

Biosystems Engineering Report 20066

Hans-Christian Gudehus

Dämpfen im Gartenbau

Biosystems Engineering Laboratory (BLab), Hochschule Osnabrück, University of Applied Sciences, Germany

Hans-Christian Gudehus: Dämpfen im Gartenbau

Biosystems Engineering Report 20066, 1–35

(2006)

Published by

Biosystems Engineering Laboratory (B Lab)
Hochschule Osnabrück - University of Applied Sciences
Osnabrück, Germany
www.blab-osnabrueck.de



Dämpfen im Gartenbau

- 1 Einleitung

- 2 Wirkung von Hitze und Dampf als Pflanzenschutzmaßnahme und biologische und chemische Veränderungen im Boden
 - 2.1 Notwendigkeit einer Boden- oder Kultursubstratentseuchung
 - 2.2 Bodenbürtige Krankheitserreger
 - 2.3 Abtötung von Krankheitserregern durch Hitze
 - 2.4 Nebenwirkung der Bodendämpfung
 - 2.4.1 Biologische Veränderungen
 - 2.4.2 Chemische Veränderungen
 - 2.5 Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum

- 3 Dämpftechnik
 - 3.1 Dampferzeugung und Verteilersysteme
 - 3.1.1 Kessel (Dampferzeuger)
 - 3.1.2 Dampfleitungen
 - 3.2 Technik der zentralen Dämpfverfahren
 - 3.2.2 Stationäre gärtnerische oder kommunale Anlagen für zeitweisen Betrieb (Haufendämpfung)
 - 3.2.3 Behälterdämpfung in einer Dämpfbox, in einem Kippanhänger und in einem Dämpfwagen
 - 3.2.4 Behälterdämpfung mit dem Erdpasteurisiergerät Sterilo
 - 3.2.5 Schnelldämpfgerät der Firma Kiefl
 - 3.3 Technik bei der Flächendämpfung
 - 3.3.1 Foliendämpfen
 - 3.3.2 Dämpfen mit Dämpfhauben
 - 3.3.3 Dämpfen mit Dämpfeggen
 - 3.3.4 Dämpfen mit dem Dämpfpflug
 - 3.3.5 Dämpfen von Freilandflächen mit einem Raupenfahrzeug
 - 3.3.6 Unterdruckdämpfen nach dem System 'Fink'
 - 3.3.7 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren
 - 3.3.8 Integriertes Dämpfen System Bioflash
 - 3.3.9 Dämpfen mit Einsatz eines Bodenaktivators zur gezielten Wiederbelebung
 - 3.4 Technik der Bodenlockerung

- 4 Physikalische Grundlagen bei der Energiezufuhr durch Wasserdampf und der Erhitzung des Bodens
 - 4.1 Energiebedarf des Bodens
 - 4.1.1 Beispiele für realistische spezifische Wärmekoeffizienten
 - 4.1.2 Umrechnung des Wassergehaltes im Boden
 - 4.2 Enthalpie des Wasserdampfes
 - 4.3 Theoretische Dampfbedarf
 - 4.4 Berücksichtigung von Wärmeverlusten
 - 4.5 Wärmeübertragung im Boden
 - 4.5.1 Wärmeübertragung aus Sicht der Wasserbilanz
 - 4.5.2 Wärmeübertragung aus Sicht der Energiebilanz
 - 4.5.3 Wärmeleitung im Boden
 - 4.5.4 Wärmeübertragung durch kondensierenden Dampf und Wärmetransport durch nach unten absickerndes Kondensat
 - 4.5.5 Zusammenfassung der einzelnen Komponenten der Wärmeübertragung

- 5 Kostenrechnung
 - 5.1 Vergleichende Kostenrechnung
 - 5.1.1 Haubendämpfen
 - 5.1.2 Foliendämpfen
 - 5.1.3 Unterdruckdämpfen nach Fink
 - 5.1.4 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren
 - 5.1.5 Mobile Dämpfeinheit mit Fahrer
 - 5.1.6 Mobile Dämpfeinheit ohne Fahrer (Vollautomat)
 - 5.1.7 Integriertes Dämpfen System Bioflash
 - 5.2 Einzelpositionen
 - 5.2.1 Kessel
 - 5.2.2 Behälterdämpfung mit Sterilo
 - 5.3 Technik der zentralen Dämpfverfahren
 - 5.3.1 Behälterdämpfung mit Sterilo
 - 5.3.2 Schnelldämpfer der Firma Kiefl

- 6 Bewertung einzelner Dämpftechniken auf der Grundlage von Messungen in Praxisbetrieben
 - 6.1 Darstellung der Wärmeübertragung beim Haubendämpfen
 - 6.2 Darstellung der Wärmeübertragung beim Foliendämpfen
 - 6.3 Darstellung der Wärmeübertragung beim Unterdruckdämpfen nach System 'Fink'
 - 6.4 Darstellung der Wärmeübertragung beim Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren
 - 6.5 Hinweis auf Messergebnisse zum Bioflash-Verfahren
 - 6.6 Überprüfung einer Neuentwicklung eines Dampfkessels mit verbesserten Emissionswerten und einem hohen Kesselwirkungsgrad

- 7 Besondere Maßnahmen bei der Dämpfung
 - 7.1 Bodenbearbeitung vor dem Dämpfen
 - 7.2 Weitere wichtige Maßnahmen vor dem Dämpfen
 - 7.3 Maßnahmen während des Dämpfens
 - 7.4 Maßnahmen nach dem Dämpfen

- 8 Literaturverzeichnis
- 9 Firmenverzeichnis
- 10 Anhang

1 Einleitung

Diese Schrift befasst sich mit einer Methode der Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen, die über den Boden auf die Pflanzen wirken, die schon mehr als hundert Jahre praktiziert wird. Seit 1970 wurde zunächst zunehmend der chemischen Bodenentseuchung der Vorzug gegeben, da sie gegenüber dem Dämpfen weniger kapital- und arbeitsintensiv ist. Damit behielt auch der Stand der Technik zum Thema Dämpfen, der mit der Veröffentlichung HEGE, H., ROß, H. (1972): Das Dämpfen von Böden und Erden KTBL-Schrift 153 dieses Thema umfassend behandelte, zwangsläufig über einen größeren Zeitraum seine Gültigkeit, da zwar durchaus technische Neuentwicklungen stattfanden, das Interesse aus der Praxis jedoch zurück ging.

Das Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren, das 1970 in den Niederlanden entwickelt und auch eingeführt wurde, bewirkte wieder eine erhöhte Aufmerksamkeit für das Dämpfen, was sich in einer ausführlichen Behandlung der Thematik in der niederländischen Fachliteratur niederschlug [DERCKX, J. M. H. (1972), DERCKX, J. M. H. und andere Autoren (1981)].

Da dieses Verfahren den Boden im Sinne des Umweltschutzes nicht negativ beeinflusst und offensichtlich eine wirkungsvolle Bekämpfung von Krankheitserregern in Bodentiefen von 30 bis 80 cm ermöglicht, war dies der Anlass, ein FuE-Vorhaben zu beantragen, um in mehreren Praxisbetrieben, verschiedene Varianten hinsichtlich des Dämpferfolges und der auftretenden Kosten zu überprüfen.

Bei diesen Messungen, die sich über mehrere Jahre zwischen 1988 und 1993 verteilten und die vom Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanziell unterstützt wurden, waren in der Zusammenarbeit - neben den Gärtnern – hauptsächlich Herr Belker von der Landwirtschaftskammer Westfalen Lippe und Herr Diedrich Wilms sowie die Studenten der Fachhochschule Osnabrück Detlev Bruckhaus, Frank Elkemann, Thomas Meier und Ludger Roling, beteiligt. Die spezielle Überprüfung der Kesseltechnik wurde durch ein Team um Herrn Prof. Rottmann von der Fachhochschule Münster/Abteilung Steinfurt durchgeführt.

In diesem Zeitraum wurde mit der KTBL-Sonderveröffentlichung BELKER, N. (1990): Bodenentseuchung durch Dämpfen diese neue Dämpftechnik ausführlich beschrieben und den traditionellen Verfahren zugeordnet.

Neben den verbesserten Methoden der Dämpftechnik in tieferen Bodenschichten wurden aber in jüngster Zeit auch Verbesserungen in der Automatisierung und rationelleren Bekämpfung von Unkräutern in relativ geringen Bodentiefen weiterentwickelt. Nicht zuletzt hat sich auch die Kesseltechnik weiter entwickelt und entspricht den aktuellen Ansprüchen hoher Wirkungsgrade und geringerer schädlicher Emissionen.

Bei der Durchsicht der Literatur zum Dämpfen fällt auf, dass neben dem, teils sehr individuell gewonnenen Wissen in bestimmten Anbaubetrieben mit jeweils

charakteristischen Kulturen, Klima- und Bodeneigenschaften, wissenschaftlich untermauerte Untersuchungen vorliegen, die sowohl die physikalische Bodenstruktur als auch die Bodenzusammensetzung aus den unterschiedlichen Mineralien und Humusanteilen sehr differenziert behandeln. [JOHNSON, D. und AAS, K. (1960), BOROS, G. (1954)]

Die Ausführungen dieser Schrift beschränken sich darauf, bei den unterschiedlichsten Bodenstrukturen und Bodenzusammensetzungen in der gärtnerischen Praxis nur dort zu differenzieren, wo nennenswerte Unterschiede bei der Erhitzung des Bodens durch Dampf auftreten, im wesentlichen mit folgender Begründung: Zwar liegen in Anbaubaugebieten, die sich intensiv mit dem Dämpfen befassen, sehr gute Kenntnisse über die Bodeneigenschaften vor, diese lassen sich jedoch nicht ohne umfangreiche Voruntersuchungen auf andere Kulturlächen übertragen. Außerdem lässt sich die für den Dämpferfolg so entscheidende Gefügestruktur - zumal in unterschiedlichen Bodentiefen und auf einer größeren Fläche - messtechnisch exakt in der Praxis nicht überprüfen. Es erscheint vielmehr für die Praxis sehr wichtig, auf einfache und (ohne fremde Hilfe) schnell durchzuführende Methoden hinzuweisen, die anzeigen, ob ein Dämpferfolg zu erwarten oder eher unwahrscheinlich ist. Außerdem muss der Gärtner wissen, ob er mit technischen Hilfsmitteln, wie z.B. der Spatenmaschine, in der Regel gute Voraussetzungen schaffen kann, andererseits keine schnell wirkenden Hilfsmittel zur Verfügung stehen, dann, wenn der Boden zu feucht ist.

Da jedoch immer wieder Idealvorstellungen und Ergebnisse präsentiert werden, die alle bislang gemachten Erfahrungen negieren, wird in Kapitel 4 der Versuch unternommen, die absoluten Grenzen des physikalisch-technischen Vorgangs aufzuzeigen und die thermodynamischen Abläufe - beschränkt auf grundsätzliche Vorgänge - zu beschreiben.

Ein zusätzliches Anliegen ist, die unterschiedlichen Denkansätze und Sprachregelungen von Gärtnern, Phytopathologen, Maschineningenieuren, Ökologen und Bodenwissenschaftlern insofern Rechnung zu tragen, dass den hier verwendeten Rechenmethoden, fachlichen Begriffen und den physikalischen Einheiten relativ viel Raum und das besondere Kapitel 10 gewidmet wurde.

In der Gesamtbetrachtung der Produktionsmethoden, die die Problematik dieses Themas tangieren, gewinnen als Alternativen erdelose Kulturverfahren und Methoden in geschlossenen Bewässerungs- und Düngekreisläufen mit - vom Unterboden getrennten - speziell präparierten Substraten zunehmend an Bedeutung. Es ist jedoch nicht Anliegen dieser Schrift unterschiedliche Kulturverfahren gegenüberzustellen.

Ein wichtiges Kapitel, sozusagen die grundlegende Voraussetzung für die Entscheidung zum Dämpfen und zur Auswahl des Dämpfverfahrens, ist das Kapitel 2: Die Wirkung von Hitze und Dampf als Pflanzenschutzmaßnahme und in Hinsicht biologischer und chemischer Veränderungen im Boden, das von Prof. Dr. Walter Wohanka von der Forschungsanstalt Geisenheim bearbeitet wurde.

Die weitere Gliederung wurde nach folgender Überlegung getroffen: Das Kapitel 3 befasst sich mit einer Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren und das Kapitel 5 mit den zugehörigen Kosten. Die ergänzenden theoretischen Grundlagen und die Versuchsergebnisse werden in den Kapiteln 4 und 6 behandelt.

Die Kapitel 3 und 6 basieren in weiten Teilen auf Aussagen, die in den Versuchsberichten des Verfassers aus früheren Jahren veröffentlicht wurden. Die dort gezeigten graphischen Darstellungen wurden – wenn nicht anders vermerkt – wesentlich von Herrn Wilms erstellt.

Osnabrück, Januar 2003 Hans-Christian Gudehus

2 Die Wirkung von Hitze und Dampf als Pflanzenschutzmaßnahme und in Hinsicht biologische und chemische Veränderungen im Boden

2.1 Notwendigkeit einer Boden- oder Kultursubstratentseuchung

Sowohl bei der Kultur im gewachsenen Boden als auch in den verschiedensten organischen und anorganischen Substraten stellen zahlreiche bodenbürtige Krankheitserreger und Schädlinge eine erhebliche Bedrohung für die Pflanzengesundheit und damit den Kulturerfolg dar. Hinzu kommt die Verseuchung mit Unkrautsamen. Während manche Erreger nur kurzfristig im Boden überleben können und in vergleichsweise kurzen Abständen ihre jeweilige Wirtspflanze benötigen (z.B. bestimmte Bakterien) können andere Erreger Dauerorgane ausbilden oder sich saprophytisch ernähren und auf diese Weise nach erfolgter Kontamination mitunter über viele Jahre den Boden verseuchen. Zahlreiche natürliche Gegenspieler (Antagonisten) hemmen in der Regel die rasche Vermehrung und Ausbreitung bodenbürtiger Erreger. Durch intensive Nutzung und Anbau gleicher Kulturen in kurzen Zeitabständen kann es jedoch zur Anreicherung und letztlich zum Überschreiten der wirtschaftlichen Schadschwelle kommen. Nur gegen einen Teil der Krankheitserreger, Schädlinge oder Unkräuter stehen mehr oder weniger gut wirksame Pflanzenschutzmittel zur Verfügung. In vielen Fällen muss deshalb der Boden oder das kontaminierte Substrat von Zeit zu Zeit z.B. durch Dämpfung entseucht werden.

2.2 Bodenbürtige Krankheitserreger

Als bodenbürtige bzw. wurzelinfizierende Schaderreger kommen sowohl Viren als auch Bakterien und Pilze in Betracht. Von den Schädlingen sind es vor allem die Nematoden und Larvenstadien verschiedener Schadinsekten.

Viren sind, im Gegensatz zu anderen Krankheitserregern der Pflanze, nicht in der Lage, sich aus eigener Kraft zu vermehren. Dazu benötigen sie stets lebende Zellen. Dennoch kann auch der Boden eine wichtige Infektionsquelle darstellen. Problematisch sind vor allem nicht verrottete virushaltige Pflanzenrückstände im Boden, sie können über längere Zeit Ausgangspunkt für Virusinfektionen sein. Manche "bodenbürtige" Viren (z.B. Tabakmauche-, Tomatenringflecken- oder BreitadernVirus) benötigen im Boden lebende Vektoren wie verschiedene Nematoden (*Xiphinema*-, *Longidorus Trichodorus* Arten) oder Pilze (z.B. *Olpidium brassicae*). Andere Viren, wie Tabak-mosaik-, Tomatenzwergebush- oder Nelkenringflecken-Virus können auch ohne Vektoren vom Boden aus ihre Wirtspflanzen infizieren [MATTHEWS, (1991)]. Dies bedeutet, dass eine wirksame Bodenent-seuchung sowohl die Viren direkt als auch deren Vektoren erfassen muss.

Die meisten pflanzenpathogenen Bakterien sind in der Lage, zumindest kurzfristig, im Boden zu überleben und von dort aus die Pflanzen zu infizieren. Ähnlich wie bei den Viren stellen vor allem nicht verrottete Rückstände kranker Pflanzen ein erhebliches Gefährdungspotential dar. Nach deren Verrottung haben viele Bakterien (z.B. *Xanthomonas*-Arten) im Boden aufgrund zahlreicher Gegenspieler nur noch geringe Überlebenschancen. Manche Bakterien (z.B. *Agrobacterium tumefaciens*) können

jedoch, ohne an Pflanzenrückstände gebunden zu sein, jahrelang im Boden überdauern. Gerade gegen solche längerfristig im Boden überdauernde Bakterien stellt die Bodenentseuchung eine wichtige vorbeugende Maßnahme dar.

Zahlreiche Pilze sind in der Lage im Boden zu überdauern und saprophytisch zu überleben. Wie bei allen bodenbürtigen Erregern spielen auch hier unverrottete Rückstände infizierter Pflanzen eine wichtige Rolle als Infektionsquelle im Boden. Daneben sind aber die meisten bodenbürtigen Pilze in der Lage, mehr oder weniger widerstandsfähige Dauer- oder Ruhestadien zu bilden, mit deren Hilfe sie oft viele Jahre im Boden überdauern können. Besonders schwer bekämpfbar sind z.B. die relativ großen Sklerotien von *Sclerotinia*-, *Botrytis*- oder *Rhizoctonia* Arten. Aber auch Mikrosklerotien von z.B. *Verticillium*- oder *Cylindrocladium*-Arten weisen eine erhebliche Widerstandsfähigkeit auf. Äußerst widerstandsfähig sind auch die sogenannten Chlamydosporen der zahlreichen *Fusarium*-Arten sowie von *Thielaviopsis basicola*. Widerstandsfähige Stadien von *Pythium*- und *Phytophthora*-Arten sind die sog. Oosporen. Aber auch sexuell oder asexuell entstehende Fruchtkörperchen (Perithezien, Pyknidien etc.) mancher Pilze (z.B. *Phoma*, *Ascochyta*) können recht widerstandsfähig sein. Gegen verschiedene der genannten Schadpilze (z.B. *Fusarium*-Arten) stehen keine wirksamen Bodenfungizide zur Verfügung. Außerdem ist es im gewachsenen Boden sehr schwierig, Fungizide in ausreichenden Mengen in die erforderlichen Tiefen einzubringen. Bei ansteigendem Infektionsdruck besteht deshalb häufig die Notwendigkeit einer Bodenentseuchung oder des Wechsels zu erdelosen Kulturverfahren.

Von den bodenbürtigen Schadtieren spielen die Nematoden eine herausragende Rolle. Nicht nur als direkte Schädlinge, sondern auch als Überträger von Viren (s.o.) können sie große Bedeutung erlangen. Während die sogenannten ektoparasitischen Wurzelnematoden (z.B. *Xiphinema*, *Longidorus*, *Trichodorus* oder *Paratylenchus*) zeitlebens im Boden beweglich sind, dringen die endoparasitischen Nematoden in die Wurzeln ein. Während Endoparasiten der Gattung *Pratylenchus* stets beweglich bleiben, setzen sich die Weibchen der Wurzelzystennematoden (*Heterodera* spp.) oder Wurzelgallennematoden (*Meloidogyne* spp.) in der Wurzel fest und bilden widerstandsfähige Zysten oder Gallen. Zu bedenken ist, dass auch Blatt- und Stengelnematoden (*Aphelenchoides*- bzw. *Ditylenchus*-Arten) die Pflanzen oft vom Boden aus befallen. Zur Zeit gibt es, mit Ausnahme eines chemischen Bodenentseuchungsmittels keine Pflanzenschutzmittel zur wirksamen Bekämpfung von wurzelparasitischen Nematoden. Da der Anbau sogenannter Feindpflanzen nur gegen spezielle Nematoden wirksam und eine weitgestellte Fruchtfolge oft nicht realisierbar ist bleibt die Bodenentseuchung eine der wichtigsten Maßnahmen gegen diese Schädlinge.

Neben den Nematoden kommen noch verschiedene Insekten bzw. deren Larvenstadien als Bodenschädlinge in Betracht (z.B. Engerlinge, Drahtwürmer, Erdräupen, *Tipula*-Larven). Sie allein sind jedoch in der Regel kein ausreichender Grund für die aufwändige Maßnahme einer Bodenentseuchung.

