| TELMA | Band 43 | Seite 19 - 38 | 9 Abb., 4 Tab. | Hannover, November 2013 |
|---|---|---|---|---|

# Bedeutung von Toneigenschaften für die Wahl der Tonbeimengung in gärtnerischen Torfsubstraten

## Significance of clay properties for the selection of clay amendments for peat based growing media

MATTHIAS SCHELLHORN, MANFRED K. SCHENK, GERALD SCHMILEWSKI, INGA BINNER, STEFAN DULTZ, JOCHEN WALSCH, EVA SCHMIDT, MALTE BELOW und MAIKE MEYER

## Zusammenfassung

Der Zusatz von Ton zu gärtnerischen Kultursubstraten ist mit vielen unterschiedlichen Zielen, wie ausgeglichener Nährstoffversorgung, Pufferung des pH-Wertes, Verbesserung der Benetzbarkeit, Bindigkeit des Substrates und Spurenelementversorgung, verknüpft. Geeignete Kriterien für die Auswahl von Tonen für spezifische Anwendungen sind nötig, um eine verlässliche Bewertung sowohl der Substratausgangsstoffe als auch von aufbereiteten Tonen zu ermöglichen.

In dieser Studie wurde eine große Bandbreite von Tonen für verschiedene Anwendungen ausgewählt. Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung und Aufbereitung der ausgewählten Tone spiegeln sich bei den entsprechenden physikalischen und chemischen Eigenschaften des Substrates wieder. Der Einfluss verschiedener Tone auf die Wiederbenetzbarkeit und Bindigkeit von Substraten wurde in Laborexperimenten untersucht und wichtige Parameter für die Auswahl bestimmter Tonspezies und deren Aufbereitung abgeleitet. Tone mit starker K- und P-Fixierung als auch solche mit spontaner Freisetzung dieser Makronährstoffe wurden identifiziert und in Kulturversuchen Toneffekte auf Nährstoffflüsse dokumentiert. Untersuchungen zur Mangantoxizität an Tonen mit unterschiedlichen Anteilen an aktivem Mangan ergaben, dass der bestehende RHP-Grenzwert für Mn in Substrattonen nicht gerechtfertigt ist.

## Abstract

The purpose of adding clay to horticultural growing media is to achieve objectives such as a well-balanced nutrient supply, buffering of the pH-value, improvement of the rewettability, cohesion of the growing medium and supply of trace elements. Criteria for choosing clay types for specific applications are necessary to assess the suitability of original materials as well as processed clays in a reliable way. A wide range of clays for different applications was chosen for this study. Differences in the mineralogical composition and in pretreatment of the selected clays resulted in specific physical and chemical characteris-

tics of the different growing media mixes. The influence of different clays on the rewettability and cohesion of growing media was analyzed in laboratory experiments which resulted in the definition of important parameters for selection of clays and suitable methods for processing. Clays with strong K and P fixation as well as clays with spontaneous release of these macronutrients were identified. The effects of clays on the flow of nutrients were documented in crop tests. growth-trials regarding Mn toxicity, carried out with clays with different contents of active Mn, proved that an existing RHP-threshold value for Mn in clays for growing media is not justified.

## 1. Einleitung

Kultursubstrate sind Betriebsmittel im Produktionsgartenbau, an die bei automatisierter Düngung und Bewässerung sowie „just in time“ Produktion höchste Anforderungen bestehen. Ein geeignetes Substrat ist für die Erzeugung gesunder, optimal gewachsener und haltbarer Pflanzen essentiell. Zeitgleich mit dem Einsatz von Torf in Kultursubstraten in den 50er Jahren wurde die Beimengung von Tonen zu gärtnerischen Substraten eingeführt. In der Patentschrift Nr. 832897 „Verfahren zur Herstellung gärtnerischer Erden“ (Deutsches Patentamt 1952) für Prof. Dr. Anton Fruhstorfer wurde eine Substratmischung bestehend aus 50 % (v/v) Torf und 50 % (v/v) Untergrundton vorgestellt. Daraus entwickelten sich in Deutschland die Produkte „Einheitserde“ und auch „Fruhstorfer Erde“ mit Tongehalten von 100 - 300 kg/m$^3$, die auch heute als gängige Produkte auf dem Markt sind. Bei einem Großteil der heute üblichen Substrate beträgt die Tonbeimengung zu Torf allerdings typischerweise 20 - 40 kg, seltener bis 80 kg Ton/m$^3$. 2012 wurden in den Substratwerken Europas 200.000 t Ton verarbeitet, davon in Deutschland 130.000 t/a. In den Niederlanden, wo Ton erst seit ca. 15 Jahren in Substraten eingesetzt wird, beträgt der Absatz heute 20.000 t/a.

Während die Melioration von landwirtschaftlich genutzten Böden durch Beimengung von Ton verschiedentlich untersucht worden ist (z. B. Ismail & Ozawa 2007, Miller & Miller 2000, Reuter 1994 und Suzuki et al. 2007), ist wissenschaftliche Literatur über den Einfluss von Ton auf Substrateigenschaften nur spärlich auf empirischem Niveau vorhanden (Deutsches Patentamt 1952, Fischer 2000, Grantzau 1998, Kipp 1998, Verhagen 2000, 2004). Derzeit sind keine zuverlässigen Bewertungskriterien für den Einsatz von Tonen in Kultursubstraten verfügbar, um die Substrate perfekt auf die Pflanzenkultur und das Kulturverfahren abzustimmen.

Es besteht Konsens, dass Ton im Substrat aufgrund seiner Kationenaustauschkapazität (KAK) die $K^+$-Konzentration in der Substratlösung puffert und somit eine kontinuierliche Versorgung der Pflanzen mit K gewährleistet (z. B. Grantzau 1998, Scheffer & Schachtschabel 2010). Ebenso ist die P-Konzentration in der Substratlösung gepuffert, weil das Anion Phosphat an variablen Ladungen gebunden werden kann, die zu hohen Anteilen auf Fe-Oxide zurückzuführen sind. Die Regulation der P-Verfügbarkeit im Substrat kann dabei auch genutzt werden, um möglichst kompakte Pflanzen zu erzeugen. Ladung

tragende Oberflächen, wie sie in typischer Weise für Tonminerale zu finden sind, begünstigen auch die Benetzbarkeit des Substrats und über den Einfluss der Tonbeimengung auf die Mikrostruktur im Substrat die Menge an pflanzenverfügbaren Wassers. Trotz Klärung einiger Wirkungsmechanismen von Tonen in Substraten fehlen der Substratwirtschaft definierte Parameter für Tone entsprechend den verschiedenen Einsatzbereichen, wie der Pufferung von Nähr- und Schadstoffen sowie Protonen, Bindemittel zur Verfestigung des Wurzelballens im Tray, Verbesserung der Benetzbarkeit und Optimierung des Wasserspeichervermögens.

