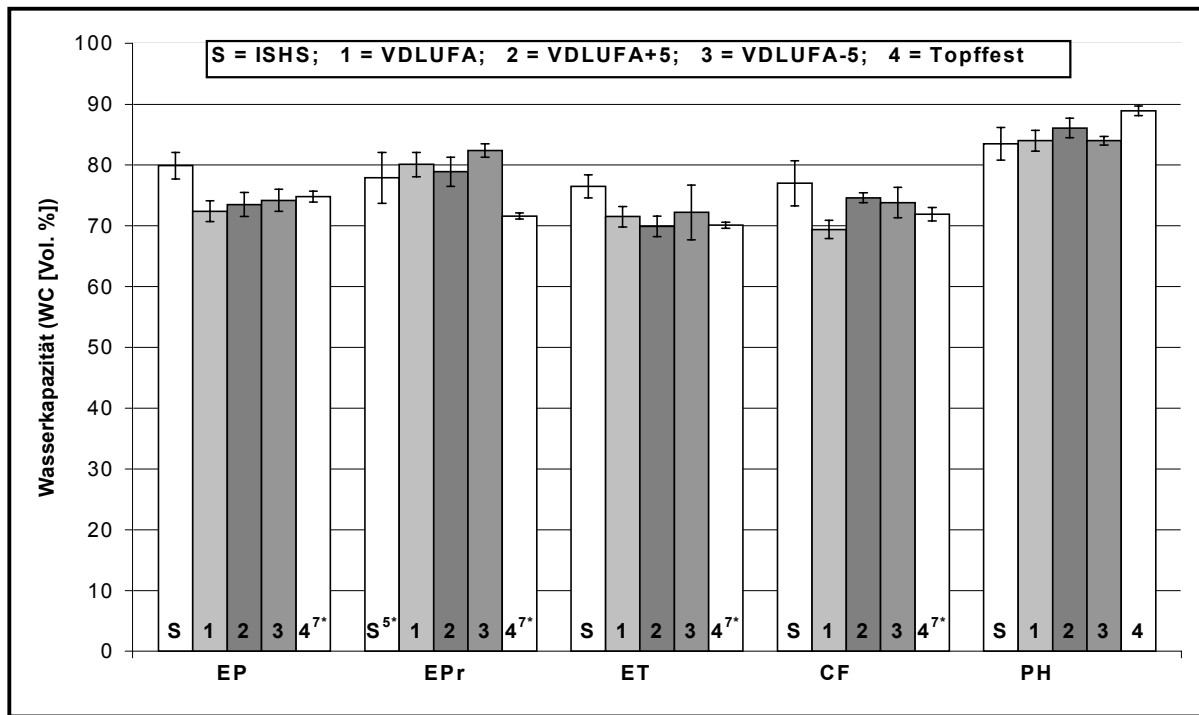


Abb. 3.55: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate EP, EPr, ET, CF und PH in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ⁵ = Wert wurde bei der ISHS-Methode als Messfehler eingestuft; ⁷ = dB_E-Wert wurde als Messfehler eingestuft; * = Messfehler; n = 4)

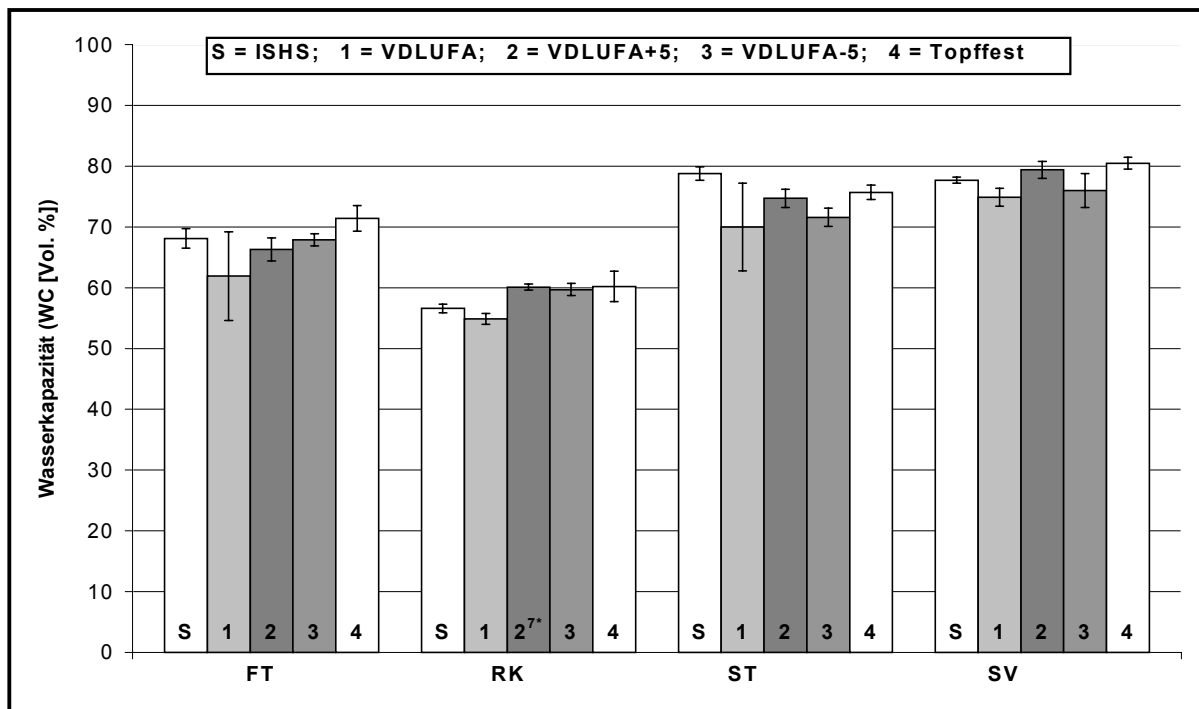


Abb. 3.56: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate FT, RK, ST und SV in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ⁷ = dB_E-Wert wurde als Messfehler eingestuft; * = Messfehler; n = 4)

zum Teil erheblich unterscheiden. Insbesondere bei den Substraten T1, FT, T2 treten Unterschiede von knapp unter 10 Vol. % bis hin zu 16,1 Vol. % zwischen den größten und kleinsten Werten von WC auf. Das Substrat EPr sollte in diesem Zusammenhang nicht genannt werden, da lediglich der auf einem Messfehler beruhende WC-Wert der Variante Topffest zu einem deutlichen Unterschied zu den Werten der übrigen Varianten führt. Die kleinsten Unterschiede zwischen den Varianten der Q-Methode wurden für die Substrate EP, ET und SW3 gemessen.

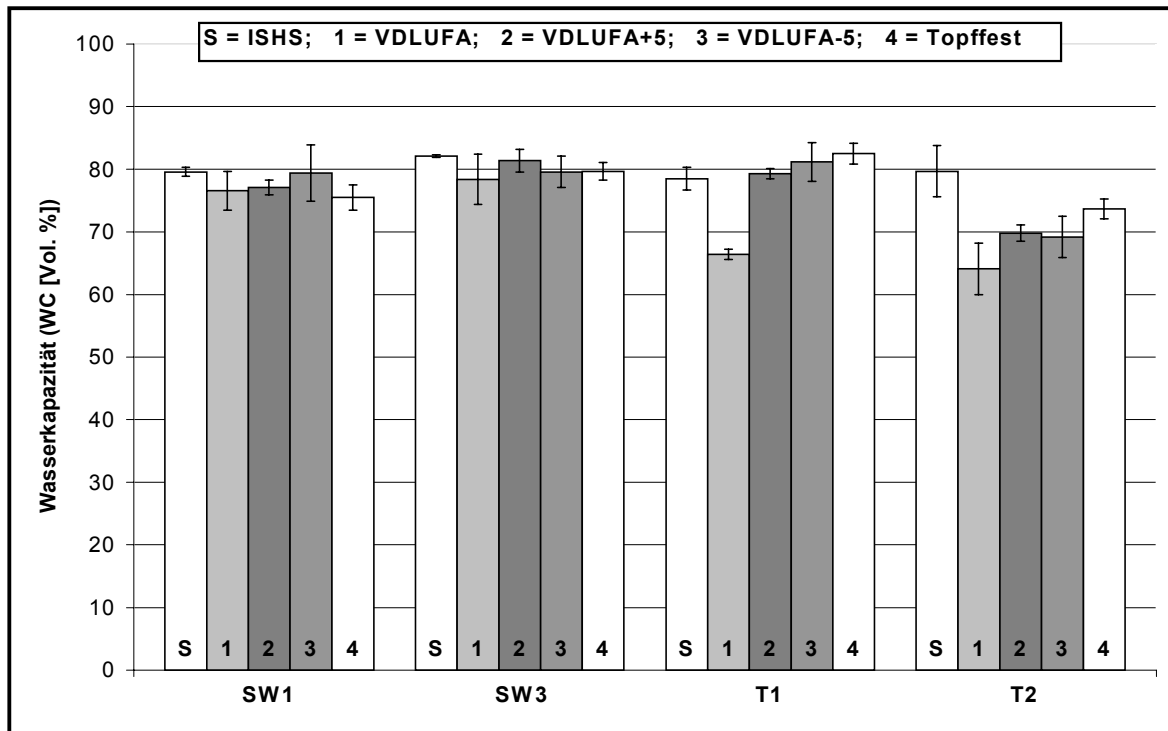


Abb. 3.57: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate SW1, SW3, T1 und T2 in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Tabelle 3.11 gibt einen Überblick über die Werte für die Wasserkapazität (WC), die mit den vier Varianten der Q-Methode für die 13 untersuchten Standardsubstrate ermittelt wurden. Es wird deutlich, dass die Variante VDLUFA bei 10 Standardsubstraten (= 77 %) die niedrigste Wasserkapazität (WC) ermittelt. Obwohl Topffest ebenfalls zwei minimale Werte für die Wasserkapazität erzeugt (EPr und SW1), führt sie jedoch bei den meisten Standardsubstraten (8 Substrate = 61,5 %) zur höchsten Wasserkapazität (WC).

Die Tabellen A6 (VDLUFA), A7 (VDLUFA+5), A8 (VDLUFA-5) und A9 (Topffest) im Anhang enthalten, neben Mittelwert, Median und Standardabweichung (s), u.a. auch die vier gemessenen Einzelwerte für WC.

Tabelle 3.11: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) (**fett** = maximale Werte von WC; **grau** unterlegt = minimale Werte von WC; **unterstrichen** = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; n = 4)

Substrat	VDLUFA [Vol. %]	s	VDLUFA+5 [Vol. %]	s	VDLUFA-5 [Vol. %]	s	Topffest [Vol. %]	s
EP	72,5	1,7	73,5	<u>2,0</u>	74,2	1,8	74,8*	0,9
EPr	80,1	2,0	78,9	<u>2,4</u>	82,4	1,1	71,6*	0,5
ET	71,5	1,7	69,9	1,7	72,2	<u>4,5</u>	70,1*	0,5
CF	69,4	1,5	74,6	0,8	73,8	<u>2,9</u>	71,9*	1,1
PH	84,0	<u>1,7</u>	86,1	1,6	84,0	0,7	88,9	0,8
FT	61,9	<u>7,3</u>	66,3	1,9	67,9	1,0	71,4	2,1
RK	54,9	0,9	60,1*	0,5	59,7	1,0	60,2	<u>2,5</u>
ST	70,0	<u>7,2</u>	74,7	1,5	71,6	1,5	75,7	1,2
SV	74,9	1,5	79,4	1,4	76,0	<u>2,8</u>	80,5	1,0
SW1	76,6	3,1	77,1	1,2	79,4	<u>4,5</u>	75,5	2,0
SW3	78,4	<u>4,0</u>	81,4	1,8	79,6	2,5	79,7	1,4
T1	66,4	0,8	79,3	0,8	81,2	<u>3,1</u>	82,5	1,7
T2	64,1	<u>4,1</u>	69,8	1,3	69,2	3,3	73,7	1,6

Mit Hilfe von VDLUFA-5 (EPr, ET und SW1) sowie VDLUFA+5 (CF und SW3) konnten die übrigen Maxima für WC gemessen werden. Angesichts der Tatsache, dass mit VDLUFA+5 die meisten Maxima (5) für das Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E) ermittelt wurden (siehe Tabelle 3.7), überrascht das Ergebnis, dass nur bei zwei Standardsubstraten eine maximale Wasserkapazität (WC) messbar war. Ähnlich überraschend sind die Ergebnisse der Variante Topffest, die nur in zwei Fällen einen maximalen dB_E -Wert zeigte, aber in 8 Fällen eine maximale Wasserkapazität (WC) erzeugte. Bei jeweils gleichen Eigenschaften einer Substratvariante und gleicher Behandlungsweise, müsste nach FONTENO (1993) davon ausgegangen werden, dass mit steigendem Volumengewicht (dB_E) die Wasserkapazität (WC) zunimmt. Da die Untersuchungen mit den vier verschiedenen Varianten der Q-Methode jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, wiesen die Substrate daher auch unterschiedliche Wassergehalte auf, was eine Veränderung der Fähigkeiten zur Wasseraufnahme

erklärt (hoher Widerstand gegen Benetzung). Für die Höhe der Wasserkapazität (WC) ist ja nicht allein das Volumengewicht (dB_E) ausschlaggebend, sondern viel mehr der gravimetrische Wassergehalt (W_g [Gew. %]) (Formel 21 und 22), der wiederum stark von der Fähigkeit zur Wasseraufnahme der jeweils untersuchten Substratvariante abhängig ist. Je weniger Wasser das Substrat zum Messtermin in der Phase der Wassersättigung im Wasserbad aufnehmen kann, desto geringer ist auch der ermittelte gravimetrische Wassergehalt (W_g) (Unterschätzung von $Substrat_{feucht}$ [g] in Formel 21).

Daneben wurde offenbar auch das Ausmaß der Fehlstelle im Probenzylinder durch Sackung und Schrumpfung leicht unter- bzw. überschätzt, da die Erfassungsmethode (Höhenmessung an drei Punkten entlang des Durchmesser des Probenzylinders) etwas ungenau ist. Die Formeln 18, 19 und 20 zeigen, dass sich Fehler bei der Erfassung der Fehlstelle auf die Höhe des Volumengewichts im Probenzylinder der Q-Methode zum Ende der Messung (dB_E) auswirken. Eine Überschätzung der Fehlstelle führt auch zur Überschätzung, eine Unterschätzung der Fehlstelle entsprechend zur Unterschätzung von dB_E . Es könnten also auch bei der Berechnung von dB_E schon Fehler aufgetreten sein.

Tabelle 3.12: Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur maximalen Wasserkapazität (WC [Vol. %]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat (**1** = höchster dB_E -Wert, **2** = zweithöchster dB_E -Wert, **3** = zweitkleinster dB_E -Wert, **4** = kleinster dB_E -Wert)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den höchsten Wert für WC zeigte	höchster WC-Wert [Vol. %]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_E
EP	Topffest	74,8	3
EPr	VDLUFA-5	82,4	1
ET	VDLUFA-5	72,2	2
CF	VDLUFA+5	74,6	1
PH	Topffest	88,9	3
FT	Topffest	71,4	4
RK	Topffest	60,2	3
ST	Topffest	75,7	2
SV	Topffest	80,5	2
SW1	VDLUFA-5	79,4	1
SW3	VDLUFA+5	81,4	2
T1	Topffest	82,5	1
T2	Topffest	73,7	1

Tabelle 3.12 zeigt eine Übersicht, welchen Rangplatz das Volumengewicht (dB_E) der jeweiligen Variante der Q-Methode einnimmt, die zur höchsten Wasserkapazität (WC) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat. Bei ca. 70 % (= 9 Substrate) der untersuchten Standardsubstrate war der dB_E -Wert, der zur höchsten Wasserkapazität (WC) geführt hat, auch der höchste oder zweithöchste Wert (5 maximale dB_E -Werte und 4 zweithöchste dB_E -Werte). Nur bei vier Standardsubstraten führte die Variante mit dem zweitkleinsten (3 Substrate) bzw. dem kleinsten (1 Substrat) Volumengewicht (dB_E) zur höchsten Wasserkapazität (WC).

In Bezug auf die Wasserkapazität von granT-Substraten treten erhebliche Unterschiede zwischen den vier Varianten der Q-Methode auf, die bei granT5% sogar über 20 Vol. % liegen (Abb. 3.58). Einige der granT-Varianten weisen sogar WC-Werte unter 40 Vol. % auf. Damit zeichnen sich die Mischsubstrate mit granuliertem Ton unter allen untersuchten Substraten durch die kleinste Wasserkapazität aus.

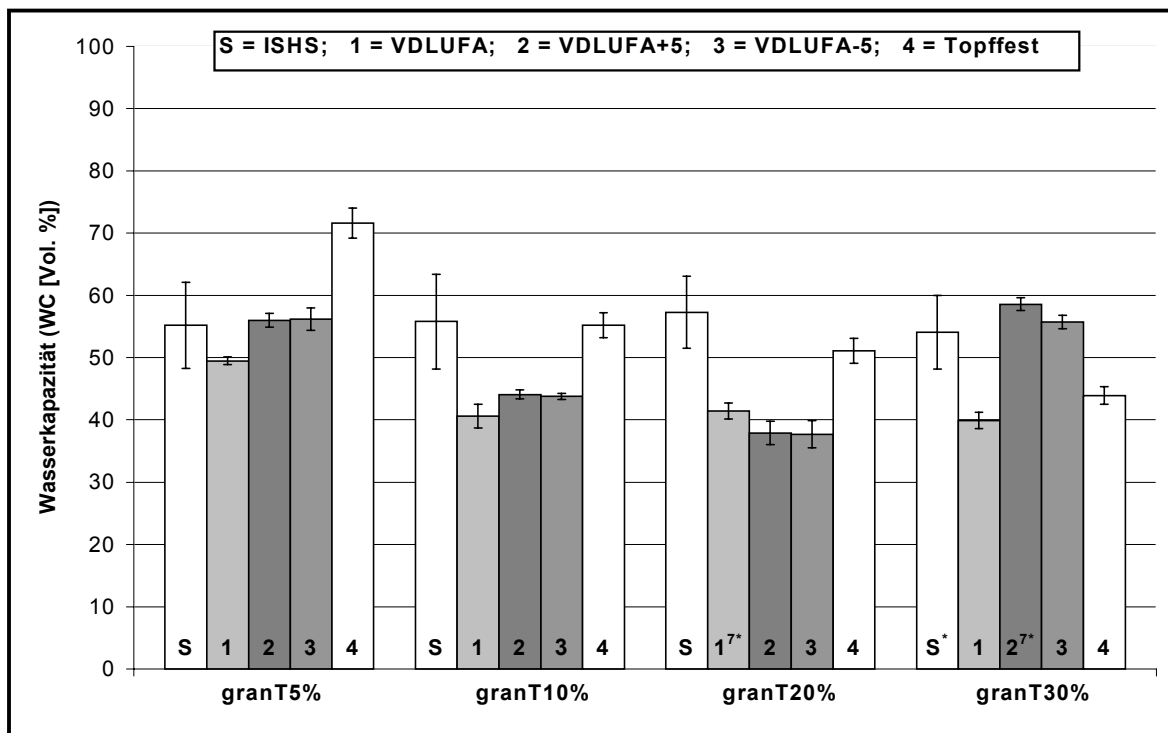


Abb. 3.58: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ⁷ = dB_E -Wert wurde als Messfehler eingestuft; * = Messfehler; n = 4)

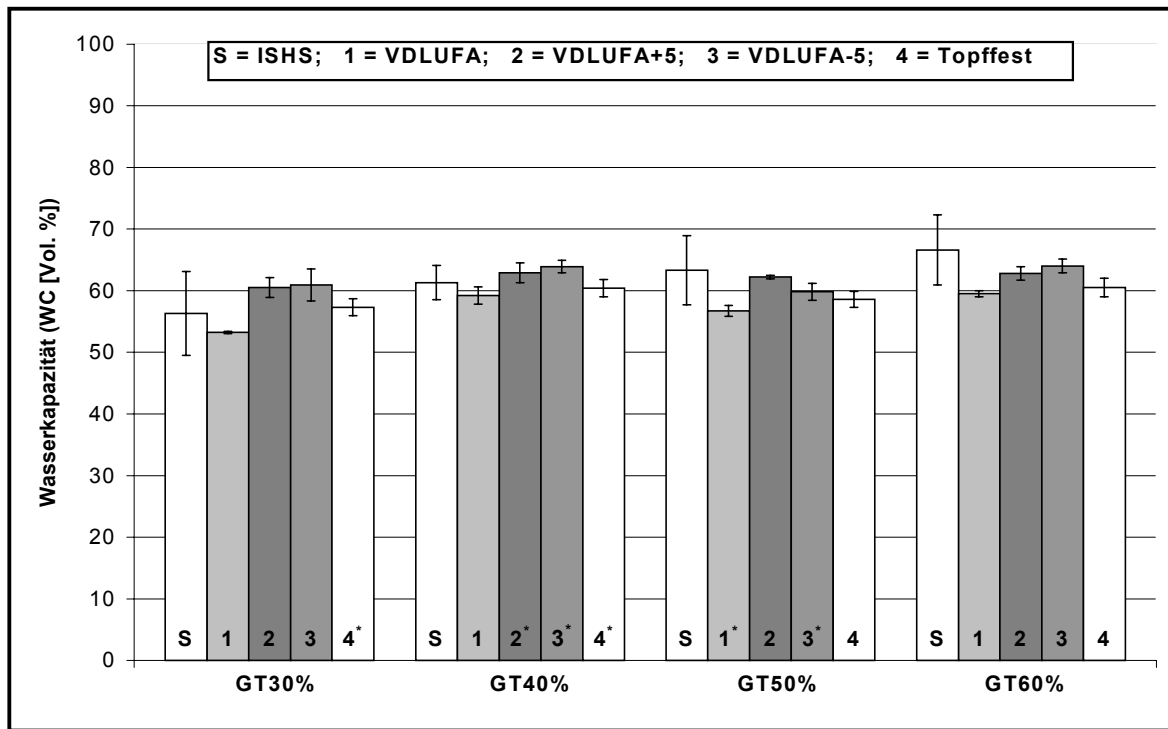


Abb. 3.59: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); * = Messfehler; n = 4)

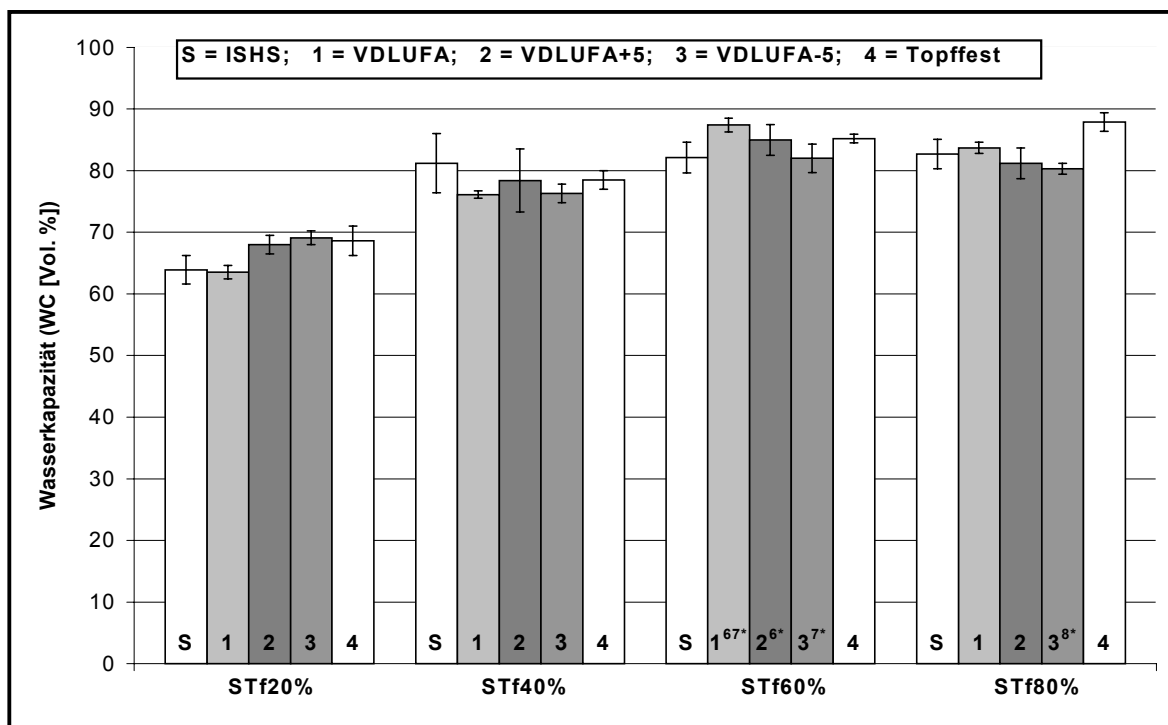


Abb. 3.60: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate STf20%, STf40%, STf60% und STf80% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); ⁶ = dB_A-Wert wurde als Messfehler eingestuft; ⁷ = dB_E-Wert wurde als Messfehler eingestuft; ⁸ = n = 2; * = Messfehler; n = 4)

Tabelle 3.13: Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) (**fett** = maximale Werte von WC; **grau** unterlegt = minimale Werte von WC; **unterstrichen** = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; n = 4)

Substrat	VDLUFA [Vol. %]	s	VDLUFA+5 [Vol. %]	s	VDLUFA-5 [Vol. %]	s	Topffest [Vol. %]	s
granT5%	<u>49,5</u>	0,6	56,0	1,1	56,2	1,8	71,6	<u>2,4</u>
granT10%	<u>40,6</u>	1,9	44,1	0,7	43,8	0,5	55,2	<u>2,0</u>
granT20%	41,4*	1,3	37,9	1,9	<u>37,7</u>	<u>2,2</u>	51,1	2,0
granT30%	<u>39,9</u>	1,3	58,6	1,0	55,7	1,1	43,9	<u>1,4</u>
GT30%	<u>53,2</u>	0,2	60,5	1,6	60,9	<u>2,6</u>	57,3*	1,4
GT40%	<u>59,2</u>	1,4	62,9*	<u>1,6</u>	63,9*	1,0	60,4*	1,4
GT50%	<u>56,7*</u>	0,9	62,2	0,3	59,8*	<u>1,4</u>	58,6	1,3
GT60%	<u>59,5</u>	0,5	62,8	1,1	64,0	1,0	60,5	<u>1,5</u>
KF10%	<u>58,7</u>	<u>2,6</u>	57,8*	1,9	59,2*	1,7	59,1*	0,9
KF15%	<u>56,0*</u>	<u>2,4</u>	58,7	1,7	62,9	1,6	62,3	0,9
KF20%	57,1	3,1	58,5	<u>3,2</u>	56,9	3,1	<u>55,7</u>	2,4
KF25%	55,7	1,8	<u>54,1</u>	1,1	54,7	2,0	55,3	<u>2,2</u>
RH10%	<u>70,6</u>	<u>3,6</u>	73,8	1,1	73,8	2,9	76,5	3,2
RH20%	<u>74,3</u>	2,0	75,6	1,6	75,7	1,6	75,3	<u>2,5</u>
RH30%	77,0	<u>1,7</u>	78,7	1,3	<u>75,3*</u>	1,2	77,6	1,6
RH40%	77,7	<u>2,3</u>	<u>77,0*</u>	1,0	80,9	1,8	80,6	1,3
STf20%	<u>63,5</u>	1,1	68,0	1,5	69,1	1,1	68,6	<u>2,4</u>
STf40%	<u>76,1</u>	0,6	78,4	<u>5,1</u>	76,3	1,5	78,5	1,5
STf60%	87,4*	1,1	85,0	1,3	<u>82,0</u>	<u>2,3</u>	85,2	0,7
STf80%	83,7	0,9	81,2	<u>2,5</u>	<u>80,3*</u>	0,9	87,9	1,5
STg20%	<u>62,4</u>	1,5	70,4	3,1	70,9	<u>4,0</u>	69,7	1,3
STg40%	<u>76,9</u>	2,5	78,5	1,4	78,8	<u>2,6</u>	78,6	1,5
STg60%	83,8	1,1	85,3*	1,5	83,0*	1,2	<u>82,1</u>	<u>2,4</u>

Die Mischvarianten mit Grubenton (GT) verfügen in ihrer Gesamtheit über eine größere Wasserkapazität, die mit 53,2 Vol % (GT30%, VDLUFA) den kleinsten und mit 64,0 Vol. % (GT60%, VDLUFA-5) den höchsten Wert aufweist (Abb. 3.59).

Die unter den GT-Substraten in Abhängigkeit von der Methodenvariante auftretenden Spannweiten der WC-Werte, sind im Vergleich zu den granT-Substraten zumeist weniger als halb so groß. Damit bewegen sich die Unterschiede der Werte für die Wasserkapazität, die mit den vier Varianten der Q-Methode erzeugt werden, bei den Substraten mit Grubenton (GT) etwa in dem Rahmen, in dem sie sich auch bei den übrigen Substraten bewegen (siehe Tabelle 3.13). Die höchste Wasserkapazität unter den 36 untersuchten Substraten wurde bei den Mischungsvarianten mit feinem, gesiebttem Schwarztorf (STf) gemessen. Mit 87,9 Vol. % wurde bei STf80% mit der

Variante Topffest die größte Wasserkapazität unter allen Substraten und Methodenvarianten festgestellt (Abb. 3.60). Aber auch unter diesen und den übrigen Mischsubstraten ist die Differenz zwischen dem höchsten und dem kleinsten WC-Wert, also der Unterschied zwischen den einzelnen Varianten der Q-Methode, nur halb so groß wie bei den Mischvarianten mit granuliertem Ton (Abb. 3.58 und Tabelle 3.13). Die kleinste Spannweite zwischen den vier Methodenvarianten weist das Substrat KF10% mit 0,5 Vol. % auf.

Alle Daten, die bezüglich der Wasserkapazität (WC) für die 23 Mischsubstrate gesammelt wurden, sind den Tabellen A6 – A9 im Anhang zu entnehmen. Außerdem sind die entsprechenden Mittelwerte auch in Tabelle 3.13 zusammengestellt worden.

Tabelle 3.14: Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur maximalen Wasserkapazität (WC [Vol. %]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat (**1** = höchster dB_E -Wert, **2** = zweithöchster dB_E -Wert, **3** = zweitkleinster dB_E -Wert, **4** = kleinster dB_E -Wert)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den höchsten Wert für WC zeigte	höchster WC-Wert [Vol. %]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_E
granT5%	Topffest	71,6	3
granT10%	Topffest	55,2	1
granT20%	Topffest	51,1	4
granT30%	VDLUFA+5	58,6	3
GT30%	VDLUFA-5	60,9	3
GT40%	VDLUFA-5	63,9	1
GT50%	VDLUFA+5	62,2	1
GT60%	VDLUFA-5	64,0	4
KF10%	VDLUFA-5	59,2	2
KF15%	VDLUFA-5	62,9	2
KF20%	VDLUFA+5	58,5	2
KF25%	VDLUFA	55,7	3
RH10%	Topffest	76,5	1
RH20%	VDLUFA-5	75,7	3
RH30%	VDLUFA+5	78,7	1
RH40%	VDLUFA-5	80,9	2
STf20%	VDLUFA-5	69,1	3
STf40%	Topffest	78,5	3
STf60%	VDLUFA	87,4	3
STf80%	Topffest	87,9	3
STg20%	VDLUFA-5	70,9	1
STg40%	VDLUFA-5	78,8	3
STg60%	VDLUFA+5	85,3	3

Unter den 23 Mischsubstraten können mit Hilfe der Variante VDLUFA-5 10 Höchstwerte (= 43,5 %) und lediglich vier Minima für die Wasserkapazität ermittelt werden, gefolgt von Topffest (6 Maxima, 2 Minima), VDLUFA+5 (5 Maxima, 2 Minima) und VDLUFA (2 Maxima, 15 Minima). Werden die Ergebnisse der vier Varianten bezüglich des Volumengewichts (dB_E) nochmals betrachtet (Tabelle 3.8), so überrascht die o.g. Rangfolge der Methodenvarianten im Zusammenhang mit der Wasserkapazität der Mischsubstrate. Mit VDLUFA-5 konnte nur in zwei Fällen ein maximales Volumengewicht (dB_E) unter den Mischsubstraten gemessen werden, während die gleiche Variante 10 Höchstwerte für die Wasserkapazität erzeugt. Umgekehrt erzeugte VDLUFA unter den selbsterstellten Mischungen zwar sechs Maxima beim Volumengewicht (dB_E), aber lediglich zwei bezüglich WC. Für das überraschende Ergebnis sollten die gleichen Erklärungsansätze gelten, die auch schon bei den 13 Standardsubstraten herangezogen wurden (siehe S. 117 – 118) .

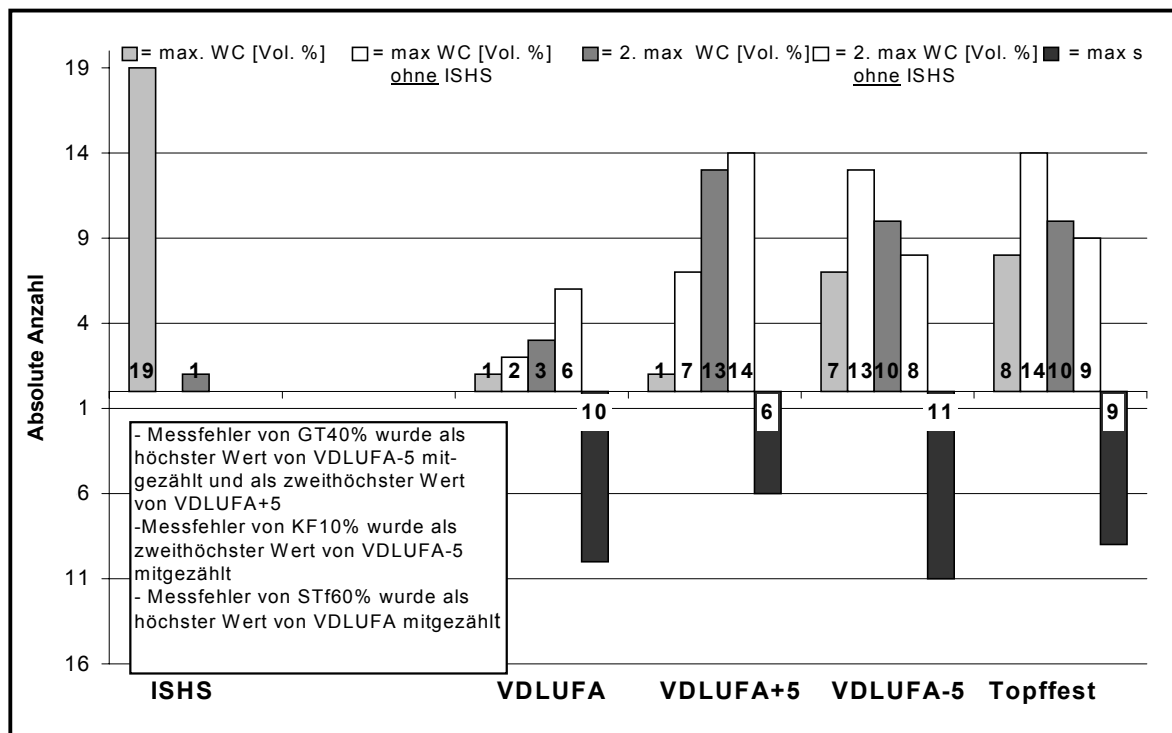


Abb. 3.61: Anzahl der höchsten (= max) und zweithöchsten (= 2. max) Werte für die Wasserkapazität WC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichung (= max s) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Containerkapazität (CC [Vol. %]) der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben (bei VDLUFA+5 und VDLUFA wurde der WC-Wert von RH10% bei beiden Varianten als zweithöchster Wert mitgezählt (siehe auch Tabelle 3.13))

Angesichts dieser Ergebnisse überrascht es nicht, dass in 13 Fällen die Varianten mit den kleinsten (2 Fälle) bzw. zweitkleinsten (11 Fälle) dB_E -Werten zu den höchsten WC-Werten (56,5 %) führen. Dagegen konnten nur sechs höchste bzw. vier zweithöchste Volumengewichte (dB_E) eine maximale Wasserkapazität erzeugen (siehe Tabelle 3.14).

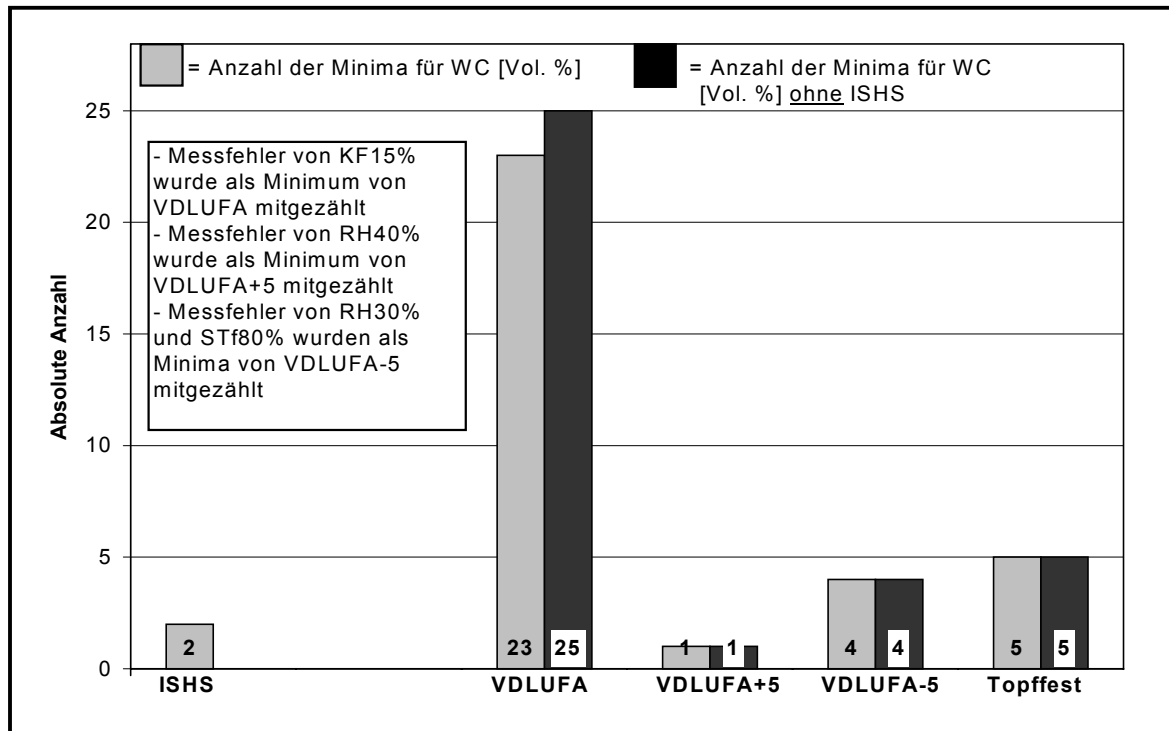


Abb. 3.62: Anzahl der niedrigsten Werte der Wasserkapazität WC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Containerkapazität (CC [Vol. %]) der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben

Wird die Aufmerksamkeit allein auf die Frage gerichtet, welche Variante der Q-Methode die meisten Höchstwerte und die wenigsten Minima für die Wasserkapazität (WC) unter allen 36 Substraten liefert, so ergibt sich das in den Abbildungen 3.61 und 3.62 dargestellte Bild. Zunächst fällt die Containerkapazität der ISHS-Methode auf, die in immerhin 19 Fällen (52,8 %) höher liegt als die Wasserkapazität, die mit den vier Varianten der Q-Methode gemessen wurde. Davon sind vor allem die Varianten VDLUFA+5, VDLUFA-5 und Topffest betroffen. Außerdem liefert die ISHS-Methode auch noch einen zweithöchsten Wert (Abb. 3.61). Der alleinige Vergleich der vier Methodenvarianten offenbart, dass mit der Variante Topffest 14 Maxima erzeugt werden (38,8 %), gefolgt von VDLUFA-5 mit 13 (36,1 %) und VDLUFA+5 mit sieben Höchstwerten (19,4 %). VDLUFA führt lediglich zu zwei Maxima, aber zu

immerhin 25 Minima (69,4 %). Mit den drei anderen Varianten der Q-Methode werden dagegen nur fünf (Topffest), vier (VDLUFA-5) bzw. ein (VDLUFA-5) kleinster Wert für die Wasserkapazität (WC) gemessen (Abb.3.62). Die Fälle, bei denen die größte Streuung der Einzelwerte beobachtet wurde, sind dagegen relativ gleichmäßig auf die vier Methodenvarianten verteilt (Abb.3.61).

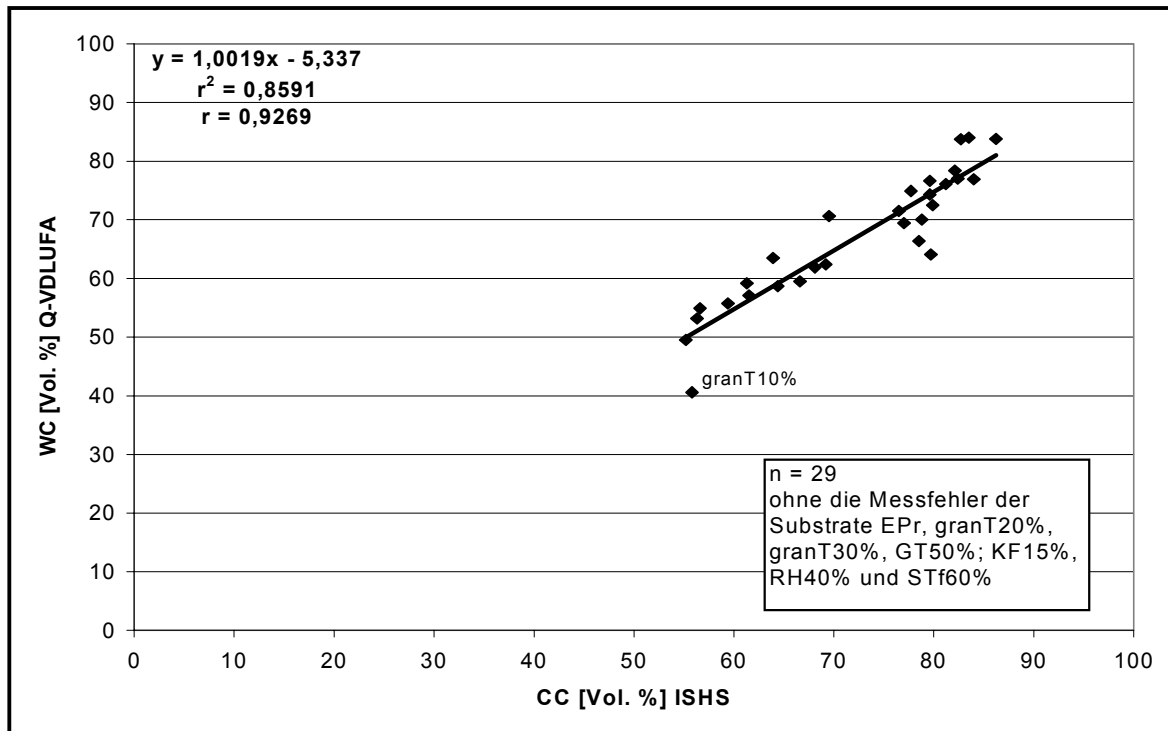


Abb. 3.63: Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 29 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Überraschend sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Wasserkapazität (WC) der Varianten der Q-Methode und der Containerkapazität (CC) der ISHS-Methode (CEN/TC 223). Obwohl mit der Variante VDLUFA die meisten kleinsten Werte für WC gemessen wurden und mit der ISHS-Methode die meisten Höchstwerte (siehe Abbildungen 3.61 und 3.62), konnte für die Wasserkapazität, die mit der Variante VDLUFA gemessen wurde (WC-VDLUFA) die engste Beziehung zur Containerkapazität (CC-ISHS) errechnet werden ($r = 0,9269$), wenn lediglich die nicht mit Messfehlern behafteten 29 Substratvarianten verrechnet werden (Abb. 3.63). Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) werden kleiner, wenn zusätzlich zu den Meßfehlern auch alle granT-Substrate, die große Probleme mit der Benetzung im Wasserbad machten, bei der Berechnung ausgeschlossen werden (Tabelle 3.15).

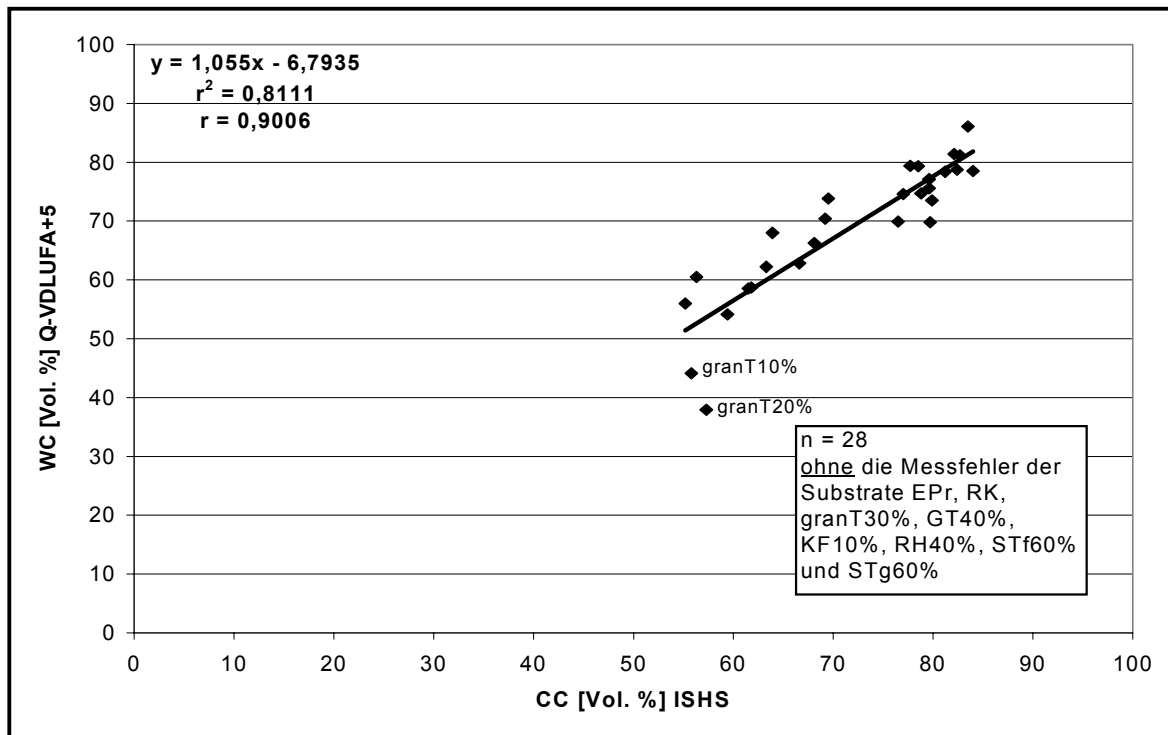


Abb. 3.64: Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA+5) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 28 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.15: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen.

(t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$) ; s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 29$) (siehe auch Abb. 3.63) (d.h. ohne: EPr, granT20%, granT30%, GT50%, KF15%; RH40%, STf60%)	0,9269	0,8591	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 27$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9128	0,8442	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 12$) (d.h. ohne: EPr)	0,8231	0,6774	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 17$) (d.h. ohne: granT20%, granT30%, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9549	0,9119	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 15$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9655	0,9321	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 18$) (d.h. ohne: KF15%, RH40%, STf60%)	0,8430	0,7105	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, granT20%, granT30%, GT50%)	0,9341	0,8725	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 9$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT50%)	0,9693	0,9395	s

Mit $r = 0,9693$ konnte für die Gruppe der tonhaltigen Substrate ohne granT die engste Korrelation zwischen WC-VDLUFA und CC-ISHS unter den acht Substratgruppen aus Tabelle 3.15 berechnet werden. Die zusätzliche Berechnung einer Korrelationsanalyse für acht unterschiedliche Substratgruppen sollte klären, ob und bei welchen Substraten eine Methodenvariante besonders enge Korrelationen zur ISHS-Methode zeigt. Die Einteilung der Gruppen erfolgte danach, ob bestimmte Substrate (z.B. granT) durch eine problematische Handhabung aufgefallen sind bzw. ob sich bestimmte Zuschlagstoffe (z.B. Ton) negativ oder positiv auf die Korrelation auswirken. Daneben sollte die Einteilung der Gruppen auch möglichen Fehlern Rechnung tragen, die sich beim Mischen der selbst erstellten Substrate ereignet haben (z.B. zu trockener Weißtorf, Zuschlagstoff nicht in praxisüblicher Menge usw.). Auch für die Beziehung zwischen der Containerkapazität (CC-ISHS) und der Wasserkapazität der Variante VDLUFA+5 (WC-VDLUFA+5) konnte noch ein Korrelationskoeffizient (r) von etwas über 0,9 errechnet werden (Abb. 3.64). Eine engere Beziehung zwischen beiden genannten Kennwerten konnte nur noch für die Substratgruppe der 21 tonfreien Substrate ($r = 0,9151$) bzw. der 15 tonhaltigen Substrate ohne die granT Substrate ($r = 0,9057$) ermittelt werden (siehe Tabelle 3.16).

Tabelle 3.16: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA+5 und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 28$) (siehe auch Abb. 3.64) (d.h. ohne: EPr, RK, granT30%, GT40%, KF10%; RH40%, STf60%, STg60%)	0,9006	0,8111	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 26$) (d.h. ohne: EP, RK, <u>alle</u> granT, GT40%, KF10%; RH40%, STf60%, STg60%)	0,8861	0,7853	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, RK)	0,7494	0,5616	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 17$) (d.h. ohne: granT30%, GT40%, KF10%; RH40%, STf60%, STg60%)	0,8855	0,7842	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 14$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT40%, KF10%; RH40%, STf60%, STg60%)	0,8760	0,7873	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 17$) (d.h. ohne: KF10%, RH40%, STf60%, STg60%)	0,9151	0,8373	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, RK, granT30%, GT40%)	0,8544	0,7300	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 8$) (d.h. ohne: EPr, RK, <u>alle</u> granT, GT40%)	0,9057	0,8184	s

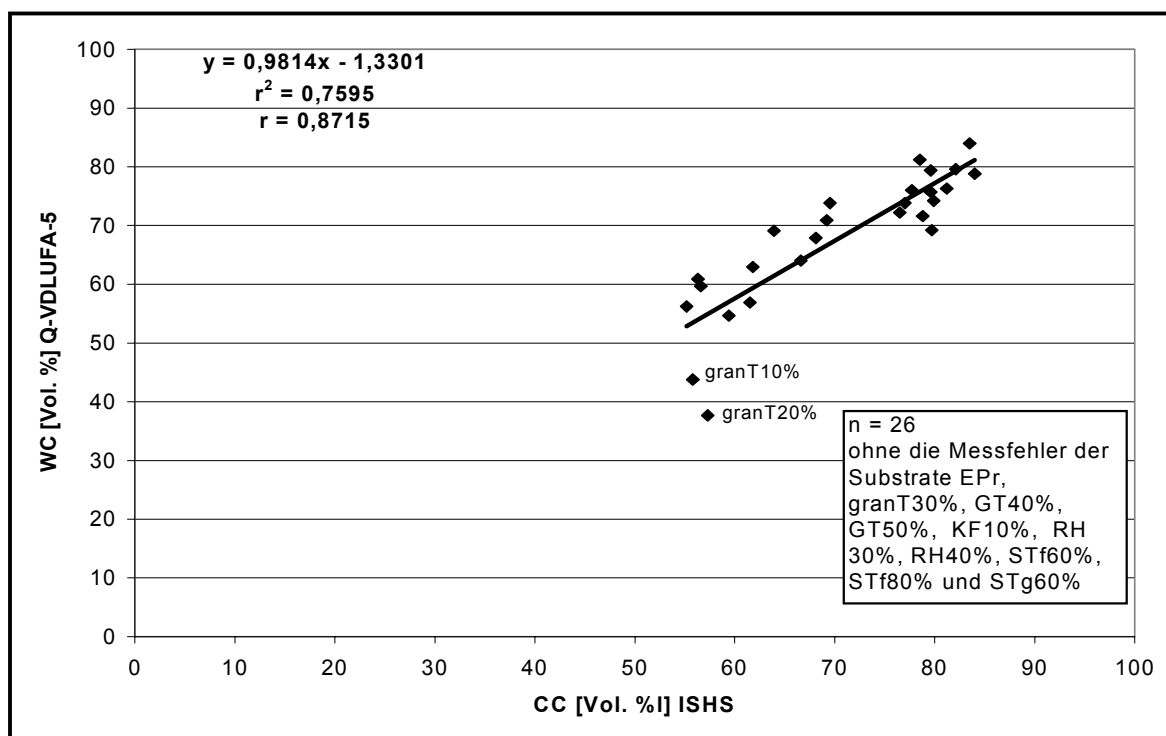


Abb. 3.65: Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA-5) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 26 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.17: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA-5 und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 26$) (siehe auch Abb. 3.65) (d.h. ohne: EPr, granT30%, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8715	0,7595	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 23$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8928	0,7971	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 12$) (d.h. ohne: EPr)	0,8381	0,7024	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 14$) (d.h. ohne: granT30%, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8337	0,6951	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 11$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8917	0,7951	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 15$) (d.h. ohne: KF10%, RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8817	0,7773	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, granT30%, GT40%, GT50%)	0,8256	0,6816	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 8$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%)	0,9621	0,9256	s

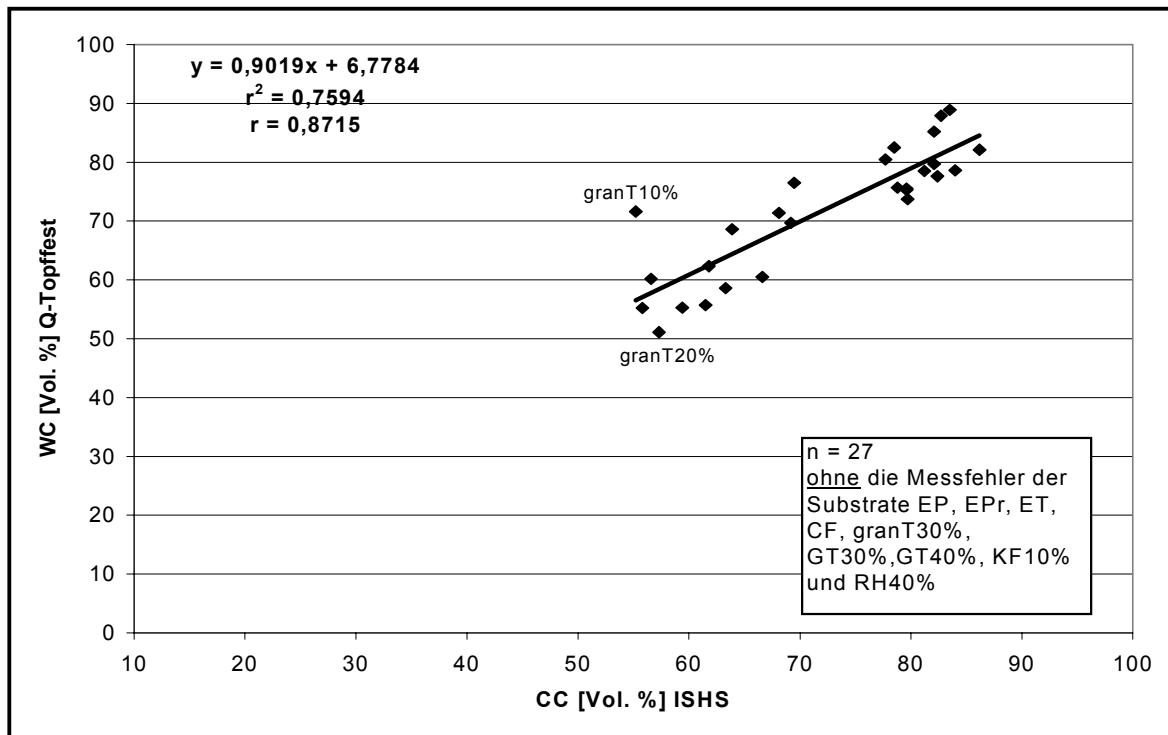


Abb. 3.66: Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante Topffest) (WC [Vol. %] Q-Topffest) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 27 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient; r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.18: Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode, Variante Topffest und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 27$) (siehe auch Abb. 3.66) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF, granT30%, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8715	0,7594	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 24$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF, <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8985	0,8073	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 9$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF)	0,8698	0,7566	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 18$) (d.h. ohne: granT30%, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8586	0,7372	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 15$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,9034	0,8161	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 18$) (d.h. ohne: CF, KF10%, RH40%)	0,8817	0,7773	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 9$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, granT30%, GT30%, GT40%)	0,7307	0,5339	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 6$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%)	0,8806	0,7754	s

Der Korrelationskoeffizient (r) von 0,8715 zeigt eine weniger enge Beziehung zwischen den Werten für die Wasserkapazität der Variante VDLUFA-5 (WC-VDLUFA-5) und CC-ISHS an als für die beiden zuerst angesprochenen Varianten der Q-Methode (siehe Abb. 3.65). Aber auch in diesem Fall führt die alleinige Verrechnung der 15 tonhaltigen Substrate zu einer wesentlich engeren Korrelation ($r = 0,9621$) zu CC-ISHS (siehe Tabelle 3.17).

Tabelle 3.19: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie der ISHS-Methode (CEN/TC 223) und den damit ermittelten Werten für die Wasserkapazität (WC) bzw. Containerkapazität (CC) für fünf verschiedene Substratgruppen, jeweils ohne Messfehler (1 = 13 Standardsubstrate; 2 = 23 Mischsubstrate; 3 = 15 tonhaltige Substrate; 4 = 21 tonfreie Substrate; 5 = alle 36 Substrate)

(Angabe sind jeweils die adjustierten p -Werte (= p_{adj}). Die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$. Ein signifikanter Unterschied liegt vor, wenn $p_{adj} < \alpha$ ist. Die Adjustierung der p -Werte erfolgte nach TUKEY-KRAMER; Werte für p_{adj} , die signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Methoden anzeigen, sind **grau** unterlegt)

Variante der Methode	WC-Topffest (ohne EP, EPr, ET, CF, GT30%, GT40%, KF10%)	WC-VDLUFA (ohne GT50%, KF15%, STf60%, granT20%)	WC-VDLUFA+5 (ohne RK, granT30%, GT40%, KF10%, RH40%, STf60%)	WC-VDLUFA-5 (ohne GT40%, GT50%, KF10%, RH30%, STf60%, STf80%, STg60%)	CC-ISHS (ohne EPr, granT30%, RH40%)
WC-Topffest (ohne EP, EPr, ET, CF, GT30%, GT40%, KF10%)	—	1 = 0,0099 2 = 0,0427 3 = 0,0162 4 = 0,0445 5 = 0,0034	1 = 0,7658 2 = 0,5470 3 = 0,6163 4 = 0,6170 5 = 0,1508	1 = 0,6673 2 = 0,6628 3 = 0,5761 4 = 0,4404 5 = 0,2178	1 = 0,2711 2 = 0,5138 3 = 0,4243 4 = 0,4462 5 = 0,8346
WC-VDLUFA (ohne GT50%, KF15%, STf60%, granT20%)	1 = 0,0099 2 = 0,0427 3 = 0,0162 4 = 0,0445 5 = 0,0034	—	1 = 0,0201 2 = 0,1497 3 = 0,0634 4 = 0,1222 5 = 0,0329	1 = 0,0282 2 = 0,1935 3 = 0,0755 4 = 0,1766 5 = 0,0126	1 = 0,0005 2 = 0,0079 3 = 0,0024 4 = 0,0049 5 = 0,0003
WC-VDLUFA+5 (ohne RK, granT30%, GT40%, KF10%, RH40%, STf60%)	1 = 0,7658 2 = 0,5470 3 = 0,6163 4 = 0,6170 5 = 0,1508	1 = 0,0201 2 = 0,1497 3 = 0,0634 4 = 0,1222 5 = 0,0329	—	1 = 0,8930 2 = 0,8631 3 = 0,9505 4 = 0,7971 5 = 0,9929	1 = 0,1642 2 = 0,2098 3 = 0,2143 4 = 0,1978 5 = 0,0543
WC-VDLUFA-5 (ohne GT40%, GT50%, KF10%, RH30%, STf60%, STf80%, STg60%)	1 = 0,6673 2 = 0,6628 3 = 0,5761 4 = 0,4404 5 = 0,2178	1 = 0,0282 2 = 0,1935 3 = 0,0755 4 = 0,1766 5 = 0,0126	1 = 0,8930 2 = 0,8631 3 = 0,9505 4 = 0,7971 5 = 0,9929	—	1 = 0,1308 2 = 0,1454 3 = 0,1978 4 = 0,1097 5 = 0,0613
CC-ISHS (ohne EPr, granT30%, RH40%)	1 = 0,2711 2 = 0,5138 3 = 0,4243 4 = 0,4462 5 = 0,8346	1 = 0,0005 2 = 0,0079 3 = 0,0024 4 = 0,0049 5 = 0,0003	1 = 0,1642 2 = 0,2098 3 = 0,2143 4 = 0,1978 5 = 0,0543	1 = 0,1308 2 = 0,1454 3 = 0,1978 4 = 0,1097 5 = 0,0613	—

Mit $r = 0,8715$ verfügt die Wasserkapazität, die mit Hilfe der Variante Topffest gemessen wurde (WC-Topffest), über einen vergleichbaren Korrelationskoeffizienten (r) zu CC-ISHS, wie die Variante VDLUFA-5 auch (Abb. 3.66). Nur durch die Verrechnung der 23 Mischsubstrate ohne die granT Substrate war es möglich, einen Korrelationskoeffizienten größer 0,9 zu erhalten. Zwar war auch im Fall von Topffest in der Gruppe der 15 tonhaltigen Substrate ohne granT eine Steigerung von r zu beobachten, jedoch blieb der Korrelationskoeffizient mit 0,8806 deutlich unter 0,9 (Tabelle 3.18). In diesem Zusammenhang sollte jedoch vor einer Überbewertung der Steigerung des Korrelationskoeffizienten (r) in der Gruppe der 15 tonhaltigen Substrate ohne granT gewarnt werden, da in dieser Gruppe lediglich zwischen $n = 6$ und $n = 9$ Substratvarianten bei der Berechnung von r berücksichtigt wurden. Für alle errechneten Korrelationskoeffizienten konnte gezeigt werden, dass sie sich signifikant von null unterscheiden.

Als Ergänzung zur Korrelationsanalyse wurde auch eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) gerechnet, wobei, genau wie bei der Korrelationsanalyse auch, die Berechnung ohne Berücksichtigung der Messfehler erfolgte. Im Gegensatz zur Korrelationsanalyse wurde die ANOVA jedoch nur für fünf Substratgruppen gerechnet, nämlich für alle 36 Substrate, 13 Standardsubstrate, 23 Mischsubstrate, 21 tonfreie Substrate und 15 tonhaltige Substrate (siehe Tabelle 3.19). Innerhalb der vier Methodenvarianten unterscheiden sich nur die WC-Werte der Varianten Topffest (WC-Topffest) und VDLUFA (WC-VDLUFA) über alle fünf Substratgruppen signifikant voneinander. Außerdem konnten noch in den Gruppen 13 Standardsubstrate sowie für alle 36 Substrate signifikante Unterschiede zwischen WC-VDLUFA und WC-VDLUFA+5 bzw. WC-VDLUFA-5 aufgezeigt werden. Das bedeutet, dass sich in Bezug auf die Wasserkapazität der 36 untersuchten Substrate die Variante VDLUFA signifikant von den drei anderen Varianten der Q-Methode (VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) unterscheidet (siehe jeweils unter 5 in Tabelle 3.19). Da zuvor schon festgestellt wurde, dass VDLUFA die meisten Minima für die Wasserkapazität (WC) erzeugt, kann hier also festgehalten werden, dass die Variante VDLUFA signifikant niedrigere WC-Werte erzeugt als die übrigen drei Varianten, die sich untereinander nicht signifikant unterscheiden.

Vor dem Hintergrund, dass für WC-VDLUFA die engste Beziehung zu CC-ISHS errechnet werden konnte (Abb. 3.63 und Tabelle 3.15), überrascht das Ergebnis der ANOVA, das zeigt, dass sich von den vier Varianten der Q-Methode lediglich die Variante VDLUFA signifikant von CC-ISHS unterscheidet, die übrigen Varianten

jedoch nicht. Wird die Beziehung zwischen WC-VDLUFA und CC-ISHS jedoch genauer betrachtet, so ergibt sich ein einfacher Zusammenhang. Obwohl mit Hilfe der Variante VDLUFA niedrigere Werte für WC gemessen werden als mit der ISHS-Methode für die Containerkapazität (CC) (= signifikanter Unterschied), sind die Werte für WC-VDLUFA offenbar bei den Substraten kleiner geworden, bei denen auch die Werte für CC-ISHS kleiner werden und haben umgekehrt bei den Substraten zugenommen, bei denen auch die CC-ISHS Werte zunehmen (= hoher Korrelationskoeffizient (r)). Der mathematische Zusammenhang von WC-VDLUFA (= y) und CC-ISHS (= x) kann mittels der Geradengleichung der Trendlinie in Abb. 3.63 ausgedrückt werden.

Zusammenfassend lassen sich bezüglich der Wasserkapazität (WC) also folgende Ergebnisse festhalten:

- Entgegen den Erwartungen führt nicht immer die Variante der Q-Methode mit dem höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) auch zur höchsten Wasserkapazität (WC) (siehe Tabelle 3.12 und 3.14), sondern häufig die Varianten mit kleineren dB_E -Werten.
- Bei vielen Substraten unterscheiden sich die WC-Werte der vier Varianten der Q-Methode nur wenig, bei anderen Substraten treten Spannweiten von über 20 Vol. % zwischen dem größten und dem kleinsten Wert von WC auf (siehe z.B. Abb. 3.58 und 3.60).
- Die Varianten VDLUFA-5 (13) bzw. Topffest (14) erzeugen die meisten Höchstwerte für die Wasserkapazität (WC), gefolgt von VDLUFA+5 (7) und VDLUFA (2) (siehe Abb. 3.61).
- Mit VDLUFA (25) werden die meisten Minima für WC gemessen. Die übrigen Varianten erzeugen dagegen nur fünf (Topffest), vier (VDLUFA-5) bzw. ein (VDLUFA+5) Minimum (siehe Abb. 3.62).
- Die engste Beziehung konnte mit einem Korrelationskoeffizienten (r) von 0,9269 zwischen der Wasserkapazität der Variante VDLUFA (WC-VDLUFA) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC-ISHS) errechnet werden (Abb. 3.63).
- Obwohl die engste Korrelation zwischen WC-VDLUFA und CC-ISHS gefunden werden konnte, ist VDLUFA die einzige Variante der Q-Methode, die sich bezüglich der Wasserkapazität (WC) signifikant von CC-ISHS unterscheidet (Tabelle 3.19). Dies ist aber kein logischer Widerspruch.

3.4 Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (AC)

Der Zusammenhang zwischen Wasserkapazität (WC), Porenvolumen (PV) und Luftkapazität (AC) ist in der Formel 24 verdeutlicht. Daraus ergibt sich, dass AC aus der Differenz von PV und WC errechnet wird. Daher ist zur Berechnung der Luftkapazität (AC) also zunächst noch die Bestimmung des Porenvolumens (PV) notwendig, nachdem die Daten der Wasserkapazität (WC) schon im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden.

Porenvolumen (PV)

Zwischen den Porenvolumina, die mit den vier Varianten der Q-Methode für die 13 Standardsubstrate ermittelt wurden, treten erwartungsgemäß nur geringe Unterschiede auf, da sich die Vorgehensweise bei der Bestimmung von PV zwischen den vier Varianten nicht unterscheidet. Alle Porenvolumina, die für die Standardsubstrate bestimmt wurden, bewegen sich im Bereich von 86,3 und 93,3 Vol. %.

Innerhalb einer Substratvariante treten dabei Spannweiten von 0,1 Vol. % (PH) bis hin zu maximal 1,4 Vol. % (EPr) zwischen den vier Varianten der Q-Methode auf. Diese Unterschiede erklären sich zum einen aus der Heterogenität der jeweiligen Substratvariante und zum anderen aus den Varianten der Q-Methode selbst, die mit ihren dB_E -Werten (Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung) in die Berechnung von PV eingehen. Besonders die Substrate mit Ton und weiteren Zuschlagstoffen (z.B. EPr, ET, FT und RK) fallen durch größere Spannweiten auf, während sich die meisten reinen Torfsubstrate durch kleinere Spannweiten auszeichnen (PH, SW1 und SW3). Die großen Spannweiten könnten durch einen Schwachpunkt des verwendeten Bestimmungsverfahrens, der Dichte der Festsubstanz (dF), erklärt werden, das besonders bei tonhaltigen Substraten zur Überschätzung des Anteils der organischen Substanz (Verlust von Kristallwasser aus dem Ton beim Verglühen mit 550° C) und damit zur Unterschätzung von dF und PV neigt. Abb. 3.67 zeigt exemplarisch die Porenvolumina von sieben der 13 Standardsubstrate.

In den Tabellen A6 – A9 im Anhang sind u.a. auch die Porenvolumina der übrigen Standardsubstrate aufgeführt. Tabelle 3.20 zeigt die Spannweiten von PV, die zwischen den vier Varianten der Q-Methode aufgetreten sind.

Innerhalb der 23 Mischsubstrate treten Unterschiede von 0,3 (GT40%, KF10% und RH10%) bis zu 2,9 Vol. % (granT30% und STf80%) zwischen den Varianten der Q-Methode auf. Dabei kann festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen den

vier Methodenvarianten häufig mit dem Anteil des Zuschlagstoffs zunehmen und bei tonhaltigen Substraten besonders hoch sind (Tabelle 3.20). Außerdem lässt sich noch ein Trend zur Verringerung des Porenvolumens (PV) mit steigendem Ton- (granT und GT), steigendem Rindenumus- (RH) und steigendem Schwarztorfgehalt (STf und STg) ablesen. Lediglich der Gehalt an Kokosfasern scheint das Porenvolumen nicht zu beeinflussen, wenn von der Variante Topffest abgesehen wird (siehe auch Abb. 3.68 und 3.69).