Einen Sonderfall stellt die sogenannte Bodenmüdigkeit dar. Darunter versteht man eine spezielle Form von Nachbauschäden, die sich durch Spezifität (z.B. Apfel nach

Apfel) und längjährige Persistenz (10 - 20 Jahre) auszeichnet. Sie tritt vor allem beim Anbau von Rosaceen auf. Nach neueren Forschungsergebnissen scheinen Aktinomyceten eine besondere Rolle als Verursacher von Bodenmüdigkeit darzustellen [OTTO et al., (1993)]. Sowohl chemische als auch thermische Bodenbehandlungen können die Bodenmüdigkeit beseitigen.

2.3 Abtötung von Krankheitserregern durch Hitze

Die abtötende Wirkung von Hitze auf Mikroorganismen hängt einerseits von der Temperatur und andererseits von der Einwirkungsdauer ab. Bei den üblichen Verfahren der thermischen Bodenentsteuchung liegen die Temperaturen meist deutlich unter 100 °C, die Verhältnisse entsprechen demzufolge eher einer Pasteurisierung denn einer Sterilisation. Literaturangaben über thermale Inaktivierungspunkte von Krankheitserregern oder Schädlingen an Pflanzen berücksichtigen meistens eine Einwirkungszeit von 30 Minuten. Wichtig ist, dass es sich dabei um "feuchte Hitze" handelt. In trockenem Zustand können die Keime oft weitaus höhere Temperaturen überstehen als in feuchtem. Bei der genannten Einwirkungszeit werden die meisten Bakterien und Pilze bei einer Temperatur von etwa 70 °C abgetötet (vgl. Tabelle 1.1). Untersuchungen von BOLLEN, (1985) ergaben, dass verschiedene Unterarten von *Fusarium oxysporum* zu den wärmeresistentesten Pilzen zählen. Daraus kann man schließen, dass Temperaturen, die *Fusarium* abtöten, auch alle anderen pflanzenschädlichen Pilze erfassen. Die meisten Schädlinge und Unkrautsamen werden ebenfalls im Bereich von 60 - 70 °C abgetötet. Viele Viren, insbesondere aus der Gruppe der Tobamoviren wie Tabak- und Tomatenmosaik-Virus benötigen hingegen viel höhere Temperaturen und sind selbst bei 100 °C schwierig abzutöten [RUNIA, (1986)]. Unkrautsamen erfordern nach KOCH und HURLE, (1978) Temperaturen im Bereich von 80 bis 100 °C.

Nicht eindeutig kann die Frage beantwortet werden, bis in welche Bodentiefe die Abtötungstemperaturen reichen müssen, da über die Tiefenverseuchung gärtnerisch genutzter Böden durch Krankheitserreger nur wenig bekannt ist. Generell ist jedoch davon auszugehen, dass in gewissem Umfang durch Wurzelwachstum, Wasserbewegung oder die Bodenfauna phytopathogene Keime auch in tiefere Bodenschichten gelangen und dort von der üblichen Bodendämpfung nicht erfasst werden. So hat z.B. WEIL, (1960) nach dem Anbau von Nelken noch in 50 cm Tiefe eine erhebliche Verseuchung durch *Fusarium*-Arten beobachtet. Der Erreger der Selleriewelke (*Fusarium oxysporum* f.sp. *apii*) wurde noch in Bodentiefen von 20-40 cm festgestellt [AWUAH und LORBEER, (1986)], andere *Fusarium*-Arten waren noch in der Bodenschicht von 60-80 cm nachweisbar. Die Bedeutung der Verseuchung tieferer Bodenschichten wird aus den Untersuchungen von BENYEPHET et al., (1994) deutlich, die durch Beimpfung mit *Fusarium oxysporum* f.sp. *dianthi* in 60-75 cm Tiefe bei Nelken noch eine Befallshäufigkeit von 22 % erzeugen konnten.

2.4 Nebenwirkungen der Bodendämpfung

Die Bodendämpfung hat nicht nur positive Auswirkungen durch Abtöten der pathogenen Zielorganismen sondern auch verschiedene, teilweise unerwünschte, Nebenwirkungen. Neben den pathogenen Mikroorganismen wird auch ein Großteil der indifferenten oder gar nützlichen Mikroflora in Mitleidenschaft gezogen. Außerdem kommt es zu chemischen oder physikalischen Veränderungen, die sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken können oder die z.B. bei der Düngung berücksichtigt werden müssen.

2.4.1 Biologische Veränderungen

Böden, aber auch die verschiedenen Kultursubstrate, werden von einer Vielzahl von Mikroorganismen besiedelt. Selbst in sogenannten erdelosen Substraten entwickelt sich bereits innerhalb weniger Stunden nach Pflanzung und erster Bewässerung eine reichhaltige Mikroflora (Berkelmann 1992). Die Quantifizierung der Mikroorganismen in Böden oder Kultursubstraten ist schwierig. Schätzwerte je Gramm Boden bewegen sich im Bereich von $10^7 - 10^9$ Bakterien, $10^4 - 10^5$ Aktinomyceten und $10^5 - 10^6$ Pilze [SCHINNER und SONNLEITNER, (1996)]. Teile dieser Mikroflora können zur Entstehung eines mehr oder weniger stark ausgeprägten antiphytopathogenen Potentials führen. Wird dadurch die Entwicklung von Krankheiten unterdrückt, spricht man auch von krankheitssuppressiven Böden [BAKER und COOK, (1974)]. Dabei unterscheidet man zwischen allgemeiner und spezifischer Suppressivität. Während die allgemeine Suppressivität in Beziehung zur gesamten mikrobiellen Aktivität steht sind einzelne Mikroorganismen oder Mikroorganismengruppen für die spezifische Suppressivität verantwortlich [COOK und BAKER, (1983)]. Wichtige Gegenspieler (Antagonisten) sind vor allem bestimmte Bakterien (z.B. Bacillus-Arten oder fluoreszierende Pseudomonaden), Aktinomyceten und verschiedene Pilze (z.B. Trichoderma spp.).

Die meisten Bodenlebewesen werden in der erhitzten Zone abgetötet. Verschiedene Organismen können jedoch selbst Temperaturen von 80 °C überleben. Untersuchungen von BOLLEN, (1969) mit Gewächshausböden zeigten, dass nach dreißigminütiger Einwirkung von 80 °C noch 1,8 % der Bakterien, 1,0 % der Aktinomyceten aber nur 0,1 % der Pilze überlebten. Ausgehend von den überlebenden Mikroorganismen, Eintrag aus der Luft und Reinfektionen aus tieferen Bodenschichten erfolgt eine rasche Wiederbelebung des gedämpften Bodens. Dies zeigt sich deutlich an der Bodenatmung, einem wichtigen Schätzfaktor der mikrobiellen Aktivität. Da nach der Dämpfung verstärkt leicht verfügbares organisches Material zur Verfügung steht, kommt es ca. eine Woche nach der Erhitzung sogar kurzzeitig zu einer erhöhten Aktivität, die weit über dem ursprünglichen Wert liegt (siehe Abb.1.1). Nach einer weiteren Woche reduziert sich die Bodenatmung dann wieder auf das ursprüngliche Niveau. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich die Zusammensetzung des Bodenlebens einschneidend qualitativ verändert hat. Erst nach Wochen oder Monaten ist die Vielfalt des Bodenlebens wieder hergestellt.

Somit ist nicht verwunderlich, dass das antiphytopathogene Potential des Bodens nach der Dämpfung für eine gewisse Zeit zumindest stark reduziert ist. Erreger aus

nicht entseuchten tieferen Bodenschichten oder Randbereichen sowie Sporeneintrag aus der Luft treffen sozusagen auf ein "biologisches Vakuum" in dem sie sich mehr oder weniger ungehindert ausbreiten können. Darüber hinaus besteht nach einer Dämpfung aber auch ein erhöhtes Infektions- und Ausbreitungsrisiko durch eingeschleppte Krankheitserreger. Eine besondere Gefahr geht dabei von kontaminierten Jungpflanzen aus. Aber auch der Verschleppung mit Geräten oder Arbeitskräften kommt eine erhebliche Bedeutung zu. Diesen Risiken muß durch sorgfältige Dämpftechnik und entsprechende Hygienemaßnahmen entgegengewirkt werden. Bei unsachgemäßer Dämpfung oder Missachtung der Pflanzenhygiene können die Schäden in bestimmten Fällen nach einer Bodenentseuchung sogar größer sein als vorher.

2.4.2 Chemische Veränderungen

Veränderungen der chemischen Bodeneigenschaften durch die Dämpfung werden ausführlich von SONNEVELD,(1979) beschrieben. Besonders stark greift die Bodendämpfung in den Mangan- und Stickstoffhaushalt ein. Manganverbindungen im Boden, die normalerweise nicht pflanzenverfügbar sind, werden durch Dämpfung in leicht verfügbare Verbindungen umgewandelt. Verschiedene Prozesse wie Dehydrierung, Freisetzung aus organischen Verbindungen und Reduzierung von Manganoxiden spielen dabei eine Rolle. Je höher die Temperatur und je länger die Dämpfzeit desto mehr Mangan wird verfügbar (siehe Abb.1.2). Bei Temperaturen um 70 °C ist dieser Effekt vergleichsweise gering. Die Freisetzung ist auch sehr stark von der Bodenart abhängig (siehe Tabelle 1.2). In sandigen Böden wird demnach weniger Mangan freigesetzt als in tonigen Böden. Wie Abb. 1.3 zu entnehmen ist, wird das durch die Dämpfung freigesetzte Mangan nur sehr langsam wieder festgelegt. Die Begründung für diese relativ langsame Manganfixierung nach einer Dämpfung sieht SONNEVELD, (1979) darin, dass die manganoxidierenden Bakterien durch die Dämpfung abgetötet wurden.

Wichtig sind auch Veränderungen, die den Stickstoffhaushalt betreffen. In einem belebten Boden wird Ammonium üblicherweise relativ schnell durch nitrifizierende Mikroorganismen in Nitrat umgewandelt. Durch die Bodendämpfung werden diese Mikroorganismen jedoch abgetötet. Die Folge ist eine Anreicherung von relativ großen Mengen an austauschbarem Ammonium und manchmal auch geringen Mengen an Nitrit (siehe Abb. 1.5). Aber auch der Nitratgehalt wird reduziert. SONNEVELD, (1979) führt letzteres vor allem auf Auswaschung und Umwandlung in gasförmigen Stickstoff zurück. Wie das Beispiel in Abb. 1.5 zeigt, halten diese Störungen im Stickstoffhaushalt relativ lange an. Die Veränderungen im Stickstoffhaushalt sind bei Dämpftemperaturen um 70 °C weit weniger stark ausgeprägt als bei 100 °C.

2.5 Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum

Pflanzenschäden nach einer Bodendämpfung sind in den meisten Fällen auf zu hohe Gehalte an verfügbarem Mangan zurückzuführen. Besonders gilt dies bei manganempfindlichen Kulturen wie Salat [SONNEVELD, (1968)], [WIEBE und WETZOLD, (1969)] oder Rosen [BROER und SONNEVELD, (1973)]. Aber auch bei anderen Pflanzenarten wie Chrysanthenen, Nelken oder Gurken können solche

Schäden auftreten [HEIKKI, (1967)], [MESSING, (1964)]. Dabei kann auch der pH-Wert des Bodens eine Rolle spielen. SONNEVELD, (1979) beobachtete bei der an sich wenig manganempfindlichen Tomatenkultur Schäden in Verbindung mit niedrigem pH-Wert. Auch die Veränderungen im Stickstoffhaushalt des Bodens können sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken. Vor allem die erhöhten Ammonium- und teilweise auch Nitritgehalte sind zu berücksichtigen [SONNEVELD, (1969)].

Um das Risiko von Pflanzenschäden zu reduzieren, empfiehlt BELKER, (1990) eine leichte Bodenlockerung nach dem Dämpfen und das Vermeiden von Bodenverdichtungen (unnötiges Befahren oder Betreten gedämpfter Flächen). Bei empfindlichen Kulturen ist vor dem Wiederbepflanzen die Einhaltung einer Wartezeit von zwei bis drei Wochen zu empfehlen. Das teilweise praktizierte Pflanzen in den noch warmen Boden kann bei hohen Manganreserven im Boden Probleme bereiten. Wegen der Veränderungen im Stickstoffhaushalt ist eine sachgerechte Düngung sehr wichtig. Wenig düngen und wenig wässern ist grundsätzlich verkehrt [BELKER, (1990)].

Stärkere Veränderungen im Mangan- oder Stickstoffhaushalt sind vor allem bei hohen Dämpftemperaturen über 70 °C sehr stark ausgeprägt. Eine möglichst exakte Temperaturführung um ca. 70 °C kann deshalb die negativen Auswirkungen des Dämpfens auf das Pflanzenwachstum weitgehend verhindern.

Tabelle 2-1: Lethaltemperaturen von Krankheitserregern, Schädlingen und Unkrautsamen nach JARVIS, (1992), Tabelle 10, Seite 91, BOLLEN, (1969a), BOLLEN, (1969b) und BOLLEN, (1985)

Tabelle 2-2: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen nach SONNEVELD, (1979)

Abb. 2-1: CO₂-Produktion je Gramm lufttrockenen Bodens nach einer dreißigminütigen Bodendämpfung bei 60 °C , auszugsweise nach BOLLEN, (1969b)

Abb. 1-2: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung bei unterschiedlichen Temperaturen und Einwirkungszeiten; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen, nach SONNEVELD, (1979)

Abb. 2-3: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen, nach SONNEVELD, (1979)

Abb. 1.4: Wirkung einer Bodendämpfung auf die Gehalte an wasserlöslichem Nitrat, Nitrit und austauschbarem Ammonium (Mittelwerte aus 6 Böden, verändert nach SONNEVELD, (1979))

Abb. 1.5: Verlauf der Nitrat- und Ammoniumgehalte in einem gedämpften Gewächshausboden, auszugsweise nach SONNEVELD,(1979)

Krankheitserreger / Schädling	Temperatur (°C)	Einwirkungszeit (min)
die meisten Bakterien	60-70	10
<i>Botrytis cinerea</i>	55	15
<i>Colletotrichum coccodes</i>	45-50	30
<i>Cylindrocarpon destructans</i>	45-50	30
<i>Didymella lycopersici</i>	50	30
<i>Fusarium oxysporum</i>	57-60	30
<i>Fusarium</i> spp.	45-60	30
<i>Olpidium brassicae</i>	55-63	30
<i>Phialophora cinerescens</i>	50	30
<i>Phomopsis sclerotioides</i>	45-50	30
<i>Phytophthora</i> spp.	40-50	30
<i>Plasmodiophora brassicae</i>	50-60	30
<i>Pythium</i> spp.	43-53	20-40
<i>Rhizoctonia</i> spp.	52-53	30
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	50	5
<i>Sclerotium rolfsii</i>	50	30
<i>Thielaviopsis basicola</i>	48	30
<i>Verticillium</i> spp.	40-58	30
die meisten phytopathogenen Pilze	60	30
die meisten Actinomyceten	90	30
Blattnematoden (<i>Aphelenchoides</i> spp.)	49	15
<i>Meloidogyne incognita</i>	48	15
<i>Pratylenchus penetrans</i>	49	10
die meisten Viren	100	15
Insekten und Milben	60-70	30
Würmer, Schnecken, Hundertfüßler	60	30
die meisten Unkrautsamen	70-80	15

Tabelle 2-1: Lethaltemperaturen von Krankheitserregern, Schädlingen und Unkrautsamen nach JARVIS, (1992), Tabelle 10, Seite 91, BOLLEN, (1969a), BOLLEN, (1969b) und BOLLEN, (1985)

Dauer der Erwärmung	Temperatur		
	70 °C	85 °C	100 °C
3 h	14	22	30
6 h	16	40	60
12 h	24	58	72
Kontrolle			16

Tabelle 2.2: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen nach SONNEVELD, (1979)

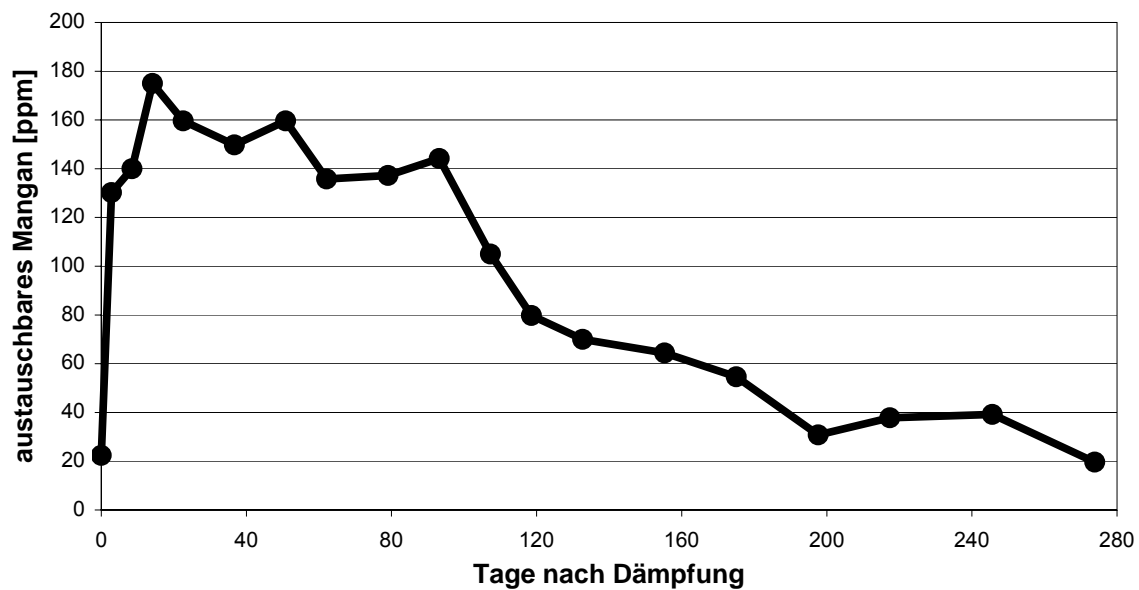


Abb. 2-1: CO₂-Produktion je Gramm lufttrockenen Bodens nach einer dreißigminütigen Bodendämpfung bei 60 °C, auszugsweise nach BOLLEN, (1969b)

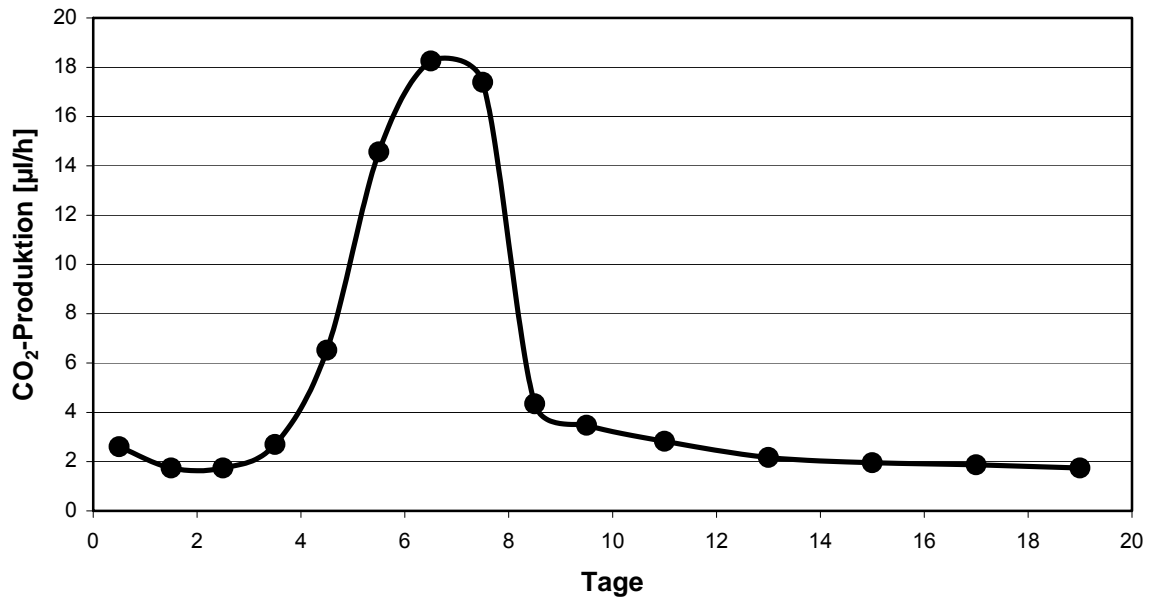


Abb. 2-2: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung bei unterschiedlichen Temperaturen und Einwirkungszeiten; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen, nach SONNEVELD, (1979)