In dieser Studie sollte die Auswahl von Tonen auf eine erweiterte, wissenschaftlich und gartenbaulich abgesicherte Basis gestellt und geeignete mineralogische, chemische und physikalische Parameter für Auswahl, Quantifizierung, Mischung und Modifizierung bzw. Funktionalisierung erarbeitet werden. Eingehend charakterisierte und für bestimmte Anwendungen spezifizierte Substrattone sollen in gleich bleibender hoher Qualität lieferbar sein. Ein geeignetes Substrat ist von fundamentaler Bedeutung für das Pflanzenwachstum. Gärtnerische Kulturen haben bestimmte Ansprüche, die der Gärtner durch Anbaumethoden und Kultivierungstechniken zu erfüllen hat. Für die Auswahl von Bestandteilen eines Substrates sollte jedes die optimalen Qualitäten für die jeweilige Kultur aufweisen. Für die Entwicklung und Herstellung eines Substrates ist eine große Zahl an chemischen, physikalischen, biologischen und ökonomischen Merkmalen der Bestandteile abzuwägen (Tab. 1).

Tab. 1: Eigenschaften gärtnerischer Substrate und ihrer Komponenten, die in Beziehung zur Qualität stehen und bei der Produktion berücksichtigt werden müssen (nach SCHMILEWSKI 2008)
Properties of horticultural growing media and constituents thereof that have an influence on quality and must be considered during production (after SCHMILEWSKI 2008)

| **Chemisch** | **Physikalisch** | **Biologisch** | **Ökonomisch** |
|---|---|---|---|
| pH-Wert | Struktur und Stabilität | Krankheitserreger | Langzeitverfügbarkeit |
| Nährstoffgehalt und -verfügbarkeit | Wasser- und Luftkapazität | Unkrautsamen und austriebsfähige Pflanzenteile | Preis |
| Nährstoffpufferkapazität, pH-Pufferkapazität | Volumengewicht (Transportkosten) | mikrobielle Aktivität, saprophytische Mikroorganismen | Konsistenz der Qualität entsprechend den Pflanzenbedürfnissen |
| pflanzenschädigende Substanzen | Wiederbenetzbarkeit | Lagerfähigkeit | Kulturmethoden |

Die Tonbeimengung fokussiert dabei auf folgende drei Eigenschaften des gärtnerischen Substrates:

1. Pufferung von Nährstoffen: Die Tonbeimengung soll sicherstellen, dass von Beginn der Kultur über die gesamte Vegetationszeit optimale Bedingungen konstant bleiben.

2. Wiederbenetzbarkeit durch Bewässerung: Durch die große spezifische Oberfläche, die nicht ladungsneutral und somit hydrophil ist, haben Tonminerale, die die äußeren Oberflächen der Torfbestandteile überziehen, einen positiven Effekt auf die Wiederbenetzbarkeit ursprünglich wasserabweisender Substrate.

3. Bindigkeit: Für den Einsatz von z. B. Pikierrobotern zur Umsetzung von Jungpflanzen und auch für die Herstellung von Presstopferden soll die Bindigkeit durch Zugabe eines geeigneten Tons erhöht werden.

Chemische als auch physikalische Eigenschaften gärtnerischer Substrate hängen sehr stark von der Art der Tonbeimengung ab. Da **ein** bestimmter Ton nicht alle gewünschten Eigenschaften einstellen kann, werden in der Substratindustrie auch Tonmischungen eingesetzt.

Durch die variable mineralogische Zusammensetzung von Tonen und das Auftreten verschiedenster Varietäten der Schichtsilicate, z. B. durch Unterschiede in der Struktur, chemischen Zusammensetzung, Schichtladung, Korngröße, Vorhandensein von Überzügen und Mineralparagenese, zeigen verschiedene Arten von Tonen aus unterschiedlichen Lagerstätten ganz verschiedene Eigenschaften. Ziel ist es in dieser Arbeit, Tone mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften torfbasierten Substraten beizumengen.

# 2. Material und Methodik

## 2.1 Verwendete Tone und deren Aufbereitung

Tone unterschiedlicher Genese aus dem Westerwald wurden beprobt. Drei verschiedene Haupttypen von Tonen werden dabei unterschieden:

1. Bentonite (primäre Lagerstätten), die aus vulkanischen Aschen entstanden sind und 30 - 90 % Smektite enthalten.

2. Saprolithische Tone (primäre Lagerstätten), wo hauptsächlich Kaolinit aus der Verwitterung von Schiefern hervorgegangen ist. Der Gehalt an $Fe_2O_3$ liegt bei 1 - 10 %.

3. Umgelagerte Tone (sekundäre Lagerstätten), die nach Erosion in Becken zum Absatz kamen und im Wesentlichen aus vier verschiedenen Mineralen, Kaolinit, Illit, Quarz und Smektit bestehen.

Insgesamt wurden 38 Tone und Tonmischungen in die Untersuchungen einbezogen. Die Ergebnisse werden im Rahmen dieses Manuskriptes nur für 7 ausgewählte Tone mit großen Merkmalsunterschieden dargestellt (Tab. 2). Bei den Proben 36M und 38M handelt es sich um gebrauchsfertige, industrielle Mischungen verschiedener Tone. Die beprobten Tone wurden bei 60 °C bis zum Erreichen konstanten Gewichts getrocknet und in einer Schlagkreuzmühle mit 500 µm Sieb zerkleinert und homogenisiert. Die chemische Zusammensetzung wurde mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse, die mineralogische Zusammensetzung mittels Röntgendiffraktometrie und weitere Parameter mit verschiedenen nasschemischen Verfahren bestimmt.

Tab. 2: Physikalische, chemische und mineralogische Eigenschaften von sieben ausgewählten Tonproben
Physical, chemical and mineralogical properties of seven selected clay samples

| Probe/ Herkunft | Sand/Schluff/ Ton (Gew.%)[1] | KAK[2] ($mol_c\ kg^{-1}$) | pH[3] ($CaCl_2$) | SSA[4] ($m^2g^{-1}$) | $Al_{ox}/Fe_{ox}$[5] ($g\ kg^{-1}$) | Ladung[6] ($\mu mol_c\ m^{-2}$) | Mineralogische Zusammensetzung der Tonfraktion[7] (d=dominant, s= Spuren) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01S/Saprolith | 42/45/13 Slu | 0,29 | 6,9 | 11 | 0,34 / 0,61 | 0,81 | Illit, Kaolinit (d); Chlorit, Quarz (s) |
| 06B/Bentonit | 41/38/21 Ls3 | 0,84 | 6,4 | 106 | 2,24 / 2,96 | 0,20 | Smektit (d); Illit, Kaolinit (s) |
| 07B/Bentonit | 46/41/13 Slu | 0,88 | 6,7 | 92 | 1,77 / 1,53 | 0,25 | Smektit (d); Illit, Kaolinit (s) |
| 27U/umgelagert | 2/52/46 Tu2 | 0,22 | 6,5 | 20 | 0,09 / 0,02 | 0,89 | Kaolinit, Quarz (d) |
| 28U/umgelagert | 2/18/80 Tt | 0,44 | 6,4 | 44 | 0,26 / 0,11 | 0,52 | Kaolinit, Illit (d) |
| 36M/Mischung | 2/35/63 Tu2 | 0,26 | 6,3 | 30 | 0,16 / 0,33 | 0,64 | Kaolinit (hohe Kristallinität), Illit (d) |
| 38M/Mischung | 25/40/35 Lt3 | 0,57 | 6,4 | 62 | 1,06 / 0,87 | 0,29 | Kaolinit, Illit (d) |