Tabelle 3.20: Spannweiten der gemessenen Porenvolumina (PV [Vol. %]) zwischen den vier Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den 36 untersuchten Substraten (Werte in Klammern = PV [Vol. %])

Substrat-variante	Spannweite von PV [Vol. %]	Variante mit höchstem PV	Variante mit niedrigstem PV
EP	0,7	VDLUFA (88,4)	VDLUFA+5 (87,7)
EPr	1,4	Topffest (87,7)	VDLUFA-5 (86,3)
ET	1,3	Topffest (88,8)	VDLUFA / VDLUFA-5 (87,5)
CF	0,8	Topffest (93,0)	VDLUFA+5 (92,2)
PH	0,1	VDLUFA-5 u. Topffest (90,4)	VDLUFA / VDLUFA+5 (90,3)
FT	1,1	Topffest (90,4)	VDLUFA (89,3)
RK	1,0	VDLUFA (88,3)	VDLUFA-5 (87,3)
ST	0,8	VDLUFA-5 (91,0)	VDLUFA+5 / Topffest (90,2)
SV	0,6	VDLUFA (91,2)	VDLUFA+5 / Topffest (90,6)
SW1	0,3	Topffest (92,5)	VDLUFA+5 / VDLUFA-5 (92,2)
SW3	0,4	VDLUFA-5 / Topffest (92,4)	VDLUFA (92,0)
T1	0,7	VDLUFA (92,2)	Topffest (91,5)
T2	0,5	VDLUFA (93,2)	Topffest (92,7)
granT5%	0,5	VDLUFA (91,5)	VDLUFA+5 (91,0)
granT10%	1,0	VDLUFA-5 (90,9)	Topffest (89,9)
granT20%	2,7	Topffest (85,9)	VDLUFA+5 (85,2)
granT30%	2,9	VDLUFA-5 (82,1)	VDLUFA (79,2)
GT30%	1,0	VDLUFA (91,2)	Topffest (90,2)
GT40%	0,3	VDLUFA (89,6)	VDLUFA-5 (89,3)
GT50%	1,5	VDLUFA (89,6)	VDLUFA+5 (88,1)
GT60%	0,6	VDLUFA+5 / VDLUFA-5 (88,8)	VDLUFA (88,2)
KF10%	0,3	VDLUFA / VDLUFA+5 (94,2)	Topffest (93,9)
KF15%	0,4	VDLUFA+5 (94,3)	Topffest (93,9)
KF20%	0,2	VDLUFA-5 (94,4)	VDLUFA, VDLUFA+5 / Topffest (94,2)
KF25%	1,6	VDLUFA-5 (94,3)	Topffest (92,7)
STf20%	0,5	VDLUFA (94,0)	Topffest (93,5)
STf40%	0,8	VDLUFA (93,3)	VDLUFA+5 (92,5)
STf60%	2,0	Topffest (93,2)	VDLUFA+5 (91,2)
STf80%	2,9	VDLUFA (92,3)	VDLUFA+5 (89,4)
STg20%	0,5	VDLUFA (93,4)	VDLUFA+5 / VDLUFA-5 (92,9)
STg40%	0,4	VDLUFA+5 (92,8)	Topffest (92,3)
STg60%	1,8	VDLUFA-5 (93,3)	VDLUFA / Topffest (91,5)

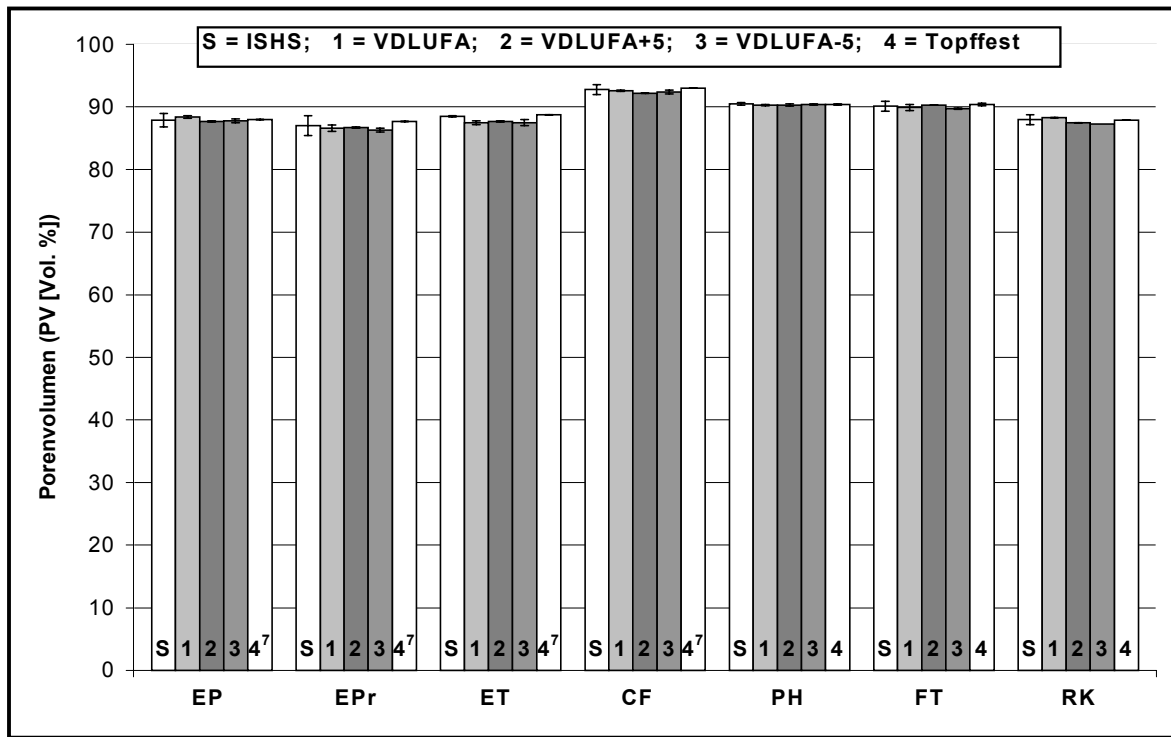


Abb. 3.67: Porenvolumen (PV [Vol. %]) von sieben Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden (⁷ = dB_E-Wert enthält einen Messfehler; Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

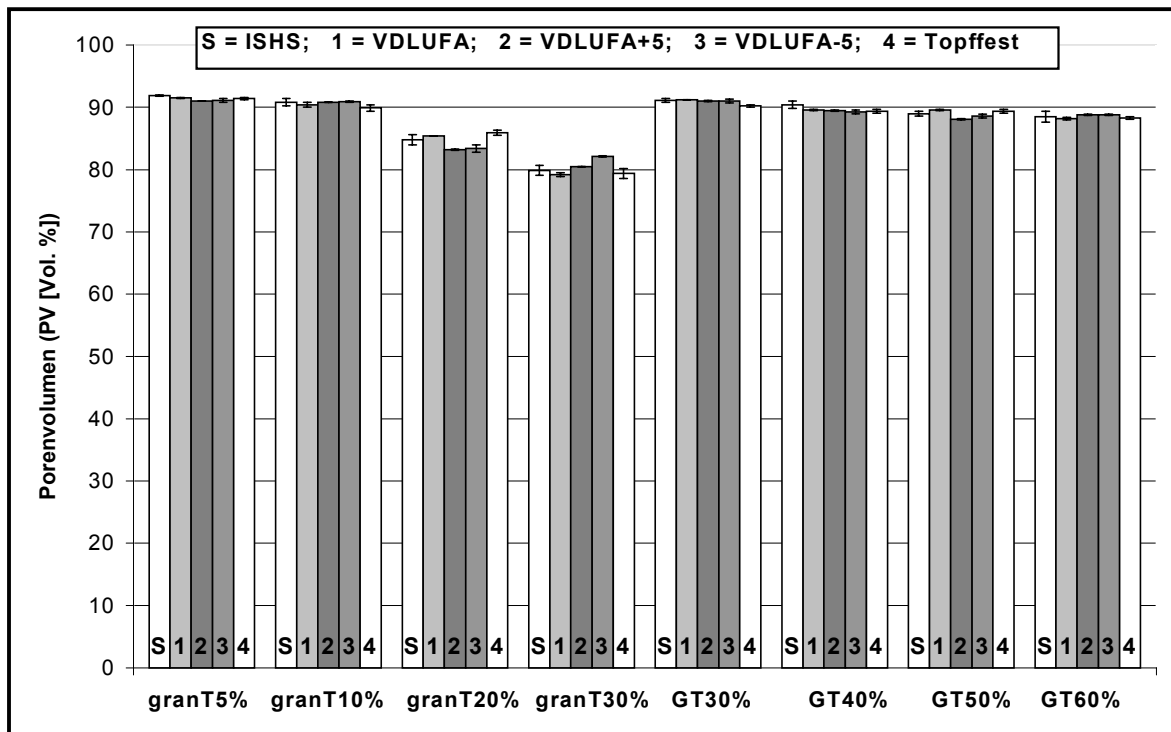


Abb. 3.68: Porenvolumen (PV [Vol. %]) von acht Mischsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

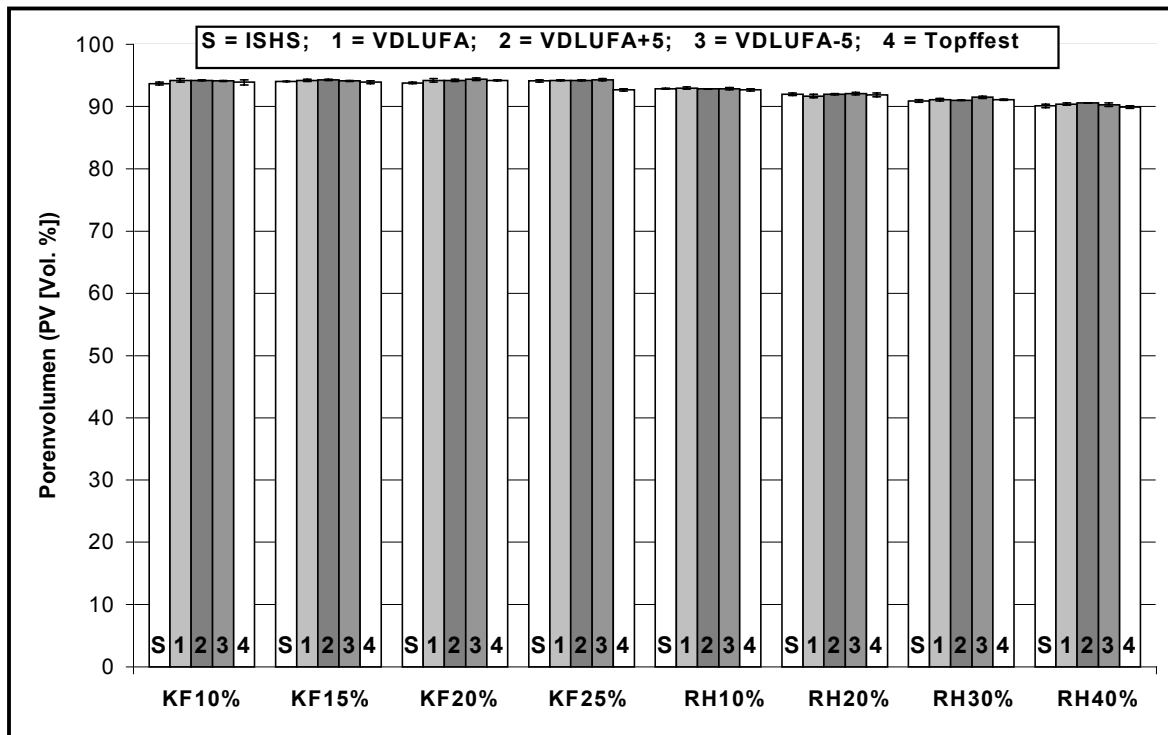


Abb. 3.69: Porenvolumen (PV [Vol. %]) von acht Mischsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Luftkapazität (AC)

Insbesondere die Luftkapazität (AC) eines Substrats ist eine wichtige Größe bei der Kultur von empfindlichen Pflanzen. Nach Angaben von GLINSKI und LIPIE (1990) sowie MOHR (1978; 1980) liegt die Luftkapazität, die im Boden für ein normales Pflanzenwachstum erforderlich ist, im Bereich von 5 - 10 Vol. %. HANDRECK und BLACK (1989) geben für die Luftkapazität von Kultursubstraten einen Bereich von 5 – 25 Vol. % (in Abhängigkeit von Pflanzenart und Kulturzustand) als notwendige Voraussetzung für zufriedenstellendes Wachstum an. Im Zusammenhang mit der Schnellmethode war die Klärung der Frage von Interesse, mit welcher Variante die meisten Minima für AC gemessen werden können, damit dieser gefundene Wert in der gärtnerischen Praxis möglichst nicht unterschritten wird und dem Substratproduzenten damit Sicherheit vor Reklamationen gibt, wenn sein Produkt mit dem Minimalwert für AC deklariert ist. Daneben sollte auch hier der Frage nachgegangen werden, welche der vier Varianten bezüglich der Luftkapazität (AC) die engste Beziehung zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode (CEN/TC 223) aufweist bzw. sich signifikant von AC-ISHS unterscheidet. Dazu wurden sowohl korrelationsanalytische als auch varianzanalytische Berechnungen durchgeführt, auf die zum Abschluß dieses Kapitels eingegangen wird.

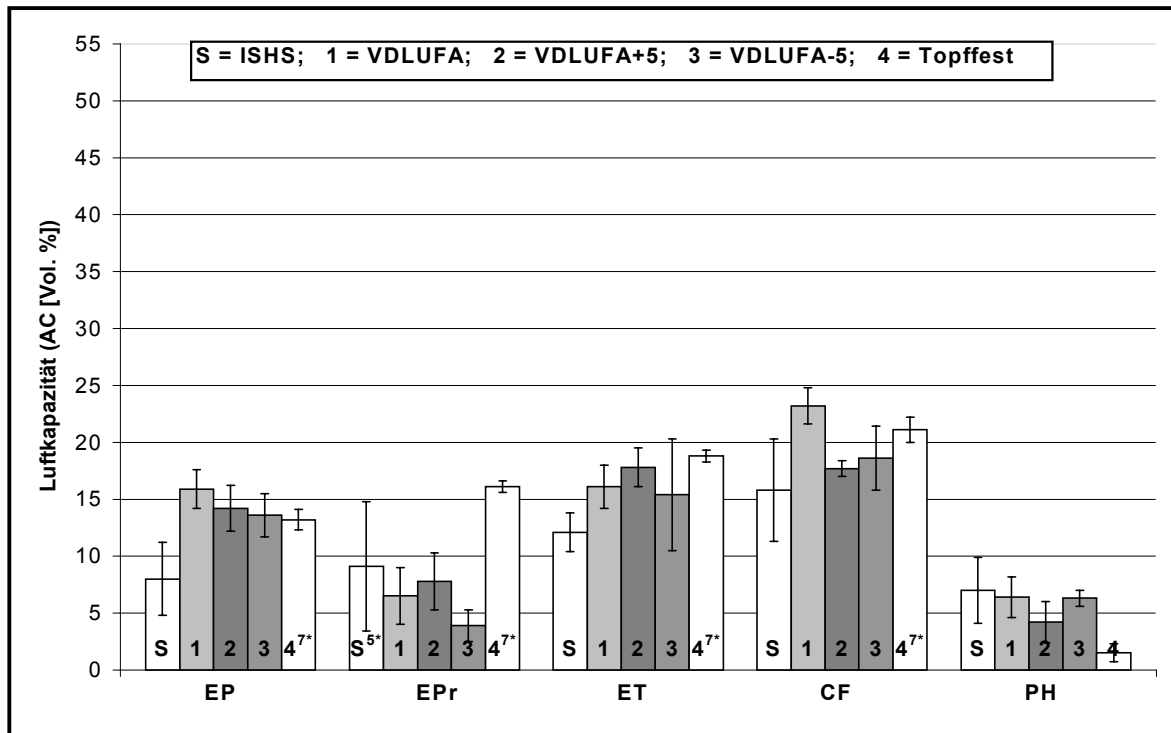


Abb. 3.70: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von fünf Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (⁷ = zugehöriger dB_E-Wert enthält Messfehler; * = Messfehler; Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Die mit den vier Varianten der Q-Methode unter den 36 Substratvarianten ermittelten Werte der Luftkapazität bewegen sich zwischen 1,5 Vol. % (PH; Topffest) und 49,7 Vol. % (granT10%; VDLUFA). Unter den Standardsubstraten konnten AC-Werte zwischen 1,5 (PH) und 33,7 Vol. % (RK) gemessen werden, und es treten Spannweiten von 2,7 (EP) bis 16,4 Vol. % (T1) zwischen den vier Varianten der Schnellmethode auf (siehe Abb. 3.70 und 3.71 sowie Tabelle 3.21).

Die meisten Minima bezüglich der Luftkapazität (AC) der Standardsubstrate werden mit der Variante Topffest gemessen (⁷ = 53,8 %), gefolgt von VDLUFA+5 und VDLUFA-5 mit jeweils drei Minima. Mit VDLUFA wird kein Minimum für AC erzeugt (Tabelle 3.21). Dafür konnten für VDLUFA 10 Höchstwerte der Luftkapazität registriert werden. Das heißt, dass bei fast 80 % der Standardsubstrate mit der Variante VDLUFA die höchsten und damit unsichersten Werte für AC ermittelt werden. Die übrigen drei AC-Maxima wurden mit Hilfe der Variante Topffest gemessen. VDLUFA+5 und VDLUFA-5 führten in keinem der 13 Fälle zu einem Maximum.

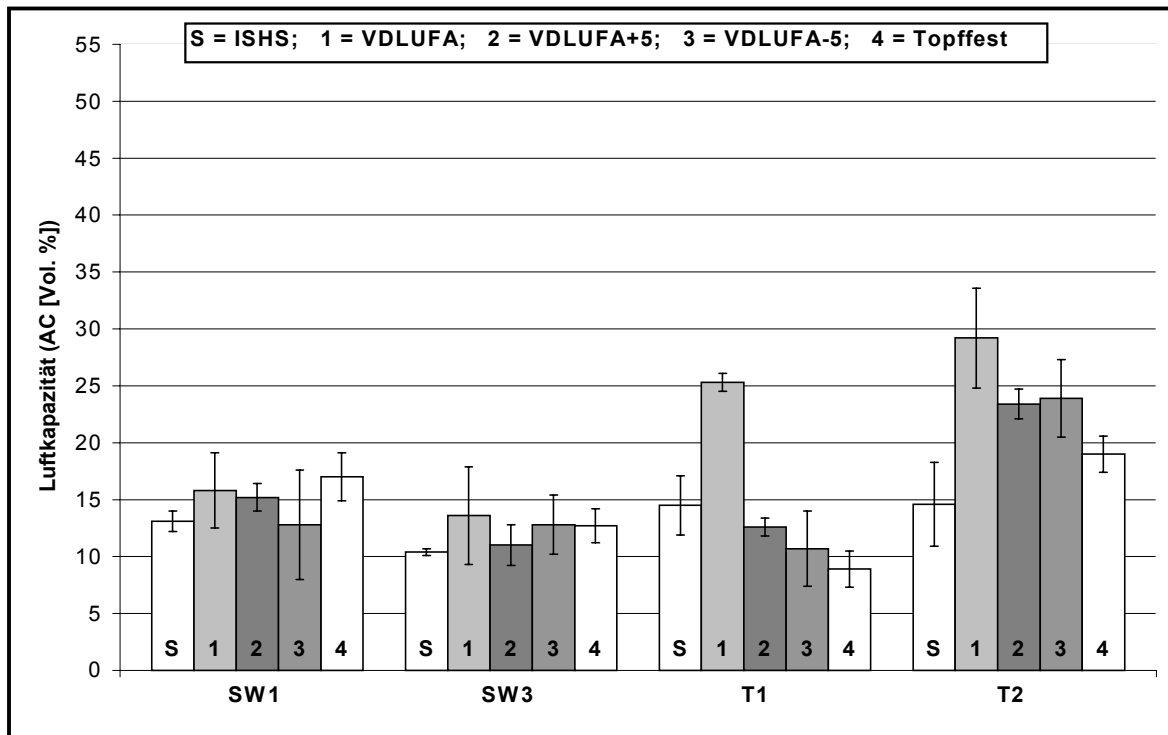


Abb. 3.71: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von fünf Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Tabelle 3.21: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5; VDLUFA-5, Topffest) (**fett** = minimale Werte von AC; **grau** unterlegt = maximale Werte für AC; **unterstrichen** = höchste Werte der Standardabweichung (s) = * Wert enthält Messfehler; n = 4)

Substrat	VDLUFA [Vol. %]	s	VDLUFA+5 [Vol. %]	s	VDLUFA-5 [Vol. %]	s	Topffest [Vol. %]	s
EP	15,9	1,7	14,2	<u>3,0</u>	13,6	1,9	13,2*	0,9
EPr	6,5	<u>2,5</u>	7,8	<u>2,5</u>	3,9	1,4	16,1*	0,5
ET	16,1	1,9	17,8	1,7	15,4	<u>4,9</u>	18,8*	0,5
CF	23,2	1,6	17,7	0,7	18,6	<u>2,8</u>	21,1*	1,1
PH	6,4	<u>1,8</u>	4,2	1,8	6,3	0,7	1,5	0,8
FT	27,4	<u>7,6</u>	24,0	1,9	21,8	1,0	19,1	2,2
RK	33,7	0,9	27,5*	0,5	27,6	1,0	27,8	<u>2,5</u>
ST	20,7	<u>7,4</u>	15,5	1,6	19,5	1,7	14,6	1,4
SV	16,3	1,5	11,2	1,4	15,1	<u>3,2</u>	10,2	1,2
SW1	15,8	3,3	15,2	1,2	12,8	<u>4,3</u>	17,0	2,1
SW3	13,6	<u>4,3</u>	11,0	1,8	12,8	2,6	12,7	1,5
T1	25,3	0,8	12,6	0,8	10,7	<u>3,3</u>	8,9	1,6
T2	29,2	<u>4,4</u>	23,4	1,3	23,9	3,4	19,0	1,6

Tabelle 3.22: Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur minimalen Luftkapazität (AC [Vol. %]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat (**1** = höchster dB_E -Wert, **2** = zweithöchster dB_E -Wert, **3** = zweitkleinster dB_E -Wert, **4** = kleinster dB_E -Wert)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den niedrigsten Wert für AC zeigte	niedrigster AC-Wert [Vol. %]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_E
EP	Topffest	13,2	3
EPr	VDLUFA-5	3,9	1
ET	VDLUFA-5	15,4	2
CF	VDLUFA+5	17,7	1
PH	Topffest	1,5	3
FT	Topffest	19,1	4
RK	VDLUFA+5	27,5	2
ST	Topffest	14,6	2
SV	Topffest	10,2	2
SW1	VDLUFA-5	12,8	1
SW3	VDLUFA+5	11,0	2
T1	Topffest	8,9	1
T2	Topffest	19,0	1

Erwartungsgemäß führen genau die Varianten der Q-Methode zur minimalen Luftkapazität (AC), die schon bezüglich der Wasserkapazität (WC) zum Höchstwert geführt haben. Eine Ausnahme bildet in diesem Zusammenhang lediglich das Standardsubstrat RK, bei dem nicht mit der Variante Topffest die niedrigste Luftkapazität gemessen wurde, sondern mit VDLUFA+5 (Tabelle 3.22).

Unter den 23 Mischsubstraten wurde für die granT-Substrate die höchste Luftkapazität ermittelt. Mit AC-Werten zwischen 21,9 und 49,7 Vol. % konnte für die vier Substrate mit granuliertem Ton sogar die höchste Luftkapazität aller untersuchten Substrate gemessen werden (Abb. 3.72). Die Tatsache, dass bei granT10% und granT20% mit den Varianten VDLUFA, VDLUFA+5 und VDLUFA-5 sogar AC-Werte gemessen worden sind, die größer sind, als die zugehörigen Werte der Wasserkapazität, sollte an dieser Stelle auch erwähnt werden (vergleiche Tabelle 3.13 und 3.23).

Doch nicht nur die absolute Höhe der Luftkapazität ist bei den granT-Substraten extrem, sondern auch die Spannweiten der AC-Werte, die zwischen den einzelnen Varianten der Q-Methode auftreten und zwischen 11,0 Vol. % bei granT20% und 22,2 Vol. % bei granT5% liegen.

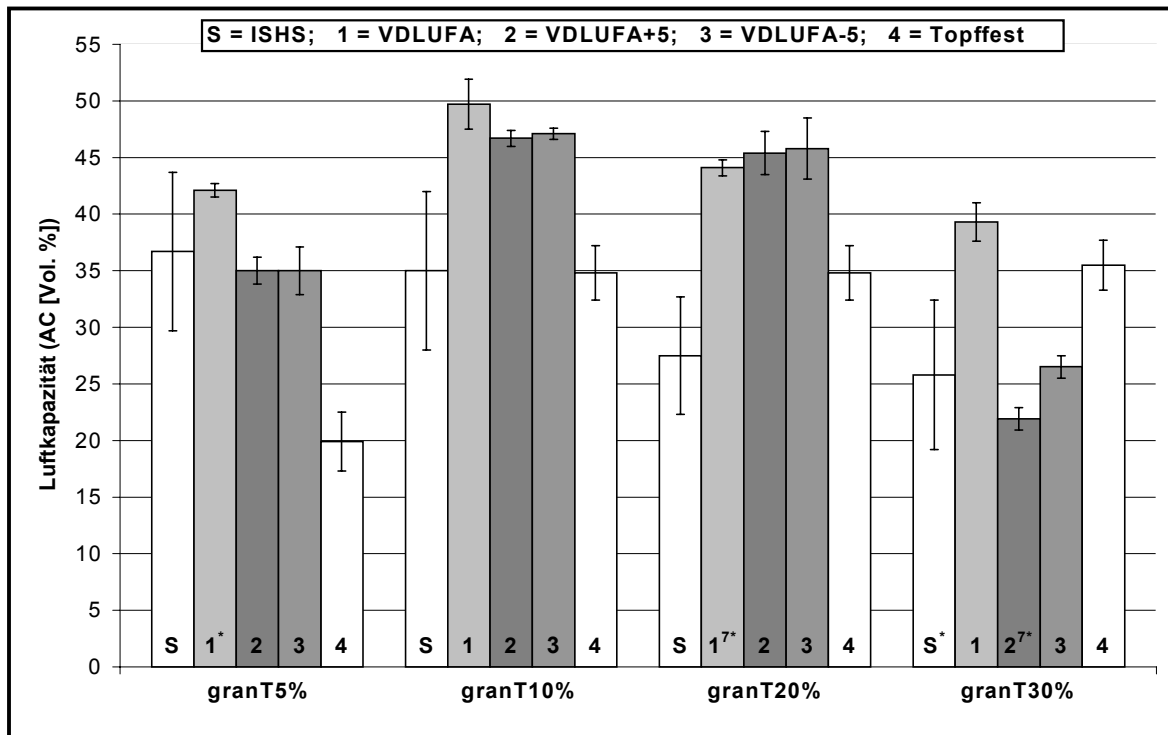


Abb. 3.72: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (⁷ = zugehöriger dB_E-Wert enthält Messfehler; * = Messfehler; Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Eine Erklärung für das extreme Verhalten der granT-Substrate bezüglich der Luft- und Wasserkapazität (WC) ist in dem hohen Benetzungswiderstand der Mischungen zu suchen, die trotz Befeuchtung in der Mischmaschine zum Messtermin wieder sehr trocken waren. Dies trifft besonders für die Substrate mit dem granulierten Ton zu, der selbst nur eine geringe Eigenfeuchte aufweist.

Außer bei den Mischsubstraten mit granuliertem Ton wurden auch bei den Mischungsvarianten mit Grubenton (GT) und mit Kokosfaser (KF) Werte für AC gemessen, die zum Teil deutlich über 30 Vol. % liegen (Abb. 3.73 und 3.74; Tabelle 3.23). Die bei GT und KF ermittelten Spannweiten zwischen den vier Varianten der Q-Methode sind jedoch wesentlich kleiner als es bei granT der Fall war und nehmen bei KF15% mit 1,5 Vol. % sogar den zweitkleinsten Wert unter allen untersuchten Substraten ein. Lediglich bei RH 20% war die Spannweite bei AC mit 1,0 Vol. % noch kleiner.

Aber auch bei den übrigen Mischsubstraten konnten nur kleine Unterschiede zwischen den AC-Werten der vier Methodenvarianten ermittelt werden. Die registrierten Spannweiten bewegen sich zwischen 1,6 und 9,1 Vol. % (siehe Tabelle 3.23).

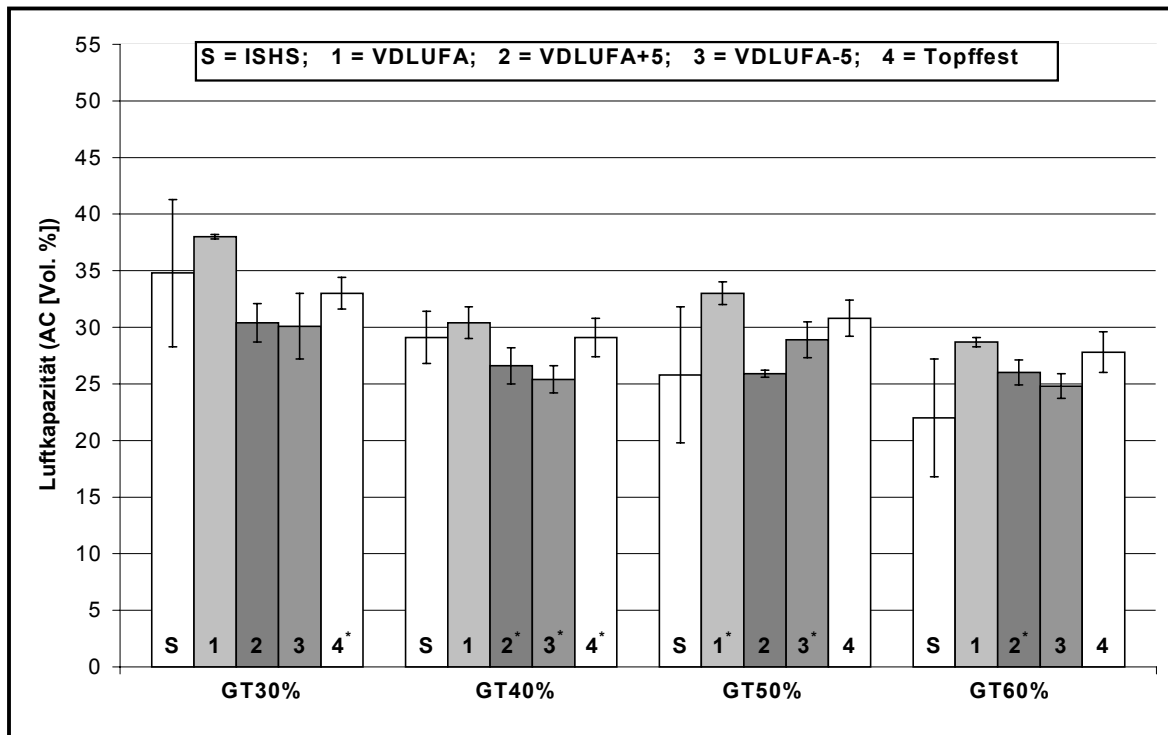


Abb. 3.73: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (* = Messfehler; Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

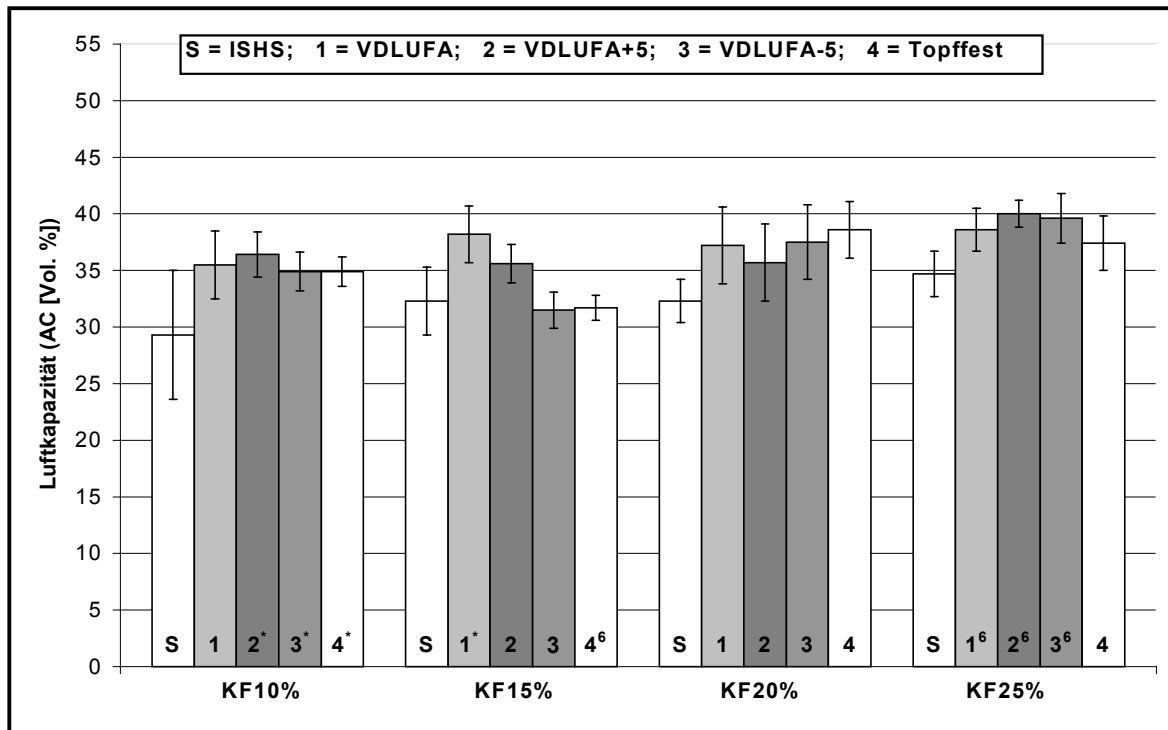


Abb. 3.74: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate KF10%, KF15%, KF20% und KF25% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde (⁶ = zugehöriger dB_A-Wert enthält Messfehler; * = Messfehler; Fehlerindikator = Standardabweichung (s); n = 4)

Tabelle 3.23: Luftkapazität (AC [Vol. %]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) (**fett** = minimale Werte von AC; **grau** unterlegt = maximale Werte von AC; **unterstrichen** = höchste Werte der Standardabweichung (s); * = Wert enthält Messfehler; n = 4; ⁸ = n = 2)

Substrat	VDLUFA [Vol. %]	S	VDLUFA+5 [Vol. %]	s	VDLUFA-5 [Vol. %]	s	Topffest [Vol. %]	s
granT5%	42,1*	0,6	35,0	1,2	35,0	2,1	19,9	<u>2,6</u>
granT10%	<u>49,7</u>	2,2	46,7	0,7	47,1	0,5	34,8	<u>2,4</u>
granT20%	44,1*	0,7	45,4	1,9	<u>45,8</u>	<u>2,7</u>	34,8	2,4
granT30%	<u>39,3</u>	1,7	21,9	1,0	26,5	1,0	35,5	<u>2,2</u>
GT30%	<u>38,0</u>	0,2	30,4	1,7	30,1	<u>2,9</u>	33,0	1,4
GT40%	<u>30,4</u>	1,4	26,6*	1,6	25,4*	1,2	29,1*	<u>1,7</u>
GT50%	<u>33,0*</u>	1,0	25,9	0,3	28,9*	<u>1,6</u>	30,8	<u>1,6</u>
GT60%	<u>28,7</u>	0,4	26,0*	1,1	24,8	1,1	27,8	<u>1,8</u>
KF10%	35,5	<u>3,0</u>	<u>36,4*</u>	2,0	34,9*	1,7	34,9*	1,3
KF15%	<u>38,2*</u>	<u>2,5</u>	35,6	1,7	31,5	1,6	31,7	1,1
KF20%	37,2	<u>3,4</u>	35,7	<u>3,4</u>	37,5	3,3	<u>38,6</u>	2,5
KF25%	38,6	1,9	<u>40,0</u>	1,2	39,6	2,2	37,4	<u>2,4</u>
RH10%	<u>22,4</u>	<u>3,7</u>	19,1	1,1	19,2	2,9	16,2	3,3
RH20%	<u>17,4</u>	2,2	16,5	1,6	16,4	1,7	16,7	<u>2,8</u>
RH30%	14,2	<u>1,9</u>	12,3*	1,4	<u>16,3*</u>	1,2	13,6	1,7
RH40%	12,8	<u>2,4</u>	<u>13,6*</u>	1,0	9,4*	2,0	9,3	1,5
STf20%	<u>30,5</u>	1,2	26,0	1,7	24,8	1,3	24,9	<u>2,5</u>
STf40%	<u>17,3</u>	0,7	14,1	<u>5,3</u>	16,4	1,7	14,6	1,6
STf60%	5,0*	1,1	6,2*	1,4	<u>10,1*</u>	<u>2,2</u>	8,0	0,7
STf80%	8,6	1,0	8,2	<u>2,8</u>	<u>9,4*⁸</u>	0,8	3,9	1,6
STg20%	<u>31,1</u>	1,6	22,5	3,3	22,0	<u>4,2</u>	22,3	1,3
STg40%	<u>15,4</u>	2,6	14,4	1,4	14,0	<u>2,8</u>	13,8	1,5
STg60%	7,7	1,3	7,9*	1,6	<u>10,3*</u>	1,3	9,4	<u>2,7</u>

Weitere Daten zur Luftkapazität (AC) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode können aus den Tabellen A6 – A9 im Anhang entnommen werden. In Tabelle 3.23 sind die Mittelwerte der Luftkapazität der 23 Mischsubstrate nochmals zusammengestellt worden. Es wird ersichtlich, dass mit Hilfe der Varianten VDLUFA-5 und Topffest bei jeweils acht Mischsubstraten ein minimaler AC-Wert gemessen werden konnte. Damit ist die Variante Topffest nicht nur bei den Standardsubstraten als positiv hervorzuheben, sondern auch bei den Mischsubstraten. Mit den Varianten VDLUFA+5 (5) und VDLUFA (2) werden die übrigen Minimalwerte für die Luftkapazität ermittelt. Umgekehrt wurden für die Variante VDLUFA bei 14 Mischsubstraten unerwünschte Höchstwerte für AC

registriert, für die Varianten VDLUFA-5 mussten acht Höchstwerte aufgenommen werden, für VDLUFA+5 (3) und Topffest (1) die übrigen AC-Maxima.

Tabelle 3.24: Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur minimalen Luftkapazität (AC [Vol. %]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat (1 = höchster dB_E -Wert, 2 = zweithöchster dB_E -Wert, 3 = zweitkleinster dB_E -Wert, 4 = kleinster dB_E -Wert)

Substrat	Variante der Q-Methode, die den niedrigsten Wert für AC zeigte	Niedrigster AC-Wert [Vol. %]	Rangplatz der Methode bezüglich dB_E
granT5%	Topffest	19,9	3
granT10%	Topffest	34,8	1
granT20%	Topffest	34,8	4
granT30%	VDLUFA+5	21,9	3
GT30%	VDLUFA-5	30,1	3
GT40%	VDLUFA-5	25,4	1
GT50%	VDLUFA+5	25,9	1
GT60%	VDLUFA-5	24,8	4
KF10%	VDLUFA-5	34,9	2
KF15%	VDLUFA-5	31,5	2
KF20%	VDLUFA+5	35,7	2
KF25%	Topffest	37,4	1
RH10%	Topffest	16,2	1
RH20%	VDLUFA-5	16,4	3
RH30%	VDLUFA+5	12,3	1
RH40%	Topffest	9,3	1
STf20%	VDLUFA-5	24,8	3
STf40%	VDLUFA+5	14,1	3
STf60%	VDLUFA	5,0	3
STf80%	Topffest	3,9	3
STg20%	VDLUFA-5	22,0	1
STg40%	Topffest	13,8	2
STg60%	VDLUFA	7,7	1

Bei 56,5 % der Mischsubstrate (13) führte die Variante der Q-Methode zu den kleinsten, also für den Produzenten sichersten Werten für die Luftkapazität, bei der zuvor auch das höchste oder zweithöchste Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) ermittelt wurde. In 10 Fällen (43,5 %) war es dagegen mit den Varianten möglich, ein AC-Minimum zu messen, bei denen zuvor der zweitkleinste (8 Fälle) bzw. kleinste (2 Fälle) dB_E -Wert gemessen wurde (Tabelle 3.24).

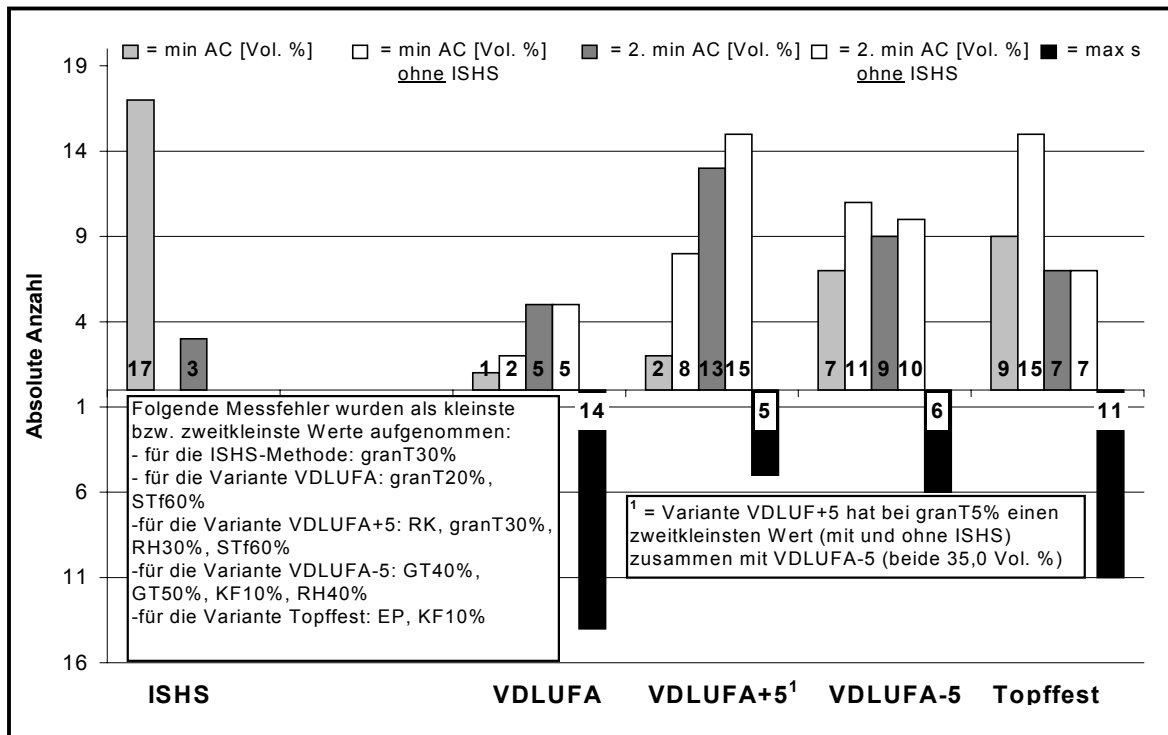


Abb. 3.75: Anzahl der kleinsten (= min) und zweitkleinsten (= 2. min) Werte für die Luftkapazität AC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichung (= max s) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Luftkapazität (AC [Vol. %]) der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben (bei VDLUFA+5 und VDLUFA-5 wurde der AC-Wert von granT5% bei beiden Varianten als zweitkleinsten Wert mitgezählt (siehe auch Tabelle 3.23))

Die Beantwortung der Frage, welche Variante der Q-Methode die meisten Maxima für AC ermittelt, ist eindeutig. Mit 24 Höchstwerten (66,6 %) ist die Variante VDLUFA die Variante, die die höchsten und damit für den Substratproduzenten unsichersten Werte für AC liefert. Die Varianten VDLUFA-5 (5), Topffest (4) und VDLUFA+5 (3) erzeugen dagegen zusammen lediglich 33,4 % der Höchstwerte (Abb. 3.76). Umgekehrt werden mit den Varianten Topffest 15 (41,6 %), VDLUFA-5 11 (30,6 %) und VDLUFA+5 acht (22,2 %) minimale AC-Werte gemessen (Abb. 3.75). Solche Minima müssen als sichere Werte für AC angesehen werden, da sie beim Anwender (Gärtner) der Substrate kaum unterschritten werden und somit den Substrathersteller, der sein Produkt mit diesen niedrigen und nicht unterschreitbaren Werten für die Luftkapazität (AC) deklariert hat, vor Reklamationen schützen. Auch in diesem Zusammenhang schneidet die Variante VDLUFA mit lediglich zwei Minimalwerten am schlechtesten ab, genau wie schon zuvor bezüglich der Wasserkapazität (WC), bei der mit VDLUFA auch nur zwei Höchstwerte gemessen werden konnten (Abb. 3.75, vergleiche Abb. 3.61).

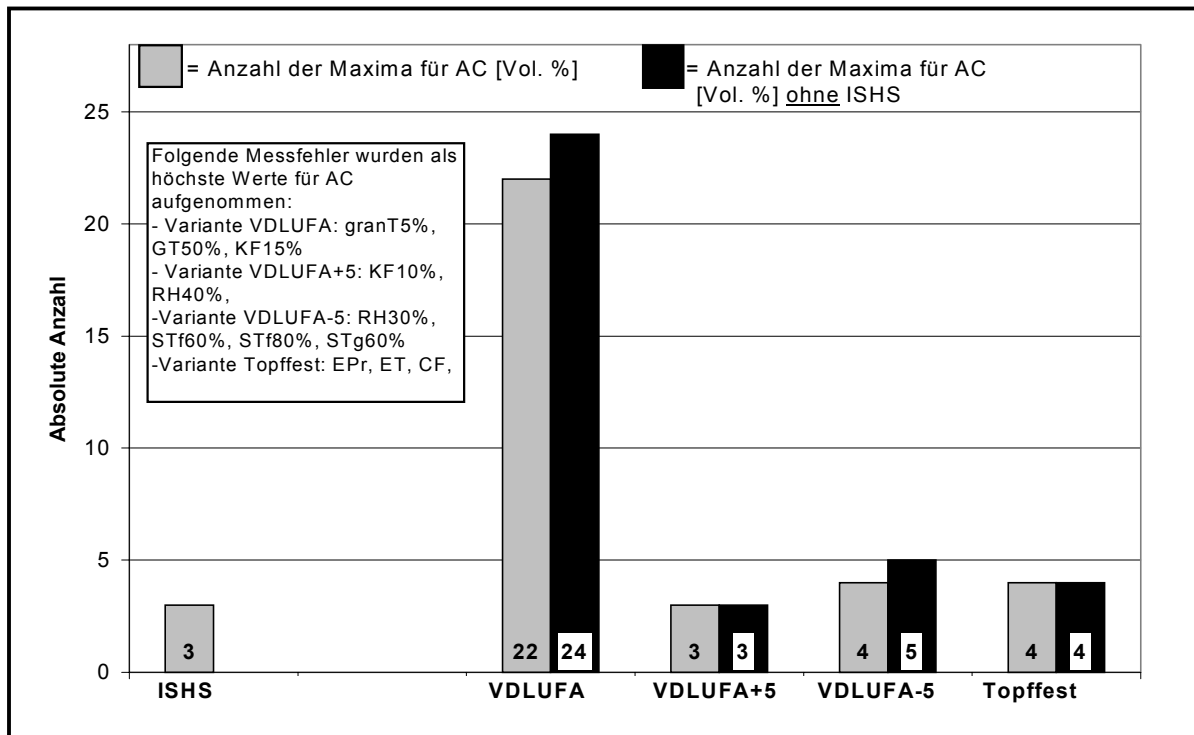


Abb. 3.76: Anzahl der höchsten Werte der Luftkapazität AC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Luftkapazität (AC [Vol. %]) der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben

Allerdings konnte für die Variante VDLUFA, die sich bei 14 Substraten durch die größte Standardabweichung (s) auszeichnet, bezüglich der Luftkapazität (AC) die engste Beziehung zur europäischen Normmethode (ISHS-Methode) nachgewiesen werden, genau wie auch schon im Zusammenhang mit der Wasserkapazität (WC) festgestellt wurde. Mit $r = 0,9284$ konnte ausschließlich für AC-VDLUFA ein Korrelationskoeffizient von über 0,9 zu AC-ISHS errechnet werden (Abb. 3.77 und Tabelle 3.25). Dieses Ergebnis ist deswegen überraschend, da AC-ISHS in 17 Fällen minimale (VDLUFA in nur einem Fall) und nur in 3 Fällen maximale Werte (VDLUFA in 22 Fällen; siehe auch Abb. 3.75 und 3.76) liefert. Für fünf andere Substratgruppen konnten noch engere Beziehungen zwischen AC-VDLUFA und AC-ISHS errechnet werden (Tabelle 3.25). Die Gründe für die zusätzliche Berechnung einer Korrelationsanalyse für acht verschiedene Substratgruppen sollen hier nicht noch einmal erläutert werden, da schon im Zusammenhang mit der Wasserkapazität darauf eingegangen wurde (siehe S. 126).

Mit $r = 0,8879$ liegt der Koeffizient zwischen AC-VDLUFA+5 und AC-ISHS deutlich unter 0,9. Für die 15 tonhaltigen Substrate konnte mit $r = 0,9326$ noch ein relativ hoher Korrelationskoeffizient (r) errechnet werden (Tabelle 3.26).

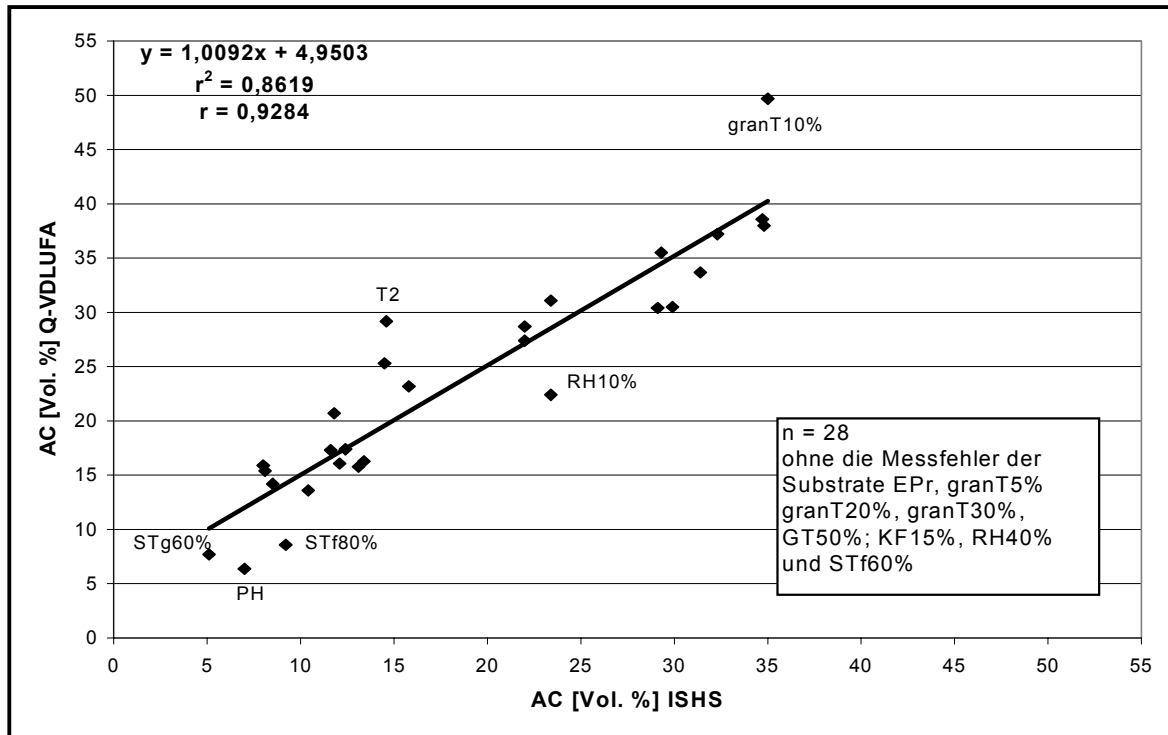


Abb. 3.77: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 28 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.25: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler (n = 28) (siehe auch Abb. 3.77) (d.h. ohne: EPr, granT5%, granT20%, granT30%, GT50%, KF15%; RH40%, STf60%)	0,9284	0,8619	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT (n = 27) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9299	0,8648	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler (n = 12) (d.h. ohne: EPr)	0,8331	0,6939	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler (n = 16) (d.h. ohne: granT5%; granT20%, granT30%, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9498	0,9022	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT (n = 15) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT50%, KF15%, RH40%, STf60%)	0,9654	0,9320	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler (n = 18) (d.h. ohne: KF15%, RH40%, STf60%)	0,9187	0,8440	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler (n = 10) (d.h. ohne: EPr, granT5%, granT20%, granT30%, GT50%)	0,9309	0,8666	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT (n = 9) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT50%)	0,9694	0,9398	s

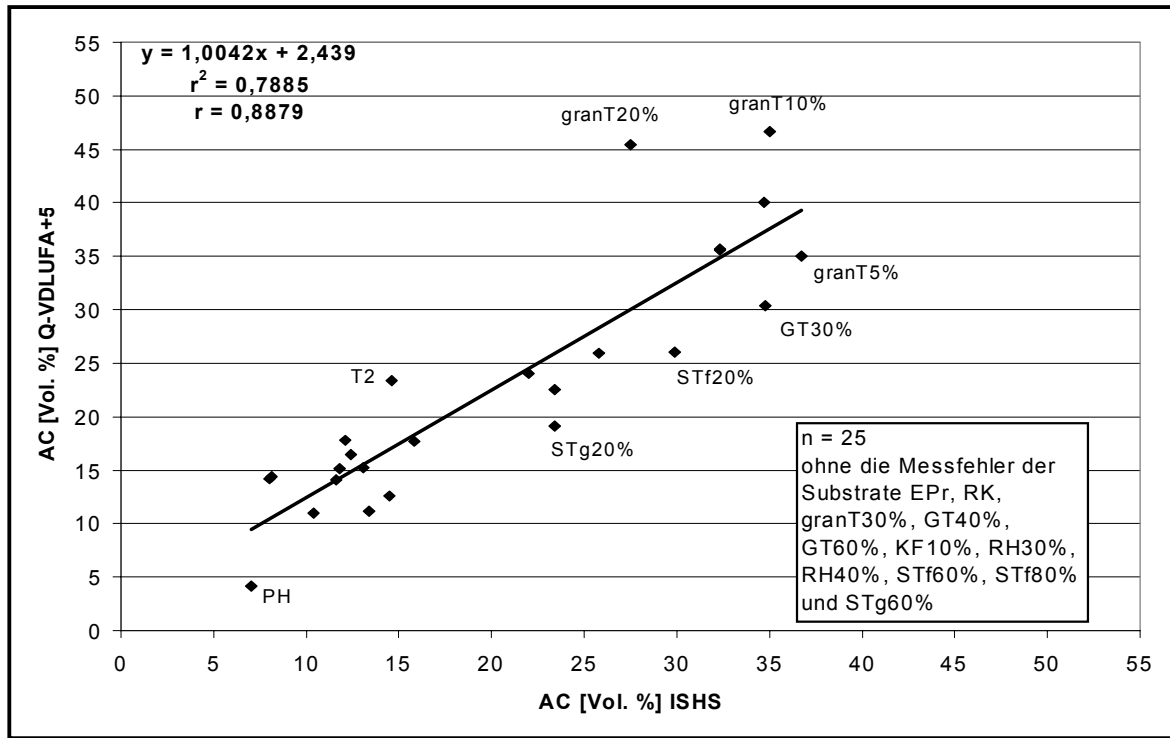


Abb. 3.78: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA+5) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 25 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.26: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA+5 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$) ; s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 25$) (siehe auch Abb. 3.78) (d.h. ohne: EPr, RK, granT30%, GT40%, GT60%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8879	0,7885	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 22$) (d.h. ohne: EP, RK, <u>alle</u> granT, GT40%, GT60%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,9166	0,8401	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, RK)	0,7577	0,5741	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 14$) (d.h. ohne: granT30%, GT40%, GT60%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8214	0,6746	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 11$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT40%, GT60%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,9146	0,8365	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 15$) (d.h. ohne: KF10%, RH40%, STf60%, STg60%)	0,9258	0,8572	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 10$) (d.h. ohne: EPr, RK, granT30%, GT40%, GT60%)	0,8425	0,7097	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 7$) (d.h. ohne: EPr, RK, <u>alle</u> granT, GT40%, GT60%)	0,9326	0,8697	s

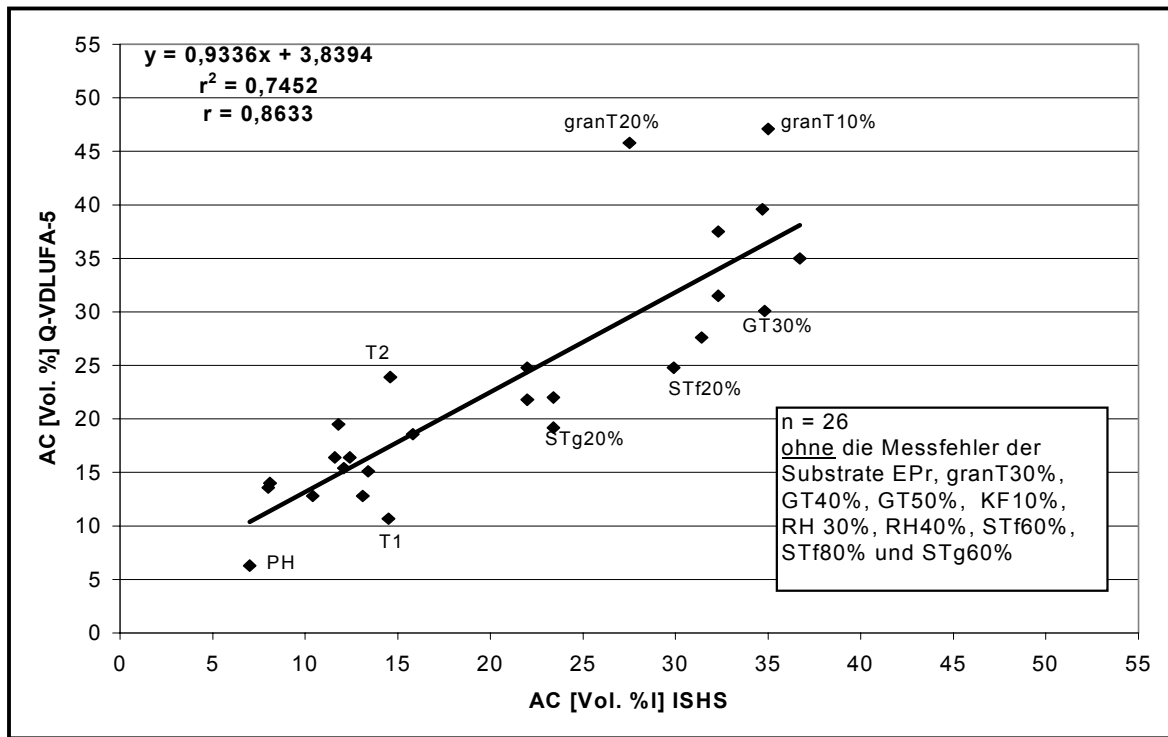


Abb. 3.79: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA-5) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 26 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.27: Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA-5 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 26$) (siehe auch Abb. 3.79) (d.h. ohne: EPr, granT30%, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8633	0,7452	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 23$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8971	0,8049	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 12$) (d.h. ohne: EPr)	0,7897	0,6237	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 14$) (d.h. ohne: granT30%, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,7998	0,6397	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 11$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%, KF10%; RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,8455	0,7146	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 15$) (d.h. ohne: KF10%, RH30%, RH40%, STf60%, STf80%, STg60%)	0,9028	0,8151	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 11$) (d.h. ohne: EPr, granT30%, GT40%, GT50%)	0,8123	0,6598	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 8$) (d.h. ohne: EPr, <u>alle</u> granT, GT40%, GT50%)	0,9567	0,9153	s

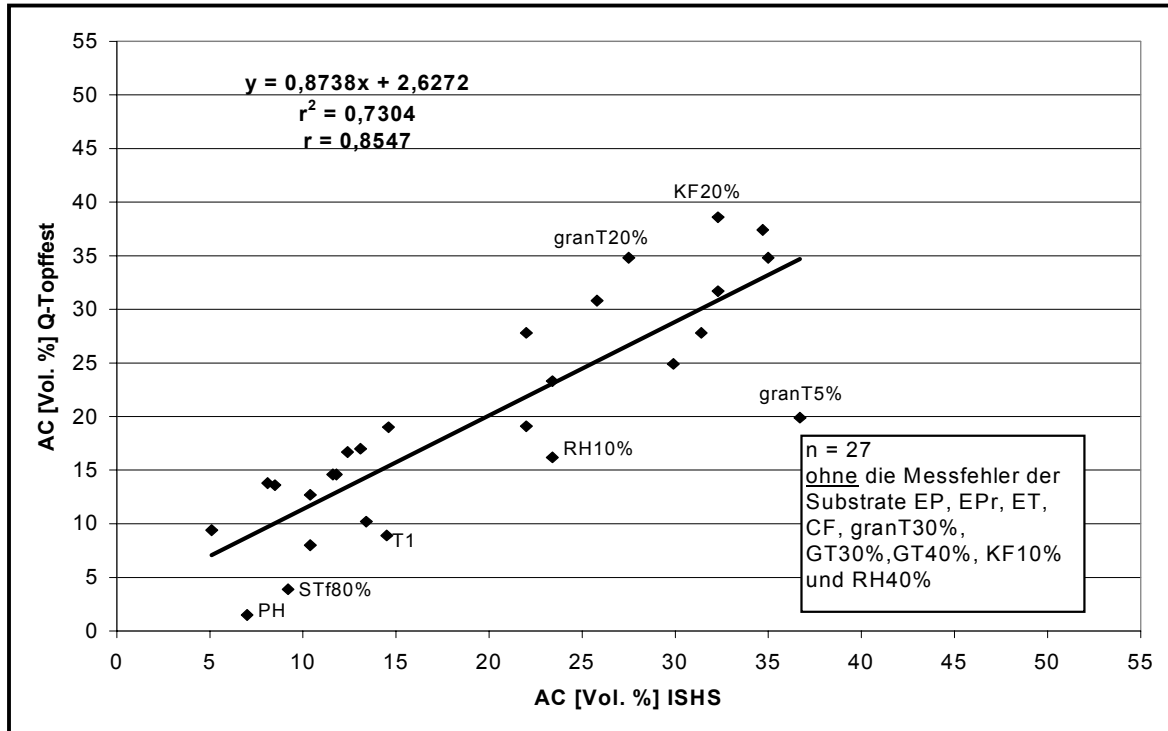


Abb. 3.80: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante Topffest) (AC [Vol. %] Q-Topffest) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 27 der 36 untersuchten Substrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 3.28: Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante Topffest und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen (t-Test = Ergebnis der Prüfung des Korrelationskoeffizienten (r) anhand der t-Verteilung nach STUDENT ($\alpha = 0,05$); s = signifikant; n.s. = nicht signifikant)

Substratgruppe	r	r^2	t-Test
36 Substrate ohne Messfehler ($n = 27$) (siehe auch Abb. 3.80) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF, granT30%, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8547	0,7304	s
36 Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 24$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF, <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8968	0,8042	s
13 Standardsubstrate ohne Messfehler ($n = 9$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, CF)	0,8446	0,7134	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler ($n = 18$) (d.h. ohne: granT30%, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,8387	0,7034	s
23 Mischsubstrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 15$) (d.h. ohne: <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%, KF10%; RH40%)	0,9086	0,8255	s
21 tonfreie Substrate ohne Messfehler ($n = 18$) (d.h. ohne: CF, KF10%, RH40%)	0,8998	0,8097	s
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler ($n = 9$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, granT30%, GT30%, GT40%)	0,6253	0,3909	n.s.
15 tonhaltige Substrate ohne Messfehler u. <u>alle</u> granT ($n = 6$) (d.h. ohne: EP, EPr, ET, <u>alle</u> granT, GT30%, GT40%)	0,8520	0,7259	s

Die Varianten VDLUFA-5 ($r = 0,8633$) und Topffest ($r = 0,8547$) weisen die kleinsten Korrelationskoeffizienten zu AC-ISHS auf. Daneben konnte bei der Variante Topffest für die Gruppe der 15 tonhaltigen Substrate ohne Messfehler lediglich eine nicht signifikante Korrelation zu AC-ISHS errechnet werden (Abb. 3.79 und 3.80; Tabelle 3.27 und 3.28). Alle übrigen Korrelationen zwischen der Luftkapazität (AC), gemessen mit den vier Varianten der Q-Methode und der Luftkapazität, die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt wurde, sind dagegen signifikant.

Tabelle 3.29: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie der ISHS-Methode (CEN/TC 223) und den damit ermittelten Werten für die Luftkapazität (AC) für fünf verschiedene Substratgruppen, jeweils ohne Messfehler (**1** = 13 Standardsubstrate; **2** = 23 Mischsubstrate; **3** = 15 tonhaltige Substrate; **4** = 21 tonfreie Substrate; **5** = alle 36 Substrate)

(Angegeben sind jeweils die adjustierten p-Werte (= p_{adj}). Die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$. Ein **signifikanter Unterschied liegt vor**, wenn $p_{adj} < \alpha$ ist. Die Adjustierung der p-Werte erfolgte nach TUKEY-KRAMER; Werte für p_{adj} , die signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Methoden anzeigen, sind **grau** unterlegt)

Variante der Methode	AC- VDLUFA (ohne granT5%, granT20%, GT50%, KF15%, STf60%)	AC- VDLUFA+5 (ohne RK, granT5%, granT30%, GT40%, GT60%, KF10%, RH30, RH40%, STf60%, STf80%)	AC- VDLUFA-5 (ohne GT40%, GT50%, KF10%, RH30%, STf60%, STg60%)	AC- Topffest (ohne EP, EPr, ET, CF, GT30%, GT40%, KF10%)	AC- ISHS (ohne EPr, granT30%, RH40%)
AC- VDLUFA (ohne granT5%, granT20%, GT50%, KF15%, STf60%)	—	1 = 0,0161 2 = 0,0906 3 = 0,0386 4 = 0,1325 5 = 0,0453	1 = 0,0182 2 = 0,1363 3 = 0,0604 4 = 0,1558 5 = 0,0145	1 = 0,0119 2 = 0,0192 3 = 0,0097 4 = 0,0503 5 = 0,0034	1 = 0,0010 2 = 0,0251 3 = 0,0023 4 = 0,0748 5 = 0,0048
AC- VDLUFA+5 (ohne RK, granT5%, granT30%, GT40%, GT60%, KF10%, RH30, RH40%, STf60%, STf80%)	1 = 0,0161 2 = 0,0906 3 = 0,0386 4 = 0,1325 5 = 0,0453	—	1 = 0,9913 2 = 0,8049 3 = 0,8683 4 = 0,8923 5 = 0,9168	1 = 0,9135 2 = 0,5353 3 = 0,7158 4 = 0,6419 5 = 0,2611	1 = 0,2635 2 = 0,5137 3 = 0,2967 4 = 0,6739 5 = 0,3411
AC- VDLUFA-5 (ohne GT40%, GT50%, KF10%, RH30%, STf60%, STg60%)	1 = 0,0182 2 = 0,1363 3 = 0,0604 4 = 0,1558 5 = 0,0145	1 = 0,9913 2 = 0,8049 3 = 0,8683 4 = 0,8923 5 = 0,9168	—	1 = 0,6673 2 = 0,6628 3 = 0,5761 4 = 0,4404 5 = 0,2178	1 = 0,2829 2 = 0,3682 3 = 0,2347 4 = 0,5796 5 = 0,3067
AC- Topffest (ohne EP, EPr, ET, CF, GT30%, GT40%, KF10%)	1 = 0,0119 2 = 0,0192 3 = 0,0097 4 = 0,0503 5 = 0,0034	1 = 0,9135 2 = 0,5353 3 = 0,7158 4 = 0,6419 5 = 0,2611	1 = 0,9244 2 = 0,3728 3 = 0,5910 4 = 0,5382 5 = 0,1531	—	1 = 0,3058 2 = 0,9286 3 = 0,4285 4 = 0,9995 5 = 0,7484
AC- ISHS (ohne EPr, granT30%, RH40%)	1 = 0,0010 2 = 0,0251 3 = 0,0023 4 = 0,0748 5 = 0,0048	1 = 0,2635 2 = 0,5137 3 = 0,2967 4 = 0,6739 5 = 0,3411	1 = 0,2829 2 = 0,3682 3 = 0,2347 4 = 0,5796 5 = 0,3067	1 = 0,2711 2 = 0,5138 3 = 0,4243 4 = 0,4462 5 = 0,8346	—

Im Vergleich zu den Korrelationen, die zwischen der Wasserkapazität (WC) und der Containerkapazität (CC) errechnet werden konnten, sind die Korrelationskoeffizienten, die bezüglich der Luftkapazität ermittelt wurden, mit Ausnahme von VDLUFA bei allen Varianten kleiner.

Die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) sind in Tabelle 3.29 zusammengefasst. Genau wie bei der Wasserkapazität (WC) unterscheidet sich die Luftkapazität (AC), die mit Hilfe der Variante VDLUFA ermittelt wurde, signifikant von allen anderen Varianten der Q-Methode. Dies gilt über alle 36 untersuchten Substrate (Gruppe 5 in Tabelle 3.29) und für die 13 Standardsubstrate (Gruppe 1). Daneben weisen einige Varianten bei weiteren Substratgruppen (Gruppen 2, 3 und 4) signifikante Unterschiede zu AC-VDLUFA auf (siehe Tabelle 3.29). Obwohl die Korrelationsanalyse die engste Beziehung zwischen AC-VDLUFA und AC-ISHS unter den untersuchten Varianten der Q-Methode angezeigt hat, treten nur zwischen diesen Werten signifikante Unterschiede auf, wenn von der Gruppe der 21 tonfreien Substrate (Gruppe 4 in Tabelle 3.29) abgesehen wird. Die Unterschiede der Luftkapazität aller anderen Varianten der Q-Methode zur Luftkapazität, ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223), sind dagegen nicht signifikant.

Auch im Zusammenhang mit der Luftkapazität (AC) kann also geschlossen werden, dass die AC-Werte der Variante VDLUFA zwar größer sind als die AC-ISHS Werte (siehe auch Abb. 3.75 und 3.76), wodurch sich die Kennwerte der Variante VDLUFA und ISHS signifikant unterscheiden. Zur engen Korrelation zwischen AC-VDLUFA und AC-ISHS kommt es offenbar dadurch, dass die AC-VDLUFA Werte bei den Substraten kleiner werden, bei denen auch AC-ISHS kleiner wird und bei den Substraten größer werden, bei denen auch AC-ISHS größer wird (= hoher Korrelationskoeffizient (r)). Der mathematische Zusammenhang zwischen der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Variante VDLUFA (= y) und der Luftkapazität, die mit Hilfe der ISHS-Methode (= x) gemessen wurde, lässt sich mittels der Geradengleichung der Trendlinie in Abb. 3.77 formulieren.

In Bezug auf die Luftkapazität lassen sich also folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Die Variante der Q-Methode, die die meisten minimalen Werte für die Luftkapazität (AC [Vol. %]) erzeugt, ist als positiv zu bewerten, da die Deklaration eines Substrats mit einer möglichst kleinen Luftkapazität dem Produzenten die Sicherheit gibt, dass derart niedrige Werte beim Gärtner nicht unterschritten werden (Sicherheit vor Reklamationen).