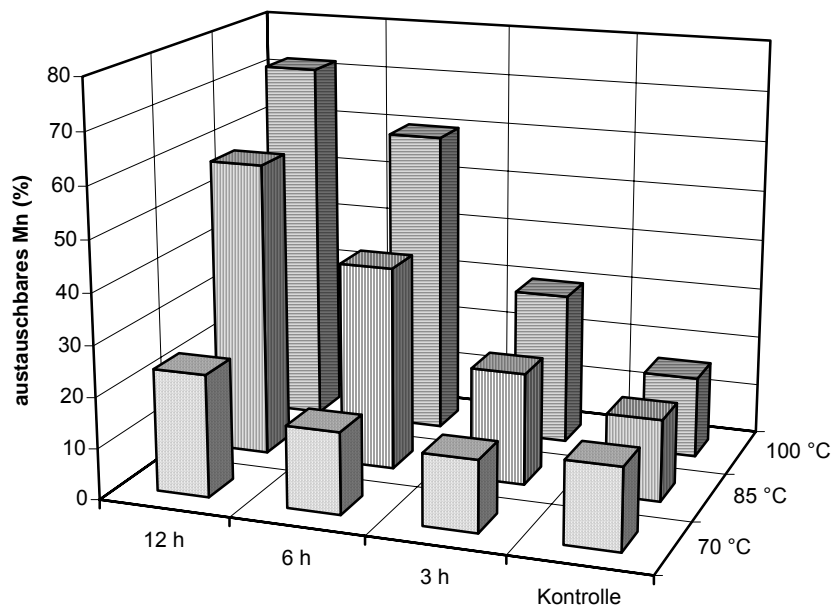


Abb. 2-3: Verhältnis (%) von austauschbarem zu aktivem Mangan nach Bodendämpfung; Mittelwerte von zehn verschiedenen Bodentypen, nach SONNEVELD, (1979)

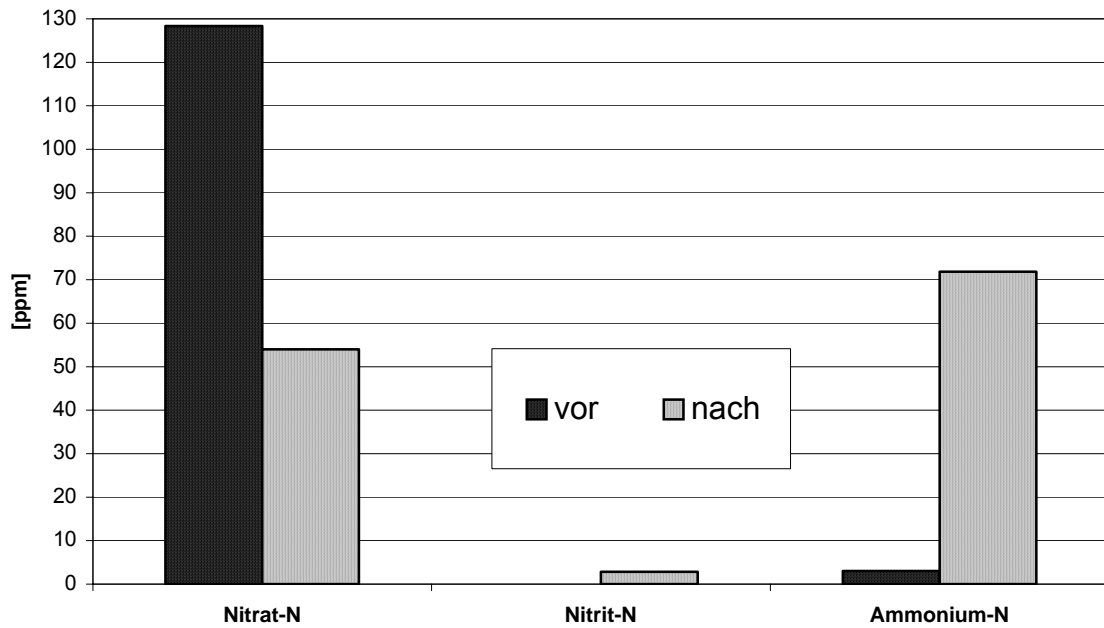


Abb. 2-4: Wirkung einer Bodendämpfung auf die Gehalte an wasserlöslichem Nitrat, Nitrit und austauschbarem Ammonium (Mittelwerte aus 6 Böden, verändert nach SONNEVELD, (1979))

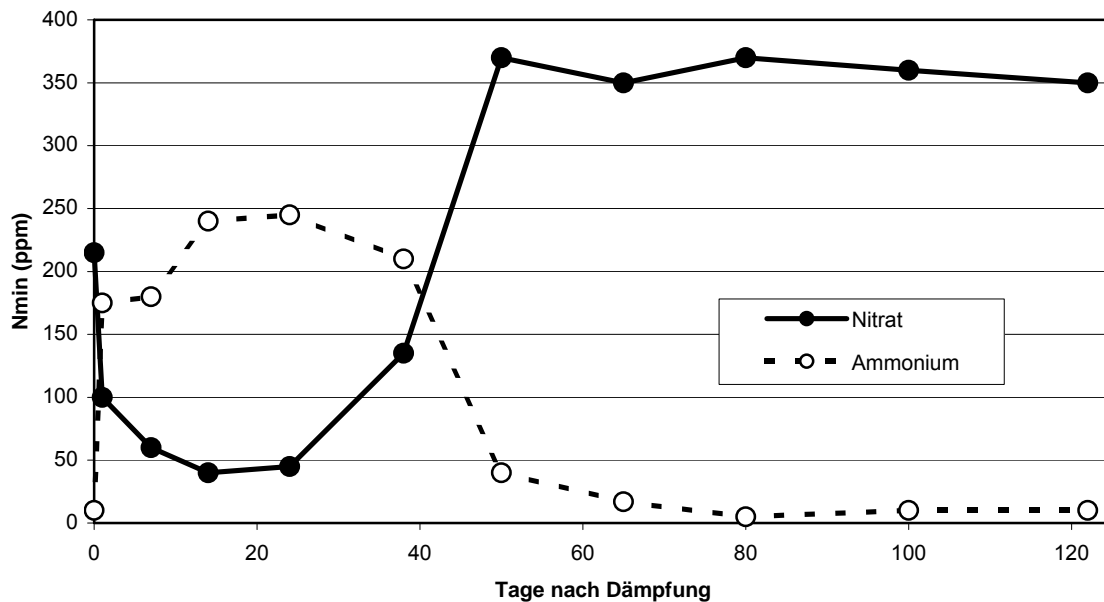


Abb. 2-5: Verlauf der Nitrat- und Ammoniumgehalte in einem gedämpften Gewächshausboden, auszugsweise nach SONNEVELD,(1979)

3 Dämpftechnik

Die Einsatzmöglichkeiten der Hitzebehandlung des Bodens mit Dampf sind in der Praxis sehr unterschiedlich. Deshalb wurden unterschiedliche Dämpftechniken entwickelt und im Laufe der Jahre weiter verbessert. Hierbei haben sich auch die Schwerpunkte immer wieder verschoben. Bei den jüngsten technischen Neuerungen geht es in erster Linie um eine höherer Effizienz beim Energieeinsatz und um die Reduzierung beim Arbeitsaufwand. Dabei werden neben der schon länger praktizierten Methode, den Boden elektrisch zu erhitzen, auch die Möglichkeit der Anwendung von Mikrowellen oder Heißluft verfolgt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren setzen eine Dampferzeugung über eine Kesseltechnik voraus.

Zu unterscheiden sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Dämpftechniken, nämlich die Haufendämpfung und die Flächendämpfung. Bei der Haufendämpfung wird die Erde, das Substrat, Steinwolle oder der Kompost zu einer stationären Anlage mit größeren Abmessungen oder zu einem Gerät oder fahrbaren Behälter mit entsprechend kleinem Fassungsvermögen gebracht. Die Flächendämpfung wird direkt auf der Kulturfäche im Gewächshaus oder Freiland durchgeführt.

Bei Berücksichtigung der heute üblichen Varianten lassen sich die Dämpftechniken folgendermaßen zuordnen. [BELKER, N. (1990)]

- Haufendämpfung
- Dämpfgabel auf dem Boden
- Behälterdämpfung
- Dämpfen auf dem Anhänger
- Dämpfen auf dem Dämpfwagen
- Erhitzen mit elektrischer Energie
- Unterdruckdämpfen in der Dämpfbox
- Kleingeräte für den privaten Bereich

- Flächendämpfung
- normales Foliendämpfen
- Dämpfen mit der Dämpfhaube
- Dämpfen mit Dämpfeggen
- Dämpfen mit dem Dämpfpflug
- Dämpfen mit dem Raupenfahrzeug
- Unterdruckdämpfen nach dem System Fink
- Unterdruckdämpfen mit Hilfe von Dränagerohren
- Dämpfen in Zusammenwirken mit exothermischen chemischen Reaktionen zur zusätzlichen Nutzung der Reaktionswärme und zur Verbesserung der Bodeneigenschaften
- Dämpfen mit Einsatz eines Bodenaktivators zur gezielten Wiederbelebung

3.1 Dampferzeugung und Verteilersysteme

3.1.1 Kessel (Dampferzeuger)

Für die Heizung verwendet man im Gartenbau üblicherweise Warmwasserkessel. Es ist jedoch möglich - und in einigen Fällen wird es auch praktiziert - speziell hierfür ausgerüstete Kessel auf Dampfbetrieb umzustellen und somit (im Sommer) die Dämpfung über die Heizzentrale durchzuführen.

Dennoch empfiehlt sich in der Regel wegen der zu überbrückenden Entfernungen einen speziellen mobilen Dampfkessel einzusetzen, der den individuellen Betrieb erleichtert und die Energieverluste reduziert. Um die Auswahl der für den jeweiligen Betrieb zweckmäßigen maximalen Dampfleistung zu erleichtern, wurden von BELKER, N.(1990) Kriterien zusammengestellt, die vor allem die Nutzungsdauer bzw. jährliche Auslastung berücksichtigen.

In der Praxis werden Niederdruckdampf- und Hochdruckdampfkessel eingesetzt. Beide Kesseltypen sind auf einem Anhängeruntersatz transportfähig. Heute können Kessel bis zu 2 000 kg/h Dampfleistung zu einer kompletten Dämpfeinheit integriert werden, die mit Traktor (25 km/h) sowohl auf der Landstraße transportiert als auch auf einer größeren Dämpffläche mobil eingesetzt werden. In diesem Fall ist lediglich ein fester Standort für die Wasserzufuhr erforderlich.

Aufgrund der einfachen Bedienung, der geringeren Investitionskosten und der (gegenüber dem Hochdruckkessel) eingeschränkteren sicherheitstechnischen Auflagen wird der Niederdruckdampfkessel am häufigsten verwendet. Diese Kesseltypen erzeugen zwischen 150 und 2 000 kg Dampf in der Stunde bei einem maximalen Betriebsüberdruck von 1 bar bzw. üblicherweise bei einem Kesseldruck von 1,4 bar (0,4 bar Überdruck) und einer Kesseltemperatur von 110°C. Da der trocken gesättigte Dampf über den Überhitzer – einen Wärmetauscher in unmittelbarem Anschluss an die Brennkammer des Kessels – geleitet wird, lassen sich Dampfaustrittstemperaturen von 210°C bei Abgastemperaturen von 165°C erzielen. Die erforderliche jährliche Überprüfung wird vom ortsansässigen Schornsteinfeger durchgeführt. Beim Kauf eines solchen Kessels wird eine Bauartzulassung vom Händler ausgestellt. Der Betreiber muss die Inbetriebnahme noch zusätzlich beim zuständigen Gewerbeaufsichtsamt anzeigen.

Die Hochdruckdampfkessel eignen sich wegen der höheren Dampfleistung für größere Dämpfflächen. Der Dampf, der unter die Dämpffolie geleitet wird, muss zwangsläufig wie beim Niederdruckkessel auf wenige Pa über Umgebungsdruck reduziert werden (in der Regel maximal 50 Pa). Vielfach dämpfen deutsche Gärtner in kleineren Parzellen, was den Einsatz eines Hochdruckdampfkessels dann nicht rechtfertigt. Im Gegensatz zu den Niederdruckdampfkesseln bedarf es hierbei einer Betriebserlaubnis und regelmäßigen Sicherheitsüberprüfungen durch den Technischen Überwachungsverein (TÜV). Die Inbetriebnahme solcher Hochdruckdampfkessel darf nur von speziell ausgebildetem Personal, sogenannten 'Heizern', erfolgen.

Der Dampfkessel hat zwar gegenüber dem Heizungskessel relativ wenig Jahresbetriebsstunden, dennoch ist auch hier den Kesseltypen mit hohem Kesselwirkungsgrad (über 92%) und geringen Emissionswerten – wie es im Heizungsbau vorgeschrieben ist – der Vorzug zu geben. Die gegenüber dem Wasserraumkessel (Typ des üblichen Heizungskessels) kostengünstigeren Wasserrohrkessel (Typ Durchlauferhitzer) haben kein entsprechendes Dampfpolster, das für die Regelung notwendig ist. Außerdem sind die Möglichkeiten zur Absenkung der Abgastemperaturen praktisch nicht gegeben. Hinsichtlich Lebensdauer und Problematik bei der Kesselsteinbildung (Verkalkung) ist eine Gegenrechnung mit den Anschaffungskosten sinnvoll.

Dampfleistung	Wärmeleistung	Abmessungen	Gewicht
kg/h	kW	Länge, Breite, Höhe m	Kg
100	74	2,2 x 1,0 x 1,65	600
250	185	2,6 x 1,1 x 2,00	900
300	220	3,0 x 1,2 x 1,80	1.200
400	290	3,1 x 1,2 x 2,00	1.460
550	410	3,7 x 1,4 x 2,20	1.780
800	580	4,1 x 1,5 x 2,50	2.300
1.000	740	4,5 x 1,7 x 2,60	2.750
1.350	1.030	5,0 x 1,8 x 2,70	3.580
2.000	1.500	5,7 x 2,1 x 3,00	4.200

Tabelle 3-1: Übersicht über eine handelsübliche Baureihe von Niederdruck dampfkesseln

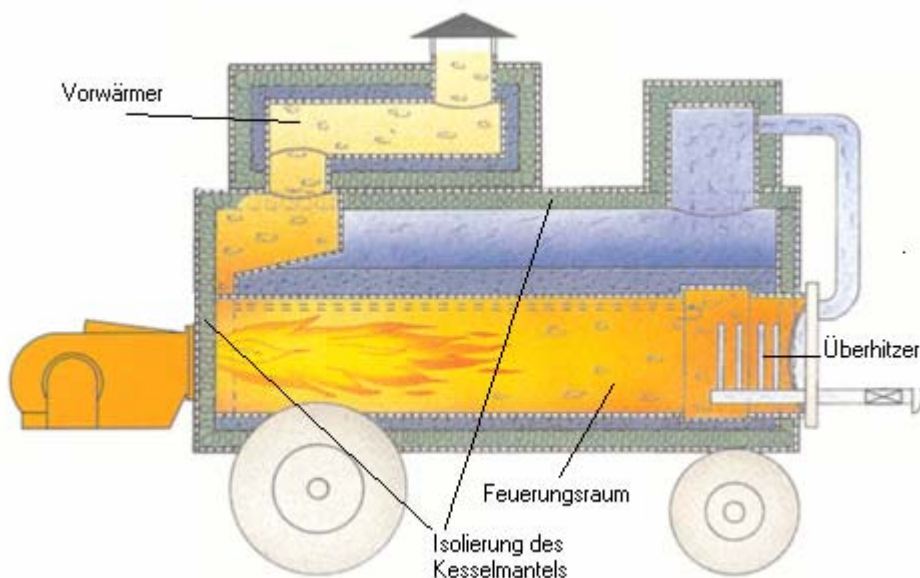


Abb.3-1: Schnitt durch einen modernen Niederdruckdampfkessel

(Werkbild Möschle)



Abb.3-2: Mobile Dämpfeinheit mit Dampfkessel (2 000 kg/h) und Ölbehälter für 24-StundenBetrieb (Werkbild Möschle)

Für alle Dampfkessel besteht die Gefahr der Ablagerung von Kesselstein und der wasserseitigen Korrosion. Dies gilt bei Kesseln für das Dämpfen um so mehr, als hier – im Gegensatz zu Heizungskesseln – ständig neues Wasser zugeführt wird. Deshalb sollten alle Dampfkessel grundsätzlich mit Wasserenthärtungs- und Aufbereitungsanlagen ausgerüstet sein. Bei geringen Härtegraden wird eine Dosieranlage mit abgestimmten Wirkstoffen eingesetzt, bei höheren Härtegraden kommt ein Ionenaustauscher infrage. Vor Inbetriebnahme ist das Dämpfgerät am Einsatzort waagrecht aufzustellen. Hierzu dient eine am Gerät angebrachte Wasserwaage. Die Anlage muss mit gleichmäßigem Druck (bei größeren Anlagen mindestens 5 bar) betrieben werden. Das verwendete Wasser sollte einen Härtegrad von 1 bis 4° deutscher Härte aufweisen. Die Umrechnung von Härtegraden in mval/l ist in Kapitel 9.3 dargestellt.

3.1.2 Dampfleitungen

Die Dampfzuleitungen sind ein wichtiger Bestandteil der Zubehörtechnik. Sie sind mit standardisierten Schnellkupplungsanschlüssen versehen. Durch zu lange, nicht isolierte Rohre verringert sich der Wirkungsgrad. Da der Dampf in den Zuleitungen kondensiert, muss er beim Austritt aus dem Kessel die erforderliche überschüssige

Energie der Überhitzung mitbringen, um die Energieverluste der Zuleitung zu kompensieren und um sicherzustellen, dass beim Austritt unter die Folie oder Haube kein Kondensat vorhanden ist. Zu Beginn des Dämpfens ist die Dämpffolie allerdings durch Sattdampf zu schützen. Weitere Verluste können an den Verbindungsdichtungen der einzelnen Dampfrohre auftreten.

Versuche an einem Kessel mit einer Nennleistung von 740 kW haben bei einer 60 m langen nicht isolierten Leitung eine Temperaturabnahme von 210°C auf 125°C ergeben. Das entspricht einem Energieverlust von 7 % bezogen auf die Verdampfungsenthalpie. Bei Teillast mit 413 kW und einer Überhitzungstemperatur von 180°C hat sich der Dampf bis auf 103°C abgekühlt und war somit gerade noch trocken gesättigt, bei einem Energieverlust von 6,5%. Mit isolierten Leitungen, die bei mobilen Leitungen häufig nicht verwendet werden, lassen sich 5% Energie einsparen. Es empfiehlt sich Dampfleitungen ab 30 m zu isolieren, Dampfleitungen über 50 m Länge sollten grundsätzlich isoliert sein.

Zu geringe Rohrenweiten erhöhen den Rohrwiderstand und verhindern die vollständige Auslastung der Kesselleistung. Für den praktischen Einsatz geben niederländische Versuchsanstalten Empfehlungen nach Tabelle 3-2 [DERCKX, J.M.H (1981)].

Kesselkapazität		Länge der Dampfzuleitung in Meter									
KW	kg Dampf / Std	100		150		200		250		300	
		0,5 bar	2 bar	0,5 bar	2 bar	0,5 bar	2 bar	0,5 bar	2 bar	0,5 bar	2 bar
580	800	94,5	57	100,5	64	106	70,0	106	70	113	70
870	1.200	113	70	119	76	125	82,5	131	82,5	150	82,5
1.160	1.600	125	76	131	82,5	137	88,0	143	88	150	94,5
1.450	2.000	131	82,5	143	88	150	94,5	162	100,5	162	100,5
1.740	2.400	143	94,5	150	94,5	162	100,5	162	106	180	106
2.030	2.800	150	94,5	162	100,5	180	106,0	180	113	180	119
2.320	3.200	162	100,5	180	106	180	113,0	203	119	203	125

Tabelle 3-2: Erforderliche Dampfleitungsdurchmesser (innen) in Abhängigkeit von der Entfernung der zu dämpfenden Fläche. Die Kesselgrößen wurden aus der ursprünglichen Tabelle von kcal/h auf kW umgerechnet.