[1] Korngrößenverteilung nach DIN ISO 11277: 2002-08
[2] Kationenaustauschkapazität (KAK) nach der *Ag thiourea* Methode
[3] pH-Wert in 0,01M $CaCl_2$ Lösung bei einem Probe-Lösungs-Verhältnis von 1:2.5
[4] Spezifische Oberfläche (SSA) mittels Stickstofftieftemperaturadsorption und Auswertung nach BET
[5] Oxalatlösliches Al und Fe
[6] Oberflächenladung (SC) bei pH 6 mittels Strömungspotential und Polyelektrolyttitration
[7] Röntgendiffraktometrie von orientierten Proben nach Entfernung von Fe-Oxiden

Der Lagerstättentyp ist dabei auch mit der Morphologie der Tone korreliert. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen, dass Schichtsilicate von saprolithischen Tonen, die hauptsächlich aus Illit, Chlorit und Kaolinit bestehen, größere Teilchendimensionen aufweisen (Abb. 1, a) als Schichtsilicate aus Bentoniten und umgelagerten Tonen (Abb. 1, b und c). Die Mineralplättchen der letzteren beiden Tone erscheinen deutlich kleiner.

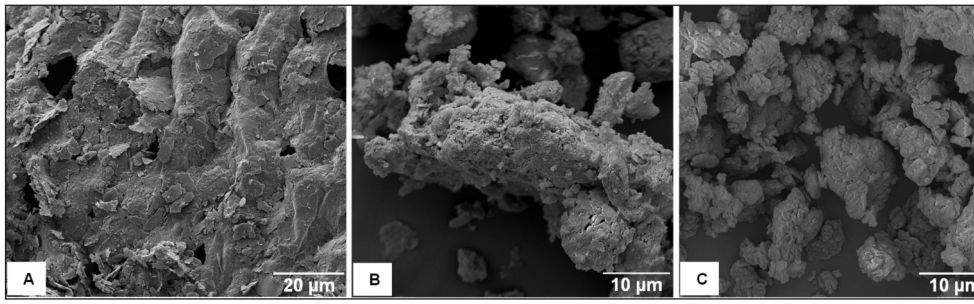



Abb. 1: Rückstreuelektronenbilder von saprolithischem Ton 01S auf einem *Sphagnum* Blatt in einem torfbasierten Substrat (A) sowie von Aggregaten von Bentonit 07B (B) und umgelagertem Ton (36M) (C), die die verschiedenen vorliegenden Formen und Teilchendimensionen in Tonen aus dem Westerwald zeigen
Different sizes and shapes of clays from the Westerwald area. Backscattered electron images of saprolitic clay 01S attached to a *Sphagnum* leave in a peat-based growing medium (A) and aggregates of bentonitic clay 07B (B) and translocated clay 36M (C)

## 2.2 Aufbereitung der Torfausgangsstoffe

Für die Untersuchungen wurde mit einer industriell gefertigten Torfmischung gearbeitet, die litauischen, schwedischen und irischen Torf im Verhältnis 60:30:10 % (v/v) enthielt. Die Torfe wurden gemischt und für verschiedene Versuche während der Laufzeit des Projektes in einem Kühlhaus bevorratet, um Veränderungen der Torfeigenschaften durch Lagerung zu vermeiden. Die Kenngrößen für den eingesetzten Standardtorf sind in Tabelle 3 angegeben.

## 2.3 Herstellung der gärtnerischen Substrate

Die Herstellung größerer Substratmengen erfolgte im industriellen Maßstab (Klasmann-Deilmann GmbH, Werk Sedelsberg), während kleinere Mengen in einem handelsüblichen Betonmischer mit einer Kapazität von 120 l hergestellt wurden. Generell wurde drei Minuten homogenisiert. Zu den Substraten wurde in der Regel PG-Mix® 14-16-18, ein voll wasserlöslicher Mehrnährstoffdünger mit Spurenelementen, zugesetzt. Der Torf wurde mit einem feinkörnigen Kalk mit hohem Anteil an Partikeln <63 µm (82,5 % [g/g]) vermengt, um eine schnelle Einstellung des gewünschten pH-Wertes zu gewährleisten.

Tab. 3: Physikalische und chemische Kenngrößen des Standardtorfes (0-10 mm), der in den meisten Pflanzenversuchen und Laborexperimenten verwendet wurde
Physical and chemical characteristics of the standard peat (0-10 mm) used in most of the growth trials and laboratory experiments

| **Kennzeichnungen** | **Methode** | **Analysenergebnisse** |
|---|---|---|
| Partikelgrößenverteilung (Gew. %) | EN 15428:2007 | 2 % = 16-8 mm<br>25 % = 8-4 mm<br>17 % = 4-2 mm<br>15 % = 2-1 mm<br>14 % = 1-0,5 mm<br>25 % = 0,5-0,2 mm<br>12 % = < 0,2 mm |
| Feuchtigkeitsgehalt $W_m$ (Gew.%) | EN 13040:2008 | 57,8 |
| Trockenrückstand $D_M$ (Gew.%) | EN 13040:2008 | 42,2 |
| Rohdichte (wie erhalten) (g/l) | VDLUFA I A 13.2.1 | 155 |
| Rohdichte (trocken) (g/l) | VDLUFA I A 13.2.1 | 70 |
| Laborschüttdichte $L_D$ (g/l) | EN 13040:2008 | 160 |
| pH ($H_2O$ 1+5) | EN 13037:2000 | 4,5 |
| pH ($CaCl_2$) | VDLUFA I A 5.1.1 | 3,0 |
| Elektrische Leitfähigkeit (mS/m) | EN 13038:2000 | 2,0 |
| Salzgehalt ($H_2O$) (g/l) | VDLUFA I A 13.4.1 | 0,07 |
| Organische Substanz $W_{om}$ (Gew.%) | EN 13039:2000 | 98,7 |
| Aschegehalt $W_{ash}$ (Gew.%) | EN 13039:2000 | 1,3 |
| Lösliche Nährstoffe (mg/l)<br><br>Diese wurden mit verschiedenen Methoden analysiert, siehe rechts | [1](CAT) DIN EN 13651:2000<br>[2](CAT) VDLUFA<br>[3]($CaCl_2$) VDLUFA<br>[4](CAL) VDLUFA<br>[5](Formiat) VDLUFA | Stoff EN[1] LUFA[2] LUFA<br>N 20 14 14[3]<br>$NO_3$-N 11 2 2[3]<br>$NH_4$-N 9 12 12[3]<br>P 5 3 ($P_2O_5$)12[2]<br>K 7 8 ($K_2O$)12[4]<br>Ca - - 94[5]<br>Mg 53 45 48[3]<br>Cu <0,25 0,20 -<br>Zn 0,28 0,52 -<br>B <0,25 <0,16 -<br>Mn 0,27 0,33 -<br>Fe 16,3 14,8 -<br>Mo <0,25 <0,16 - |
| Rohdichte, trocken $D_{BD}$ (kg/m³) | EN 13041:2006 | 75 |
| Luftkapazität $A_V$ (Vol.%)<br>bei -1 kPa (pF 1) | EN 13041:2006 | 29 |

| | | |
|---|---|---|
| Wasserkapazität $W_V$ (Vol.%) bei -1 kPa (pF 1,0) | EN 13041:2006 | 66 |
| Total pore space $P_S$ (Vol.%) at -1 kPa | EN 13041:2006 | 94 |
| Wasserhaltefähigkeit (g/100 g Trockenmasse) bei -1 kPa (pF 1,0) | EN 13041:2006 | 885 |
| Schrumpfung ($S_{\%}$) bei -1 kPa | EN 13041:2006 | 19 |
| KAK (mmol/100 g = meq/100g) | Mehlich-Methode (pH 8,1) | 124 |

Zur Kontrolle wurden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit drei Tage nach dem Mischen gemessen und in einigen Fällen der Gehalt der löslichen Haupt- und Spurennährstoffe analysiert.