- Bei vielen Substraten unterscheiden sich die AC-Werte der vier Varianten der Q-Methode nur wenig, bei anderen treten jedoch Spannweiten bis zu 22,2 Vol. % auf.
- Die meisten Minima für die Luftkapazität werden mit der Variante Topffest (15) gemessen, gefolgt von VDLUFA-5 (11) und VDLUFA+5 (8). Mit VDLUFA werden nur 2 Minima für AC erzeugt (Abb. 3.75).
- VDLUFA erzeugt 24 Höchstwerte für AC. Mit den anderen Varianten werden dagegen nur in fünf (VDLUFA-5), vier (Topffest) bzw. drei Fällen (VDLUFA+5) Maxima für die Luftkapazität (AC) ermittelt (Abb. 3.76).
- Die engste Korrelation konnte zwischen der mit der Variante VDLUFA ermittelten Luftkapazität und der mit der ISHS-Methode ermittelten Luftkapazität errechnet werden ($r = 0,9284$) (Abb. 3.77 und Tabelle 3.25).
- Trotz der engen Beziehung zwischen AC-VDLUFA und AC-ISHS unterscheiden sich auch nur diese Werte signifikant voneinander (Tabelle 3.29).

3.3.5 Zusammenstellung der Ergebnisse zur Q-Methode

1. Volumengewicht im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A)

- Mit dem Ziel, am Anfang der Messung im Probenzylinder ein möglichst hohes Volumengewicht (dB_A) zu erzeugen, sollte der Variante VDLUFA+5 der Vorrang eingeräumt werden, mit der 16 Maxima, 15 zweithöchste Werte und kein Minimum für dB_A erzeugt werden konnte.
- Die Variante Topffest liefert zwar 17 Maxima für dB_A , aber lediglich zwei zweithöchste Werte und immerhin 10 Minima. Zusätzlich ist die Bestimmungsmethode Topffest noch wenig standardisiert und mechanisiert, wodurch sie schlecht reproduzierbar ist.

2. Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E)

- Die Variante VDLUFA+5 erzeugt die meisten (12) Maxima für dB_E und zusätzlich noch neun zweithöchste Werte und ist damit den anderen drei Varianten überlegen. Daneben werden mit VDLUFA+5 auch die wenigsten (4) Minima gemessen.
- Für VDLUFA+5 konnte außerdem der nach der Variante Topffest zweithöchste Korrelationskoeffizient (r) zwischen dB_A und dB_E errechnet werden.

Tabelle 3.30: Ergebnisse bzw. Rangplätze der vier Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bezüglich verschiedener physikalischer Kennwerte und anderer Eigenschaften – Eine Übersicht und Zusammenfassung – (1, 2, 3 oder 4 = Rangplatz der Methode bezüglich des Kennwerts bzw. der Eigenschaft; AC = Luftkapazität [Vol. %]; CC = Containerkapazität [Vol. %], ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223); dB_A = Volumengewicht [g / l] im Probenzylinder zum Anfang der Messung; dB_E = Volumengewicht [g / l] im Probenzylinder zum Ende der Messung; r = Korrelationskoeffizient; WC = Wasserkapazität; (Werte in Klammern) = absolute Anzahl bzw. absolute Werte; grau unterlegt = die jeweils positivste Eigenschaft)

Kennwert bzw. Eigenschaft	Variante VDLUFA	Variante VDLUFA +5	Variante VDLUFA -5	Variante Topffest
Größte Anzahl an Höchstwerten beim Volumengewicht dB _A [g / l]	3 (2)	2 (16)	4 (1)	1 (17)
Größte Anzahl an Minimalwerten beim Volumengewicht dB _A [g / l]	3 (7)	4 (0)	1 (19)	2 (10)
Größte Anzahl an Höchstwerten beim Volumengewicht dB _E [g / l]	3 (9)	1 (12)	4 (5)	2 (10)
Größte Anzahl an Minimalwerten beim Volumengewicht dB _E [g / l]	1 (14)	4 (4)	2 (10)	3 (8)
Engste Korrelation zwischen dB _A und dB _E	4 (r = 0,966)	2 (r = 0,983)	3 (r = 0,976)	1 (r = 0,991)
Engste Korrelation zwischen dB _E und dem dB _E -Wert der ISHS-Methode	1 (r = 0,994)	3 (r = 0,984)	4 (r = 0,981)	2 (r = 0,989)
Größte Anzahl an Höchstwerten für WC [Vol. %]	4 (2)	3 (7)	2 (13)	1 (14)
Größte Anzahl an Minimalwerten für WC [Vol. %]	1 (25)	4 (1)	3 (4)	2 (5)
Engste Korrelation zwischen WC und CC	1 (r = 0,927)	2 (r = 0,901)	3 (r = 0,872)	4 (r = 0,872)
Signifikanter Unterschied zwischen WC und CC	ja	nein	nein	nein
Mathematischer Zusammenhang zwischen WC und CC	1,0019 CC – 5,337	1,055 CC – 6,7935	0,9814 CC – 1,3301	0,9019 CC + 6,7784
Größte Anzahl an Minimalwerten für AC [Vol. %] = ! POSITIV !	4 (2)	3 (8)	2 (11)	1 (15)
Größte Anzahl an Höchstwerten für AC [Vol. %] = ! NEGATIV !	4 (24)	1 (3)	3 (5)	2 (4)
Engste Korrelation zwischen AC und dem AC-Wert der ISHS-Methode	1 (r = 0,928)	2 (r = 0,888)	3 (r = 0,863)	4 (r = 0,855)
Signifikanter Unterschied zwischen AC und dem AC-Wert der ISHS-Methode	ja	nein	nein	nein
Mathematischer Zusammenhang zwischen AC und dem AC-Wert der ISHS-Methode	1,0092 AC-ISHS + 4,9503	1,0042 AC-ISHS + 2,439	0,9336 AC-ISHS + 3,8394	0,8738 AC-ISHS + 2,6272

- Bezüglich der Korrelation der mit den vier Varianten ermittelten dB_E -Werte zu den dB_E -Werten der ISHS-Methode, belegt VDLUFA+5 hinter den Varianten VDLUFA und Topffest jedoch nur den dritten Rang.

3. Wasserkapazität (WC)

- Entgegen den Erwartungen führt nicht immer das höchste Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) auch zur höchsten Wasserkapazität (WC) (und zur niedrigsten Luftkapazität (AC)).
- Die Varianten Topffest (14) und VDLUFA-5 (13) erzeugen die meisten Maxima für WC, gegenüber sieben bei VDLUFA+5 und lediglich zwei bei VDLUFA.
- Mit der Variante VDLUFA werden die meisten (25) Minima für WC gemessen.
- Obwohl sich die WC-Werte von VDLUFA signifikant von den Werten der Containerkapazität (CC-ISHS) unterscheiden, die mit Hilfe der ISHS-Methode bestimmt wurden, wurde für WC-VDLUFA die engste Korrelation zu CC-ISHS errechnet. Obwohl die WC-Werte der Variante VDLUFA signifikant kleiner als die CC-Werte der ISHS-Methode sind, verändert sich WC-VDLUFA bei den meisten Substraten offenbar in ähnlichem Umfang und in die gleiche Richtung wie CC-ISHS.

4. Luftkapazität (AC)

- Die Variante der Q-Methode, die die meisten minimalen Werte für die Luftkapazität (AC [Vol. %]) erzeugt, ist als positiv zu bewerten (Sicherheit vor Reklamationen).
- Topffest (15) und VDLUFA-5 (11) bewirken die meisten Minima für AC, gefolgt von VDLUFA+5 (8) und VDLUFA mit nur zwei Minima.
- Der Variante VDLUFA sind 24 Höchstwerte für AC zuzuschreiben.
- Obwohl nur VDLUFA über alle 36 Substrate zu signifikant höheren AC-Werten führt als die ISHS-Methode, konnte zwischen AC-VDLUFA und AC-ISHS die engste Korrelation errechnet werden. Sinngemäß gilt der Zusammenhang, der bereits bei der Wasserkapazität (WC) erläutert wurde.

3.4 Ergebnisse der M-ISHS-Methode

Die Untersuchung der 13 Standardsubstrate mit Hilfe der M-ISHS-Methode ermöglicht die Bestimmung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts der einzelnen Substrate und die Erstellung einer Wasserspannungskurve. Der Vorteil gegenüber der ISHS-Methode liegt in der Berücksichtigung eines bestimmten Volumengewichts im Probenzylinder der M-ISHS-Methode. In dieser Arbeit wurde die M-ISHS-Methode mit der praxisüblichen Topffestigkeit (= Variante Topffest) und dem Volumengewicht VDLUFA (= Variante VDLUFA) durchgeführt.

3.4.1 Ergebnisse der M-ISHS-Methode (Variante Topffest)

Im Zusammenhang mit der M-ISHS-Methode sind neben den Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts, die in den Tabelle 3.31 und 3.32 für die untersuchten Standardsubstrate zusammengestellt sind, vor allem die Unterschiede zu den entsprechenden Kennwerten interessant, die mit der ISHS-Methode ermittelt wurden.

Tabelle 3.31: Porenvolumen (= **PV**), Luftkapazität (= **AC**) und Containerkapazität (= **CC**) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b) (n = 4) (**s** = Standardabweichung)

Substrat	PV [Vol. %]	s	AC [Vol. %]	s	CC [Vol. %]	s
EP	87,5	0,2	10,9	2,7	76,6	2,8
EPr	86,6	0,2	6,8	2,2	79,8	2,1
ET	87,8	0,6	14,4	1,6	73,4	2,0
CF	92,5	0,2	12,6	1,9	79,9	1,8
PH	90,8	0,1	6,3	1,2	84,5	1,2
FT	89,9	0,6	21,3	5,2	64,6	4,6
RK	88,4	0,7	30,8	3,3	57,7	2,6
ST	89,9	0,3	8,6	2,8	81,2	2,6
SV	90,2	0,4	8,2	2,2	81,9	1,8
SW1	92,8	0,1	14,7	1,4	78,1	1,3
SW3	92,8	0,2	14,4	4,3	78,3	4,1
T1	91,3	0,3	5,6	2,4	85,7	2,1
T2	93,4	0,3	18,6	1,2	74,7	1,0

Im Vergleich zu den physikalischen Kennwerte der 13 Standardsubstrate, die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt wurden, zeigt sich bei der M-ISHS-Methode (Variante Topffest), dass sich die Porenvolumina beider Methoden kaum unterscheiden

(maximal um 0,9 Vol. %). In neun von 13 Fällen (ca. 70 % der Fälle) liefert die M-ISHS-Methode jedoch die kleineren Werte.

In Abb. 3.81 sind die Werte für die Luftkapazität (AC) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode aufgetragen. Es zeigt sich, dass in 8 von 13 Fällen (61,5 %) die M-ISHS-Methode (Variante Topffest) die kleinere Luftkapazität erzeugt. Die festgestellte Differenz der AC-Werte schwankt zwischen (0,7 und 8,9 Vol. % => Mittelwert ca. 3,1 Vol. %), was in Anbetracht der kleinen absoluten Werte für AC in vielen Fällen als bedeutsam eingestuft werden muss.

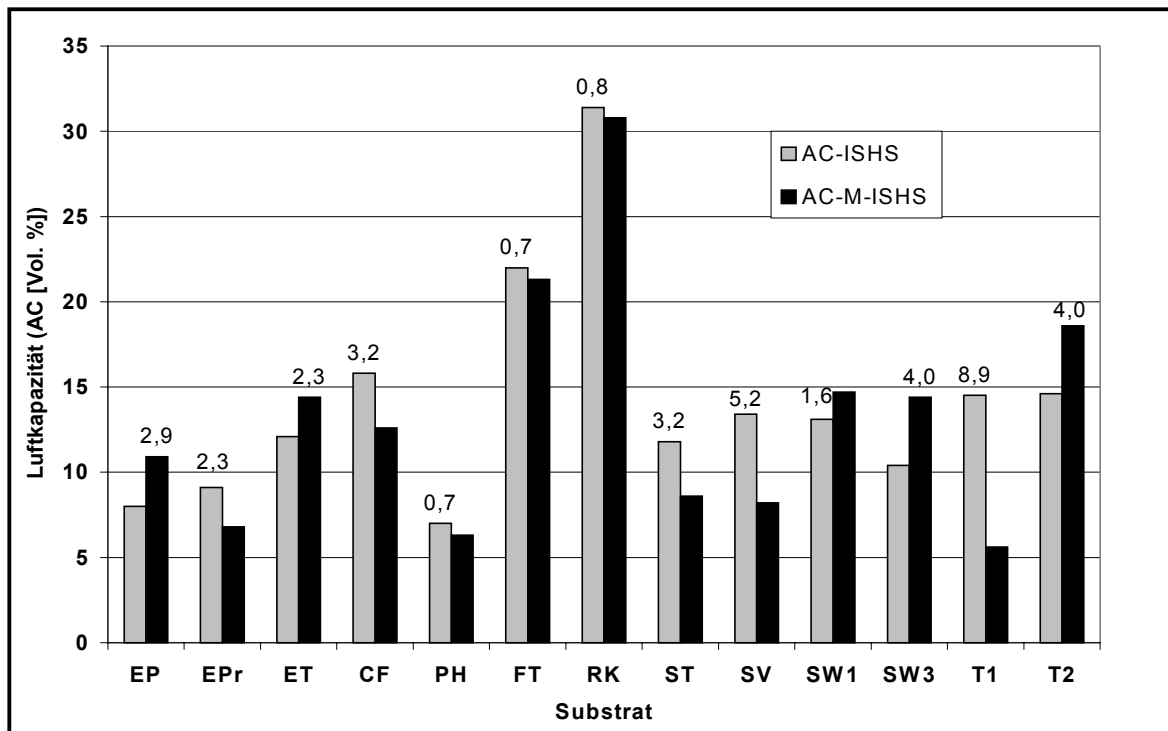


Abb. 3.81: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. **AC-ISHS** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), **AC-M-ISHS** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b), **Zahlen über den Säulen** = Differenz zwischen den beiden AC-Werten (n = 4)

Bezüglich der Containerkapazität (CC [Vol. %]) kann im Vergleich der beiden Methoden festgehalten werden, dass die CC-Werte der Methode M-ISHS (Variante Topffest) bei sieben Substraten höher sind als die CC-Werte der ISHS-Methode. Die Differenz beider Methoden schwankt zwischen 1,0 und 7,2 Vol. %. Diese Unterschiede bezüglich CC sind vor dem Hintergrund der hohen absoluten Werte der Containerkapazität (CC) bei Töpfen mit kleinem Volumen als nicht bedeutsam einzustufen, bei Containern mit großem Volumen allerdings schon (siehe Abb. 3.82.).

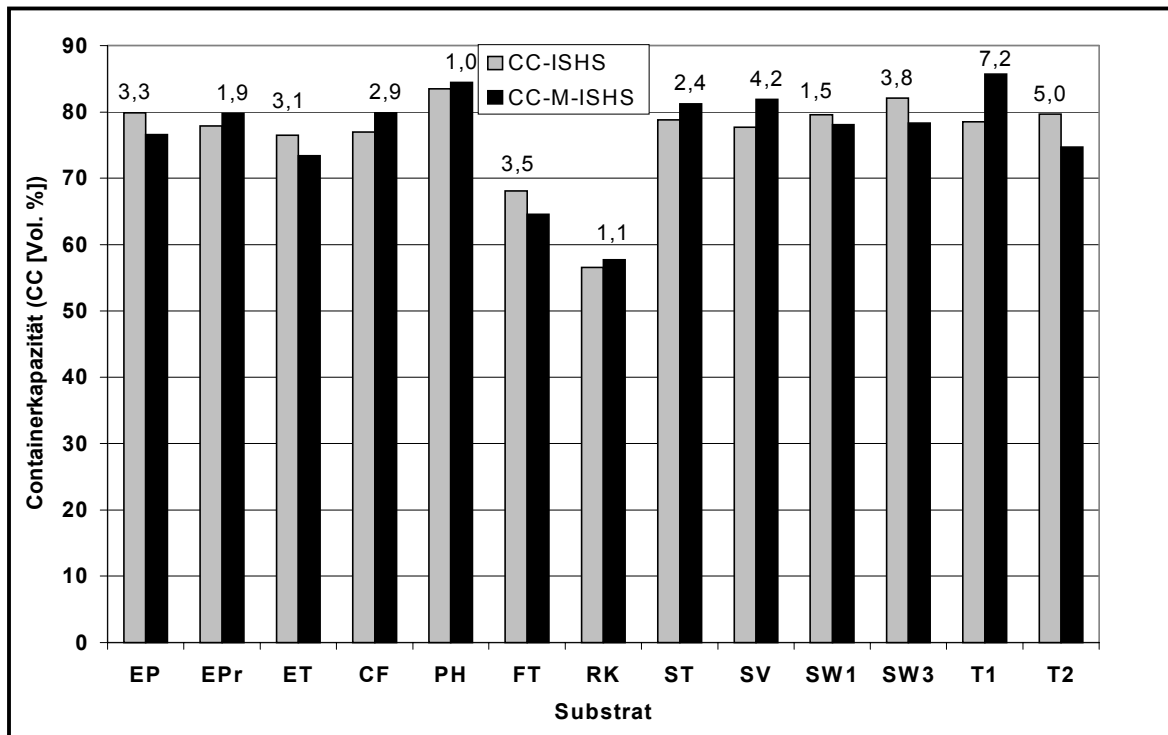


Abb. 3.82: Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. **CC-ISHS** = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), **CC-M-ISHS** = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b), **Zahlen über den Säulen** = Differenz zwischen den beiden CC-Werten (n = 4)

Der Vergleich der Werte für das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) zeigt, dass mit der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) in neun von 13 Fällen (ca. 70 %) das höhere Volumengewicht gegenüber der ISHS-Methode ermittelt wird, in vier Fällen das kleinere. Nur acht Substrate (62,5 %) entsprechen der in der Literatur häufig geschilderten Beobachtung, dass die Luftkapazität (AC) bei steigendem Volumengewicht abnimmt und umgekehrt. Die Beobachtung, dass die Containerkapazität (CC) mit steigendem Volumengewicht zunimmt und umgekehrt, konnte sogar nur bei sieben Substraten (ca. 54%) bestätigt werden (vergleiche Tabelle A1 und A13 im Anhang).

Wird das Augenmerk auf die verfügbare Wassermenge (AW) gelenkt, so zeigt sich, dass diese, genau wie bei der ISHS-Methode auch, bei dem Substrat SV am größten ist (vergleiche Tabelle 3.32 und Tabelle 3.1). In sieben Fällen wird AW mit der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) kleiner als bei der ISHS-Methode eingeschätzt, in sechs Fällen größer. Die Differenzen schwanken zwischen 1,3 und 6,3 Vol. %, der Mittelwert beträgt 3,5 Vol. %. Wie schon bezüglich der Differenzen bei der Containerkapazität (CC) festgestellt wurde, hängt die Bedeutung der Differenzen

bezüglich der verfügbaren Wassermenge (AW) auch von der Topf- bzw. Containergröße ab.

Tabelle 3.32: Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= **WV50**) und 100 hPa (= **WV100**) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= **AW**), leicht verfügbares Wasser (= **EAW**) und schwerer verfügbares Wasser (= **LRAW**) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b) (n = 4) (s = Standardabweichung)

Substrat	WV50 [Vol. %]	s	WV100 [Vol. %]	s	AW [Vol. %]	EAW [Vol. %]	LRAW [Vol. %]
EP	40,2	1,1	35,2	0,1	41,4	36,4	5,0
EPr	41,8	1,3	35,1	0,3	44,7	38,0	6,7
ET	38,9	0,8	34,5	0,6	38,9	34,5	4,4
CF	42,2	1,5	35,4	0,3	44,5	37,7	6,8
PH	48,3	0,5	41,8	1,4	42,7	36,2	6,5
FT	38,3	1,6	32,3	0,8	32,3	26,3	6,0
RK	38,0	1,7	33,4	1,4	24,3	19,7	4,6
ST	43,4	1,7	34,8	1,1	46,4	37,8	8,6
SV	38,5	0,9	31,7	1,2	50,2	43,4	6,8
SW1	41,7	0,4	35,1	0,8	43,0	36,4	6,6
SW3	42,6	1,6	35,4	1,0	42,9	35,7	7,2
T1	44,2	0,5	35,6	1,6	50,1	41,5	8,6
T2	40,9	1,9	33,2	1,2	41,5	33,8	7,7

3.4.2 Ergebnisse der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA)

Im Gegensatz zur M-ISHS-Methode (Variante Topffest), bei der im Probenzylinder zu Anfang der Messung ein Volumengewicht (dB_A) erzeugt wird, das der sogenannten praxisüblichen Topffestigkeit entspricht, wird bei der Variante VDLUFA ein Volumengewicht erzeugt, das auch bei der chemischen Untersuchung von Substraten gemäß den Vorgaben des VDLUFA zugrunde gelegt wird.

Ein Vergleich der Porenvolumina (PV) ermittelt mit der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) und mit der ISHS-Methode zeigt, dass sich beide Methoden nicht unterscheiden. Die größte Differenz beträgt 1,0 Vol. %, im Durchschnitt wird jedoch eine Differenz von lediglich ca. 0,3 Vol. % ermittelt.

Wird der Vergleich beider Methoden auf die Luftkapazität (AC) ausgedehnt, so wird deutlich, dass die AC-Werte in 10 Fällen (= 77 %) bei der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) größer sind, als bei der ISHS-Methode. Der größte Unterschied beträgt 9,2 Vol. % (T2). Im Mittel beträgt die Differenz über alle 13 Standardsubstrate jedoch nur

ca. 2,7 Vol. %. Trotzdem sollten die Unterschiede als bedeutsam eingestuft werden, da die absoluten Werte von AC relativ klein sind (siehe Abb. 3.83 und Tabelle 3.33).

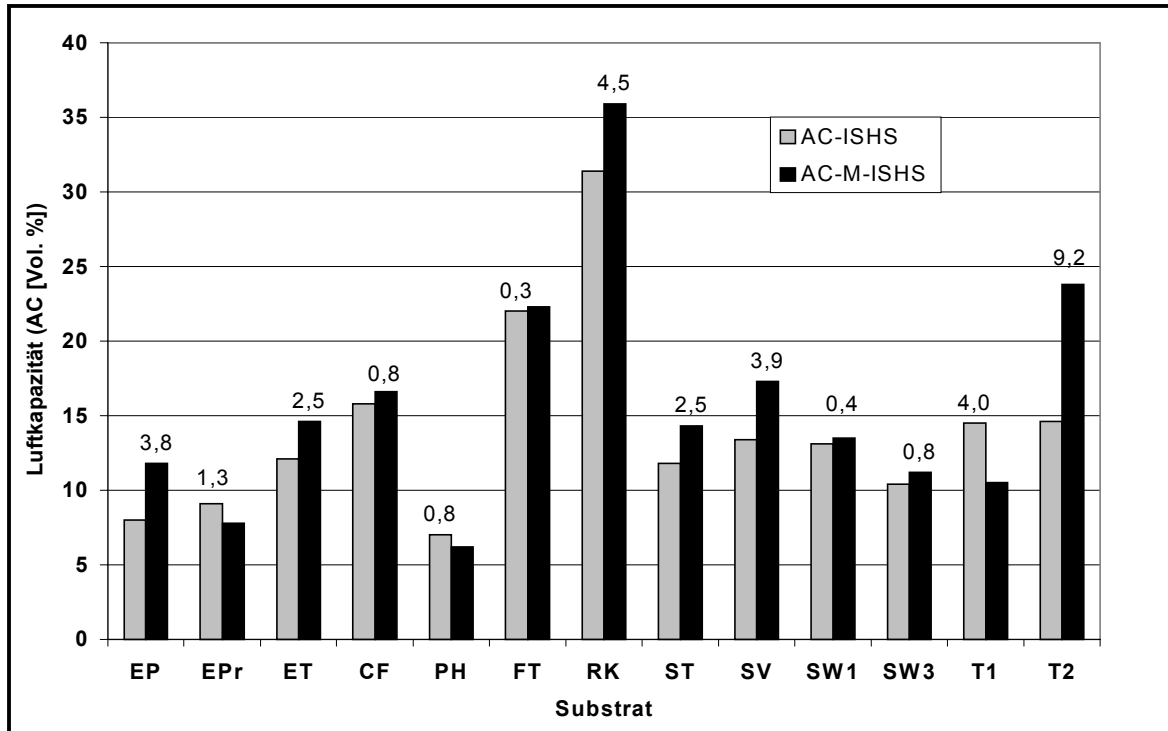


Abb. 3.83: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. **AC-ISHS** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), **AC-M-ISHS** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b), **Zahlen über den Säulen** = Differenz zwischen den beiden AC-Werten (n = 4, bei SV n = 3)

Bezüglich der Containerkapazität (CC) läßt sich festhalten, dass die Variante VDLUFA der M-ISHS-Methode in 10 Fällen kleinere Werte erzeugt als die ISHS-Methode. Obwohl die Differenz zwischen beiden Methoden ähnlich hoch ist wie bei der Luftkapazität sind die Unterschiede jedoch nur in großen Containern von Bedeutung (siehe auch Tabellen A1 und A12 im Anhang und Abb. 3.84).

Betrachtet man das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) so wird deutlich, dass mit der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) in lediglich fünf von 13 Fällen das höhere Volumengewicht gegenüber der ISHS-Methode ermittelt wird, in acht Fällen das kleinere. Ebenfalls acht Substrate (62,5 %) entsprechen der in der Literatur häufig geschilderten Beobachtung, dass die Luftkapazität (AC) bei steigendem Volumengewicht abnimmt und umgekehrt. Die Beobachtung, dass die Containerkapazität (CC) mit steigendem Volumengewicht zunimmt und umgekehrt, konnte sogar nur bei sieben Substraten (ca. 54%) bestätigt werden (Vergleiche Tabelle A1 und A12 im Anhang). Damit weichen sowohl bei der

Tabelle 3.33: Porenvolumen (= **PV**), Luftkapazität (= **AC**) und Containerkapazität (= **CC**) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b) (n = 4, bei SV n = 3) (s = Standardabweichung)

Substrat	PV [Vol. %]	s	AC [Vol. %]	s	CC [Vol. %]	s
EP	88,1	0,2	11,8	3,3	76,4	3,1
EPr	87,1	0,7	7,8	1,9	79,3	2,1
ET	87,5	0,7	14,6	1,5	72,9	1,2
CF	92,9	0,1	16,6	1,7	76,3	1,6
PH	90,7	0,2	6,2	2,2	84,6	1,9
FT	89,7	0,4	22,3	3,1	67,4	3,1
RK	88,4	0,9	35,9	1,6	52,4	2,4
ST	90,9	0,7	14,3	4,6	76,6	4,4
SV	91,1	0,5	17,3	2,0	73,8	1,8
SW1	91,7	0,3	13,5	3,9	79,2	3,6
SW3	92,7	0,1	11,2	2,0	81,5	2,0
T1	91,8	0,2	10,5	2,0	81,4	1,8
T2	93,7	0,2	23,8	4,1	69,8	4,0

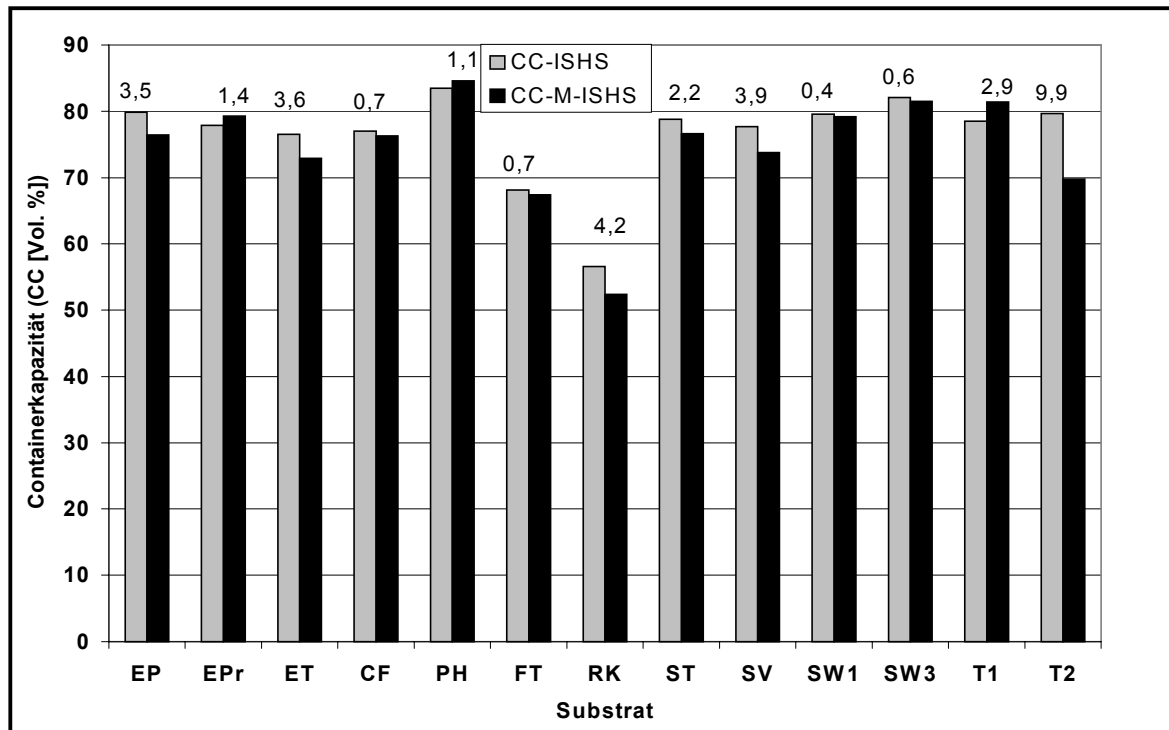


Abb. 3.84: Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. **CC-ISHS** = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), **CC-M-ISHS** = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b), **Zahlen über den Säulen** = Differenz zwischen den beiden CC-Werten (n = 4)

Tabelle 3.34: Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= **WV50**) und 100 hPa (= **WV100**) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= **AW**), leicht verfügbares Wasser (= **EAW**) und schwerer verfügbares Wasser (= **LRAW**) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b) (n = 4, bei SV n = 3) (s = Standardabweichung)

Substrat	WV50 [Vol. %]	s	WV100 [Vol. %]	s	AW [Vol. %]	EAW [Vol. %]	LRAW [Vol. %]
EP	40,2	0,5	33,7	1,5	43,4	36,2	6,5
EPr	42,8	1,6	34,6	0,8	44,7	36,5	8,2
ET	38,9	1,6	33,0	0,8	39,9	34,0	5,9
CF	42,8	0,7	34,5	1,0	41,8	33,5	8,3
PH	52,1	2,3	45,0	1,7	39,6	32,5	7,1
FT	39,6	1,4	32,1	0,5	35,3	27,8	7,5
RK	35,9	1,0	32,2	1,4	20,2	16,5	3,7
ST	41,2	1,5	32,9	1,3	43,7	35,4	8,3
SV	35,3	3,5	28,5	2,9	45,3	38,5	7,0
SW1	42,0	0,6	34,2	1,4	45,0	37,2	7,8
SW3	43,3	1,7	34,8	1,2	46,7	38,2	8,5
T1	43,7	0,7	33,9	0,8	47,5	37,7	9,8
T2	41,4	1,5	31,8	0,5	38,0	28,4	9,6

Variante Topffest als auch bei der Variante VDLUFA fünf Substrate bezüglich der Erwartung für die Luftkapazität in Abhängigkeit von dem Volumengewicht dB_E und sechs Substrate bezüglich der Erwartung für die Containerkapazität ab. Abweichter von der Erwartung, die bei beiden Varianten (Topffest und VDLUFA) auffällig wurden, sind Substrate ET, PH und T2.

Zum verfügbaren Wasser (AW) kann festgehalten werden, dass es bei acht Substraten mit der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) kleiner eingeschätzt wird als mit der ISHS-Methode. Die Bedeutung der festgestellten Differenzen (0,2 – 6,6 Vol. % => Mittelwert = 2.5 Vol. %) hängt wiederum von der Topf- bzw. Containergröße ab.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten (siehe auch Abb. 3.85):

- Mit der ISHS-Methode werden bei drei Substraten (EPr, PH, T1) Maximalwerte für die Luftkapazität (AC) erzeugt und bei immerhin fünf Substraten Minimalwerte.
- Die M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) führte bei 8 Substraten zur höchsten Luftkapazität (AC) und nur bei PH zu einem Minimalwert.
- Wird die Luftkapazität (AC) mit der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) ermittelt, werden lediglich bei zwei Substraten (SW1 und SW3) Höchstwerte und bei immerhin sieben Substraten Minimalwerte gemessen.

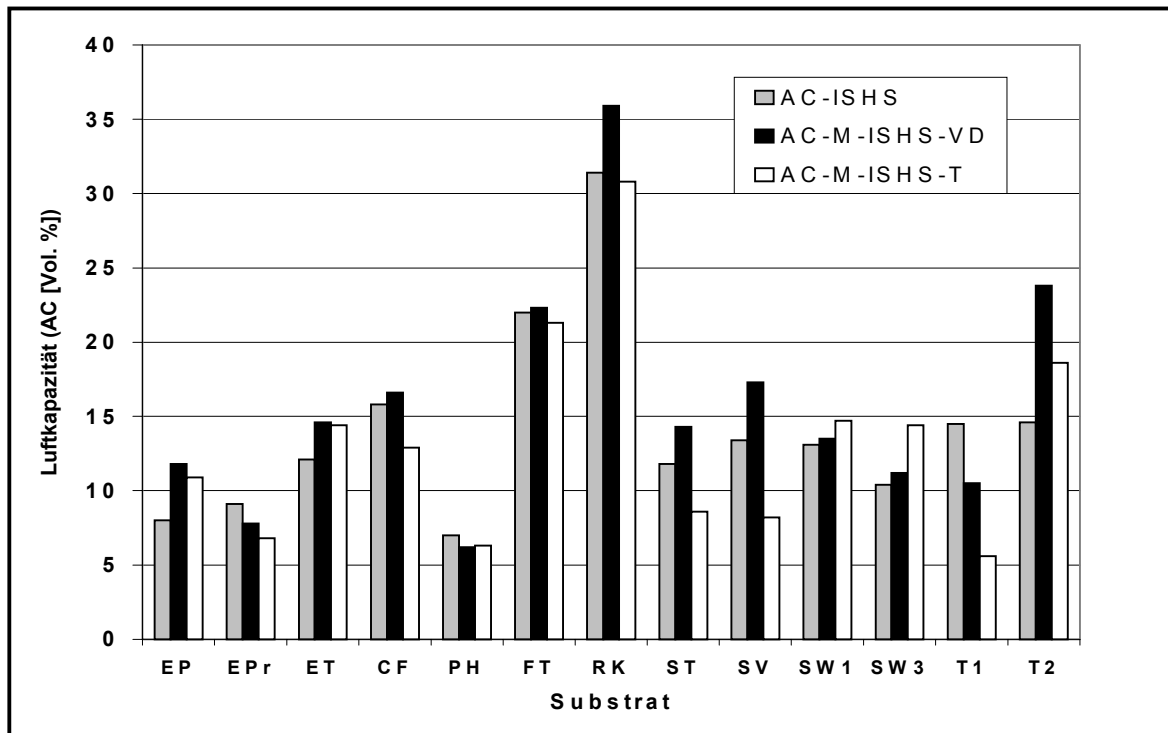


Abb. 3.85: Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. **AC-ISHS** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), **AC-M-ISHS-T** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest), **AC-M-ISHS-VD** = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b) (n = 4, bei SV bei (Variante VDLUFA) n = 3)

- Bezogen auf die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten liefert die M-ISHS-Methode mit beiden getesteten Varianten nur bezüglich der Luftkapazität (AC) unterschiedliche Werte zur ISHS-Methode, die uneingeschränkt als bedeutsam einzustufen sind.
- Die Unterschiede bezüglich der Containerkapazität (CC) sind hinsichtlich ihrer Bedeutung von der Topf- bzw. Containergröße abhängig, genau wie die Differenzen bezüglich der verfügbaren Wassermenge (AW).
- Bedeutsame Unterschiede im Porenvolumen konnten nicht festgestellt werden.
- Der alleinige Vergleich der beiden Varianten der M-ISHS-Methode bezüglich der Luftkapazität (AC) zeigt, dass die Variante VDLUFA in 10 Fällen (= 77 %) zur größeren Luftkapazität führt. Im Mittel über alle 13 Substrate liegt der AC-Wert bei der Variante VDLUFA um ca. 3,2 Vol. % über dem der Variante Topffest (siehe Abb. 3.84).

3.5 Ergebnisse der Siebmethode

Im Rahmen der Entwicklung einer Siebmethode zur schnellen Kontrolle des Produktionsprozesses vor Ort wurden zwei unterschiedliche Siebsätze und drei unterschiedliche Vorbehandlungen der Substrate geprüft (siehe Seite 46 ff). Die drei Varianten Vorbehandlung_{feucht}, Vorbehandlung_{schrantrocken} und Vorbehandlung_{lufttrocken} wurden an den 13 Standardsubstraten getestet, die nach entsprechender Vorbehandlung mit dem Siebsatz nach Gütesicherung / RHP (WEVER und VERHAGEN 1995) fraktioniert wurden. In Tabelle A10 im Anhang sind die Mittelwerte der Substratanteile [Gew. %] in den sieben Fraktionen nach Siebung mit dem Siebsatz nach Gütesicherung / RHP in Abhängigkeit von der Variante der Vorbehandlung zusammengestellt. Es wird deutlich, dass die Fraktionen >31,5 mm und 16,0 – 31,5 mm keine Rolle spielen (mit Ausnahme von Fraktion 16,0 – 31,5 mm bei dem Substrat CF). Mit weiter abnehmender Maschenweite der Siebe nimmt der Substratanteil in den entsprechenden Fraktionen (8,0 – 16,0; 4,0 – 8,0; 2,0 – 4,0; 1,0 – 2,0; 0,0 – 1,0 mm) zu. In den drei Fraktionen kleiner 4 mm (2,0 – 4,0; 1,0 – 2,0 und 0,0 – 1,0 mm) werden je nach Substratvariante zwischen 62,6 Gew. % (RK, Vorbehandlung_{schrantrocken}) und 94,6 Gew. % (T1, Vorbehandlung_{lufttrocken}) der Substrate gefunden. Davon entfällt der größte Anteil auf die kleinste Fraktion (0,0 – 1,0 mm) (siehe Tabelle 3.35).

Tabelle 3.35: Anteile der 13 Standardsubstrate in den drei Fraktionen kleiner 4,0 mm (= < 4 mm) und in der Fraktion 0,0 – 1,0 mm (= < 1 mm) [Gew. %] in Abhängigkeit von der Variante der Vorbehandlung (n = 4)
(**feucht** = Vorbehandlung_{feucht}, **schrantrocken** = Vorbehandlung_{schrantrocken} und **lufttrocken** = Vorbehandlung_{lufttrocken})

Substrat	schrantrocken		feucht		lufttrocken	
	< 4mm [Gew. %]	< 1mm [Gew. %]	< 4 mm [Gew. %]	< 1 mm [Gew. %]	< 4 mm [Gew. %]	< 1 mm [Gew. %]
EP	81,0	40,4	74,4	35,4	77,9	35,4
EPr	87,9	61,4	88,2	52,1	90,4	58,5
ET	77,9	34,6	74,2	33,9	79,1	35,0
CF	70,0	50,5	75,9	48,4	65,5	46,4
PH	92,2	69,3	93,7	31,2	92,3	68,6
FT	70,4	38,1	66,9	35,0	65,6	33,4
RK	62,6	27,4	65,2	29,8	64,9	27,8
ST	83,1	57,2	74,8	41,5	81,6	53,4
SV	93,1	55,9	88,0	52,2	94,1	58,0
SW1	82,7	60,6	78,9	53,4	83,6	58,9
SW3	93,2	68,6	89,5	60,1	94,1	69,3
T1	88,1	52,1	87,4	57,1	94,6	63,2
T2	69,7	69,7	68,0	42,8	73,2	45,5

Nachdem anhand der 13 Standardsubstrate gezeigt werden konnte, dass sich die Substrate zum größten Teil aus Bestandteilen mit einem Durchmesser kleiner 1 mm zusammensetzen, wurde neben dem Siebsatz nach Gütesicherung / RHP zusätzlich auch der Siebsatz nach DIN 11540 in die Untersuchung aufgenommen, da dieser Siebsatz die Fraktion kleiner 1 mm nochmals in drei Fraktionen unterteilt (0,5 – 1,0; 0,2 – 0,5; 0,0 – 0,2 mm). Auf die Ergebnisse der Siebung nach DIN wird später eingegangen.

Die Korrelationsanalyse zwischen den Fraktionsanteilen der einzelnen Fraktionen des Siebsatzes nach Gütesicherung / RHP [Gew. %] in Abhängigkeit von der Variante der Vorbehandlung und der Luftkapazität (AC) ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), ergab das in Tabelle 3.36 dargestellte Ergebnis. Danach

Tabelle 3.36: Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen sechs Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach Gütesicherung / RHP und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), in Abhängigkeit von der Vorbehandlung. Die Korrelationskoeffizienten wurden für die sieben tonhaltigen (= Ton), die sechs tonfreien (= **ohne Ton**) und für alle 13 Standardsubstrate (= **13**) getrennt berechnet (**feucht** = Vorbehandlung_{feucht}; **schrantrocken** = Vorbehandlung_{schrantrocken} und **lufttrocken** = Vorbehandlung_{lufttrocken})

Siebfraktion [mm]	r feucht			r schrantrocken			r lufttrocken		
	Ton	ohne Ton	13	Ton	ohne Ton	13	Ton	ohne Ton	13
16,0 – 31,5	0,95	0,38	0,55	0,21	0,53	0,16	0,86	0,45	0,17
8,0 – 16,0	0,99	0,54	0,81	0,86	0,65	0,79	0,95	0,51	0,81
4,0 – 8,0	0,06	0,87	0,39	0,67	0,74	0,68	0,43	0,53	0,51
2,0 – 4,0	-0,19	0,41	0,22	0,17	0,36	0,29	-0,17	0,31	0,20
1,0 – 2,0	-0,61	-0,86	-0,41	-0,37	-0,08	-0,04	-0,46	-0,08	0,01
0,0 – 1,0	-0,59	-0,47	-0,31	-0,65	-0,86	-0,68	-0,62	-0,74	-0,61

sollte festgehalten werden, dass sich eine sehr enge positive Korrelation zwischen AC und der Fraktion 16,0 – 31,5 und 8,0 – 16,0 mm für die tonhaltigen Substrate ergibt, besonders bei den Vorbehandlungen feucht und lufttrocken. Dies sollte jedoch nicht überbewertet werden, da sich vergleichbare Koeffizienten nicht für die tonfreien Substrate errechnen lassen und besonders die Fraktion 16,0 – 31,5 mm bei vielen Substraten gar nicht vorhanden ist.

In anderen Arbeiten, die sich ebenfalls mit dem Thema Siebung von Substraten und Korrelation der erhaltenen Fraktionen zur Luftkapazität (AC) beschäftigt haben,

wurde häufig eine enge, negative Korrelation zwischen der/den Fraktion(en) kleiner 1,0 mm und der Luftkapazität gefunden (FRESE 1998; LIMBERS und REHME 1997; SCHARPF 1997; VERHAGEN 1995,1997). Auch in dieser Arbeit konnte die engste Korrelation zwischen der Fraktion 0,0 – 1,0 mm und AC-ISHS errechnet werden, wobei jedoch selbst die engste Korrelation der Vorbehandlung_{schrantrocken} ($r = -0,68$) auf keine enge Beziehung hindeutet. Da die Vorbehandlung_{lufttrocken} als nicht reproduzierbar eingestuft wurde und die Vorbehandlung_{feucht} mit $r = -0,31$ über keine enge Beziehung zu AC-ISHS verfügt (siehe Tabelle 3.37), wurde nachfolgend nur noch mit der Vorbehandlung_{schrantrocken} gearbeitet.

Die Tabelle A10 im Anhang enthält die Ergebnisse der Siebung nach Gütesicherung / RHP für die 23 Mischsubstrate nach Vorbehandlung_{schrantrocken}. Auch im Fall der 23 Mischsubstrate konnte die Beobachtung bestätigt werden, dass sich die Substrate zum überwiegenden Teil aus Bestandteilen unter 4,0 mm Durchmesser aufbauen. Substratbestandteile über 31,5 mm Durchmesser konnten kaum gefunden werden

Tabelle 3.37: Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen sechs Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach Gütesicherung / RHP und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), nach Vorbehandlung_{schrantrocken}. Die Korrelationskoeffizienten wurden für die tonhaltigen (= **Ton**), die tonfreien (= **ohne Ton**), für die 13 Standardsubstrate (= **13**), die 23 Mischsubstrate (= **23**) und die 36 Substrate (= **36**) getrennt berechnet. Zusätzlich wurden auch einige Fraktionen zusammengefasst (= Σ) und dann die Korrelation zu AC berechnet (^{hochgestellte Zahl} = Anzahl der Substrate, die jeweils tonhaltig oder ohne Ton sind)

Siebfraktion [mm]	r 13 Standardsubstrate			r 23 Mischsubstrate			r 36 Substrate		
	Ton ⁷	ohne Ton ⁶	13	Ton ⁸	ohne Ton ¹⁵	23	Ton ¹⁵	ohne Ton ²¹	36
16,0 – 31,5	0,21	0,53	0,16	-0,57	0,31	0,03	0,37	0,39	0,24
8,0 – 16,0	0,86	0,65	0,79	0,44	0,79	0,44	0,43	0,68	0,54
4,0 – 8,0	0,67	0,74	0,68	-0,14	0,63	0,63	0,56	0,41	0,54
2,0 – 4,0	0,17	0,36	0,29	-0,23	-0,03	0,44	0,09	-0,13	0,22
1,0 – 2,0	-0,37	-0,08	-0,04	-0,48	-0,30	0,31	-0,33	-0,35	0,05
0,0 – 1,0	-0,65	-0,86	-0,68	0,30	-0,69	-0,67	-0,45	-0,62	-0,59
Σ 4,0 – 16,0	0,95	0,70	0,78	0,31	0,84	0,79	0,55	0,67	0,63
Σ 2,0 – 8,0	0,45	0,64	0,51	-0,20	0,37	0,53	0,35	0,13	0,38
Σ 1,0 – 8,0	0,49	0,31	0,40	-0,31	0,11	0,46	0,21	-0,04	0,29
Σ 1,0 – 4,0	0,07	0,20	0,19	0,35	-0,14	0,39	0,07	-0,24	0,17

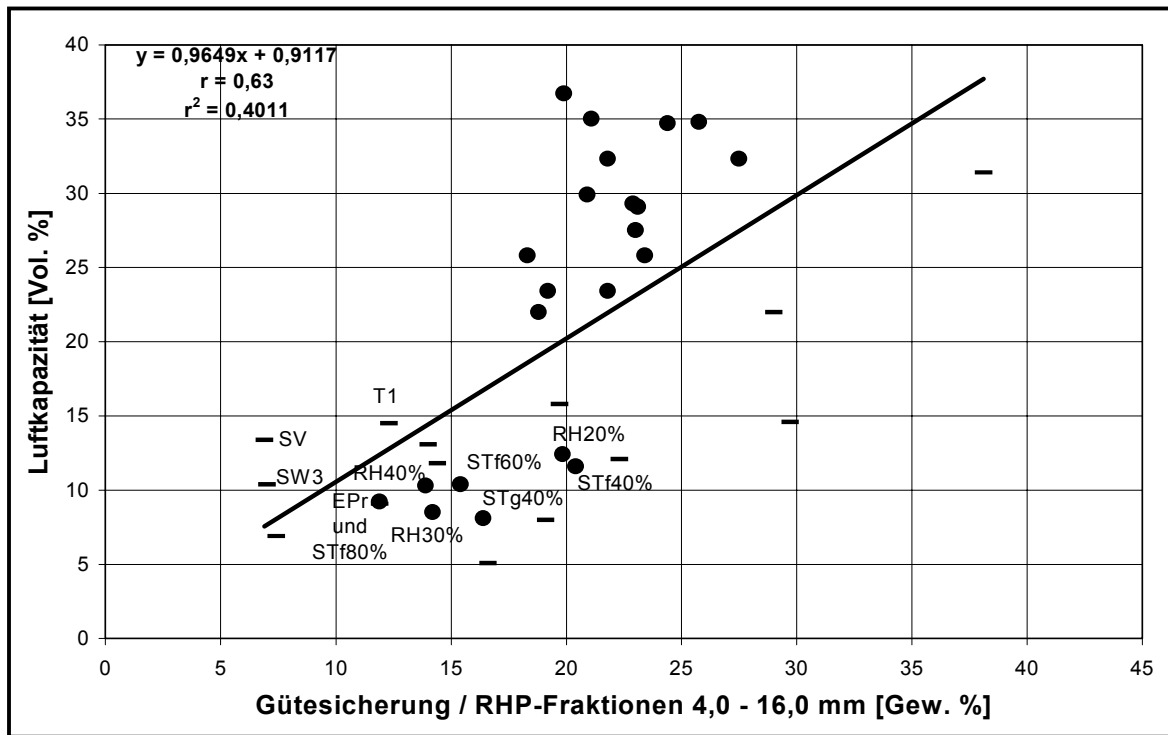


Abb. 3.86: Beziehung zwischen den Fraktionen 4,0 – 16,0 mm der Siebung nach Gütesicherung / RHP [Gew. %] und der Luftkapazität [Vol. %], ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (• = Datenpunkte der 23 Mischsubstrate; – = Datenpunkte der 13 Standardsubstrate; der Datenpunkt 11,9/9,1 bzw. 11,9/9,2 ist doppelt belegt durch EPr (11,9/9,1) und durch STf80% (11,9/9,2))

und auch der Anteil der Bestandteile mit einem Durchmesser zwischen 16,0 und 31,5 mm ist als gering einzustufen (maximal 10,4 Gew. % bei KF10%; siehe Tabelle A10). Die Korrelationsanalyse der mit dem Siebsatz nach Gütesicherung / RHP erhaltenen Siebfraktionen [Gew. %] zu AC-ISHS zeigt, dass keine besonders engen Korrelationen zwischen den einzelnen Fraktionen und AC-ISHS bestehen. Selbst die Addition von mehreren Fraktionen und die anschließende Berechnung der Korrelationsanalyse zu AC-ISHS ergab keine engere Beziehung (Tabelle 3.38). Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,63$ konnte für die Fraktion 4 - 16 mm (= 4,0 – 8,0 mm + 8,0 – 16,0 mm) die engste Korrelation zur Luftkapazität AC errechnet werden (siehe Abb. 3.86). Dabei wird deutlich, dass sich die Mischsubstrate (• in Abb. 3.86) und die Standardsubstrate (– in Abb. 3.86) offenbar stark unterscheiden, sogar deutlich unterschiedliche Gruppen bilden. Die Mischsubstrate verfügen zum größten Teil über eine höhere Luftkapazität (AC) und auch die Gewichtsanteile in der/den Fraktion(en) 4,0 – 16,0 mm sind bei den Mischsubstraten viel größer.

Die zusätzliche Berechnung der Korrelationsanalyse für die Gruppen mit und ohne Ton zeigt, dass in einigen Fällen eine engere Beziehung der einen oder anderen

Gruppe errechnet werden konnte, wobei das Verhalten der einzelnen Gruppen mit und ohne Ton nicht einheitlich ist (Tabelle 3.38).

Mit dem Siebsatz nach DIN 11540 wurde nur noch nach der Vorbehandlung_{schränktrocken} gesiebt. Außerdem wurde nicht mehr in vierfacher Wiederholung gearbeitet, sondern lediglich in dreifacher. Die Tabelle A11 im Anhang enthält die Substratanteile der einzelnen Fraktionen [Gew. %]. Es lässt sich gut erkennen, dass die Fraktion > 16,0 mm kaum vorhanden ist. Der höchste Substratanteil in der Fraktion > 16,0 mm wurde mit 5,1 Gew. % bei Standardsubstrat T2 ermittelt.

Tabelle 3.38: Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen acht Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach DIN 11540 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), nach Vorbehandlung_{schränktrocken}. Die Korrelationskoeffizienten wurden für die tonhaltigen (= **Ton**), die tonfreien (= **ohne Ton**), für die 13 Standardsubstrate (= **13**), die 23 Mischsubstrate ohne STf80% (= **22**) und die 36 Substrate ohne STf80% (= **35**) getrennt berechnet. Zusätzlich wurden auch einige Fraktionen zusammengefasst (= Σ) und dann die Korrelation zu AC berechnet
(^{hochgestellte Zahl} = Anzahl der Substrate, die jeweils tonhaltig oder ohne Ton sind)

Siebfraktion [mm]	r 13 Standardsubstrate			r 22 Mischsubstrate			r 35 Substrate		
	Ton ⁷	ohne Ton ⁶	13	Ton ⁸	ohne Ton ¹⁴	23	Ton ¹⁵	ohne Ton ²⁰	36
> 16,0	0,52	0,59	0,20	0,82	0,10	0,24	0,62	0,12	0,26
10,0 – 16,0	0,47	0,49	0,37	0,28	0,34	0,18	0,47	0,39	0,37
5,0 – 10,0	0,62	0,72	0,61	0,54	0,65	0,73	0,79	0,60	0,71
2,0 – 5,0	0,28	0,56	0,37	-0,72	0,51	0,54	0,07	0,41	0,36
1,0 – 2,0	0,22	-0,43	0,25	-0,78	0,20	0,42	-0,09	0,10	0,24
0,5 – 1,0	-0,90	-0,38	-0,50	-0,53	-0,27	-0,43	-0,40	-0,36	-0,42
0,2 – 0,5	-0,65	-0,59	-0,50	0,09	-0,15	-0,46	-0,71	-0,32	-0,51
0,0 – 0,2	0,10	-0,54	-0,30	0,16	-0,81	-0,74	-0,38	-0,58	-0,56
Σ 0,0 – 0,5	-0,71	-0,67	-0,56	0,15	-0,78	-0,69	-0,68	-0,71	-0,65
Σ 0,0 – 1,0	-0,63	-0,77	-0,58	-0,03	-0,75	-0,71	-0,67	-0,67	-0,65
Σ 0,0 – 2,0	-0,59	-0,75	-0,58	-0,29	-0,73	-0,74	-0,68	-0,63	-0,68
Σ 0,2 – 2,0	-0,46	-0,79	-0,50	-0,57	-0,14	-0,40	-0,64	-0,32	-0,49
Σ 0,5 – 2,0	-0,17	-0,86	-0,18	-0,71	-0,03	0,21	-0,33	-0,21	-0,05
Σ 1,0 – 5,0	0,30	0,33	0,35	-0,78	0,40	0,50	0,02	0,33	0,33
Σ 2,0 – 10,0	0,48	0,92	0,54	-0,22	0,66	0,65	0,56	0,66	0,59

Bei allen anderen Substraten sind die Gewichtsanteile in dieser Fraktion geringer oder sogar gleich null. Durch die Unterteilung des Bereichs kleiner 1,0 mm in die drei Fraktionen 0,0 – 0,2, 0,2 – 0,5 und 0,5 – 1,0 mm wird deutlich, dass bei 23 der 35 Substrate (ohne STf80%, da kein Substrat mehr verfügbar war) der größte Gewichtsanteil unter 1,0 mm Durchmesser auf die Fraktion 0,2 – 0,5 mm entfällt, bei 12 Substraten auf die Fraktion 0,5 – 1,0 mm (Tabelle A11).

Die Korrelationskoeffizienten (r) zwischen der Luftkapazität (AC) ermittelt mit der ISHS-Methode (AC-ISHS) und den einzelnen Siebfractionen sind in Tabelle 3.38 zusammengestellt. Die Fraktion 5,0 – 10,0 mm verfügt über die engste positive Korrelation zur Luftkapazität ($r = 0,71$, siehe auch Abb. 3.87) über alle 35 Substrate.

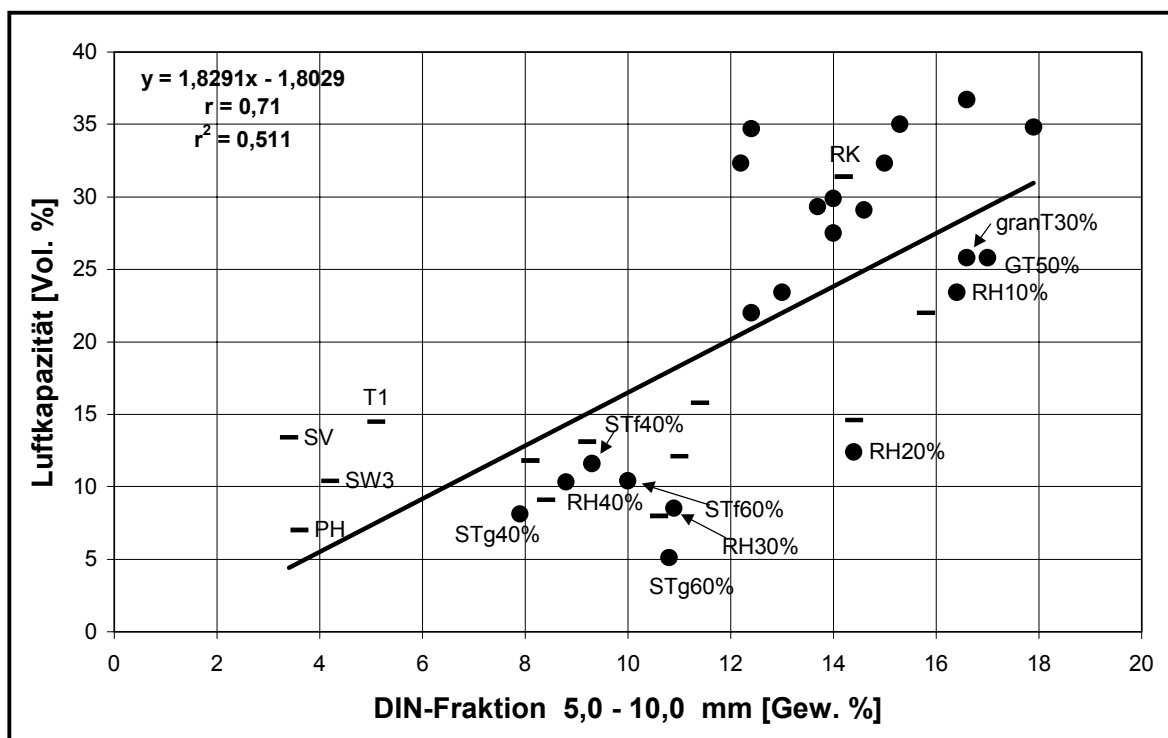


Abb. 3.87: Beziehung zwischen der Fraktion 5,0 – 10,0 mm der Siebung nach DIN 11540 [Gew. %] und der Luftkapazität [Vol. %], ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) (• = Datenpunkte der 22 Mischsubstrate; – = Datenpunkte der 13 Standardsubstrate)

Die einzelnen Datenpaare streuen sehr stark um die Regressionsgerade, wobei wieder zu beobachten ist, dass sich die meisten Mischsubstrate (= • in der Abb. 3.87) durch eine höhere Luftkapazität und höhere Gewichtsanteile in der Fraktion 5,0 – 10,0 mm auszeichnen. Die Gruppenbildung von Mischsubstraten auf der einen Seite und Standardsubstraten (= – in Abb. 3.87) auf der anderen Seite ist jedoch nicht so ausgeprägt wie im Fall der Fraktion(en) 4,0 – 16,0 mm bei der Siebung nach Gütesicherung / RHP.

Die engste negative Korrelation zur Luftkapazität über alle 35 Substrate wurde für die Fraktion(en) 0,0 – 2,0 mm mit $r = -0,68$ errechnet (Tabelle 3.38). Werden die Fraktionsanteile der tonhaltigen und tonfreien Substrate getrennt verrechnet, ergeben sich auch keine wesentlich engeren Korrelationen. Lediglich bei den tonfreien Standardsubstraten ergibt sich ein höherer Korrelationskoeffizient ($r = 0,92$). Da es sich in diesem Fall jedoch um lediglich sechs Substrate handelt, sollte dieses Ergebnis nicht überbewertet werden.

Eine Siebmethode zur Beurteilung von physikalischen Substrateigenschaften (insbesondere der Luftkapazität (AC)), in der hier durchgeführten Form erscheint vor dem Hintergrund der geschilderten Ergebnisse als ungeeignet. Diese Ergebnisse werden auch von anderen Arbeiten, die ebenfalls den Versuch unternommen haben, durch die Fraktionierung von Substraten mittels Siebung Aussagen über die Luft- bzw. Containerkapazität (CC) von Kultursubstraten machen zu können, indirekt bestätigt. So konnten z.B. FRESE (1998), LIMBERS und REHME (1997), SCHARPF (1997) sowie VERHAGEN (1995,1997) lediglich bei reinen Torfen enge Korrelationen zwischen der Luftkapazität und den Gewichtsanteilen der gesiebten Substrate in einer bzw. mehreren Fraktionen aufzeigen. Sobald weitere Mischkomponenten im Substrat vorhanden waren, wurden die errechneten Korrelationen weiter und glichen sich den in dieser Arbeit gefundenen Ergebnissen an.

4 Diskussion

4.1 Die ISHS-Methode als Referenzmethode

Für die physikalischen Kennwerte, die mit Hilfe der in dieser Arbeit untersuchten Methoden (Q-Methode, M-ISHS-Methode, Fraktionierung durch Siebung) gesammelt wurden, lieferte die ISHS-Methode (CEN/TC 223) die entsprechenden Referenzwerte. Der Grund dafür ist hauptsächlich in der Tatsache zu suchen, dass es sich bei der ISHS-Methode um die deutsche bzw. europäische Normmethode (DIN EN 13041) handelt.

Nach Angaben von SCHMILEWSKI (1996) wird die DIN EN 13041 zukünftig als Grundlage für die europaweit einheitliche Deklaration von Substratausgangsstoffen und Kultursubstraten herangezogen. Daher ist es verständlich, dass eine Methode, die zukünftig eventuell physikalische Kennwerte zur freiwilligen Deklaration von Kultursubstraten in Form eines RAL Gütezeichens liefern soll, solche Werte produziert, die über möglichst enge Beziehungen zu den entsprechenden Kennwerten der Normmethode verfügen. Vor dem Hintergrund, dass bei einigen Substratherstellern der Exportanteil im Jahre 1999 bei 45 % der Jahresproduktion (FLORAGARD 2000) bzw. bei 80 % des Jahresumsatzes lag (KLASMANN 2001), sollte es selbstverständlich sein, dass ein deutsches (RAL) Gütezeichen über eine Deklaration verfügt, die der europaweit einheitlichen Deklaration nahe kommen sollte.

Trotz der Möglichkeiten, die die ISHS-Methode liefert, wird sie teilweise kontrovers diskutiert. Auf einige Aspekte dieser Diskussion wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

4.1.1 Möglichkeiten und Grenzen der ISHS-Methode

Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen haben gezeigt, dass der Luft- und Wasserhaushalt von Substraten in einem Topf bzw. Container u.a. auch von der Höhe und Geometrie der Kulturgefäße abhängig ist (BILDERBACK und FONTENO 1987; FONTENO 1989; RUTER und WERKEN 1991; SPOMER 1975 u.a.). Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich kurz nach einer Bewässerung oder einem Starkregen bei Freilandkulturen ein Gleichgewichtszustand im Kulturgefäß einstellt, bei dem kein Wasser mehr aus dem Gefäß tropft (= Wasserkapazität). Der Wassergehalt im Gefäß nimmt bei Wasserkapazität (= Zustand maximalen Wassergehalts) mit der Höhe des Gefäßes ab, da der Gefäßboden mit seinen Löchern, genau wie die Grundwasseroberfläche in Böden, die Bezugsgröße für die Wasserspannung

darstellt. Daher wird ein Substrat mit steigender Gefäßhöhe auch immer stärker entwässert. SPOMER (1979) macht diese Zusammenhänge am Beispiel eines Schwamms deutlich. In Abhängigkeit von der vertikalen Kantenlänge fließt unterschiedlich viel Wasser aus dem zuvor wassergesättigten Schwamm heraus. Im Gleichgewicht, wenn also kein Wasser mehr aus dem Schwamm fließt (= Wasserkapazität), nimmt der Wassergehalt im Schwamm von unten nach oben ab. Die Containerkapazität (WHITE und MASTALERZ 1966) gibt den Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 10 hPa an (siehe auch Tabelle 4.2). Eine solche Wasserspannung von 10 hPa herrscht an der Oberfläche des Substrats, das sich in einem 10 cm hohen Topf befindet. In einem 20 cm hohen Container charakterisiert die Containerkapazität allerdings nur den Wassergehalt in halber Höhe, an der Substratoberfläche ist das Substrat dann trockener, die Wasserspannung höher (20 hPa) und der Wassergehalt bei Wasserkapazität entsprechend geringer. Umgekehrt ist in Plugs und Trays mit kleinerer Höhe die Wasserspannung an der Substratoberfläche geringer und der Wassergehalt höher. Ein so geringer Wassergehalt wie ihn die Containerkapazität angibt, stellt sich in Plugs und Trays also nicht direkt nach Einstellung der Wasserkapazität (= Zustand maximalen Wassergehalts im Gleichgewicht) ein, sondern erst später, wenn durch Evapotranspirationsvorgänge der Wasservorrat im Substrat abnimmt. Das heißt also, dass die Containerkapazität den Wassergehalt bei Wasserkapazität in Gefäßen unter 10 cm Höhe unterschätzt und in Gefäßen über 10 cm Höhe überschätzt. Entsprechend wird der Luftgehalt in einem Substrat mit der Luftkapazität, die DE BOODT und DE WAELE (1968) für die Containerkapazität (Wasserspannung von 10 hPa) definiert haben (siehe Tabelle 4.2), in niedrigen Gefäßen überschätzt und in hohen Gefäßen unterschätzt (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Luftgefüllter Porenraum (**APR** [Vol. %]) eines Torf-Vermiculit Substrats (V+V = 1+1) in Abhängigkeit von Topfhöhe und – form. Die Größe der Töpfe ist angegeben in Durchmesser (oben) x Topfhöhe x Durchmesser (Boden), die Zellen der Trays sind in mittlerer Durchmesser x mittlere Höhe angegeben. Höhenangabe jeweils **fett** gedruckt (verändert nach FONTENO 1989; CARON und NKONGOLO 1999)

Topfgröße- bzw. Zellengröße des Tray [cm]	Bezeichnung des Topf bzw. Tray	APR [Vol. %]
15 x 14 x 10	Topf 15	19
10 x 10 x 7	Topf 10	12
4,7 x 5,6	Tray „bedding plant“	8
1,9 x 2,8	Plug	2
1,3 x 1,9	Waffle plug	<1

Die o.g. Sachverhalte sollten bei der Interpretation der in dieser Arbeit gefundenen Werte stets beachtet werden.

Dadurch dass die ISHS-Methode, im Gegensatz zur Q-Methode, die Wassergehalte bei Wasserspannungen von 0, 10, 50 und 100 hPa ermittelt, können Wasserspannungskurven erstellt werden, die es u.a. ermöglichen, den Wasser- und Lufthaushalt in Substraten in Abhängigkeit von der Höhe über dem Bezugsniveau für die Wasserspannung (= Gefäßboden) abzulesen (siehe dazu auch Abb. 3.13 – Abb. 3.24 im Kapitel 3.2.1.3). Die Q-Methode ermittelt dagegen nur den Wassergehalt bei einer mittleren Wasserspannung von 9 hPa, also streng genommen auch nicht die Containerkapazität, die bei 10 hPa ermittelt wird.

Außerdem bietet die mit der ISHS-Methode erstellte Wasserspannungskurve die Möglichkeit, die verfügbar speicherbare Wassermenge (AW) (siehe Tabelle 4.2) abzuschätzen. Bei diesem Wert handelt es sich um eine wichtige Kenngröße für eine an das Substrat angepasste Bewässerungsteuerung.

Tabelle 4.2: Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts von Kultursubstraten (nach BAILLY1989a, b; BOHNE et al. 1998; BRÜCKNER 1997; CARON und NKONGOLO 1999; DEBOODT und DEWAELE 1968; WHITE und MASTALERZ 1966; WREDE 1999) (vergleiche auch Tabelle 2.8)

Kennwert	Einheit	Definition
Porenvolumen (PV)	Vol. %	Anteil des Substratvolumens, der nicht von der Festsubstanz eingenommen wird, also mit Wasser und Luft gefüllt ist
Containerkapazität (CC)	Vol. %	Anteil des Porenvolumens, der bei einer Wasserspannung von 10 hPa mit Wasser gefüllt ist
Wasserkapazität (WC)	Vol. %	Wassergehalt im Gleichgewichtszustand, bei dem nach Bewässerung oder Starkregen kein Wasser mehr aus dem Substrat nach unten austropft. Nimmt mit zunehmender Höhe über dem Bezugsniveau für die Wasserspannung (= Gefäßboden) ab. In dieser Arbeit entspricht die Wasserkapazität dem Wassergehalt, der mit der Q-Methode ermittelt wurde, also in einer Höhe von 9 cm bzw. bei einer Wasserspannung von 9 hPa
Verfügbares Wasser (AW)	Vol. %	Wasseranteil, den ein Substrat zwischen 10 hPa und 100 hPa Wasserspannung speichern kann
Leicht verfügbares Wasser (EAW)	Vol. %	Wasseranteil, den ein Substrat zwischen 10 und 50 hPa Wasserspannung speichern kann
Schwerer verfügbares Wasser (LRAW)	Vol. %	Wasseranteil, den ein Substrat zwischen 50 hPa und 100 hPa Wasserspannung speichern kann
Luftkapazität (AC)	Vol. %	Anteil des Porenvolumens, der bei einer Wasserspannung von 10 hPa, also bei Containerkapazität, mit Luft gefüllt ist

Die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushaltes sind jedoch nicht nur von Containerhöhe und -geometrie abhängig, sondern auch von der Handhabung der Substrate beim Topfen und im Verlauf der Kultur, also der Lagerungsdichte bzw. dem Volumengewicht ($\text{dB} [\text{g} / \text{cm}^3]$), das sich im Topf bzw. Container durch die Kulturmaßnahmen einstellt (u.a. BOHNE et al. 1998; BRÜCKNER 1994; FONTENO 1993; WREDE und BOHNE 2000b). Daher ist es notwendig, bei der Untersuchung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts die Bedingungen im Topf- bzw. Container, wie sie beim Gärtner vorkommen, zu berücksichtigen, was die ISHS-Methode nicht kann. Vielmehr wird bei der ISHS-Methode das Substrat nach der Vorentwässerung bei 50 hPa ohne gezielte Einstellung eines Volumengewichts in die Doppelzylinder eingefüllt (siehe Tabelle 2.9). Erst im Verlauf der Untersuchung stellt sich durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder ein Volumengewicht (dB_E) ein, das zum Ende der Messung, also nach der Entwässerung auf der Unterdruckanlage erfasst wird. Da es sich dabei um ein zufällig eingestelltes Volumengewicht handelt, ist es fraglich, ob es wirklich dem Volumengewicht entspricht, das beim Gärtner in den Töpfen und Containern zu finden ist. Da das Volumengewicht (dB_E), das sich zum Ende der Messung im Probenzylinder einstellt, zur Berechnung aller Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts dient, die sich auf das Volumen beziehen (siehe Tabelle 4.2), sollte dB_E möglichst dem Volumengewicht im Topf des Gärtners (= Topffestigkeit) entsprechen (CARON und NKONGOLO 1999). PAQUET et al. (1993) konnten mit einer *in situ* – Bestimmung einer Wasserspannungskurve den Unterschied zwischen den physikalischen Kennwerten von gestörten Substratproben, die also die Topffestigkeit des Gärtners nicht beachten, und ungestörten Substratproben aufzeigen, bei denen die Topffestigkeit beachtet wird. Nicht zuletzt aus diesem Grund wurde von BOHNE et al. (1998) sowie WREDE und BOHNE (2000b) die M-ISHS-Methode entwickelt (siehe auch Kapitel 4.2). Die gleichen Überlegungen führten außerdem dazu, dass auch die Q-Methode mit einem gezielt eingestellten Volumengewicht arbeitet (siehe Kapitel 4.3).