Für kleinere Leistungen und bei Verwendung von Schnellkupplungsrohren sind Zuordnungen üblich. Bei Längen über 100 m empfiehlt sich die jeweils größere Nennweite. Die Nennweite orientiert sich am Innendurchmesser (1" = 25,4 mm).

bis 400 kg Dampf/h	DN 50	2"	(DN = Nennweite)
bis 800 kg Dampf/h	DN 70	2 1/2"	
bis 1 300 kg Dampf/h	DN 89	3"	
bis 1 500 kg Dampf/h	DN 108	4"	
bis 2 000 kg Dampf/h	DN 133	5"	
	DN 159	6"	

Tabelle 3-3: Firmenangaben für Kesselleistungen und Anschlüsse der Dampfleitungen

Soll eine Fläche von 200 m² mit 10 kg Dampf/h gedämpft werden, so werden 2.000 kg Dampf/h benötigt. Eine optimale Dampfzufuhr kann (wie aus Tabelle 3-3 ersichtlich) mit einem Durchmesser der Zuleitungen von 133 mm und einer Länge von max. 100 m erreicht werden. Kleinere Zuleitungsdurchmesser sollten demnach nicht verwendet werden, da ansonsten die Kapazität des Kessels nicht genutzt wird. Auch kann die zur Berechnung zugrunde gelegte Dampfmenge von 10 kg/m²h zu Dämpfbeginn nicht eingehalten werden.

3.2. Technik bei zentralen Dämpfverfahren

3.2.1 Stationäre Anlagen für kontinuierlichen Betrieb

Bei großen Anlagen wird das Dämpfen auf einer dafür vorgesehenen Fläche oder in einem speziellen Raum vorgesehen. Das zu dämpfende Material kann einen kontinuierlichen Prozess durchlaufen.

Die Dämpfung von Torf und Kompost in einem Erdewerk erfolgt unter exakt kontrollierten Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Verweilzeit im Rührwerk oder einer Schnecke. Das Material wird von oben der Dampfzone zugeführt und anschließend zunächst in einer Kammer wärmeisoliert gelagert.



Abb. 3-3: Dämpfen von Torf in einem Erdewerk

Der zwangsläufig gleichzeitig anfallende Bedarf an elektrischer Energie für mechanische Arbeitsvorgänge und thermischer Energie ermöglicht die Einbindung einer Kraft-Wärme-Kopplung und damit einer günstigen Ausnutzung der Primärenergie. Derartige Anlagen erreichen einen hohen Automatisierungsgrad und ermöglichen einen kontinuierlichen Betrieb bei vergleichsweise hohen Investitionen.

3.2.2 Stationäre gärtnerische oder kommunale Anlagen für zeitweisen Betrieb (Haufendämpfung)

Für diese Anlagen wird vorzugsweise eine speziell vorgesehene entseuchte Fläche mit festem Untergrund (Beton), häufig mit einer zusätzlichen seitlichen Einfassung, verwendet. In der Regel wird der Dampf über Rohrsysteme, sog. Dämpfgabeln zugeleitet. Als Variante kommt auch das Unterdruckdämpfen in Frage, wobei das Substrat in eine geschlossene Dämpfbox gebracht wird oder auf Paletten eine dichte Verpackung erhält. In diesem Fall sorgt ein Gebläse für einen Unterdruck und ein Absaugen des zugeführten Dampfes durch das Substrat.

Günstige Anwendungskriterien:

- Minimierung der Energieverluste durch gute Wärmedämmung der Kammern und Überwachung der Temperaturen
- relativ geringe Investitionskosten
- besonders geeignet für Lohndämpfen

Kritische Aspekte:

- erforderliche Maßnahmen zur Verhinderung der Reinfektion
- erhöhter Arbeitsaufwand durch die Erdbewegung

Man verwendet entweder Rohre, die wie in Abb. 3-4 zu einer sog. Dämpfgabel verbunden sind und die einen Dampfanschluss erhalten oder aber Dränagerohre wie beim Unterdruckdämpfen, die an ein Sauggebläse angeschlossen werden.

Der Kompost wird auf 40 bis maximal 70 cm aufgeschichtet und mit einer Dämpffolie abgedeckt. Bei den Dämpfgabeln liegen die Rohre 10 cm über dem Boden, um sicherzustellen, dass das Kondensat nach unten abfließen kann. Beim Unterdruckdämpfen liegen die Kunststoffrohre direkt auf dem Boden. Der Dampf wird wie beim Foliendämpfen von oben zugeführt.



Abb. 3-4: Dämpfgabel

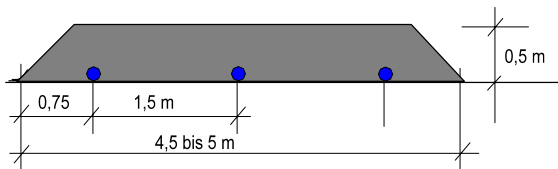


Abb. 3-5: Beispiel für eine Kompostschichtung mit entsprechender Rohrverteilung beim Unterdruckdämpfen

3.2.3 Behälterdämpfung in einer Dämpfbox, in einem Kippanhänger und einem Dämpfwagen

Das Unterdruckdämpfen, wie unter Kapitel 3.3.7 beschrieben, lässt sich noch effektiver in einer sog. Dämpfbox durchführen. Die Dränagerohre werden im Gegensatz zum Haufendämpfen in den Boden eingelassen und werden in U-förmige Betonrinnen in einem Abstand von 80 cm gelegt, die mit gelochten Blechplatten abgedeckt werden. Die beiden äußeren Rinnen müssen direkt an der Seitenwand verlegt werden. Das gesamte Absaugsystem funktioniert analog zu den in Kapitel 3.3.7 beschriebenen Unterdruckanlagen.

Die hitzebeständigen Kunststoff-Dränagerohre mit 60 mm Durchmesser und Ummantelung mit hitzebeständigem Fasermaterial werden an der Vorderseite verschlossen und sind an der Rückseite mit einem Sammelrohr verbunden, das zu einem Sammelschacht mit Kondensatpumpe führt. Über dem Sammelschacht ist ein Radialgebläse angebracht, das für einen Unterdruck von 800 bis 1 000 Pa (80 bis 100 mm WS) sorgt. Die Luftleistung sollte 1 000 m³/h betragen (s. a. Abb. 3-20).

Der Boden wird wegen der Hitzeeinwirkung zweckmäßig mit Betonsteinen gepflastert. Die seitliche Umrandung besteht aus etwa 4,5 cm starken Holzbohlen, die in U-Eisen gelegt und mit Folie abgehängt werden, damit keine Außenluft angesaugt wird. Die Schütthöhe soll maximal 1 m betragen. Die Beschickung erfolgt in der Regel mit Radlader. Vor dem Dämpfen ist eine Folie aufzulegen und darüber ein Isoliervlies zu legen. Undichte Stellen, beispielsweise im Bereich der Dränagerohre, sind abzudichten. Der Dampf wird an der Rückseite unter die Folie gebracht. Durch die schnelle Kondensation und den hohen Unterdruck kommt die Folie erst nach 1,5 Stunden zum Stehen. Der Dampfverbrauch liegt bei 60 bis 80 kg/h (vergl. Aussagen in Kapitel 3.3). Die entsprechende Wassermenge von 60 bis 80 l/h ist durch die Kondensatpumpe abzupumpen.

Beim Kippanhänger wird wie beim Haufendämpfen eine Dämpfgabel verwendet, die auch dort einen Abstand von 10 cm vom Boden haben soll. Die Abdeckung erfolgt durch eine Folie. Die Begrenzung auf 2 bis maximal 6 m³ hat andererseits den Vorteil, dass ein Arbeitsgang beim Erdtransport eingespart und die Gefahr der Reinfektion reduziert wird.

Der kippbare Dämpfwagen stellt eine kleinere Variante in den Größen 0,4, 0,5 und 0,75 m³ zum Kippanhänger dar und ist mit einer Abdeckhaube versehen, die fest verschlossen höhere Dampfdrücke und somit auch kürzere Dämpfzeiten zulässt.

3.2.4 Behälterdämpfung mit dem Erd-Pasteuriserapparat Sterilo

Eine Lösung bietet auch der in den Varianten 0,1 (Sterilo 1K) und 0,5 m³ (Sterilo 7K) fassende Erddämpfer Sterilo der Firma Harter (früher Mafac), in dem die durch elektrische Energie erzeugte Wärme über Wärmeleitbleche an das Substrat übertragen wird. Die Temperatur ist über einen Thermostaten zwischen 70 und 100°C regulierbar. Das Gerät kann auf einen speziellen Wagen gestellt werden, der mit Hebebügeln ausgerüstet ist.



Abb.3-6: Zwei Varianten der Sterilo-Geräte der Firma Harter
(Werkbild)

3.2. 5 Schnelldämpfer der Firma Kiefl

Das Substrat wird in einem kontinuierlichem Verfahren über einen Aufnahmetrichter und einer Förderschnecke in ein Rohr von 4,95 m gefördert und dort mit Heißdampf von 170°C auf 90°C erhitzt. Ein stufenlos regelbarer Getriebemotor steuert die Durchsatzmenge, bzw. die Dämpftemperatur. Die beiden Modelle KRW 4000 und KRW 6000 mit den Rohrdurchmessern 273 und 330 mm ermöglichen Dampfleistungen von 250 bis 850 kg/h Durchsatzmengen von 2,5 bis 8,0 m³/h.



Abb. 3-7: Schnelldämpfer der Firma Kiefl
(Werkbild)

3.3 Technik bei der Flächendämpfung

Hier ist im Einzelfall zu prüfen, ob es wirtschaftlich sinnvoll ist, eine Investition für ggf. wenige Einsatzfälle zu tätigen, sich zu einem Maschinenring zusammenzuschließen oder die Arbeiten durch Lohnunternehmen durchführen zu lassen.

Die einzusetzenden Verfahren vor Ort im Gartenbaubetrieb hängen von den Flächengrößen im Freiland oder im Gewächshaus, den Kulturen und den Anbaumethoden ab.

Die früher häufiger angewendeten Verfahren, den Dampf mit angetriebenen Dampfpflügen und Dampfeggen von oben in den Boden einzuleiten, wurden später immer mehr durch das Foliendämpfen verdrängt, da diese Technik insgesamt einfacher zu handhaben war. In den letzten Jahren ging die Entwicklung in zwei unterschiedliche Richtungen. Da man mit dem Foliendämpfen Bodentiefen von 40 cm und mehr nicht erreichen konnte, wurde das Unterdruckdämpfen entwickelt, mit dem man auf mehr als 60 cm Tiefe in den Boden eindrang, in diesem Fall unter Beibehaltung der Folie. Andererseits waren für schnell wechselnde Kulturfolgen mit flach wurzelnden Pflanzen – beispielsweise für die Bekämpfung von Pilzkrankheiten und Unkräutern vorzugsweise im Gemüsebau - nur Bodentiefen von 10 bis 15 cm zu erhitzen. In diesem Fall ist das Auflegen der Folie viel zu umständlich, da man nur noch maximal 30 Minuten Dämpfzeit benötigte. Es kam zur Entwicklung der Dämpfhaube aus Metall, die heute häufig nur noch fünf bis acht Minuten auf den Boden aufgesetzt wird. In der Folge kam es dann zwangsläufig zu selbstfahrenden Systemen mit immer größer und schwerer werdenden Hauben, mit automatisch arbeitenden Hebe- und Senkvorrichtungen und mitfahrenden Kesseln. Für Folienhäuser bis zu 200 m Länge sind heute sog. Vollautomaten einsetzbar, die lediglich am Ende des Hauses eine Arbeitskraft zum Umsetzen benötigten. Um eine Bodenverdichtung zu vermeiden, werden Raupenfahrzeuge eingesetzt.

Ausgerüstet mit dieser Maschinenteknik kommt es wieder zu einer Rückbesinnung auf die Dampfegge, um in tiefere Bodenschichten einzudringen. Das führt dazu, dass automatisch arbeitende Raupenfahrzeuge anstatt mit Dämpfhauben mit Bodenwerkzeugen ausgerüstet werden, die in unterschiedlichen Bodentiefen den Boden lockern und den Dampf zuführen werden.

Kritische Aspekte

Für alle Verfahren der Flächendämpfung ist zwar in Ansätzen eine Automatisierung angedacht und in Einzelfällen auch realisiert, in der Regel ist jedoch die ständige Anwesenheit einer Person zur Überwachung erforderlich.

3.3.1 Foliendämpfen

Mit diesem Verfahren erreicht man bei sorgfältiger Durchführung Bodentiefen von 25 cm. Auf den zu dämpfenden Boden wird eine hitzebeständige PVC-Folie (max. 115°C) mit einer Stärke von 0,25 bis 0,30 mm und einer Breite von ca. 3,60 m aufgelegt und an den Rändern befestigt. Es werden auch hitzebeständige PE-, PU-, und Teflonfolien verwendet. Gitterverstärkte Dämpffolien (0,3 mm) gibt es bis zu

Breiten von 15 m. Zur Reduzierung der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung ist die Folie mit einem Isolier-Vlies abzudecken.

Günstige Anwendungskriterien:

Das Foliendämpfen ist geeignet für individuelle Flächenzuschnitte die auch direkt an kultivierte Flächen angrenzen. Es ist relativ einfach durchzuführen und damit gleichermaßen geeignet in Eigenregie durchzuführen. Die Anpassung der Dämpfzeit an individuelle Gegebenheiten schafft günstige Voraussetzungen für den Dämpferfolg.

Kritische Aspekte:

Das Foliendämpfen erfordert einen relativ hohen Zeitaufwand für den gesamten Dämpfablauf. Der Nachteil liegt in der geringen Tiefenwirkung, so dass die Schad erregere in den tieferen Bodenschichten nicht oder nicht ausreichend abgetötet werden. Dies führt dazu, dass eine Reinfektion von den unteren, nicht gedämpften Bodenschichten in kurzer Zeit erfolgen kann. Als Nachteil ist auch die erforderliche ständige Überwachung anzusehen.



Abb. 3-8 : Foliendämpfung in einem Gartenbaubetrieb

Zur Befestigung kann die Folie eingegraben, mit Sandsäcken oder mit Schiffsketten beschwert werden. Durch die Befestigung wird ein besseres Dämpfresultat erzielt, da unter der Folie ein größerer Überdruck herrschen kann. Tabelle 2.4 zeigt den maximal erzielbaren Überdruck unter der Folie.

a) Sandsäcke	4 mm Wassersäule = 0,0004 bar = 40 Pa (mindestens 15 cm breite Auflage)
b) Schiffsketten	5 mm Wassersäule = 0,0005 bar (Schiffskettengewicht 19 kg/lfd. m)
c) Bodenauflage	6 mm Wassersäule = 0,0006 bar
d) Verankerung durch Netze	15 mm Wassersäule = 0,0015 bar

Tabelle3-4: Übersicht verschiedener Beschwerungsmöglichkeiten in Abhängigkeit des maximal möglichen Überdruckes unter der Folie (DERCKX, 1972)

Beim Lohndämpfen wird in der Regel zur Beschwerung Bodenmaterial verwendet, da es arbeitstechnisch die schnellste Methode darstellt.

Die Dampfeinführung unter die Folienbahn erfolgt durch einen Einführstutzen an der Stirnseite der Folie. Der Einführstutzen wurde früher mit einer Metall- oder Holzplatte überdeckt, damit bei Dampfeintritt die Folie nicht flattert und dadurch zerreißt. Heute eignet sich hier besonders gut ein alter Autoreifen. Für eine rationelle Arbeitsweise ist es von Vorteil, mit zwei Folienbahnen zu arbeiten. Während die eine unter Dampf steht, wird eine zweite vorbereitet, um möglichst keine Dämpfpausen entstehen zu lassen.

3.3.2 Dämpfen mit Dämpfhauben

Die Dämpfhaube wird heute in verschiedenen Varianten im Freiland und im Gewächshaus dort eingesetzt, wo Bodentiefen bis zu maximal 15 cm erreicht werden müssen – beispielsweise primär zur Unkrautbekämpfung. Sie ist in diesem Fall wesentlich weniger arbeitsaufwändig als das Foliendämpfen, da die Dämpfzeiten viel kürzer sind. Sie wird auf der zu dämpfenden Fläche abgesetzt und nach einer bestimmten Zeit (häufig 20 bis 30 Minuten) auf die angrenzende Fläche umgesetzt. In diesem Fall erreicht man eine Tiefe von 15 bis 20 cm. Durch das größere Eigengewicht der Aluminium- oder Stahlkonstruktion ist ein etwas höherer Dampfdruck möglich, der die Dämpfleistung positiv beeinflussen kann. Dämpfhauben sind in den Abmessungen zwischen 2,5 m x 3 m und 12 m x 5 m im Einsatz. Durch individuelle Abmessungen und mit – bei speziellen Ausführungen – verstellbaren Breiten, ist eine Anpassung an unterschiedliche Gewächshausabmessungen möglich. Die Haube wird mit einem Traktor oder mit Seilwinde und Elektromotor versetzt, wobei sie hydraulisch angehoben oder abgesetzt werden kann. Die Firmen Regero und Möschle-Ferrari haben eine Selbstfahreinheit mit integriertem Dampfkessel entwickelt. Ferrari setzt hierbei eine Raupe ein. Neuere Anwendungstechniken mit selbstfahrenden Hauben und einem höheren Eigengewicht (Stahl) lassen etwas höhere Dampfdrücke zu. Speziell für den

Gemüsebau wird für 12 cm Dämpftiefe eine Dämpfzeit von nur 8 Minuten und eine Umrüstzeit von 2 Minuten angegeben.



Abb. 3-9: Dämpfhaube, die mit Seilwinde im Gewächshaus transportiert wird

Günstige Anwendungskriterien:

Geeignet für häufige Flachdämpfung mit kurzer Dämpfdauer vorzugsweise im Gemüsebau und gegen Unkraut, im Freiland und unter bestimmten Voraussetzungen auch im Gewächshaus.

Kritische Aspekte:

Geringe Tiefenwirkung, Arbeitseinsparung nur bei entsprechender Organisation des Betriebsablaufs. Anpassung an spezielle Gewächshausabmessungen sind zu bedenken.

Durch das schnelle Schritt-für-Schritt-Vorrücken der Haube geht man immer mehr davon ab, den Kessel stationär aufzustellen, vielmehr wird er gemeinsam mit dem Öltank transportiert. Dies geschieht entweder mit Traktor und Anhängerkombination



Abb. 3-10: 3-geteilte Dämpfhaube (Länge 3 x 4 m, Breite 5 m und somit 60 m²) mit Dampfkessel (2.000 kg/h) (Werkbild Möschle)

oder als integrierte Einheit mit einer Dämpfraupe Dampfkessel (500 kg/h), einschl. Dämpfhaube (8 m x 1,5 m), sowie automatisch (über 200 m) arbeitenden Transporteinheit



Abb. 3-11: Mobile Dämpfeinheit ohne Fahrer Steriliter S 500 (Werkbild Möschle – Ferrari)



Abb. 3-12: Mobile Dämpfeinheit ohne Fahrer Fa. Regero

oder in individueller Anpassung an unterschiedliche Gewächshausbreiten mit verstellbaren Dämpfhauben



Abb. 3-13: Verstellbare Dämpfhaube (Möschle)

3.3.3 Dämpfen mit Dämpfeggen

Bei diesem Verfahren befinden sich an einer eggenähnlichen Konstruktion Zinken, durch die der Dampf austritt. Die Dampftiefe entspricht der Länge der Zinken, die in den Boden gestoßen werden. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, zwei Eggen hintereinander zu verwenden, die dann abwechselnd aus dem Boden herausgehoben und wieder neu in den Boden gerammt werden (HEGE,ROSS). Aufgrund geringer Flächenleistung eignet sich die Dämpfegge nur für sehr kleine Flächen.