# 3. Versuchsdurchführung, Ergebnisse und Diskussion

## 3.1 Untersuchungen zur Bindigkeit torfbasierter Substrate

Um die Plastizität und Stabilität von Presstöpfen für die Anzucht von Jungpflanzen zu gewährleisten, wird üblicherweise stark humifizierter, durchfrorener Schwarztorf mit einem hohen Anteil kolloidaler Teilchen verwendet. Das Pressmedium muss dabei eine feine Struktur aufweisen, um die Formgebung zu erlauben. Eine ausreichende Bindigkeit der Presstöpfe ist notwendig, damit diese bei Verpflanzung nicht brechen. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Tonzugabe die Stabilität erhöhen kann. Zur Kennzeichnung des Toneffektes auf die Bindigkeit wurde die Druckfestigkeit mit einer Methode geprüft, die dem Verfahren zum Verpflanzen von Gemüsejungpflanzen aus dem Gewächshaus ins Freiland nachempfunden wurde. Hierfür wurden in einem von der RHP eigens entwickelten Laborgerät zur Herstellung von Presstöpfen Blöcke gepresst und auf 3x3x3 cm geschnitten. Folgende Parameter wurden für die Versuche erfasst: Menge des Pressmediums, Feuchtigkeitsgehalt sowie aufgewandter Druck bei der Herstellung. In einem Druckfestigkeitsprüfgerät mit meißel förmigen Druckbolzen wurde die Druckfestigkeit bei Bruch des Blocks bei der Herstellung und nach Austrocknung bestimmt.

In die Versuche wurden jeweils ein saprolithischer (01S), bentonitischer (06B) und umgelagerter Ton (38M) einbezogen. Der verwendete Torf in der Fraktion <5 mm hatte eine Laborschüttdichte $L_D$ von 400 g/l. Als Referenz wurde reiner Torf ohne jede Zusätze (Mix 0) sowie aufgekalkt und gedüngt (Mix 1) eingesetzt. Zwei verschiedene Raten bei der Tonzugabe (30 und 60 kg/m³) wurden eingesetzt (Abb. 2).

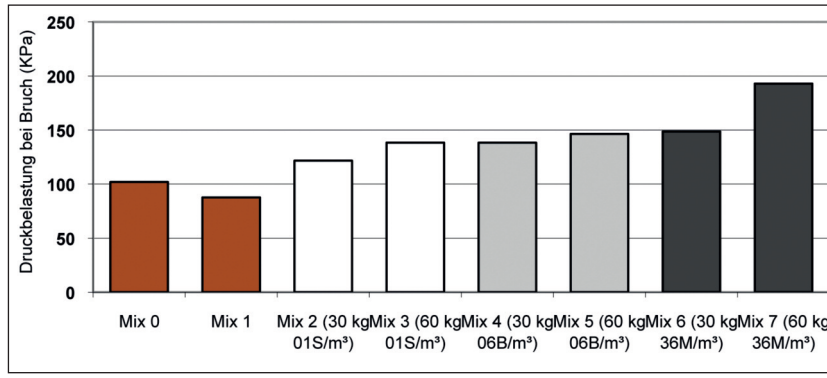



Abb. 2: Einfluss des saprolithischen Tones 01S, des Bentonites 06B und des umgelagerten Tones 36M auf den Druck, um den Bruch trockener Presstöpfe zu erreichen (Mix 0 ohne Ton, Dünger und Kalk; Mix 1 ohne Ton mit Dünger und Kalk)
Effect of saprolitic clay 01S, bentonitic clay 06B and translocated clay 36M on the pressure needed to reach the breaking point of dry-treated blocks. (Mix 0 is without clay, fertilizers and lime; Mix 1 is without clay but with fertilizer and lime. Both mixes are controls.)

In diesen Versuchen – wie in der Praxis – führte partielle Austrocknung der Presstöpfe zu einer Schrumpfung. Der Zusatz der drei Tone führte zu einer stärkeren Schrumpfung als die Kontrolle ohne Ton, ein Effekt, der auch in Traysubstraten für den Pikiervorgang erwünscht ist. Steigende Tonmengen führten zu einer stärkeren Schrumpfung. Alle drei Tone vergrößerten die Stabilität der Presstöpfe nach anfänglicher Trocknung (Abb. 2). Der umgelagerte Ton 36M erwies sich hierbei am effektivsten, um die Bindigkeit der Presstöpfe zu erhöhen. Hier konnte eine Steigerung der Druckfestigkeit von fast 100 kPa bei Zugabe von 60 kg/m³ Ton nachgewiesen werden (Abb. 2).

## 3.2 Einfluss der Tonbeimengung auf die Wiederbenetzbarkeit

Bei den heute üblichen „Ebbe/Flut“–Systemen wird das Bewässerungswasser durch Anstau in die Wurzelzone eingebracht. Üblicherweise wird Wasser für einen Zeitraum von 5-10 Minuten in einer Höhe von maximal 10 mm angestaut. Je schneller der kapillare Aufstieg erfolgt, desto besser ist die Durchnässung des Substrates und umso schneller kann das Wasser wieder abfließen, um Staunässe zu vermeiden. Daher ist die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme sehr wichtig. In dieser Arbeit wurde die Wasseraufnahme von Substraten durch den kapillaren Aufstieg in dem von der Stiftung RHP (Regeling Handelspotgronden = niederländisches Qualitätssicherungssystem für Substrate) entwickelten WOK-Apparat (WOK = wateropnamekarakteristiek, Abb. 3) im Labor der Klasmann-Deilmann GmbH gemessen. Dabei wurde die Wasseraufnahme zeitabhängig aufgezeichnet. Die ausgewählten Tone wurden zur Standardtorfmischung gegeben, die gekalkt (6,0 kg/m³) und gedüngt wurden (PG-Mix 14-16-18, 1,1 kg/m³). Neben verschiedenen Tonmengen wurden auch verschiedene Siebfraktionen der Tone eingesetzt.