Abschließend soll noch auf die Ermittlungsmethode des Porenvolumens eingegangen werden. Um das Gesamtporenvolumen (PV) mit der ISHS-Methode bestimmen zu können, ist es notwendig, den Gehalt an organischer Substanz und Asche (= Gehalt an mineralischer Substanz) nach kontrollierter Verbrennung (trockene Veraschung) bei 550 °C (DIN EN 13039 und DIN 11540) zu bestimmen. Aus den Massenanteilen wird dann die Dichte der Festsubstanz (dF) berechnet (siehe Kapitel 2.1.1.3 Formeln 1, 2, 3).

Diese indirekte Ermittlungsmethode wurde ursprünglich für Torfe entwickelt, also für nahezu rein organische Substrate. Da die modernen Kultursubstrate aber über größere Anteile an mineralischer Substanz verfügen (z.B. Ton), wird bei der Veraschung auch ein Teil des Kristallwassers der Tonminerale entfernt und als Glühverlust erfasst. So kommt es zur Überschätzung des Gehalts an organischer Substanz, wodurch die Dichte der Festsubstanz sowie das daraus ermittelte Porenvolumen (PV) unterschätzt werden (siehe Formeln 1, 2, 3 und 7).

Ein anderer Weg zur Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (d_F) führt über die Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes, der dann über Umrechnungsfaktoren in organische Substanz umgerechnet wird. Diese Umrechnungsfaktoren sind abhängig vom jeweils bestimmten Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz. Erste Untersuchungen von BOHNE (2000) mit zwei tonhaltigen Substraten ergaben, dass die Dichte der Festsubstanz bei der trockenen Veraschung zwar tatsächlich kleiner war als bei der Kohlenstoffbestimmung, jedoch war der Unterschied mit $0,13 \text{ g/l}$ sehr gering. Weitere vergleichende Untersuchungen müssen also klären, ob es durch die trockene Veraschung von Substraten tatsächlich zur Unterschätzung von d_F und damit auch von PV kommt. Wenn das der Fall sein sollte, so ist die nächste Frage, wie groß dieser Fehler ist. Ein Fehler in der o.g. Größenordnung ist vor dem Hintergrund der anderen möglichen Fehlerquellen bei der Bestimmung von PV (z.B. die Ermittlung der Lagerungsdichte im Probengefäß zum Ende der Messung bei 10 hPa ($d_{B_{E10}}$) siehe Formel 7) zu vernachlässigen.

Da in dieser Arbeit die ermittelte Dichte der Festsubstanz (d_F) nur einmal für alle Substrate ermittelt wurde und damit zur Berechnung des Porenvolumens (PV) des jeweiligen Substrats bei allen drei Methoden herangezogen wurde, ist ein eventueller Fehler hier auf jeden Fall zu vernachlässigen.

4.2 Die M-ISHS-Methode

4.2.1 Möglichkeiten und Grenzen

Die aus der ISHS-Methode durch Modifizierung hervorgegangene M-ISHS-Methode bietet gegenüber der ISHS-Methode den großen Vorteil, dass bei der Ermittlung von Wasserspannungskurven ein gezielt eingestelltes Volumengewicht (d_{B_A}) beachtet werden kann. Im Idealfall sollte der Gärtner, der seine Substratproben zur physikalischen Analyse an ein entsprechend ausgestattetes Labor schickt, die Lagerungsdichte (= Volumengewicht bzw. Topffestigkeit) des Substrates in seinen Töpfen bzw.

Containern durch Topfproben ohne Pflanzen ermittelt haben und dem Substrat als wichtige Information zur Probe beifügen (siehe auch WREDE et al. 1999, die eine Anleitung zur Bestimmung der Topffestigkeit geben). In diesem Fall kann genau die Topffestigkeit als Volumengewicht im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A) bei der Untersuchung mit der M-ISHS-Methode beachtet werden.

Die nach dem Topfen und dem anschließenden Angießen der frisch getopften Kultur eintretende Sackung im Topf, die auch zu einer Erhöhung des Volumengewichts im Topf / Container führt (u.a. MILKS et al. 1989c), wird bei der M-ISHS-Methode durch die Wassersättigung der Substratproben, durch die es auch zu einer Sackung der Probe im Probenzylinder kommt, in Ansätzen nachvollzogen. Damit sollte man erwarten können, dass der dB_E -Wert (Volumengewicht), der sich im Probenzylinder zum Ende der Messung mit der M-ISHS-Methode einstellt, einen engeren Bezug zu der tatsächlich beim Gärtner vorliegenden Topffestigkeit hat, die sich nach dem Angießen der Kultur einstellt, als der entsprechende dB_E -Wert bei der ISHS-Methode. Da, wie schon häufig erwähnt wurde, das Volumengewicht die Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts beeinflusst (FONTENO 1993; NKONGOLO und CARON 1999 u.a.), ist davon auszugehen, dass die mit der M-ISHS-Methode ermittelten physikalischen Kennwerte, bei gezielter Einstellung der vom jeweiligen Gärtner selbst ermittelten Topffestigkeit, die tatsächlichen Verhältnisse im Topf des Gärtners besser wiedergeben als die entsprechenden Werte der ISHS-Methode. In wieweit das Volumengewicht im Probenzylinder der M-ISHS-Methode zum Ende der Messung (dB_E) tatsächlich eine engere Beziehung zu den Verhältnissen im Topf bzw. Container beim Gärtner hat, kann nach den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit jedoch nicht beurteilt werden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit kann allerdings sehr wohl geschlossen werden, dass sich die hier sogenannte dB_A -Variante Topffest (= „praxisübliche Topffestigkeit“) auf Grund der weiten Streuung der Werte (siehe Standardabweichung (s) in den Tabellen 3.3 und 3.4) als nicht reproduzierbares Verfahren zur Ermittlung von dB_A herausgestellt hat. Offenbar gibt es keinen reproduzierbaren und repräsentativen Wert für die wirkliche Topffestigkeit. Außerdem ist zu bedenken, dass nicht das Volumengewicht zum Anfang der Messung im Probenzylinder (dB_A) der wichtige Wert ist, mit dem auch die physikalischen Kennwerte berechnet werden, sondern das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E). Damit die Bedingungen im Topf bzw. Container des Gärtners bei der Messung mit der M-ISHS-Methode möglichst genau getroffen werden, ist es daher notwendig, ein Verfahren

zur Einstellung von dB_A im Probenzylinder zu ermitteln, mit dem das resultierende Volumengewicht zum Ende der Messung (dB_E), über eine möglichst enge Beziehung zur tatsächlichen Topffestigkeit beim Gärtner verfügt.

Nach Ergebnissen von HEISKANEN (1995) führt die Trocknung von mittelgroben finnischen Torfs und einer Torf-Perlite-Mischung auf eine Wasserspannung von 50 hPa zu einer Schrumpfung auf 78 – 82 % des ursprünglichen Volumens bei dem Torf und auf 89 – 92 % bei der Torf-Perlite-Mischung. Übertragen auf die ISHS-Methode und die M-ISHS-Methode könnte dieses Ergebnis von HEISKANEN (1995) bedeuten, dass die Vorentwässerung der Substratproben bei 50 hPa im Laufe der ISHS-Methode zu einer Schrumpfung im Substrat führt, die weitaus stärker ist, als die im Zeitraum zwischen Topftermin und dem Ende des Angießens der frisch getopften Kultur eintretende Schrumpfung im Topf beim Gärtner. Ein Nachteil der ISHS-Methode könnte demnach darin zu sehen sein, dass hier geschrumpftes Substrat in die Probenzylinder zur Messung eingebaut wird, wovon zum Topftermin beim Gärtner nicht ausgegangen werden kann. Da dieser Schritt der Vorentwässerung bei der M-ISHS-Methode fehlt, erscheint es daher möglich, dass der Zustand des Substrats bei der Untersuchung mit der M-ISHS-Methode eher die Bedingungen beim Gärtner aufgreift, als die ISHS-Methode.

Aufgrund der o.g. Überlegungen sind BOHNE et al. (1998), WREDE et al. (1999) und WREDE und BOHNE (2000a, b) davon ausgegangen, dass die mit der M-ISHS-Methode ermittelten Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts der Substrate eher den Bedingungen entsprechen, die im Topf / Container beim Gärtner vorliegen, als die der ISHS-Methode. Daher gehen sie auch weiter davon aus, dass sich die mit der M-ISHS-Methode ermittelten Kennwerte besser zur von ihnen sogenannten „substratangepassten Steuerung einer Bewässerung“ eignen, als die entsprechenden Werte auf Basis der ISHS-Methode.

In den folgenden Kapiteln wird auf einzelne physikalische Kennwerte, die mit beiden Untersuchungsmethoden gesammelt wurden, nochmals genauer eingegangen.

4.2.2 Das Volumengewicht zum Anfang (dB_A) und zum Ende der Messung (dB_E)

In Anbetracht der Zusammenhänge zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder, das zu Anfang der Messung mit der M-ISHS-Methode eingestellt wird (dB_A) und dem Volumengewicht, das sich zum Ende der Messung im Probenzylinder

eingestellt hat (dB_E), erscheint die Frage interessant, bei welcher der zwei getesteten Varianten von dB_A eine engere Beziehung zu dem dB_E -Wert besteht, d.h. mit welcher Variante von dB_A im Verlauf der Untersuchung mit der M-ISHS-Methode ein stärkerer Einfluss auf dB_E genommen werden konnte (siehe Abb. 4.1 und 4.2).

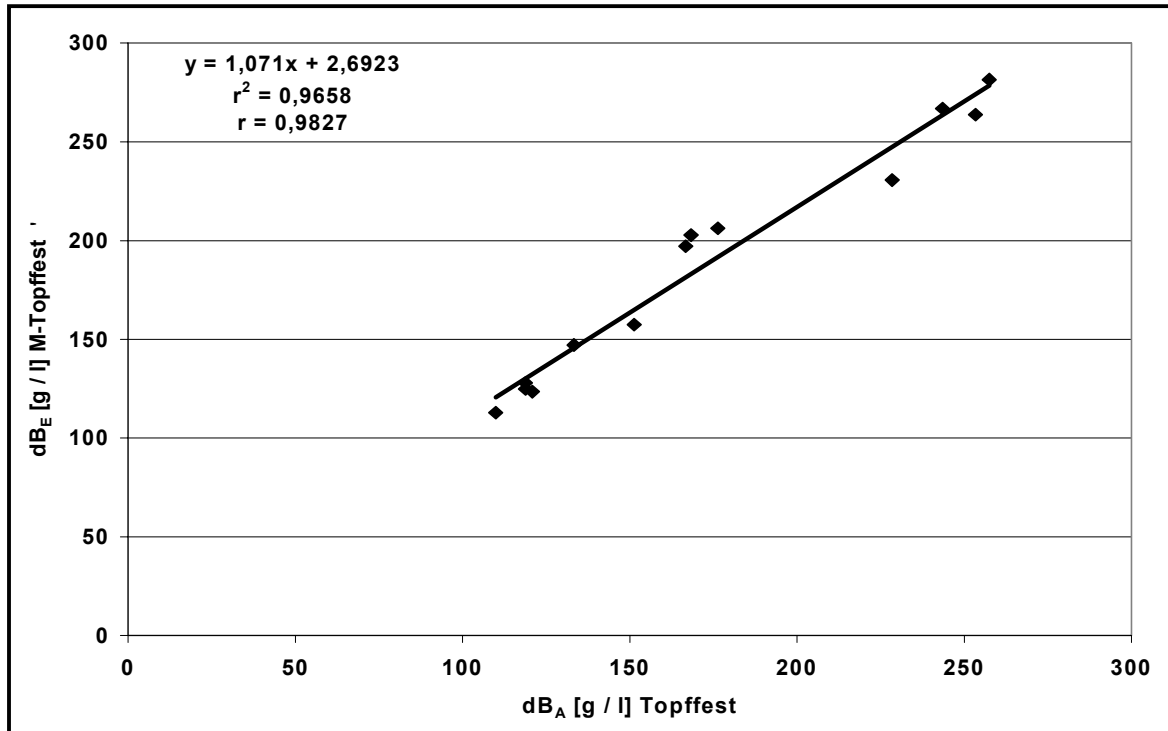


Abb. 4.1: Beziehung zwischen der zum Anfang der Messung im Probenzylinder der M-ISHS-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] Topffest) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] M-Topffest) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Es ist ersichtlich, dass die Variante Topffest (Abb. 4.1) über einen etwas höheren Korrelationskoeffizienten (r) zwischen dB_A und dB_E verfügt als die Variante VDLUFA (Abb. 4.2). Außerdem offenbaren die Gleichungen der Regressionsgeraden, dass sich die Werte von dB_A und dB_E der Variante Topffest weniger stark unterscheiden als die der Variante VDLUFA. Der Unterschied beider Varianten ist jedoch so gering, dass nicht zwingend von einer engeren Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A) und dem Volumengewicht zum Ende der Messung (dB_E) bei der Variante Topffest der M-ISHS-Methode ausgegangen werden kann.

Die Betrachtung der dB_E -Werte der beiden Varianten der M-ISHS-Methode und der ISHS-Methode offenbart das in Tabelle 4.3 dargestellte Bild. In sieben Fällen liefert die Variante Topffest den höchsten dB_E -Wert, in jeweils drei Fällen die Variante VDLUFA und die ISHS-Methode.

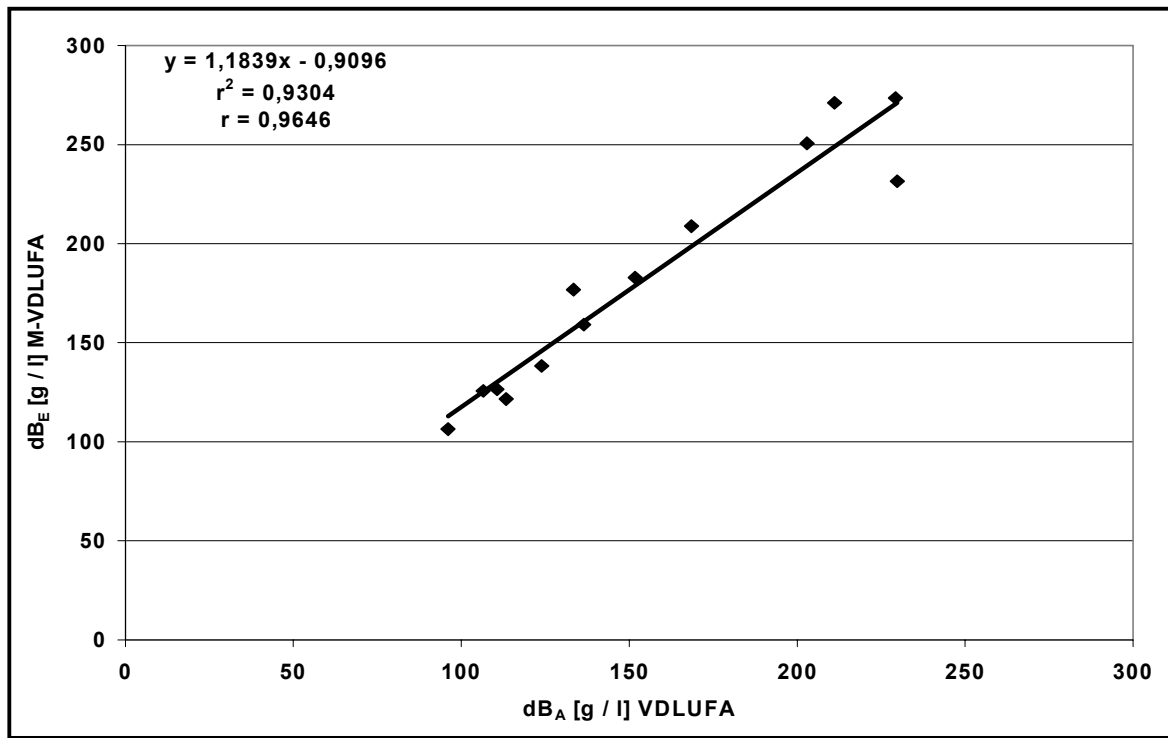


Abb. 4.2: Beziehung zwischen der zum Anfang der Messung im Probenzylinder der M-ISHS-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] M-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Tabelle 4.3: Vergleich der Volumengewichte im Probenzylinder zum Ende der Messung mit der ISHS-Methode (dB_E – ISHS), mit der M-ISHS-Methode Variante Topffest (dB_E -M-ISHS-T) und mit der M-ISHS-Methode Variante VDLUFA (dB_E -M-ISHS-VD). Maxima sind jeweils **fett** gedruckt

Substrat	dB_E – ISHS [g / l]	dB_E -M-ISHS-T [g / l]	dB_E -M-ISHS-VD [g / l]
EP	254,6	263,8	205,6
EPr	273,9	281,4	271,0
ET	251,8	266,9	273,5
CF	123,8	128,0	121,5
PH	163,8	157,4	159,1
FT	200,7	206,1	208,8
RK	239,4	230,6	231,6
ST	182,8	197,1	176,8
SV	183,7	202,7	182,9
SW1	126,0	123,5	126,5
SW3	128,2	124,8	125,7
T1	129,5	147,1	138,2
T2	95,7	112,9	106,4
Summe	3	7	3
Maxima			

Der Vergleich der dB_E -Werte der ISHS-Methode und der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) zeigt, dass in neun von dreizehn Fällen die M-ISHS-Methode (Topffest) die höheren Werte für dB_E aufweist (siehe auch Kapitel 3.4.1). FRESE (1998) kommt in seiner Arbeit mit 10 Substraten dagegen zu einem ganz anderen Ergebnis. In acht von 10 Fällen liefert die ISHS-Methode bei FRESE (1998) die höheren dB_E -Werte. Eine mögliche Erklärung für die gegensätzlichen Ergebnisse dieser und der Arbeit von FRESE (1998) könnte in dem individuellen Fehler bei Erfassung der Fehlstelle im Probenzylinder der M-ISHS-Methode liegen. Entweder wurde die Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder der M-ISHS-Methode bei FRESE (1998) unterschätzt oder aber in dieser Arbeit überschätzt. Die Arbeit von KISTNER (2000), die ebenfalls mit den Substraten EP, EPr, ET und CF durchgeführt wurde, bestätigt bei den Substraten CF und EP die in dieser Arbeit gefundene Tendenz, dass dB_E bei der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) höher ist als bei der ISHS-Methode und widerspricht der hier gefundenen Tendenz bei den Substraten EPr und ET. Die Erklärung könnte auch hier im individuellen Fehler bei der Erfassung der Fehlstelle liegen.

Im Zusammenhang mit den Volumengewichten im Probenzylinder der M-ISHS-Methode zum Ende der Messung (dB_E), ist auch ein Vergleich mit den entsprechenden Varianten (Topffest und VDLUFA) bei der Q-Methode interessant

Tabelle 4.4: Vergleich der Werte für das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) bei den Varianten Topffest und VDLUFA der Q-Methode (**Q-Topffest** und **Q-VDLUFA**) und der M-ISHS-Methode (**M-Topffest** und **M-VDLUFA**). Maxima sind jeweils **fett** gedruckt

Substrat	Q-Topffest dB_E [g / l]	Q-VDLUFA dB_E [g / l]	M-Topffest dB_E [g / l]	M-VDLUFA dB_E [g / l]
EP	253,7	244,2	263,8	250,6
EPr	257,9	281,3	281,4	271,0
ET	244,1	273,2	266,9	273,5
CF	118,9	126,2	128,0	122,5
PH	165,2	165,8	157,4	159,1
FT	193,4	216,8	206,1	208,8
RK	240,4	232,9	230,6	231,6
ST	189,9	181,3	197,1	176,8
SV	193,5	181,0	202,7	182,9
SW1	130,1	131,6	123,5	126,5
SW3	129,8	135,7	124,8	125,7
T1	144,4	132,5	147,1	138,2
T2	124,1	113,4	112,9	106,4

(siehe Tabelle 4.4). Es wird deutlich, dass 10 von 13 Substraten (Ausnahmen EPr, CF, RK) sowohl bei der M-ISHS-Methode als auch bei der Q-Methode den gleichen Trend aufweisen. Die Variante VDLUFA führt also bei fünf Substraten (ET, PH, FT, SW1, SW3) mit der Q- und mit der M-ISHS-Methode zu den höheren dB_E -Werten sowie in weiteren fünf Fällen (EP, ST, SV, T1, T2) bei beiden Methoden zu den niedrigeren Werten für dB_E . Eine entsprechende Aussage lässt sich auch für die Variante Topffest formulieren. Daher kann offenbar geschlossen werden, dass sich in 77 % der Fälle die beiden Varianten des Volumengewichts dB_A bezüglich des von ihnen beeinflussten dB_E -Werts bei beiden Methoden (M-ISHS-Methode und Q-Methode) vergleichbar verhalten, was auch durch die hohen Korrelationskoeffizienten (r) untermauert werden kann, die zwischen den dB_E -Werten der M-ISHS- und der Q-Methode im Falle der Variante Topffest (siehe Abb. 4.3) und im Falle der Variante VDLUFA (siehe Abb. 4.4) errechnet werden konnten. Sie unterstreichen die enge Beziehung der dB_E -Werte zwischen beiden Methoden bei der jeweiligen Variante von dB_A (Topffest und VDLUFA), die bei der Variante Topffest mit $r = 0,987$ nur unwesentlich weiter ist als bei der Variante VDLUFA mit $r = 0,990$. Daneben sind die

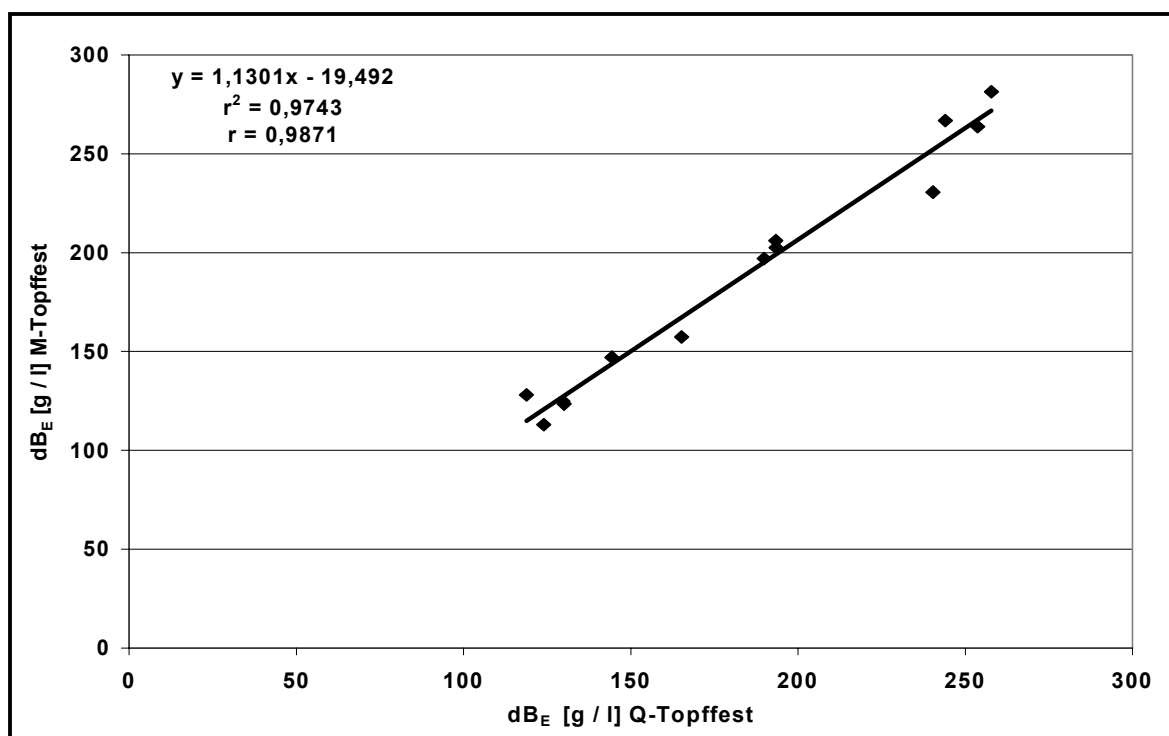


Abb. 4.3: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) der Q-Methode (**dB_E [g / l] Q-Topffest**) und dem eingestellten Volumengewicht zum Ende der Messung der M-ISHS-Methode (**dB_E [g / l] M-Topffest**) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

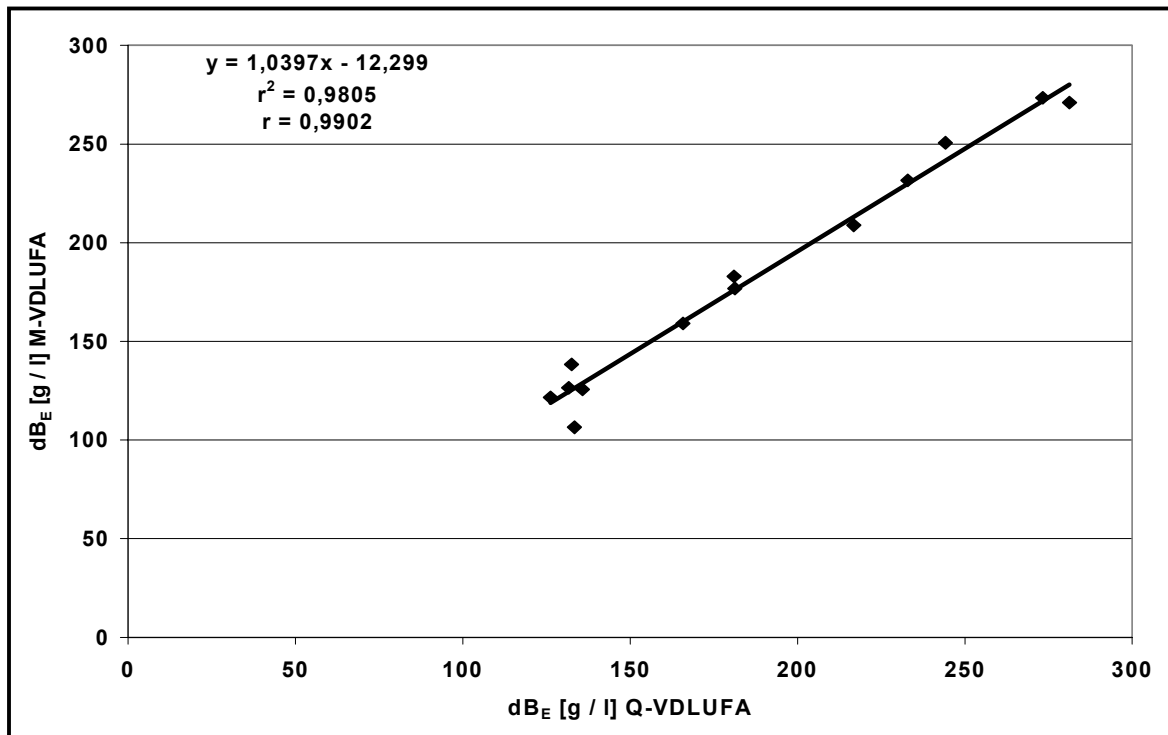


Abb. 4.4: Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) der Q-Methode (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) und dem eingestellten Volumengewicht zum Ende der Messung der M-ISHS-Methode (dB_E [g / l] M-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Unterschiede der dB_E -Werte zwischen der Q-Methode und der M-ISHS-Methode bei bei beiden Varianten relativ groß (siehe Gleichungen der Regressionsgeraden in Abb. 4.3 und 4.4), wobei sie bei VDLUFA etwas kleiner ist als bei Topffest. Trotzdem kann aufgrund der engen Beziehung der dB_E -Werte bei beiden Methoden davon ausgegangen werden, dass die Q-Methode hinsichtlich der dB_E -Werte bei den untersuchten Varianten, unter Berücksichtigung der mathematischen Zusammenhänge (Regressionsgerade), zu vergleichbaren Ergebnissen kommt wie die M-ISHS-Methode.

Im Gegensatz zur Q-Methode stand bei der M-ISHS-Methode jedoch nicht die Frage nach der Variante von dB_A im Vordergrund, die zu einem dB_E -Wert mit besonders enger Beziehung zum dB_E -Wert der ISHS-Methode führt. Außerdem war im Zusammenhang mit der M-ISHS-Methode auch die Beantwortung der Frage nach der dB_A -Variante nebensächlich, die das größte Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) erzeugt. Vielmehr ging es um die Klärung der Frage, ob überhaupt eine enge Beziehung zwischen dB_A und dB_E existiert., d.h. kann eine beliebige Variante des Volumengewichts dB_A das Volumengewicht dB_E gezielt beeinflussen? Genau wie es in den Abb. 3.44 bis 3.50 für die Q-Methode gezeigt

werden konnte, besteht auch bei der M-ISHS-Methode eine ausgesprochen enge Beziehung zwischen dB_A und dB_E bei den bisher getesteten Varianten von dB_A (Topffest und VDLUFA), wobei bei der Variante Topffest die engere Beziehung und die kleinere Differenz zwischen dB_A und dB_E gefunden werden konnte (siehe Abb. 4.1 und 4.2).

Da die physikalischen Kennwerte von Substraten von sehr vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig sind, wie z.B. Topfhöhe und –geometrie, Bewässerungssystem, Korngrößenverteilung, Strukturstabilität (AENDEKERK 1997; CATTIVELLO et al. 1997; DRZAL et al. 1999; MICHIELS 1993; MILKS et al. 1989c), kann es die repräsentativen und reproduzierbaren Bedingungen im Topf bzw. Container, also auch die Topffestigkeit, nicht geben, von der in dieser Arbeit mit der dB_A -Variante Topffest zunächst ausgegangen wurde. In einem nächsten Untersuchungsschritt sollten daher repräsentativere, praxisrelevantere Ermittlungswege für die Variante(n) von dB_A gesucht werden, die die jeweiligen Bedingung(en) in den Töpfen und Containern der gärtnerischen Praxis besser wiedergeben, als die hier verwendete Variante Topffest. Hinsichtlich Differenz und Korrelation zum bewirkten dB_E -Wert sollte(n) diese neue(n) dB_A -Variante(n) jedoch der hier verwendeten Variante Topffest entsprechen.

4.2.3 Die Luftkapazität (AC)

Vor dem Hintergrund der in Tabelle 4.3 zusammengestellten Ergebnisse für das Volumengewicht im Probenzylinder der ISHS- bzw. der M-ISHS-Methode zum Ende der Messung (dB_E) und der Erwartung, dass die Luftkapazität (AC) mit steigendem Volumengewicht abnimmt (z.B. KAEMPF et al.; 1999, SWANSON 1989), verwundern die in Abbildungen 4.5 und 4.6 zusammengestellten Werte der Luftkapazität. Obwohl die Variante Topffest der M-ISHS-Methode in sieben Fällen (EP, EPr, CF, ST, SV, T1, T2) im Vergleich zu der Variante VDLUFA und der ISHS-Methode den größten dB_E -Wert liefert, führt Topffest nur bei den Substraten EPr, CF, ST, SV und T1 auch tatsächlich zur kleinsten Luftkapazität (AC). Für die Substrate RK und FT konnten bei der Variante Topffest zwar die kleinsten AC-Werte festgestellt werden, in diesen Fällen konnten die entsprechenden Volumengewichte (dB_E) jedoch lediglich als zweitgrößter (FT) bzw. als kleinster (RK) Wert klassifiziert werden.

Ähnliche Beispiele finden sich jedoch nicht nur in dieser Arbeit. So konnte auch KISTNER (2000) bei den Substraten CF und EPr eine Ausnahme von der oft dokumentierten Beobachtung registrieren, dass die Luftkapazität (AC) mit steigendem Vo-

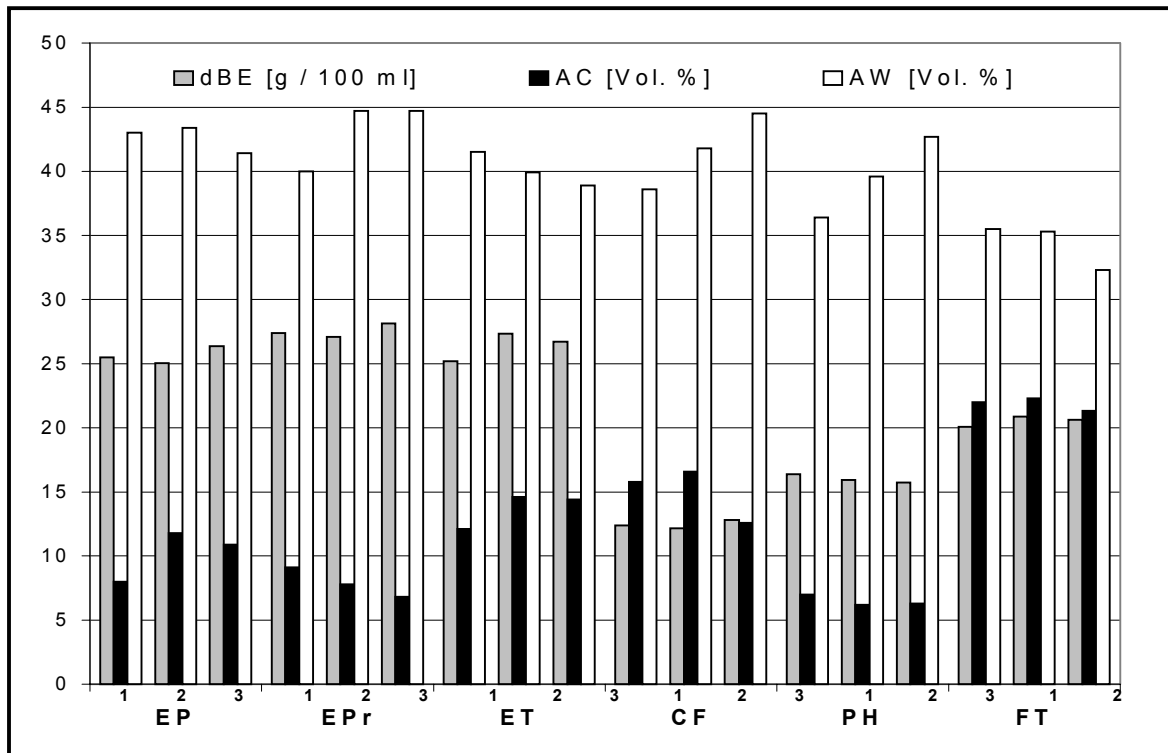


Abb. 4.5: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / 100 ml]), Luftkapazität (AC [Vol. %]) und verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) von sechs der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode (1 = ISHS-Methode; 2 = M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA); 3 = M-ISHS-Methode (Variante Topffest)(n = 4)

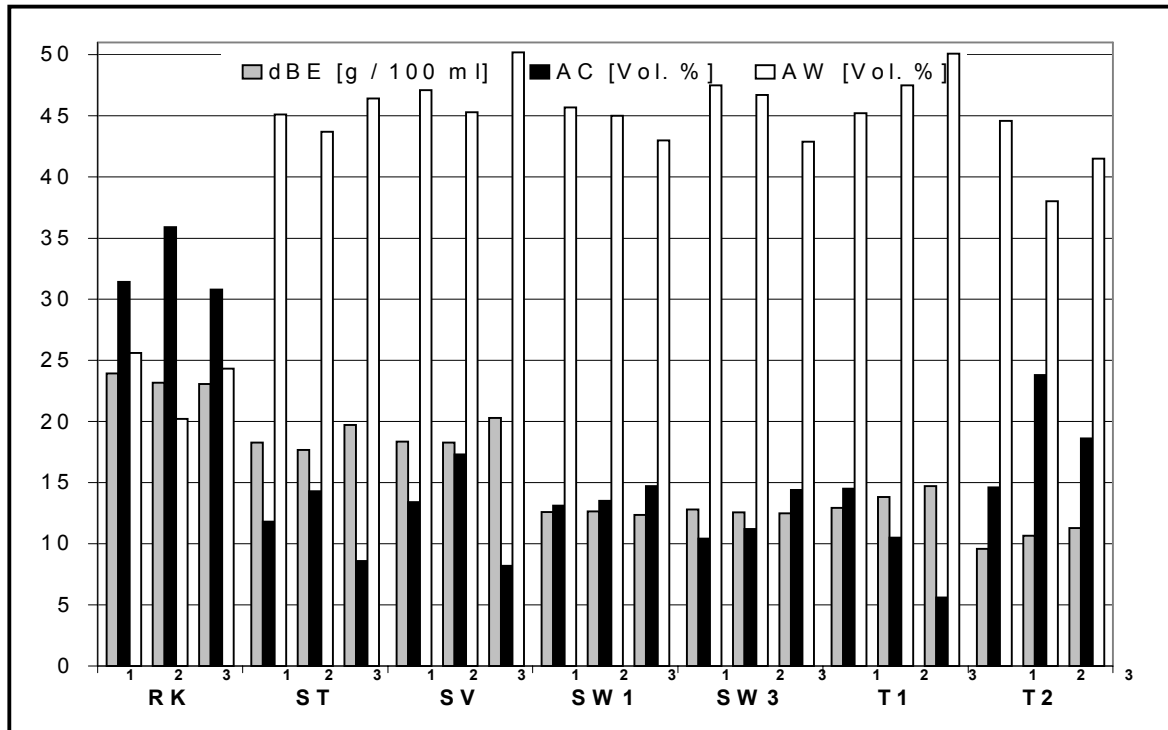


Abb. 4.6: Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / 100 ml]), Luftkapazität (AC [Vol. %]) und verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) von sieben der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode (1 = ISHS-Methode; 2 = M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA); 3 = M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (n = 4)

lumengewicht des Substrats im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) abnimmt. Um die hier gefundenen Ergebnisse (Abb. 4.5 und 4.6) richtig werten zu können, sollte der in der Literatur häufig dokumentierte Zusammenhang hinterfragt werden.

Als erstes sollten die betroffenen Substrate betrachtet werden. Wie aus den Abbildungen 4.5 und 4.6 entnommen werden kann, zeigen die Substrate EP, ET, PH, FT, RK, SW1 und T2 das unerwartete Verhalten. Ein Blick in die Tabelle 2.1 zeigt, dass es sich bei den Substraten EP, ET, FT und RK um Substrate handelt, die zwischen 15 und 30 Vol % Feuchttton enthalten. Dieser Ton ist teilweise in großen Stücken im Substrat enthalten. Wenn bei einer Messung ein größeres Stück Ton in den Probenzylinder gelangt ist, so steigt das Volumengewicht stark an, ohne dass dadurch die Luftkapazität ähnlich stark sinken müsste. Offenbar ist die von SPOMER (1974) sogenannte „threshold proportion“ (Schwellenwert bzw. kritische Menge) des Tons noch nicht überschritten, ab der er sich auf die Porengrößenverteilung auswirkt.

Als nächstes muss festgestellt werden, dass die in den Abbildungen 4.5 und 4.6 verglichenen Werte mit drei unterschiedlichen Methoden gesammelt wurden.

Die ISHS-Methode unterscheidet sich besonders durch die Vorentwässerung der Substratprobe bei 50 hPa und die Einstellung (Vermeidung von künstlicher Verdichtung) einer Lagerungsdichte im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A) von der M-ISHS-Methode. Auf den Einfluss, den die Vorentwässerung von 50 hPa durch Schrumpfung auf die Eigenschaften eines Substrats haben kann, wurde schon unter Verweis auf die Ergebnisse von HEISKANEN (1995) im Kapitel 4.1 eingegangen.

Daneben unterscheiden sich aber auch beide Varianten der M-ISHS-Methode in der Art der Einstellung des Volumengewichts (dB_A) voneinander, da gerade die unterschiedlichen dB_A -Werte die Varianten charakterisieren.

Daher muss davon ausgegangen werden, dass sich die drei Methoden besonders in der Art und Weise, wie sich im Verlauf der Messung das Volumengewicht im Probenzylinder (dB_E) einstellt, unterscheiden. Im Fall der ISHS-Methode führen hauptsächlich Sackungs- und Schrumpfungsvorgänge im Probenzylinder zur Einstellung von dB_E . Die beiden Varianten der M-ISHS-Methode unterscheiden sich durch unterschiedlich hohe Volumengewichte im Probenzylinder zu Anfang der Messung (dB_A). Je niedriger dB_A ist, desto größer ist der Anteil von Sackung und Schrumpfung im Verlauf der Messung, der für die Einstellung des Volumengewichts zum Ende der Messung dB_E verantwortlich ist.

Um die gefundenen Ergebnisse erklären zu können, liegt daher die Vermutung nahe, dass sich auch die unterschiedliche Art und Weise der Einstellung von dB_E im Verlauf der Messung auf die resultierende Porengrößenverteilung auswirkt. Diese entscheidet darüber, welcher Porenanteil bei einer bestimmten Wasserspannung im Substrat mit Wasser gefüllt ist und welcher mit Luft, also auch wie groß die Luftkapazität bei einer Wasserspannung von 10 hPa ist (HARTGE und HORN 1999; VERDONCK und PENNINCK 1986). Ob die Art und Weise, wie es zur Einstellung eines Volumengewichts kommt, wirklich Einfluss auf die resultierende Porengrößenverteilung hat, ist eine Frage, der in gesonderten Versuchen nachgegangen werden sollte. Weitere Gründe für das unerwartete Verhalten der Substrate könnten in der unzureichenden Benetzung der Substrate liegen. Dadurch kommt es zu einer Unterschätzung der Containerkapazität (CC) und zu einer Überschätzung der Luftkapazität (AC). Gleichzeitig sind sowohl das Volumengewicht (dB_E) als auch das Porenvolumen (PV) davon nicht beeinflusst, da beide Größen sich nur auf das trockene Substrat beziehen, das bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurde. Schon im Verlauf der Vorstellung der Ergebnisse, die mit der Q-Methode gesammelt wurden, wurde auf die Probleme bei der Wiederbenetzung nach langer Lagerdauer der Substrate hingewiesen.

Daneben könnte auch ein mangelnder Kontakt der Probenzylinder zur Unterdruckanlage zum Abreißen der Wassersäule geführt haben. Gerade die Probenzylinder mit dem Haltering für die Gaze (siehe Abb. 2.2) sind dafür anfällig, sobald der Haltering für die Gaze nicht richtig auf den Probenzylinder aufgeschoben wurde. Das könnte dazu führen, dass die Proben nicht auf der Gaze stehen, sondern auf dem Haltering. Daher konnte die Wasserspannung in der Probe nicht mit dem angelegten Unterdruck ins Gleichgewicht gebracht werden. Das würde bedeuten, dass es zu einer Überschätzung der Containerkapazität (CC) und zur Unterschätzung der Luftkapazität (AC) gekommen ist, wobei Porenvolumen und Volumengewicht davon wieder unbeeinflusst sind.

Ein Vergleich zwischen den Werten der Luftkapazität (AC), die mit Hilfe der entsprechenden Varianten der Q-Methode ermittelt wurden (Topffest und VDLUFA), zeigt die Tabelle 4.5.

Sowohl bei der Q-Methode als auch bei der M-ISHS-Methode führt die Variante Topffest zu jeweils 3 Höchstwerten für die Luftkapazität (AC), die Variante VDLUFA bei jeweils 10 Substraten. Allerdings verhalten sich die beiden Varianten nicht bei

den jeweils entsprechenden Substraten gleich. Bezogen auf die Variante Topffest heißt das, dass Topffest lediglich bei neun von 13 Substraten sowohl bei der M-ISHS-Methode als auch bei der Q-Methode den gleichen Trend zeigt. Bei acht Substraten führt sie bei beiden Methoden jeweils zur kleineren (EP, CF, FT, RK, ST, T1, T2) und in einem Fall (SW1) zur größeren Luftkapazität (AC). Eine sinngemäße

Tabelle 4.5: Vergleich der Werte für die Luftkapazität (**AC [Vol. %]**) bei den Varianten Topffest und VDLUFA der Q-Methode (**AC-Q-Topffest** und **AC-Q-VDLUFA**) und der M-ISHS-Methode (**AC-M-Topffest** und **AC-M-VDLUFA**). Maxima sind jeweils **fett** gedruckt

Substrat	AC-Q-Topffest [Vol. %]	AC-Q-VDLUFA [Vol. %]	AC-M-Topffest [Vol. %]	AC-M-VDLUFA [Vol. %]
EP	13,2	15,9	10,9	11,8
EPr	16,1	6,5	6,8	7,8
ET	18,8	16,1	14,4	14,6
CF	21,1	23,2	12,6	16,6
PH	1,5	6,4	6,3	6,2
FT	19,1	27,4	21,3	22,3
RK	27,8	33,7	30,8	35,9
ST	14,6	20,7	8,6	14,3
SV	10,2	16,3	8,2	17,3
SW1	17,0	15,8	14,7	13,5
SW3	12,7	13,6	14,4	11,2
T1	8,9	25,3	5,6	10,5
T2	19,0	29,2	18,6	23,8

Feststellung kann auch im Fall der Variante VDLUFA gemacht werden (siehe Tabelle 4.5). Aus diesen Ergebnissen sollte geschlossen werden können, dass sich beide Varianten, genau wie zuvor im Fall von dB_E , auch im Fall der Luftkapazität (AC) sowohl bei der M-ISHS-Methode als auch bei der Q-Methode jeweils vergleichbar verhalten. Da es sich im Fall der Luftkapazität (AC) jedoch nicht um 10 von 13 Substraten handelt (wie im Fall von dB_E) die sich bei beiden Methoden mit der jeweiligen Variante (VDLUFA bzw. Topffest) vergleichbar verhalten, sondern lediglich um neun von 13 Substraten (= 69 %), wurde zusätzlich eine Korrelationsanalyse gerechnet (siehe Abb. 4.7 und 4.8).

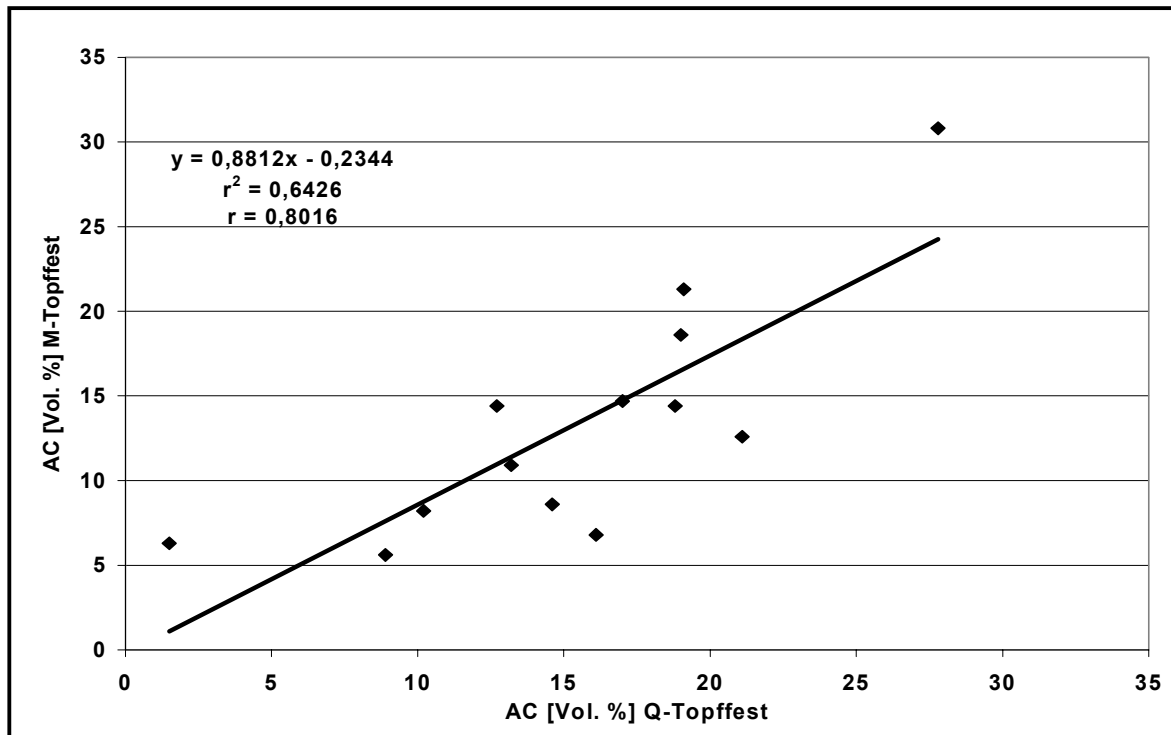


Abb. 4.7: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] Q-Topffest) und der Luftkapazität der M-ISHS-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] M-Topffest) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

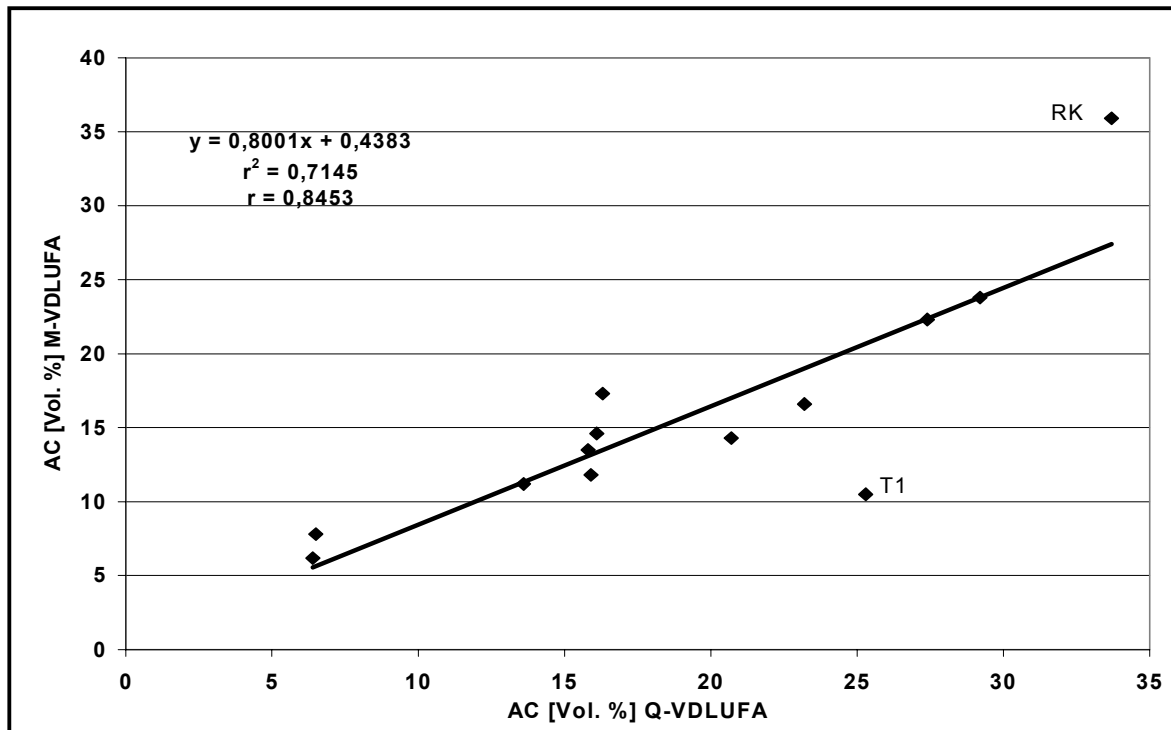


Abb. 4.8: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante VDLUFA (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der M-ISHS-Methode Variante VDLUFA (AC [Vol. %] M-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

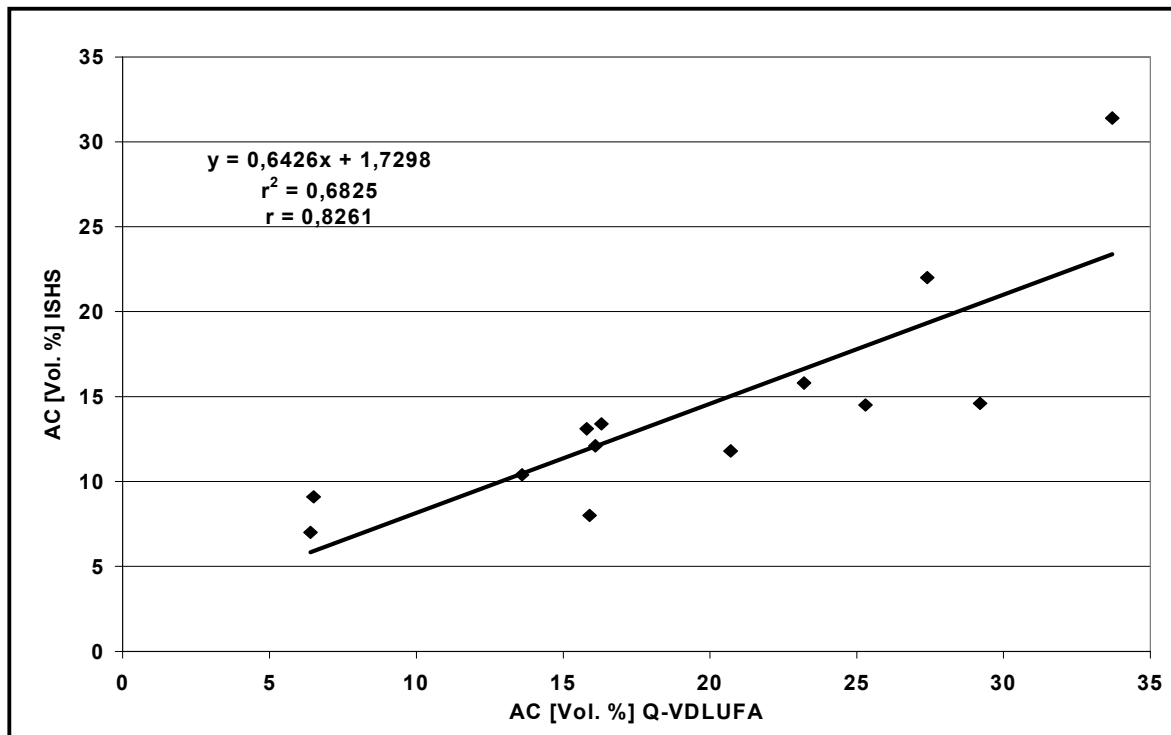


Abb. 4.9: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante VDLUFA (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

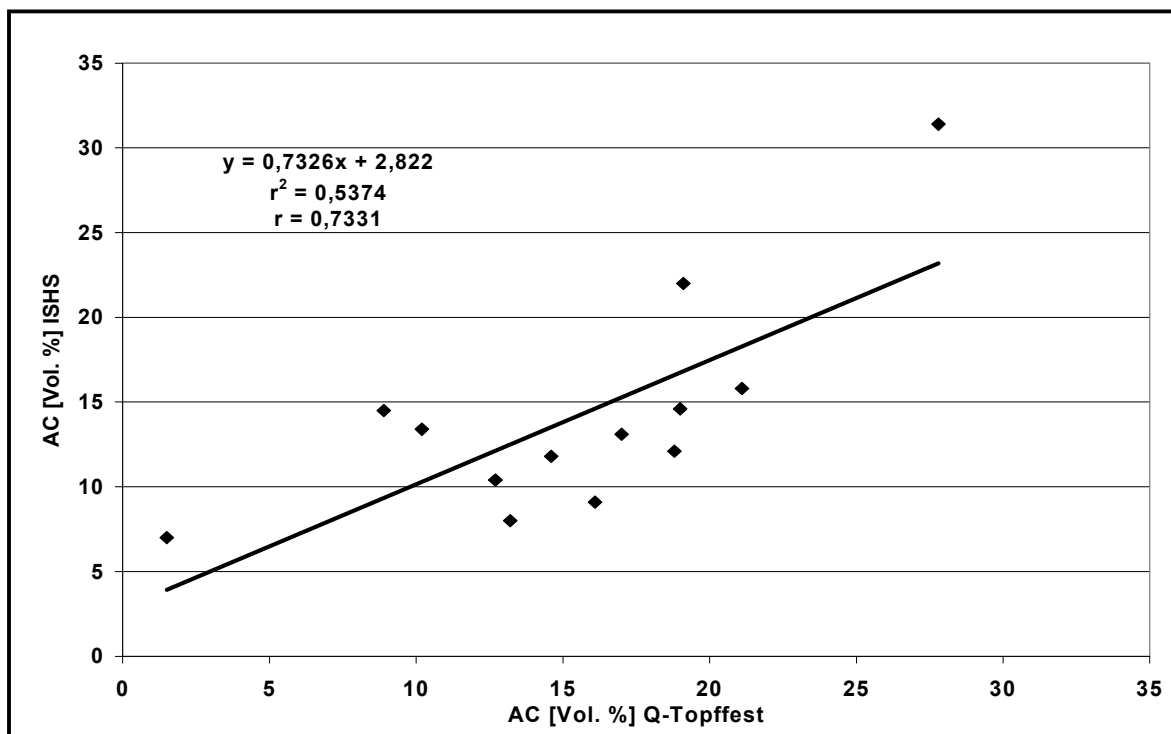


Abb. 4.10: Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für die 13 untersuchten Standardsubstrate (r = Korrelationskoeffizient, r^2 = Bestimmtheitsmaß)

Mit Korrelationskoeffizienten von $r = 0,8016$ für die Variante Topffest und $r = 0,8453$ für die Variante VDLUFA bestätigt sich, dass bezüglich der Luftkapazität (AC) eine weniger enge Beziehung zwischen der M-ISHS-Methode und der Q-Methode für die jeweils vergleichbare Variante (Topffest bzw. VDLUFA) besteht. Besonders im Fall von Topffest wird deutlich, wie stark die Werte um die Regressionsgerade streuen (siehe Abb. 4.7). Zur Erklärung könnte auch in diesem Fall die Zusammensetzung der Substrate sowie die unterschiedlichen Methoden herangezogen werden, die zur Einstellung der Lagerungsdichte im Probenzylinder dB_E führen. Obwohl bei beiden Methoden (Q-Methode und M-ISHS-Methode) bei den jeweils verglichenen Varianten gleiche Volumengewichte zum Anfang der Messung erzeugt werden, ist zu erwarten, dass der Anteil der Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder der Q-Methode höher ist als bei der M-ISHS-Methode. Der Probenzylinder der Q-Methode ist mit 10 cm Höhe doppelt so hoch wie der Probenzylinder der M-ISHS-Methode, im Durchmesser aber um 3 cm schmaler (vergleiche Abb. 2.2. unterer Probenzylinder und Abb. 2.4). Damit unterscheidet sich aber wieder die Art und Weise der Einstellung von dB_E , die offenbar, wie oben dargelegt wurde, neben der absoluten Größe von dB_E auch einen Einfluss auf die Porengrößenverteilung hat und damit auf die Höhe der Luftkapazität bei vergleichbarem Volumengewicht.

Außerdem wurde schon häufig erwähnt, dass die physikalischen Eigenschaften durch die Containerhöhe und -form beeinflusst werden (BILDERBACK und FONTENO 1987; FONTENO 1989; RUTER und WERKEN 1991; SPOMER 1975 u.a.). Damit können sich also auch Höhe und Durchmesser der Probenzylinder u.a. auf die Luftkapazität auswirken. Auch die Ergebnisse von KREMER (1997) deuten eine Abhängigkeit der physikalischen Kennwerte von der Geometrie des Probenzylinders an. In seiner Arbeit war es nur mit einer bestimmten Bauart des Probenzylinders der Q-Methode möglich, Werte zu messen, die über eine besonders enge Beziehung zu den entsprechenden Werten der ISHS-Methode verfügen. Allerdings wurde leider noch kein Versuch unternommen, nach den Gründen dafür zu suchen.

Zum Abschluss soll noch auf die Korrelationen, zwischen der Luftkapazität, ermittelt mit der Q-Methode und der M-ISHS-Methode auf der einen Seite und zwischen der Luftkapazität, ermittelt mit der Q-Methode und der ISHS-Methode auf der anderen Seite eingegangen werden (vergleiche Abb. 4.7 bis 4.10). Da sowohl die M-ISHS-Methode als auch die Q-Methode bei den jeweiligen Varianten (Topffest und VDLUFA) mit dem gleichen Volumengewicht zum Anfang der Messung im Probenzylinder (dB_A) arbeiten, sollte erwartet werden, dass die Korrelation zwischen

den Werten für die Luftkapazität, die mit Hilfe der jeweils gleichen Varianten der Q-Methode und M-ISHS-Methode ermittelt wurden, enger sind, als die, die mit Q-Methode und ISHS-Methode ermittelt wurden. Wie aus den Abbildungen 4.7 bis 4.10 hervorgeht, ist die Beziehung zwischen der Q-Methode und der M-ISHS-Methode bezüglich der Luftkapazität (AC) der 13 Standardsubstrate tatsächlich enger, als zwischen Q-Methode und ISHS-Methode.

Für die Variante VDLUFA der Q-Methode konnte ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,8261$ zu den Kennwerten der ISHS-Methode errechnet werden. Die Beziehung der Variante VDLUFA der Q-Methode zur entsprechenden Variante der M-ISHS-Methode ist bezogen auf die Werte der Luftkapazität mit $r = 0,8453$ enger als zur ISHS-Methode. Noch deutlicher wird der Unterschied bei der Variante Topffest. Mit $r = 0,8016$ ist die Beziehung zwischen der Q-Methode und der M-ISHS-Methode deutlich enger, als zwischen Q-Methode und ISHS-Methode ($r = 0,7331$).

Dieses Ergebnis ist, wie schon oben erwähnt, zu erwarten gewesen, da im Fall der Q-Methode und der M-ISHS-Methode jeweils die gleichen dB_A -Varianten verglichen wurden. Vor dem Hintergrund, dass die Q-Methode in der hier durchgeführten Form von KREMER (1997) deswegen ausgewählt wurde, da sie über die engste Korrelation zur ISHS-Methode verfügt, hätte das Ergebnis der Korrelationsanalyse aber auch anders ausfallen können.

4.2.4. Das verfügbare Wasser (AW)

Wie schon im Ergebnisteil zur M-ISHS-Methode (Kapitel 3.4) festgestellt wurde, führt in einigen Fällen die ISHS-Methode zur höheren verfügbaren Wassermenge (AW) und in anderen Fällen die M-ISHS-Methode. In der Abbildung 4.11 sind die AW-Werte der beiden Varianten der M-ISHS-Methode sowie die der ISHS-Methode zusammengefasst dargestellt.

Es wird deutlich, dass in sechs Fällen die ISHS-Methode die größte verfügbare Wassermenge ermittelt (ET, FT, RK, SW1, SW3; T2), in einem Fall die Variante VDLUFA der M-ISHS-Methode (EP) und in weiteren sechs Fällen (EPr, CF, PH, ST, SV, T1) die Variante Topffest.

Nach MILKS et al. (1989c) und FONTENO (1993) ist die Zunahme des Volumengewichts zumeist auch mit einer Zunahme des verfügbaren Wassers verbunden. Die

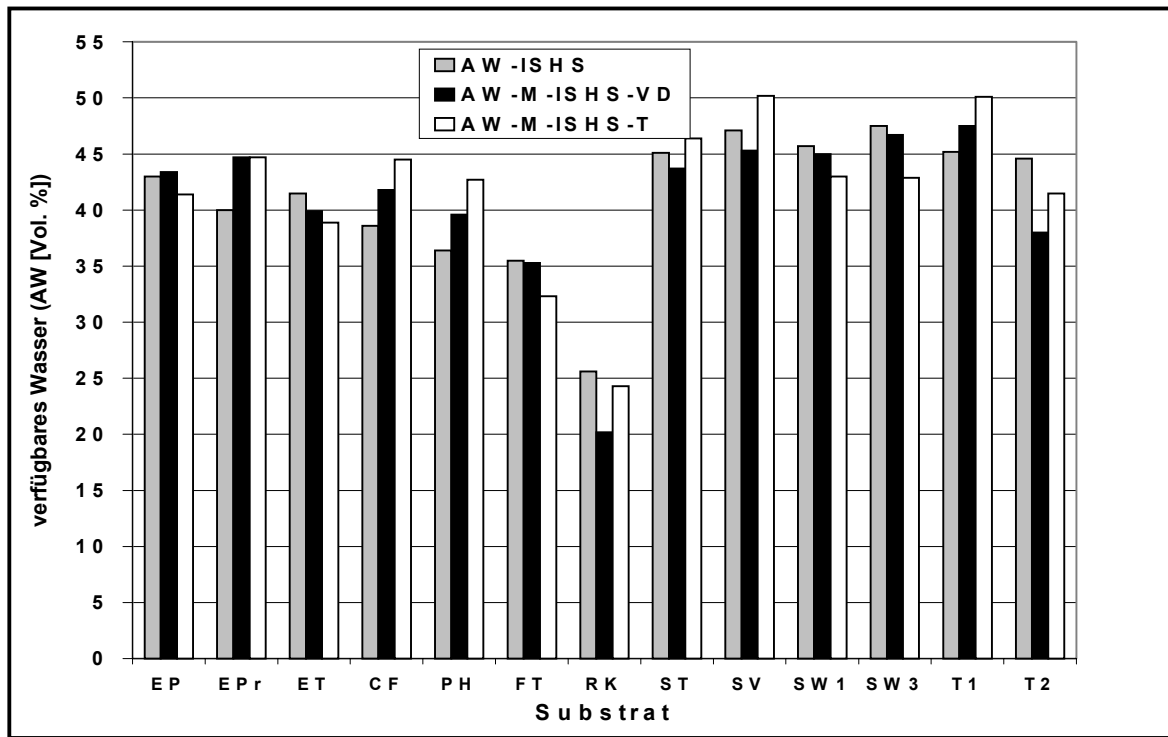


Abb. 4.11: Verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) der untersuchten 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode. **AW-ISHS** = verfügbares Wasser ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode; **AW-M-ISHS-VD** = verfügbares Wasser ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA); **AW-M-ISHS-T** = verfügbares Wasser ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (n = 4)

Tabelle 4.6: Methode bzw. Variante der Methode, die zum höchsten Wert des Volumengewichts zum Ende der Messung im Probenzylinder führte (dB_E) bzw. zur höchsten verfügbaren Wassermenge (**AW**). **ISHS** = ISHS-Methode, **M-ISHS-T** = M-ISHS-Methode Variante Topffest; **M-ISHS-VD** = M-ISHS-Methode Variante VDLUFA. Widersprüche von der Erwartung (höchster dB_E -Wert bewirkt höchsten AW-Wert) sind grau unterlegt

Substrat	dB_E	AW
EP	M-ISHS-T	ISHS
EPr	M-ISHS-T	M-ISHS-T
ET	M-ISHS-VD	M-ISHS-VD
CF	M-ISHS-T	M-ISHS-T
PH	M-ISHS-T	ISHS
FT	M-ISHS-VD	ISHS
RK	ISHS	ISHS
ST	M-ISHS-T	M-ISHS-T
SV	M-ISHS-T	M-ISHS-T
SW1	M-ISHS-VD	ISHS
SW3	ISHS	ISHS
T1	M-ISHS-T	M-ISHS-T
T2	M-ISHS-T	ISHS

Prüfung der in dieser Arbeit gefundenen Zahlen hinsichtlich dieses Zusammenhangs ergibt das in Tabelle 4.6 dargestellte Ergebnis bzw. das in den Abbildungen 4.5 und 4.6 dargestellte Bild. Nur in acht von 13 Fällen bewirkt das höchste Volumengewicht auch tatsächlich die größte verfügbare Wassermenge (AW).

Erklärungsansätze dafür könnten auch in diesem Fall die im Kapitel 4.2.3 (Luftkapazität) geschilderten Zusammenhänge zwischen der unterschiedlichen Art und Weise der Einstellung des Volumengewichts dB_E im Probenzylinder sein und deren Einfluss auf die Porengrößenverteilung bei vergleichbarem Volumengewicht. Außerdem ist auch in diesem Fall an die Heterogenität in der Zusammensetzung vieler Substrate zu erinnern sowie an mögliche Messfehler durch Abreißen der Wassersäule, in diesem Fall auch auf der Unterdruckanlage, auf der die 100 hPa Varianten entwässert werden.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie weit der Bereich des verfügbaren Wassers geht, d.h. wo der Grenzwert der Wasserspannung liegt, von dem ab eine Pflanze in einem Topf oder Container Stress erleidet, also mit Qualitätseinbußen bzw. Ertragsverlusten zu rechnen ist. Der in dieser Arbeit gewählte Grenzwert von 100 hPa wurde von DE BOODT und DE WAELE (1968) für *Ficus* ermittelt. Bei Tomaten liegt der Grenzwert für die Ertragsverluste bei 60 hPa (FRENZ und LECHL 1981) bzw. zwischen 30 und 60 hPa (GOODMANN 1983). RÖBER und HAFEZ (1982) kommen in Versuchen mit der Gattung *Chrysanthemum* allerdings zu einem Grenzwert von nur 30 hPa, während SPOMER und LANGHANS (1975) bei der gleichen Gattung den maximalen Ertrag bei 20 hPa bzw. 50 hPa je nach untersuchter Substratvariante ermitteln konnten. Dass der Grenzwert für das verfügbare Wasser offenbar neben der Pflanzenart auch vom Substrat abhängig ist, konnte auch durch Untersuchungen von BERNIER (1992) untermauert werden, der zeigte, dass zwischen Sand und Torf Unterschiede auftreten. BERNIER et al. (1995) ermittelten sogar Unterschiede zwischen verschiedenen Torfen.

Ergebnisse von CARON et al. (1998) an *Prunus x cistena* zeigen, dass das Xylempotential bei ihren Versuchspflanzen offenbar der empfindlichere Indikator für Wasserstress ist. Daher sollten weitere Versuche angestellt werden, die zur Klärung der Frage beitragen können, welches Potential der empfindlichere bzw. geeignetere Indikator für drohende Ertragsverluste durch Wassermangel ist.

Selbst wenn der von DE BOODT und DE WAELE (1968) aufgestellte Grenzwert für Ertragsverluste durch Wassermangel von 100 hPa zukünftig nicht bestätigt werden

kann, so ist es doch interessant zu erfahren, wieviel Wasser ein Substrat im Bereich von 100 – 300 hPa Wasserspannung speichern kann, also in dem von DRZAL et al. (1997) benannten Bereich der Mesoporen. Gerade vor dem Hintergrund, dass in einem extrem heißen Sommer das Bewässerungssystem in einer Baumschule stark beansprucht ist und die Zeiten bis ein Bewässerungsturnus abgeschlossen ist sehr lang werden, ist es gut zu wissen, wie groß der Puffer zur Speicherung von Wasser ist (zwischen 100 – 300 hPa), den ein Substrat zur Verfügung stellen kann. Mit dem Kenntnis, wieviel Zeit vergeht, bis dieser Puffer verbraucht ist, könnte ein Bewässerungssystem hinsichtlich der maximalen Dauer für einen kompletten Bewässerungsgang durch eine Containerbaumschule ausgelegt werden.