3.3.4 Dämpfen mit dem Dämpfpflug

Der Dämpfpflug ist die ältere technische Entwicklung, um tiefe Bodenschichten zu erreichen. Er hat eine rechenförmige Konstruktion aus Rohren und wird an einer Giebelseite des Gewächshauses in einen Graben eingesetzt und von einer Seilwinde langsam durch den Boden gezogen. Über Öffnungen auf der Rückseite der Schare gelangt der Dampf in den Boden. Das Verfahren wird bei HEGE,ROSS (1972) ausführlich beschrieben. Die Verfasser legen dar, dass damit nur ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden kann, wenn zuvor eine Bodenlockerung mit Tiefenbodenlockerer und Spatenmaschine durchgeführt wurde. Zusätzlich muss die Oberschicht des Bodens mit einer Fräse so feinkörnig bearbeitet werden, dass eine dampfundurchlässige Schicht entsteht.

Durch diese Maßnahme kann gewährleistet werden, dass der Dampf den Boden nicht vorschnell durch Bodenkanäle verlässt. Der Dämpfpflug hat keine Weiterentwicklung erfahren und ist durch das Unterdruckdämpfen und durch spezielle Entwicklungen der Dämpfraupe ersetzt worden.



Abb. 3-14: Dämpfpflug mit Seilzug und Schleppfolie im Gewächshaus

Die Dämpftiefe lässt sich zwischen 20 und 50 cm variieren. Bei jeder Tiefeneinstellung (Tabelle 3-5) muss die Dämpfzuggeschwindigkeit an der Seilwinde eingestellt werden.

bei 30 cm Dämpftiefe = 12 - 15 m/h
 bei 40 cm Dämpftiefe = 10 - 12 m/h
 bei 50 cm Dämpftiefe = 8 - 10 m/h

Tabelle 3-5: Dämpfzuggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der gewünschten Dämpftiefe (Firmeninformation)

In der Firmeninformation werden folgende Arbeitsbreiten des Dämpfpfluges für bestimmte Dämpfleistungen (Tabelle 3-6) genannt.

Bei einer Dampfleistung von:

500 kg/h = 1,75 - 2,10 m Arbeitsbreite
 750 kg/h = 2,45 - 2,80 m Arbeitsbreite
 900 kg/h = 2,80 - 3,15 m Arbeitsbreite
 1200 kg/h = 2x (2,10 - 2,45 m) Arbeitsbreite
 2000 kg/h = 2x (2,80 - 3,15 m) Arbeitsbreite

Tabelle 3-6: Geeignete Dämpfpflugarbeitsbreiten in Abhängigkeit der Dampfleistung

3.3.5 Dämpfen von Freilandflächen mit einem Raupenfahrzeug und Dampfzufuhr im Boden

Speziell für das Freiland ist eine mobile Einheit entwickelt worden, die die gesamte Dämpfeinrichtung transportiert. Hierbei wird ein kontinuierlich ablaufender Dämpfvorgang angestrebt. Die erhöhte Bodenverdichtung wird durch eine Raupe verhindert. Der Dampf muss zwangsläufig im Boden zugeführt werden.

Günstige Anwendungskriterien:

Geeignet für hohe Flächenleistung im Freiland

Kritische Aspekte:

Relativ hoher technischer Aufwand mit Raupe zum Transport des Dampfkessels. Auslastung des Gerätes nur bei großen Flächen zu erwarten.

Das Untergestell eines Raupenbaggers mit einer Länge von 6 m und einer Breite von 3,4 m dient als Unterbau. Jede Raupe hat eine Laufbreite von 1 m. Der Antrieb erfolgt über einen 4-Zylinder-Deutz-Dieselmotor mit einer Leistung von 60 kW und mit drei Sauer-Verstellpumpen für den unabhängigen Antrieb der beiden Raupen und der Grabemaschine. Die Normalgeschwindigkeit ist 1500 m/h, die Kriechgeschwindigkeit für das Dämpfen ist stufenlos einstellbar von 12 bis 120 m/h.

Der Möschle-Hochleistungsdampfkessel hat eine Dampfleistung von 1200 kg/h und eine Dampftemperatur von 130 bis 220°C. Der Wassertank hat 3000 Liter, der Öltank 1000 Liter Inhalt. Zur Bodenlockerung ist eine Grabemaschine - System Farmax - mit

einer Arbeitsbreite von 3,40 m und einer Arbeitstiefe bis zu 40 cm mit hydraulischer Drehzahlregelung angebaut. Die Tiefenregulierung erfolgt über Tastrad mit Dreipunktsteuergerät. Zur Glättung der Oberfläche folgt ein Krümmler mit 6 bis 8 cm Eindringtiefe mit hydraulischer Drehzahlregelung. Die Dampfeinleitung in den Boden erfolgt über einen Dämpfpflug mit 3,40 m Arbeitsbreite, der in die Bodenbearbeitungsmaschinen integriert ist. Hinter dem Gerät wird eine Plane mit 3,50 m Breite und 20 m Länge nachgezogen (Firmeninformation Möschle 1992).



Abb. 3-15: Dämpfen mit Raupenfahrzeug (Werkbild Möschle)

3.3.6 Unterdruckdämpfen nach dem System Fink

Bei dem Verfahren 'Fink' wird ein Absaugsystem auf die Oberfläche der zu dämpfenden Bodenfläche gelegt. Daran angeschlossen werden Absaugschläuche, deren Ende jeweils bis zur gewünschten Absaugtiefe in den Boden gestoßen werden. Diese Verfahrenstechnik ermöglicht eine Dämpftiefe (in Abhängigkeit der Absaugstellen) bis ca. 35 cm.



Abb. 3-16: Unterdruckdämpfen nach dem System Fink

Die Schnellkupplungs-Rohrstücke Nennweite 50 mit den Anschlüssen für die Absaugschläuche sind 3 m lang und haben je nach Dämpfbreite unterschiedliche Verteilraster und zwar bis 3 m jeweils 2, bis 7 m 3 und darüber hinaus 4 Anschlüsse. Die Längen der 3/4"-Schläuche variieren zwischen 1,5 und 6 m. Je nach Größe der Absaugfläche werden unterschiedliche Absaugventilatoren verwendet. Für 100 m² wird ein Gebläse mit einer elektrischen Leistung von 2,6 kW und einem Fördervolumen von 800 m³/h und einem Druck von 650 mm WS (0,065 bar) gewählt.

Günstige Anwendungskriterien:

Gegenüber dem Foliendämpfen größere Tiefenwirkung bis 35 cm (40 cm).
Individuelle Flächenzuschnitte sind gut beherrschbar.

Kritische Aspekte:

Relativ hoher Zeitaufwand für den gesamten Dämpfablauf



Abb. 3-17: Unterdruckdämpfen nach dem System Fink (im Rahmen einer messtechnischen Überprüfung)

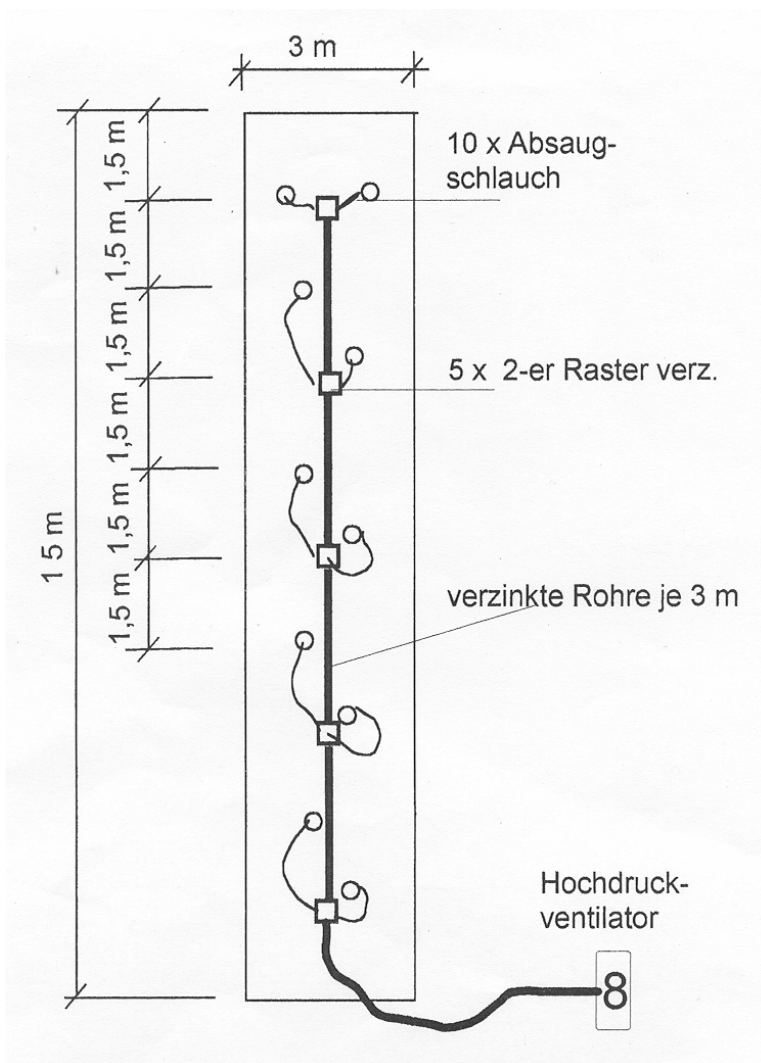


Abb. 3-18: Anordnung der Absaugschläuche für eine Dämpffläche von 3 m Breite

3.3.7 Unterdruckdämpfen mit Hilfe von Dränagerohren

Im Gegensatz zur Methode 'Fink' wird bei diesem Verfahren die zu dämpfende Fläche mit einer fest verlegten Drainage ausgestattet. Der Dampf wird dann, wie beim normalen Foliendämpfen auch, unter die Folie geleitet.

Günstige Anwendungskriterien

Geeignet für Tiefenwirkung bis üblicherweise 60 cm.

Kritische Aspekte

Relativ hoher technischer Aufwand für die Verlegung der Dränagerohre und damit Festlegung auf bestimmte Flächen

Da das Ausheben des Drainagekanals durch Handgraben zu arbeitsaufwändig und für diese Zwecke zu ungenau wäre, werden heute spezielle Maschinen eingesetzt. Zu diesen Maschinen gehören Drainagefräsen als Heckanbaugerät am Traktor, sowie auch die so genannte Drainagekettenfräse der Firma Aerts. Die Verlegetiefe von ca. 70-80 cm wird durch die automatische Höhenregulierung eines Lasersenders gesteuert. Das Laserstrahlgerät korrigiert die Kettenfräse in Abständen von Sekundenbruchteilen und stellt auch das Gefälle von 1% präzise ein. Nachdem die ca.

16 cm breite Kettenfräse den Graben ausgehoben hat, wird das Dränagerohr (ein kokusfaserummanteltes, gewelltes Polypropylenrohr mit einem Durchmesser von 60 mm) mit Hilfe eines Spursohlenpfluges ausgelegt. Die Dränagerohre werden mit dem zuvor verlegten Sammelrohr (Durchmesser 160 mm) verbunden und am anderen Ende mit einem Plastikstopfen verschlossen. [RUINA, W. 1983]

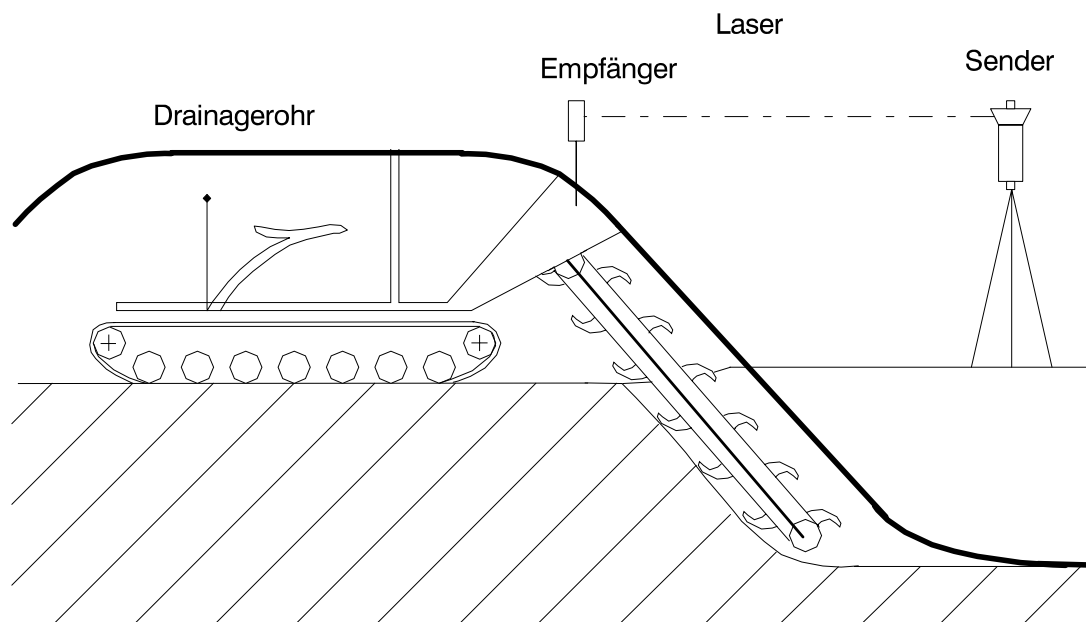


Abb. 3-19: Funktionsprinzip des Drainageverlegens mit einem (Abb.3-21) Laserstrahlgerät

Als Hauptanschluss ist ein Sammelschacht aus Edelstahl üblich. Von einem solchen Sammelschacht saugt während der Dämpfphase ein Radialgebläse die Bodenluft ab. Eine Entwässerungspumpe sorgt für den nötigen Abfluss. In der Praxis werden Radialgebläsetypen unterschiedlicher Leistung eingesetzt, die von der Flächengröße abhängig sind:

- a) für 2 500 m²: Gebläse mit mindestens 3 300 Pa = 330 mm WS
Luftdurchsatz 1 800 m³/h
- b) für 1 000 m²: Gebläse mit 1 000 Pa = 100 mm WS
Luftdurchsatz 1.000 m³/h

Bei Böden mit einer offenen Struktur sind nach Versuchen an der Versuchsstation "Noord - Limburg" geribbelte Dränagerohre mit 3,20 m Abstand voneinander zu verlegen (DERCKX, J. 1972). Böden mit einer dichteren Struktur wie z.B. Sand, machen ein Verlegen von zwei Rohren auf 3,20 m Verlegeabstand erforderlich. Auf tonhaltigen Böden sollte der Rohrabstand auf 1,60 m vermindert werden (RUNIA, W. 1983). Diese Vorgaben der Verlegetechnik haben sich auch in vier deutschen Gartenbaubetrieben 1990 bewährt. Besonders sei darauf hingewiesen, dass die Rohre exakt verlegt werden müssen und dass die Dränagerohre nach Regenfällen vollständig entwässert werden können.

Ein zusätzlich verlegtes Rohr in kurzem Abstand zum Außenfundament könnte ein besseres Ergebnis dieses Randbereiches zur Folge haben. Nach dem Verlegen der Dränage wird der Graben mit einer speziell für diesen Zweck entwickelten Maschine wieder zugeschüttet. Das Funktionsprinzip dieser Maschine besteht darin, dass eine waagrecht auf dem Boden rotierende Spiralwendel das Erdmaterial in den Graben zurückbefördert.

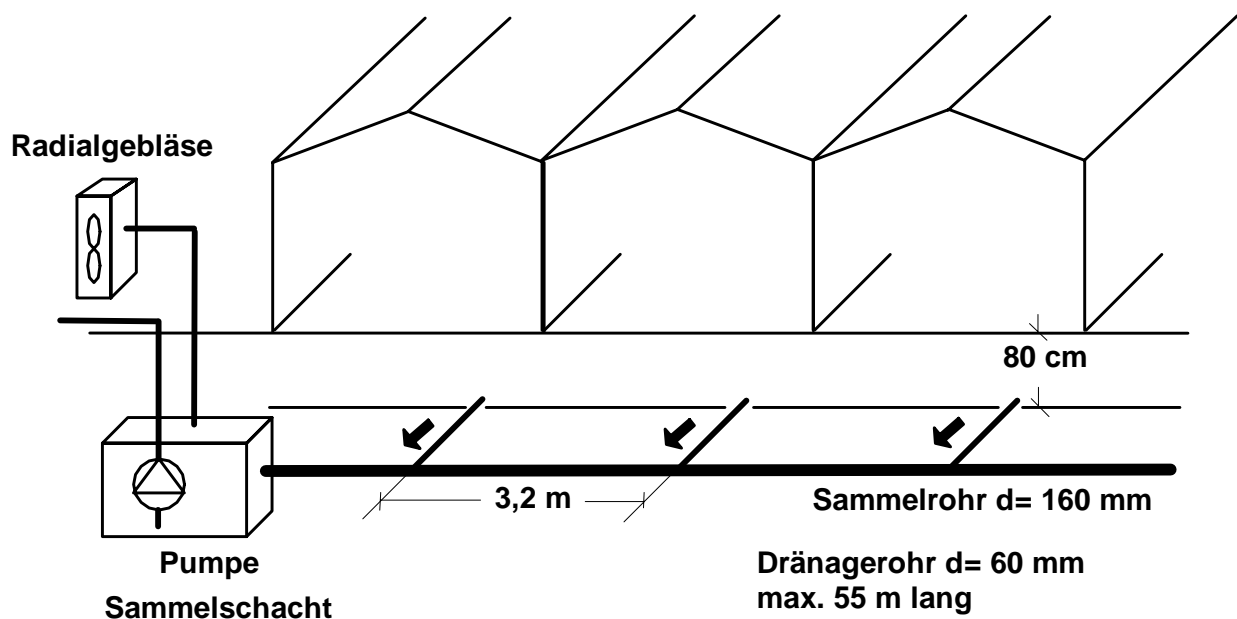


Abb. 3-20: Beispiel für die Verlegung der Dränagerohre in 80 cm Tiefe und Abstand von 2,30 m



Abb3-21: Lasergerät für die exakte Verlegung der Dränagerohre



Abb. 3-22:



Abb. 3-23:

Verlegung der Dränagerohre (mit 2 Varianten)



Abb. 3-24: die Dränagerohre müssen mit gleichbleibenden Gefälle verlegt sein



Abb. 3-25: Anschluss der Dränagerohre an den Sammelschacht



Abb. 3-26: Durch das erforderliche Gefälle der Dränagerohre liegt der Sammelschacht zwangsläufig am tiefsten Punkt. Teilweise wird noch ein Dränagerohr parallel verlegt



Abb. 3-27: Durch das erforderliche Gefälle der Dränagerohre liegt der SammelSchacht zwangsläufig am tiefsten Punkt. Bei längeren Häusern werden 2 Sammelrohre in der Mitte des Hauses verlegt



Abb. 3-28: Das Absauggebläse wird in der Regel außerhalb des Gewächshauses installiert



Abb. 3-29: Nach Verlegen der Dränagerohre wird der Boden eingeebnet

3.3.8 Dämpfen in Zusammenwirken mit exothermischen chemischen Reaktionen zur zusätzlichen Nutzung der Reaktionswärme und zur Verbesserung der Bodeneigenschaften (System Bioflash)

Das in Italien unter der Bezeichnung Bioflash entwickelte Verfahren verbindet das Dämpfen mit einer Bodendüngung mit Kalk und Kalium, bei Einsatz von CaO unter Nutzung der Reaktion $\text{CaO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + 65,2 \text{ kJ}$ und von Kaliumhydroxid KOH, das sich in Wasser unter Wärmentwicklung sehr gut löst und die Kalilauge bildet. Zur Durchführung des Verfahrens wurden spezielle Maschinen entwickelt, die den Boden an der Oberfläche mechanisch bearbeiten und gleichzeitig den Dampf einleiten und den Dünger zumischen.

Die Kombination von Dampf oder Wasser mit CaO führt zu der exothermen Reaktion $\text{CaO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$, wobei 4 735 kJ/kg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ freigesetzt werden.