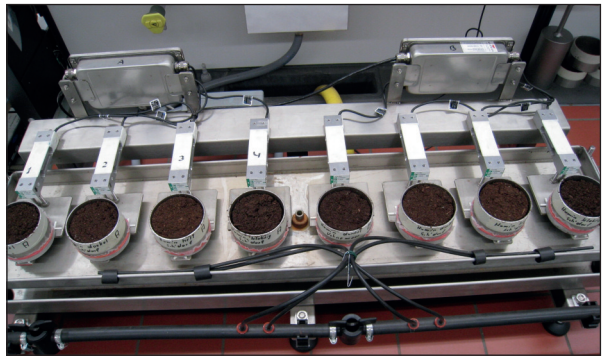


Abb. 3: WOK Apparat zur Bestimmung der Wasseraufnahmecharakteristik
WOK-Apparatus for the determination of water uptake characteristics

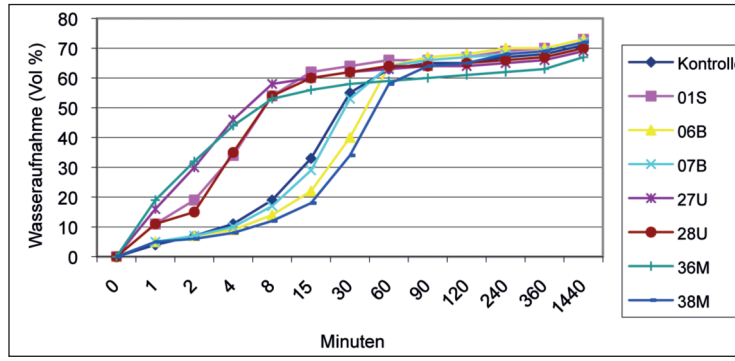
Die WOK-Messungen zeigen, dass die Zugabe von 20 kg/m³ Bentonit (06B und 07B) nur einen geringen bzw. neutralen Effekt auf die Wasseraufnahme hat (Abb. 4a). Hingegen haben Tone mit größeren Tonplättchen, der Saprolith 01S, der umgelagerte Ton 27U und 28U und auch die Tonmischung 36M, einen positiven Effekt auf die Wasseraufnahme.

In einem weiteren Versuch wurde der Ton 01S gebrochen und mittels Siebung fraktioniert. Der Zusatz feinerer Siebfraktionen des saprolithischen Tones 01S erhöhte markant die Wasseraufnahmerate im Vergleich zu gröberen Fraktionen. Bereits der Zusatz von 5 kg Ton/m³ der Fraktion 0-0,063 mm verdoppelte die aufgenommene Wassermenge nach 15 min. Die Zugabe von 30 kg dieses Tons pro m³ resultierte in einem fünffachen Anstieg der nach 15 min aufgenommenen Wassermenge (Abb. 4b). Der Einsatz der groben Fraktion (2,0-4,0 mm) ergab keinen signifikanten Einfluss auf die Wasseraufnahme bei beiden Aufwandmengen. Wenn Tone zur Erhöhung der Wasseraufnahmerate und Verbesserung der Wiederbenetzbarkeit torfbasierter Substrate ausgewählt werden, dann sind der Grad der Aufbereitung (Mahlfeinheit) und die zugesetzte Menge neben dem Tontypus entscheidende Größen. Da reiner Torf selbst erhebliche Unterschiede im Verlauf der Wasseraufnahme zeigen kann, ist es notwendig für jeden Versuch eine neue Kontrollmischung mit einzubeziehen. Siehe hierzu auch die Unterschiede in Abbildung 4a und b.

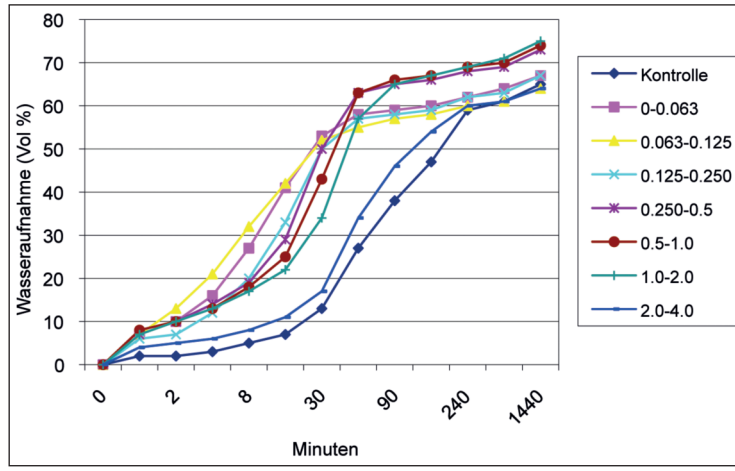
## 3.3 Pflanzenbauliche Untersuchungen

### 3.3.1 Mn in Substrattonen – schädlich für Pflanzen?

Mangan (Mn) ist für Pflanzen ein essentieller Mikronährstoff, welcher jedoch in zu hohen Konzentrationen auch phytotoxisch wirken kann. Pflanzen nehmen Mn aus der Bodenlösung als $Mn^{2+}$ auf. Die Konzentration an $Mn^{2+}$ in der Lösung ist dabei stark vom pH-Wert und Redoxpotential abhängig. Unter aeroben Bedingungen und pH-Werten >5,5 liegt Mn vor allem in Form von Mn-Oxiden vor, die eine geringe Löslichkeit aufweisen. Bei niedri-




a




b

Abb. 4: Wasseraufnahme des eingesetzten Standardtorfes bei Zusatz von jeweils 30 kg/m³ von sieben verschiedenen Tonen (a) sowie Ton 01S in verschiedenen Fraktionen (0-0,063 bis 2,0-4,0 mm) (b)
Water uptake of the standard peat blend with addition of each 20 kg of seven different clays (a) and of clay 01S in particle size fractions from 0-0.063 to 2.0-4.0 mm (b)

geren pH-Werten und unter reduzierenden Bedingungen (z. B. bei Wasserüberstau) kann es aber leicht zu Mn-Toxizität kommen (MILLALEO et al. 2010). Die Abschätzung des pflanzenverfügbaren Mn in Substraten ist daher äußerst schwierig. Hierzu wird u.a. das aktive Mn (Summe des austauschbaren und leicht reduzierbaren Mn) verwendet. Um die Gefahr von Mn-Toxizität in tonhaltigen Substraten auszuschließen, wurde in den Niederlanden ein Grenzwert von 500 mg aktivem Mn pro kg Ton festgesetzt (STICHTING RHP 2003). Die Dynamik von Mn in Torf-Ton Substraten sollte in dieser Arbeit charakterisiert und der bestehende Grenzwert für Mn in Tonmineralen wissenschaftlich überprüft werden.

Für die Experimente wurden Substrattone mit unterschiedlichen Gehalten an aktivem Mn ausgewählt (Tab. 4) und mit einem Anteil von 10 Vol. % in Weißtorfsubstrate eingemischt. Zusätzlich wurde reiner Weißtorf mit steigender Mn-Düngung von 1-400 mg Mn $l^{-1}$ Sub-

strat als Kontrolle verwendet. Mn-sensitive Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris nanus* ‚Saxa‘) wurden in die vorbereiteten Substrate ausgesät und über 5 Wochen kultiviert. Weiterhin wurde der Einfluss der Substratfeuchte auf das Auftreten von Mn-Toxizität untersucht. Alle Versuche wurden mit 5 Wiederholungen durchgeführt.

Unter normalen, aber auch unter Mn-mobilisierenden Kulturbedingungen zeigten die Pflanzen, die in den tonhaltigen Substraten kultiviert wurden, keinerlei Anzeichen von Mn-Toxizität, auch bei aktiven Mn Gehalten aus dem Ton von 270 mg Mn $l^{-1}$ Substrat. In reinem Weißtorf hingegen zeigten sich erste Mn-Toxizitätssymptome ab einer Düngung von 100 mg Mn $l^{-1}$ Substrat (Abb. 5). Ein Grenzwert für aktives Mn in Substrattonen scheint somit nicht gerechtfertigt.