4.3 Die Q-Methode

4.3.1 Möglichkeiten und Grenzen

Der große Vorteil der hier als Q-Methode bezeichneten Schnellmethode nach SCHLICHTING und BLUME (1966) ist, wie der Name schon sagt, die Schnelligkeit. Wie auch aus der Tabelle 2.11 (Kapitel 2.2.2.3) entnommen werden kann, werden ca. 48 Stunden benötigt, bis die physikalischen Kennwerte Wasserkapazität (WC (bei 9 hPa ermittelt)), Luftkapazität (AC) und Porenvolumen (PV) vorliegen. Zur Erklärung des Unterschieds zwischen Containerkapazität (CC), die mit der ISHS-Methode und der M-ISHS-Methode bei einer Wasserspannung von 10 hPa ermittelt wird, und der Wasserkapazität (WC) die mit der Q-Methode bei einer Wasserspannung von 9 hPa ermittelt wird, sei auf das Kapitel 4.1.1 verwiesen.

Im Vergleich zur ISHS-Methode, die seit kurzem europäische Normmethode ist (DIN EN 13041), hat die Q-Methode einen Zeitvorteil von fünf bis sechs Tagen (vergleiche auch Tabelle 2.11 und Tabelle 2.9) bis die entsprechenden physikalischen Kennwerte ermittelt sind.

Ein weiterer Vorteil der Q-Methode gegenüber der ISHS-Methode liegt in der Möglichkeit, ein gezielt eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder beachten zu können, ein Vorteil, der schon ausgiebig im Kapitel 4.2 und 4.2.2 diskutiert wurde. Neben der Q-Methode kann auch die M-ISHS-Methode (WREDE und BOHNE 2000b) ein gezielt eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder beachten. Sie hat aber auch den Nachteil, dass es immerhin fünf bis sechs Tage länger dauert, bis die Kennwerte Containerkapazität (CC), Luftkapazität (AC) und Porenvolumen (PV) bestimmt sind.

Genaugenommen dürfte im Fall der Q-Methode gar nicht von Luftkapazität gesprochen werden, da die Luftkapazität von DE BOODT und DE WAELE (1968) als luftgefüllter Anteil der Poren bei Containerkapazität (CC), also bei einer Wasserspannung von 10 hPa festgelegt wurde. Im Fall der Q-Methode wird der Anteil der luftgefüllten Poren aber bei einer Wasserspannung von 9 hPa ermittelt. Trotz dieses Unterschieds wird in dieser Arbeit unkorrekter Weise auch bei der Q-Methode von Luftkapazität (AC) gesprochen.

Neben Vorteilen birgt die Q-Methode natürlich auch Nachteile. Wie schon in den Kapiteln 4.1 und 4.2 dargelegt wurde, ist es mit der ISHS-Methode und mit der M-ISHS-Methode möglich, eine Wasserspannungskurve zu erstellen, was mit Hilfe der Q-Methode nicht möglich ist. Da die physikalischen Kennwerte allerdings von der Höhe und Form eines Topfs / Containers beeinflusst werden (u.a. BOHNE et al. 1998; MILKS et al. 1989a, b; SPOMER 1979), beschreiben die Kennwerte Wasser- und Luftkapazität, die mit der Q-Methode ermittelt werden, lediglich die Zustände an der Substratoberfläche eines 9 cm hohen Topfs (siehe auch Kapitel 4.1.1). Außerdem können die mit Hilfe der Q-Methode ermittelten physikalischen Kennwerte auch nicht zur „substratangepassten Steuerung“ einer Bewässerung (WREDE und BOHNE 2000a) genutzt werden, da das verfügbare Wasser (AW) nicht bestimmt werden kann. Damit eignen sich die mit der Q-Methode gefundenen Kennwerte, die eventuell zukünftig zur Produktdeklaration im Rahmen der (RAL) Gütesicherung von Kultursubstraten eingesetzt werden soll, lediglich zur Auswahl von Substraten, wenn z.B. ein Substrat für eine gegenüber Sauerstoffmangel empfindliche Kultur gesucht wird. Als gegenüber Sauerstoffmangel im Substrat empfindliche Kulturen sind z.B. aus dem Baumschulbereich folgende Kulturen bekannt:

- einige Gattungen aus der Gruppe der Nadelgehölze und hier besonders zahlreiche Arten und Cultivare der Gattung *Chamaecyparis* Spach
- daneben aber auch einige Taxa der Gattungen
 - *Rhododendron* L.
 - *Wisteria* Nutt.
 - *Chaenomelis* Lindl.
 - *Rosa* L.
 - *Hydrangea* L. (AENDEKERK 1993, 1997; LEISTIKOW 1994)

Konkrete Grenzwerte für die Luftkapazität der o.g. Gehölze werden jedoch von den Autoren nicht genannt. Auf die zur Substratauswahl notwendige Kenntnis von Grenzwerten für die Luftkapazität wird im Kapitel 4.3.2 genauer eingegangen.

Ein weiterer Nachteil der Q-Methode, aber auch der M-ISHS-Methode (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3), liegt in der umständlichen und den individuellen Fehlern der durchführenden Person unterliegenden Erfassung der Fehlstelle im Probenzylinder, die im Verlauf der Messung durch Sackung und Schrumpfung entstanden ist. Viel zu leicht kommt es aufgrund der ungleichmäßigen Sackung der Substratprobe zur ungenauen Erfassung der Fehlstelle und damit zur Über- bzw. zur Unterschätzung des Volumengewichts (dB_E) zum Ende der Messung im Probenzylinder. Da dieses Volumengewicht dB_E zur Berechnung aller auf das Volumen bezogener Größen dient, also auch für die Wasser- und Luftkapazität, sollte über eine Änderung des Verfahrens zur Erfassung der Fehlstelle nachgedacht werden. GÜNTHER (2001) schlägt ein Glattstreichen der Substratoberfläche mit einer an einem Stab befestigten Scheibe vor, die etwa den gleichen Durchmesser aufweist wie der Probenzylinder selbst (z.B. erhältlich im Baumarkt zur Befestigung von abgehängten Deckenkonstruktionen), bevor dann die Fehlstelle, wie durchgeführt, durch einfache Höhenmessung ermittelt wird.

Eine Alternative könnte auch in der Änderung der Bauweise des Probenzylinders liegen. So erscheint es denkbar, dass der Probenzylinder den gleichen Durchmesser und die gleiche Gesamthöhe behält, aber trotzdem aus zwei trennbaren Bauteilen besteht, ähnlich dem Doppelring bei der ISHS-Methode (vergleiche Abb. 2.2 und Abb. 2.4). Durch die Konstruktion als Doppelring ist es möglich, genau wie im Laufe der ISHS-Methode auch, den oberen Teil, in dem Schrumpfung und Sackung ablaufen, abzunehmen, und das über den Rand des unteren Probenzylinders herausragende Substrat eben, entlang des oberen Randes des unteren Probenzylinders abzuschneiden. Damit würde der gegenüber individuellen Fehlern besonders anfällige Teil der Erfassung der Fehlstelle entfallen. Dadurch dass der obere und der untere Probenzylinder zusammen immer noch die gleiche Größe und den gleichen Durchmesser aufweisen wie in dieser Arbeit, ist die von KREMER (1997) gefundene Abmessung des Probenzylinders immer noch garantiert, die eine Voraussetzung für die enge Beziehung zwischen den Werten der Q-Methode und den entsprechenden Werten der ISHS-Methode bildet.

4.3.2 Die Q-Methode als Instrument der Gütesicherung

Die Ergebnisse zeigen, dass die mit der Q-Methode ermittelten physikalischen Kennwerte der hier untersuchten Substrate über eine sehr enge Beziehung zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode verfügen (siehe auch Tabelle 3.30)

im Kapitel 3.3.5). Dies gilt allerdings uneingeschränkt nur für die Variante VDLUFA der Q-Methode, die bezüglich des Volumengewichts zum Ende der Messung im Probenzylinder (dB_E), bezüglich der Wasserkapazität (WC) und auch bezüglich der Luftkapazität (AC) über die engste Korrelation zur ISHS-Methode verfügt. Für die drei anderen Varianten (VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die in Tabelle 2.10 des Kapitels 2.2.2.2 genauer erklärt sind, konnten dagegen nicht so enge Beziehungen zur ISHS-Methode festgestellt werden. Allerdings sollte auch betont werden, dass sich die drei zuletzt genannten Varianten der Q-Methode bezüglich der mit ihnen ermittelten Werte für die Wasserkapazität (WC) und der Luftkapazität (AC) nicht signifikant von den entsprechenden Kennwerten unterscheiden, die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt wurden. Signifikante Unterschiede zu den Kennwerten der ISHS-Methode konnten nur für die mit der Variante VDLUFA ermittelten Kennwerte errechnet werden (siehe auch Tabellen 3.19, 3.29 und 3.30). Das bedeutet:

1. Nur die Werte für die Wasserkapazität (WC) ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA sind signifikant kleiner, als die mit der ISHS-Methode ermittelten Werte für die Containerkapazität (CC).
2. Obwohl nur die WC-Werte der Variante VDLUFA signifikant kleiner sind als die CC-Werte der ISHS-Methode besitzt sie die engste Korrelation zu den CC-Werten, da sich die WC-Werte der Variante VDLUFA offenbar in gleicher Richtung und in ähnlichem Umfang verändern wie die CC-Werte der ISHS-Methode.
3. Der mathematischer Zusammenhang zwischen der Containerkapazität (CC), die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt wurde und der Wasserkapazität (WC-VDLUFA), die mit der Q-Methode (Variante VDLUFA) ermittelt wurde, wird durch die Gleichung der Regressionsgeraden aus Abbildung 3.36 verdeutlicht.

$$\text{WC-VDLUFA [Vol. \%]} = 1,0019 \times \text{CC [Vol. \%]} - 5,337$$

4. Nur die Variante VDLUFA führt zu signifikant höheren Werten für die Luftkapazität (AC) verglichen mit den entsprechenden Werten der ISHS-Methode.
5. Obwohl nur die AC-Werte der Variante VDLUFA signifikant größer sind als die AC-Werte der ISHS-Methode besitzt sie die engste Korrelation zu den AC-Werten, da sich die AC-Werte der Variante VDLUFA offenbar im Fall der Luftkapazität (AC) in gleicher Richtung und in ähnlichem Umfang verändern wie die AC-Werte der ISHS-Methode.
6. Der mathematische Zusammenhang zwischen der Luftkapazität (AC), die mit Hilfe der ISHS-Methode ermittelt wurde und der Luftkapazität (AC-VDLUFA), die mit der Q-Methode (Variante VDLUFA) ermittelt wurde, wird durch die Gleichung der Regressionsgeraden aus Abbildung 3.77 verdeutlicht.

$$\text{AC-VDLUFA [Vol. \%]} = 1,0092 \times \text{AC-ISHS [Vol. \%]} + 4,9503$$

Es soll hier jedoch nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass die meisten minimalen Werte für die Luftkapazität (AC) allerdings die Variante Topffest liefert. Die Deklaration eines Produktes mit minimalen Werten für die Luftkapazität (AC) soll dem Produzenten Sicherheit vor Reklamationen geben. Außerdem konnte für die Variante Topffest auch die engste Beziehung zwischen dB_A und dB_E ermittelt werden, d.h. mit der Variante Topffest kann das Volumengewicht zum Ende der Messung im Zylinder (dB_E) am gezieltesten beeinflusst werden.

Es zeigt sich, dass die Kennwerte der Q-Methode (Variante VDLUFA) bei den 36 hier getesteten Substraten über eine enge Beziehung zur europäischen Normmethode verfügen und damit zu den Werten, die nach SCHMILEWSKI (1996) Bestandteil einer europaweiten Pflichtdeklaration von Kultursubstraten und Substratausgangsstoffen werden könnten. Damit würde die Q-Methode (VDLUFA) bei den 36 Substraten dieser Arbeit eine wichtige Forderung zur Gütesicherung von Kultursubstraten erfüllen.

Nachdem die Frage nach einer möglichen (Labor-)Schnellmethode zur Deklaration von physikalischen Kennwerten im Rahmen einer (RAL) Gütesicherung für die hier untersuchten 36 Substrate geklärt ist, ergibt sich die Frage danach, wie die so ermittelten physikalischen Kennwerte zu interpretieren sind. Einige Hinweise dazu werden im folgenden Kapitel angesprochen.

4.3.2.1 Luftkapazität (AC)

Die Luftkapazität wird von BAILLY (1989a) als der kritische Luftgehalt im Substrat bei Wassersättigung beschrieben. DE BOODT UND DE WAELE (1968) verstehen darunter genauer den Luftgehalt im Substrat bei einer Wasserspannung von 10 hPa, also bei Containerkapazität (CC). Im Sinne von De BOODT UND DE WAELE (1986) wurde die Luftkapazität auch in dieser Arbeit verstanden und ermittelt.

Die mit den einzelnen Varianten der Q-Methode ermittelten Werte für die Luftkapazität (AC) sind im Kapitel 3.3.2 ausführlich dargestellt und in den Tabellen 3.21 und 3.23 zusammengestellt worden. In diesem Zusammenhang soll noch kurz darauf verwiesen werden, dass auch im Zusammenhang mit der Q-Methode deutlich geworden ist, dass nicht immer die Variante mit dem höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) auch zur niedrigsten Luftkapazität führt (vergleiche Tabellen 3.22 und 3.24). Auch im Fall der Q-Methode sind die gleichen Erklärungen für das beobachtete Verhalten der Substrate bei den vier verglichenen

Varianten der Q-Methode anzuführen, die auch schon im Fall der M-ISHS-Methode ausführlich dargelegt wurden (siehe dazu Kapitel 4.2.3).

Nachdem die Werte für die Luftkapazität (AC), die mit Hilfe verschiedener Methoden und Varianten gemessen wurden, in dieser Arbeit ausführlich dargestellt und diskutiert wurden, stellt sich, besonders im Zusammenhang mit der (RAL) Gütesicherung, die Frage, wie groß die Luftkapazität (AC) sein muss, damit sich ein Substrat zur Kultur von gartenbaulichen Nutzpflanzen eignet. Damit stellt sich also auch die Frage danach, welche Richtwerte für die (RAL) Gütesicherung angegeben werden sollen und wie groß tolerierbare Schwankungen sein dürfen. Beide Größen sind sowohl in den Güte- und Prüfbestimmung für Blumenerden (GGs 1999) als auch in den entsprechenden Bestimmungen für Kultursubstrate (RAL-GZ 252) nicht genannt, mit dem Hinweis, dass Grenzwerte in Erarbeitung sind.

Ein gutes Substrat zeichnet sich dadurch aus, dass es eine hohe Luftkapazität besitzt und gleichzeitig auch eine große Menge an verfügbarem Wasser speichern kann (DE BOODT und VERDONCK 1972). Daher kann ein Substrat auch nicht zuviel Wasser speichern sondern höchstens zu wenig Luft (BAILLY 1989a). Da die Luftkapazität von Substraten nachträglich nicht erhöht werden kann und damit zu rechnen ist, dass sie als Folge von Sackungs- und Zersetzungsprozessen im Verlauf der Kultur abnimmt, sind hohe Werte für die Luftkapazität besonders zu Beginn einer Kultur von großer Bedeutung (CARON und NKONGOLO 1999). Eine hohe Luftkapazität ist deswegen auch gerade bei Baumschulkulturen besonders wichtig, da deren Kulturzeit teilweise mehr als ein Jahr und länger dauert (PRASAD und MAHER 1993).

In der Literatur gibt es unterschiedliche Angaben zur notwendigen Höhe der Luftkapazität. In Böden sollte die Luftkapazität, die für normales Pflanzenwachstum notwendig ist, im Bereich von 5 – 10 Vol. % liegen (GLINSKI und LIPIE 1990; MOHR 1978, 1980). Eine globale Beurteilung der Werte für die Luftkapazität in Substraten ist dagegen schwierig, da unterschiedliche Messmethoden, unterschiedliche Kulturbedingungen, unterschiedliche Ansprüche der jeweils untersuchten Kulturen und deren Kulturzustand (HANDRECK und BLACK 1989) den Vergleich der Ergebnisse in der Literatur erschweren.

Trotz der o.g. Probleme eines Vergleichs der in der Literatur genannten Zahlen, wird in Tabelle 4.7 ein Überblick gegeben. Nach VERDONCK et al. (1983) sollte die Luftkapazität von Substraten nach der in Tabelle 4.8 zusammengestellten Einteilung bewertet werden.

Tabelle 4.7: Zusammenstellung einiger in der Literatur genannter Kennzahlen für die Luftkapazität, die für Kultursubstrate empfohlen werden. Die Angabe der Quelle erfolgt jeweils direkt in der Tabelle.

(Die Angaben beziehen sich nicht in allen Fällen auf den Luftgehalt, der bei einer Wasserdampfspannung von 10 hPa ermittelt wurde, wie DE BOODT und DE WAELE (1968) die Luftkapazität definiert haben und wie sie auch in dieser Arbeit verstanden wurde; auf die genaue Angabe von Versuchspflanzen bzw. Substratarten wurde verzichtet, da lediglich ein Überblick über die große Anzahl unterschiedlicher Grenzwerte für die Luftkapazität (AC) gegeben werden sollte.)

Angaben zur empfohlenen Luftkapazität	Quelle
6 – 10 Vol. %	WEVER (1991) VAN SCHIE (1999)
mindestens 10 Vol. %	PAUL UND LEE (1976)
10 – 20 Vol. %	BAILLY 1989c; BRÜCKNER (1994)
15 – 20 Vol. %	AENDEKERK (1993)
15 – 25 %	HANDRECK (1983); RICHARDS et al. (1985)
20 – 25 %	AENDEKERK (1988); HANDRECK und BLACK (1989);
20 – 30 Vol. %	BIK (1973) Swanson (1989)
20 – 50 Vol. %	ALLMEN und GYSI (1983)
30 – 40 Vol. %	PENNINGSFELD (1988) VERDONCK et al. (1981)

Tabelle 4.8: Bewertungsschema zur Luftkapazität von Substraten nach VERDONCK et al. (1983)

Bewertung	Luftgehalt [Vol. %]
Sehr niedrige Luftkapazität	0 – 10
Niedrige Luftkapazität	10 – 20
Normale Luftkapazität	20 – 30
Hohe Luftkapazität	30 – 40
Sehr hohe Luftkapazität	über 40

Die Nennung eines allgemeingültigen Grenzwertes für Kultursubstrate ist aufgrund der Vielfalt der in der Literatur genannten Grenzwerte und der Einflussfaktoren auf diesen Grenzwert (Kultur, Kulturzustand, Messmethode, Substratart u.a.) sehr problematisch. Daneben zeigen Ergebnisse von SCHARPF et al. (1995), MEYER (1996) und SCHARPF (1997), dass einige Zierpflanzen (u.a. *Impatiens-Neu-Guinea*-Hybriden 'Paradise Antigua') selbst bei sehr niedriger Luftkapazität (siehe Tabelle 4.8) keine

signifikanten Zuwachs- bzw. Qualitätsdepressionen zeigen. Diese Ergebnisse weisen in eine vergleichbare Richtung wie Ergebnisse von NKONGOLO und CARON (1999), die an *Prunus x cistena* zeigen konnten, dass das Wachstum der Versuchspflanzen nicht durch die zurückgehende Luftkapazität im Substrat signifikant beeinflusst war, sondern vielmehr durch die relative Gas-Diffusivität. Hier deutet sich offenbar an, dass nicht die Luftkapazität (AC) die pflanzenbaulich wichtige Kenngröße in einem Kultursubstrat ist, sondern vielmehr die Transportrate für Sauerstoff im Substrat (siehe Kapitel 4.4).

4.3.3. Schwachpunkte der Q-Methode

Im Verlauf der vorangegangenen Kapitel und besonders im Kapitel 4.3.1 wurden schon zahlreiche Schwachstellen der Q-Methode angesprochen. Trotzdem sollen sie in diesem Kapitel nochmals angesprochen werden.

Der große Nachteil der Q-Methode ist der, dass mit ihrer Hilfe lediglich die Wasserkapazität (WC), die Luftkapazität (AC) und das Porenvolumen (PV) ermittelt werden können. Damit eignet sich die Methode nicht für die Aufstellung einer Wasserspannungskurve, mit deren Hilfe die physikalischen Eigenschaften im Topf bzw. Container in Abhängigkeit von der Höhe über dem Containerboden beurteilt werden können. Außerdem kann mit den Kennwerten, die die Q-Methode ermittelt, nicht das verfügbare Wasser (AW) bestimmt werden. Damit eignet sich die Q-Methode lediglich zur Bestimmung von Kennwerten, die im Rahmen der (RAL) Gütesicherung zur Produktdeklaration benötigt werden. Sie können dem Anwender Informationen zur Substratauswahl geben, besonders im Hinblick auf die von seiner Kultur benötigten Luftkapazität (AC). Auf die Probleme im Zusammenhang mit der Luftkapazität ist schon im Kapitel 4.3.2 ausführlich eingegangen worden, so dass an dieser Stelle lediglich festgestellt werden muss, dass vor dem Hintergrund des beschränkten Wissens zur Luftkapazität eine Auswahl des geeigneten Substrats für eine bestimmte Kultur problematisch ist. Selbst wenn ein konkreter Wert für die Luftkapazität (AC) deklariert ist, kann der Praktiker diesen kaum verwenden, da er häufig keine genauen Bedarfszahlen kennt.

Im Zusammenhang mit der Luftkapazität (AC) soll an dieser Stelle nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei nicht um den von DE BOODT und DE WAELE (1968) eingeführten Begriff der Luftkapazität handelt, der bei 10 hPa bestimmt wurde, sondern lediglich um einen vergleichbaren Wert, der bei einer Wasserspannung von nur 9 hPa bestimmt wird. Das gleiche gilt für die Wasserkapazität

(WC), die im Gegensatz zur Containerkapazität (CC), auch lediglich bei 9 hPa bestimmt wird. Trotzdem verfügen sowohl AC als auch WC über sehr enge Korrelationen zu den bei 10 hPa ermittelten Werten der ISHS-Methode.

Eine eindeutige Schwäche der Q-Methode liegt in dem ungenauen Verfahren der Erfassung der Fehlstelle, die sich im Verlauf der Messung durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder ergeben hat. Sie unterliegt in dem bis jetzt praktizierten Verfahren stark dem individuellen Fehler. Verbesserungsvorschläge sind zum einen das Glattstreichen der Substratoberfläche mit einer Scheibe, die stempelartig an einem Stab befestigt ist (GÜNTHER 2001) oder aber die Teilung des Probenzylinders ähnlich dem des Doppelzylinders der ISHS-Methode, unter Beibehaltung des Durchmesser von 7 cm und der Höhe über alles von 10 cm (vergleiche Abb. 2.2 und 2.4).

Wie die Auswertung der Korrelationen zwischen den vier Varianten der Q-Methode für dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) und dem jeweils eingestellten Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) ergeben hat, verfügen alle Varianten über eine relativ enge Korrelation. Für die Variante Topffest konnte allerdings von allen vier Varianten die engste Beziehung zwischen dB_A und dB_E ermittelt werden (siehe Abb. 3.47 – 3.50). Damit ist es mit Hilfe der Q-Methode (genau wie mit Hilfe der M-ISHS-Methode auch) und besonders mit der Variante Topffest möglich, das Volumengewicht im Probenzylinder stark und gezielt zu beeinflussen (das Volumengewicht im Probenzylinder ändert sich im Verlauf der Messung am wenigsten). Der Nachteil der hier verwendeten Variante Topffest liegt aber in dem Verfahren, welches zur Ermittlung des Volumengewichts Topffest (ursprünglich „praxisübliche Topffestigkeit“) geführt hat. Zum einen ist es nicht reproduzierbar und zum anderen ist es auch nicht repräsentativ für die Vielzahl an möglichen Bedingungen in den Töpfen und Containern der gärtnerischen Praxis. Daneben zeichnete sich die Variante Topffest bei ihrer Ermittlung ebenfalls durch eine hohe Streuung der verschiedenen Werte aus, die später zur Bildung des Mittelwerts genutzt wurden. Dieser Mittelwert ist dann als Variante Topffest für dB_A in die Untersuchung eingegangen. Zur Zeit gibt es noch keine Methode, die ein ähnlich hohes Volumengewicht erzeugt wie die Methode Topffest bei kleinerer Streuung der Einzelwerte. Eine Annäherung an die Werte der „praxisüblichen Topffestigkeit“ ermöglicht die Variante VDLUFA+5 mit 15 Fallvorgängen aus 10 cm Höhe.

Ein wichtige Aufgabe für die zukünftige Arbeit mit der Q-Methode (und der M-ISHS-Methode) liegt daher darin, Werte für dB_A zu finden, mit denen die Beeinflussung von

dB_E genau so gezielt möglich ist, wie mit der hier erprobten Variante Topffest. Das Verfahren zur Ermittlung dieser neuen Variante sollte aber möglichst reproduzierbar (geringe Standardabweichung) sein und zu dB_E -Werten führen, die den Bedingungen in den Töpfen und Containern der gärtnerischen Praxis mehr entspricht, als bei der Variante Topffest. Dabei ist jedoch zu bezweifeln, dass eine einzelne Variante von dB_A alle möglichen Bedingungen in den Töpfen / Containern der gärtnerischen Praxis wiedergeben kann.

4.4 Andere Methoden zur Bestimmung physikalischer

Kennwerte

Alle Messmethoden, die in dieser Arbeit zur Bestimmung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts benutzt wurden, sind Methoden, die an gestörten Substratproben durchgeführt werden, das heißt an Substratproben, deren Volumengewicht nicht demjenigen im Topf / Container des Gärtners entspricht. Obwohl die Q-Methode als auch die M-ISHS-Methode die Möglichkeit bieten, ein bestimmtes Volumengewicht im Probenzylinder bei der Messung der Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts zu berücksichtigen, ist es fraglich, welches Volumengewicht den tatsächlichen Bedingungen beim Gärtner entspricht. Aus diesem Grund geben WREDE et al. (1999) auch eine Anleitung zur Bestimmung der Topffestigkeit beim Praktiker, damit diese dann vom beauftragten Labor bei der Messung berücksichtigt werden kann. Durch eine Sammlung solcher Werte und deren Auswertung an zentraler Stelle, könnte es möglich sein, häufig auftretende, tatsächlich praxisübliche Topffestigkeiten zu ermitteln (sollte es solche geben), die dann auch im Rahmen der Untersuchungen für die (RAL) Gütesicherung verwendet werden könnten. Damit würde die Q-Methode solche Werte ermitteln, die in der Praxis häufig anzutreffen sind, eine Voraussetzung für eine wirklich auf den Kunden bezogene Deklaration der gütegesicherten Substrate.

Neben der Q-Methode und der M-ISHS-Methode existieren verschiedene Methoden zur Ermittlung von Wasserspannungskurven in Substraten, die den tatsächlichen Lagerungszustand der Substrate in den Töpfen / Containern nicht verändern (ANISKO et al. 1994; PAQUET et al. 1993). Dazu werden Tensiometer verwendet, die die Wasserspannung in den Töpfen erfassen. Der bei der jeweils anliegenden Wasserspannung enthaltene volumetrische Wassergehalt wird mittels der Time Domain Reflektrometrie (TDR) ermittelt.

Da die Luftkapazität sehr aufwendig über die Bestimmung der Containerkapazität (CC), der indirekten Ermittlung der Dichte der Festsubstanz (d_F) und anschließende Berechnung des Porenvolumens (PV) ermittelt werden muss, wird immer wieder versucht AC, über leichter bestimmbare Eigenschaften abzuleiten. So leiten MILKS et al. (1989a,b) die Luftkapazität aus einem Modell ab, das eine mathematische Funktion der Wasserspannung mit der Höhe und Form von Töpfen und Containern verbindet. Dieses Modell wurde von den Autoren auch auf Töpfe unter 5 cm Höhe erfolgreich übertragen (MILKS 1989c).

Wie schon zum Ende des Kapitels 4.3.2.1 angedeutet wurde, deuten einige Versuchsergebnisse an, dass die Luftkapazität (AC) unter pflanzenbaulichen Gesichtspunkten offenbar nicht der geeignete Qualitätsparameter für ein Substrat ist. Die meisten physikalischen Untersuchungsmethoden ermitteln jedoch die Speichereigenschaften von Substraten für Wasser und Luft, also die Containerkapazität (CC) bzw. Wasserkapazität (WC) und die Luftkapazität (AC). Für die im Substrat wachsende Pflanze ist aber offenbar nicht die Speichereigenschaft für Luft ausschlaggebend, sondern vielmehr der Abtransport von Gasen (CO_2 , Methan, Ethan und Ethylen) bei gleichzeitig ausreichendem Sauerstoffangebot (BIK 1970; TESKEY und HINCKLEY 1981). Aus diesem Grund rät GISLEROD (1982) bei Substraten neben der Luftkapazität vor allem auch den Gasaustausch zu bestimmen. In neuerer Zeit haben zahlreiche Versuche im Substratbereich bestätigt, dass ein behinderter Gasaustausch das Wachstum von Kulturpflanzen behindern kann. Diese Behinderung des Gas-, aber auch des Wassertransports, wird durch die erhöhte Tortuosität des Porensystems, also einer gestörten Kontinuität der Poren erklärt (ALLAIRE et al. 1994, 1996, 1999, BUNT 1988; CARON und NKONGOLO; 1999; NKONGOLO und CARON 1999). Ein Vergleich der Korrelation zwischen dem Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von der Luftkapazität auf der einen Seite und der Sauerstoffdiffusionsrate auf der anderen Seite ergab immer die engere Korrelation zwischen Pflanzenwachstum und der Diffusionsrate (CARON und NKONGOLO 1999). Außerdem konnten CARON und NKONGOLO (1999), NKONGOLO und CARON (1999) sowie ALLAIRE et al. (1999) zeigen, dass im Kulturverlauf zwar die Luftkapazität abnimmt, die Gasdiffusionsrate aber nicht, da offenbar die Leistungsfähigkeit des verbleibenden Porensystems zugenommen hat, offenbar aufgrund der herabgesetzten Tortuosität im Substrat. Da zusätzlich die Speicherfähigkeit für verfügbares Wasser zugenommen hat, kommen die Verfasser zu dem Schluss, dass

sich die Kulturbedingungen im Verlauf der Kultur sogar verbessert haben, trotz oder gerade weil die Luftkapazität abgenommen hat.

Die zuletzt genannten Ergebnisse untermauern nochmals deutlich, wie wichtig die Untersuchung der physikalischen Substrateigenschaften in ungestörten Substratproben ist. Außerdem wird deutlich, dass dem Kennwert Luftkapazität (AC) offenbar nicht die pflanzenbauliche Bedeutung zukommt, wie der Gasdiffusionsrate. In den Fällen jedoch, in denen die Luftkapazität ermittelt werden soll, ist es unbedingt angeraten, das Volumengewicht im Topf / Container des Gärtners bei der Messung zu beachten, so wie es, im Gegensatz zur ISHS-Methode, die hier beschriebene Q-Methode und auch die M-ISHS-Methode können.

4.5 Einfluss steigender Zuschlagstoffanteile auf die physikalischen Eigenschaften

Ziel dieses Versuchsteils war es, durch das Zumischen von unterschiedlichen Zuschlagstoffen zu Weißtorf, Substrate herzustellen, die sich hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei stand die Frage im Vordergrund, ob sich die physikalischen Eigenschaften durch das Zumischen der Zuschlagstoffe so verändern, dass sich Gesetzmäßigkeiten ablesen lassen.

Neben Grubenton (GT) wurde granulierter Ton (granT), gesiebter (STf) und ungesiebter (STg) Schwarztorf, Kokosfasern (KF) und Rindenumus (RH) verwendet. Alle Zuschlagstoffe wurden in steigenden Anteilen zu Weißtorf zugemischt.

Mit steigenden Anteilen des granulierten Tons (granT) in den Mischsubstraten konnte beobachtet werden, dass das verfügbare Wasser (AW) und der schwerer verfügbare Anteil (LEAW) abnehmen, während der leicht verfügbare Anteil (EAW) zunimmt. Die Containerkapazität (CC) nimmt erwartungsgemäß mit dem Anteil an granuliertem Ton zu, die Luftkapazität (AC) dementsprechend ab. Die absoluten Werte für die Luftkapazität, die als sehr hoch einzustufen sind, und die niedrigen Werte der Containerkapazität können zum größten Teil durch den sehr trockenen Weißtorf erklärt werden, mit dem die Mischsubstrate hergestellt wurden (siehe auch Abb. 3.5, 3.11, 3.19). Trotz z.T. erheblicher Wasserzugabe zum Mischtermin waren besonders die Substrate mit dem granulierten Ton als Mischkomponente sehr schnell wieder so trocken, dass der Weißtorf durch steigenden Benetzungswiderstand nur noch unzureichend mit Wasser gesättigt werden konnte. Die Tendenz zum Austrocknen der Substrate im Versuchsverlauf war besonders bei den granT-Substraten sehr

ausgeprägt, da der relativ trockene Ton den Torf offenbar noch zusätzlich entwässert hat.

Der feuchte Grubenton (GT), der nach Angaben von PENNINGSFELD (1988) in Anteilen zwischen 20 und 40 Vol. % in praxisüblichen Substraten enthalten sein kann, hat die weitere Austrocknung des Weißtorfanteils im Mischsubstrat offenbar nicht so stark gefördert, wie zuvor der granuliert Ton. Daher konnte bei den GT-Mischsubstraten offenbar auch mit steigendem Grubentongehalt eine Zunahme des verfügbaren Wassers (AW) und des leicht verfügbaren Anteils festgestellt werden. Das Porenvolumen und die Luftkapazität wurden mit zunehmendem Anteil des Feuchtons kleiner, während die Containerkapazität zugenommen hat. Obwohl der feuchte Grubenton offenbar eine stärkere Austrocknung verhindert hat, sind die Werte für CC und AC immer noch als sehr hoch (AC) bzw. sehr niedrig (CC) zu bezeichnen (vergleiche auch Abb. 3.5, 3.11, 3.20).

Durch den Zusatz von Kokosfasern (KF), die bei der Herstellung von Kokosmatten, Ummantelungen von Drainsträngen sowie Kokosstricken entstehen und den Fertigs substraten in Anteilen zwischen 10 und 20 Vol % zugesetzt werden (GRANTZAU 1992), verringert sich das verfügbare Wasser (AW), wobei sowohl der leicht verfügbare Anteil als auch der schwerer verfügbare Anteil kleiner werden. Daneben konnte mit steigendem Anteil der Kokosfaser am Mischsubstrat zusätzlich eine Verringerung der Containerkapazität (CC) bei gleichzeitiger Abnahme der Luftkapazität (AC) festgehalten werden, während sich das Porenvolumen kaum veränderte (siehe Abb. 3.5, 3.8, 3.11, 3.21). Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit den Beobachtungen von LIMBERS (1994) sowie GRANTZAU (1996, 1997). Beide Autoren geben an, dass die Luftkapazität in einem Weißtorfsubstrat durch den Zusatz von Kokosfasern steigt. Gleichzeitig nimmt die Containerkapazität leicht ab, während das Porenvolumen nahezu unverändert bleibt, da beide Stoffe über vergleichbare Porenvolumina verfügen (GRANTZAU 1997). Versuche von VERHAGEN und JANSEN (1999) bestätigen zusätzlich die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse in Bezug auf den Zuschlagstoff Kokosfaser (KF). Allerdings war es den genannten Autoren möglich, die Containerkapazität durch den Zusatz von 25 Vol. % Kokosfaser zu Weißtorf deutlicher zu senken (14 Vol. %) als in dieser Arbeit (5 Vol. %). Eine vergleichbare Feststellung lässt sich auch für die Steigerung der Luftkapazität machen. Zur Erklärung sollte jedoch angeführt werden, dass in dieser Arbeit lediglich die Veränderung zwischen den Anteilen 5 Vol. % Kokosfaser und 25 Vol % Kokosfaser beobachtet werden konnte, da auf die Untersuchung von 100 % Weißtorf

verzichtet wurde. In der zitierten holländischen Arbeit von VERHAGEN und JANSEN (1999) wurde dagegen auch die 100 % Weißtorfvariante untersucht. Es könnte also in dieser Arbeit schon durch den Zusatz von nur 5 Vol. % Kokosfaser zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften gekommen sein, so dass die Differenz zwischen KF5% und KF25% nicht mehr so groß ist, wie zwischen 100 % Weißtorf und 25% Kokosfaser in der holländischen Arbeit. Außerdem erscheint es auch denkbar, dass in dieser Arbeit der Einfluss der Kokosfaser auf die Luft- und Containerkapazität durch den hohen Benetzungswiderstand des Weißtorfs überdeckt wurde.

Da Rindenumus (RH), der in Fertigsubstraten in Anteilen zwischen 30 und 60 Vol. % erhalten sein kann, im Vergleich zu Weißtorf über eine geringere Containerkapazität (CC), ein höheres Porenvolumen (PV) und eine höhere Luftkapazität verfügt (GRANTZAU 1997), sollte auch erwartet werden, dass die Luftkapazität durch Zugabe von steigenden Anteilen von Rindenumus zu Weißtorf zunehmen würde, bei gleichzeitiger Verringerung der Containerkapazität. Die Ergebnisse dieser Arbeit stehen jedoch im Widerspruch zu diesen Erwartungen (siehe auch Abb. 3.6, 3.9, 3.12, 3.22). Durch Zusatz von steigenden Volumenanteilen Rindenumus zu Weißtorf verringerte sich die Luftkapazität bei gleichzeitiger Zunahme der Containerkapazität. Dementsprechend erhöhten sich auch das verfügbare Wasser (AW) sowie der leicht verfügbare Anteil (EAW).

Damit stehen die hier gefundenen Ergebnisse auch im Widerspruch zu den Ergebnissen der Holländer VERHAGEN und JANSEN (1999), die durch Zusatz von Rindenumus zu Weißtorf die Luftkapazität steigern konnten bei gleichzeitiger Abnahme der Containerkapazität. Eine mögliche Erklärung für die Abweichungen zwischen der holländischen und dieser Arbeit könnte wieder im hohen Benetzungswiderstand des Torf gesucht werden, der erst durch die Zugabe von steigenden Anteilen Rindenumus herabgesetzt werden konnte, was die Zunahme der Containerkapazität mit steigendem RH-Gehalt erklären würde. Es sollte aber auch nicht unerwähnt bleiben, dass die Ergebnisse der physikalischen Untersuchung von VERHAGEN und JANSEN (1999) auf der RHP-Methode beruhen (WEVER und PON 1990), die nicht ohne weiteres mit den hier gewonnenen Ergebnissen, die mit der ISHS-Methode gesammelt wurden, verglichen werden können.

Werden die Ergebnisse dieser Arbeit genauer betrachtet, so wird deutlich, dass die Luftkapazität der Mischungen mit Rindenumus (RH) bis zu einem Anteil von 30 Vol. % abnimmt. Bei RH40% nimmt die Luftkapazität wieder zu. Diese Beobachtung steht

wieder im Einklang mit der oft zitierten holländischen Arbeit, da VERHAGEN und JANSEN (1999) mit deutschem Rindenumus die Beobachtung machen konnten, dass sich dieser erst ab einem Volumenanteil über 50 % positiv auf die Luftkapazität des Weißtorfs auswirken konnte. In dieser Arbeit waren die Anteile von 10, 20 und 30 Vol. % Rindenumus offenbar zu gering, um sich positiv auf die Luftkapazität auswirken zu können, zumal offenbar zunächst durch diese kleineren Rindenumusanteile der Benetzungswiderstand des Weißtorfs herabgesetzt wurde. Dadurch stieg die Containerkapazität an. Erst bei 40 Vol. % Rindenumus in der Mischung näherte sich der RH-Anteil der Grenze, ab der er sich positiv auf die Luftkapazität auswirken konnte.

Beide Schwarztorfe (gesiebt = STf, ungesiebt = STg) führen mit steigenden Volumenanteilen in Mischungen mit Weißtorf zur Zunahme der Containerkapazität (CC) und Abnahme der Luftkapazität (AC) (Abb. 3.6, 3.9, 3.12, 3.23, 3.24). Damit entsprechen die Ergebnisse dieser Arbeit denen von VERHAGEN und JANSEN (1999), die durch den Zusatz von 50 Vol. % Schwarztorf zu Weißtorf ebenfalls einen Rückgang der Luftkapazität erreichen konnten. Im Widerspruch zu den Ergebnissen in dieser Arbeit steht jedoch das holländische Ergebnis, dass die Containerkapazität durch den Zusatz von 50 Vol. % Schwarztorf unverändert blieb.

Die Erklärung für die starke Zunahme der Containerkapazität mit dem Schwarztorfanteil in dieser Arbeit, liegt sicher wieder in der starken Austrocknung des Weißtorfs, dessen Benetzungswiderstand erst durch die steigenden Anteile des Schwarztorfs herabgesetzt werden konnte.

Aus den vorhergegangenen Ausführungen lässt sich folgern, dass der Weißtorf zum Mischtermin viel zu trocken war. Da der Untersuchungszeitraum zusätzlich sehr lang war (zusätzliche Austrocknung), lassen sich keine Gesetzmäßigkeiten ableiten, nach denen sich die physikalischen Eigenschaften der hier untersuchten Mischsubstrate mit dem Anteil des Zuschlagstoffs verändern, da der hohe Benetzungswiderstand des Weißtorfs die physikalischen Eigenschaften zu stark verändert hat.

In zukünftigen Versuchen mit vergleichbarer Fragestellung sollten daher Zuschlagstoffe verwendet werden, die nicht derart ausgetrocknet sind, wie der hier verwendete Weißtorf. Außerdem sollten die Substrate nach dem Mischen innerhalb kürzester Zeit untersucht werden, damit sich die physikalischen Eigenschaften nicht durch erneute Austrocknung zu stark verändern. Es ist z.B. denkbar, dass nach dem Mischen der Substrate die Kapazitäten mehrerer Labore genutzt werden, damit der Untersuchungszeitraum möglichst kurz bleibt.

Daneben ist es auch zu überlegen, ob die Mischungen nicht besser erst kurz vor der physikalischen Untersuchung erstellt werden, wie es bei den Versuchen von VERHAGEN und JANSEN (1999) der Fall war, die Ihre Substrate im Labor gemischt haben. Auch auf diesem Wege läßt sich eine starke Austrocknung der Mischsubstrate im Untersuchungsverlauf vermeiden.

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung der Austrocknung liegt in der Lagerung der Mischsubstrate in geeigneten Kühlräumen, falls ausreichend Kühlkapazität zur Lagerung von derart großen Substratmengen zur Verfügung steht.

Obwohl u.a. BRÜCKNER (1994) anmerkt, dass beim Mischen unterschiedlicher Zuschlagstoffe zu beachten ist, dass sich die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Substratkomponenten nicht einfach addieren lassen, sondern dass das Mischen verschiedener Stoffe zu neuen Eigenschaften in der entstandenen Mischung führt, sollte in zukünftigen Versuchen nicht auf die Ermittlung der physikalischen Eigenschaften der einzelnen Zuschlagstoffe (100 % Variante) verzichtet werden, um Veränderungen in Mischsubstraten besser beurteilen zu können.

4.6 Siebung

Die feste Phase von Substraten besteht aus organischen und mineralischen Partikeln von unterschiedlicher Größe und Form. Größe und Form dieser Partikel wirken sich, genau wie z.B. das Volumengewicht auch, auf das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung aus. Damit hat auch die Korngrößenverteilung einen großen Einfluss auf die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts von Kultursubstraten.

Die Korngrößenverteilung von mineralischen Gemischen ist relativ gut reproduzierbar zu bestimmen (u.a. KRETZSCHMAR 1991). Bei Mischungen aus organischen Bestandteilen treten dagegen Probleme auf, da es sich dabei vorwiegend um Pflanzenteile handelt, die sich in unterschiedlichen Stadien des Ab- und Umbaus befinden, wodurch es zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Formen und Korngrößen kommt. Besonders problematisch gestaltet sich allerdings die Bestimmung der Korngrößenverteilung von Gemischen aus mineralischen und organischen Komponenten (z.B. die meisten Böden und viele Kultursubstrate). Der Grund dafür ist, dass z.B. Huminstoffe als Kittsubstanz zwischen den Primärteilchen fungieren können. Aus diesem Grund werden in den meisten Fällen vor der eigentlichen Bestimmung der Korngrößenverteilung u.a. die Huminstoffe zerstört (KRETZSCHMAR 1991). Auch für Torfe wurde daher eine Siebmethode entwickelt, bei

der vor der eigentlichen Siebung die Huminstoffe zerstört werden (LEVESQUE UND DINEL 1977).

Insbesondere bei der Siebung von organischen Gemischen sollte beachtet werden, dass sich die Partikel z.T. sehr stark in ihrer Form und Größe unterscheiden. Daher werden bei der Siebung von Substraten nicht die realen Durchmesser der Partikel ermittelt, sondern ihr Äquivalentdurchmesser. Das ist der Durchmesser der kleinsten Siebmasche, durch das der entsprechende Partikel treten kann. Tatsächlich kann das betreffende Teilchen diesen Wert in einer anderen Achse seines Körpers deutlich überschreiten, wenn es sich z.B. um ein faden- bzw. stäbchenförmiges Teilchen handelt (HARTGE und HORN 1999).

In dieser Arbeit wurde mit der in der zurückgezogenen DIN 11540 beschriebenen Siebmethode für Torfe gearbeitet sowie mit der Methode der niederländischen Gütesicherung R.H.P. (WEVER und PON 1995). Dabei wurde deutlich, dass in den meisten Fällen die Fraktionen über 16 mm keine Rolle spielen (maximal 2 Gew. %). Lediglich bei CF, bei dem es sich um ein Substrat für lange Kulturzeiten im Freiland handelt, betrug der Fraktionsanteil über 16 mm mehr als 9 Gew. %. Die Fraktionsanteile unter 4 mm Äquivalentdurchmesser sind dagegen viel häufiger vertreten (62,6 bis 94,6 Gew. %). Ein großer Gewichtsanteil fällt dabei auf die Fraktionen kleiner 1 mm (siehe Tabelle 3.31).

In Abhängigkeit von der Vorbehandlung der Substrate (lufttrocken, schranktrocken und lieferfeucht) konnten unterschiedliche Gewichtsanteile in den einzelnen Fraktionen ermittelt werden. Da die Vorbehandlung lufttrocken jedoch als nicht reproduzierbar eingestuft werden mußte und die Fraktionsanteile nach der Vorbehandlung lieferfeucht nur über kleine Korrelationskoeffizienten zur Luftkapazität (AC-ISHS) verfügen, wurde in dieser Arbeit später ausschließlich mit der Vorbehandlung schranktrocken gearbeitet, obwohl PUUSTJÄRVI (1982) die Frage aufwirft, ob die nach einer Trocknung im Labor ermittelte Korngrößenverteilung überhaupt Aussagen über die Korngrößenverteilung im kulturfeuchten Substrat zuläßt.

Aufgrund der im Kapitel 3.5 dargestellten Ergebnisse, lassen sich jedoch auch für die nach Vorbehandlung schranktrocken ermittelte Korngrößenverteilung keine besonders engen Korrelationen zur Luftkapazität ermitteln. Daher muß festgehalten werden, dass eine Überwachung des Produktionsprozesses im Substratwerk mit den Mitteln der hier durchgeführten Siebmethoden und bei den hier untersuchten Substraten nicht möglich ist (siehe dazu auch Tabelle 3.33 und 3.34).

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen über den Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Wasser- und Lufthaushalt von Substraten überwiegend mit Torfen durchgeführt. So konnte SCHARPF (1997) an Torfen zeigen, dass die Wasserkapazität und damit auch die Luftkapazität vom Anteil an Partikeln mit einem Äquivalentdurchmesser unter 1 mm abhängig ist, wobei die Luftkapazität mit steigendem Anteil der Partikel unter 1 mm abnimmt. LIMBERS und REHME (1997) ermittelten für zwei Torfe mit jeweils feiner, mittlerer und grober Struktur eine lineare Abnahme der Luftkapazität mit zunehmendem Anteil an Partikeln unter 0,2 mm und eine lineare Zunahme der Luftkapazität mit dem Anteil an Körnern größer als 5 mm. Auch SCHIE (1999) betont den Zusammenhang zwischen der Luftkapazität und der Grobkörnigkeit von Torfsubstraten. VERHAGEN (1995; 1997) konnte mit verarbeiteten, gemahlene Torfen einen engen Zusammenhang zwischen dem Fraktionsanteil kleiner als 1 mm und der Luftkapazität (AC) finden. Mit Hilfe der von VERHAGEN (1997) aufgestellten Gleichung, die den mathematischen Zusammenhang zwischen den Anteilen (Gew. %) in der Fraktion kleiner als 1 mm und der Luftkapazität (AC) darstellt, war es dem Autor möglich, mit den untersuchten Torfen Torfmischungen mit definiertem Porenvolumen herzustellen (siehe Formel 27).

Formel (27): Zusammenhang zwischen dem Fraktionsanteil unter 1 mm Äquivalentdurchmesser ($A_{<1\text{mm}}$) und der Luftkapazität (AC) (nach VERHAGEN 1997)

$$AC = \frac{1}{(0,022124 + 0,001507 \times A_{<1\text{mm}})}$$

Verwendete der Autor allerdings nicht verarbeitete, ungemahlene Torfe, so war es ihm nicht möglich, den engen Zusammenhang zwischen den Fraktionsanteilen kleiner 1 mm und der Luftkapazität zu finden. Offenbar überdeckte der veränderliche Anteil an größeren Klumpen in diesen Torfen den in Formel 27 beschriebenen Zusammenhang.

Auf den ersten Blick scheinen die Ergebnisse in den zitierten Arbeiten und die Ergebnisse dieser Arbeit im Widerspruch zu stehen. Unter Beachtung der Tatsache, dass in dieser Arbeit jedoch nicht mit reinen Torfen gearbeitet wurde, sondern mit Mischsubstraten aus unterschiedlichen Zuschlagstoffen auf mineralischer und organischer Basis, so relativieren sich die zitierten Ergebnisse.

Entsprechend der schon erwähnten Probleme bei der Ermittlung der Korngrößenverteilung bei rein organischen sowie bei Mischungen aus mineralischen und organischen Substanzen, zeigt sich auch bei SCHARPF (1997), dass sich die für Torfe gefundenen engen Korrelationen zwischen der Luftkapazität und dem Anteil in der Fraktion kleiner 1 mm bei Mischsubstraten nicht bestätigen lässt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch FRESE (1998) in seiner Arbeit, in der auch Mischsubstrate untersucht wurden. Damit gleichen sich die Ergebnisse der zuletzt erwähnten Arbeiten den Ergebnissen dieser Arbeit an.

Vor dem Hintergrund, dass die Bestimmung der Korngrößenverteilung von organischen Mischungen problematisch ist und angesichts der Tatsache, dass extra für Torfe eine Siebmethode entwickelt wurde, die vor der eigentlichen Siebung die Huminstoffe zerstört (LEVESQUE und DINEL 1977), stellt sich daher die Frage, wie es FRESE (1998), LIMBERS und REHME (1997), SCHARPF (1997) und VERHAGEN (1995; 1997) überhaupt möglich war, für reine Torfe eine enge Beziehung zwischen den Fraktionsanteilen unter 1 mm und der Luftkapazität (AC) zu finden. Wenn unter dem Verarbeiten des Torfs (VERHAGEN 1995; 1997) das bei SCHMILEWSKI (1992) erläuterte Sieben des zuvor gemahlten Torfs gemeint ist, könnte es durch das Sieben zu einer Verringerung der vorkommenden Anzahl an verschiedenen Formen und Korngrößen in den betreffenden Torfen gekommen sein (= eine relativ gleichmäßige Verteilung der Korngrößen). Besonders die Faseranteile werden durch die Siebung abgefangen, auch beim Einsatz von heute üblichen Sternsieben. Dadurch könnte es erklärbar werden, warum die Fraktionierung derart vorbehandelter Torfe mit den Mitteln der Siebung erfolgreich war und warum dabei auch eine enge Korrelation zwischen den Fraktionsanteilen und der Luftkapazität gefunden werden konnte. Die Ergebnisse, die VERHAGEN (1995; 1997) mit unverarbeitetem, ungemahlenem Torf sammeln konnte, deuten in diese Richtung.

Der geschilderte Einfluss von Verarbeitung (Siebung) und Mahlen der Torfe würde auch die schlechten Korrelationen zwischen der Luftkapazität und den Fraktionsanteilen in dieser Arbeit erklären. Zunächst wurden hier vorwiegend Mischsubstrate aus organischen und mineralischen Komponenten untersucht und kaum reine Torfe. Außerdem erfolgte die Mischung der 23 Mischsubstrate mit 50 Vol % feinem und 50 Vol. % grobem Weißtorf, zu dem dann die Zuschlagstoffe zugemischt wurden. Dadurch könnte es zu einer Anreicherung von verschiedenartigen Formen und Korngrößen in den Mischsubstraten gekommen sein (starke Ungleichverteilung an Korngrößen): Diese Anreicherung an unterschiedlichen Korngrößen und -formen

könnte einen ähnlich negativen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Luftkapazität und Korngrößenverteilung haben, wie es im Fall des unverarbeiteten, ungemahlten Torfs bei VERHAGEN (1995, 1997) zu beobachten war.

Aufgrund der in Kapitel 3.5 geschilderten Ergebnisse, die mit den hier durchgeführten Siebmethoden ermittelt wurden, ist über Alternativen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten nachgedacht worden. Denkbar erscheint z.B. eine andere Methode zur Fraktionierung der Substrate. So könnte z.B. mit der in der DIN 18123 (HAAS 1997) beschriebenen Siebmethode gearbeitet werden.

Eine weitere Alternative könnte in der Erstellung von Nomogrammsätzen liegen. Diese bieten bei Mineralböden die Möglichkeit, innerhalb von ungefähr einer Stunde aus der Körnungssummenkurve und dem Porenvolumen die zugehörige Wasserspannungskurve zu ermitteln (HARTGE 1968; 1969; HARTGE et al. 1985; HARTGE und HORN 1989). Eine Körnungssummenkurve könnte durch die Interpolation der in dieser Arbeit gesammelten Daten relativ schnell erstellt werden. Wasserspannungskurven sind bereits für alle untersuchten Substrate vorhanden, die Porenvolumina sind auch bekannt. Da bisher jedoch lediglich Nomogrammsätze für Mineralböden mit bis maximal 10 % organischer Substanz erstellt worden sind, sollte allerdings vor zu hohen Erwartungen gewarnt werden. Trotzdem sollte der Versuch unternommen werden Nomogrammsätze zu erstellen, da die meisten der dazu benötigten Daten schon in dieser Arbeit gesammelt wurden.

Nach Angaben von BACHMANN (1988) gibt es die schon häufiger erwähnte Methode zur Siebung von Torfen nach vorheriger Zerstörung der Huminstoffe (LEVESQUE und DINEL 1977). Eine Kombination aus Siebung ohne vorherige Zerstörung der Huminstoffe (wie in dieser Arbeit geschehen) und einer zusätzlichen Siebung nach der Methode nach LEVESQUE und DINEL (1977) könnte möglicherweise Rückschlüsse auf die resultierende Porengrößenverteilung und damit auf die Wasserspannungskurve ermöglichen (BACHMANN 2000).

Ergänzend zur Berechnung von Korrelationskoeffizienten zwischen den Gewichtsanteilen in den Siebfraktionen und der Luftkapazität (AC) wurde versucht, eine kritische Grenze für den Anteil an Partikeln mit einem Äquivalentdurchmesser kleiner als 1 mm zu finden, bei deren Überschreitung die Luftkapazität im Substrat zu klein wird. (siehe Abb. 4.12 und 4.13). Dieser Versuch war aber schon angesichts der mangelnden Kenntnis bezüglich eines Minimalwerts für die Luftkapazität sehr problematisch. In den Abbildungen 4.12 und 4.13 wurde von einer kritischen Grenze von 15 Vol. % für die Luftkapazität im Substrat ausgegangen. Als kritische Grenze des

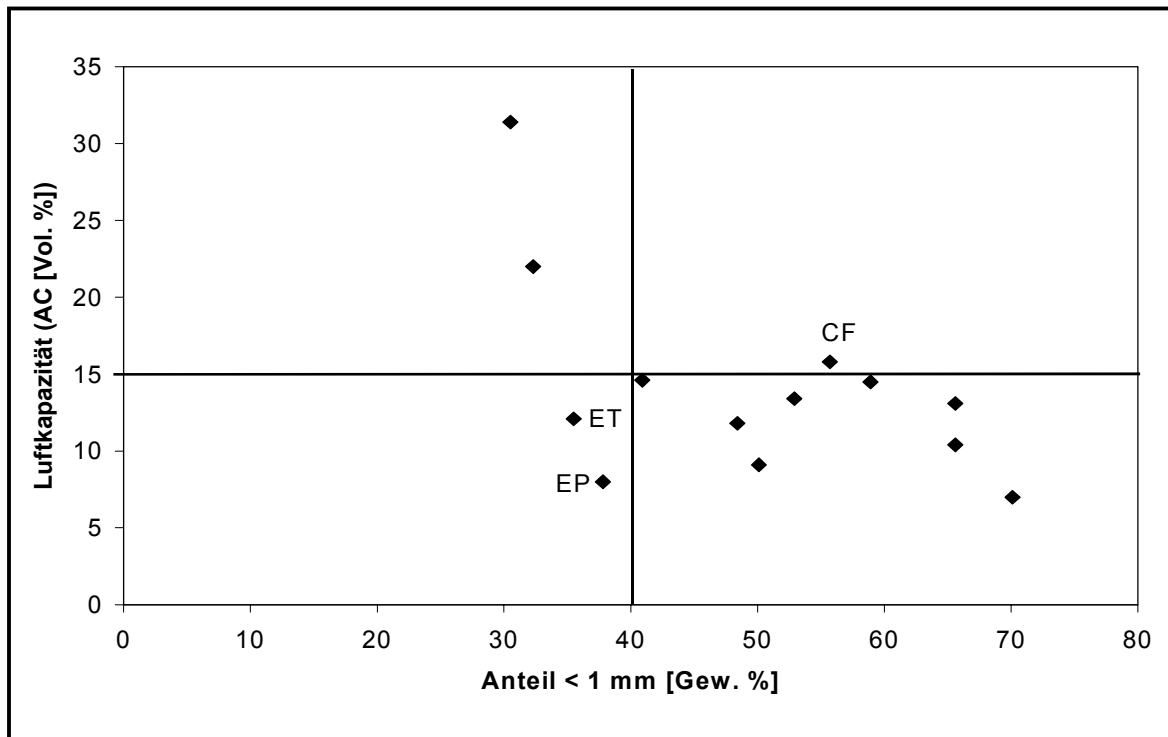


Abb. 4.12: Luftkapazität (AC) in Abhängigkeit vom Fraktionsanteil < 1 mm [Gew. %] bei den 13 untersuchten Standardsubstraten nach Siebung mit der Methode nach DIN 11540, Variante schranktrocken. **Vertikale Gerade** = kritische Grenze des Fraktionsanteils < 1mm; **horizontale Gerade** = kritische Grenze für die Luftkapazität (AC)

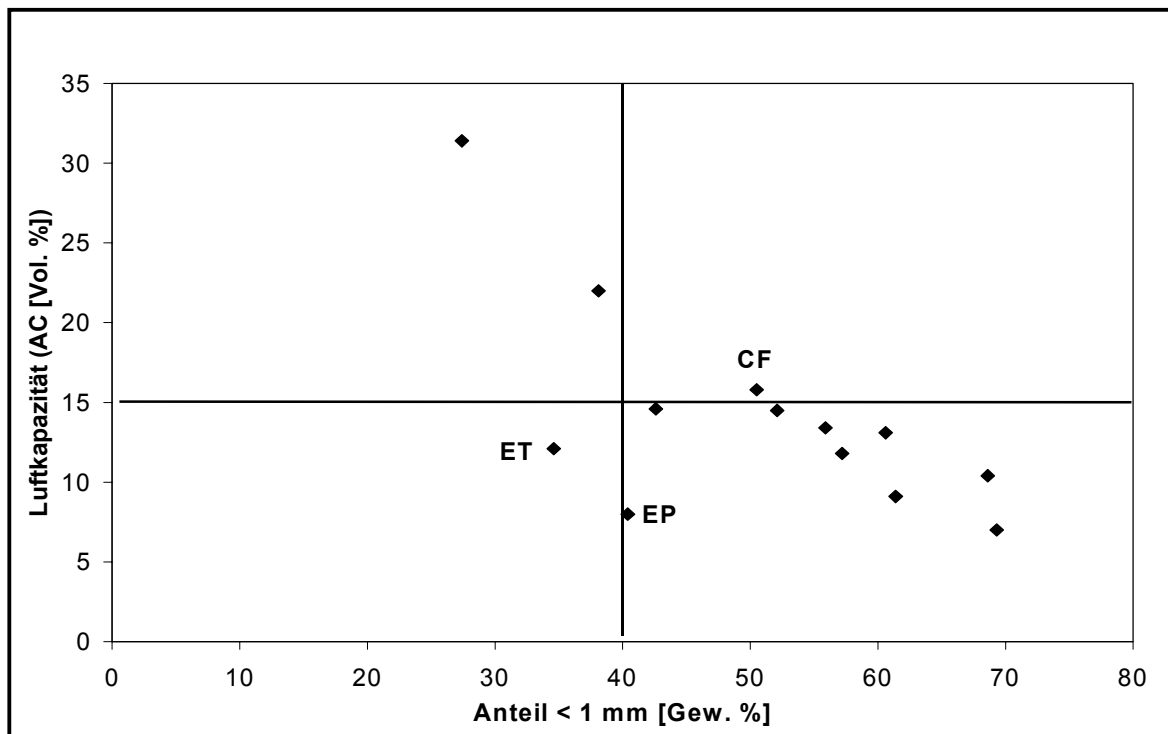


Abb. 4.13: Luftkapazität (AC) in Abhängigkeit vom Fraktionsanteil < 1 mm [Gew. %] bei den 13 untersuchten Standardsubstraten nach Siebung mit der Methode nach R.H.P., Variante schranktrocken. **Vertikale Gerade** = kritische Grenze des Fraktionsanteils < 1mm; **horizontale Gerade** = kritische Grenze für die Luftkapazität (AC)

Fraktionsanteils unter 1 mm wurde 40 Gew. % ausgemacht, die nicht überschritten werden sollte, damit die Luftkapazität nicht unter 15 Vol. % sinkt. Wie aus den Abbildungen jedoch deutlich hervorgeht, ist der kritischen Fraktionsanteil unter 1 mm von 40 Gew. % allerdings bei acht (Siebung nach DIN 11540, schranktrocken) bzw. neun Substraten (Siebung nach R.H.P., schranktrocken) der 13 handelsüblichen Standardsubstrate überschritten, für die jedoch keine Probleme mit der Luftkapazität bekannt sind. Außerdem finden sich mit ET und EP zwei in der Praxis häufig verwendete Substrate, die eine Luftkapazität unter 15 Vol. % aufweisen, obwohl der kritische Gewichtsanteil von 40 Gew. % der Fraktion kleiner 1 mm noch nicht erreicht ist. Um zu ermitteln, ob bei den beiden genannten Substraten eine starke Ungleichverteilung der Körnung zu finden ist, die dieses Ausnahmeverhalten erklären könnte, wurde der Ungleichförmigkeitsgrad bzw. U-Wert berechnet (siehe Formel 28).

Formel (28): Ungleichförmigkeitsgrad = U-Wert (nach HARTGE und HORN 1989)

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d10 = Äquivalentdurchmesser, bei der die Körnungsummenkurve den 10 % Punkt der Ordinate schneidet [mm]

d60 = Äquivalentdurchmesser, bei der die Körnungsummenkurve den 60 % Punkt der Ordinate schneidet [mm]

Ein hoher U-Wert bedeutet, dass die Körnung kaum sortiert ist, ein niedriger U-Wert deutet auf sehr gleichförmig sortierte Substrate hin, bei denen die unterschiedlichen Fraktionen über etwa gleiche Anteile verfügen und die zugehörige Körnungsummenkurve also nicht so stark steigt (HARTGE und HORN 1989, 1999). Für die Substrate EP und ET wurde ein hoher U-Wert erwartet, da vermutet wurde, dass es aufgrund des klumpigen Feuchttons zu einer Ungleichverteilung in der Korngrößenverteilung dieser beiden Substrate gekommen sein könnte. Durch diese Ungleichverteilung könnte es daher zu einer Überdeckung der Beziehung zwischen der Luftkapazität und dem Gewichtsanteil in der Fraktion kleiner 1 mm gekommen sein, vergleichbar dem Einfluss, den der unverarbeitete, ungemahlene Torf in der Arbeit von VERHAGEN (1997) hatte. Da sich die U-Werte der 13 Standardsubstrate, die in

den Abbildungen 4.12 und 4.13 beachtet wurden, jedoch kaum unterscheiden, ist der U-Wert in der hier berechneten Form kaum tauglich, um das Verhalten der untersuchten Substrate zu erklären.

5 Zusammenfassung

Zu den für den Gartenbau besonders wichtigen physikalischen Substrateigenschaften zählen die Mengen an Wasser und Luft, die vom Substrat gespeichert werden können. Diese Eigenschaften sollten Produzent und Anwender der Substrate schon vor Kulturbeginn kennen, da sie sich, im Gegensatz zu den chemischen Eigenschaften, im Kulturverlauf nicht gezielt verändern lassen.

Zur Messung dieser Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts gibt es unterschiedliche Methoden, zu denen u.a. die sehr aufwendige ISHS-Methode (DIN EN 13041) gehört, die auch in dieser Arbeit als Standardmethode zur Untersuchung der insgesamt 36 Substrate verwendet wurde. Der Grund dafür ist, dass es sich dabei um die europäische Normmethode handelt, die ab Ende 2001 europaweit zur Deklaration von Substratausgangsstoffen und Kultursubstraten herangezogen wird. Der Nachteil der ISHS-Methode ist, dass sie kein gezielt eingestelltes Volumengewicht bei der Messung beachten kann, obwohl viele Untersuchungen gezeigt haben, dass neben der Topf- / Containerhöhe und der Topf- / Containergeometrie vor allem auch das Volumengewicht im Topf / Container (dB) großen Einfluss auf die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts hat (u.a. BOHNE et al. 1998; BRÜCKNER 1994; CARON und NKONGOLO 1999; FONTENO 1993). Daher wurden die 13 handelsüblichen Standardsubstrate nicht nur mit der ISHS-Methode sondern zusätzlich auch mit der M-ISHS-Methode (= modifizierte ISHS-Methode) untersucht, die ein gezielt eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder bei der Messung berücksichtigen kann (WREDE und BOHNE 2000b).

Sowohl mit Hilfe der ISHS-Methode als auch mit Hilfe der M-ISHS-Methode können komplette Wasserspannungskurven erstellt werden, die es ermöglichen die Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts in Abhängigkeit von der Höhe des Topfs / Containers zu beurteilen. Daneben eignen sich beide Methoden auch zur Abschätzung des verfügbaren Wassers (AW), einer wichtigen Kenngröße zur wassersparenden Steuerung einer Bewässerung. Da die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts u.a. vom Volumengewicht abhängig sind, eignet sich besonders die M-ISHS-Methode für diese Belange.

Beide Methoden benötigen 7-8 (M-ISHS-Methode) bzw. 8-9 Tage (ISHS-Methode), bis Kennwerte wie Containerkapazität (CC), Luftkapazität (AC) und verfügbares Wasser (AW) vorliegen. Da zur freiwilligen Deklaration der Kultursubstrate, wie sie die Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V. im Rahmen des Gütezeichens RAL GZ 252 anbietet, nicht mit der ISHS-Methode erfolgen muss, wird nach einer

schnelleren, preiswerteren Alternativmethode gesucht, deren Kennwerte jedoch über eine enge Korrelation zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode verfügen sollen. Daher wurde in dieser Arbeit die sogenannte Q-Methode (quick = schnell) vorgestellt und auf ihre Eignung geprüft. Sie basiert auf einer Schnellmethode von SCHLICHTING und BLUME (1966) und benötigt lediglich 48 Stunden, bis die Kennwerte Luft- und Wasserkapazität vorliegen. Genau wie die M-ISHS-Methode arbeitet auch die Q-Methode mit einem gezielt eingestellten Volumengewicht (dB) im Probenzylinder. Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier unterschiedliche Varianten des Volumengewichts (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) mit der Q-Methode hinsichtlich ihrer Eignung überprüft, Werte für die Wasserkapazität (WC) und Luftkapazität (AC) zu ermitteln, die über eine enge Beziehung zu den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode verfügen. Daneben wurden die vier Volumengewichtsvarianten aber auch dahingehend untersucht, mit welcher Variante eine möglichst geringe Luftkapazität gemessen werden kann. Ein möglichst kleiner Wert für AC erscheint deswegen als erstrebenswert für die Deklaration von Kultursubstraten, da dieser beim Praktiker im Topf / Container nicht unterschritten werden kann. Daher eignet sich ein solcher Wert auch besonders zur Substratauswahl für solche Kulturen, die gegenüber Luftmangel sehr anfällig sind. Zusätzlich würde ein Minimalwert bei der Produktdeklaration auch den Produzenten der Substrate vor Reklamationen und Regressforderungen schützen. Mit Hilfe der Q-Methode können jedoch lediglich Luft- und Wasserkapazität ermittelt werden. Eine Wasserspannungskurve lässt sich mit Hilfe der Q-Methode nicht aufstellen.

Außerdem wurde an den 36 untersuchten Substraten der Versuch unternommen, mit Hilfe von zwei Siebsätzen (DIN 11540; R.H.P. Methode) Rückschlüsse auf die Luftkapazität der Kultursubstrate zu ziehen, um so ein Instrument zur schnellen Überwachung der Produktion im Substratwerk zur Verfügung stellen zu können. Dazu wurden die Substrate nach drei unterschiedlichen Varianten der Trocknung (Vorbehandlung lieferfeucht, lufttrocken und schranktrocken) gesiebt und die Korrelation der Gewichtsanteile der einzelnen Fraktionen bzw. Summen aus verschiedenen Fraktionen zur Luftkapazität (AC) errechnet.

Außerdem sollte anhand der 23 selbst gemischten Substrate geprüft werden, welchen Einfluss steigende Volumenanteile unterschiedlicher Zuschlagstoffe (granulierter Ton (granT), Feucht- bzw. Grubenton (GT), Kokosfasern (KF),

Rindenhumus (RH), gesiebter - (STf) und ungesiebter Schwarztorf (STg)) zu Weißtorf auf die resultierende Luft- und Wasserkapazität haben.

Q-Methode

Die 36 Substrate wurden mit je 2 Messungen pro Volumengewichtsvariante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5; Topffest) untersucht, wobei bei jeder Messung mit jeweils 2 Wiederholungen pro Substratvariante gearbeitet wurde.

Von den vier geprüften Varianten des Volumengewichts im Probenzylinder zum Anfang der Messung (dB_A) führt die Variante Topffest zu den meisten Höchstwerten (17) gefolgt von VDLUFA+5 mit 16. Die Variante Topffest, deren Bestimmungsmethode noch wenig standardisiert und mechanisiert ist, ist schlecht reproduzierbar und führt daneben auch zu einer größeren Anzahl minimaler Werte (10) für dB_E als die Variante VDLUFA+5 (0).