Bei einer maximalen Dosierung 4.000 kg CaO je ha oder 0,4 kg CaO/m^2 , werden für die Reaktion $0,4 \cdot 4857 \text{ kJ} = 1 943 \text{ kJ} = 540 \text{ Wh}$ frei. Für die Reaktion ist eine Dampfmenge von 0,129 kg erforderlich, die bei der Kondensation 80,6 Wh freisetzt. Nach Tabelle 4.8.a liegt die eingesetzte Dampfmenge zwischen 3 und 5 kg/m^2 , mit einer Enthalpie zwischen 1 800 bis 3 200 Wh/m^2 .

Günstige Anwendungskriterien:

Als optimiertes Dämpfverfahren für geringe Bodentiefen zukünftig interessant.

Kritische Aspekte:

Der spezielle zusätzlich technische Aufwand und die gezielte Dosierung von Kalium und Kalk setzen Erfahrung und gezielte begleitende Beratung voraus, um die angestrebten positiven Ergebnisse zu erzielen.

Die technische Entwicklung basiert auf Aktivitäten der Universität Pisa und der Firma Celli in Forli (Italien). Sie führte zu einer Typenreihe von kleinen einfachen Geräten bis hin zu Raupenfahrzeugen, die den schweren Dampferzeuger transportieren und eine Kombination von Dosiereinrichtungen, Bodenlockerungs- und Mischgeräten, hieran angehängt, mitführen.

Eine ausführliche Information erhält man über den Bericht über eine Tagung, die von der Firma Celli am 30.10. 2002 in Forli veranstaltet wurde. [Convegno: Vapor d'acqua e sostanze a reazione esotermica: una combinazione a ridotto impatto ambientale per la disinfezione e la disinfestazione del terreno] mit 13 Einzelbeiträgen und einer Reihe von Praxisergebnissen.

Betriebsdaten		Selbstfahrer	Gezogene Geräte
Arbeitsgeschwindigkeit	m/h	150	150
Arbeitstiefe	m	0,2	0,2
Arbeitsbreite	m	1,6	2,0
Zeitbedarf je Hektar	h/ha	41,6	33,4
Rüstzeiten	h/ha	10,9	7,8
Gesamter Zeitaufwand	h/ha	52,5	41,2
Anteil der reinen Bearbeitungszeit	%	79	81
Flächenleistung	m ² /h	190	243
Kraftstoffverbrauch für Antrieb und Ausbringung	kg/ha	450	576
Brennstoffverbrauch für Dampferzeugung	kg/ha	1.838	3.146
Gesamter Ölverbrauch	kg/ha	2.288	3.722

Tabelle 3-7: Charakteristische Betriebsdaten des Maschinentyps Ecostar zur Bodensterilisation

Quelle: PERUZZI, A., RAFFAELI, M. (2002): Messa a punto del sistema 'bioflash' ed evoluzione delle macchine operatrici per la disinfezione e disinfestazione del terreno: risulti di unquadriennio di sperimentazione

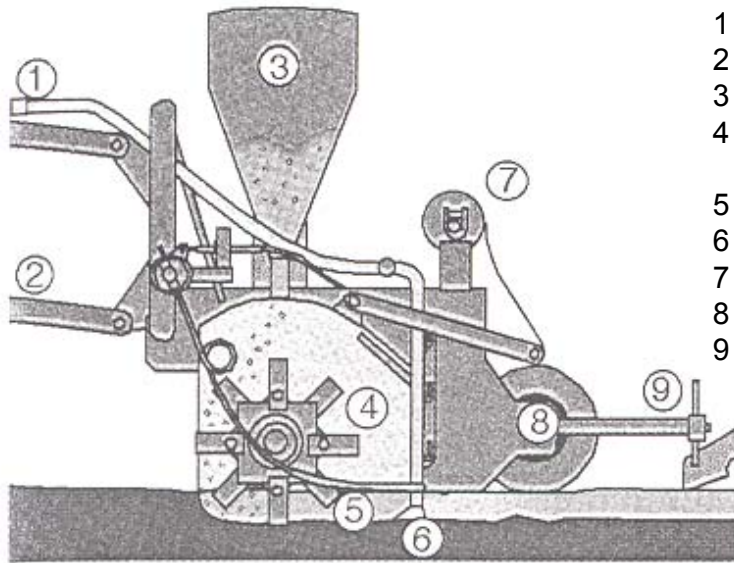
Auf Beispiele wird in Kapitel 6 eingegangen. Zusätzlich sei verwiesen auf [PERUZZI, A., RAFFAELI, M., GINNASI, M., MAINARDI, M. (2002)] und [PERUZZI, A., RAFFAELI, M. und 8 weitere Autoren (2000)]

Ergänzend zu den Angaben in der Tabellen 3-7 wird in der folgenden Tabelle 3-8 ein Vergleich zu den Aussagen in Kapitel 4.1.1 und Abb. 4-4 gezogen und als Bezugsgröße 1 m² anstelle von 1 ha gewählt. Für die in Tabelle 4-7 erzielten

$\vartheta_{\max} = 74,9^{\circ}\text{C}$ in 15 cm Tiefe ist für eine Ausgangstemperatur von 20°C eine theoretische Wärmemenge $Q = 0,15 \cdot C_{\text{Vol}}(74,9-20) = 8,24 C_{\text{Vol}}$ aufzubringen. Setzt man in diese Gleichung den gemessenen Energieverbrauch ohne Berücksichtigung der Verluste ein, dann erhält man eine absolute Obergrenze für die spezifische

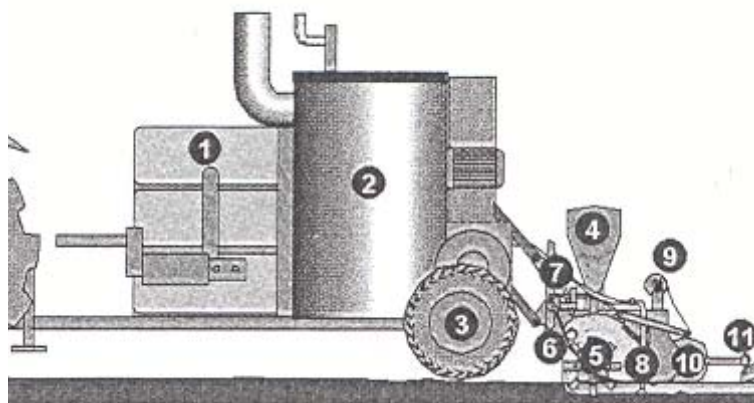
Wärmekapazität des Bodens. Ebenso entspricht dem Heizölverbrauch ohne Berücksichtigung von Kesselwirkungsgraden eine maximal erzeugte Dampfmenge			
Brennstoffverbrauch	kg/m ²	0,1838	0,3146
für Dampferzeugung (Heizöl EL)	l/m ²	0,2137	0,3658
Energieverbrauch mit $H_u = 11,7$ kWh/kg	kWh	2,15	3,681
maximale spez Wärmekapazität des Bodens C_{Vol}	Wh/m ³ K	261	446
maximale Dampfmenge	kg/m ²	3,00	5,11

Tabelle 3-8: Ergänzende Angaben zu Tabelle 3-7



- 1 Schlauch für Dampfzufuhr
- 2 Anhängung an Zugfahrzeug
- 3 Wirkstoffbehälter
- 4 Messerwerkzeuge zum Einbringen der Wirkstoffe
- 5 Einregulierung der Bearbeitungstiefe
- 6 Dampfinjektion
- 7 Folienrolle
- 8 Walze
- 9 Folienabdeckung

Abb.3-30: Darstellung der Funktionen des Systems Bioflash



- 1 Wasserbehälter
- 2 Dampferzeuger
- 3 Radabstützung
- 4 Wirkstoffbehälter
- 5 Messerwerkzeuge zum Einbringen der Wirkstoffe
- 6 Einregulierung der Bearbeitungstiefe
- 7 Schlauch für Dampfzufuhr
- 8 Schiene zur Dampfverteilung
- 9 Folienrolle
- 10 Walze
- 11 Folienabdeckung (Mulchwerkzeug)

Abb.3-31: Gezogenes Gerät Typ ECOSTAR T 1200

3.3.9 Dämpfen mit Einsatz eines Bodenaktivators zur gezielten Wiederbelebung

Günstige Anwendungskriterien:

Bepflanzung des Bodens ohne Wartezeit nach dem Dämpfen

Kritische Aspekte:

Bis zu einer generellen Empfehlung sollten noch eine Reihe von Praxisergebnissen abgewartet werden, die die Gesamtwirtschaftlichkeit des Verfahrens bestätigen.

Das unter dem Begriff Integrierte Dämpfung entwickelte Verfahren verwendet einen Bodenaktivator, der dem Boden unmittelbar nach dem Dämpfen beigemischt wird und zwar dann, wenn sich der Boden auf 40°C abgekühlt hat. Das Verfahren zielt darauf ab, dass die bedingten Wartezeiten nach dem Dämpfen zur Regenerierung der Mikroorganismen im Boden entfallen können. Durch den gezielten Einsatz von Mikroorganismen, die die phytotoxischen Substanzen im Boden abbauen, können gesündere Pflanzen entstehen und unter Umständen auch die regelmäßig erforderlichen Dämpfvorgänge reduziert werden.

3.4 Technik der Bodenlockerung

Um in Bodentiefen von über 30 cm einzudringen, sollten zur Bodenlockerung Maschinen wie Tiefenbodenlockerer und Spatenmaschinen eingesetzt werden. Ein Boden, der mit einer Fräse verhältnismäßig feinkrümelig bearbeitete wurde, neigt zur Verschlammung und ist damit zum Dämpfen in tieferen Bodenschichten ungeeignet. Der Tiefenbodenlockerer bewirkt, dass die Einlagerungsverdichtungen von z.B. Ton, Kalk und Humus im Unterboden gelockert und vermischt werden. Der Boden wird zusätzlich in größerer Tiefe (60-80 cm) gelockert, als dies mit einer Spatenmaschine möglich ist. Zur Steigerung der Bodenlockerung sollte die zu dämpfende Fläche mit einer Spatenmaschine in Längs- und Querrichtung bearbeitet werden.

Die Tiefspatenfräse der Firma Aerts hat eine Arbeitstiefe zwischen 10 und 120 cm, lockert den Boden mit einer einstellbaren Vermischung von 5 bis 50% bis zur Arbeitstiefe homogen auf.

Um den Boden in tieferen Schichten zu lockern, ohne das Profil wesentlich zu beeinflussen, setzt die Firma Aerts den beweglichen Wühler (Arbeitstiefe zwischen 25 und 100 cm) und falls keine Vermischung erfolgen soll, den scharfen Wühler zwischen 25 und 90 cm, der besonders die Dränagewirkung auf schweren Böden fördert.



Abb. 3-32: HAB Tiefspatenfräse
Arbeitsentiefe 30 bis 120 cm, Arbeitsbreite 150 bis 270 cm (Werkbild Aerts)



Abb. 3-33: HAB Tiefspatenfräse Type 120
Arbeitsentiefe 120 cm, Arbeitsbreite 275 cm, Durchmischung 10-50%
(Werkbild Aerts)



Abb. 3-34: Tiefspatenlockerung mit starrem Werkzeug

4 Physikalische Grundlagen bei der Energiezufuhr durch Wasserdampf und bei der Erhitzung des Bodens

Bei der Untersuchung der physikalischen Vorgänge stehen folgende Fragen im Mittelpunkt:

Welche Wärmeenergie benötigt der Boden und wie lässt sich diese Energie mit Hilfe von Wasserdampf möglichst einfach, möglichst schnell und möglichst gleichmäßig zuführen.

Die aktuelle Anforderung an die Dämpftechnik konzentriert sich zusätzlich auf die konkrete Fragestellung:

Wie erreicht man durch das Dämpfen tiefere Bodenschichten und mit welchem Verfahren und welchem Aufwand erzielt man in einer gewünschten Bodentiefe gesichert die jeweils geforderte Temperatur.

Die bodenphysikalischen Stoffgrößen und die wärmetechnischen Eigenschaften des Wasserdampfs sind bekannt und lediglich hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Dämpfen zu definieren. Dies geschieht in den Kapiteln 4.1. und 4.2. Aus den bodenphysikalischen Stoffgrößen und den energetischen Größen des Wasserdampfes, seiner Enthalpie*), lässt sich in Kapitel 4.3 der theoretische Dampfbedarf festlegen.

Die unterschiedlichen Zusammensetzungen des Bodens und der Substrate und die unterschiedlichen Gefügestrukturen führen zu differenzierten Angaben über den theoretischen Dampfbedarf. Diese Angaben sind jedoch unabhängig von jeder aktuellen Dämpftechnik universell gültig und bekannt. An dieser Stelle wird auf Detailangaben hinsichtlich der Bodenphysik verzichtet und auf die Literatur Johnson und Aas (1960), sowie Hege und Ross (1972) hingewiesen.

Im folgenden Kapitel 4.4 werden auf der Grundlage neuerer Untersuchungen für aktuelle Dämpfverfahren Angaben über den Dampfverbrauch und die Tiefenwirkung unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden gemacht.

Die Einleitung des Dampfes in den Boden darf nicht allein über eine Energiebilanz dargestellt werden. Physikalisch zu beschreiben ist vielmehr das Zusammenwirken der Energie- und Stoffbilanz (Wärme und Wasser) mit den Verknüpfungen des Energie- des Wasser- und Dampftransports. Der Dampf tritt zunächst als Gas auf und agiert im Austausch mit dem Luftporenvolumen. Bei Kontakt mit der Bodenoberfläche kondensiert der Dampf spontan. In allen Luftporen und Bodenkanälen, die vom Dampf erreicht werden kondensiert der Dampf überall dort, wo der Boden noch nicht auf 100°C erhitzt wurde. Bei der Kondensation wirken sich für das Wasser als Flüssigkeit die Bindekräfte an den Boden (Verschlammung) sehr viel stärker als die Schwerkraft nach unten (Dränagewirkung) aus. Die Dämpftechnik blockiert sich zwangsläufig selbst, wenn alle ursprünglichen vorhandenen Hohlräume und Luftporen von Wasser ausgefüllt sind und wenn dieses Wasser nicht abfließt.

*)Die verwendeten physikalischen Größen werden in Kap. 10 erläutert.

Der Wärmetransport im Boden schreitet nur solange sehr zügig voran, wie der Dampf die Luft verdrängen kann und das entstehende Kondensat genügend Hohlräume vorfindet. Er wird jedoch sehr stark gebremst, wenn kein Dampf mehr nachrückt und nur noch Wärmeleitung über den Boden stattfindet und ein Teil der Wärme über das dann langsam erkaltende Kondensat nach unten transportiert wird. Diese Zusammenhänge werden ausführlicher in Kapitel 4.5 dargestellt, insbesondere deswegen, weil hier die wesentliche Ursache beim Mislingen der Bodendämpfung gesehen wird.

Die physikalischen Stoffgrößen der Wärmeleitfähigkeit der trockenen Bodensubstanz, des Wassers im Boden und der Luft in den vorhandenen Poren sind so gering, dass eine Erwärmung des Bodens allein über die Wärmeleitfähigkeit indiskutabel ist.

4.1 Der Energiebedarf des Bodens

Die Energie wird angegeben in

$J = Ws$ (Joule = Wattsekunde) oder in $Wh = 3600 J$ oder in $kWh = 3600 kJ$.

Bei der Gegenüberstellung der (Dämpf-)Leistung in kW und Wärmespeicherung im Boden in kWh ist die Umrechnung über 1 Stunde näher liegend als über 1 Sekunde. Deshalb werden bei den folgenden Betrachtungen die Angaben in Wh bzw. kWh bevorzugt verwendet.

Der früher üblichen Kilokalorie entspricht $1 kcal = 1,163 Wh = 4,19 kJ$.

Der Energiebedarf für das Erhitzen des Bodens ist abhängig von:

- a) der Bodenart,
- b) der Dichte des Bodens,
- c) der Feuchte des Bodens,
- d) der Bodentemperatur zu Beginn und am Ende des Dämpfvorgangs,
- e) den Wärmeverlusten, die beim Dämpfvorgang auftreten.

Er ist für $1 m^3$ Boden

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges}} \text{ Wh/m}^3 &= Q_{\text{thoer}} + Q_{\text{Verluste}} \\ &= C_{\text{Vol}} \cdot \Delta T + Q_{\text{Verluste}} \end{aligned}$$

Der theoretische Energiebedarf

Q_{theoret} wird bestimmt durch die oben aufgeführten Punkte a) bis d) mit

C_{Vol} Wh/m^3K oder J/cm^3K , der spezifischen Wärmekapazität des Bodens (mit dem jeweiligen Porenvolumen und Wassergehalt) sowie

ΔT K , der Temperaturdifferenz vom Ausgangszustand bis zur gewünschten Abtötungstemperatur bzw. der erreichten Endtemperatur.

Die Energieverluste sind zum Teil relativ unabhängig vom Dämpfverfahren, z.B. die Wärmeübertragung an die benachbarten nicht gedämpften Flächen. Sie treten bei bestimmten Dämpftechniken auf wie z. B. beim Absaugen des aufgeheizten Dränagewassers beim Unterdruckdämpfen. Sie können aber auch entscheidend reduziert werden, beispielsweise durch Abdecken der Dämpffolie mit einem Isoliervlies.

Da die Dampfleistung zu Dämpfbeginn am größten ist und mit der Dämpfzeit ständig abnimmt, die Verluste sich jedoch relativ konstant über die Dämpfzeit aufsummieren, verschlechtert sich der Dämpfwirkungsgrad $\eta = Q_{\text{thoer}} / Q_{\text{ges}}$ vom Startbeginn ständig.

Somit gilt als Voraussetzung für ein effektives Dämpfen:

Der Dämpfvorgang ist zeitlich auf ein Mindestmaß zu begrenzen.

Da in der Praxis von einer zu dämpfenden Fläche mit einer angestrebten Dämpftiefe ausgegangen wird, ist es zweckmäßig, mit Bodenvolumina und nicht mit Bodengewichten zu rechnen. Die für eine Berechnung erforderlichen spezifischen Stoffgrößen sind in der Literatur jedoch auf das Gewicht (die Masse) bezogen, da bei einer Volumenangabe immer das in der Praxis sehr unterschiedliche Porenvolumen berücksichtigt werden muss.

Folgende Definitionen werden verwendet:

1 m³ Boden setzt sich aus den festen Bodenteilchen bzw. dem Substanzvolumen SV und dem Gesamtporenvolumen GPV zusammen.

Das Gesamtporenvolumen setzt sich aus dem Luftvolumen LV und dem Wasservolumen WV zusammen.

Für das Substanzvolumen liegt die Dichte der Mineralböden (je nach Ton- und Humusgehalt) relativ eng begrenzt zwischen 2,5 und 2,7 g/cm³ (Kuntze et al., 1983, Seite 195).

Die natürliche Lagerungsdichte – ohne Berücksichtigung der vor dem Dämpfen zwingend erforderlichen Bodenlockerung – liegt (mit Ausnahme von Moorböden) zwischen 1,1 und 2,0 g/cm³. Bei diesen Angaben handelt es sich um trockenen Boden. Da eine Bodenverdichtung über 2,0 g/cm³ nicht realisierbar ist, entspricht diesem hohen Verdichtungsgrad ein Gesamtporenvolumen von $(1 - 2,0/2,6) \cdot 100 = 23 \%$ (2,6 g/cm³ entspricht Mineralischen Gestein).

Für den praktischen Fall kann im unbearbeiteten Boden mit einem Gesamtporenvolumen von 45 % gerechnet werden. Das entspricht einer Lagerungsdichte zwischen 1,35 und 1,5 g/cm³.

Da beim Bodendämpfen der obere Bereich in der Regel gut gelockert ist und der untere Bereich eine durch Bodenbearbeitung wenig beeinflusste Lagerungsdichte aufweist, werden in der Praxis im oberen Bereich bis maximal 80 % Gesamtporenvolumen, im mittleren Bereich 55 % und im nicht gelockerten unteren Bereich 45 % (Ausnahmen 30%) vorhanden sein.