Tab. 4: Gehalte an aktivem Mn in Tonen und Substraten
Content of active Mn in clays and horticultural growing media

| Substrate Torf + Mn[a] | Mn Ton [mg kg-1] | Mn Substrat [mg $l^{-1}$] |
|---|---|---|
| Mn 1 | - | 1 |
| Mn 50 | - | 38 |
| Mn 100 | - | 67 |
| Mn 200 | - | 182 |
| Mn 400 | - | 351 |
| Torf-Ton Mischungen | | |
| Torf + 15B | 4 | 1 |
| Torf + 36M | 18 | 2 |
| Torf + 01S | 29 | 6 |
| Torf + 38M | 298 | 31 |
| Torf + 07B | 591 | 59 |
| Torf + 11B | 2354 | 266 |

[a] in mg Mn $l^{-1}$ Substrat

### 3.3.2 Einfluss der P-Pufferung von Substrattonen auf die Kultursicherheit von Topfpflanzen

Der essentielle Pflanzennährstoff Phosphor liegt im Boden häufig an mineralische Oberflächen gebunden vor und nur ein kleiner Anteil, etwa 0,1% des Gesamt-Phosphor-Pools, befindet sich in der Bodenlösung. Die P-Sorptionskapazität von Böden variiert sehr stark und die P-Löslichkeit hängt dabei vor allem von der Bindungsform und dem pH-Wert ab (Holford 1997). Die Fähigkeit eines Bodens, Nährstoffe pflanzenverfügbar zu speichern und bei Bedarf wieder an die Bodenlösung abzugeben, wird als Puffervermögen bezeichnet. Ein Ausschütteln der Tone in einer P-haltigen Lösung eignet sich gut, um die Sorptionsfähigkeit zu beschreiben. Daneben stehen verschiedene Extraktionsverfahren zur Ver-

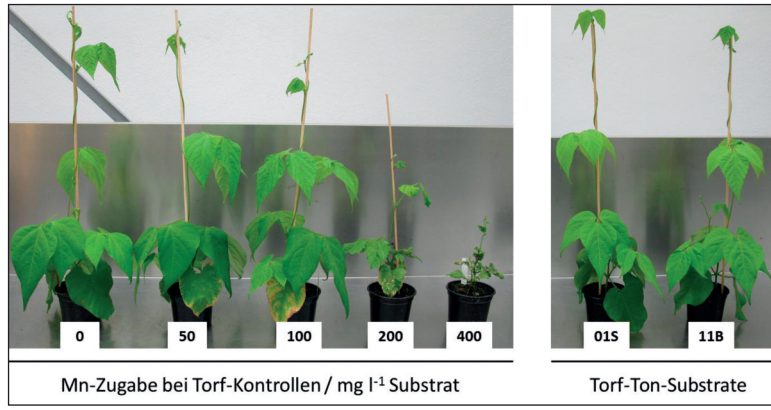



Abb. 5: Einfluss von Mn-Zugabe zu Weißtorf (links) und des genutzten Substrattons (rechts) auf das Wachstum von Buschbohnen (01S = niedrige Gehalte an aktivem Mn, 11B = hohe Gehalte an aktivem Mn)
Influence of different Mn supply in pure peat (left) and the usage of different substrate clays (right) on the growth of bean plants (01S = low active Mn, 11B = high active Mn)

fügung, um das pflanzenverfügbare P in Böden zu charakterisieren. In Deutschland finden vor allem die CAL-Methode (Schüller 1969) und die CAT-Methode (Alt & Peters 1992) Anwendung.

Um die Nährstoff-Pufferfähigkeit von Substraten zu erhöhen und auch bei fehlerhafter Auf- und Nachdüngung eine relativ ausgeglichene Nährstoffversorgung der Kultur zu gewährleisten, wird in der Praxis oft Ton in unterschiedlichen Mengen zugemischt. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der P-Pufferung verschiedener Substrattone auf die Kultursicherheit und die Qualität von Topfpflanzen bei fehlerhafter P-Nachdüngung zu untersuchen.

Für die Versuche wurden zuerst 9 Substrattone in einem Schüttelexperiment mit 500 mg P $l^{-1}$ auf ihre P-Sorptionsfähigkeit hin untersucht. Aus diesen wurden vier Tone mit unterschiedlicher Sorptionskapazität (01S + 04S = niedrige, 06B + 39W = hohe) für die Pflanzenversuche ausgewählt und in einem Anteil von 20 Vol. % in Weißtorf-Substrat eingemischt. Reiner Weißtorf diente als Kontrolle. Alle Substrate wurden vor Versuchsbeginn auf den gleichen CAT-löslichen P-Gehalt von 25 mg P $l^{-1}$ Substrat aufgedüngt. Als Versuchspflanze wurde *Impatiens walleriana* `Candy Coral Bee verwendet. Die P-Konzentration in der Bewässerungsdüngung wurde von 0 mg P $L^{-1}$ (keine) über 17 mg P $L^{-1}$ (mittel) bis 35 mg P $L^{-1}$ (hoch) variiert.

Die P-Sorptionsfähigkeit der 9 ausgesuchten Tone konnte durch ein einfaches Ausschütteln der Tone in einer P-haltigen Lösung verlässlich bestimmt werden. Die Tone unterschieden sich dabei z.T. sehr deutlich voneinander und die P-Sorption war vor allem von

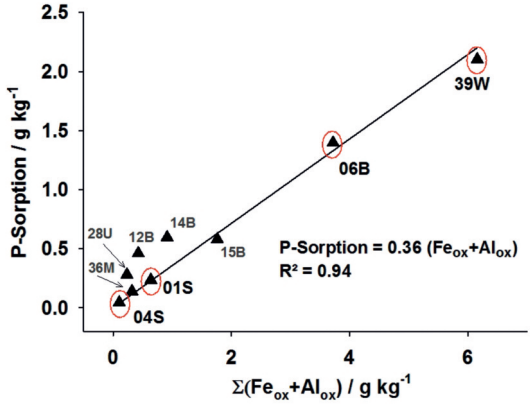



Abb. 6: Korrelation von oxalatlöslichem Eisen und Aluminium ($Fe_{ox}$+$Al_{ox}$) und P-Sorption bei 9 ausgewählten Substrattonen. Die markierten Tone wurden für die Pflanzenversuche ausgewählt
Relationship between the content of oxalate soluble Fe and Al ($Fe_{ox}$+$Al_{ox}$) and the P-sorption of 9 different clays. Marked clays were used in the plant experiments

dem Gehalt an amorphen Fe- und Al-Oxiden abhängig (Abb. 6). Daher waren auch die Düngermengen zum Erreichen des gleichen CAT-löslichen P-Gehaltes höher, je höher die Sorptionskapazität eines Tones war.