Bezüglich des Volumengewichts im Probenzylinder zum Ende der Messung kann festgehalten werden, dass die Variante VDLUFA+5 die meisten Maxima (12) und die wenigsten Minima (4) erzeugt. Die engste Korrelation zwischen dB_A und dB_E konnte allerdings für die Variante Topffest errechnet werden, gefolgt von VDLUFA+5. Damit ist die gezielte Beeinflussung des Volumengewichts zum Ende der Messung (dB_E) am besten mit Hilfe der Variante Topffest möglich. Die Variante VDLUFA verfügt jedoch über die engste Beziehung zu den entsprechenden dB_E -Werten der Standardmethode (ISHS-Methode), gefolgt von Topffest und VDLUFA+5.

Entgegen den Erwartungen führt nicht immer das höchste Volumengewicht zum Ende der Messung (dB_E) auch zur höchsten Wasserkapazität (WC) und zur niedrigsten Luftkapazität (AC). Offenbar spielt auch die Art der Einstellung des Volumengewichts (der Anteil von Sackung und Schrumpfung) eine große Rolle. Die Varianten Topffest (14) und VDLUFA-5 (13) erzeugen die meisten Maxima für WC, die Variante VDLUFA die meisten Minima (25). Obwohl sich nur die WC-Werte der Variante VDLUFA signifikant von den Werten der Containerkapazität (CC) der ISHS-Methode unterscheiden, wurde für die WC-Werte der Variante VDLUFA gleichzeitig die engste Korrelation zur Containerkapazität errechnet. Das ist kein Widerspruch und bedeutet, dass die Werte für die Wasserkapazität der Variante VDLUFA zwar signifikant kleiner sind als die Werte für die Containerkapazität (CC) die mit der ISHS-Methode ermittelt wurden, gleichzeitig verändern sich die WC-Werte der Variante VDLUFA bei den meisten Substraten offenbar in ähnlichem Umfang und in gleicher Richtung wie die CC-Werte der ISHS-Methode. Der mathematische

Zusammenhang zwischen der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC-ISHS) und der Wasserkapazität der Q-Methode Variante VDLUFA (WC-VDLUFA) lautet:

$$\mathbf{WC-VDLUFA = 1,0019 CC-ISHS - 5,337}$$

Die Varianten Topffest (15) und VDLUFA-5 (11) führen zu den meisten minimalen Werten der Luftkapazität (AC). Dies ist als positiv zu bewerten, wenn das Ziel der Deklaration von Kultursubstraten die Sicherheit vor Reklamationen und Regressforderungen ist.

Mit Hilfe der Variante VDLUFA werden immerhin 24 Höchstwerte für AC ermittelt. Obwohl nur mit der Variante VDLUFA signifikant höhere Werte für AC gemessen werden als mit der ISHS-Methode, wurde trotzdem die engste Korrelation zwischen den AC-Werten beider Methoden errechnet. Sinngemäß kann der gleiche Zusammenhang zur Erklärung herangezogen werden, wie schon zuvor im Zusammenhang mit der Wasserkapazität (WC) geschehen. Die Gleichung

$$\mathbf{AC-VDLUFA = 1,0092 AC-ISHS + 4,9503}$$

drückt den mathematischen Zusammenhang zwischen der Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (AC-ISHS) und der Luftkapazität (AC-VDLUFA) aus, die mit Hilfe der Q-Methode Variante VDLUFA ermittelt wurde.

Damit läßt sich eindeutig festhalten, dass die Q-Methode bei den hier untersuchten 36 Substraten besonders mit der Variante VDLUFA zu Kennwerten des Luft- und Wasserhaushalts führt, die über eine sehr enge Beziehung zu den entsprechenden Werten der ISHS-Methode verfügen.

M-ISHS-Methode

Genau wie im Fall der Q-Methode führt auch bei der M-ISHS-Methode nicht in jedem Fall das höchste Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E) auch automatisch zur kleinsten Luftkapazität bzw. größten Containerkapazität.

Die M-ISHS-Methode liefert nur bezüglich der Luftkapazität (AC) Werte, die sich bedeutsam von den entsprechenden Kennwerten der ISHS-Methode unterscheiden. Die Unterschiede bezüglich der Containerkapazität (CC) sind in Ihrer Bedeutung abhängig von der Topf- / Containergröße, genau wie die verfügbare Wassermenge (AW). Bei beiden Kennwerten nimmt die Bedeutung mit zunehmender Gefäßgröße zu.

Wird die Luftkapazität (AC) der Varianten VDLUFA und Topffest mit den AC-Werten der ISHS-Methode verglichen, so ergibt sich folgendes Bild:

- Die Variante VDLUFA der M-ISHS-Methode führt bei acht von 13 Substraten zur höchsten Luftkapazität (AC) und nur bei einem Substrat zur kleinsten Luftkapazität.
- Dagegen wird mit der Variante Topffest nur bei zwei Substraten ein Maximalwert und bei immerhin sieben Substraten ein Minimalwert für die Luftkapazität ermittelt.
- In vier Fällen führt die ISHS-Methode zur kleinsten Luftkapazität, in drei Fällen zur größten.

Der Vergleich der Werte der Luftkapazität zwischen beiden Varianten der M-ISHS-Methode zeigt, dass die Werte bei der Variante VDLUFA im Mittel 3,2 Vol. % über denen der Variante Topffest liegen.

Siebung

Von den drei getesteten Vorbehandlungen (lieferfeucht, lufttrocken und schranktrocken) hat sich die Variante schranktrocken als beste Variante hervorgetan. Die Vorbehandlung_{lufttrocken} in der hier durchgeführten Form (Trocknen im Gewächshaus) ist nicht reproduzierbar. Bei der Variante lieferfeucht zeigen die ermittelten Fraktionsanteile bei der Siebung der 13 Standardsubstrate mit dem Siebsatz RHP nicht so enge Korrelationen zur Luftkapazität (AC) wie eine Siebung nach Vorbehandlung_{schranktrocken}. Daher wurden die 23 Mischsubstrate im Folgenden nur noch nach Vorbehandlung_{schranktrocken} gesiebt. Der Siebsatz nach DIN 11540 wurde bei allen 36 untersuchten Substraten ausschließlich nach Vorbehandlung_{schranktrocken} getestet.

Die Fraktionen größer als 31,5 mm und 16 bis 31,5 mm spielen keine Rolle. Mit abnehmender Maschenweite der Siebe nimmt der Substratanteil in den resultierenden Fraktionen zu. In den Fraktionen kleiner 4 mm werden zwischen 63 und 94 Gew. % der Substratpartikel gefunden. Davon entfällt ein großer Teil (28 – 69 Gew. %) auf die Fraktion kleiner 1 mm.

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen den jeweiligen Fraktionsanteilen und der Luftkapazität (AC) ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode, ergab bei keinem der geprüften Siebsätze eine für die schnelle Überprüfung der Substratqualität ausreichend hohe Korrelation. Diese Ergebnisse stehen allerdings nicht im Widerspruch zu anderen Arbeiten, die lediglich bei reinen Torfen enge Beziehungen zwischen der Luftkapazität und den Fraktionsanteilen unter 1 mm ermitteln konnten (FRESE 1998; LIMBERS und REHME 1997; SCHARPF 1997; VERHAGEN 1995, 1997). Diese engen Korrelationen ließen sich z.B. auch von SCHARPF (1997) nicht

bestätigen, sobald Substrate mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen untersucht wurden.

Die Fraktionierung der untersuchten Substrate in der hier durchgeführten Form eignet sich daher nicht zur Überwachung des Produktionsprozesses im Substratwerk, da keine ausreichend sicheren Rückschlüsse auf die Luftkapazität möglich sind.

Einfluss steigender Zuschlagstoffanteile auf die physikalischen Eigenschaften von Weißtorf

Aufgrund des hohen Benetzungswiderstands des schon zum Mischtermin sehr trockenen Weißtorfs konnten keine repräsentativen physikalischen Kennwerte der erstellten Mischsubstrate ermittelt werden. Daher war es auch nicht möglich eventuelle Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, die sich durch die steigenden Zuschlagstoffanteile zu Weißtorf ergeben.

Es konnten jedoch folgende Tendenzen festgehalten werden, nach denen sich die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts mit steigenden Anteilen der Zuschlagstoffe verändern:

- Bei granuliertem Ton (granT) und Grubenton (GT) nimmt die Luftkapazität (AC) mit steigendem Anteil der beiden Zuschlagstoffe ab, die Containerkapazität (CC) und das verfügbare Wasser (AW) zu.
- Durch den Zusatz von Kokosfasern (KF) verringert sich die Containerkapazität und das verfügbare Wasser (AW) bei gleichzeitiger Zunahme der Luftkapazität (AC).
- Entgegen den Erwartungen führten steigende Anteile Rindenumus (RH) zur Verringerung der Luftkapazität (AC) während die Werte für die Containerkapazität (CC) und das verfügbare Wasser (AW) ansteigen. Offenbar waren die untersuchten Rindenumusanteile noch zu klein um sich positiv auf die Luftkapazität auswirken zu können, zumal die Luftkapazität des trockenen Torfs durch den hohen Benetzungswiderstand künstlich erhöht war.
- Steigende Anteile von gesiebttem Schwarztorf (STf) und ungesiebttem Schwarztorf (STg) führten zur Zunahme der Containerkapazität (CC) und zur Abnahme der Luftkapazität (AC).

6 Literaturverzeichnis¹

AENDEKERK, T. (1988): Standards of physical quality for substrates for nursery plants. Boomteelt Praktijonderzoek 5004, Proefstation voor de boomkwekerij, Boskoop. <http://www.bibwau.nl/boskoop.html> (Stand: 12.1999)

AENDEKERK, T. (1993): Standards of physical properties for substrates for cuttings. Acta Hort. 342: 273 - 278

AENDEKERK, T. (1997): Decomposition of peat substrates in relation to physical properties and growth of *Chamaecyparis*. Acta Hort. 450: 191 – 197

AENDEKERK, T.; D. KLAPWIJK; W.L. SCHIE, van; N. STRAVER; A. WEES, van der; M.A. ZEVENHOVEN (1992): Richtlijnen voor de Productie van Potgronden en Substraten. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas te Naaldwijk, Nederlandse, 65 pp.

ALLAIRE, S.E.; J. CARON und J. GALLICHAND (1994): Measuring the saturated hydraulic conductivity of peat substrates in nursery containers. Can. J. Soil Sci. 74: 431 - 437

ALLAIRE, S.E.; J. CARON; J. DUCHESNE, L.E. PARENT und J.A. RIOUX (1996): Air-filled porosity, gas relative diffusivity, and tortuosity: Indices of *Prunus x cistena* sp. growth in peat substrates. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 121: 236 – 242

ALLAIRE-LEUNG, S.R.; J. CARON und L.E. PARENT (1999): Changes in physical properties of peat substrates during plant growth: Can. J. Soil Sci. 79: 137 – 139

ALLMEN, F. von und C. GYSI (1983): Physikalische und chemische Substratuntersuchungen im Zierpflanzenbau. Gartenbauwissenschaft 48 (4): 171 - 176

ANISKO, T.; D.E. NESMITH und O. LINDSTROM (1994): Time domain reflectometry for measuring water content of organic growing media in containers. HortScience 29 (11): 1511 – 1513

¹ = Abkürzungen der Zeitschriften und Veröffentlichungen soweit möglich nach BIOSIS (1992): Serial sources for the BIOSIS database, Biological Abstracts Inc., Philadelphia

ARCHUT (1999a): Lignostrat U, Rinden-Kultursubstrat. Produktinformation auf der Verpackung. Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor, Industrie-Erdenwerk Archut GmbH und Co. KG, Lauterbach-Wallenrod

ARCHUT (1999b): Fruhstorfer Erde Typ EP 340. Produktinformation auf der Verpackung. Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor, Industrie-Erdenwerk Archut GmbH und Co. KG, Lauterbach-Wallenrod

AUGUSTIN, J. und G. SCHILLING (1989): Untersuchungen über die Ursachen der gehemmten Wurzel ausbreitung bei steigender Substratlagerungsdichte. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 33 (4): 239 – 247

BACHMANN, J. (1988): Auswirkungen der organischen Substanz verschiedenen Zersetzungsgrades auf die physikalischen Bodeneigenschaften. Dissertation Universität Hannover

BACHMANN, J. (2000): persönliche Mitteilung

BACKHAUS-CYSYK, T. (1995): Substrate à la carte. Neue Produktionsstätte in Grubenforst vorgestellt. Gärtnerbörse 29: 1268 – 1269

BAILLY, F. (1989a): Bodenphysikalische Untersuchungen an Substraten: I. Hohlräume und Luft. Gärtnerbörse und Gartenwelt 89 (17): 808 – 812

BAILLY, F. (1989b): Bodenphysikalische Untersuchungen an Substraten. II. Wasser und seine Pflanzenverfügbarkeit. Gärtnerbörse und Gartenwelt 89 (18): 862 – 864

BAILLY, F. (1989c): Bodenphysikalische Untersuchungen an Substraten. III. Ergebnisse von Versuchen mit Müllkompost-Mischungen. Gärtnerbörse und Gartenwelt 89 (19): 914 – 917

BARTELS, W. (1999): Physikalische Eigenschaften von Pietal. Dtsch. Gartenbau 38: 8 – 10

BARTELS, W. (2000): Physikalische Qualitätsparameter für Substrate. ZVG Gartenbau Report 26 (4): 11 – 13

BERNIER, P.Y. (1992): Soil texture influences seedling water stress in more ways than one. Tree Planter's Notes 43 (2): 39 – 42

BERNIER, P.Y.; J.D. STEWART und A. GONZALES (1995): Effects of physical properties of Sphagnum peat on water stress in containerized *Picea mariana* seedlings under simulated field conditions. Skand. J. For. Res. 10: 184 - 189

BILDERBACK, T.E. und W.C. FONTENO (1987): Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. J. Environ. Hortic. 5: 180 – 182

BIK, A. (1973): Some thoughts on the physical properties of substrates with special references to aeration. Acta Hort. 31: 149 – 160

BOHNE, H. (2000): Mündliche Mitteilung zum Vergleich zweier Verfahren zur indirekten Bestimmung der Dichte der Festsubstanz (dF) an der Abteilung Baumschule der Universität Hannover (Dezember 2000)

BOHNE, H. und C. GÜNTHER (1997): Physical properties of peat determined with different methods. Acta Hort. 450: 271 - 176

BOHNE, H.; P. KREMER und A. WREDE (1998): Physikalische Substrateigenschaften messen, interpretieren, umsetzen. TASPO Gartenbaumagazin 8 (2): 33 – 35

BRILL (1998): Brill Substrat. Firmen und Produktinformation. Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG, Georgsdorf

BRILL (1999a): Brill Topfsubstrat Typ 1. Produktinformation auf der Verpackung. Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG, Georgsdorf

BRILL (1999b): Brill Vermehrungssubstrat Typ 3. Produktinformation auf der Verpackung. Gebr. Brill Substrate GmbH und Co. KG, Georgsdorf

BRÜCKNER, U. (1994): Physikalische Eigenschaften von Kultursubstraten. *Gemüse* 30 (5): 292 – 294

BRÜCKNER, U. (1997): Physical properties of different potting media and substrate mixtures – especially air- and water capacity. *Proc. Int. Symp. Growing media and plant nutrition. Acta Hort.* 450: 263 – 270

BRUMM, I. (2000): Ein Schritt voran – Gütesicherung Blumenerden,. *ZVG Gartenbau Report* 26 (4): 33 – 35

BUNT, A.C. (1984): Physical properties of mixtures of peat and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. *Acta Hort.* 150: 143 – 153

BUNT, A.C. (1988): *Media and mixes for container-grown plants.* Unwin Hyman, London, UK

CARON, J.; H.L. XU; P.Y. BERNIER; I. DUCHENSE und P. TARDIF (1998): Water availability in three artificial substrates during *Prunus x cistena* growth: Variable threshold values. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 123: 931 – 936

CARON, J. und V.K.N. NKONGOLO (1999): Aeration in growing media: recent developments. *Acta Hort.* 481: 545 – 551

CATTIVELLO, C; E. DELLA DONNA und R. PANTANALI (1997): Behaviour of peat substrates during *Cyclamen* and *Poinsettia* cultivation. *Acta Hort.* 450: 439 – 447

DE BOODT, M. und N. DE WAELE (1968): Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie* 18 (3): 275 – 300

DE BOODT, M und O. VERDONCK (1972): The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26: 37 – 44

DE BOODT, M.; O. VERDONCK und I.M. CAPPAERT (1974): Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37: 2054 – 2062

DIJK, L.F.M van und S.S. DE BES (1987): Methods for physical analysis of potting soil and peat. Glasshouse Crops Research and Experiment Station Naaldwijk, The Netherlands

DIN11540 (1989): Torfe und Torfprodukte. Technische Lieferbedingungen, Eigenschaften, Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 12579 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Probenahme. Deutsche Fassung der EN 12579: 1999. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 12580 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Bestimmung der Menge. Deutsche Fassung der EN 12580: 1999. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13037 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Bestimmung des pH-Wertes. Deutsche Fassung der EN 13037: 1999. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13038 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. Deutsche Fassung der EN 13038: 1999. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13039 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Bestimmung des Gehaltes an organischer Substanz und Asche. Deutsche Fassung der EN 13039: 1999. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13040 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Probenherstellung für chemische und physikalische Untersuchungen, Bestimmung des Trockenrückstands, des Feuchtegehaltes und der Laborschüttdichte. Deutsche Fassung der EN 13040: 2000. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13041 (2000): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate. Bestimmung der physikalischen Eigenschaften Rohdichte (trocken), Luftkapazität, Wasser-

kapazität, Schrumpfungswert und Gesamtporenvolumen. Deutsche Fassung der EN 13041: 2000. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DRZAL, M.S.; W.C. FONTENO und D. KEITH CASSEL (1999): Pore fraction analysis: A new tool for substrate testing. Proc. Int. Symp. Growing media and plant nutrition. Acta Hort. 450: 43 – 54

DUFNER, J.; U. JENSEN und E. SCHUMACHER (1992): Statistik mit SAS. Teubner, Stuttgart

EINHEITSERDE (1999a): Einheitserde Typ P. Produktinformation auf der Verpackung. Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, Sinntal-Jossa

EINHEITSERDE (1999b): Einheitserde Typ Primel. Produktinformation auf der Verpackung. Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, Sinntal-Jossa

EINHEITSERDE (1999a): Einheitserde Typ T. Produktinformation auf der Verpackung. Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, Sinntal-Jossa

EINHEITSERDE (1999d): Optifer ®, Produktinformation. Gebr. Patzer GmbH und Co. KG, Sinntal-Jossa. <http://www.einheitserde.de/erden.html> (Stand 12.1999)

EVERS, G. (ohne Jahr): Düngemittel für den Gartenbau. EINHEITSERDE WERKVERBAND e.V. (Hrsg.), Sinntal- Jossa

FLL (1995): Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (Hrsg.) Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. FLL, Troisdorf

FLORAGARD (1999): TKS®1 Instant und TKS®2 Instant. Produktinformation. Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Oldenburg. <http://www.floragard.de/profi/index.html> (Stand 12.1999)

FLORAGARD (2000): Floragard News. Werbebroschüre. Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Oldenburg

FLORAGARD (ohne Jahr): Hochmodernes Substratwerk im Floragard-Werksverbund geht in Produktion. Werbebroschüre zu Neueröffnung des Produktionswerks Böske. Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Oldenburg

FONTENO, W.C. (1989): An approach to modelling air and water status of horticultural substrates. *Acta Hort.* 238: 67 – 74

FONTENO, W.C. (1993): Problems and considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Hort.* 342: 197 - 204

FRENZ, F.W. und P. LECHL (1981): The influence of different water suction on yield and water requirements of tomatoes, cucumbers, radish and lettuce in greenhouses. *Acta Hort.* 119: 323 - 331

FRESE, J. (1998): Entwicklung einer Methode für die Ermittlung physikalischer Substrateigenschaften und Vergleich vorhandener Methoden. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Zierpflanzenbau, Baumschule und Pflanzenzüchtung, Abt. Baumschule

GABRIELS, R. und O. VERDONCK (1991): Physical and chemical characterization of plant substrates: Towards an European standardisation. *Acta Hort.* 294: 249 – 259

GABRIELS, R. und O. VERDONCK (1992): Reference method for the determination of physical properties of plant substrates (revised ed. Nov. 1990). *Acta Hort.* 302: 169 - 179

GABRIELS, R.; W. KEIERSBULCK van und O. VERDONCK (1991): Reference method for physical and chemical characterisation of growing media: An international comparative study. *Acta Hort.* 294: 147 - 160

GABRIELS, R.; W. KEIERSBULCK van und H. ENGELS (1993): A rapid method for the determination of physical properties of growing media. *Acta Hort.* 342: 243-248

GEISLER, G. (1978): Der Lufthaushalt des Bodens in seiner Bedeutung für das Pflanzenwachstum. *Kali-Briefe (Büntehof)* 14 (1): 61 – 78

GGG (1999): Güte- und Prüfbestimmungen für Blumenerden. Schlussfassung vom Dezember 1999. Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V., Hannover

GISLEROD, H.R. (1982): Physical conditions of propagation media and their influence on rooting of cuttings. I. Air content and oxygen diffusion at different moisture tensions. *Plant Soil* 69: 440 - 456

GLINSKI, J. und J. LIPIE (1990): Soil physical conditions and plant roots. CFR Press, Fla

GOODMAN, D. (1983): A portable tensiometer for measurements of water tension in peat blocks. *J. Agr. Eng. Res.* 28: 179 – 182 (zit. nach CARON et al. 1998)

GRANTZAU, E. (1992): Organische Reststoffe in Kultursubstraten nur mit standardisierten Qualitäten. *Zierpflanzenbau* 32 (6): 253 – 256

GRANTZAU, E. (1996): Substrate: Leichtsinnig handelt, wer sie ohne Analyse einsetzt. *Dtsch. Baumsch.* 48 (3): 202 - 203

GRANTZAU, E. (1997): Eigenschaften organischer Substratkomponenten. *TASPO Gartenbaumagazin* 7 (10): 51

GRUDA, N. und W.H. SCHNITZLER (1999): Determination of volume weight and water content of wood fiber substrates with different methods. *Agribiol. Res.* 52 (2): 163 – 170

GÜNTHER, J. (2000): Kultursubstrate für den europäischen Erwerbsgartenbau. Sonderdruck im ZVG Gartenbau Report 26 (4): 5 pp.

GÜNTHER, J. (2001): Persönlich Mitteilung vom 09.01.2001 im Verlauf einer Sitzung mit Mitgliedern des Fachausschusses Kultursubstrate der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V.

HAAS, H (1997): Verbesserung des Analyseverfahrens zur Ermittlung der Korngrößenverteilung feinkörniger Boden und Bodenanteile nach DIN 18123. For-

schungsarbeiten aus dem Straßen- und Verkehrswesen, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.), Heft 107, 29 pp.

HANDRECK, K.A. (1983): Particle size and physical properties of growing media for containers. Com. Soil Sci. Plant Anal. 14: 209 - 222

HANDRECK, K.A. und N. BLACK (1989): Growing media for ornamental plants and turf. Revised edition, New South Wales University Press, Kensington

HARTGE, K.H. (1968): Ermittlung der Wasserspannungskurve aus der Körnungssummenkurve und dem Gesamtporenvolumen. Mitt. Deutsch. Bodenkundl. Ges. 8: 29 – 31

HARTGE, K.H. (1969): Ermittlung der Wasserspannungskurve aus der Körnungssummenkurve und dem Gesamtporenvolumen. Zeitschrift Kulturtechnik und Flurbereinigung 10: 20 – 27

HARTGE, K.H.; H. BOHNE und M. EXTRA (1985): Die Bestimmung der Wasserspannungskurve aus der Körnungssummenkurve und dem Gesamtporenvolumen. Zeitschrift Kulturtechnik und Flurbereinigung 27: 83 – 87

HARTGE, K.H. und R. HORN (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart

HARTGE, K.H. und R. HORN (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart

HEISKANEN, J. (1995): Water status of *Sphagnum* peat and a peat perlite mixture in containers subjected to irrigation regimes. HortScience 30 (3): 281 – 284

HEISKANEN, J. (1997): Air-filled porosity of eight growing media based on sphagnum peat during drying from container capacity. Acta Hort. 450: 277 - 286

KAEMPF, A.N.; P.A. HAMMER und T. KIRK (1999): Effect of packing density on the mechanical impedance of root media. Acta Hort. 481; 689 - 694

KAMENZ, A. und H. VONHOEGEN (1998): Das Excel 97 Super Buch. Data Becker, Düsseldorf

IPS (1984): Torfwörterbuch. International Peat Society (Hrsg.), Helsinki

KISTNER, D. (2000): Ermittlung physikalischer Substrateigenschaften mit verschiedenen Methoden. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Zierpflanzenbau, Baumschule und Pflanzenzüchtung, Abt. Baumschule

KLASMANN (1999a): Klasmann Containerfasersubstrat, Baumschulsubstrat. Produktinformation, Klasmann-Deilmann GmbH, Groß Hesepe. http://sentry.uni-x.de/klasmann_out/popup.html?id=29 (Stand 12.1999)

KLASMANN (1999b): Klasmann Potgrond H, Presstopfsubstrat. Produktinformation, Klasmann-Deilmann GmbH, Groß Hesepe. http://sentry.uni-x.de/klasmann_out/popup.html?id=20 (Stand 12.1999)

KLASMANN (2001): Zahlen zum Umsatz 1999 der Klasmann-Deilmann GmbH. Klasmann-Deilmann GmbH, Groß Hesepe. <http://www.klasmann.de/de/framset.html> (Stand 20.1.2001)

KÖHLER, W.; G. SCHACHTEL und P. VOLESKE (1984): Biometrie, Einführung in die Statistik für Biologen und Agrarwissenschaftler. Springer Verlag, Berlin

KREMER, P. (1997): Physikalische Eigenschaften von Baumschulsubstraten ermittelt mit verschiedenen Methoden. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Zierpflanzenbau, Baumschule und Pflanzenzüchtung, Abt. Baumschule

KRETZSCHMAR, R. (1991): Kulturtechnisch - bodenkundliches Praktikum – Ausgewählte Laboratoriumsmethoden. Eine Anleitung zum selbständigen Arbeiten an Böden. 7. Auflage, Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel

KURZWEIL, P. (1999): Das Vieweg Einheiten-Lexikon. Formeln und Begriffe aus Physik, Chemie und Technik. Vieweg Verlag, Braunschweig

LEISTIKOW, D. (1994): Wie Containersubstrate heute so beschaffen sein sollten. TASPO Gartenbaumagazin 3 (3): 24 - 25

LEVESQUE, M. P. und H. DINEL (1977): Fiber content, particle soil distribution of four peat materials in eastern Canada. Can. J. Soil Sci. 57: 187 – 195 (zit. nach BACHMANN 1988)

LIMBERS, H. (1994): Welche Qualität Roh- und Zuschlagstoffe erfüllen müssen. TASPO Gartenbaumagazin 3 (3): 18 - 19

LIMBERS, H. und J. REHME (1997): Physical properties of milled peat and sod peat in relation to moisture and structure. In: SCHMILEWSKI, G. (ed.): Peat in horticulture. Proc. Int. Peat Conference, Amsterdam, The Netherlands, November 2 – 7: 146 – 148

MEYER, F. (1996): Einfluß der Korngrößenfraktion auf das Wachstum von *Impatiens-Neu-Guinea* Hybriden. Diplomarbeit an der Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover-Ahlem.

MICHIELS, P.; R. HARTMANN und C. COUSSENS (1993): Physical properties of peat substrate in ebb/flood irrigation system. Acta Hort. 342: 205 - 220

MILKS, R.R; W.C. FONTENO und R.A. LARSON (1989a): Hydrology of horticultural substrates: I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 114: 48 – 52

MILKS, R.R; W.C. FONTENO und R.A. LARSON (1989b): Hydrology of horticultural substrates:II. Predicting physical properties of media in containers. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 114: 53 – 56

MILKS, R.R; W.C. FONTENO und R.A. LARSON (1989c): Hydrology of horticultural substrates:III. Predicting air and water content of limited volume plug cells. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 114: 57 – 61

- MOHR, H.D. (1978): Die Durchwurzelung von Böden in Abhängigkeit von wichtigen Bodeneigenschaften. Kali-Briefe (Büntehof) 14 (2): 103 – 113
- MOHR, H.D. (1980): Einfluß der Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum. Kali-Briefe (Büntehof) 15 (5): 305 - 316
- MÜHLBACH, G. (1988): Repetitorium der Ingenieur-Mathematik, Teil 3, Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Feldmann, Springe
- NKONGOLO, V.K.N. und J.CARON (1999): Bark particle size and modification of the physical properties of peat substrate. Can. J. Soil Sci. 79: 111 - 116
- PAQUET, J.M.; J. CARON und O. BANTON (1993): *In situ* – determination of water desorption characteristics of peat substrate. Can. J. Soil Sci. 73: 329 – 339
- PAUL, J.L. und C.J. LEE (1976): Relation between growth of chrysanthemums and aeration of various container media. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 101: 500 - 503
- PENNINGSFELD, F. (1988): Erden und Substrate im gärtnerischen Pflanzenbau. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID) e.V. (Hrsg.), Bonn
- POST, L. von und E. GRANLUND (1929): Sodra Sveriges Tortillganger I. Sver. Geol. Unders. C 233 19: 1 – 27 (zit. nach NKONGOLO und CARON 1999)
- PRASAD, M. und M.J. MAHER (1993): Physical and chemical properties of fractionated peat. Acta Hort. 342: 257 – 264
- PRECHT, M. (1987): Bio-Statistik., Eine Einführung für Studierende der biologischen Wissenschaften. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München
- PUUSTJÄRVI, V. (1982): Textural classes of horticultural peat. In: Peat and Plant Yearbook – 1981. Accociation of Finnish Peat Industries (Hrsg.): 28 - 32

RAL GZ 252 (1998): Gütezeichen Kultursubstrate, Güte- und Prüfbestimmungen. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (Hrsg.), Sankt Augustin

RAL GZ 253 (1999): Gütezeichen Dachsubstrate, Güte- und Prüfbestimmungen. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (Hrsg.), Sankt Augustin

RAL GZ 254 (1999): Gütezeichen Substratausgangsstoffe, Güte- und Prüfbestimmungen. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (Hrsg.), Sankt Augustin

REHME, J. (1995): Luftkapazität und Drainageverhalten; Wirkung von Substrat-Zuschlagstoffen. Dtsch. Gartenbau 49: 1298 – 1300

RICHARDS , D.; M. LANE und D.V. BEARDSELL (1986): The influence of particle-size-distribution in peat on water-supply, aeration and plant growth. Sci. Hortic. 29: 1 - 14

RÖBER, R. und M. HAFEZ (1982): The influence of different water supply upon the growth of Chrysanthemums. Acta Hort. 125: 69 - 78

RUTER, J M. und H. DE WERKEN, van (1991): Container design influences physical parameters of different media. Hortotechnology 7: 76 - 78

SCHACHTSCHABEL, P.; H.P. BLUME; G. BRÜMMER; K.H. HARTGE und U. SCHWERTMANN (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart

SCHARPF, H.C. (1997): Physical characteristics of peat and the growth of pot plants. In: SCHMILEWSKI, G. (ed.): Peat in horticulture. Proc. Int. Peat Conference, Amsterdam, The Netherlands, November 2 - 7: 43 - 52

SCHARPF, H.C.; E. GRANTZAU; W. TEMMING; F. MEYER; H. BOHNE und C. GÜNTHER (1995): Prüfung physikalischer Eigenschaften von Torfen und industriell hergestellten Kultursubstraten im Pflanzenversuch und Methodenvergleich. Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau, Hannover-Ahlem

SCHIE, W.L., VAN (1995): Quality control of substrates in the Netherlands. *Acta Hort.* 401: 145 - 147

SCHIE, W.L., VAN (1999): Standardization of substrates. *Acta Hort.* 481: 71 – 77

SCHLICHTING, E. und H.P. BLUME (1966): *Bodenkundliches Praktikum*. Parey Verlag, Hamburg

SCHLICHTING, E.; H.P. BLUME und K. STAHR (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. 2. Auflage, Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin

SCHMILEWSKI, G. (1992): Kultursubstrate im Gartenbau, Ausgangsstoffe, Eigenschaften, Verwendung. Lehrer-Service Medienpaket. Zentrale Informationsstelle Torf und Humus (Hrsg.); Hannover, 112 pp.

SCHMILEWSKI, G. (1994): Europäische Normen für Kultursubstrate und Bodenverbesserungsmittel – Konsequenzen für die Torf- und Humuswirtschaft. *TELMA* 24: 57 – 70

SCHMILEWSKI, G. (1996): Kultursubstrate im Würgegriff Europäischer Normen? Bessere Produkttransparenz und Chancen für deutsche Gütesicherung! *ZVG Gartenbau-report* 22 (3): 14 – 16

SCHMILEWSKI, G. und J. GÜNTHER (1988): An international comparative study on the physical and chemical analysis of horticultural substrates. *Acta Hort.* 221: 425 – 441

SPOMER, L.A. (1974): Optimizing container soil amendment: the „threshold proportion“ and prediction of porosity. *HortScience* 9 (6): 532 - 533

SPOMER, L.A. (1975): Small soil containers as experimental tools: soil water relations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6: 21- 26

SPOMER, L.A. (1979): Three simple demonstrations of the physical effects of soil amendment. *HortScience* 14 (1): 75 – 77

SPOMER, L.A. und R.W. LANGHANS (1975): The growth of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. at high soil water contents: effects of soil water and aeration. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 6: 545 – 553

SPRINGER, P. (1995): Qualitätssicherung von Substraten. Gärtnerbörse 47: 2064 - 2065

STANGENBERG (1998): Telefonische Mitteilung zur Grubenton-Torf Vormischung vom 15.09.1998 durch Herrn U. Stangenberg von der Fa. Einheitswerk Hameln, A. Stangenberg GmbH

STENDER (1999a): Stender Topfsubstrat. Produktinformation auf der Verpackung. Blumenerdewerk Stender GmbH, Schermbeck

STENDER (1999b): Stender Vermehrungs- / Pikiersubstrat. Produktinformation auf der Verpackung. Blumenerdewerk Stender GmbH, Schermbeck

SWANSON, B.T. (1989): Critical physical properties of container media. Am. Nurseryman 157 (6): 59 - 63

TERKAMP, H. (1995): Sicherung der Qualität: Was tut die Substrat- und Erdenindustrie? Dtsch. Gartenbau 49: 1290 – 1292

TESKEY, R.O und T.M. HINCKLEY (1981): Influence of temperature and water potential on root growth of white oak. Physiol. Plant. 52: 363 - 369

VDLUFA (1991a): Bestimmung der Rohdichte (Volumengewicht) von gärtnerischen Erden und Substraten ohne sperrige Komponenten. VDLUFA Methodenbuch, Band I, Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage, VDLUFA Verlag, Darmstadt

VDLUFA (1991b): Bestimmung des Wassergehaltes (bzw. der Trockenmasse) durch Trocknen im Trockenschrank. VDLUFA Methodenbuch, Band I, Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage, VDLUFA Verlag, Darmstadt

VERDONCK, O.; D. DE VLEESCHAUWER und M. DE BOODT (1981): The influence of substrate to plant growth. *Acta Hort.* 126: 251 - 258

VERDONCK, O. und R. PENNINGCK (1986): Air content in horticultural substrates. *Acta Hort.* 178: 101 - 105

VERDONCK, O. ; R. PENNINGCK und M. DE BOODT (1983): The physical properties of different horticultural substrates. *Acta Hort.* 150: 155 - 160

VERHAGEN, J.B.G.M. (1995): Waadering van freesturfmaterialen. Intern verslag 2, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk

VERHAGEN, J.B.G.M. (1996): Characterisation of growing media or components for growing media to determine suitability for horticulture. *Acta Hort.* 450: 363 - 364

VERHAGEN, J.B.G.M. (1997): Particle size distribution to qualify milled peat. A prediction of air content of ultimate mixtures. In: SCHMILEWSKI, G. (ed.): Peat in horticulture. Proc. Int. Peat Conference, Amsterdam, The Netherlands, November 2 - 7: 53 - 56

VERHAGEN, J.B.G.M. und J. JANSEN (1999): Effect van grondstoffen in potgrondmengels. Stichting R.H.P. (Hrsg.), Naaldwijk

WALLER, P.L. und A.M. HARRISON (1986): A rapid method for the assessment of air-filled porosity and its relationship with other methods. *Acta Hort.* 178: 107 – 113

WALZ, E. (1995): Diskussion um Kultursubstrate, Qualitätssicherung für den Abnehmer. *Dtsch. Gartenbau* 49: 1294 – 1296

WEBER, E. (1986): Grundriss der biologischen Statistik. 9. Auflage, Fischer Verlag, Jena

WEICHERT, M. (2000): Mündliche Mitteilungen in mehreren Beratungsgesprächen. Lehrgebiet Bioinformatik am Fachbereich Gartenbau der Universität Hannover. Heute Mitarbeiter der Fa. Cap Gemini, Düsseldorf

WEVER, G. (1991): Guide values for physical properties of peat substrates. Acta Hort. 294: 41 - 47

WEVER, G. und M.H. PON (1990): Fysische analysesmethoden voor potgrond en veen met aanpassing 1989. Intern verslag nr. 31, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk

WEVER, G. und J.B.G.M. VERHAGEN (1995): Zeefanalyse voor de veentypen 1, 2 en 3. Methodenbeschrijving voor de bepaling van de fractieverdeling van veentypen 1, 2 en 3. Intern verslag 3, Proefstation voor Bloemmisterij en Glasgroente, Naaldwijk

WHITE, J.W. und J.W. MASTALERTZ (1966): Soil moisture as related to container capacity. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci. 89: 758 – 765

WREDE, A. (1999): Physikalische Kennwerte von Substraten (Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts). <http://www.gartenbau.uni-hannover.de/baum/forschung/substrat/physik.html> (Stand 16.01.2001)

WREDE, A. UND H. BOHNE (1999): Substratangepasste Bewässerungssteuerung. <http://www.gartenbau.uni-hannover.de/baum/forschung/substrat/wasser.html> (Stand 16.01.2001)

WREDE, A. und H. BOHNE (2000a): Bewässerung an das Substrat anpassen. Dtsch. Baumsch. 52 (7):23 – 26

WREDE, A. und H. BOHNE (2000b): Die M-ISHS-Methode – eine praxisorientierte Untersuchungsmethode zur Ermittlung der Kennwerte des Luft- und Wasserhaushaltes von Kultursubstraten. Gartenbauwissenschaft 65: 199 - 202

WREDE, A.; P. KREMER und H. BOHNE (1999): Die M-ISHS-Methode (= Modifizierte ISHS-Methode): <http://www.gartenbau.uni-hannover.de/baum/forschung/substrat/methode.html> (Stand 16.01.2001)

7 Verzeichnisse

7.1 Verzeichnis der Tabellen

2.1	Kurzbezeichnung, Lieferfirma, Verwendung und Zusammensetzung der untersuchten 13 Standardsubstrate	9
2.2	Kurzbezeichnung und Tonanteil der vier Mischsubstrate mit granuliertem Ton	14
2.3	Kurzbezeichnung, Vormischungsanteil und realer Montmorillonit-Ton Anteil der vier Mischsubstrate mit Grubenton-Torf Vormischung	15
2.4	Kurzbezeichnung und Anteil der Kokosfasern der vier Mischsubstrate mit Kokosfasern	15
2.5	Kurzbezeichnung und Anteil des Rindenhumus an den vier Mischsubstraten	16
2.6	Kurzbezeichnung und Anteil des gesiebten Schwarztorfs an den vier Mischsubstraten	16
2.7	Kurzbezeichnung und Anteil des ungesiebten Schwarztorfs an den drei Mischsubstraten	17
2.8	Kennwerte des Luft- und Wasserhaushalts, die in dieser Arbeit verwendeten Kurzbezeichnungen und Erklärungen zu den Kennwerten, die mit der ISHS-Methode (GABRIELS und VERDONCK 1991, 1992) ermittelt werden können	20
2.9	Kurzübersicht der Arbeitsschritte der ISHS-Methode nach GABRIELS und VERDONCK (1991, 1992) und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage	22
2.10	Geprüfte Varianten des Volumengewichts bzw. der Lagerungsdichte zum Anfang der Messung (ρ_{BA} [g/l]) im Probenzylinder der Q-Methode sowie deren Kurzbezeichnung	32
2.11	Kurzübersicht der Arbeitsschritte der Q-Methode und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage	39
2.12	Kurzübersicht der Arbeitsschritte der M-ISHS-Methode (BOHNE et al. 1998; WREDE et al. 1999; WREDE und BOHNE 2000b) und eine mögliche Verteilung der Arbeitsschritte auf die Wochentage	46
3.1	Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= WV50) und 100 hPa (= WV100) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= AW), leicht verfügbares Wasser (= EAW) und schwerer verfügbares Wasser (= LRAW) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	70

3.2	Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= WV50) und 100 hPa (= WV100) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= AW), leicht verfügbares Wasser (= EAW) und schwerer verfügbares Wasser (= LRAW) der untersuchten 23 selbsterstellten Mischsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	76
3.3	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	82
3.4	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	91
3.5	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Ermittlungsmethoden des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	92
3.6	Rangplatz der zu <u>A</u> nfang der Messung im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die zum höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung der Q-Methode (dB_E [g / l]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat	96
3.7	Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit von der zum <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) für die 13 Standardsubstrate	97
3.8	Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit von der zum <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) für die 23 Mischsubstrate	103
3.9	Rangplatz der zu <u>A</u> nfang der Messung im Probenzylinder eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die zum höchsten Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung der Q-Methode (dB_E [g / l]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat	104
3.10	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) und den damit ermittelten dB_E -Werten	108
3.11	Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	117
3.12	Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur maximalen Wasserkapazität (WC [Vol. %]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat	118

3.13	Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	121
3.14	Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur maximalen Wasserkapazität (WC [Vol. %]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat	122
3.15	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	126
3.16	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA+5 und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	127
3.17	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA-5 und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	128
3.18	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen der Wasserkapazität (WC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante Topffest und der Containerkapazität (CC [Vol. %]), ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	129
3.19	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier unterschiedlichen Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie der ISHS-Methode (CEN/TC 223) und den damit ermittelten Werten für die Wasserkapazität (WC) bzw. Containerkapazität (CC) für fünf verschiedene Substratgruppen, jeweils <u>ohne</u> Messfehler	130
3.20	Spannweiten der gemessenen Porenvolumina (PV [Vol. %]) zwischen den vier Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den 36 untersuchten Substraten	134
3.21	Luftkapazität (AC [Vol. %]) der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	138
3.22	Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur minimalen Luftkapazität (AC [Vol. %]) bei den 13 Standardsubstraten geführt hat	139

3.23	Luftkapazität (AC [Vol %]) der 23 Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	142
3.24	Rangplatz des Volumengewichts (dB_E [g / l]) der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), die jeweils zur minimalen Luftkapazität (AC [Vol. %]) bei den 23 Mischsubstraten geführt hat	143
3.25	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	146
3.26	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA+5 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	147
3.27	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante VDLUFA-5 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	148
3.28	Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) für die Beziehung zwischen Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit der Q-Methode Variante Topffest und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) für acht unterschiedliche Substratgruppen	149
3.29	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der vier untersuchten Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5; VDLUFA-5; Topffest) sowie der ISHS-Methode (CEN/TC 223) und den damit ermittelten Werten für die Luftkapazität (AC) für fünf verschiedene Substratgruppen, jeweils <u>ohne</u> Messfehler	150
3.30	Ergebnisse bzw. Rangplätze der vier Varianten der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bezüglich verschiedener physikalischer Kennwerte und anderer Eigenschaften – Eine Übersicht und Zusammenfassung –	153
3.31	Porenvolumen (= PV), Luftkapazität (= AC) und Containerkapazität (= CC) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b)	155
3.32	Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= WV50) und 100 hPa (= WV100) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= AW), leicht verfügbares Wasser (= EAW) und schwerer verfügbares Wasser (=	158

LRAW) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b)	
3.33 Porenvolumen (= PV), Luftkapazität (= AC) und Containerkapazität (= CC) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b)	160
3.34 Volumetrische Wassergehalte bei 50 hPa (= WV50) und 100 hPa (= WV100) Wasserspannung, verfügbares Wasser (= AW), leicht verfügbares Wasser (= EAW) und schwerer verfügbares Wasser (= LRAW) der untersuchten 13 handelsüblichen Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b)	161
3.35 Anteile der 13 Standardsubstrate in den drei Fraktionen kleiner 4,0 mm und in der Fraktion 0,0 – 1,0 mm [Gew. %] in Abhängigkeit von der Variante der Vorbehandlung	163
3.36 Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen sechs Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach Gütesicherung / RHP und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), in Abhängigkeit von der Vorbehandlung	164
3.37 Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen sechs Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach Gütesicherung / RHP und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), nach Vorbehandlung _{schränktrocken}	165
3.38 Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten (r) zwischen acht Siebfraktionen [Gew. %] der Siebung nach DIN 11540 und der Luftkapazität (AC [Vol. %]), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), nach Vorbehandlung _{schränktrocken}	167
4.1 Luftgefüllter Porenraum (APR [Vol. %]) eines Torf-Vermiculit Substrats (V+V = 1+1) in Abhängigkeit von Topfhöhe und -form	171
4.2 Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts von Kultursubstraten	172
4.3 Vergleich der Volumengewichte im Probenzylinder zum Ende der Messung mit der ISHS-Methode (dB _E -ISHS), mit der M-ISHS-Methode Variante Topffest (dB _E -M-ISHS-T) und mit der M-ISHS-Methode Variante VDLUFA (dB _E -M-ISHS-VD)	178
4.4 Vergleich der Werte für das Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB _E [g / l]) bei den Varianten Topffest und VDLUFA der Q-Methode (Q-Topffest und Q-VDLUFA) und der M-ISHS-Methode (M-Topffest und M-VDLUFA)	179
4.5 Vergleich der Werte für die Luftkapazität (AC [Vol. %]) bei den Varianten Topffest und VDLUFA der Q-Methode (AC-Q-Topffest und	186

	AC-Q-VDLUFA) und der M-ISHS-Methode (AC-M-Topffest und AC-M-VDLUFA)	
4.6	Methode bzw. Variante der Methode, die zum höchsten Wert des Volumengewichts zum Ende der Messung im Probenzylinder führte (dB _E) bzw. zur höchsten verfügbaren Wassermenge (AW)	191
4.7	Zusammenstellung einiger in der Literatur genannter Kennzahlen für die Luftkapazität, die für Kultursubstrate empfohlen werden	199
4.8	Bewertungsschema zur Luftkapazität von Substraten nach VERDONCK et al. (1983)	199

7.2 Verzeichnis der Abbildungen

2.1	Skizze vom möglichen Aufbau einer Unterdruckanlage (verändert nach DIN EN 13041 (2000))	19
2.2	Möglicher Aufbau eines Doppelzylinders (verändert nach DIN EN 13041 (2000))	21
2.3	Unterdruckanlage der Q-Methode mit Messbox, Sättigungsbox und Probenzylinder (möglicher Aufbau)	30
2.4	Aufbau des Probenzylinders der Q-Methode	31
3.1	Zusammenstellung der Werte der Dichte der Festsubstanz der untersuchten 13 Standardsubstrate	52
3.2	Zusammenstellung der Werte der Dichte der Festsubstanz von 12 der 23 untersuchten Mischsubstrate	53
3.3	Zusammenstellung der Werte der Dichte der Festsubstanz von 11 der 23 untersuchten Mischsubstrate	53
3.4	Containerkapazität (CC [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	56
3.5	Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	57
3.6	Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	57
3.7	Porenvolumen (PV [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	59
3.8	Porenvolumen (PV [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	59
3.9	Porenvolumen (PV [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	60
3.10	Luftkapazität (AC [Vol. %]) der 13 untersuchten Standardsubstrate, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	61
3.11	Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 12 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	62
3.12	Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 11 untersuchten Mischsubstraten, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	63
3.13	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate EP, EPr und ET, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	64

3.14	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate CF und PH, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	65
3.15	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate FT und RK, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	66
3.16	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate ST und SV, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	67
3.17	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate SW1 und SW3, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	68
3.18	Wasserspannungskurven der Standardsubstrate T1 und T2, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	69
3.19	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit granuliertem Ton (granT), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	71
3.20	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Grubenton-Torf Mischung (GT), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	71
3.21	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Kokosfasern (KF), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	73
3.22	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit Rindenumus (RH), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	73
3.23	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit gesiebttem, feinem Schwarztorf (STf), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	75
3.24	Wasserspannungskurven der Mischsubstrate mit ungesiebttem, grobem Schwarztorf (STg), ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	75
3.25	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate EP, EPr, ET, CF und PH in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	79
3.26	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate FT, RK, ST und SV in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	80
3.27	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Substrate SW1, SW3, T1 und T2 in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	81
3.28	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	83
3.29	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA,	84

VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest)	
3.30	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate KF10%, KF15%, KF 20% und KF25% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) 85
3.31	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate RH10%, RH20%, RH 30% und RH40% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) 86
3.32	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate STf20%, STf40%, STf 60% und STf80% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) 87
3.33	Volumengewicht (dB_A [g / l]) der Mischsubstrate STg20%, STg40%, und STg60% in Abhängigkeit vom Ermittlungsverfahren (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) 88
3.34	Anzahl der Fälle mit den höchsten Werten (Maxima) des Volumengewichts (dB_A [g / l]), Anzahl der Fälle mit den zweithöchsten Werten für dB_A sowie Anzahl der Fälle mit der höchsten Standardabweichung (s) der vier getesteten Ermittlungsmethoden von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), bei den 36 untersuchten Substraten 90
3.35	Anzahl der Fälle mit den kleinsten Werten (Minima) des Volumengewichts (dB_A [g / l]) der vier getesteten Ermittlungsmethoden von dB_A (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest), bei den 36 untersuchten Substraten 90
3.36	Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten EP, EPr, ET, CF und PH. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 95
3.37	Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten FT, RK, ST und SV. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 95
3.38	Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Substraten SW1, SW3, T1 und T2. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 96
3.39	Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu <u>A</u> nfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten granT5%, granT10%, granT20% und 98

- granT30%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223)
- 3.40 Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten GT30%, GT40%, GT50% und GT60%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 99
- 3.41 Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten KF10%, KF15%, KF20% und KF25%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 99
- 3.42 Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten RH10%, RH20%, RH30% und RH40%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 100
- 3.43 Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten STf20%, STf40%, STf60% und STf80%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 101
- 3.44 Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) in Abhängigkeit vom zu Anfang im Probenzylinder eingestellten Volumengewicht (dB_A [g / l] = VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) bei den Mischsubstraten STg20%, STg40% und STg60%. Zum Vergleich der jeweilige dB_E -Wert der ISHS-Methode (CEN/TC 223) 102
- 3.45 Anzahl der höchsten (= max) und zweithöchsten (= 2. max) Werte für dB_E [g / l] in Abhängigkeit dB_A (= VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichung (= max s) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der dB_E -Werte der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben 105
- 3.46 Anzahl der niedrigsten Werte von dB_E [g / l] in Abhängigkeit von dB_A (= VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der dB_E -Werte der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben 106
- 3.47 Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g /

- l] VDLUFA) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) für 33 der 36 untersuchten Substrate
- 3.48 Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA+5) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA+5) für 32 der 36 untersuchten Substrate 109
- 3.49 Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA-5) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA-5) für 33 der 36 untersuchten Substrate 110
- 3.50 Beziehung zwischen der zu Anfang der Messung im Probenzylinder der Q-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] Topffest) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-Topffest) für 31 der 36 untersuchten Substrate 110
- 3.51 Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 33 der 36 untersuchten Substrate 111
- 3.52 Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA+5) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 31 der 36 untersuchten Substrate 111
- 3.53 Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-VDLUFA-5) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 33 der 36 untersuchten Substrate 112
- 3.54 Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder der Q-Methode (Variante Topffest) zum Ende der Messung (dB_E [g / l] Q-Topffest) und dem entsprechenden Volumengewicht der ISHS-Methode (dB_E [g / l] ISHS) für 31 der 36 untersuchten Substrate 112
- 3.55 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate EP, EPr, ET, CF und PH in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 115
- 3.56 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate FT, RK, ST und SV in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 115

-
- 3.57 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate SW1, SW2, T1 und T2 in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 116
- 3.58 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 119
- 3.59 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 120
- 3.60 Wasserkapazität (WC [Vol. %]) der Substrate STf20%, STf40%, STf60% und STf80% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist die Containerkapazität (CC [Vol. %]) aufgeführt worden, die mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde 120
- 3.61 Anzahl der höchsten (= max) und zweithöchsten (= 2. max) Werte für die Wasserkapazität WC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichung (= max s) über alle 36 untersuchten Substrate 123
- 3.62 Anzahl der niedrigsten Werte der Wasserkapazität WC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest) über alle 36 untersuchten Substrate 124
- 3.63 Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 29 der 36 untersuchten Substrate 125
- 3.64 Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA+5) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 28 der 36 untersuchten Substrate 126
- 3.65 Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) (WC [Vol. %] Q-VDLUFA-5) und der Containerkapazität der ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 26 der 36 untersuchten Substrate 128
- 3.66 Beziehung zwischen der Wasserkapazität der Q-Methode (Variante Topffest) (WC [Vol. %] Q-Topffest) und der Containerkapazität der 129

ISHS-Methode (CC [Vol. %] ISHS) für 27 der 36 untersuchten Substrate	
3.67 Porenvolumina (PV [Vol. %]) von sieben Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5; VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden	135
3.68 Porenvolumina (PV [Vol. %]) von acht Mischsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5; VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden	135
3.69 Porenvolumina (PV [Vol. %]) von acht Mischsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5; VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich sind die Porenvolumina mit aufgeführt, die bei der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurden	136
3.70 Luftkapazität (AC [Vol. %]) von fünf Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde	137
3.71 Luftkapazität (AC [Vol. %]) von fünf Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde	138
3.72 Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate granT5%, granT10%, granT20% und granT30% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde	140
3.73 Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate GT30%, GT40%, GT50% und GT60% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde	141
3.74 Luftkapazität (AC [Vol. %]) der Mischsubstrate KF10%, KF15%, KF20% und KF25% in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5, Topffest). Zum Vergleich ist auch die Luftkapazität aufgeführt, die mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223) ermittelt wurde	141
3.75 Anzahl der kleinsten (= min) und zweitkleinsten (= 2. min) Werte für die Luftkapazität AC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5; Topffest) sowie die Anzahl der höchsten Standardabweichungen (= max s) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Luftkapazität (AC [Vol. %]) der ISHS-Methode	144

(CEN/TC 223) angegeben		
3.76	Anzahl der höchsten Werte für die Luftkapazität AC [Vol. %] in Abhängigkeit von der Variante der Q-Methode (VDLUFA, VDLUFA+5, VDLUFA-5; Topffest) über alle 36 Substrate. Zum besseren Vergleich ist die Anzahl jeweils mit und ohne Einbeziehung der Luftkapazität (AC [Vol. %]) der ISHS-Methode (CEN/TC 223) angegeben	145
3.77	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 28 der 36 untersuchten Substrate	146
3.78	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA+5) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA+5) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 25 der 36 untersuchten Substrate	147
3.79	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante VDLUFA-5) (AC [Vol. %] Q-VDLUFA-5) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 26 der 36 untersuchten Substrate	148
3.80	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode (Variante Topffest) (AC [Vol. %] Topffest) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für 27 der 36 untersuchten Substrate	149
3.81	Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. AC-ISHS = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), AC-M-ISHS = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b)	156
3.82	Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. CC-ISHS = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), CC-M-ISHS = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b)	157
3.83	Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. AC-ISHS = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), AC-M-ISHS = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b)	159
3.84	Containerkapazität (CC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. CC-ISHS = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), CC-M-ISHS = Containerkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest) (WREDE und BOHNE 2000b)	160
3.85	Luftkapazität (AC [Vol. %]) von 13 Standardsubstraten in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode. AC-ISHS = Luftkapazität, ermittelt mit	162

	Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223), AC-M-ISHS-T = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante Topffest), AC-M-ISHS-VD = Luftkapazität, ermittelt mit Hilfe der M-ISHS-Methode (Variante VDLUFA) (WREDE und BOHNE 2000b)	
3.86	Beziehung zwischen der Fraktion 4,0 – 16,0 mm der Siebung nach Gütesicherung / RHP [Gew. %] und der Luftkapazität [Vol. %], ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	166
3.87	Beziehung zwischen der Fraktion 5,0 – 10,0 mm der Siebung nach DIN 11540 [Gew. %] und der Luftkapazität [Vol. %], ermittelt mit Hilfe der ISHS-Methode (CEN/TC 223)	168
4.1	Beziehung zwischen der zum <u>A</u> nfang der Messung im Probenzylinder der M-ISHS-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] Topffest) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l] M-ISHS-Topffest) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	177
4.2	Beziehung zwischen der zum <u>A</u> nfang der Messung im Probenzylinder der M-ISHS-Methode eingestellten Variante des Volumengewichts (dB_A [g / l] VDLUFA) und dem Volumengewicht im Probenzylinder zum <u>E</u> nde der Messung (dB_E [g / l] M-ISHS-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	178
4.3	Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) der Q-Methode (dB_E [g / l] Q-Topffest) und dem eingestellten Volumengewicht zum Ende der Messung der M-ISHS-Methode (dB_E [g / l] M-Topffest) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	180
4.4	Beziehung zwischen dem Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / l]) der Q-Methode (dB_E [g / l] Q-VDLUFA) und dem eingestellten Volumengewicht zum Ende der Messung der M-ISHS-Methode (dB_E [g / l] M-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	181
4.5	Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / 100 ml]), Luftkapazität (AC [Vol. %]) und verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) von sechs der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode	183
4.6	Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (dB_E [g / 100 ml]), Luftkapazität (AC [Vol. %]) und verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) von sieben der 13 Standardsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode	183
4.7	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] Q-Topffest) und der Luftkapazität der M-ISHS-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] M-Topffest) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	187

4.8	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante VDLUFA (AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der M-ISHS-Methode Variante Topffest (AC [Vol. %] M-VDLUFA) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	187
4.9	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante VDLUFA AC [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für die 13 untersuchten Standard-substrate	188
4.10	Beziehung zwischen der Luftkapazität der Q-Methode Variante Topffest [Vol. %] Q-VDLUFA) und der Luftkapazität der ISHS-Methode (AC [Vol. %] ISHS) für die 13 untersuchten Standardsubstrate	188
4.11	Verfügbares Wasser (AW [Vol. %]) der untersuchten 13 Standard-substrate in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode	191
4.12	Luftkapazität (AC) in Abhängigkeit vom Fraktionsanteil < 1 mm [Gew. %] bei den 13 untersuchten Standardsubstraten nach Siebung mit der Methode nach DIN 11540, Variante schranktrocken	213
4.13	Luftkapazität (AC) in Abhängigkeit vom Fraktionsanteil < 1 mm [Gew. %] bei den 13 untersuchten Standardsubstraten nach Siebung mit der Methode nach R.H.P., Variante schranktrocken	213

7.3 Verzeichnis der Formeln

1	Anteil mineralische Substanz [%]	24
2	Anteil organische Substanz [%]	24
3	Dichte der Festsubstanz (dF) [g / cm ³]	24
4	Lagerungsdichte zum Ende der Messung im unteren Probenzylinder bei der Wasserspannung i (dB _{Ei}) [g / cm ³]	25
5	Gravimetrischer Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i (W _{gi}) [Gew. %]	25
6	Volumetrischer Wassergehalt bei der jeweils anliegenden Wasserspannung i (W _{vi}) [Vol. %]	26
7	Porenvolumen (PV) [Vol. %]	26
8	Luftkapazität (AC = <u>A</u> ir <u>c</u> apacity) [Vol. %]	27
9	Verfügbares Wasser (AW = <u>A</u> vailable <u>w</u> ater) [Vol. %]	27
10	Lagerungsdichte _{feucht} bzw. Volumengewicht _{feucht} (dB _{Afeucht}) [g / l]	34
11	Lagerungsdichte _{trocken} bzw. Volumengewicht _{trocken} (dB _A) [g / l]	34
12	Trockenmassegehalt der Substratprobe TM [%]	35
13	Trockenmasse TM [%]	35
14	Volumengewicht _{trocken} bzw. Lagerungsdichte _{trocken} (dB _A) [g / l]	35
15	Im Probenzylinder der Q-Methode einzustellendes aktuelles Volumengewicht _{feucht} (akt.dB _{Afeucht}) [g / l] (aktueller Wassergehalt)	36
16	Im Probenzylinder der Q-Methode einzustellendes aktuelles Volumengewicht _{feucht} (akt.dB _{Afeucht}) [g / l] (Trockenmasse)	36
17	Substratmasse, die in die Probenzylinder der Q-Methode einzufüllen ist (SM) [g / Zylinder]	37
18	Volumen der Fehlstelle, die durch Sackung und Schrumpfung im Probenzylinder entstanden ist (V _{Sack}) [ml]	40
19	Substratbefülltes Volumen des Probenzylinders zum Ende der Messung (V _{Subs}) [ml]	41

20	Lagerungsdichte der Substratprobe zum Ende der Messung im Probenzylinder (δB_E) [g / cm^3]	41
21	Gravimetrischer Wassergehalt (W_g) [Gew. %]	42
22	Volumetrischer Wassergehalt (W_v) [Vol. %]; Wasserkapazität ($WC = \underline{\text{Water capacity}}$) [Vol %]	42
23	Porenvolumen (PV) [Vol. %]	42
24	Luftkapazität ($AC = \underline{\text{Air capacity}}$) [Vol. %]	43
25	Masse der Substratfraktion in einem Sieb (S_f) [g]	49
26	Anteil einer Substratfraktion an der Substratprobe (= Fraktionsanteil) [Gew. %]	50
27	Zusammenhang zwischen dem Fraktionsanteil unter 1 mm Äquivalentdurchmesser ($A_{<1\text{mm}}$) und der Luftkapazität (AC)	210
28	Ungleichförmigkeitsgrad = U-Wert	214

7.4 Verzeichnis der Abkürzungen

Abb.	= Abbildung
AC	= Luftkapazität [Vol. %]
AC-ISHS	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der ISHS-Methode
AC-M-ISHS	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der M-ISHS-Methode
AC-M-ISHS-T	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der M-ISHS-Methode Variante Topffest
AC-M-ISHS-VD	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der M-ISHS-Methode Variante VDLUFA
AC-Topffest (= AC-Q-Topffest)	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante Topffest der Q-Methode
AC-VDLUFA (= AC-Q-VDLUFA)	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA der Q-Methode
AC-VDLUFA+5 (= AC-Q-VDLUFA+5)	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA+5 der Q-Methode
AC-VDLUFA-5 (= AC-Q-VDLUFA-5)	= Luftkapazität (AC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA-5 der Q-Methode
ANOVA	= Varianzanalyse
AW	= Verfügbares Wasser [Vol. %]
bzw.	= beziehungsweise
CC	= Containerkapazität [Vol. %]
CC-ISHS	= Containerkapazität (CC [Vol. %]) gemessen mit der ISHS-Methode
CC-M-ISHS	= Containerkapazität (CC [Vol. %]) gemessen mit der M-ISHS-Methode
CEN	= European Committee for Standardisation (siehe SCHMILEWSKI 1994)
CF	= Containerfasersubstrat
cm WS	= Zentimeter Wassersäule (1 cm WS \cong 1 hPa)
dB_A	= Volumengewicht im Probenzylinder zum Anfang der Messung [g / l]
dB_E	= Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung [g / l]
dF	= Dichte der Festsubstanz [g / cm ³]
DIN	= Deutsches Institut für Norming e.V.
EAW	= Leicht verfügbares Wasser [Vol. %]
EP	= Einheitserde ® Pikieren (Typ P)
EPr	= Einheitserde ® Primel
ET	= Einheitserde ® Topfen (Typ T)
e.V.	= eingetragener Verein
FT	= Frühstorfer Erde ®
Gew. %	= Gewichtsprozent (bezogen auf die trockene Masse)
GGS	= Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V.
granT	= Mischsubstrat aus Weißtorf und granuliertem Ton
GT	= Mischsubstrat aus Weißtorf und Grubenton (Feuchttton)
h	= Stunde
ISHS	= International Society of Horticultural Science
ISHS-Methode	= Methode nach GABRIELS und VERDONCK (1992)
ISO	= International Organization for Standardisation
KF	= Mischsubstrat aus Weißtorf und Kokosfaser
l	= Liter
LRAW	= Schwerer verfügbares Wasser [Vol. %]
max	= maximal
max s	= maximale Anzahl an Höchstwerten für die Standardabweichung (s)
2. max	= zweithöchster Wert
min	= minimal
2. min	= zweitkleinster Wert
M-ISHS-Methode	= Modifizierte ISHS-Methode (WREDE und BOHNE 2000b)
n	= Anzahl der Messdaten
n.s.	= nicht signifikant
o.g.	= oben genannt

p_{adj}	= adjustierter p-Wert
PH	= Potgrond H
PV	= Porenvolumen [Vol. %]
Q-Methode	= Schnellmethode (nach SCHLICHTING und BLUME (1966))
r	= PEARSONSCHER Korrelationskoeffizient
r²	= Bestimmtheitsmaß
RH	= Mischsubstrat aus Weißtorf und Rindenumus
RAL	= Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
R.H.P.	= Stichtung Regelung Handelspotgronden
RHP-Methode	= Methode zur Untersuchung von Torfen und Kultursubstraten nach WEVER und POON 1990, WEVER und VERHAGEN 1995a sowie VERHAGEN 1995
RK	= Lignostrat ® Typ U (Rindenkultursubstrat)
s	= Standardabweichung (s) oder signifikant
sog.	= so genannt
STf	= Mischsubstrat aus Weißtorf und feinem, gesiebttem Schwarztorf
STg	= Mischsubstrat aus Weißtorf und grobem, ungesiebttem Schwarztorf
ST	= Stender Topfsubstrat
STAB	= Standardabweichung
SV	= Stender Vermehrungssubstrat
SW1	= Schwarz-Weißtorfsubstrat Typ 1
SW3	= Schwarz-Weißtorfsubstrat Typ 3
Tab.	= Tabelle
T1	= TKS ® 1 Instant
T2	= TKS ® 2 Instant
TC	= Technical Committee
u.a.	= unter anderem
VDLUFA	= Verband Dt. Landwirtschaftlicher Untersuchungs und Forschungsanstalten = hier eine Variante zur Erzeugung eines Volumengewichts mit 10 Fallvorgängen aus 10 cm Höhe
VDLUFA+5	= Variante zur Erzeugung eines Volumengewichts mit 15 Fallvorgängen aus 10 cm Höhe
VDLUFA-5	= Variante zur Erzeugung eines Volumengewichts mit 5 Fallvorgängen aus 10 cm Höhe
Vol. %	= Volumenprozent
WC	= Wasserkapazität [Vol. %]
WC-Topffest (= WC-Q-Topffest)	= Wasserkapazität (WC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante Topffest der Q-Methode
WC-VDLUFA (= WC-Q-VDLUFA)	= Wasserkapazität (WC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA der Q-Methode
WC-VDLUFA+5 (= WC-Q-VDLUFA+5)	= Wasserkapazität (WC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA+5 der Q-Methode
WC-VDLUFA-5 (= WC-Q-VDLUFA-5)	= Wasserkapazität (WC [Vol. %]) ermittelt mit der Variante VDLUFA-5 der Q-Methode
WV50	= Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 50 hPa [Vol. %]
WV100	= Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 100 hPa [Vol. %]
z.T.	= zum Teil

8 Anhang

Tabelle A1: Physikalische Kennwerte der 36 Substrate, ermittelt mit der ISHS-Methode (CEN/TC 223). **Sub** = Substrat; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **CC** = Containerkapazität [Vol. %]; **WV50** = Wassergehalt bei 50 hPa [Vol. %]; **WV100** = Wassergehalt bei 100 hPa [Vol. %]; **dB_A** = Anfänglich eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder; **dB_E** = Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (**Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung ausgehend von der Stichprobe; [%] = Vol. %; * = Wert enthält Messfehler; insbesondere bei AC können Rundungsfehler auftreten)