Die bei eine Reihe von Dämpfversuchen in Gartenbaubetrieben in Gewächshäusern untersuchten Böden hatten eine Bodenfeuchte zwischen 10 und 30 Gewichtsprozent Wasser bezogen auf die Trockensubstanz. Aus den oben erwähnten Gründen sind bei den energetischen Betrachtungen auch die Angaben für die Bodenfeuchte in Volumenprozenten aussagekräftiger als in Gewichtsprozenten.

Der spez. Wärmekoeffizient C für 1 m³ Bodenvolumen kann aus den Einzelkomponenten der Tabelle 4.1 ermittelt werden (Bolt in Kuntze, 1983, Seite 241).

	C_{Vol} J/cm ³ K	C_{Vol} Wh/m ³ K
Quarz	2,11	586
Ton	2,49	692
Humus	2,76	767
Wasser	4,19	1164
Luft	0,0012	0,3

Tab. 4-1: Spezifische Wärmekoeffizienten des Bodens

4.1.1 Beispiele für realistische spezifische Wärmekoeffizienten

In den beiden folgenden Beispielen sind jeweils für einen charakteristischen und definierten Freilandboden und ein Gefäßsubstrat die Wärmekoeffizienten in Abhängigkeit des Wassergehaltes zusammengestellt.

Mineralischer Freilandboden (ohne Bodenbearbeitung)

mit insgesamt 50% Sand-, Schluff- und Tonanteilen, 5% Humus

mit	10	20	30	40	Vol% Wasser
oder	7	14	21	28	Gew%
C_{Vol}	476	592	708	825	Wh/m ³ K

Daraus errechnet sich ein Energiebedarf $Q_{theoret,}$ für eine Temperaturerhöhung von 60 bzw. 80 K

80 K	38,08	47,36	56,64	66	kWh/m ³
60 K	28,56	35,52	42,48	49,50	kWh/m ³

Gärtnerisches Gefäßsubstrat

mit insges. 20% organischer Substanz und mineralischen Anteilen

mit	10	20	30	40	Vol% Wasser
oder	19,2	38,5	57,7	76,9	Gew%
C_{Vol}	246	362	478	594	Wh/m ³ K

Daraus errechnet sich ein Energiebedarf $Q_{theoret,}$ für eine Temperaturerhöhung von 60 bzw. 80 K

80 K	19,68	29,0	38,2	47,5	kWh/m ³
60 K	14,76	21,7	28,7	35,64	kWh/m ³

Spezifiziertere Angaben werden bei Hege und Ross (1972) gemacht.

4.1.2 Umrechnung des Wassergehaltes im Boden von Volumen- auf Gewichtsprozente bei unterschiedlichen Rohdichten. Ausgangsbasis ist eine Dichte der Festsubstanz von $2,61 \text{ g/cm}^3$

In der folgenden Tabelle werden für einen charakteristischen und definierten Freilandboden mit unterschiedlichem Porenvolumen und unterschiedlichem Wassergehalt Volumen- und Gewichtsprozente gegenüber gestellt.

Boden	20	30	40	50	60	70	Vol %
Porenvolumen	80	70	60	50	40	30	%
Rohdichte	0,52	0,78	1,04	1,305	1,57	1,82	g/cm^3

10 Gew.% Wasser bezogen auf die trockene Substanz

ergeben	Wasservolumen	5,2	7,8	10,4	13,1	15,7	18,3 %
	Luftporenvolumen	74,8	62,2	49,6	36,9	24,3	11,7 %

20 Gew.% Wasser

ergeben	Wasservolumen	10,4	15,6	20,8	26,2	31,4	----- %
	Luftporenvolumen	69,6	54,4	39,2	23,8	8,6	----- %

30 Gew.% Wasser

ergeben	Wasservolumen	15,6	23,5	31,2	39,2	-----	----- %
	Luftporenvolumen	64,4	46,5	28,8	10,8	-----	----- %

40 Gew.% Wasser

ergeben	Wasservolumen	20,8	31,3	41,8	-----	-----	----- %
	Luftporenvolumen	59,2	38,7	18,2	-----	-----	----- %

Tab. 4-2: Umrechnung des Wassergehaltes im Boden von Volumen- auf Gewichtsprozente bei unterschiedlichen Rohdichten. Ausgangsbasis ist eine Dichte der Festsubstanz von $2,61 \text{ g/cm}^3$

4.2 Enthalpie des Wasserdampfs

1 kg Dampf hat gegenüber 1 kg Wasser bei 100°C eine Enthalpiedifferenz bzw. eine Verdampfungswärme

$$r = 2256,7 \text{ kJ/kg} \text{ oder } r = 626,86 \text{ Wh/kg. (Zusätzliche Angaben Kap 10)}$$

Diese Wärmeenergie steht theoretisch zur Verfügung, um den Boden auf 100°C zu erhitzen.

Da grundsätzlich mit überhitztem Dampf gearbeitet wird, sind dies zusätzlich bei

105°C	9,5	kJ/kg	oder	2,5	Wh/kg
110°C	19	kJ/kg		5,3	Wh/kg
120°C	38	kJ/kg		10,6	Wh/kg
130°C	57	kJ/kg		31,0	Wh/kg

Der zusätzliche Energiegewinn von Dampf, der auf 130°C überhitzt wird, beträgt gegenüber trocken gesättigtem Dampf bei 100°C somit nur ca. 5%. Die Überhitzung des Dampfes dient lediglich zur Kompensation der Energieverluste zwischen Dampferzeuger und Dämpffläche und soll verhindern, dass an der Dampfaustrittsstelle unter der Folie Kondensat anfällt und den Boden an dieser Stelle verschlammmt. Für die Energiebilanz im Boden spielt die Überhitzung keine Rolle.

Wenn der Boden auf weniger als 100°C erhitzt werden soll, steht zusätzliche Wärme durch die Abkühlung des kondensierten Dampfes zur Verfügung.

Dies sind bei

90°C	42	kJ/kg	oder	11,7	Wh/kg
80°C	84	kJ/kg		23,4	Wh/kg
70°C	126	kJ/kg		35,0	Wh/kg
60°C	168	kJ/kg		46,7	Wh/kg

Da der Dampf grundsätzlich von oben zugeführt wird, wird sich der obere Bereich des Bodens nach entsprechender Zeit immer auf 100°C erhitzen, sodass sich die evtl. erforderlichen niedrigeren Temperaturen energiebilanzmäßig nur in den tieferen Schichten auswirken.

Dennoch kommt dieser Überlegung eine ganz besondere Bedeutung zu. Bei der praktischen Durchführung des Dämpfvorganges spielt es eine wesentliche Rolle, ob beispielsweise in 40 cm Bodentiefe 60°C oder 90°C gefordert werden.

Die Erzeugung von Dampf bei 1 bar Luftdruck und 80°C ist mit einer Venturidüse am Dampfaustritt des Kessels möglich. Damit gelangt jedoch zusätzlich Luft unter die Folie, die auch zusätzlich verdrängt oder abgesaugt werden muss.

Da die eigentliche Problematik jedoch nicht in der Energiebilanz, sondern in der Forderung liegt, eine bestimmte Bodentiefe zu erreichen, sind die physikalisch bedingten Temperaturen des Wasserdampfes von 100°C eher positiv zu bewerten.

4.3 Theoretischer Dampfbedarf

Da der Energiebedarf zur Erwärmung des Bodens in hohem Maße vom Porenvolumen und ganz besonders vom Wasseranteil abhängt, ist es zweckmäßig, die infrage kommenden Anteile der reinen Bodensubstanz ohne Porenvolumen, sowie beim Porenvolumen, die Luft- und Wasseranteile getrennt darzustellen.

In Abb. 4-1 sind alle theoretisch denkbaren Zusammensetzungen in einem Dreieckdiagramm dargestellt.

Die 3 Eckpunkte des Diagramms geben jeweils
 100 Vol.-% Bodensubstanz SV,
 100 Vol.- % Luft LV
 und 100 Vol.-% Wasser WV an.

Der übliche Bodenzustand vor dem Dämpfen ist gekennzeichnet durch die Grenzfälle 5% Wasservolumen (sehr trocken)
 30% Wasservolumen (sehr feucht)
 und die Grenzfälle 20% Substanzvolumen (lockerer Boden)
 50% Substanzvolumen (dichter Boden).

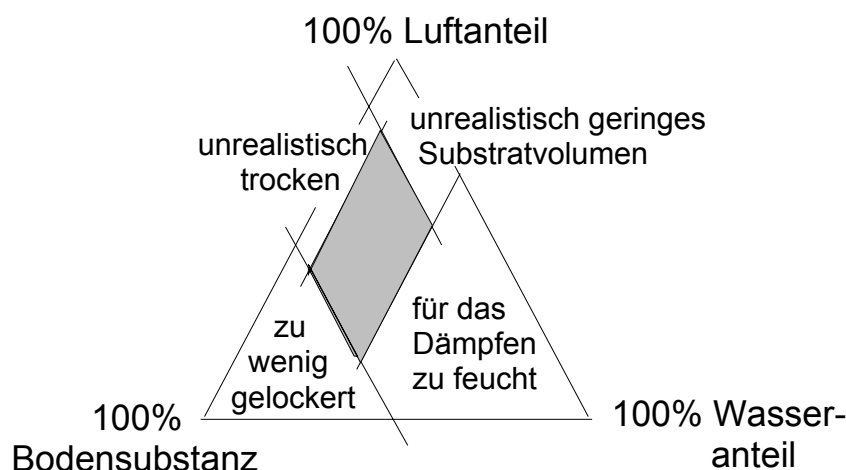


Abb. 4-1: Anteile des Substanzvolumens, des Wasservolumens und des Luftvolumens im Boden

Nach den Berechnungen in Kap. 4.1 liegt der Energiebedarf beim Freilandboden zwischen 28 und 56 kWh/m³. Die beiden "Extremwerte" sind in Abb. 4-2 in der Zusammensetzung der Bodensubstanz und der zugehörigen Wasseranteile dargestellt für die Grenzfälle 20% Substanzvolumen (lockerer Boden)

50% Substanzvolumen (dichter Boden).

In tieferen Schichten dürften besonders günstige Bedingungen bei 30% Substanzvolumen
 10% Wasservolumen vorliegen.

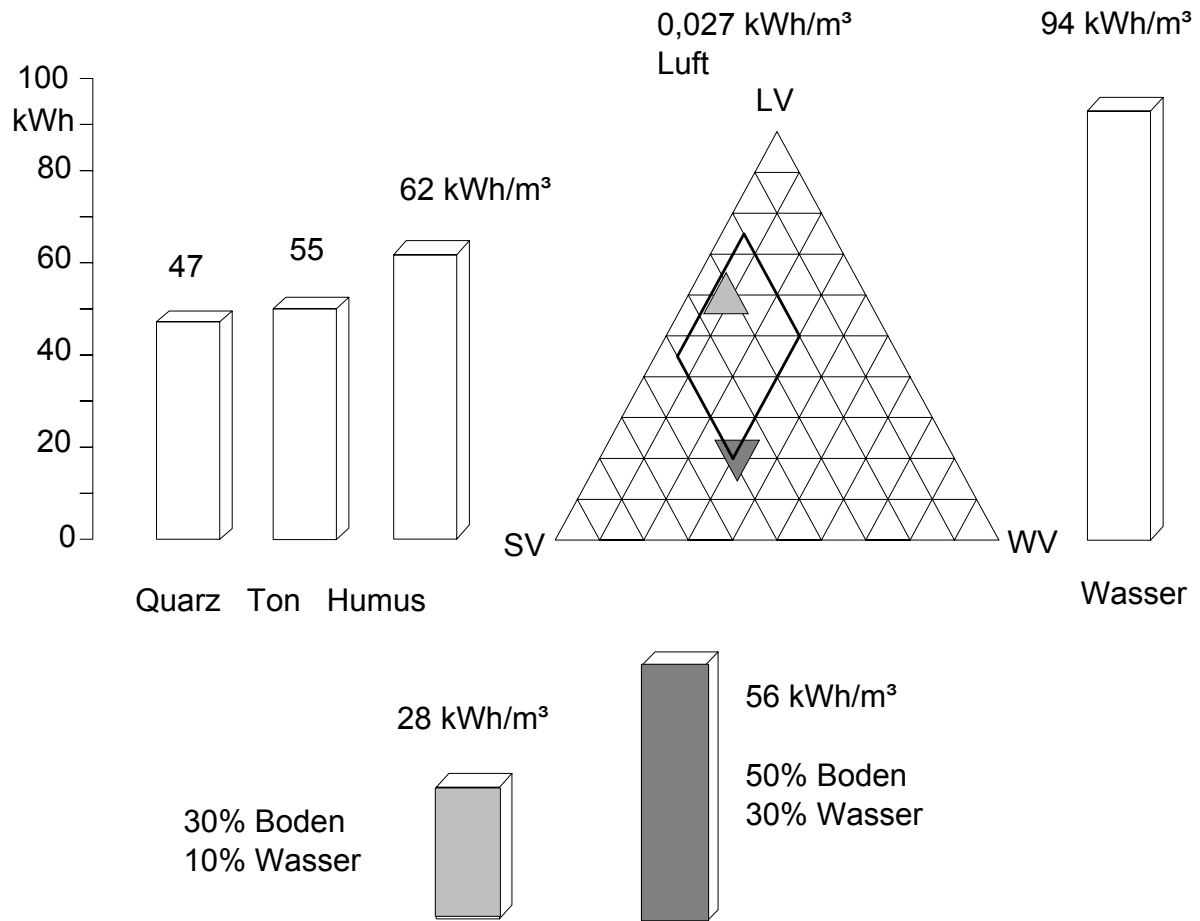


Abb. 4-2: Übersicht zur Abschätzung des Energiebedarfs eines Freiland- und Gewächshausbodens beim Dämpfen bei einem $\Delta T = 80\text{K}$.

Bei vollständiger Umsetzung der Enthalpie des Dampfes im Boden ergibt sich ein theoretischer Dampfbedarf bei einer Dämpftiefe

Von	15 cm	von	6 bis 13 kg/m ²
	30 cm		13 bis 27 kg/m ²
	35 cm		15 bis 31 kg/m ²
	60 cm		27 bis 54 kg/m ²

Für die hier untersuchten Dämpfverfahren wird die jeweilige Zuordnung in Abb. 4-3 vorgenommen.

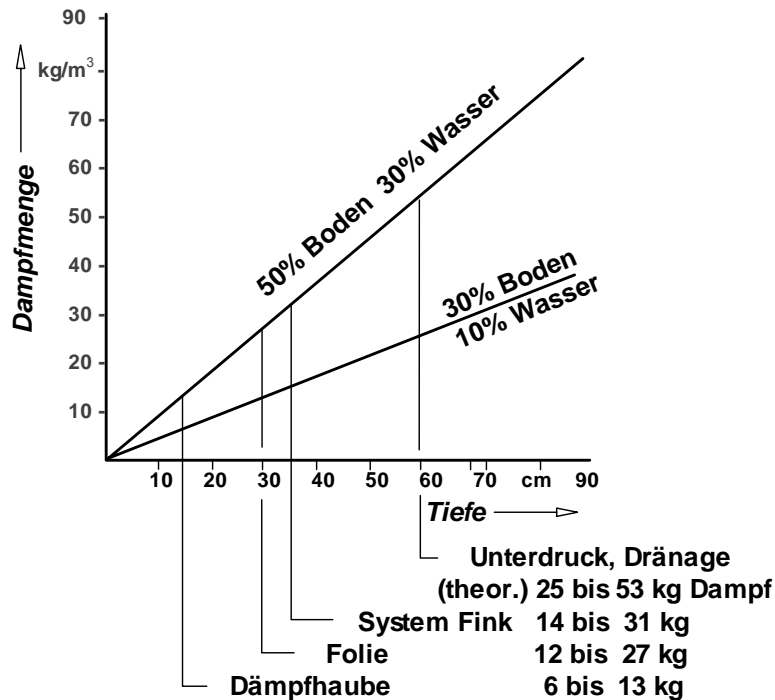


Abb. 4-3: Mindestdampfbedarf der einzelnen Verfahren

4.4 Berücksichtigung von Wärmeverlusten

Bei der Bodendämpfung treten Verluste auf:

- bei der Dampfzuführung,
- durch die konvektive Wärmeabgabe und Abstrahlung der Folie,
- durch undichte Stellen beim Aufliegen von Dämpfhaube und Folie auf dem Boden,
- durch die Wärmeleitung zu den seitlich angrenzenden Flächen,
- durch die Wärmeleitung in tiefere Bodenschichten.

Gegenüber den bislang betrachteten Energiebilanzen, bei denen der Zeitablauf keine Rolle spielte, sind die Verluste im wesentlichen von dem untersuchten Zeitabschnitt, also von der Dauer des Dämpfvorganges abhängig. Da grundsätzlich kürzere Dämpfzeiten geringere Verluste bedeuten, hängt die Effizienz des Dämpfens ganz entscheidend davon ab, welche Wärmeenergie in einer bestimmten Zeit in den Boden geleitet werden kann oder analog dazu, welche Dampfmenge der Boden in der Stunde in $\text{kg}_{\text{Dampf}}/\text{m}^3_{\text{Boden}}\cdot\text{h}$ aufnehmen, beziehungsweise der Dampfkessel in $\text{kg}_{\text{Dampf}}/\text{m}^2_{\text{Boden}}\cdot\text{h}$ an den Boden abgeben kann.

Bei der Definition der Verluste ist die Festlegung einer geforderten Temperatur in einer bestimmten Bodentiefe notwendig. Sind beispielsweise in einer Tiefe von 30 cm 70°C festgelegt, dann müsste im Einzelfall darüber diskutiert werden, inwieweit Temperaturen über 70°C (beispielsweise in 20 cm Tiefe) den Verlusten zuzuordnen sind.

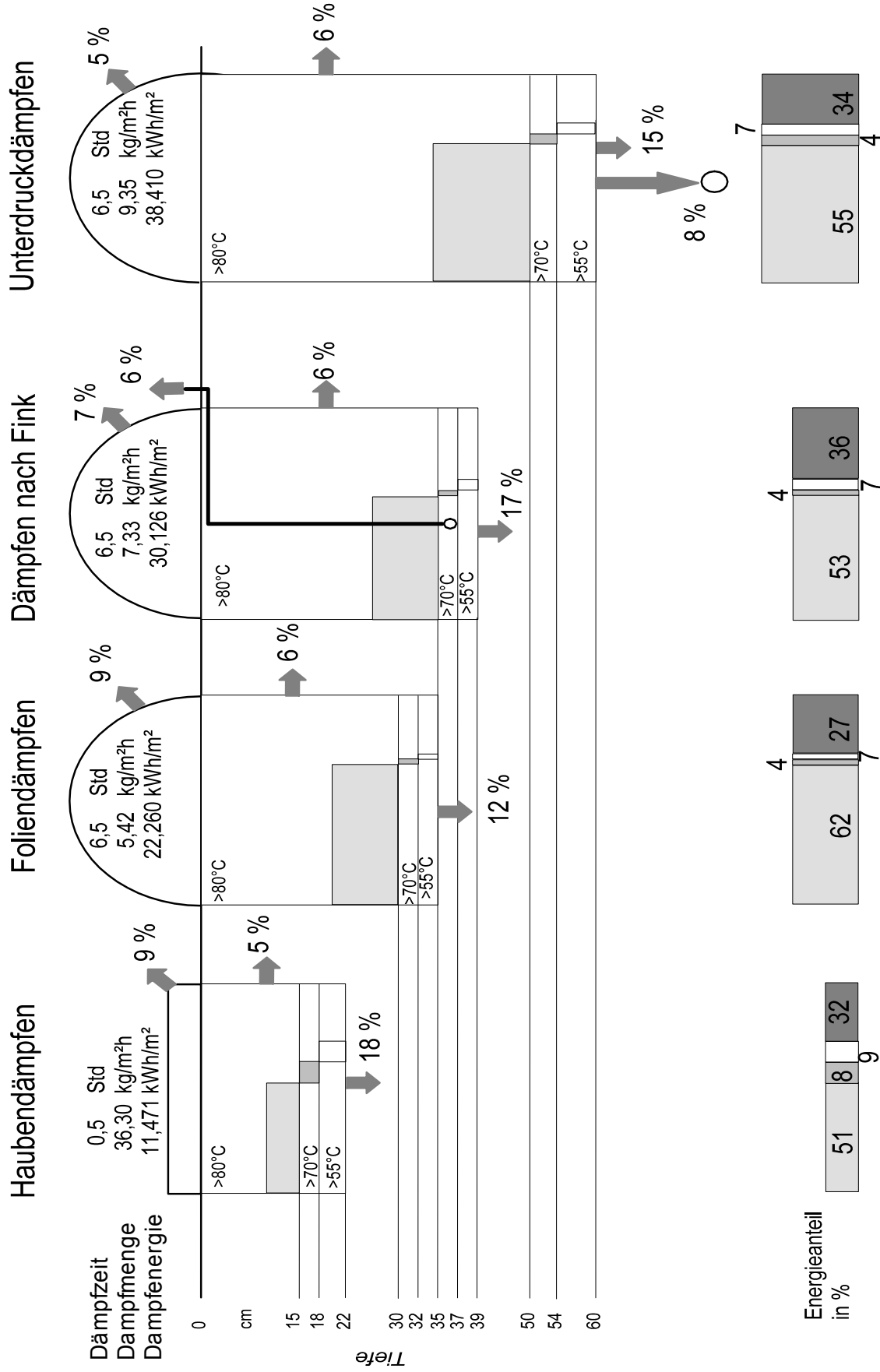


Abb. 4-4. Energieeinsatz bei den unterschiedlichen Dämpfverfahren

Eine vergleichende Darstellung über die in Praxisversuchen auf getretenen Anteile der Energien in unterschiedlichen Bodentiefen bei unterschiedlichen Temperaturen und der zugehörigen mittleren Verluste ist in Abb. 4-4 aufgezeigt.