Nach zehnwöchiger Kultur zeigten sich deutliche Unterschiede in der Qualität der Pflanzen in Abhängigkeit der Nachdüngung und des eingesetzten Substrates. Bei fehlender oder schwach konzentrierter Nachdüngung konnten in reinem Torf und in den schwach gepufferten Torf/Ton-Substraten deutliche Symptome von P-Mangel beobachtet werden (Abb. 7). Die Pflanzen in den stärker gepufferten Substraten zeigten in diesen Düngungsstufen ein besseres Wachstum als diejenigen, die in den schwach gepufferten Substraten kultiviert wurden. Gleichzeitig wiesen sie auch höhere P-Konzentrationen in der Trockenmasse auf. Es zeigte sich, dass die P-Bereitstellung aus dem Substrat bei Einsatz von stark gepufferten Tonen bis zu 100 % höher war als bei schwach gepufferten Tonen. Dadurch können Unregelmäßigkeiten in der P-Nachdüngung und P-Aufnahme der Pflanzen bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden.

### 3.3.3 Einfluss der K-Pufferung von Substrattonen auf die Kultursicherheit von Topfpflanzen

Kalium kommt im Boden in vier verschiedenen Bindungsformen vor: als Baustein im Kristallgitter von primären Silicaten wie Feldspäten, als nicht-austauschbares K in Zwischenschichten von Dreischichtsilicaten, als austauschbares K bevorzugt in aufweitbaren Tonmineralen sowie Humusbestandteilen und als Ion in der Bodenlösung (Scheffer & Schachtschabel 2010). Sinkt durch den Entzug von K durch die Pflanze die K-Konzen-

Abb. 7: Wachstum von *Impatiens wallerina* bei unterschiedlicher P-Nachdüngung unter Zugabe von schwach P-pufferndem Ton 04S (oben) und stark P-pufferndem Ton 06B (unten)
Growth of *Impatiens walleriana* in peat-clay mixtures 04S (low P buffering capacity) and 06B (high P buffering capacity) at varying P concentrations in the fertigation solution

tration in der Bodenlösung, wird die Freisetzung von austauschbarem und nicht-austauschbarem K aus den Tonmineralen gefördert. Für Pflanzen ist K ein essentieller Nährstoff. Der K-Bedarf von Pflanzen unterscheidet sich zwischen Pflanzenarten und Entwicklungsstadien und muss bei der Kultur von Topfpflanzen berücksichtigt werden. Fehler in der K-Nachdüngung können leicht zu K-Mangel und Qualitätsminderung führen. Der Einsatz eines stark K-gepufferten Substrattons könnte hingegen eine kontinuierliche K-Verfügbarkeit begünstigen. Zuerst erfolgte eine Charakterisierung der Tone an Hand von K-Sorptionsisothermen und K-Pufferkurven (Abb. 8). Für die Pflanzenversuche wurden die Tone mit einem Anteil von 20 Vol. % in aufgedüngte Weißtorfsubstrate gemischt. Als Kontrolle diente reiner Weißtorf. Alle Substrate wurden zu Kulturbeginn auf einen CAT-löslichen K-Gehalt von 60 mg $l^{-1}$ Substrat aufgedüngt und die K-Verfügbarkeit mit den Extraktionsmitteln CAT, CAL und Ammoniumacetat bestimmt. Als Versuchspflanze wurde *Chrysanthemum indicum* gewählt, welche ein hohes vegetatives Wachstum und eine hohe Nährstoffaufnahme hat. Die K-Nachdüngung wurde in drei Stufen variiert: „keine“, „verspätete“ und „sofortige“ Nachdüngung.

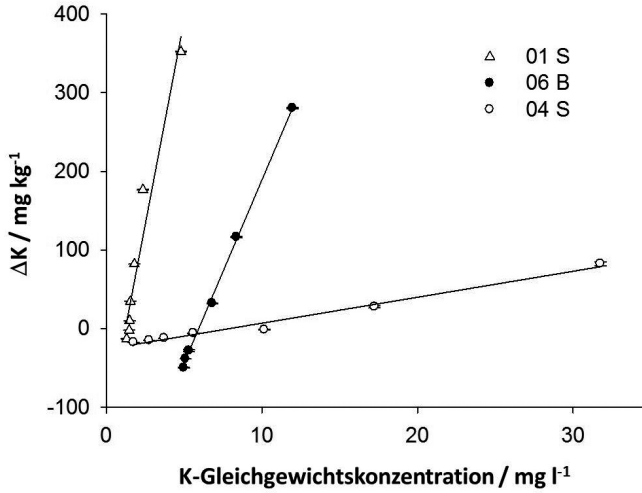



Abb. 8: K-Sorptionsisothermen der Tone 01S, 06B und 04S
K sorption isotherms for the clays 01S, 06B and 04S

Die untersuchten Substrattone unterschieden sich deutlich in ihrer Fähigkeit, K zu sorbieren und zu desorbieren (Abb. 8). Die Tone 01S und 06B zeigten eine deutlich stärkere K-Sorption als der Ton 04S, doch nur der Ton 06B war auch in der Lage, größere K-Mengen zu desorbieren. Bemerkenswert ist der deutliche Unterschied der im Mineralbestand ähnlichen Saprolithe 01S und 04S. Ein wesentlicher Unterschied beider Tone liegt in dem hohen Eisengehalt der Illite in 01S. Da Eisen zumindest partiell auch zweiwertig vorliegt, handelt es sich hier um nicht rein dioktaedrische, sondern vielmehr um trioktaedrische Illite, sogenannte Ledikite (PETZOLD & HINTZ 1979), in denen eine bedeutend bessere Freisetzung von K erfolgen kann (SCHELLHORN 1993, MÜLLER 1967).

Nach 10-wöchiger Kultur zeigten sich deutliche Unterschiede im Wachstum und in der Qualität der Versuchspflanzen in Abhängigkeit von der K-Nachdüngung und des verwendeten Substrates. In den schwach gepufferten Substraten Torf und Torf+04S waren bei fehlender K-Nachdüngung deutliche Symptome von K-Mangel sichtbar, während die Pflanzen aus den stärker gepufferten Substraten 01S und 06B kaum Mangelsymptome zeigten und auch ein erhöhtes Sprosstrockengewicht aufwiesen (Abb. 9).

Die Ergebnisse haben deutlich gemacht, dass sich gut K-gepufferte Substrattone dafür eignen, die K-Verfügbarkeit und -Nachlieferung für die Kulturpflanze signifikant zu verbessern. Die Fähigkeit, nicht-austauschbar gebundenes Kalium im Laufe der Wachstumszeit pflanzenverfügbar abzugeben, ist dabei das wichtigste Kriterium. So war die K-Nach-