Sub	PV				AC				CC				WV50				WV100				dB _A [g/l]	dB _E			
	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
EP	89,2	88,0	87,9	1,1	11,1	7,9	8,0	3,2	78,1	79,8	79,9	2,2	43,6	42,5	42,6	1,5	39,5	36,6	36,9	1,9		228,2	253,5	254,6	23,7
	88,4				10,5				77,9				44,1				37,1					244,3			
	87,6				5,3				82,2				41,2				35,1					262,7			
	86,6				5,1				81,5				41,3				36,0					283,2			
EPr	86,2	87,2	87,0	1,6	13,1	10,7	9,1*	5,7	75,1	76,4	77,9*	4,2	41,9	45,0	44,7	2,6	36,5	37,7	37,9	1,4		247,9	270,5	273,9	33,5
	88,4				13,6				74,8				43,1				37,4					243,3			
	85,2				1,3				83,9				47,0				37,9					311,3			
	86,1				8,3				77,7				46,8				39,9					293,0			
ET	88,5	88,6	88,5	0,1	11,3	11,8	12,1	1,7	77,2	76,8	76,5	1,9	41,9	39,8	39,8	2,5	35,8	35,6	35,0	1,7		252,8	251,2	251,8	3,2
	88,6				10,4				78,3				42,1				36,1					248,9			
	88,3				14,4				73,9				37,5				35,4					256,0			
	88,6				12,2				76,4				37,7				32,5					249,6			
CF	93,7	92,7	92,8	0,8	20,2	15,5	15,8	4,5	73,5	77,1	77,0	3,7	43,7	43,3	43,3	0,6	43,1	37,9	38,4	4,0		107,8	125,6	123,8	13,7
	93,1				19,0				74,1				43,8				40,4					117,1			
	92,0				11,8				80,3				42,9				34,8					136,3			
	92,2				12,0				80,1				42,6				35,3					134,0			
PH	90,7	90,5	90,5	0,2	9,4	7,4	7,0	2,9	81,2	83,2	83,5	2,7	56,3	56,1	56,6	2,0	47,3	46,6	47,1	1,8		160,6	162,8	163,8	3,8
	90,6				9,4				81,2				59,5				49,6					161,4			
	90,2				3,7				86,4				55,8				45,8					169,0			
	90,4				5,3				85,2				54,8				45,7					164,3			
FT	90,7	90,1	90,1	0,8	22,7	22,7	22,0	1,9	68,0	67,8	68,1	1,6	38,8	38,9	38,8	0,6	32,1	32,5	32,6	0,4		187,2	200,3	200,7	17,0
	90,9				23,4				67,5				38,0				32,4					185,0			
	89,3				22,6				66,6				39,5				32,6					217,1			
	89,4				19,1				70,4				39,0				33,1					213,5			
RK	88,9	88,0	88,0	0,8	32,1	31,8	31,4	1,2	56,8	56,7	56,6	0,7	35,9	35,4	35,1	1,1	31,1	30,8	31	1,3		220,0	239,5	239,4	15,9
	88,1				31,5				56,6				34,9				32,8					237,8			
	87,0				29,7				57,3				33,6				29,7					258,7			
	87,9				32,2				55,7				35,9				30,5					241,2			
ST	91,4	90,6	90,6	0,7	11,6	12,0	11,8	1,0	79,8	79,0	78,8	1,1	41,6	39,6	39,8	1,5	35,6	33,9	33,7	1,7		167,6	183,9	182,8	13,6
	91,0				12,7				78,3				40,3				34,2					175,3			
	90,1				10,4				79,7				38,9				31,5					192,5			
	89,9				12,4				77,5				38,2				33,5					195,8			
SV	91,5	91,2	91,1	0,5	13,6	13,5	13,4	0,4	77,8	77,9	77,7	0,5	36,3	35,9	35,9	0,6	31,5	30,8	30,6	1,6		175,9	182,1	183,7	8,8
	91,4				13,4				78,0				36,6				32,2					177,5			
	90,9				12,8				78,1				35,4				28,5					186,7			
	90,5				13,7				76,9				35,3				30,0					194,8			
SW1	92,8	92,7	92,7	0,3	12,9	13,1	13,1	0,9	79,9	79,6	79,6	0,7	41,8	41,6	41,6	0,7	34,0	33,8	33,9	0,9		123,6	125,9	126,0	4,9
	93,0				14,1				78,9				41,3				35,1					120,7			
	92,4				12,0				80,4				40,7				33,0					131,7			
	92,6				13,3				79,3				42,4				33,6					128,1			
SW3	92,7	92,5	92,5	0,3	10,8	10,4	10,4	0,3	81,9	82,0	82,1	0,2	45,2	43,0	43,2	1,6	35,9	34,5	34,6	1,3		125,0	127,9	128,2	4,1
	92,7				10,3				82,4				43,6				35,4					124,6			
	92,3				10,4				81,9				42,3				33,4					130,8			
	92,2				10,1				82,1				41,7				33,6					132,6			
T1	92,5	92,4	92,4	0,3	16,2	14,7	14,5	2,6	76,3	78,6	78,5	1,8	39,2	39,0	39,3	1,1	34,5	33,2	33,3	1,7		127,6	129,3	129,5	4,6
	92,7				17,0				78,4				38,7				34,9					124,4			
	92,0				13,1				78,9				38,4				31,9					135,1			
	92,3				11,6				80,6				40,8				31,8					131,0			
T2	94,0	94,3	94,3	0,4	18,5	14,4	14,6	3,7	75,5	79,9	79,7	4,1	38,6	40,4	40,3	2,2	31,1	35,8	35,1	2,9		100,2	95,7	95,7	6,0
	93,9				17,1				76,8				38,2				34,6					101,6			
	94,6				11,2				83,5				42,3				37,6					89,8			
	94,5				11,6				82,9				42,2				36,9					91,2			
granT 5%	91,8	91,9	91,9	0,1	29,2	37,0	36,7	7,0	62,6	55,0	55,2	6,9	34,5	33,0	33,0	2,1	27,7	27,2	27,1	1,2		155,5	153,3	153,2	2,0
	91,9				32,5				59,4				35,1				28,5					152,7			
	91,9				41,4				50,5				31,4				25,7					153,8			
	92,0				43,7				48,3				31,1				26,6					150,8			
granT 10%	90,8	90,8	90,8	0,6	33,0	36,3	35,0	7,0	57,9	54,3	55,8	7,6	34,5	32,7	32,6	2,2	28,7	27,8	27,8	1,4		197,2	198,6	197,2	12,9
	91,6				26,0				65,6				34,5				29,3					180,2			
	90,2				39,6				50,6				30,8				26,4					211,5			
	90,7				41,5				49,2				30,5				26,9					200,0			
granT 20%	85,6	84,8	84,8	0,8	21,9	27,5	27,5	5,2	63,7	57,0	57,3	5,8	33,4	32,2	32,7	2,2	30,3	30,5	30,0	1,6		319,5	339,0	339,5	17,1
	85,0				24,4				60,6				35,5				30,7					334,4			
	84,6				33,0				51,6				30,8				27,7					343,5			
	83,8				30,5				53,3				31,0				31,3					360,5			
granT 30%	79,2	79,8	79,9	0,8	19,4	25,7	25,8	6,6	59,8	54,3	54,1	5,9	37,8	35,0	35,1	2,3	30,8	30,0	30,5	2,3		496,2	481,9	480,9	18,2
	79,2				21,0				58,3				35,9				33,5					496,9			
	80,6				30,3				50,3				34,1				28,4					462,8			
	80,4				32,6				47,9				32,4				29,1					467,7			

Sub	PV				AC				CC				WV50				WV100				dB _A [g/l]	dB _E					
	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	[g/l]	Med	MW	s	
GT 30%	91,2	91,1	91,1	0,3	30,0	34,0	34,8	6,5	61,3	57,1	56,3	6,8	36,5	34,9	34,9	1,5	28,7	29,0	28,6	1,4		177,7					
	91,5				28,8				62,7				35,8				29,8					171,2					
	90,9				38,0				52,9				34,0				26,7					183,7					
	90,8				42,4				48,4				33,2				29,3					186,4					
GT 40%	90,7	90,3	90,4	0,6	26,6	29,1	29,1	2,3	64,2	61,3	61,3	2,8	35,0	35,7	36,2	1,5	31,6	32,1	32,2	0,8		188,9	197,1	196,3	12,6		
	91,1				27,9				63,1				36,2				31,4					182,4					
	89,8				30,3				59,5				35,2				33,1					208,4					
	89,9				31,7				58,3				38,2				32,5					205,4					
GT 50%	88,5	89,1	89	0,4	17,7	27,6	25,8	6,0	70,9	61,6	63,3	5,6	35,6	35,0	35,2	2,0	30,8	30,3	30,2	0,5		239,2	227,1	228,7	8,2		
	88,9				24,9				64,0				37,7				30,1					231,0					
	89,4				30,4				59,0				32,9				30,4					221,3					
	89,3				30,3				59,1				34,4				29,5					223,3					
GT 60%	88,9	88,4	88,5	0,9	14,4	24,0	22,0	5,2	74,5	64,7	66,6	5,7	39,4	38,5	38,3	1,2	31,8	32,6	32,5	0,5		232,0	243,1	239,6	19,0		
	89,6				22,7				66,9				36,7				32,9					216,4					
	87,7				25,3				62,5				38,8				32,4					256,0					
	87,8				25,5				62,4				38,1				32,8					254,2					
KF 10%	93,6	93,7	93,7	0,2	32,9	31,5	29,3	5,7	60,7	62,2	64,4	5,6	33,2	35,5	35,7	2,6	26,2	28,2	28,4	2,5		106,7	106,0	105,6	3,0		
	93,9				33,3				60,5				33,6				26,5					101,6					
	93,5				21,0				72,5				38,4				31,2					108,8					
	93,7				30,0				63,7				37,4				29,8					105,3					
KF 15%	94,0	94,0	94,0	0	33,4	31,7	32,3	3,0	60,6	62,4	61,8	3,0	31,5	33,9	34,0	2,6	25,7	29,0	29,0	3,8		100,3	100,1	100,0	0,7		
	94,0				36,0				58,1				32,1				25,8					99,1					
	94,0				29,8				64,2				36,6				32,1					100,7					
	94,0				29,9				64,1				35,7				32,4					99,8					
KF 20%	93,9	93,9	93,8	0,1	34,0	32,7	32,3	1,9	59,9	61,1	61,5	1,9	33,0	33,4	34,2	2,1	26,1	27,0	27,2	1,0		102,1	102,7	103,4	2,5		
	93,8				33,8				60,0				32,6				26,8					103,2					
	93,9				30,0				63,9				33,8				27,2					101,5					
	93,6				31,5				62,1				37,2				28,5					107,0					
KF 25%	94,1	94,2	94,1	0,2	37,4	34,2	34,7	2,0	56,6	59,9	59,4	2,0	33,2	34,0	33,8	2,2	25,2	26,6	27,3	2,6		98,9	98,2	99,0	2,5		
	93,8				34,8				59,0				31,0				25,2					102,6					
	94,2				33,5				60,7				36,2				28,0					97,1					
	94,2				33,0				61,1				34,8				30,6					97,5					
RH 10%	92,8	92,9	92,9	0,1	23,7	23,7	23,4	1,6	69,1	69,3	69,5	1,5	38,5	38,2	38,9	2,2	27,4	28,5	28,8	1,4		120,7	119,6	119,6	1,8		
	93,0				23,6				69,4				37,2				28,0					117,8					
	92,8				21,2				71,6				42,0				30,6					121,6					
	93,0				24,9				68,0				37,8				29,0					118,5					
RH 20%	92,0	92,0	92,0	0,2	7,5	12,9	12,4	3,8	84,5	79,2	79,6	3,9	41,1	41,9	41,7	1,1	33,2	34,6	34,6	1,7		135,9	137,2	136,2	3,2		
	92,3				11,7				80,6				40,4				33,0					131,8					
	91,9				16,5				75,4				42,7				36,0					138,5					
	91,9				14,0				77,8				42,6				36,1					138,7					
RH 30%	91,2	90,9	90,9	0,2	7,4	8,4	8,5	1,7	83,7	82,5	82,4	1,7	45,0	45,0	45,1	0,7	36,7	37,8	37,7	1,7		151,1	155,1	155,1	3,5		
	90,8				6,8				84,0				44,4				35,8					156,6					
	90,7				9,4				81,3				44,9				39,3					169,2					
	91,0				10,4				80,6				46,0				38,9					153,6					
RH 40%	89,8	90,1	90,1	0,3	8,8	10,2	10,3	1,7	81,0	79,9	79,8	1,4	46,2	46,6	46,4	0,9	37,0	38,6	39,0	2,3		174,0	169,9	169,7	4,2		
	89,9				8,8				81,1				45,2				37,1					172,5					
	90,2				11,5				78,8				47,3				40,0					167,3					
	90,4				12,0				78,4				46,9				41,7					165,2					
STf 20%	93,6	93,8	93,8	0,2	28,8	28,8	29,9	2,5	64,8	65,0	63,9	2,3	38,1	37,4	37,4	1,0	30,0	30,5	30,5	1,3		106,0	104,2	103,4	3,1		
	93,7				28,6				65,1				38,3				29,1					105,3					
	93,8				28,7				65,1				36,4				32,0					103,2					
	94,0				33,6				60,5				36,7				31,0					99,1					
STf 40%	92,6	92,8	92,8	0,2	6,9	11,5	11,6	4,9	85,7	81,4	81,2	4,8	45,1	45,1	45,4	0,7	37,2	36,9	37,2	1,1		122,9	120,8	120,1	3,1		
	92,8				7,9				84,9				46,4				36,2					120,3					
	92,7				15,0				77,8				44,8				36,6					121,4					
	93,0				16,7				76,3				45,1				38,8					115,7					
STf 60%	93,1	92,4	92,5	0,4	13,4	10,8	10,4	2,7	79,7	81,6	82,1	2,5	47,3	49,8	49,7	1,9	38,7	39,9	40,6	2,5		114,9	127,9	125,0	6,8		
	92,3				6,8				85,5				49,1				39,0					128,7					
	92,2				10,3				81,9				50,4				44,1					129,5					
	92,4				11,2				81,2				51,8				40,7					127,0					
STf 80%	92,1	91,9	92,0	0,1	7,4	9,2	9,2	2,3	84,7	82,9	82,7	2,4	53,7	55,1	55,2	3,8	43,3	45,6	46,4	3,8		132,2	135,6	134,8	1,8		
	91,9				7,1				84,8				50,9				43,4					135,6					
	91,9				11,5				80,3				59,9				47,7					135,9					
	91,9				10,9				81,0				56,4				51,1					135,5					
STg 20%	92,3	92,5	92,6	0,4	16,2	23,2	23,4	6,1	76,2	69,7	69,2	6,2	41,1	38,6	38,2	3,4	30,7	31,7	32,1	2,3		127,5	125,4	123,8	6,7		
	93,1				21,9				71,2				41,1				32,7					114,6					
	92,6				24,4				68,1				36,1				35,1					123,2					

Tabelle A2: Gegenüberstellung der Volumengewichte (dB_A [g/l]) der 13 Standardsubstrate und der 23 selbstgestellten Mischsubstrate in Abhängigkeit von der Ermittlungsmethode (**Topffest** = praxisübliche Topffestigkeit; **VDLUFA** = Volumengewicht bestimmt nach VDLUFA; **VDLUFA+5** = Volumengewicht nach 15 Fallvorgängen; **VDLUFA-5** = Volumengewicht nach 5 Fallvorgängen; **EW** = Einzelwert; **MW** = Mittelwert aus 3 Einzelwerten; **s** = Standardabweichung; Einzelwerte der Variante Topffest in Tabelle A3; * = Messfehler)

Sub- strat	VDLUFA			VDLUFA+5			VDLUFA-5			Topffest	
	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	MW [g/l]	s
EP	198,0 211,2 199,7	203,0	7,2	216,1 219,2 224,5	219,9	4,2	196,0 208,1 216,5	206,9	10,3	253,4	12,3
EPr	210,5 208,7 214,4	211,2	2,9	226,6 224,2 228,8	226,5	2,3	212,0 214,3 203,9	210,1	5,5	257,5	8,3
ET	221,1 241,9 224,8	229,3	11,1	242,7 236,4 244,6	241,2	4,3	212,2 222,8 210,6	215,2	6,6	243,5	6,3
CF	113,6 113,6 112,9	113,4	0,4	121,2 117,8 117,9	119,0	1,9	113,6 108,9 114,2	112,3	2,9	118,8	4,4
PH	136,8 133,9 138,6	136,5	2,4	137,5 136,3 135,0	136,3	1,2	134,2 132,9 133,2	133,4	0,7	151,4	6,7
FT	158,4 182,9 164,1	168,5	12,8	188,4 184,6 157,3	176,8	17,0	191,7 182,1 176,6	183,5	7,7	176,4	8,4
RK	231,6 229,9 227,9	229,8	1,9	246,7 255,1 242,1	248,0	6,6	224,6 276,6 240,8	247,3	26,6	228,5	9,5
ST	128,8 139,0 132,4	133,4	5,2	156,3 169,2 160,1	161,9	6,6	144,2 148,1 151,5	147,9	3,7	166,7	8,8
SV	154,7 149,8 151,1	151,8	2,6	155,7 154,8 151,9	154,1	2,0	153,4 167,8 157,3	159,5	7,4	168,4	5,0
SW1	113,2 111,3 107,3	110,6	3,0	117,0 114,3 117,6	116,3	1,8	106,5 109,9 110,1	108,8	2,0	120,9	4,5
SW3	104,7 106,5 108,7	106,6	2,0	108,3 113,7 110,4	110,8	2,8	109,3 111,4 106,8	109,1	2,3	118,8	5,1
T1	124,5 123,7 123,4	123,9	0,6	123,1 128,7 125,1	125,6	2,8	113,9 118,9 114,6	115,8	2,7	133,4	9,5
T2	95,2 98,3 94,8	96,1	1,9	101,0 100,6 94,5	98,7	3,6	102,8 101,8 97,2	100,6	3,0	110,0	5,6
granT5 %	147,9 138,6 132,6	139,7	7,7	122,7 142,2 169,4	155,8	13,6	147,9 138,6 145,2	143,9	4,8	145,4	7,6
granT10 %	143,6 171,4 195,4	170,1	25,9	150,8 175,8 215,9	180,8	32,9	134,1 155,8 205,1	165,0	36,4	198,2	10,5

Sub- strat	VDLUFA			VDLUFA+5			VDLUFA-5			Topffest	
	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	MW [g/l]	s
granT20 %	392,2	323,0	60,6	382,1	327,2	38,9	363,5	311,0	45,8	299,5	15,8
	297,7			297,7			290,4				
	279,2			301,8			279,2				
granT30 %	512,7	439,7	65,4	512,7	465,7	42,7	479,9	424,3	47,0	417,2	26,5
	368,5			429,4			386,5				
	416,9			454,9			409,5				
GT30%	134,6	150,3	13,9	145,2	157,9	12,1	131,4	145,5	13,1	164,6	7,2
	155,3			159,3			147,9				
	161,0			269,2			157,1				
GT40%	176,4	178,1	6,3	185,9	181,3	7,4	172,0	172,3	8,1	177,3	12,4
	185,1			185,1			180,6				
	172,7			172,7			164,3				
GT50%	222,9	207,2	14,6	228,6	209,2	19,8	202,6	194,0	9,2	207,0	11,3
	204,9			210,1			195,1				
	193,9			189,0			184,2				
GT60%	222,4	220,6	6,6	227,8	226,0	6,7	222,4	218,8	4,9	216,5	9,1
	213,3			218,6			213,3				
	226,1			231,7			220,7				
KF10%	90,0	88,9	3,5	87,6	89,7	4,0	83,2	84,3	2,3	88,1	4,0
	91,7			94,2			87,0				
	84,9			87,2			82,8				
KF15%	86,0	84,8	1,2	86,0	87,1	1,1	77,6	79,9	2,1	90,0*	4,0
	85,0			87,3			80,8				
	83,5			88,1			81,5				
KF20%	83,3	80,4	2,5	87,8	85,0	2,5	79,2	76,3	2,5	86,1	3,0
	78,5			83,0			74,5				
	79,4			84,1			75,2				
KF25%	92,7	86,6*	5,8	95,3	88,3*	7,0	85,8	80,8*	5,4	86,0	3,6
	81,3			81,3			75,1				
	85,9			88,3			81,4				
RH10%	113,0	113,3	1,5	113,0	117,5	4,3	107,5	108,6	1,0	113,1	4,2
	114,9			117,9			109,3				
	112,0			121,6			109,1				
RH20%	127,1	127,0	2,0	130,6	132,9	2,9	120,6	120,6	1,8	121,2	5,1
	128,9			136,1			122,5				
	125,1			132,0			118,8				
RH30%	142,6	142,4	0,4	146,6	147,6	1,8	135,3	136,4	1,8	127,9	4,1
	142,6			146,6			135,3				
	142,0			149,7			138,5				
RH40%	148,3	144,7	5,7	156,3	147,3	7,9	144,6	138,7	6,7	148,6	5,0
	138,1			141,7			131,4				
	147,6			143,8			140,2				
STf20%	91,6	91,2	1,3	89,0	91,1	1,9	84,2	85,7	1,8	94,4	3,8
	92,2			92,2			87,7				
	89,7			92,2			85,3				
STf40%	97,3	98,6	4,6	100,1	98,6	3,4	92,2	93,4	2,0	102,7	3,4
	103,6			100,8			95,7				
	94,7			94,7			92,2				
STf60%	158,2	142,3*	14,6	158,2	143,6*	14,3	150,5	133,3	15,5	111,5	4,6
	139,1			142,9			128,9				
	129,6			129,6			120,4				

Substrat	VDLUFA			VDLUFA+5			VDLUFA-5			Topffest	
	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	EW	MW [g/l]	s	MW [g/l]	s
STf80%	122,6 115,8 117,7	118,7	3,5	126,3 122,4 121,0	123,2	2,8	115,8 119,0 114,5	116,4	2,3	96,6	3,0
STg20%	98,8 98,0 108,3	101,7	5,7	101,3 100,5 111,1	104,3	5,9	91,9 93,4 103,0	93,1	6,0	101,6	3,5
STg40%	114,5 112,9 120,7	166,0	4,1	111,4 112,9 120,7	115,0	5,0	108,4 106,9 114,3	109,9	3,9	105,0	3,0
STg60%	122,6 123,5 116,4	120,8	3,8	119,1 123,5 116,4	119,6	3,6	112,6 116,6 113,1	114,1	2,2	110,5	4,3

Tabelle A3: Volumengewichte (dB_A [g / l]) der 13 Standardsubstrate und der 23 selbstgestellten Mischsubstrate der Variante Topffest

(**EW** = Einzelwert; **A** und **B** = Topfende Personen; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; * = Messfehler)

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
EP	247,8	260,4	242,9	246,4	253,4	12,3
	255,8		235,2			
	255,5		234,8			
	271,0		234,5			
	248,3		250,6			
	262,3		252,4			
	268,5		238,4			
	257,9		249,5			
	265,4		254,4			
	271,8		270,9			
	EPr		273,3			
260,6		256,9				
265,5		251,3				
270,2		246,8				
261,1		247,2				
260,8		245,4				
260,0		245,6				
263,4		257,6				
262,3		263,0				
263,2		257,1				
ET		240,2	242,1	247,4	245,0	243,5
	239,8	240,3				
	254,1	240,6				
	238,5	238,4				
	245,0	246,3				
	247,1	246,9				
	242,1	258,0				
	236,2	242,6				
	244,7	237,1				
	233,3	252,0				
	CF	119,2		117,0		
125,6		120,5				
111,9		123,7				
113,3		119,5				
118,0		119,9				
119,3		116,8				
121,3		122,5				
106,8		117,9				
114,9		121,0				
119,9		122,1				
PH		155,3	157,2		149,9	145,6
	159,9	146,0				
	159,2	138,6				
	155,3	143,8				
	158,4	141,0				
	157,1	146,4				
	158,4	147,7				
	160,4	144,8				
	154,4	147,4				
	153,7	150,3				

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
FT	178,1 165,3 185,3 172,7 182,4 169,6 175,8 174,3 175,6 182,5	176,1	161,8 179,0 162,4 177,2 168,5 173,0 186,5 176,7 189,1 191,9	176,6	176,4	8,4
RK	206,9 213,3 221,1 217,4 221,2 217,2 236,2 218,6 223,7 214,8	219,0	209,0 228,4 213,4 227,2 226,2 226,4 234,8 225,3 244,4 231,7	226,7	222,9	9,5
ST	184,9 167,4 180,9 173,7 165,6 166,9 171,8 171,3 172,4 165,1	172,0	154,1 152,7 167,1 152,8 165,8 159,7 158,4 159,4 175,8 168,2	161,4	166,7	8,8
SV	164,3 169,5 169,5 172,8 170,0 156,1 174,4 169,1 172,4 165,6	168,4	157,8 166,8 172,2 165,9 167,0 167,5 170,6 175,8 167,8 172,9	168,4	168,4	5,0
SW1	115,9 124,0 123,1 128,2 121,5 119,7 122,3 119,7 121,5 118,8	121,5	111,1 116,6 115,9 122,4 119,1 117,3 121,3 127,3 122,1 130,1	120,3	120,9	4,5

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
SW3	117,7 117,4 118,0 120,1 119,9 121,0 125,1 118,7 120,3 122,8	120,1	106,8 107,7 112,1 116,5 118,7 125,2 122,8 117,1 122,3 125,4	117,5	118,8	5,1
T1	118,9 122,2 123,5 126,0 125,1 127,0 124,8 124,6 124,6 126,3	124,3	143,0 142,8 144,1 144,6 140,6 142,9 141,4 138,1 143,7 143,0	142,4	133,4	9,5
T2	105,2 109,8 105,0 106,3 107,2 105,4 101,6 104,0 102,6 104,7	105,2	109,3 116,6 117,7 114,7 112,4 120,1 114,3 113,9 113,1 115,4	114,7	110,0	5,6
granT5%	150,5 152,8 146,6 148,1 149,2 142,5 140,4 141,5 151,7 145,0	146,8	133,6 145,0 141,8 142,1 126,6 147,4 152,3 158,3 156,6 136,1	144,0	145,4	7,8
granT10%	214,8 205,1 201,2 191,6 207,5 191,8 196,5 221,8 191,7 179,2	200,1	199,7 199,5 183,7 184,8 190,9 206,5 206,1 203,5 191,7 197,0	196,3	198,2	10,5

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
granT20%	290,6 318,3 313,8 274,2 294,1 316,0 301,6 302,8 271,0 313,7	299,6	310,4 308,9 286,6 320,0 313,0 308,3 288,0 302,6 280,0 276,0	299,4	299,5	15,8
granT30%	447,1 472,6 374,2 418,1 432,2 426,4 411,7 411,5 378,7 386,6	415,9	427,5 377,3 381,0 428,6 441,9 422,3 439,7 409,7 435,6 421,6	418,5	417,2	26,5
GT30%	173,8 172,5 163,2 166,8 174,7 158,2 164,7 156,2 165,6 142,4	163,8	167,5 147,1 171,1 167,0 166,1 161,2 170,8 156,7 159,6 140,8	160,8	162,3	9,8
GT40%	165,0 156,0 162,6 155,5 162,0 170,2 193,4 193,4 187,9 168,5	171,4	184,4 189,4 190,7 175,9 184,7 187,6 177,6 174,6 186,7 179,7	183,1	177,3	12,4
GT50%	202,6 221,3 214,8 215,7 206,9 201,9 206,6 216,1 235,2 214,8	213,6	182,4 191,1 199,0 210,0 196,1 202,8 206,8 201,5 206,3 208,5	200,4	207,0	11,3

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
GT60%	226,9 225,4 219,2 210,1 223,6 224,3 220,0 209,3 233,4 209,1	220,1	222,7 224,2 219,5 220,6 198,4 215,1 203,7 207,0 206,1 212,0	212,9	216,5	9,1
KF10%	91,1 92,0 87,5 93,7 85,1 83,9 84,1 83,4 87,3 92,1	88,0	87,0 85,6 87,5 94,7 86,8 88,6 93,5 82,2 92,3 82,9	88,1	88,1	4,0
KF15%*	89,5 89,9 91,2 92,8 98,5 97,3 88,9 93,4 92,2 89,8	92,3	84,1 81,5 89,4 90,6 91,3 90,7 89,4 84,0 87,5 88,5	87,7	90,0*	4,0
KF20%	89,7 86,6 87,9 88,4 83,3 86,7 88,8 86,5 90,7 84,4	87,3	84,0 89,9 85,8 87,7 88,9 86,1 83,0 83,6 80,9 79,9	85,0	86,1	3,0
KF25%	86,8 85,3 84,9 79,2 87,6 93,3 88,1 80,1 85,4 86,1	85,7	84,4 80,9 84,3 87,9 82,9 80,7 80,0 86,3 89,5 86,1	84,3	85,0	3,6

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
RH10%	112,9 119,5 119,0 115,8 119,1 110,3 119,8 110,8 114,6 113,3	115,5	107,3 108,6 109,1 107,7 111,7 109,5 108,0 113,0 114,4 117,0	110,6	113,1	4,2
RH20%	121,9 127,1 126,1 125,8 123,8 128,0 127,7 118,7 121,6 123,0	124,4	110,9 112,5 113,9 123,9 115,2 120,2 122,1 122,2 123,6 116,4	118,1	121,2	5,1
RH30%	135,4 127,8 134,5 126,1 129,1 124,3 126,0 130,0 129,5 128,5	129,1	133,0 119,0 125,8 125,1 129,4 128,2 125,1 121,7 126,4 133,0	126,7	127,9	4,1
RH40%	152,5 153,1 155,7 150,4 147,9 148,2 152,3 150,0 143,5 145,5	149,9	138,4 140,3 145,4 144,4 154,1 155,8 149,8 152,5 149,5 143,5	147,4	148,6	5,0
STf20%	98,2 97,5 94,6 99,4 96,3 93,2 96,8 97,7 90,9 91,5	95,6	98,2 100,3 100,8 98,6 98,1 94,7 101,2 92,2 94,8 96,3	97,5	96,6	3,0

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
STf40%	103,8 105,1 107,1 104,1 100,0 97,3 100,6 101,3 103,7 97,0	102,0	98,6 97,9 104,0 101,2 99,0 107,2 102,3 96,5 98,1 106,9	101,2	101,6	3,5
STf60%	109,1 104,0 107,7 107,6 109,6 103,3 106,7 109,1 106,6 105,8	106,9	101,0 105,9 105,8 99,8 100,4 103,0 102,6 101,8 104,1 106,3	103,1	105,0	3,0
STf80%	112,2 113,0 116,3 114,8 108,1 111,4 114,8 115,1 114,1 115,4	113,5	104,7 108,0 109,0 103,6 105,5 109,8 108,2 108,3 102,8 115,2	107,5	110,5	4,3
STg20%	91,5 88,3 89,2 92,9 87,7 96,2 92,0 92,6 93,6 93,9	91,8	97,0 91,8 95,5 96,6 95,8 100,3 101,2 99,2 98,5 93,9	97,0	94,4	3,8
STg40%	105,0 101,6 99,7 100,4 100,4 100,1 102,4 100,9 98,8 102,0	101,1	101,0 100,2 100,6 99,8 109,3 107,9 101,2 108,8 107,2 106,4	104,2	102,7	3,4

Substrat	EW A [g / l]	MW A [g / l]	EW B [g / l]	MW B [g / l]	MW A und B [g / l]	s
STg60%	114,4 111,3 100,9 111,6 111,8 109,9 110,9 111,2 115,1 114,5	111,1	100,7 109,8 116,2 118,4 114,4 106,8 111,9 110,4 116,0 114,7	111,9	111,5	4,6

Tabelle A4: Volumengewicht im Probenzylinder vor (dB_A) und nach der Gleichgewichtseinstellung auf der Unterdruckanlage (dB_E) bei der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode)
 (dB_A = Zum Anfang der Messung im Probenzylinder eingestelltes (eingewogenes) Volumengewicht (Topffest; VDLUFA; VDLUFA+5; VDLUFA-5); dB_E = Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung; **Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; * = Werte von dB_A enthalten offenbar Messfehler; ¹ = nur jeweils ein Messwert je Wiederholung der VDLUFA-5 Methode, da nicht genügend Substrat vorhanden; ² = Messfehler bei dB_E)

Substrat	dB _A -Variante VDLUFA					dB _A -Variante VDLUFA+5					dB _A -Variante VDLUFA-5					dB _A -Variante Topffest				
	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	Med.	MW	s	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	Med.	MW	s	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	Med.	MW	s	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	Med.	MW	s
EP	203,0	242,2	243,7	244,2	3,9	219,9	260,4	259,8	259,8	1,3	206,9	261,6	267,8	258,7	6,3	253,4	253,7	253,7	253,7 ²	0,0
		240,3					259,3					254,0					253,7			
EPr	211,2	287,5	280,6	281,3	10,5	226,5	278,8	279,4	279,1	2,0	210,1	295,3	288,5	288,9	5,9	257,5	257,9	257,9	257,9 ²	0,0
		273,7					281,1					292,5					257,9			
ET	229,3	274,7	275,3	273,2	5,5	241,2	269,5	269,0	268,8	1,7	215,2	286,9	269,4	272,8	9,7	243,5	244,1	244,1	244,1 ²	0,0
		265,1					268,5					271,1					244,1			
CF	113,4	127,2	127,2	126,2	2,7	119,0	133,6	132,8	132,8	0,6	112,3	127,8	129,0	130,5	5,2	118,8	118,9	118,9	118,9 ²	0,0
		128,2					132,6					126,1					118,9			
PH	136,5	164,2	166,2	165,8	1,3	136,3	164,6	166,3	166,1	2,6	133,4	161,8	165,9	165,1	2,3	151,4	165,5	165,1	165,2	1,8
		165,5					168,0					166,6					164,8			
FT	168,5	228,6	216,8	216,8	9,6	176,8	197,0	196,7	196,7	1,0	183,5	209,7	209,4	209,0	1,1	176,4	195,7	195,0	193,4	3,7
		205,3					197,8					209,7					188,0			
RK	229,8	232,3	233,1	232,9	0,4	248,0	248,1	248,1	248,1	0,0	247,3	250,9	253,0	252,6	1,2	222,9	241,7	240,8	240,4	1,7
		233,1					248,1					252,6					239,9			
ST	133,4	173,8	179,0	181,3	8,9	161,9	189,6	190,0	190,0	1,0	147,9	174,7	174,3	173,9	5,0	166,7	181,2	189,9	189,9	7,8
		193,4					188,9					167,4					185,9			
SV	151,8	172,2	182,3	181,0	6,5	154,1	193,6	194,0	194,0	1,1	159,5	171,9	186,5	183,9	8,3	168,4	195,5	193,3	193,5	2,8
		180,5					192,7					187,6					191,0			
SW1	110,6	134,8	132,3	131,6	3,3	116,3	133,9	133,6	133,6	0,7	108,8	143,1	132,2	134,6	5,7	120,9	129,7	130,9	130,1	2,7
		126,9					132,8					130,9					126,5			
SW3	106,6	136,0	134,6	135,7	5,1	110,8	130,7	130,9	130,9	0,7	109,1	132,9	129,2	129,7	2,2	118,8	129,2	129,2	129,8	1,2
		131,0					131,2					129,2					129,2			
T1	123,9	131,5	132,7	132,5	0,7	125,6	136,6	137,0	137,1	0,5	115,8	139,2	138,4	137,9	3,0	133,4	142,6	144,4	144,4	1,6
		132,4					137,2					137,5					143,6			
T2	96,1	117,2	113,7	113,4	4,6	98,7	116,9	116,7	116,7	0,6	100,6	119,6	118,3	117,8	2,0	110,0	126,0	124,1	124,1	1,7
		108,6					116,1					115,0					122,2			
granT5%	139,7	160,7	160,1	160,1	1,1	155,8	170,2	169,9	169,9	0,8	143,9	171,1	166,9	167,4	6,0	145,4	163,3	162,6	162,2	3,4
		161,3					169,6					162,7					157,6			
granT10%	170,1	194,5	209,9	206,7	8,4	180,8	198,0	198,0	198,0	1,2	165,0	195,0	195,4	196,2	2,5	198,2	229,0	213,6	215,9	9,9
		211,6					198,0					194,3					207,4			
granT20%	323,0	324,0	324,0	324,0 ²	0,0	327,2	375,5	373,4	373,0	2,4	311,0	387,2	362,9	368,6	12,5	299,5	324,5	313,1	313,8	8,4
		324,0					369,8					361,4					304,5			
granT30%	439,7	506,4	497,8	497,8	8,0	465,7	466,0	466,0	466,0 ²	0,0	424,3	424,6	426,8	427,1	2,5	417,2	512,4	492,5	493,5	19,4
		489,3					466,0					430,4					508,2			
GT30%	150,3	178,9	178,5	178,5	0,9	157,9	183,8	182,7	182,7	0,9	145,5	176,2	181,0	181,2	6,3	164,6	201,4	197,9	197,5	3,7
		178,2					182,4					185,9					196,7			
	179,6					183,1					175,5					192,9				
	177,5					181,7					187,5					199,0				

Tabelle A5 : Gegenüberstellung der Volumengewichte [g / l] vor und nach Ablauf der Untersuchung mit Hilfe der ISHS-Methode (= ISHS) und der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode) (Topffest = **Q-Topffest**; VDLUFA = **Q-VDLUFA**; VDLUFA+5 = **Q-VDLUFA+5**; VDLUFA-5 = **Q-VDLUFA-5**) (dB_A = zum Anfang der Messung im Probenzylinder eingestelltes (eingewogenes) Volumengewicht (Topffest; VDLUFA; VDLUFA+5; VDLUFA-5); dB_E = Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung; **MW** = arithmetisches Mittel; * = Werte von dB_A enthalten offenbar Messfehler; ¹ = nur jeweils ein Messwert je Wiederholung der Q-VDLUFA-5 Methode, da nicht genügend Substrat vorhanden; ² = Messwerte von dB_E enthalten Messfehler)

Substrat	ISHS			Q-VDLUFA			Q-VDLUFA+5			Q-VDLUFA-5			Q-Topffest		
	dB_A [g/l]	dB_E [g/l]	MW	dB_A [g/l]	dB_E [g/l]	MW	dB_A [g/l]	dB_E [g/l]	MW	dB_A [g/l]	dB_E [g/l]	MW	dB_A [g/l]	dB_E [g/l]	MW
EP		228,2	254,6	203,0	242,2	244,2	219,9	260,4	259,8	206,9	261,6	258,7	253,4	253,7	253,6 ²
		244,3			240,3			259,3			254,0			253,7	
		262,7			249,3			258,3			253,0			253,7	
		283,2			245,2			261,4			266,1			253,7	
EPr		247,9	273,9	211,2	287,5	281,3	226,5	278,8	279,1	210,1	295,3	288,9	257,5	257,9	257,9 ²
		243,3			273,7			281,1			292,5			257,9	
		311,3			271,3			279,9			284,5			257,9	
		293,0			292,8			276,5			283,2			257,9	
ET		252,8	251,8	229,3	274,7	273,2	241,2	269,5	268,8	215,2	286,9	272,8	243,5	244,1	244,1 ²
		248,9			265,1			268,5			271,1			244,1	
		256,0			277,0			270,6			267,7			244,1	
		249,6			275,9			266,5			265,5			244,1	
CF		107,8	123,8	113,4	127,2	126,2	119,0	133,6	132,8	112,3	127,8	130,5	118,8	118,9	118,9 ²
		117,1			128,2			132,6			126,1			118,9	
		136,3			127,2			132,1			137,9			118,9	
		134,0			122,1			133,1			130,2			118,9	
PH		160,6	163,8	136,5	164,2	165,8	136,3	164,6	166,1	133,4	161,8	165,1	151,4	165,5	165,2
		161,4			165,5			168,0			166,6			164,8	
		169,0			166,9			168,7			166,6			163,0	
		164,3			166,9			163,3			165,2			167,3	
FT		187,2	200,7	168,5	228,6	216,8	176,8	197,0	196,7	183,5	209,7	209,0	176,4	195,7	193,4
		185,0			205,3			197,8			209,7			188,0	
		217,1			214,9			196,3			209,0			194,3	
		213,5			218,6			195,6			207,5			195,7	
RK		220,0	239,4	229,8	232,3	232,9	248,0	248,1	248,1 ₂	247,3	250,9	252,6	222,9	241,7	240,4
		237,8			233,1			248,1			252,6			239,9	
		258,7			233,1			248,1			253,5			238,2	
		241,2			233,1			248,1			253,5			241,7	
ST		167,6	182,8	133,4	173,8	181,3	161,9	189,6	190,0	147,9	174,7	173,9	166,7	181,2	189,9
		175,3			193,4			188,9			167,4			185,9	
		192,5			182,6			191,1			174,0			198,5	
		195,8			175,3			190,4			179,3			193,9	
SV		175,9	183,7	151,8	172,2	181,0	154,1	193,6	194,0	159,5	171,9	183,9	168,4	195,5	193,5
		177,5			180,5			192,7			187,6			191,0	
		186,7			184,2			194,4			190,6			196,3	
		194,8			187,2			195,2			185,4			191,0	
SW1		123,6	126,0	110,6	134,8	131,6	116,3	133,9	133,6	108,8	143,1	134,6	120,9	129,7	130,1
		120,7			126,9			132,8			130,9			126,5	
		131,7			132,6			133,4			132,5			132,1	
		128,1			132,1			134,4			131,9			132,1	
SW3		125,0	128,2	106,6	136,0	135,7	110,8	130,7	130,9	109,1	132,9	129,7	118,8	129,2	129,8
		124,6			131,0			131,2			129,2			129,2	
		130,8			142,8			130,1			129,2			129,2	
		132,6			133,2			131,7			127,7			131,7	
T1		127,6	129,5	123,9	131,5	132,5	125,6	136,6	137,1	115,8	139,2	137,9	133,4	142,6	144,4
		124,4			132,4			136,7			137,5			143,6	
		135,1			133,0			137,2			140,9			145,2	
		131,0			133,0			137,7			133,8			146,3	

Substrat	ISHS			Q-VDLUFA			Q-VDLUFA+5			Q-VDLUFA-5			Q-Topffest		
	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW
T2		100,2	95,7	96,1	117,2	113,4	98,7	116,9	116,7	100,6	119,6	117,8	110,0	126,0	124,1
		101,6			108,6			116,1			115,0			122,2	
		89,8			117,6			117,4			117,8			123,1	
		91,2			110,3			116,5			118,8			126,0	
granT 5%		155,5	153,2	139,7	160,7	160,1	155,8	170,2	169,9	143,9	171,1	167,4	145,4	163,3	162,2
		152,7			161,3			169,6			162,7			157,6	
		153,8			159,4			169,0			162,0			162,0	
		150,8			158,8			170,8			173,9			165,9	
granT		197,2	197,2	170,1	194,5	206,7	180,8	198,0	198,0	165,0	195,0	196,2	198,2	229,0	215,9
		180,2			211,6			198,0			194,3			207,4	
		211,5			208,2			196,5			199,8			208,9	
		200,0			212,5			199,5			195,8			218,2	
granT 20%		319,5	339,5	323,0	324,0	324,0 ²	327,2	375,5	373,0	311,0	387,2	368,6	299,5	324,5	313,8
		334,4			324,0			369,8			361,4			304,5	
		343,5			324,0			372,6			361,4			315,3	
		360,5			324,0			374,1			364,3			310,9	
granT 30%		496,2	480,9	439,7	506,4	497,8	465,7	466,0	466,0 ²	424,3	424,6	427,1	417,2	512,4	493,5
		496,9			489,3			466,0			430,4			508,2	
		462,8			502,5			466,0			427,5			476,8	
		467,7			493,0			466,0			426,0			476,8	
GT30%		177,7	179,7	150,3	178,9	178,5	157,9	183,8	182,7	145,5	176,2	181,2	164,6	201,4	197,5
		171,2			178,2			182,4			185,9			196,7	
		183,7			179,6			183,1			175,5			192,9	
		186,4			177,5			181,7			187,5			199,0	
GT40%		188,9	196,3	178,1	213,0	212,4	181,3	215,6	214,3	172,3	217,1	217,7	177,3	214,7	215,0
		182,4			211,3			214,7			225,7			207,9	
		208,4			212,2			213,8			216,2			218,3	
		205,4			213,0			213,0			211,7			219,2	
GT50%		239,2	228,7	207,2	217,5	216,6	209,2	249,2	247,7	194,0	241,3	238,0	207,0	213,5	221,5
		231,0			216,0			248,2			242,3			220,4	
		221,3			216,8			247,2			240,3			226,1	
		223,3			216,0			246,2			227,9			226,1	
GT60%		232,0	239,6	220,6	242,7	245,9	226,0	233,3	233,7	218,8	233,1	233,1	216,5	240,9	243,7
		216,4			248,2			234,1			234,8			251,3	
		256,0			241,8			234,9			229,0			240,9	
		254,2			251,1			232,5			235,6			241,8	
KF10%		106,7	105,6	88,9	94,0	96,8	89,7	96,7	96,2	84,3	101,7	98,5	88,1	94,2	101,1
		101,6			96,4			95,7			97,8			109,6	
		108,8			92,7			98,5			97,3			96,7	
		105,3			104,0			94,0			97,3			103,9	
KF15%		100,3	100,0	84,8	94,8	96,5	87,1	95,1	95,0	79,9	99,0	98,5	90,0*	99,7	101,4
		99,1			100,9			94,4			102,4			102,0	
		100,7			93,7			94,1			96,5			105,1	
		99,8			96,6			96,6			96,2			99,0	
KF20%		102,1	103,4	80,4	98,7	96,7	85,0	99,6	96,5	76,3	98,6	93,1	86,1	97,4	96,3
		103,2			92,2			93,1			89,3			95,2	
		101,5			101,7			97,8			92,5			97,0	
		107,0			94,1			95,6			92,2			95,6	
KF25%		98,9	99,0	86,6*	99,1	96,2	88,3*	98,4	97,3	80,8*	95,3	95,0	85,0	126,6	121,5
		102,6			96,1			96,6			95,3			118,1	
		97,1			94,7			98,8			98,0			119,0	
		97,5			95,0			95,5			91,3			122,2	
RH10%		120,7	119,6	113,3	123,7	118,3	117,5	120,0	120,2	108,6	120,9	119,3	113,1	126,8	122,0
		117,8			116,4			120,4			115,7			124,0	
		121,6			116,4			119,6			123,3			119,6	
		118,5			116,4			120,8			117,4			117,9	

Substrat	ISHS			Q-VDLUFA			Q-VDLUFA+5			Q-VDLUFA-5			Q-Topffest		
	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW	dB _A [g/l]	dB _E [g/l]	MW
RH20%		135,9	136,2	127,0	140,3	141,4	132,9	135,7	135,9	120,6	138,4	134,6	121,2	134,5	134,2
		131,8			143,5			136,1			133,7			138,4	
		138,5			135,7			135,2			132,2			128,8	
		138,7			146,2			136,6			134,2			135,1	
RH30%		151,1	155,1	142,4	151,5	152,4	147,6	154,4	154,2	136,4	141,2	144,9	127,9	148,8	149,0
		156,6			154,3			155,0			148,4			146,5	
		159,2			155,4			153,4			145,8			150,0	
		153,6			148,3			153,9			144,2			150,6	
RH40%		174,0	169,7	144,7	161,6	163,8	147,3	161,5	160,6	138,7	164,9	165,5	148,6	171,0	168,4
		172,5			166,6			160,3			171,8			169,7	
		167,3			166,0			159,7			161,7			169,7	
		165,2			161,0			160,9			163,6			163,4	
STf20%		106,0	103,4	91,2	99,3	100,5	91,1	101,8	101,8	85,7	99,1	101,0	96,6	104,0	107,9
		105,3			101,5			103,3			101,1			107,5	
		103,2			100,0			97,4			98,7			107,5	
		99,1			101,1			104,9			105,3			112,5	
STf40%		122,9	120,1	98,6	109,7	111,0	98,6	125,9	124,7	93,4	121,3	122,7	101,6	116,1	115,1
		120,3			112,2			120,3			120,2			115,2	
		121,4			109,7			129,2			129,1			115,7	
		115,7			112,2			123,3			120,2			113,5	
STf60%		114,9	125,0	142,3	126,5	126,5 ²	143,6	150,7	146,8	133,3	133,3	133,3 ²	105,0	112,7	113,6
		128,7			126,5			145,0			133,3			115,1	
		129,5			126,5			147,0			133,3			114,1	
		127,0			126,5			144,5			133,3			112,3	
STf80% ¹		132,2	134,8	118,7	127,8	129,2	123,2	185,6	176,2	116,4	172,1	172,7	110,5	139,2	137,5
		135,6			130,6			169,7			136,9				
		135,9			127,8			175,7			137,5				
		135,5			130,6			173,9			136,3				
STg20%		127,6	123,8	101,7	110,7	109,5	104,3	123,1	117,5	96,1	124,5	117,8	94,4	116,4	116,9
		114,6			110,3			115,5			115,1			117,4	
		123,2			108,3			115,9			115,1			115,5	
		129,7			108,7			115,5			116,5			118,4	
STg40%		131,6	132,4	116,0	131,6	129,2	115,0	121,2	119,5	109,9	122,0	121,2	102,7	128,8	128,1
		124,7			126,2			119,4			122,0			128,8	
		139,1			128,6			118,1			114,1			126,1	
		134,0			130,6			119,4			126,6			128,8	
STg60%		145,3	146,7	120,8	142,5	143,0	119,6	113,0	114,4 ²	114,1	109,9	112,7 ²	111,5	144,7	142,9
		143,6			147,2			117,1			114,4			147,3	
		148,5			140,8			113,4			114,0			142,2	
		149,2			141,4			113,9			112,7			137,5	

Tabelle A6: Physikalische Kennwerte der 36 Substrate, die mit Hilfe der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode) gewonnen wurden. Zu Anfang der Messung wurde die Variante VDLUFA des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder eingestellt. (**WC** = Wasserkapazität [Vol. %] ; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; dB_A = Am Anfang im Probenzylinder eingestelltes Volumengewicht [g / l]; dB_E = das zum Ende der Messung im Probenzylinder ermittelte Volumengewicht [g / l]; * = Wert enthält Messfehler; ¹ = dB_A Wert enthält Messfehler; ² = dB_E Wert enthält Messfehler; insbesondere bei **AC** können Rundungsfehler auftreten)

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB_A [g/l]	dB_E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
EP	VDLUFA	88,5	88,5	88,4	0,00	15,5	15,5	15,9	1,70	73,0	73,1	72,5	1,70	203,0	242,4	243,7	244,2	3,90
		88,6				15,5				73,1				240,3				
		88,2				14,3				73,9				249,3				
		88,4				18,3				70,1				245,2				
EPr	VDLUFA	86,3	86,6	86,6	0,5	4,2	6	6,5	2,5	82,1	80,5	80,1	2,0	211,2	287,5	280,6	281,3	10,5
		87,0				6,9				80,1				273,7				
		87,1				9,8				77,3				271,3				
		86,1				5,2				80,9				292,8				
ET	VDLUFA	87,4	87,4	87,5	0,3	15,4	15,7	16,1	1,9	72,0	71,7	71,5	1,7	229,3	274,7	275,3	273,2	5,5
		87,9				18,6				69,3				265,1				
		87,3				14,1				73,3				277,0				
		87,4				16,1				71,3				275,9				
CF	VDLUFA	92,5	92,5	92,6	0,1	21,7	22,8	23,2	1,6	70,8	69,7	69,4	1,5	113,4	127,2	127,2	126,2	2,7
		92,5				22,6				69,9				128,2				
		92,5				23,0				69,6				127,2				
		92,8				25,5				67,3				122,1				
PH	VDLUFA	90,4	90,3	90,3	0,1	8,9	5,8	6,4	1,8	81,5	84,5	84,0	1,7	136,5	164,2	166,2	165,9	1,3
		90,4				4,9				85,4				165,5				
		90,3				6,0				84,3				166,9				
		90,3				5,6				84,7				166,9				
FT	VDLUFA	88,7	89,3	89,3	0,5	20,0	26,0	27,4	7,6	68,7	63,5	61,9	7,3	168,5	228,6	216,8	216,8	9,6
		89,9				27,8				62,0				205,3				
		89,4				37,7				51,7				214,9				
		89,2				24,2				65,0				218,6				
RK	VDLUFA	88,3	88,3	88,3	0,0	35,0	33,4	33,7	0,9	53,3	54,9	54,6	0,9	229,8	232,3	233,1	232,9	0,4
		88,3				33,6				54,7				233,1				
		88,3				33,1				55,1				233,1				
		88,3				32,9				55,4				233,1				
ST	VDLUFA	91,1	90,8	90,7	0,5	18,8	20,0	20,7	7,4	72,2	71,0	70,0	7,2	133,4	173,8	179,0	181,3	8,9
		90,0				12,4				77,6				193,4				
		90,6				30,2				60,4				182,6				
		91,0				21,2				69,8				175,3				
SV	VDLUFA	91,6	91,1	91,2	0,3	17,2	16,2	16,3	1,5	74,4	75,1	74,9	1,5	151,8	172,2	182,3	181,0	6,5
		91,2				14,9				76,4				180,5				
		91,1				18,0				73,0				184,2				
		90,9				15,1				75,8				187,2				
SW1	VDLUFA	92,2	92,3	92,4	0,2	11,9	15,8	15,8	3,3	80,2	76,5	76,6	3,1	110,6	134,8	132,3	131,6	3,3
		92,6				19,6				73,0				126,9				
		92,3				14,5				77,9				132,6				
		92,3				17,1				75,2				132,1				
SW3	VDLUFA	92,0	92,1	92,0	0,3	11,4	13,2	13,6	4,3	80,6	78,9	78,4	4,0	106,6	136,0	134,6	135,7	5,1
		92,3				18,9				73,4				131,0				
		91,6				9,2				82,4				142,8				
		92,2				15,0				77,2				133,2				
T1	VDLUFA	92,2	92,2	92,2	0,1	24,2	25,4	25,3	0,8	68,0	66,8	66,9	0,8	123,9	131,5	132,7	132,5	0,7
		92,2				26,1				66,1				132,4				
		92,1				25,2				67,0				133,0				
		92,1				25,6				66,5				133,0				
T2	VDLUFA	93,1	93,3	93,3	0,3	24,8	29,5	29,2	4,4	68,3	63,8	64,1	4,1	96,1	117,2	113,7	113,4	4,6
		93,6				33,1				60,5				108,6				
		93,1				26,1				66,9				117,6				
		93,5				32,8				60,7				110,3				
granT5%	VDLUFA	91,5	91,5	91,5	0,1	42,9	42	42,1	0,6	48,6	49,6	49,5	0,6	139,7	160,7	160,1	160,1	1,1
		91,5				41,5				50,0				161,3				
		91,6				41,8				49,8				159,4				
		91,6				42,2				49,4				158,8				
granT10%	VDLUFA	90,9	90,2	90,4	0,4	52,5	49,6	49,7	2,2	38,4	40,6	40,6	1,9	170,1	194,5	209,9	206,7	8,4
		90,1				47,3				42,8				211,6				
		90,3				50,4				39,9				208,2				
		90,1				48,8				41,3				212,5				
granT20%	VDLUFA	85,4	85,4	85,4	0,0	44,6	44,2	44,1	0,7	40,8	41,2	41,4	0,7	323,0	324,0	324,0	324,0 ²	0,0
		85,4				43,9				41,6				324,0				
		85,4				43,2				42,2				324,0				
		85,4				44,7				40,8				324,0				
granT30%	VDLUFA	78,8	79,2	79,2	0,3	38,0	38,9	39,3	1,7	40,8	40,2	39,9	1,3	439,7	506,4	497,8	497,8	8,0
		79,5				41,4				38,2				489,3				
		79,0				37,8				41,1				502,5				
		79,4				39,8				39,6				493,0				

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB _A [g/l]	dB _E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
GT30%	VDLUFA	91,2	91,2	91,2	0,0	37,9	38,0	38,0	0,2	53,2	53,2	53,2	0,2	150,3	178,9	178,5	178,5	0,9
		91,2				38,1				53,1					178,2			
		91,1				37,7				53,4					179,6			
		91,2				38,2				53,0					177,5			
GT40%	VDLUFA	89,5	89,6	89,6	0,1	30,2	30,8	30,4	1,4	59,3	58,8	59,2	1,4	178,1	213,0	212,6	212,4	0,8
		89,6				31,1				58,3					211,3			
		89,6				28,4				61,2					212,2			
		89,5				31,6				58,0					213,0			
GT50%	VDLUFA	89,6	89,6	89,6	0,1	32,9	33,3	33,0	1,0	56,7	56,4	56,7	0,9	207,2	217,5	216,4	216,6	0,7
		89,7				33,6				56,0					216,0			
		89,6				31,6				58,0					216,8			
		89,7				33,7				56,0					216,0			
GT60%	VDLUFA	88,4	88,3	88,2	0,2	28,3	28,7	28,7	0,4	60,1	59,5	59,5	0,5	220,6	242,7	245,4	245,9	4,4
		88,1				28,4				59,7					248,2			
		88,4				29,1				59,4					241,8			
		88,0				29,1				58,9					251,1			
KF10%	VDLUFA	94,3	94,3	94,2	0,3	36,3	36,7	35,5	3,0	58,0	57,6	58,7	2,6	88,9	94,0	95,2	96,8	5,1
		94,2				37,3				56,9					96,4			
		94,4				37,2				57,3					92,7			
		93,7				31,1				62,6					104,0			
KF15%	VDLUFA	94,3	94,3	94,2	0,2	38,0	38,6	38,2	2,5	56,3	55,6	56,0	2,4	84,8	94,8	95,7	96,5	3,1
		93,9				34,8				59,2					100,9			
		94,4				40,7				53,6					93,7			
		94,2				39,2				55,0					96,6			
KF20%	VDLUFA	94,1	94,2	94,2	0,3	36,4	37,9	37,2	3,4	57,7	56,3	57,1	3,1	80,4	98,7	96,4	96,7	4,3
		94,5				40,1				54,3					92,2			
		93,9				32,7				61,2					101,7			
		94,4				39,4				55,0					94,1			
KF25%	VDLUFA	94,1	94,3	94,2	0,1	36,2	39,0	38,6	1,9	57,8	55,3	55,7	1,8	86,6 ¹	99,1	95,6	96,2	2,0
		94,2				40,2				54,1					96,1			
		94,3				37,9				56,4					94,7			
		94,3				40,0				54,3					95,0			
RH10%	VDLUFA	92,7	93,1	93,0	0,2	17,5	22,9	22,4	3,7	75,2	70,2	70,6	3,6	113,3	123,7	116,4	118,3	3,6
		93,1				24,1				69,0					116,4			
		93,1				21,8				71,3					116,4			
		93,1				26,2				66,9					116,4			
RH20%	VDLUFA	91,7	91,6	91,7	0,3	18,7	17,2	17,4	2,2	73,1	74,4	74,3	2,0	127,0	140,3	141,9	141,4	4,5
		91,5				15,3				76,2					143,5			
		92,0				19,8				72,2					135,7			
		91,4				15,7				75,7					146,2			
RH30%	VDLUFA	91,1	91,1	91,1	0,2	14,1	14,0	14,2	1,9	77,1	77,0	77,0	1,7	142,4	151,5	152,9	152,4	3,2
		91,0				14,0				77,0					154,3			
		90,9				11,9				79,0					155,4			
		91,3				16,6				74,8					148,3			
RH40%	VDLUFA	90,6	90,4	90,4	0,2	12,6	12,3	12,8	2,4	78,0	78,2	77,7	2,3	144,7	161,6	163,8	163,8	2,9
		90,3				11,9				78,3					166,6			
		90,3				10,4				79,9					166,0			
		90,6				16,1				74,5					161,0			
STf20%	VDLUFA	94,0	94,0	94,0	0,1	31,5	30,8	30,5	1,2	62,5	63,1	63,5	1,1	91,2	99,3	100,6	100,5	1,0
		93,9				28,8				65,1					101,5			
		94,0				30,6				63,4					100,0			
		93,9				31,0				62,9					101,1			
STf40%	VDLUFA	93,4	93,3	93,3	0,1	17,1	17,2	17,3	0,7	76,3	76,1	76,1	0,6	98,6	109,7	111,0	111,0	1,5
		93,3				16,6				76,7					112,2			
		93,4				18,2				75,2					109,7			
		93,3				17,3				76,0					112,2			
STf60%	VDLUFA	92,4	92,4	92,4	0,0	3,7	5,1	5,0	1,1	88,7	87,3	87,4	1,1	142,3 ¹	126,5	126,5	126,5 ²	0,0
		92,4				6,1				86,3					126,5			
		92,4				4,6				87,8					126,5			
		92,4				5,6				86,8					126,5			
STf80%	VDLUFA	92,3	92,3	92,3	0,1	7,8	8,4	8,6	1,0	84,6	83,8	83,7	0,9	118,7	127,8	129,2	129,2	1,6
		92,2				8,2				83,9					130,6			
		92,3				10,0				82,4					127,8			
		92,2				8,5				83,7					130,6			
STg20%	VDLUFA	93,3	93,4	93,4	0,1	29,2	31,1	31,1	1,6	64,1	62,3	62,4	1,5	101,7	110,7	109,5	109,5	1,2
		93,4				30,5				62,9					110,3			
		93,5				32,8				60,7					108,3			
		93,4				31,7				61,8					108,7			
STg40%	VDLUFA	92,1	92,2	92,2	0,1	12,0	16,0	15,4	2,6	80,1	76,3	76,9	2,5	116,0	131,6	129,6	129,2	2,3
		92,4				17,5				75,0					126,2			
		92,3				17,5				74,7					128,6			
		92,2				14,6				77,6					130,6			
STg60%	VDLUFA	91,5	91,5	91,5	0,2	7,3	7,8	7,7	1,3	84,2	83,8	83,8	1,1	120,8	142,5	141,9	143,0	2,9
		91,2				6,0				85,2					147,2			
		91,6				9,1				82,5					140,8			
		91,6				8,2				83,4					141,4			

Tabelle A7: Physikalische Kennwerte der 36 Substrate, die mit Hilfe der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode) gewonnen wurden. Zu Anfang der Messung wurde die Variante VDLUFA+5 des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder eingestellt. (**WC** = Wasserkapazität [Vol. %]; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; dB_A = Am Anfang im Probenzylinder eingestelltes Volumengewicht [g / l]; dB_E = das zum Ende der Messung im Probenzylinder ermittelte Volumengewicht [g / l]; * = Wert enthält Messfehler; ¹ = dB_A Wert enthält Messfehler; ² = dB_E Wert enthält Messfehler; insbesondere bei **AC** können Rundungsfehler auftreten)

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB_A		dB_E		
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[g/l]	[g/l]	Med	MW	s
EP	VDLUFA+5	87,7	87,7	87,7	0,1	14,9	14,9	14,2	2,0	72,8	72,8	73,5	2,0	219,9	260,4	259,8	259,8	1,3
		87,7				14,9				72,8				259,3				
		87,8				15,8				72,0				258,3				
		87,6				11,2				76,4				261,4				
EPr	VDLUFA+5	86,7	86,7	86,7	0,1	4,9	8,1	7,8	2,5	81,9	78,5	78,9	2,4	226,5	278,8	279,4	279,1	2,0
		86,6				6,8				79,8				281,1				
		86,7				9,4				77,3				279,9				
		86,8				10,3				76,6				276,5				
ET	VDLUFA+5	87,7	87,7	87,7	0,1	17,1	17,7	17,8	1,7	70,6	70,1	69,9	1,7	241,2	269,5	269,0	268,8	1,7
		87,7				19,9				67,8				268,5				
		87,6				16,0				71,7				270,6				
		87,8				18,2				69,6				266,5				
CF	VDLUFA+5	92,2	92,2	92,2	0,0	18,6	17,6	17,7	0,7	73,6	74,6	74,6	0,8	119,0	133,6	132,8	132,8	0,6
		92,2				17,5				74,7				132,6				
		92,3				16,8				75,5				132,1				
		92,2				17,7				74,5				133,1				
PH	VDLUFA+5	90,4	90,3	90,3	0,2	4,0	3,5	4,2	1,8	86,4	86,8	86,1	1,6	136,3	164,6	166,3	166,1	2,6
		90,2				3,1				87,1				168,0				
		90,2				2,9				87,2				168,7				
		90,5				6,8				83,7				163,3				
FT	VDLUFA+5	90,3	90,3	90,3	0,0	22,1	23,8	24,0	1,9	68,2	66,5	66,3	1,9	176,8	197,0	196,7	196,7	1,0
		90,2				24,6				65,7				197,8				
		90,3				23,0				67,3				196,3				
		90,3				26,5				63,8				195,6				
RK	VDLUFA+5	87,5	87,5	87,5	0,0	26,9	27,5	27,5	0,5	60,6	60,1	60,1	0,5	248,0	248,1	248,1	248,1 ²	0,0
		87,5				27,3				60,3				248,1				
		87,5				28,1				59,4				248,1				
		87,5				27,6				59,9				248,1				
ST	VDLUFA+5	90,2	90,2	90,2	0,1	16,4	15,8	15,5	1,6	73,9	74,4	74,7	1,5	161,9	189,6	190,0	190,0	1,0
		90,3				16,9				73,4				188,9				
		90,2				15,3				74,8				191,1				
		90,2				13,3				76,9				190,4				
SV	VDLUFA+5	90,6	90,6	90,6	0,0	10,9	11,3	11,2	1,4	79,7	79,2	79,4	1,4	154,1	193,6	194,0	194,0	1,1
		90,6				9,5				81,2				192,7				
		90,6				12,7				77,8				194,4				
		90,5				11,7				78,8				195,2				
SW1	VDLUFA+5	92,2	92,2	92,2	0,1	15,1	15,2	15,2	1,2	77,1	77	77,1	1,2	116,3	133,9	133,6	133,6	0,7
		92,3				13,6				78,7				132,8				
		92,3				16,6				75,7				133,4				
		92,2				15,3				76,9				134,4				
SW3	VDLUFA+5	92,3	92,3	92,3	0,0	10,6	10,5	11,0	1,8	81,7	81,9	81,4	1,8	110,8	130,7	130,9	130,9	0,7
		92,3				9,4				82,8				131,2				
		92,4				10,3				82,1				130,1				
		92,3				13,5				78,8				131,7				
T1	VDLUFA+5	91,9	91,9	91,9	0,0	12,6	12,4	12,6	0,8	79,3	79,5	79,3	0,8	125,6	136,6	137,0	137,1	0,5
		91,9				13,7				78,2				136,7				
		91,9				11,8				80,1				137,2				
		91,9				12,2				79,7				137,7				
T2	VDLUFA+5	93,1	93,1	93,1	0,0	21,9	23,3	23,4	1,3	71,2	69,8	69,8	1,3	98,7	116,9	116,7	116,7	0,6
		93,2				23,9				69,2				116,1				
		93,1				22,7				70,4				117,4				
		93,1				24,9				68,3				116,5				
granT5%	VDLUFA+5	91,0	91,0	91,0	0,0	35,0	34,8	35,0	1,2	56,0	56,3	56,0	1,1	155,8	170,2	169,9	169,9	0,8
		91,0				36,6				54,4				169,6				
		91,1				34,5				56,5				169,0				
		91,0				33,9				57,0				170,8				
granT10%	VDLUFA+5	90,8	90,8	90,8	0,0	47,3	46,8	46,7	0,7	43,4	44,0	44,1	0,7	180,8	198,0	198,0	198,0	1,2
		90,8				47,1				43,7				198,0				
		90,8				45,8				45,0				196,5				
		90,7				46,5				44,2				199,5				
granT20%	VDLUFA+5	83,1	83,2	83,2	0,1	44,7	45,3	45,4	1,9	38,4	37,8	37,9	1,9	327,2	375,5	373,4	373,0	2,4
		83,4				47,7				35,7				369,8				
		83,3				43,2				40,1				372,6				
		83,2				46,0				37,2				374,1				
granT30%	VDLUFA+5	80,5	80,5	80,5	0,0	22,3	21,7	21,9	1,0	58,2	58,8	58,6	1,0	465,7	466,0	466,0	466,0 ²	0,0
		80,5				23,1				57,4				466,0				
		80,5				21,2				59,3				466,0				
		80,5				21,0				59,5				466,0				

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB _A [g/l]	dB _E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
GT30%	VDLUFA+5	90,9	91,0	91,0	0,1	30,1	30,2	30,4	1,7	60,8	60,8	60,5	1,6	157,9	183,8	182,7	182,7	0,9
		91,0				28,7				62,2					182,4			
		90,9				30,2				60,7					183,1			
		91,0				32,7				58,3					181,7			
GT40%	VDLUFA+5	89,4	89,5	89,5	0,1	24,5	26,6	26,6	1,6	64,9	62,8	62,9	1,6	181,3	215,6	214,3	214,3	1,1
		89,5				26,6				62,9					214,7			
		89,5				26,7				62,8					213,8			
		89,5				28,5				61,1					213,0			
GT50%	VDLUFA+5	88,1	88,1	88,1	0,1	26,3	25,8	25,9	0,3	61,8	62,3	62,2	0,3	209,2	249,2	247,7	247,7	1,3
		88,1				25,7				62,4					248,2			
		88,2				25,8				62,3					247,2			
		88,2				25,8				62,4					246,2			
GT60%	VDLUFA+5	88,8	88,8	88,8	0,1	25,1	25,7	26,0	1,1	63,8	63,1	62,8	1,1	226,0	233,3	233,7	233,7	1,0
		88,8				26,1				62,7					234,1			
		88,8				25,2				63,5					234,9			
		88,9				27,5				61,3					232,5			
KF10%	VDLUFA+5	94,2	94,2	94,2	0,1	36,2	36,9	36,4	2,0	58,0	57,3	57,8	1,9	89,7	96,7	96,2	96,2	1,9
		94,2				38,1				56,2					95,7			
		94,1				33,7				60,4					98,5			
		94,3				37,7				56,7					94,0			
KF15%	VDLUFA+5	94,3	94,3	94,3	0,1	33,5	35,6	35,6	1,7	60,8	58,7	58,7	1,7	87,1	95,1	94,8	95,0	1,1
		94,3				37,6				56,7					94,4			
		94,3				35,8				58,5					94,1			
		94,2				35,4				58,8					96,6			
KF20%	VDLUFA+5	94,0	94,2	94,2	0,2	31,9	36,0	35,7	3,4	62,1	58,2	58,5	3,2	85,0	99,6	96,7	96,5	2,8
		94,4				39,1				55,3					93,1			
		94,1				34,0				60,1					97,8			
		94,3				37,9				56,3					95,6			
KF25%	VDLUFA+5	94,1	94,2	94,2	0,1	38,8	40,1	40,0	1,2	55,3	54,0	54,1	1,1	88,3 ¹	98,4	97,5	97,3	1,5
		94,2				41,0				53,3					96,9			
		94,1				39,2				54,8					98,8			
		94,3				41,1				53,1					95,5			
RH10%	VDLUFA+5	92,9	92,9	92,9	0,0	17,9	19,0	19,1	1,1	75,0	73,9	73,8	1,1	117,5	120,0	120,2	120,2	0,5
		92,9				18,9				73,9					120,4			
		92,9				20,6				72,3					119,6			
		92,8				19,0				73,8					120,8			
RH20%	VDLUFA+5	92,0	92,0	92,0	0,1	15,4	16,2	16,5	1,6	76,6	75,8	75,6	1,6	132,9	135,7	135,9	135,9	0,6
		92,0				16,9				75,1					136,1			
		92,0				15,0				77,1					135,2			
		91,9				18,5				73,5					136,6			
RH30%	VDLUFA+5	91,0	91,0	91,0	0,0	10,4	12,6	12,3	1,4	80,5	78,4	78,7	1,3	147,6	154,4	154,2	154,2	0,7
		90,9				12,1				78,9					155,0			
		91,0				13,1				77,9					153,4			
		91,0				13,4				77,6					153,9			
RH40%	VDLUFA+5	90,6	90,6	90,6	0,0	12,2	13,9	13,6	1,0	78,3	76,8	77,0	1,0	147,3	161,5	160,6	160,6	0,8
		90,6				14,3				76,4					160,3			
		90,7				13,4				77,2					159,7			
		90,6				14,4				76,2					160,9			
STf20%	VDLUFA+5	93,9	93,8	93,9	0,2	24,9	25,7	26,0	1,7	69,0	68,1	68,0	1,5	91,1	101,8	102,5	101,8	3,3
		93,8				26,5				67,3					103,3			
		94,1				28,1				66,1					97,4			
		93,7				24,3				69,4					104,9			
STf40%	VDLUFA+5	92,4	92,5	92,5	0,3	10,9	14,6	14,1	5,3	81,5	78,0	78,4	5,1	98,6	125,9	124,6	124,7	3,8
		92,8				18,3				74,5					120,3			
		92,2				8,3				84,0					129,2			
		92,6				18,8				73,7					123,3			
STf60%	VDLUFA+5	91,0	91,2	91,2	0,1	4,9	5,9	6,2	1,4	86,1	85,3	85,0	1,3	143,6 ¹	150,7	146,0	146,8	2,8
		91,3				8,2				83,1					145,0			
		91,2				6,0				85,1					147,0			
		91,3				5,8				85,5					144,5			
STf80%	VDLUFA+5	88,9	89,4	89,4	0,4	6,5	7,6	8,2	2,8	82,3	81,6	81,2	2,5	123,2	185,6	174,8	176,2	6,7
		89,8				11,9				77,9					169,7			
		89,5				5,7				83,8					175,7			
		89,6				8,7				80,9					173,9			
STg20%	VDLUFA+5	92,6	93,0	92,9	0,2	17,9	23,4	22,5	3,3	74,7	69,6	70,4	3,1	104,3	123,1	115,7	117,5	3,7
		93,0				24,3				68,7					115,5			
		93,0				22,4				70,6					115,9			
		93,0				25,5				67,6					115,5			
STg40%	VDLUFA+5	92,7	92,8	92,8	0,1	12,7	14,5	14,4	1,4	80,0	78,3	78,5	1,4	115,0	121,2	119,4	119,5	1,3
		92,8				13,6				79,2					119,4			
		92,9				15,7				77,2					118,1			
		92,8				15,4				77,4					119,4			
STg60%	VDLUFA+5	93,3	93,2	93,2	0,1	8,5	8,6	7,9	1,6	84,8	84,7	85,3	1,5	119,6	113,0	113,7	114,4 ²	1,9
		93,0				5,5				87,5					117,1			
		93,2				8,8				84,5					113,4			
		93,2				8,8				84,4					113,9			

Tabelle A8: Physikalische Kennwerte der 36 Substrate, die mit Hilfe der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode) gewonnen wurden. Zu Anfang der Messung wurde die Variante VDLUFA-5 des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder eingestellt. (**WC** = Wasserkapazität [Vol. %] ; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; dB_A = Am Anfang im Probenzylinder eingestelltes Volumengewicht [g / l]; dB_E = das zum Ende der Messung im Probenzylinder ermittelte Volumengewicht [g / l]; * = Wert enthält Messfehler; ¹ = dB_A Wert enthält Messfehler; ² = dB_E Wert enthält Messfehler; insbesondere bei **AC** können Rundungsfehler auftreten)

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB_A	dB_E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[g/l]	[g/l]	Med	MW	s
EP	VDLUFA-5	87,6	87,8	87,8	0,3	11,7	13,3	13,6	1,9	75,9	74,5	74,2	1,8	206,9	261,6	257,8	258,7	6,3
		88,0				16,1				71,8					254,0			
		88,0				12,9				75,2					253,0			
		87,4				13,6				73,8					266,1			
EPr	VDLUFA-5	85,9	86,3	86,3	0,3	2,8	3,6	3,9	1,4	83,2	82,7	82,4	1,1	210,1	295,3	288,5	288,9	5,9
		86,1				2,8				83,2					292,5			
		86,5				4,3				82,1					284,5			
		86,5				5,6				80,9					283,2			
ET	VDLUFA-5	86,9	87,7	87,5	0,5	8,3	16,8	15,4	4,9	78,6	70,9	72,2	4,5	215,2	286,9	269,4	272,8	9,7
		87,6				17,7				69,9					271,1			
		87,8				15,9				71,8					267,7			
		87,9				19,5				68,4					265,5			
CF	VDLUFA-5	92,5	92,4	92,4	0,3	19,5	18,7	18,6	2,8	73,0	73,5	73,8	2,9	112,3	127,8	129,0	130,5	5,2
		92,6				15,1				77,5					126,1			
		91,9				17,8				74,1					137,9			
		92,4				21,8				70,6					130,2			
PH	VDLUFA-5	90,6	90,3	90,4	0,1	6,6	6,5	6,3	0,7	84,0	84,1	84,0	0,7	133,4	161,8	165,9	165,1	2,3
		90,3				5,5				84,8					166,6			
		90,3				7,1				83,2					166,6			
		90,4				6,3				84,1					165,2			
FT	VDLUFA-5	89,6	89,7	89,7	0,1	21,6	22,1	21,8	1,0	68,0	67,6	67,9	1,0	183,5	209,7	209,4	209,0	1,1
		89,6				22,6				67,0					209,7			
		89,7				20,5				69,2					209,0			
		89,7				22,6				67,2					207,5			
RK	VDLUFA-5	87,4	87,3	87,3	0,0	27,4	27,8	27,6	1,0	60,0	59,5	59,7	1,0	247,3	250,9	253,0	252,6	1,2
		87,3				28,5				58,8					252,6			
		87,3				26,2				61,1					253,5			
		87,3				28,2				59,1					253,5			
ST	VDLUFA-5	91,0	91,0	91,0	0,3	17,4	19,5	19,5	1,7	73,6	71,4	71,6	1,5	147,9	174,7	174,3	173,9	5,1
		91,4				21,4				70,0					167,4			
		91,0				20,0				71,1					174,0			
		90,8				19,1				71,6					179,7			
SV	VDLUFA-5	91,6	90,9	91,1	0,4	19,1	14,4	15,1	3,2	72,5	76,6	76,0	2,8	159,5	171,9	186,5	183,9	8,3
		90,9				12,6				78,3					187,6			
		90,7				12,5				78,3					190,6			
		91,0				16,1				74,9					185,4			
SW1	VDLUFA-5	91,7	92,3	92,2	0,3	5,8	14,5	12,8	4,8	85,9	77,9	79,4	4,5	108,8	143,1	132,2	134,6	5,7
		92,4				15,6				76,8					130,9			
		92,3				13,3				79,0					132,5			
		92,3				16,4				75,9					131,9			
SW3	VDLUFA-5	92,2	92,4	92,4	0,1	9,5	13,3	12,8	2,6	82,7	79,1	79,6	2,5	109,1	132,9	129,2	129,7	2,2
		92,4				15,0				77,5					129,2			
		92,4				11,8				80,6					129,2			
		92,5				14,8				77,7					127,7			
T1	VDLUFA-5	91,8	91,8	91,9	0,2	11,0	11,1	10,7	3,3	80,7	80,8	81,2	3,1	115,8	139,2	138,4	137,9	3,0
		91,9				11,1				80,8					137,5			
		91,7				6,2				85,4					140,9			
		92,1				14,3				77,8					133,8			
T2	VDLUFA-5	93,0	93,0	93,1	0,1	19,4	24,2	23,9	3,4	73,6	68,8	69,2	3,3	100,6	119,6	118,3	117,8	2,0
		93,2				27,6				65,6					115,0			
		93,1				24,6				68,5					117,8			
		93,0				23,9				69,1					118,8			
granT5%	VDLUFA-5	90,9	91,2	91,1	0,3	34,0	35,0	35,0	2,1	57,0	56,2	56,2	1,8	143,9	171,1	166,9	167,4	6,0
		91,4				37,3				54,1					162,7			
		91,4				36,0				55,4					162,0			
		90,8				32,5				58,3					173,9			
granT10%	VDLUFA-5	90,9	90,9	90,9	0,1	47,5	47,3	47,1	0,5	43,4	43,5	43,8	0,5	165,0	195,0	195,4	196,2	2,5
		91,0				47,4				43,6					194,3			
		90,7				47,2				43,5					199,8			
		90,9				46,4				44,5					195,8			
granT20%	VDLUFA-5	82,6	83,7	83,4	0,6	41,8	46,8	45,8	2,7	40,8	36,9	37,7	2,2	311,0	387,2	362,9	368,6	12,5
		83,8				47,7				36,0					361,4			
		83,8				46,1				37,7					361,4			
		83,6				47,5				36,1					364,3			
granT30%	VDLUFA-5	82,2	82,2	82,1	0,1	26,0	26,0	26,5	1,0	56,3	56,2	55,7	1,1	424,3	424,6	426,8	427,1	2,5
		82,0				25,8				56,2					430,4			
		82,1				26,0				56,2					427,5			
		82,2				28,0				54,1					426,0			

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB _A [g/l]	dB _E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
GT30%	VDLUF _A -5	91,3	91,1	91,0	0,3	30,4	29,5	30,1	2,9	60,9	61,6	60,9	2,6	145,5	176,2	181,0	181,2	6,3
		90,8				28,5				62,3					185,9			
		91,3				34,1				57,2					175,5			
		90,7				27,5				63,2					187,5			
GT40%	VDLUF _A -5	89,3	89,4	89,3	0,3	25,8	25,2	25,4	1,2	63,5	64,0	63,9	1,0	172,3	217,1	216,6	217,7	5,9
		88,9				24,4				64,6					225,7			
		89,4				24,5				64,9					216,2			
		89,6				26,9				62,7					211,7			
GT50%	VDLUF _A -5	88,4	88,5	88,6	0,3	27,7	28,8	28,9	1,6	60,7	59,7	59,8	1,4	194,0	241,3	240,8	238,0	6,7
		88,4				29,9				58,5					242,3			
		88,5				27,3				61,2					240,3			
		89,1				30,5				58,6					227,9			
GT60%	VDLUF _A -5	88,8	88,8	88,8	0,1	23,5	24,9	24,8	1,1	65,3	64,0	64,0	1,1	218,8	233,1	233,9	233,1	3,0
		88,8				25,2				63,6					234,8			
		89,0				24,6				64,4					229,0			
		88,7				26,0				62,7					235,6			
KF10%	VDLUF _A -5	93,9	94,1	94,1	0,1	33,0	34,6	34,9	1,7	60,9	59,5	59,2	1,7	84,3	101,7	97,6	98,5	2,1
		94,1				37,2				56,9					97,8			
		94,1				34,6				59,5					97,3			
		94,1				34,6				59,5					97,3			
KF15%	VDLUF _A -5	94,1	94,1	94,1	0,1	29,4	31,7	31,5	1,6	64,7	62,3	62,6	1,6	79,9	99,0	97,8	98,5	2,9
		93,9				31,0				62,9					102,4			
		94,2				33,0				61,2					96,5			
		94,2				32,5				61,7					96,2			
KF20%	VDLUF _A -5	94,1	94,5	94,4	0,2	33,1	38,2	37,5	3,3	61,0	56,3	56,9	3,1	76,3	98,6	92,4	93,1	3,9
		94,6				40,7				53,9					89,3			
		94,4				36,9				57,5					92,5			
		94,5				39,4				55,1					92,2			
KF25%	VDLUF _A -5	94,3	94,3	94,3	0,2	40,4	40,0	39,6	2,2	53,9	54,3	54,7	2,0	80,8 ¹	95,3	95,3	95,0	2,8
		94,3				39,5				54,8					95,3			
		94,1				36,6				57,5					98,0			
		94,5				41,9				52,7					91,3			
RH10%	VDLUF _A -5	92,8	92,9	92,9	0,2	15,0	19,9	19,2	2,9	77,9	73,0	73,8	2,9	108,6	120,9	119,2	119,3	3,4
		93,1				20,3				72,8					115,7			
		92,7				19,5				73,2					123,3			
		93,0				21,8				71,3					117,4			
RH20%	VDLUF _A -5	91,8	92,1	92,1	0,2	14,0	16,6	16,4	1,7	77,8	75,5	75,7	1,6	120,6	138,4	134,0	134,6	2,6
		92,1				16,7				75,4					133,7			
		92,2				16,5				75,7					132,2			
		92,1				18,2				73,9					134,2			
RH30%	VDLUF _A -5	91,7	91,5	91,5	0,2	15,7	16,5	16,3	1,2	76,1	75,2	75,3	1,2	136,4	141,2	145,0	144,9	3,0
		91,3				14,9				76,4					148,4			
		91,5				17,3				74,2					145,8			
		91,6				17,2				74,3					144,2			
RH40%	VDLUF _A -5	90,4	90,4	90,3	0,3	8,3	9,5	9,4	2,0	82,1	80,9	80,9	1,8	138,7	164,9	164,2	165,5	4,4
		90,0				7,2				82,7					171,8			
		90,6				11,6				79,0					161,7			
		90,5				10,6				79,8					163,6			
STf20%	VDLUF _A -5	94,0	94,0	93,9	0,2	25,2	24,7	24,8	1,3	68,9	69,3	69,1	1,1	85,7	99,1	100,1	101,0	3,0
		93,9				24,2				69,7					101,1			
		94,1				26,4				67,6					98,7			
		93,7				23,5				70,2					105,3			
STf40%	VDLUF _A -5	92,7	92,7	92,6	0,3	16,9	16,7	16,4	1,7	75,9	76,0	76,3	1,5	93,4	121,3	120,7	122,7	4,3
		92,8				16,6				76,2					120,2			
		92,2				13,9				78,3					129,1			
		92,8				18,1				74,7					120,2			
STf60%	VDLUF _A -5	92,0	92,0	92,0	0,0	10,1	9,7	10,1	2,2	81,9	82,3	82,0	2,3	133,3	133,3	133,3	133,3 ²	0,0
		92,0				13,1				78,9					133,3			
		92,0				7,8				84,3					133,3			
		92,0				9,4				82,7					133,3			
STf80%	VDLUF _A -5	89,7	89,6	89,6	0,1	8,8	9,4	9,4	0,8	80,9	80,3	80,3	0,9	116,4	172,1	172,7	172,7	0,9
		(n = 2)				89,6				10,0					79,6			
STg20%	VDLUF _A -5	92,5	93,0	92,9	0,3	15,8	23,6	22,0	4,2	76,7	69,5	70,9	4,0	96,1	124,5	115,8	117,8	4,5
		93,1				24,2				68,9					115,1			
		93,1				23,0				70,0					115,1			
		93,0				25,0				68,0					116,5			
STg40%	VDLUF _A -5	92,7	92,7	92,7	0,3	12,2	12,9	14,0	2,8	80,5	79,7	78,8	2,6	109,9	122,0	122,0	121,2	5,2
		92,7				13,5				79,2					122,0			
		93,1				18,1				75,0					114,1			
		92,4				12,1				80,3					126,6			
STg60%	VDLUF _A -5	93,5	93,3	93,3	0,1	11,5	10,4	10,3	1,3	82,0	82,9	83,0	1,2	114,1	109,9	113,3	112,7 ²	2,0
		93,2				9,4				83,8					114,4			
		93,2				9,0				84,2					114,0			
		93,2				11,4				81,9					112,7			

Tabelle A9: Physikalische Kennwerte der 36 Substrate, die mit Hilfe der Schnellmethode SCHLICHTING (= Q-Methode) gewonnen wurden. Zu Anfang der Messung wurde die Variante Topffest des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder eingestellt. (**WC** = Wasserkapazität [Vol. %] ; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung; dB_A = Am Anfang im Probenzylinder eingestelltes Volumengewicht [g / l]; dB_E = das zum Ende der Messung im Probenzylinder ermittelte Volumengewicht [g / l]; * = Wert enthält Messfehler; ¹ = dB_A Wert enthält Messfehler; ² = dB_E Wert enthält Messfehler; insbesondere bei **AC** können Rundungsfehler auftreten)

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB_A [g/l]	dB_E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
EP	Topffest	88,0	88,0	88,0	0,0	14,4	13,1	13,2	0,9	73,6	74,9	74,8	0,9	253,4	253,7	253,7	253,7 ²	0,0
		88,0				13,2				74,8				253,7				
		88,0				12,3				75,7				253,7				
		88,0				13,0				75,0				253,7				
EPr	Topffest	87,7	87,7	87,7	0,0	16,6	16,3	16,1	0,5	71,2	71,4	71,6	0,5	257,5	257,9	257,9	257,9 ²	0,0
		87,7				16,2				71,6				257,9				
		87,7				16,4				71,3				257,9				
		87,7				15,4				72,4				257,9				
ET	Topffest	88,8	88,8	88,8	0,0	19,4	18,7	18,8	0,5	69,4	70,1	70,1	0,5	243,5	244,1	244,1	244,1 ²	0,0
		88,8				18,6				70,3				244,1				
		88,8				18,2				70,6				244,1				
		88,8				18,8				70,0				244,1				
CF	Topffest	93,0	93,0	93,0	0,0	21,9	21,2	21,1	1,1	71,2	71,8	71,9	1,1	118,8	118,9	118,9	118,9 ²	0,0
		93,0				22,2				70,8				118,9				
		93,0				20,5				72,5				118,9				
		93,0				19,9				73,1				118,9				
PH	Topffest	90,4	90,4	90,4	0,1	0,6	1,5	1,5	0,8	89,8	88,8	88,9	0,8	151,4	165,5	165,1	165,2	1,8
		90,4				1,9				88,5				164,8				
		90,5				2,5				88,0				163,0				
		90,3				1,1				89,1				167,3				
FT	Topffest	90,3	90,4	90,4	0,2	16,6	19,4	19,1	2,2	73,7	71,1	71,4	2,1	176,4	195,7	195,0	193,4	3,7
		90,7				21,0				69,7				188,0				
		90,4				17,9				72,5				194,3				
		90,3				20,9				69,5				195,7				
RK	Topffest	87,9	87,9	87,9	0,0	25,2	27,4	27,8	2,5	62,7	60,5	60,2	2,5	222,9	241,7	240,8	240,4	1,7
		87,9				31,0				56,9				239,9				
		88,0				26,7				61,4				238,2				
		87,9				28,2				59,7				241,7				
ST	Topffest	90,7	90,2	90,2	0,4	14,6	14,9	14,6	1,4	76,1	75,5	75,7	1,2	166,7	181,2	189,9	189,9	7,8
		90,4				15,9				74,6				185,9				
		89,8				12,6				77,1				198,5				
		90,0				15,2				74,8				193,9				
SV	Topffest	90,5	90,6	90,6	0,1	9,2	10,1	10,2	1,2	81,3	80,5	80,5	1,0	168,4	195,5	193,3	193,5	2,8
		90,7				11,3				79,4				191,0				
		90,5				9,1				81,4				196,3				
		90,7				11,0				79,7				191,0				
SW1	Topffest	92,5	92,4	92,5	0,2	16,4	16,8	17,0	2,1	76,1	75,6	75,5	2,0	120,9	129,7	130,9	130,1	2,7
		92,7				19,8				72,9				126,5				
		92,3				14,7				77,6				132,1				
		92,3				17,1				75,2				132,1				
SW3	Topffest	92,4	92,4	92,4	0,0	14,2	12,6	12,7	1,5	78,2	79,7	79,7	1,4	118,8	129,2	129,2	129,8	1,2
		92,4				13,8				78,7				129,2				
		92,4				11,4				81,0				129,2				
		92,3				11,5				80,8				131,7				
T1	Topffest	91,6	91,5	91,5	0,1	6,6	9,4	8,9	1,6	85,0	82,0	82,5	1,7	133,4	142,6	144,4	144,4	1,6
		91,5				9,8				81,7				143,6				
		91,4				10,3				81,2				145,2				
		91,4				9,1				82,3				146,3				
T2	Topffest	92,6	92,7	92,7	0,1	16,7	19,5	19,0	1,6	75,9	73,2	73,7	1,6	110,0	126,0	124,1	124,1	1,7
		92,8				19,3				73,5				122,2				
		92,8				19,8				73,0				123,1				
		92,6				20,4				72,3				125,0				
granT5%	Topffest	91,4	91,4	91,4	0,2	18,5	18,9	19,9	2,6	72,9	72,5	71,6	2,4	145,4	163,3	162,6	162,2	3,4
		91,7				23,6				68,0				157,6				
		91,4				19,4				72,0				162,0				
		91,2				18,0				73,3				165,9				
granT10%	Topffest	89,3	90,1	89,9	0,5	31,6	35,1	34,8	2,4	57,8	54,9	55,2	2,0	198,2	229,0	213,6	215,9	9,9
		90,3				37,2				53,1				207,4				
		89,8				35,0				55,3				208,9				
		89,8				35,3				54,6				218,2				
granT20%	Topffest	85,4	85,9	85,9	0,4	31,4	35,5	34,8	2,4	54,0	50,4	51,1	2,0	299,5	324,5	313,1	313,8	8,4
		86,3				36,8				49,6				304,5				
		85,8				35,0				50,8				315,3				
		86,0				36,1				49,9				310,9				
granT30%	Topffest	78,6	79,4	79,4	0,8	33,2	35,5	35,5	2,2	45,4	43,9	43,9	1,4	417,2	512,4	492,5	493,5	19,4
		78,7				33,9				44,8				508,2				
		80,1				37,6				42,4				476,8				
		80,1				37,1				42,9				476,8				

Substrat	Variante	PV				AC				WC				dB _A [g/l]	dB _E			
		[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s		[g/l]	Med	MW	s
GT30%	Topfest	90,0	90,2	90,2	0,2	31,1	33,2	33,0	1,4	59,0	57,1	57,3	1,4	164,6	201,4	197,9	197,5	3,7
		90,3				34,4				55,8					196,7			
		90,5				32,8				57,6					192,9			
		90,2				33,5				56,6					199,0			
GT40%	Topfest	89,5	89,4	89,4	0,3	29,0	28,8	29,1	1,7	60,5	60,6	60,4	1,4	177,3	214,7	216,5	215,0	5,1
		89,8				31,3				58,5					207,9			
		89,3				27,3				62,0					218,3			
		89,2				28,6				60,7					219,2			
GT50%	Topfest	89,8	89,3	89,4	0,3	31,8	30,8	30,8	1,6	58,0	58,7	58,6	1,3	207,0	213,5	223,3	221,5	6,0
		89,4				32,4				57,1					220,4			
		89,2				29,1				60,0					226,1			
		89,2				29,8				59,4					226,1			
GT60%	Topfest	88,5	88,4	88,3	0,2	28,2	28,5	27,8	1,8	60,3	60,0	60,5	1,5	216,5	240,9	241,4	243,7	5,1
		88,0				25,2				62,7					251,3			
		88,5				29,1				59,4					240,9			
		88,4				28,8				59,6					241,8			
KF10%	Topfest	94,3	94,0	93,9	0,4	35,9	35,1	34,9	1,3	58,4	58,9	59,1	0,9	88,1	94,2	100,3	101,1	7,0
		93,4				33,3				60,1					109,6			
		94,2				35,9				58,3					96,7			
		93,7				34,3				59,4					103,9			
KF15%	Topfest	94,0	93,9	93,9	0,2	32,5	31,8	31,7	1,1	61,5	62,2	62,3	0,9	90,0 ¹	99,7	100,8	101,4	2,8
		93,9				31,1				62,8					102,0			
		93,7				30,4				63,3					105,1			
		94,1				32,6				61,5					99,0			
KF20%	Topfest	94,2	94,2	94,2	0,1	38,3	39,2	38,6	2,5	55,9	55,1	55,7	2,4	86,1	97,4	96,3	96,3	1,1
		94,3				40,0				54,3					95,2			
		94,2				35,2				59,0					97,0			
		94,3				40,7				53,6					95,6			
KF25%	Topfest	92,4	92,8	92,7	0,2	35,1	36,9	37,4	2,4	57,4	55,9	55,3	2,2	85,0	126,6	120,6	121,5	3,8
		92,9				40,8				52,2					118,1			
		92,9				37,4				55,5					119,0			
		92,7				36,4				56,2					122,2			
RH10%	Topfest	92,4	92,7	92,7	0,2	12,1	16,1	16,2	3,3	80,3	76,6	76,5	3,2	113,1	126,8	121,8	122,0	4,1
		92,5				16,2				76,3					124,0			
		92,8				16,0				76,8					119,6			
		92,9				20,3				72,6					117,9			
RH20%	Topfest	91,9	91,9	91,9	0,3	14,9	15,5	16,7	2,8	77,0	76,3	75,3	2,5	121,2	134,5	134,8	134,2	4,0
		91,7				14,9				76,8					138,4			
		92,3				20,7				71,6					128,8			
		91,9				16,1				75,8					135,1			
RH30%	Topfest	91,1	91,0	91,1	0,1	14,6	13,4	13,6	1,7	76,5	77,6	77,6	1,6	127,9	148,8	149,4	149,0	1,8
		91,2				15,4				75,8					146,5			
		91,0				12,3				78,7					150,0			
		91,0				12,1				78,9					150,6			
RH40%	Topfest	89,7	89,8	89,9	0,2	7,9	9,4	9,3	1,5	81,8	80,6	80,6	1,3	148,6	171,0	169,7	168,4	3,4
		89,8				8,2				81,6					169,7			
		89,8				10,6				79,2					169,7			
		90,2				10,6				79,6					163,4			
STr20%	Topfest	93,7	93,5	93,5	0,2	28,3	24,2	24,9	2,5	65,4	69,3	68,6	2,4	96,6	104,0	107,5	107,9	3,5
		93,5				25,3				68,2					107,5			
		93,5				23,1				70,4					107,5			
		93,2				22,8				70,4					112,5			
STr40%	Topfest	93,0	93,1	93,1	0,1	12,7	14,6	14,6	1,6	80,3	78,5	78,5	1,5	101,6	116,1	115,4	115,1	1,2
		93,1				14,8				78,3					115,2			
		93,0				14,4				78,6					115,7			
		93,2				16,5				76,7					113,5			
STr60%	Topfest	93,2	93,2	93,2	0,1	8,6	8,0	8,0	0,7	84,6	85,1	85,2	0,7	105,0	112,7	113,4	113,6	1,3
		93,1				7,5				85,6					115,1			
		93,1				7,2				86,0					114,1			
		93,3				8,6				84,6					112,3			
STr80%	Topfest	91,7	91,8	91,8	0,0	1,5	4,4	3,9	1,6	90,1	87,3	87,9	1,5	110,5	139,2	137,2	137,5	1,3
		91,8				4,7				87,1					136,9			
		91,8				4,1				87,6					137,5			
		91,8				5,2				86,7					136,3			
STg20%	Topfest	93,0	93,0	93,0	0,1	21,6	23,4	23,3	1,3	71,4	69,5	69,7	1,3	94,4	116,4	116,9	116,9	1,3
		92,9				23,8				69,1					117,4			
		93,0				24,6				68,5					115,5			
		92,9				23,1				69,8					118,4			
STg40%	Topfest	92,3	92,3	92,3	0,0	12,0	13,9	13,8	1,5	80,3	78,3	78,6	1,5	102,7	128,8	128,8	128,1	1,3
		92,3				13,0				79,3					128,8			
		92,4				15,2				77,3					126,1			
		92,3				14,9				77,4					128,8			
STg60%	Topfest	91,4	91,5	91,5	0,2	7,4	8,7	9,4	2,7	84,0	82,8	82,1	2,4	111,5	144,7	143,5	142,9	4,2
		91,2				7,2				84,0					147,3			
		91,5				9,9				81,6					142,2			
		91,8				12,9				78,9					137,5			

Tabelle A10: Gegenüberstellung der Substratanteile [Gew. %] in den Fraktionen nach Siebung mit dem Siebsatz der Gütesicherung (= RHP Siebsatz) (auf Basis des Mittelwerts).

(**schranktrocken** = Siebung nach 48 h Trocknung bei 25°C im Umlufttrockenschrank (500 g Substrat in Pikierschale, 6 mal umrühren); **lieferfeucht** = Siebung ohne Vorbehandlung direkt aus dem Substratsack; **lufttrocken** = Siebung nach Trocknung an der Gewächshausluft (1000 ml für 48 h in 4-5 cm starker Schicht); **STAB** = Standardabweichung ausgehend von der Stichprobe). Die 23 Mischsubstrate nur schranktrocken

Substrat	Fraktion [mm]	Schrank-trocken		Liefer-feucht		Luft-trocken	
		Mittelwert [Gew. %]	STAB	Mittelwert [Gew. %]	STAB	Mittelwert [Gew. %]	STAB
EP	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0
	8,0 - 16,0	7,1	4,3	4,8	1,7	5,3	2,8
	4,0 - 8,0	12,0	2,0	20,1	3,5	17,5	0,5
	2,0 - 4,0	21,5	0,1	21,7	1,0	23,3	1,8
	1,0 - 2,0	19,1	1,2	17,3	1,2	19,2	1,4
	0,0 - 1,0	40,4	2,6	35,4	3,1	35,4	1,4
EPr	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,3	0,2	0,2	0,9	1,8
	8,0 - 16,0	5,1	3,5	3,9	3,0	2,7	2,4
	4,0 - 8,0	6,8	2,8	8,6	0,3	6,6	3,1
	2,0 - 4,0	11,0	1,4	15,2	0,8	14,4	1,8
	1,0 - 2,0	15,5	1,7	20,9	2,4	17,5	1,6
	0,0 - 1,0	61,4	5,8	52,1	1,6	58,5	8,5
ET	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,2
	8,0 - 16,0	6,6	3,2	6,4	3,5	3,9	2,8
	4,0 - 8,0	15,7	3,7	18,5	3,8	17,5	4,7
	2,0 - 4,0	24,0	4,3	23,0	1,3	25,0	1,6
	1,0 - 2,0	19,3	1,4	17,3	1,5	19,1	0,8
	0,0 - 1,0	34,6	6,3	33,9	4,6	35,0	3,0
CF	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	9,7	5,2	3,4	1,7	11,7	5,0
	8,0 - 16,0	8,3	3,0	7,6	3,0	10,7	2,2
	4,0 - 8,0	11,4	1,6	11,8	1,2	12,4	1,1
	2,0 - 4,0	9,6	0,5	11,5	0,4	9,5	1,1
	1,0 - 2,0	9,9	0,7	16,0	1,1	9,6	0,8
	0,0 - 1,0	50,5	4,7	48,4	3,3	46,4	1,3
PH	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	8,0 - 16,0	0,1	0,2	0,8	0,9	1,7	1,2
	4,0 - 8,0	7,3	1,8	3,9	0,6	6,5	1,8
	2,0 - 4,0	10,2	0,9	10,8	0,6	10,7	1,0
	1,0 - 2,0	12,7	0,6	51,7	6,8	13,0	1,1
	0,0 - 1,0	69,3	2,7	31,2	7,1	68,6	3,1
FT	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	1,6	2,0	3,1	1,7	1,1	1,6
	8,0 - 16,0	12,9	4,2	11,5	7,0	15,2	8,2
	4,0 - 8,0	16,1	2,3	16,9	1,8	18,8	3,6
	2,0 - 4,0	17,8	3,4	16,8	0,9	17,9	2,6
	1,0 - 2,0	14,5	1,7	15,1	1,7	14,3	1,9
	0,0 - 1,0	38,1	6,5	35,0	3,1	33,4	3,7

Substrat	Fraktion [mm]	Schrank- trocken		Liefer- feucht		Luft- trocken	
		Mittelwert [Gew. %]	STAB	Mittelwert [Gew. %]	STAB	Mittelwert [Gew. %]	STAB
RK	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,5	1,0	3,4	5,0	1,8	1,7
	8,0 - 16,0	20,9	7,6	14,4	6,7	17,8	8,4
	4,0 - 8,0	17,2	2,6	15,8	2,7	17,4	4,1
	2,0 - 4,0	19,2	2,6	19,0	2,6	19,4	1,0
	1,0 - 2,0	16,0	1,0	16,4	2,0	17,7	1,0
	0,0 - 1,0	27,4	5,2	29,8	3,5	27,8	6,3
ST	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	2,2	0,3	4,8	6,6	4,7	4,3
	8,0 - 16,0	7,3	1,5	8,3	0,8	6,1	2,1
	4,0 - 8,0	7,1	1,4	8,5	1,3	8,8	1,7
	2,0 - 4,0	11,3	0,9	11,1	2,2	13,3	1,5
	1,0 - 2,0	14,6	0,3	22,2	2,0	14,9	1,5
	0,0 - 1,0	57,2	3,0	41,5	3,9	53,4	3,2
SV	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	8,0 - 16,0	0,1	0,2	0,4	0,8	0,8	1,3
	4,0 - 8,0	6,8	1,2	8,2	1,7	6,2	1,4
	2,0 - 4,0	17,5	0,8	17,6	0,6	17,4	1,7
	1,0 - 2,0	19,7	0,8	18,2	0,7	18,7	0,5
	0,0 - 1,0	55,9	1,9	52,2	1,6	58,0	2,3
SW1	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,3	0,7	2,3	2,9	0,8	1,1
	8,0 - 16,0	4,9	1,7	6,1	3,6	7,3	2,2
	4,0 - 8,0	9,1	2,5	9,2	1,5	9,5	2,0
	2,0 - 4,0	10,2	1,8	11,0	0,8	11,3	2,1
	1,0 - 2,0	11,9	1,2	14,5	1,7	13,4	1,6
	0,0 - 1,0	60,6	8,1	53,4	2,3	58,9	6,7
SW3	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	8,0 - 16,0	0,7	0,7	0,8	0,4	1,2	0,4
	4,0 - 8,0	6,3	1,4	6,4	0,9	6,7	1,5
	2,0 - 4,0	11,2	1,7	11,6	0,4	10,7	1,2
	1,0 - 2,0	13,4	1,6	17,8	3,8	14,1	2,3
	0,0 - 1,0	68,6	5,2	60,1	4,0	69,3	2,8
T1	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	8,0 - 16,0	1,5	0,5	0,6	0,7	0,0	0,3
	4,0 - 8,0	10,8	1,0	8,5	0,6	6,0	0,5
	2,0 - 4,0	19,0	1,8	15,5	0,6	15,7	1,2
	1,0 - 2,0	17,0	0,9	14,8	0,6	15,7	0,6
	0,0 - 1,0	52,1	2,9	57,1	1,2	63,2	2,4
T2	> 31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	1,0	2,0	3,0	0,7	0,9	1,8
	8,0 - 16,0	14,4	5,1	12,2	3,6	12,0	1,1
	4,0 - 8,0	15,3	1,7	13,6	1,4	15,2	1,8
	2,0 - 4,0	14,5	1,4	13,3	0,7	14,4	1,0
	1,0 - 2,0	12,6	0,6	11,9	0,4	13,3	0,3
	0,0 - 1,0	42,6	4,3	42,8	1,5	45,5	2,7

Substrat	Fraktion [mm]	Schranktrocken		Substrat	Fraktion [mm]	Schranktrocken	
		Mittelwert [Gew. %]	STAB			Mittelwert [Gew. %]	STAB
granT5%	> 31,5	0,2	0,3	KF10%	> 31,5	0,0	0,1
	16,0 - 31,5	1,3	1,9		16,0 - 31,5	10,4	7,0
	8,0 - 16,0	7,0	1,8		8,0 - 16,0	12,0	1,3
	4,0 - 8,0	12,9	1,7		4,0 - 8,0	10,9	3,6
	2,0 - 4,0	15,4	0,8		2,0 - 4,0	8,7	1,4
	1,0 - 2,0	14,9	0,4		1,0 - 2,0	9,0	0,5
	0,0 - 1,0	48,7	3,0		0,0 - 1,0	47,5	8,8
granT10%	> 31,5	0,0	0,1	KF15%	> 31,5	0,1	0,0
	16,0 - 31,5	2,3	1,2		16,0 - 31,5	6,0	7,9
	8,0 - 16,0	9,1	4,9		8,0 - 16,0	17,0	5,9
	4,0 - 8,0	12,0	3,6		4,0 - 8,0	10,5	2,5
	2,0 - 4,0	16,2	1,2		2,0 - 4,0	9,0	1,4
	1,0 - 2,0	14,6	0,9		1,0 - 2,0	9,3	1,4
	0,0 - 1,0	45,8	4,8		0,0 - 1,0	47,1	4,8
granT20%	> 31,5	0,0	0,1	KF20%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	6,9	5,8		16,0 - 31,5	5,0	3,3
	8,0 - 16,0	9,1	3,5		8,0 - 16,0	11,1	4,9
	4,0 - 8,0	13,9	2,9		4,0 - 8,0	10,7	2,0
	2,0 - 4,0	15,8	1,2		2,0 - 4,0	9,6	0,3
	1,0 - 2,0	15,0	0,6		1,0 - 2,0	10,7	0,8
	0,0 - 1,0	39,3	2,1		0,0 - 1,0	51,1	4,9
granT30%	> 31,5	0,0	0,1	KF25%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	4,3	3,5		16,0 - 31,5	4,7	2,5
	8,0 - 16,0	5,6	3,2		8,0 - 16,0	14,4	6,4
	4,0 - 8,0	12,7	2,1		4,0 - 8,0	10,0	2,3
	2,0 - 4,0	16,1	0,5		2,0 - 4,0	9,0	0,5
	1,0 - 2,0	15,4	0,5		1,0 - 2,0	10,0	0,6
	0,0 - 1,0	46,5	5,4		0,0 - 1,0	51,2	10,8
GT30%	> 31,5	0,0	0,0	RH10%	> 31,5	4,4	8,8
	16,0 - 31,5	2,6	2,8		16,0 - 31,5	0,1	0,1
	8,0 - 16,0	9,2	5,9		8,0 - 16,0	8,1	2,4
	4,0 - 8,0	16,5	3,3		4,0 - 8,0	11,1	2,1
	2,0 - 4,0	20,5	1,3		2,0 - 4,0	11,9	0,7
	1,0 - 2,0	17,7	1,7		1,0 - 2,0	12,2	1,7
	0,0 - 1,0	33,2	5,2		0,0 - 1,0	52,4	12,2
GT40%	> 31,5	0,0	0,0	RH20%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	2,9	2,9		16,0 - 31,5	9,8	7,6
	8,0 - 16,0	7,9	2,4		8,0 - 16,0	8,9	2,5
	4,0 - 8,0	15,2	1,8		4,0 - 8,0	11,0	3,0
	2,0 - 4,0	20,3	2,2		2,0 - 4,0	10,8	1,0
	1,0 - 2,0	18,5	0,9		1,0 - 2,0	11,7	0,9
	0,0 - 1,0	33,6	4,3		0,0 - 1,0	47,6	9,0
GT50%	> 31,5	0,1	0,1	RH30%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	0,9	0,6		16,0 - 31,5	4,3	5,4
	8,0 - 16,0	10,5	3,0		8,0 - 16,0	5,7	1,5
	4,0 - 8,0	12,9	3,8		4,0 - 8,0	8,5	3,0
	2,0 - 4,0	19,5	2,2		2,0 - 4,0	9,9	1,5
	1,0 - 2,0	18,7	1,8		1,0 - 2,0	12,5	0,9
	0,0 - 1,0	37,3	4,3		0,0 - 1,0	58,4	11,0
GT60%	> 31,5	0,0	0,0	RH40%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	5,9	10,9		16,0 - 31,5	0,6	0,7
	8,0 - 16,0	3,3	2,0		8,0 - 16,0	5,1	1,3
	4,0 - 8,0	15,5	3,4		4,0 - 8,0	8,8	1,9
	2,0 - 4,0	19,1	2,3		2,0 - 4,0	11,9	2,0
	1,0 - 2,0	18,7	2,8		1,0 - 2,0	14,5	1,6
	0,0 - 1,0	37,6	6,9		0,0 - 1,0	58,9	3,8

Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken		Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken	
		Mittelwert [Gew.%]	STAB			Mittelwert [Gew.%]	STAB
STf20%	> 31,5	2,5	4,9	STg20%	> 31,5	0,0	0,0
	16,0 - 31,5	6,9	3,0		16,0 - 31,5	14,1	7,3
	8,0 - 16,0	11,0	3,4		8,0 - 16,0	13,5	2,8
	4,0 - 8,0	9,9	2,7		4,0 - 8,0	8,3	1,2
	2,0 - 4,0	9,9	1,2		2,0 - 4,0	8,3	1,2
	1,0 - 2,0	9,7	0,8		1,0 - 2,0	8,6	0,9
	0,0 - 1,0	49,8	2,6		0,0 - 1,0	45,1	4,7
STf40%	> 31,5	0,0	0,1	STg40%	> 31,5	0,1	0,0
	16,0 - 31,5	8,2	5,5		16,0 - 31,5	1,0	1,0
	8,0 - 16,0	10,5	0,8		8,0 - 16,0	7,9	3,0
	4,0 - 8,0	9,9	0,9		4,0 - 8,0	8,5	1,1
	2,0 - 4,0	9,1	0,9		2,0 - 4,0	9,0	0,9
	1,0 - 2,0	8,9	0,5		1,0 - 2,0	9,9	0,8
	0,0 - 1,0	51,7	7,9		0,0 - 1,0	62,9	5,1
STf60%	> 31,5	0,1	0,0	STg60%	> 31,5	0,0	0,1
	16,0 - 31,5	2,4	2,0		16,0 - 31,5	5,5	4,5
	8,0 - 16,0	7,8	1,5		8,0 - 16,0	8,5	2,9
	4,0 - 8,0	7,6	0,8		4,0 - 8,0	8,1	1,4
	2,0 - 4,0	8,9	1,1		2,0 - 4,0	9,3	1,0
	1,0 - 2,0	9,9	0,5		1,0 - 2,0	10,1	0,5
	0,0 - 1,0	61,8	5,1		0,0 - 1,0	57,1	1,2
STf80%	> 31,5	0,0	0,0				
	16,0 - 31,5	1,7	1,1				
	8,0 - 16,0	5,7	2,5				
	4,0 - 8,0	6,2	1,8				
	2,0 - 4,0	7,2	0,9				
	1,0 - 2,0	9,7	0,3				
	0,0 - 1,0	68,0	3,3				

Tabelle A11: Gegenüberstellung der Substratanteile [Gew. %] in den Fraktionen nach Siebung mit dem Siebsatz nach DIN 11540 (auf Basis des Mittelwerts).

(**schranktrocken** = Siebung nach 48 h Trocknung bei 25°C im Umlufttrockenschrank (500 g Substrat in Pikierschale, 6 mal umrühren); **STAB** = Standardabweichung ausgehend von der Stichprobe)

Substrat	Fraktion [mm]	Schrank-trocken		Substrat	Fraktion [mm]	Schrank-trocken	
		MW [Gew. %]	STAB			MW [Gew. %]	STAB
EP	>16	0,0	0,0	RK	>16	0,7	1,2
	10,0 - 16,0	0,0	0,2		10,0 - 16,0	4,2	5,1
	5,0 - 10,0	10,6	5,7		5,0 - 10,0	14,2	3,4
	2,0 - 5,0	30,9	5,0		2,0 - 5,0	29,0	2,1
	1,0 - 2,0	19,9	1,1		1,0 - 2,0	21,2	1,6
	0,5 - 1,0	14,8	0,5		0,5 - 1,0	14,3	1,6
	0,2 - 0,5	14,3	0,0		0,2 - 0,5	10,8	1,6
	< 0,0 - 0,2	8,7	0,7		< 0,0 - 0,2	5,4	0,5
EPr	>16	0,6	0,4	ST	>16	0,8	1,4
	10,0 - 16,0	2,0	1,8		10,0 - 16,0	5,7	2,7
	5,0 - 10,0	8,4	4,0		5,0 - 10,0	8,1	2,8
	2,0 - 5,0	21,1	1,0		2,0 - 5,0	18,3	2,3
	1,0 - 2,0	18,9	1,0		1,0 - 2,0	14,4	0,5
	0,5 - 1,0	17,6	0,8		0,5 - 1,0	17,4	0,5
	0,2 - 0,5	18,4	2,6		0,2 - 0,5	21,7	0,3
	< 0,0 - 0,2	14,1	2,0		< 0,0 - 0,2	9,3	0,9
ET	>16	0,2	0,2	SV	>16	0,0	0,0
	10,0 - 16,0	4,4	2,8		10,0 - 16,0	0,0	0,0
	5,0 - 10,0	11,0	2,1		5,0 - 10,0	3,4	1,4
	2,0 - 5,0	31,2	0,2		2,0 - 5,0	23,2	0,8
	1,0 - 2,0	18,4	1,0		1,0 - 2,0	19,2	0,2
	0,5 - 1,0	14,1	0,7		0,5 - 1,0	22,4	0,5
	0,2 - 0,5	15,3	1,2		0,2 - 0,5	24,2	0,2
	< 0,0 - 0,2	6,1	0,7		< 0,0 - 0,2	6,3	0,0
CF	>16	3,1	5,4	SW1	>16	0,9	1,3
	10,0 - 16,0	3,4	1,5		10,0 - 16,0	4,6	0,7
	5,0 - 10,0	11,4	2,0		5,0 - 10,0	9,2	2,2
	2,0 - 5,0	14,0	2,9		2,0 - 5,0	13,9	1,8
	1,0 - 2,0	11,6	1,1		1,0 - 2,0	12,6	0,5
	0,5 - 1,0	16,9	1,1		0,5 - 1,0	17,0	0,3
	0,2 - 0,5	30,6	3,5		0,2 - 0,5	23,4	0,5
	< 0,0 - 0,2	8,2	3,2		< 0,0 - 0,2	17,2	1,1
PH	>16	0,0	0,0	SW3	>16	0,2	0,2
	10,0 - 16,0	0,2	0,2		10,0 - 16,0	0,0	0,0
	5,0 - 10,0	3,6	1,4		5,0 - 10,0	4,2	0,8
	2,0 - 5,0	11,1	1,1		2,0 - 5,0	14,7	0,9
	1,0 - 2,0	13,9	0,7		1,0 - 2,0	13,1	2,7
	0,5 - 1,0	23,0	0,6		0,5 - 1,0	20,7	0,7
	0,2 - 0,5	34,1	1,1		0,2 - 0,5	39,7	1,2
	< 0,0 - 0,2	13,0	0,9		< 0,0 - 0,2	5,2	1,4
FT	>16	1,3	1,3	T1	>16	0,0	0,2
	10,0 - 16,0	6,2	2,5		10,0 - 16,0	0,0	0,0
	5,0 - 10,0	15,8	3,5		5,0 - 10,0	5,1	0,4
	2,0 - 5,0	28,0	1,5		2,0 - 5,0	22,1	6,0
	1,0 - 2,0	15,8	1,2		1,0 - 2,0	14,9	0,5
	0,5 - 1,0	12,6	0,2		0,5 - 1,0	16,2	0,2
	0,2 - 0,5	11,6	1,4		0,2 - 0,5	23,3	0,6
	< 0,0 - 0,2	8,1	1,2		< 0,0 - 0,2	19,4	0,5

Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken		Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken	
		Median [Gew. %]	STAB			Median [Gew. %]	STAB
T2	>16	5,1	5,8	GT50%	>16	0,0	0,0
	10,0 - 16,0	10,7	4,4		10,0 - 16,0	12,7	1,0
	5,0 - 10,0	14,4	2,2		5,0 - 10,0	17,0	3,2
	2,0 - 5,0	15,9	0,4		2,0 - 5,0	26,2	1,9
	1,0 - 2,0	11,1	0,2		1,0 - 2,0	17,3	1,2
	0,5 - 1,0	13,6	0,2		0,5 - 1,0	14,3	1,3
	0,2 - 0,5	17,6	1,3		0,2 - 0,5	9,4	0,7
	< 0,0 - 0,2	9,7	0,3		< 0,0 - 0,2	2,7	0,0
granT5%	>16	2,7	3,1	GT60%	>16	0,0	0,0
	10,0 - 16,0	7,6	2,0		10,0 - 16,0	3,9	3,5
	5,0 - 10,0	16,6	1,8		5,0 - 10,0	12,4	3,0
	2,0 - 5,0	23,4	1,5		2,0 - 5,0	28,4	0,7
	1,0 - 2,0	16,1	1,5		1,0 - 2,0	19,8	1,4
	0,5 - 1,0	14,2	1,2		0,5 - 1,0	18,0	0,6
	0,2 - 0,5	11,1	0,8		0,2 - 0,5	12,0	0,9
	< 0,0 - 0,2	7,0	0,7		< 0,0 - 0,2	3,7	0,0
granT10%	>16	2,0	2,0	KF10%	>16	0,6	1,0
	10,0 - 16,0	8,0	1,9		10,0 - 16,0	2,9	2,3
	5,0 - 10,0	15,3	1,2		5,0 - 10,0	13,7	1,2
	2,0 - 5,0	23,9	2,6		2,0 - 5,0	17,2	1,4
	1,0 - 2,0	16,6	1,1		1,0 - 2,0	13,3	1,2
	0,5 - 1,0	14,4	1,2		0,5 - 1,0	16,1	1,6
	0,2 - 0,5	12,7	1,8		0,2 - 0,5	23,3	3,2
	< 0,0 - 0,2	9,4	1,3		< 0,0 - 0,2	5,4	1,5
granT20%	>16	0,0	0,0	KF15%	>16	0,6	1,0
	10,0 - 16,0	1,7	1,5		10,0 - 16,0	4,9	0,5
	5,0 - 10,0	14,0	3,5		5,0 - 10,0	15,0	3,5
	2,0 - 5,0	26,3	3,3		2,0 - 5,0	18,8	0,8
	1,0 - 2,0	19,8	2,2		1,0 - 2,0	14,2	0,8
	0,5 - 1,0	16,1	0,2		0,5 - 1,0	16,4	0,8
	0,2 - 0,5	12,6	1,6		0,2 - 0,5	18,1	1,6
	< 0,0 - 0,2	9,9	1,1		< 0,0 - 0,2	10,6	0,2
granT30%	>16	0,0	0,0	KF20%	>16	3,0	4,4
	10,0 - 16,0	2,1	1,5		10,0 - 16,0	7,0	4,2
	5,0 - 10,0	16,6	3,1		5,0 - 10,0	12,2	1,0
	2,0 - 5,0	26,7	1,2		2,0 - 5,0	16,7	1,2
	1,0 - 2,0	16,1	0,2		1,0 - 2,0	12,8	1,3
	0,5 - 1,0	14,2	0,8		0,5 - 1,0	15,4	1,8
	0,2 - 0,5	10,4	0,4		0,2 - 0,5	24,0	2,0
	< 0,0 - 0,2	10,4	0,4		< 0,0 - 0,2	3,8	1,4
GT30%	>16	4,0	4,0	KF25%	>16	1,1	1,9
	10,0 - 16,0	6,4	2,5		10,0 - 16,0	6,3	2,9
	5,0 - 10,0	17,9	3,0		5,0 - 10,0	12,4	0,8
	2,0 - 5,0	26,2	3,9		2,0 - 5,0	15,8	0,4
	1,0 - 2,0	17,0	2,7		1,0 - 2,0	13,6	0,7
	0,5 - 1,0	15,2	3,0		0,5 - 1,0	17,4	1,2
	0,2 - 0,5	10,3	2,4		0,2 - 0,5	27,4	1,2
	< 0,0 - 0,2	3,6	0,8		< 0,0 - 0,2	5,1	1,4
GT40%	>16	2,7	0,9	RH10%	>16	0,0	0,0
	10,0 - 16,0	2,1	1,2		10,0 - 16,0	10,0	6,5
	5,0 - 10,0	14,6	2,8		5,0 - 10,0	16,4	3,8
	2,0 - 5,0	19,1	0,8		2,0 - 5,0	15,7	1,2
	1,0 - 2,0	19,8	1,7		1,0 - 2,0	11,7	0,9
	0,5 - 1,0	16,7	1,5		0,5 - 1,0	13,6	1,7
	0,2 - 0,5	10,6	1,1		0,2 - 0,5	14,2	2,8
	< 0,0 - 0,2	3,3	0,3		< 0,0 - 0,2	13,9	2,9

Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken		Substrat	Fraktion [mm]	schranktrocken	
		Median [Gew. %]	STAB			Median [Gew. %]	STAB
RH20%	>16	1,8	2,3	STf60%	>16	0,8	1,4
	10,0 - 16,0	6,7	2,0		10,0 - 16,0	6,9	1,0
	5,0 - 10,0	14,4	0,4		5,0 - 10,0	10,0	1,8
	2,0 - 5,0	17,4	1,5		2,0 - 5,0	11,8	1,5
	1,0 - 2,0	12,8	0,5		1,0 - 2,0	10,2	0,2
	0,5 - 1,0	15,1	0,4		0,5 - 1,0	17,4	0,5
	0,2 - 0,5	16,3	0,9		0,2 - 0,5	26,7	1,7
	< 0,0 - 0,2	14,9	1,2		< 0,0 - 0,2	15,4	1,1
RH30%	>16	1,0	0,9	STg20%	>16	2,9	2,4
	10,0 - 16,0	4,2	2,2		10,0 - 16,0	6,1	1,7
	5,0 - 10,0	10,9	3,4		5,0 - 10,0	13,0	3,2
	2,0 - 5,0	16,0	0,3		2,0 - 5,0	16,0	1,5
	1,0 - 2,0	14,2	0,8		1,0 - 2,0	12,1	0,8
	0,5 - 1,0	17,0	0,9		0,5 - 1,0	16,7	0,9
	0,2 - 0,5	18,6	1,0		0,2 - 0,5	15,8	1,2
	< 0,0 - 0,2	16,4	0,8		< 0,0 - 0,2	12,3	0,7
RH40%	>16	0,0	0,0	STg40%	>16	4,1	7,1
	10,0 - 16,0	3,2	3,6		10,0 - 16,0	6,8	4,0
	5,0 - 10,0	8,8	1,6		5,0 - 10,0	7,9	0,8
	2,0 - 5,0	18,4	0,5		2,0 - 5,0	12,1	1,3
	1,0 - 2,0	15,8	0,5		1,0 - 2,0	10,4	1,8
	0,5 - 1,0	18,6	0,2		0,5 - 1,0	14,7	2,6
	0,2 - 0,5	20,0	0,9		0,2 - 0,5	25,7	3,8
	< 0,0 - 0,2	14,6	1,0		< 0,0 - 0,2	15,9	2,5
STf20%	>16	2,1	2,4	STg60%	>16	0,0	0,0
	10,0 - 16,0	7,8	1,9		10,0 - 16,0	2,4	1,5
	5,0 - 10,0	14,0	1,2		5,0 - 10,0	10,8	0,5
	2,0 - 5,0	15,9	2,0		2,0 - 5,0	13,9	0,2
	1,0 - 2,0	11,7	0,7		1,0 - 2,0	12,3	0,7
	0,5 - 1,0	16,2	1,0		0,5 - 1,0	17,8	1,2
	0,2 - 0,5	17,1	1,4		0,2 - 0,5	25,4	1,2
	< 0,0 - 0,2	13,4	1,1		< 0,0 - 0,2	14,3	0,7
STf40%	>16	0,9	0,5				
	10,0 - 16,0	8,0	2,7				
	5,0 - 10,0	9,3	1,7				
	2,0 - 5,0	12,3	0,7				
	1,0 - 2,0	11,2	0,5				
	0,5 - 1,0	18,2	1,0				
	0,2 - 0,5	25,0	0,9				
	< 0,0 - 0,2	14,7	0,9				

Tabelle A12: Physikalische Kennwerte der 13 Standardsubstrate, ermittelt mit der M-ISHS-Methode (WREDE und BOHNE 2000b) unter Beachtung der Variante VDLUFA des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder. **Sub** = Substrat; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **CC** = Containerkapazität [Vol. %]; **WV50** = Wassergehalt bei 50 hPa [Vol. %]; **WV100** = Wassergehalt bei 100 hPa [Vol. %]; **dB_A** = Anfänglich eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder; **dB_E** = Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (**Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung ausgehend von der Stichprobe; [%] = Vol. %; * = Wert enthält Messfehler; insbesondere bei AC können Rundungsfehler auftreten; bei SV konnten lediglich 3 Wiederholungen gemessen werden)

Sub	PV				AC				CC				WV50			WV100			dB_A	dB_E					
	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[g/l]	[g/l]	Med	MW	s
EP	88,3	88,2	88,1	0,2	15,4	11,9	11,8	3,3	73,0	76,3	76,4	3,1	40,7	40,3	40,2	0,5	33,1	33,7	33,7	1,5	203,0	246,6	249,7	250,6	4,8
	88,3				13,3				75,0				40,2				34,2				247,0				
	87,8				7,9				80,0				40,5				32,0				256,7				
	88,1				10,5				77,5				39,5				35,4				252,3				
EPr	87,9	87,2	87,1	0,7	6,3	7,2	7,8	1,9	81,6	79,5	79,3	2,1	41,1	42,9	42,8	1,6	34,5	34,6	34,6	0,8	211,2	255,1	269,1	271,0	14,7
	87,2				7,3				79,9				41,8				34,7				268,6				
	87,2				10,5				76,7				44,4				33,6				269,6				
	86,2				7,1				79,1				44,0				35,5				290,7				
ET	87,7	87,4	87,5	0,7	14,3	14,7	14,6	1,5	73,4	72,8	72,9	1,2	37,6	38,8	38,9	1,6	32,2	32,9	33,0	0,8	229,3	270,1	275,2	273,5	15,3
	86,4				16,3				72,1				37,5				33,2				253,9				
	87,2				12,8				74,4				40,0				34,0				280,3				
	86,8				15,1				71,7				40,4				32,5				289,5				
CF	92,8	92,9	92,9	0,1	14,3	17,0	16,6	1,7	78,5	75,9	76,3	1,6	42,7	42,6	42,8	0,7	34,9	34,4	34,5	1,0	113,4	122,4	122,5	121,5	1,2
	92,9				17,6				75,4				42,2				35,7				120,5				
	92,9				18,1				74,9				43,7				33,6				120,4				
	92,8				16,4				76,4				42,5				33,9				122,8				
PH	90,4	90,8	90,7	0,2	3,2	6,7	6,2	2,2	87,3	84,1	84,6	1,9	53,3	51,8	52,1	2,3	45,6	44,7	45,0	1,7	136,5	164,2	158,9	159,1	4,1
	91,0				8,2				82,8				54,7				47,2				154,4				
	90,8				7,1				83,7				50,1				43,8				158,0				
	90,7				6,2				84,5				50,3				43,5				159,8				
FT	89,8	89,8	89,7	0,4	18,1	22,8	22,3	3,1	71,7	66,6	67,4	3,1	40,9	39,7	39,6	1,4	31,6	31,9	32,1	0,5	168,5	206,2	207,2	208,8	9,0
	89,1				23,4				65,6				40,4				32,8				221,1				
	89,7				22,2				67,5				38,9				31,9				208,3				
	90,1				25,4				64,7				37,9				32,0				199,6				
RK	88,8	88,7	88,4	0,9	36,1	35,7	35,9	1,6	52,7	53,2	52,4	2,4	35,6	36,1	35,9	1,0	32,1	32,4	32,2	1,4	229,8	233,2	224,8	231,6	17,7
	89,1				35,2				53,8				36,7				30,3				218,0				
	87,0				38,0				49,0				36,7				33,7				258,9				
	88,6				34,3				54,3				34,6				32,7				226,4				
ST	91,2	91,0	90,9	0,7	19,4	14,8	14,3	4,6	71,8	76,0	76,6	4,4	43,4	40,8	41,2	1,5	33,9	33,1	32,9	1,3	133,4	171,1	174,8	176,8	14,2
	89,9				13,9				76,1				41,0				34,1				195,6				
	90,8				8,4				82,4				40,7				31,2				178,6				
	91,7				15,7				75,9				39,9				32,4				162,0				
SV	90,7	91,0	91,1	0,5	15,1	18,0	17,3	2,0	75,6	73,7	73,8	1,8	39,3	33,4	35,3	3,5	31,8	26,9	28,5	2,9	151,8	192,0	185,5	182,9	10,6
	91,0				18,9				72,1				33,1				26,9				185,5				
	91,7				18,0				73,7				33,4				26,6				171,3				
SW1	92,2	92,8	92,7	0,3	7,6	14,9	13,5	3,9	84,6	77,9	79,2	3,6	42,2	41,9	42,0	0,6	33,9	34,5	34,2	1,4	110,6	134,2	124,7	126,5	5,3
	92,8				15,0				77,8				42,8				35,4				123,8				
	92,7				14,7				78,0				41,7				32,4				125,6				
	92,9				16,5				76,4				41,3				35,1				122,4				
SW3	92,7	92,7	92,7	0,1	10,2	10,5	11,2	2,0	82,5	82,1	81,5	2,0	44,2	43,7	43,3	1,7	32,9	35,3	34,8	1,2	106,6	126,3	126,1	125,7	1,4
	92,6				9,6				83,0				41,0				35,3				127,0				
	92,8				14,2				78,6				44,8				35,5				123,7				
	92,7				10,9				81,8				43,2				35,2				125,9				
T1	92,0	91,8	91,8	0,2	12,8	10,5	10,5	2,0	79,2	81,4	81,4	1,8	42,8	43,8	43,7	0,7	34,9	34,0	33,9	0,8	123,9	134,8	138,4	138,2	2,9
	91,7				10,1				81,7				44,3				34,0				139,7				
	91,6				8,1				73,6				43,5				33,9				141,4				
	91,9				10,9				81,0				44,2				32,8				137,1				
T2	93,6	93,8	93,7	0,2	19,5	23,7	23,8	4,1	74,1	70,1	69,8	4,0	41,7	41,9	41,4	1,5	31,2	31,9	31,8	0,5	96,1	109,4	106,1	106,4	2,6
	93,9				28,9				65,0				42,0				32,3				104,1				
	93,9				25,4				68,5				42,6				31,8				104,5				
	93,7				21,9				71,7				39,2				32,1				107,7				

Tabelle A13: Physikalische Kennwerte der 13 Standardsubstrate, ermittelt mit der M-ISHS-Methode (WREDE und BOHNE 2000b) unter Beachtung der Variante Topffest des Volumengewichts (dB_A [g / l]) im Probenzylinder. **Sub** = Substrat; **PV** = Porenvolumen [Vol. %]; **AC** = Luftkapazität [Vol. %]; **CC** = Containerkapazität [Vol. %]; **WV50** = Wassergehalt bei 50 hPa [Vol. %]; **WV100** = Wassergehalt bei 100 hPa [Vol. %]; **dB_A** = Anfänglich eingestelltes Volumengewicht im Probenzylinder; **dB_E** = Volumengewicht im Probenzylinder zum Ende der Messung (**Med** = Median; **MW** = Mittelwert; **s** = Standardabweichung ausgehend von der Stichprobe; [%] = Vol. %; * = Wert enthält Messfehler; insbesondere bei AC können Rundungsfehler auftreten)

Sub	PV				AC				CC				WV50			WV100			dB_A		dB_E				
	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[%]	Med	MW	s	[g/l]	[g/l]	Med	MW	s
EP	87,6 87,5 87,3 87,7	87,5	87,5	0,2	8,1 8,9 12,8 13,7	10,9	10,9	2,7	79,4 78,6 74,5 74,0	76,6	76,6	2,8	41,2 41,1 39,1 39,5	40,3	40,2	1,1	35,2 35,4 35,2 35,2	35,2	35,2	0,1	253,4	262,9 263,9 268,2 260,2	263,4	263,8	3,3
EPr	86,8 86,6 86,4 86,7	86,7	86,6	0,2	6,3 10,0 5,4 5,4	5,8	6,8	2,2	80,5 76,7 81,0 81,3	80,7	79,8	2,1	40,3 41,0 43,2 42,6	41,8	41,8	1,3	35,0 35,0 34,9 35,6	35,0	35,1	0,3	257,5	278,2 280,6 286,6 280,3	280,5	281,4	3,6
ET	88,3 88,4 87,2 87,4	87,8	87,8	0,6	14,3 13,1 16,7 13,7	14,0	14,4	1,6	74,0 75,3 70,5 73,6	73,8	73,4	2,0	39,7 39,1 38,9 37,9	39,0	38,9	0,8	33,9 35,2 34,6 34,2	34,4	34,5	0,6	243,5	256,2 254,7 279,8 276,8	266,5	266,9	13,3
CF	92,4 92,4 92,8 92,5	92,4	92,5	0,2	12,8 10,6 15,1 11,9	12,4	12,6	1,9	79,6 81,8 77,7 80,6	80,1	79,9	1,8	42,7 40,2 43,7 42,4	42,6	42,2	1,5	35,2 35,2 35,7 35,3	35,3	35,4	0,3	118,8	130,1 130,3 123,7 127,9	129,0	128,0	3,1
PH	90,9 90,9 90,7 90,8	90,8	90,8	0,1	6,9 7,4 6,3 4,6	6,6	6,3	1,2	84,0 83,5 84,5 86,2	84,2	84,5	1,2	49,0 48,4 47,8 48,0	48,2	48,3	0,5	41,2 40,9 41,1 43,9	41,1	41,8	1,4	151,4	157,0 156,3 159,6 158,0	157,5	157,4	1,4
FT	90,3 90,4 89,3 89,3	89,8	89,8	0,6	25,6 25,9 16,3 17,2	21,5	21,3	5,2	64,6 64,5 73,0 72,1	68,3	64,6	4,6	38,7 36,0 39,8 38,7	38,7	38,3	1,6	32,7 31,3 32,1 33,1	32,4	32,3	0,8	176,4	195,6 195,2 217,0 216,5	206,1	206,1	12,3
RK	89,1 89,0 87,8 87,7	88,4	88,4	0,7	33,1 34,1 28,0 27,7	30,6	30,8	3,3	56,0 54,9 59,8 60,0	57,9	57,7	2,6	35,8 37,6 39,8 38,8	38,2	38,0	1,7	32,2 32,3 35,1 34,1	33,2	33,4	1,4	228,5	216,8 219,0 242,2 244,4	230,6	230,6	14,7
ST	89,6 89,9 89,7 90,2	89,8	89,9	0,3	4,8 11,0 8,5 10,2	9,3	8,6	2,8	84,8 78,9 81,2 80,0	80,6	81,2	2,6	43,3 41,6 45,6 43,2	43,3	43,4	1,7	34,4 35,4 33,4 35,9	34,9	34,8	1,1	166,7	201,7 195,6 200,9 190,3	198,3	197,1	5,3
SV	90,3 90,6 89,7 90,1	90,2	90,2	0,4	9,2 10,5 5,3 8,0	8,6	8,2	2,2	81,1 80,1 84,3 82,1	81,6	81,9	1,8	38,8 37,8 39,6 37,6	38,3	38,5	0,9	30,6 30,8 32,6 33,0	31,7	31,7	1,2	168,4	200,2 193,3 212,9 204,4	202,3	202,7	8,2
SW1	92,9 92,9 92,7 92,7	92,8	92,8	0,1	16,7 14,3 14,3 13,7	14,3	14,7	1,4	76,2 78,6 78,5 79,1	78,5	78,1	1,3	41,7 41,7 41,2 42,2	41,7	41,7	0,4	34,0 36,1 35,2 35,2	35,2	35,1	0,8	120,9	121,6 122,0 125,5 125,1	123,6	123,5	2,0
SW3	92,9 92,9 92,6 92,6	92,8	92,8	0,2	15,7 19,9 10,7 11,5	13,6	14,4	4,3	77,3 73,0 81,9 81,1	79,2	78,3	4,1	41,6 41,2 44,7 42,9	42,3	42,6	1,6	34,5 34,7 36,3 36,2	35,4	35,4	1,0	118,8	121,7 121,8 128,2 127,6	124,7	124,8	3,5
T1	91,7 91,5 91,0 91,1	91,3	91,3	0,3	7,5 7,4 2,3 5,2	6,3	5,6	2,4	84,2 84,1 88,7 85,9	85,0	85,7	2,1	43,9 43,6 44,6 44,6	44,3	44,2	0,5	37,8 34,3 35,6 34,7	35,2	35,6	1,6	133,4	140,9 144,5 153,1 130,0	147,3	147,1	9,6
T2	93,6 93,7 93,1 93,0	93,3	93,4	0,3	18,2 20,3 17,5 18,5	18,4	18,6	1,2	75,4 73,4 75,7 74,5	74,9	74,7	1,0	41,4 38,8 43,2 40,0	40,7	40,9	1,9	32,2 32,3 34,6 33,7	33,0	33,2	1,2	110,0	109,4 106,9 116,7 118,6	113,1	112,9	5,6

Lebenslauf

- 07.03.1963:** Geboren in Iserlohn als Sohn des technischen Angestellten Heinrich Wrede und seiner Frau Ingeborg, geb. Ortmann
- 1983:** Abschluss der Schulausbildung am „Gymnasium An der Stenner“, Iserlohn (Allgemeine Hochschulreife)
- 1983 – 1985:** Ausbildung zum Gärtner, Fachrichtung Garten- und Landschaftsbau (Fa. U. Matthies, Menden)
- 1985 – 1987:** Ableistung des Grundwehrdienstes in Plön, später Zivildienst in Altena (Westf.)
- 1987 – 1989:** Gehilfentätigkeit im Garten- und Landschaftsbau (Fa. U-Matthies, Menden)
- 1989:** Praktikum im Blumen- und Zierpflanzenbau (Fa. K. Schotte, Hemer)
- 1989 – 1995:** Studium der Gartenbauwissenschaften an der Universität Hannover, Abschluss als Diplom –Agraringenieur
- 1995:** Mitarbeit bei der Erstellung einer Beratungssoftware zur Kundenberatung in Gartencentern (Fa. Maethe Script, Haan)
- 1996:** Leiter der Abteilung Garten- und Landschaftsbau der Baumschule H.G. Rahte, Wietze bei Celle
- 1997 – 2000:** wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Baumschule der Universität Hannover
- seit 01.06.2000:** Mitarbeiter im Institut Koldingen GmbH, Ehlbeek 2, Burgwedel, Abteilung Gartenbau sowie physikalische und chemische Sonderuntersuchungen

Curriculum vitae

- 07.03.1963:** Born in Iserlohn as a son of the technical office worker Heinrich Wrede and his wife Mrs. Ingeborg, née Ortmann
- 1983:** Completed secondary school education in Iserlohn „Gymnasium an der Stenner“ (A-levels, general university maturity)
- 1983 – 1985:** Apprenticeship in landscape gardening in the enterprise of U. Matthies, Menden
- 1985 – 1987:** Military service in Plön, later community service in Altena (Westphalia)
- 1987 – 1989:** Landscape gardening craftsman in the enterprise of U. Matthies, Menden
- 1989:** Practical training in floriculture (enterprise of K. Schotte, Hemer)
- 1989 – 1995:** Study of horticultural science at Hanover University, diploma degree in agricultural engineering
- 1995:** Assistance in the development of software for customer advisory service in garden centers (Maethe Script, Haan)
- 1996:** Foreman of landscape gardening division of H.G. Rahte tree nursery, Wietze near Celle
- 1997 – 2000:** Scientific assistant at the Department of Tree Nursery Science, Hanover University
- since 01.06.2000:** Assistant at the Institut Koldingen GmbH, Ehlbeek 2, Burgwedel, horticultural and special physical and chemical investigations division

Danksagung

Frau Prof. Dr. Heike Bohne möchte ich herzlich für die Überlassung des Themas, die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit, die Übernahme des Referates und ihr stetes Interesse am Fortgang und den Ergebnissen des Projektes sowie für ihre Unterstützung danken.

Herrn Prof. Dr. M. Schenk danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Bei der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V., Heisterbergallee 12, D-30453 Hannover sowie bei den folgenden Firmen

- Blumenerdewerk Stender GmbH, Alte Poststraße 12, D-46514 Schermbeck
- Einheitserde Werkverband e.V., Waldsiedlung 4, D-36391 Sinntal-Jossa
- Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Gerhard-Stalling-Str. 7, D-26135 Oldenburg
- Gebr. Brill Substrate GmbH & Co. KG; Torfwerkstr. 11, D-49828 Georgsdorf
- Klasmann-Deilmann GmbH, Georg-Klasmann-Str. 2-10, D-49744 Geeste-Groß Hesepe
- Unternehmensgruppe Archut / Hawitaflor; Industrie-Erdenwerk Archut GmbH & Co. KG, D-36341 Lauterbach

möchte ich mich herzlich für die Überlassung und die Finanzierung des Forschungs- und Entwicklungsauftrages bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Michael Weichert vom Lehrgebiet Bioinformatik am Fachbereich Gartenbau der Universität Hannover für die fachkundige Beratung bei der statistischen Auswertung der Versuche.

Daneben möchte ich mich bei Dipl.- Ing. agr. Bettina Baldin, Dipl.- Ing. agr. Sabine Löns sowie bei Dipl.- Ing. forst. Sigrun Jess von der Abteilung Baumschule der Universität Hannover für die stete Unterstützung bei den Laborarbeiten bedanken.

Herrn Prof. Dr. H. Schacht (FH Osnabrück), Herrn Dr. R. Rexilius (Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzenbau e.V.), Herrn Dipl.- Ing. H.J. Luck (Fa. Archut / Hawitaflor) sowie Herrn Dipl.- Ing. J. Günther (Bundesverband Torf und Humuswirtschaft e.V.) möchte ich für die zahlreichen Anregungen und sachdienlichen Diskussionen herzlich danken.

Außerdem danke ich Prof. Dr. D. Mac Cárthaigh (FH Weihenstephan) und Prof. Dr. W. Spethmann (Uni Hannover) für die zahlreichen Verbesserungsvorschläge am Manuskript.

Meiner Lebenspartnerin Anke Poppek danke ich für ihre Geduld, ihren Einsatz, ihre zahlreichen kritischen Bemerkungen, ihre Anregungen, ihre Unterstützung und die Kraft, die sie mir gegeben hat. Nur mit ihrer Hilfe konnte diese Arbeit realisiert werden.