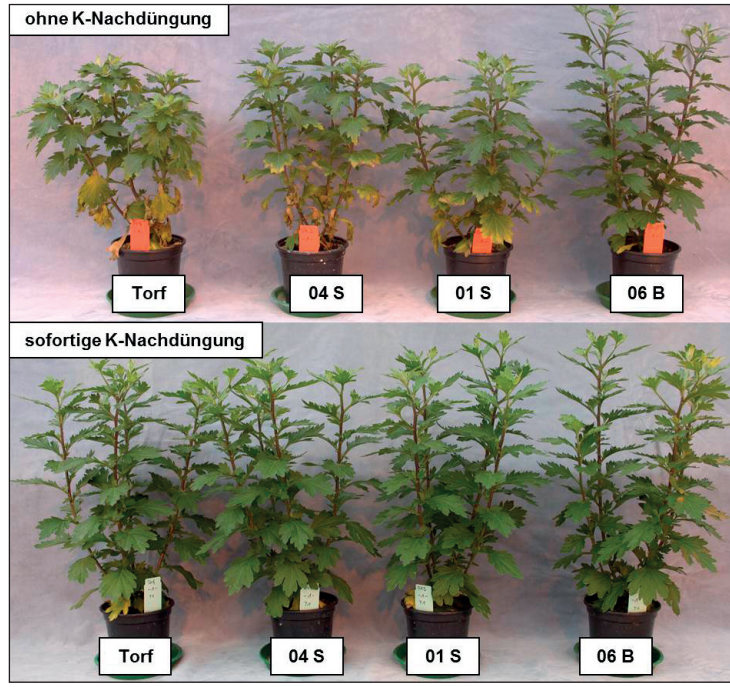



Abb. 9: Wachstum von *Chrysanthemum indicum* bei unterschiedlicher K-Nachdüngung (oben = ohne Nachdüngung; unten = sofortige Nachdüngung) in Torf und in drei Torf-Ton Substraten mit unterschiedlicher K-Pufferung : schwach K-puffernd = Torf und Torf+04S; stark K-puffernd = Torf+ Tone 01S + 06B
Growth of *Chrysanthemum indicum* in peat and peat-clay mixtures 04S (low K buffering capacity), 01S and 06B (high K buffering capacity) at varying beginning of K fertigation

lieferung während der Versuchsdauer bei Ton 06 B rund zweimal höher als bei Ton 04 S. Grund dafür ist der Mineralbestand der Tone: 06B ist ein smektitreicher Ton mit hoher negativer Schichtladung, 01S und 04S bestehen hingegen vorwiegend aus Illiten.

## 4. Ausblick

Unsere Studie belegt, dass mit Tonen verschiedene physikalische wie auch chemische Eigenschaften in torfbasierten Kultursubstraten optimiert werden können. Die Aufwandmenge, die chemische wie mineralogische Zusammensetzung eines Tones, dessen Genese (primäre oder sekundäre Lagerstätte) sowie die Aufbereitungsform spielen für die Effizienz im Substrat eine bedeutende Rolle. Ein einziges Tonprodukt kann häufig nicht alle nutzbaren Eigenschaften in sich vereinen. Deshalb scheinen der Einsatz verschiedener

Tonprodukte und gegebenenfalls deren Kombination je nach Anwendungsfall und Substrat für eine optimale Nutzung der Toneigenschaften im Hinblick auf leistungsoptimierte Substrate zielführend.

## 5. Danksagung / Förderhinweis

Das Forschungsprojekt „Steuerfunktionen von Tonen/Tonmineraloberflächen in gärtnerischen Substraten – Erfassung von Toneigenschaften und deren Parametrisierung zur Optimierung der Pflanzenqualität“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Sonderprogramms ‚Mineraloberflächen – von atomaren Prozessen zur industriellen Anwendung‘ im Rahmen des F&E Programmes ‚Geotechnologien‘ gefördert; Förderzeitraum 1.8.2008 - 31.12.2011. Förderkennzeichen: 03G0722.

## 6. Literaturverzeichnis

ALT, D. & PETERS, I. (1992): Die $CaCl_2$/DTPA- Methode zur Untersuchung gärtnerischer Erden auf Mengen- und Spurenelemente. – Agribiol. Res. **45**: 204-214.

DEUTSCHES PATENTAMT (1952): Verfahren zur Herstellung gärtnerischer Erden. Patentschrift Nr. 832 897, Klasse 16, Gruppe 14.

FISCHER, P. (2000): Gärtnerische Kultursubstrate. – AID-Heft 1085, 51 S.

GRANTZAU, E. (1998): Tone für Substrate. – Deutscher Gartenbau **49**: 6-10.

HOLFORD, I.C.R. (1997): Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants. – Aust. J. Soil Res. **35**: 227-239.

ISMAIL, S.M. & OZAWA, K. (2007): Improvement of crop yield, soil moisture distribution and water use efficiency in sandy soils by clay application. – Applied Clay Science **37:** 81-89.

KIPP, J.A. (1998): De effecten van toegoeving van klei aan potgronden. RHP project report.

MILLAELEO, R., REYES-DIAZ, M., IVANOV, A.G., MORA, M.L. & ALBERDI, M. (2010): Mn as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. – J.Soil Sci. Plant Nutr. **10**: 476-494.

MILLER, D.M. & MILLER, W.P. (2000): Land application of wastes. – In: Handbook of Soil Science, Ed.: M.E. Sumner, G-217-G245.

MÜLLER, G. (1967): Der Einfluss der mechanischen Zerkleinerung auf den Kaliumgehalt von Biotitfraktionen. – Contr. Mineral. and Petrol. **15**: 356-361.

PETZOLD, P. & HINZ, W. (1979): Silikatchemie; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).

REUTER, G. (1994): Improvement of sandy soils by clay-substrate application. – Appl. Clay Sci. **9**: 107-120.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

SCHELLHORN, M. (1993): Experimentelle Untersuchungen der mineralogischen Veränderung von Tonmineralen nach Kontakt mit Deponiesickerwässern im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Deponiebasisabdichtungen. – Dissertation TU Clausthal.

SCHMILEWSKI, G. (2008): The role of peat in assuring the quality of growing media. – Mires and Peat **3**: 1-8; http://www.mires-and-peat:net/.

SCHÜLLER, H. (1969): Vanadatmethode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren P in CAL-Extrakten. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **123**: 49-63.

STICHTING RHP (2003): RHP methodebeschrijving MANGAAN AKTIEF. MG 's-Gravenzande, The Netherlands.

UZUKI, S., NOBLE, A.D., RUAYSOONGNERN, S. & CHINABUT, N. (2007): Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in Northeast Thailand. – Arid Land Research and Management **21**: 37-49.

VERHAGEN, J.B.G.M. (2000): Effect van klei in potgrondmengsels. RHP project report.

VERHAGEN, J.B.G.M. (2004): Effectiveness of clay in peat-based growing media. In: Alsanius, Jensen & Asp (Hrsg.): Proc. Int. Symp. on Growing Media, Acta Horticulturae **644**: 115-122.

Anschriften der Verfasser:

Dr. M. Schellhorn, E. Schmidt
Stephan Schmidt KG
Bahnhofstraße 92
D-65599 Langendernbach
E-Mail: florisol@schmidt-tone.de

PD Dr. S. Dultz, J. Walsch, M. Below
Institut für Bodenkunde, Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Straße 2
D-30419 Hannover
E-Mail: dultz@ifbk.uni-hannover.de

Prof. Dr. M.K. Schenk, I. Binner, M. Meyer
Institut für Pflanzenernährung, Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Straße 2
D-30419 Hannover
E-Mail: schenk@pflern.uni-hannover.de

G. Schmilewski
Klasmann Deilmann GmbH
Georg-Klasmann-Straße 2-10
D-49744 Geeste-Groß Hesepe
E-Mail: gerald.schmilewski@klasmann-deilmann.de

Manuskript eingegangen am 22. April 2013,
begutachtet und angenommen am 1. Juli 2013