Die Bezugsgröße der einzelnen Energieanteile ist die Enthalpiedifferenz von Wasserdampf bei 100°C gegenüber Wasser bei 100°C, also die Verdampfungswärme. Zur Erhitzung des Bodens auf 70°C kann aus dem Dampf zusätzliche Energie 'aktiviert' werden, nämlich die Enthalpiedifferenz des Kondensates zwischen 100°C und 70°C. In der Darstellung Abb. 4-4 sind diese zusätzlichen Energien nicht dargestellt.

In der gesamten Bilanzierung der aufzuwendenden Energie, sind zusätzlich die Wirkungsgrade bei der Dampferzeugung, also die Kesselwirkungsgrade zu berücksichtigen. Dies erfolgt jedoch in einem gesonderten Kapitel, das sich mit den Kesseln befasst. Streng genommen müsste auch die Energie von Hilfsaggregaten (Absauggebläsen) und bei Lohnunternehmen der Kraftstoffverbrauch für den Transport berücksichtigt werden. Hierfür sind jedoch die detaillierten Angaben über den Kostenaufwand aussagekräftiger.

Befasst man sich in einer übergeordneten Betrachtung mit einer Energiebilanz bei der Bodenerhitzung, die sich also nicht allein auf das Dämpfen beschränkt, so ist der Energieaufwand nach Kap. 10, Tab. 10-1 für die Erhitzung des Wassers von beispielsweise 20 auf 100°C mit $h'_{100^\circ\text{C}} - h'_{20^\circ\text{C}} = 419,1 - 83,9 = 335,2 \text{ kJ/kg} = 93,1 \text{ Wh/kg}$ ebenfalls als Verlust anzusehen, da das Wasser (bzw. der Dampf) selbst lediglich Transportfunktionen hat. Erhitzt man den Boden auf 80°C, so sind dies $335,0 - 83,9 = 251,1 \text{ kJ/kg} = 69,75 \text{ Wh/kg}$. Bezogen auf die Verdampfungswärme von 2256,7 kJ/kg sind dies bei 100°C Bodentemperatur 14,8 %, bei 80°C Bodentemperatur 11,1 %. Angaben Enthalpie von Wasser und Dampf bei den oben angegebenen Temperaturen sind der Tabelle 10-1 zu entnehmen.

In der Zusammenfassung von Kapitel 4.1 bis 4.4 ist generell festzuhalten:

Bei der Erhitzung des Bodens ist ein theoretischer Energiebedarf zwischen 28 und 56 kWh/m³ erforderlich, dessen exakter Wert durch die Gewichtsanteile der Bodensubstanz und der Bodenfeuchte feststeht. Dies entspricht einem theoretischen Dampfbedarf von 45 bis 90 kg Dampf je Kubikmeter Boden.

Der tatsächliche Energiebedarf ist je nach Verfahrenstechnik – bedingt durch Wirkungsgrade in den Verfahrensabläufen – wesentlich höher. Bezogen auf die Primärenergie Heizöl oder Erdgas kann speziell beim Dämpfen ein Wirkungsgrad von 60% angestrebt und als Vergleichsbasis zu alternativen Verfahren zugrunde gelegt werden.

Die Energiebilanzen sind durch Kostenanalysen zu ergänzen.

4.5 Wärmeübertragung im Boden

In den vorangegangenen Kapiteln 4.1 bis 4.3 wurde der theoretische Energie – und Dampfverbrauch nachgewiesen, wobei auf die exakte Festlegung für spezielle Bodenarten bewusst verzichtet wurde, da Detailangaben in diesem Bereich in der praktischen Anwendung sehr schwierig nachvollziehbar sind.

Die Angaben für den realistischen Energieverbrauch in Kapitel 4.4 auf der Grundlage umfangreicher Messungen in mehreren Gartenbaubetrieben führen immer wieder zu den kritischen Fragestellungen:

- *Müssen denn die Verluste so hoch sein? (30 bis 50%)?*
- *Sind die Angaben für die Dämpfzeit nicht viel zu hoch?*
- *Sind die Angaben für die Dampfleistung nicht viel zu niedrig?*

Alle diese Fragen zielen zu dem Wunschdenken, dass noch erhebliche Reserven bei der Wärmeübertragung im Boden bestehen, die bislang nicht berücksichtigt wurden.

Um die Vorgänge bei der Wärmeübertragung nachzuweisen und um die Grenzen aufzuzeigen, wird dieses Kapitel ausführlicher behandelt, und es werden zur Begründung auch Formeln eingefügt, die jedoch zum allgemeinen Verständnis nicht nachvollzogen werden müssen.

Die Wärmeübertragung im Boden wird in einzelnen Unterabschnitten behandelt, da sich hier mehrere physikalische Vorgänge überlagern, die sich gegenseitig beeinflussen und die bestimmten Gesetzmäßigkeiten gehorchen. Dabei ist wichtig, zu untersuchen, inwieweit diese Vorgänge durch technische Maßnahmen intensiviert werden können.

Obwohl eine exakte Aussage zur Wärmeübertragung an einem bestimmten Punkt im Boden unmöglich ist, weil sowohl die Bodenzusammensetzung als auch die Bodenstruktur an dieser Stelle nicht bekannt sind, können generelle Vorgänge durch die Berücksichtigung physikalischer Einflussgrößen genügend genau beschrieben und auch auf dieser Basis Messergebnisse interpretiert werden.

Die Leistung des Dampfkessels lässt sich grundsätzlich an die Aufnahmefähigkeit des Bodens anpassen. Somit ist die Leistung des Dampfkessels nicht der begrenzende Faktor. Die Dampfleistung hängt vielmehr davon ab, welche kondensierende Dampfmenge die hierbei freiwerdende Energie an eine möglichst große Oberfläche im Boden - die noch keine 100°C erreicht hat – abgeben kann und mit welcher die Geschwindigkeit der Weiterleitung der Wärme ins Innere dieses Bodens erfolgt.

Da die Kondensation spontan mit relativ großem Energiebetrag erfolgt und damit die Bodenoberfläche an der Stelle der Kondensation sehr schnell 100°C erreicht, setzt eine weitere Kondensation voraus, dass die Wärme ins Innere des Bodens weitergeleitet wird. Die Wärmeleitung im Boden verläuft relativ langsam und somit nimmt auch die Kondensation ab, obwohl der Boden in seiner Gesamtheit 100°C noch längst nicht erreicht hat. Dies kann für die Aufgabe, die Wärme in tiefere Schichten zu leiten, sogar von Vorteil sein, da mit der Kondensation zwangsläufig Wasser entsteht, das ohne zügiges Abfließen alle Hohlräume ausfüllt und die weitere Dampfung unterbindet. Bei der Wärmeübertragung spielt neben der Leitfähigkeit des Bodens auch die Ausbreitung des Kondensats und das Abfließen in tiefere Bodenschichten eine Rolle.

4.5.1 Wärmeübertragung aus Sicht der Wasserbilanz

Zur Erläuterung dient ein einfaches Modell mit kugelförmigen Bodenpartikeln. Betrachtet werden Bodenteilchen mit unterschiedlichen Durchmessern d . Für alle Kugeln ist der Rauminhalt

$V_{\text{Kugel}} = \pi d^3/6$ und die Oberfläche $O_{\text{Kugel}} = \pi d^2$. Das Verhältnis Inhalt zu Oberfläche ist also immer $d/6$ und somit eine charakteristische Länge.

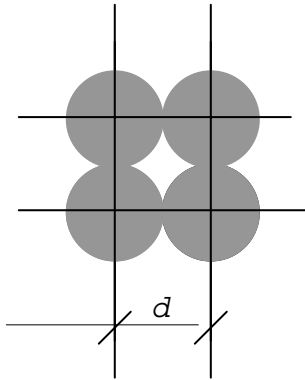


Abb. 4-5: Modell einer vereinfachten Anordnung von Bodenteilchen in Kugelform

Betrachtet man eine Kugelpackung in der Darstellung von

Abb. 4-5, so ist für einen Raumwürfel von $d = 10$ cm,

$V_{\text{Kugel}} = 524 \text{ cm}^3$ und der Hohlraum zwischen den Kugeln $1.000 - 524 = 476 \text{ cm}^3$.

Bei einem Energiebedarf des Bodens von 56 kWh/m^3 oder 56 Wh/dm^3 (entspr. Abb.4-2 für 50% Boden und 30% Wasser) und einer Verdampfungswärme des Wassers von $626,7 \text{ Wh/kg} = 626,7 \text{ Wh/dm}^3$ werden theoretisch $56 \cdot 1000/(627 \cdot 476) = 0,188 = 18,8 \%$ des Hohlraumes an kondensiertem Dampf benötigt, um den Boden zu erwärmen. Unter Berücksichtigung von Bild 4-4 muss von insgesamt 50 % Verlusten ausgegangen werden, sodass das Kondensat realistischer 38 % des Hohlraumes ausfüllt.

Man kann sich eine dichtere Kugelpackung vorstellen, als sie in Abb. 4-5 dargestellt wird, da jedoch die Bodenteilchen auch nicht kugelförmig sind, soll die Modelldarstellung von Abb. 4-5 lediglich eine räumliche Analogie zu Abb. 4-2 herstellen mit dort angegebenen realistischen Anteilen von Substanz- und Porenvolumen.

Geht man davon aus, dass die kugelförmigen Bodenteilchen mit Poren durchsetzt sind, die nahezu vollständig mit Wasser ausgefüllt sind, so würde dies nach Abb. 4-2. in einer Zusammensetzung von 40 % Boden 10 % Wasser und 50 % Luft und in der Ausgangssituation einem für das Dämpfen ideal trockenem Boden entsprechen. Man könnte auch von einer feuchteren Struktur mit 30 % Boden, 20 % Wasser und 50 % Luft ausgehen. Beide Fälle sind somit realistisch im Boden – unabhängig von der geometrischen Form der Bodenteilchen – vorhanden.

33 % Wasseranteil im Luftporenvolumen erscheinen zunächst – zusätzlich zu der Ausgangsbodenfeuchte nach Abb. 4-2 - nicht besonders kritisch. Man könnte also annehmen, dass ein Boden mit einem Gesamtporenanteil von 50% auch in relativ kurzer Zeit bis in beispielsweise 30 cm Tiefe in diesem Fall 48 Liter je Quadratmeter aufnehmen könnte.

Zwar ist das Porenvolumen (in der Modellbetrachtung) unabhängig von der Kugelgröße gleich groß, bei größeren Bodenklumpen ist jedoch der Anteil der Oberfläche zum Bodenvolumen geringer. Damit wird die Kondensation reduziert und noch zusätzlich verzögert, da der Wärmetransport ins Innere des Bodens länger dauert.

Bei fein gefrästem Boden kann sich der Boden in einer dünnen oberen Schicht sehr schnell erwärmen. Die plötzlich entstehende Kondensatmenge fließt relativ langsam nach unten ab und verdichtet sich weiter unten zu einer Bodenschicht, die mit Wasser gesättigt und die für nachrückenden Dampf undurchlässig ist.

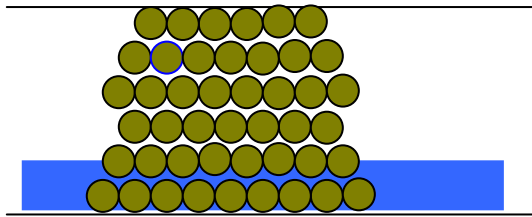


Abb. 4-6: Modell der Bodensättigung mit Wasser durch abfließendes Kondensat

Da das in den oberen Schichten entstandene Kondensat dort seine Aufgabe erfüllt hat, wirkt es tiefer im Boden nur noch als Ballast.

Es wird also in der Regel bei gefrästem Boden schon nach 10 bis 20 cm Bodentiefe der Punkt erreicht, wo der Dampf nicht weiter in die Hohlräume eindringen kann, sondern durch das dort angesammelte Wasser gebremst wird. Von da ab gewinnt die Frage der Wärmeleitung im Boden zunehmend an Bedeutung, es sei denn es gelingt durch Absaugen des Kondensats (Unterdruckdämpfen) neue Hohlräume zu schaffen.

Hinsichtlich der Größenordnung der Wassermengen, die in die tiefen Bodenschichten versickern, kann auch ein Vergleich zu den Infiltrationsraten und der Regenverdaulichkeit des Bodens herangezogen werden. Bei einer mittleren Dampfleistung für das Foliendämpfen von $5,4 \text{ kg/m}^2\text{h}$ (Abb. 4-4) entspricht dies einer Regendichte von $5,4 \text{ mm/h}$ oder $5,4 \text{ l/m}^2\text{h}$. Berücksichtigt man, dass bei einer Bodenerhitzung $>80^\circ\text{C}$ nur 62% des zugeführten Dampfes genutzt werden, ließe sich hiermit in einer Stunde eine Schicht von $626,7 \cdot 5,4 \cdot 0,62 / (56 \cdot 1000) = 0,0375 \text{ m} = 3,75 \text{ cm}$ auf 100°C erhitzen. Das erscheint relativ wenig zu sein, entspricht jedoch durchaus den Angaben, dass 30 cm in 6,5 Stunden auf 80°C erhitzt werden können.

Unabhängig davon, dass zu Beginn des Dämpfens nicht $5,4$ sondern 8 bis $10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ vom Boden aufgenommen werden, scheint ein 'Schwachregen' von weniger als 6 mm/h völlig unproblematisch zu sein. Der wesentliche Unterschied liegt beim Dämpfen darin, dass die Wasserzufuhr im Boden durch Kondensation unmittelbar an den Oberflächen erfolgt.

Aus dem Gesichtspunkt der Dränagewirkung eines gut gelockerten Bodens müsste eigentlich ein wesentlich höherer Wert zu erzielen sein, beispielsweise in der Größenordnung, die beim Haubendämpfen mit $36 \text{ kg/m}^2\text{h}$ erreicht wird. Das Problem der dampf- undurchlässigen mit Wasser gesättigten verschlammten Schicht, das in Abb. 4-7 dargestellt wird, lässt sich auch eindeutig nur beim Haubendämpfen nachweisen, wenn an die Grenze der Aufnahmefähigkeit des Bodens gegangen wird.

Man beobachtet allerdings ein entsprechendes Phänomen beim Unterdruckdämpfen. Wenn dort für eine gewisse Zeit das Gebläse ausfällt, ist der später wieder einsetzende Unterdruck nicht in der Lage, die Kanäle in tiefere Schichten von Wasser frei zu saugen.

Der Grund, warum beim normalen Foliendämpfen keine höhere Dampfleistung zu erzielen ist, liegt nicht in erster Linie an der Aufnahmefähigkeit des Bodens von Wasser, sondern daran, dass der Dampf nicht in den Hohlräumen sondern nur an den Oberflächen kondensieren kann, solange die noch nicht 100°C erreicht haben.

Ist der Boden fein gefräst, droht Verschlämmung und Abschnüren der Dampfzufuhr, ist er zu grob schollig, dann sind die Oberflächen relativ klein und die Kondensationsflächen reduziert.

Zum Vergleich mit dem Kugelmodell:

Kugeln mit 1 mm Durchmesser haben bei gleichem Raumvolumen eine 100-fache Oberfläche gegenüber Kugeln mit 100 mm = 1 dm Durchmesser.

Der Wasserfilm der Kondensation an der Oberfläche hat sofort beim Entstehen 100°C, leitet die Wärme jedoch nur langsam weiter. Das nach unten fließende Kondensat bildet zwar neue Hohlräume und kühlt dabei auch schnell ab. Diese Hohlräume werden durch den nachrückenden Dampf auch ausgefüllt, der jedoch bei entsprechendem Porenvolumen nur geringe Gewichtsanteile enthält. Auch hier wird sofort eine Kondensation eingeleitet, die dann aber bei einer Oberflächen- bzw. Wassertemperatur von 100°C schnell wieder abbricht.

4.5.2 Wärmeübertragung aus Sicht der Energiebilanz

Während die geringe Wärmeleitfähigkeit in horizontaler Richtung - zumindest im oberen Bodenbereich - durchaus positive Aspekte hat, a) wegen der zeitlich verzögerten Kondensation, b) wegen geringer Wärmeverluste zu den angrenzenden Flächen, ist die geringe Wärmeleitung nach unten sehr nachteilig, weil sie den Dämpfvorgang entscheidend bremst und zwangsläufig verlängert.

Beim Dämpfen verläuft der Wärmetransport im Boden nicht stationär, d. h. er ist beginnend bei niedrigen Bodentemperaturen größer als gegen Ende der erreichten höheren Temperaturen.

Ein Teil der Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung des Bodens, ein Teil wird weitergeleitet. Die Wärmezufuhr (Energiezufuhr) \dot{q}_{zu} entspricht der Enthalpie der stündlich zugeführten Dampfmenge je m² Grundfläche.

$$\dot{q}_{zu} \text{ W/m}^2 = \dot{m} \cdot h_{\text{Dampf}}, \text{ mit}$$

$$\dot{m} \text{ kg}_{\text{Dampf}}/\text{m}^2\text{h}$$

$$h \text{ Wh/kg} = r + c_W(100^\circ\text{C} - \vartheta)$$

$$\vartheta \text{ }^\circ\text{C} \text{ Bodentemperatur während des Dämpfens}$$

$$\vartheta_0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ Bodentemperatur vor dem Dämpfen}$$

Der Boden nimmt die ständig zugeführte Energie Q_{zu} auf.

$$Q_{zu} \text{ Wh/m}^3 = C_B \cdot V_B (\vartheta - \vartheta_0)$$

Für eine Fläche A von 1 m^2 mit einer Schichtdicke Δx ist

$$Q_{zu} \text{ Wh/m}^3 = C_B \cdot A \cdot \Delta x (\vartheta - \vartheta_0) \text{ oder}$$

$$q_{zu} \text{ Wh/m}^2 = C_B \cdot \Delta x (\vartheta - \vartheta_0)$$

Für eine Bodenschicht der Dicke Δx erfolgt die Energiezufuhr von oben

- durch Wärmeleitung
- durch Wärmeübertragung von Sickerwasser aus dem kondensierten Dampf und ggf.
- durch kondensierenden Dampf.

Die Energieweiterleitung in tiefere Schichten erfolgt ebenfalls

- durch Wärmeleitung
- durch den Energieinhalt des Sickerwassers.

Für die weitere Betrachtung wird der Boden in drei Schichten zu unterteilt:

I Temperatur $\geq 100^\circ\text{C}$

Hier wird der von oben zugeführte Dampf ohne Kondensation, d.h. ohne Enthalpieabgabe in tiefere Schichten weitergeleitet. Die Bilanz der zugeführten und abgeführten Energie- und Dampfmengen ist ausgeglichen.

II Temperatur $\leq 100^\circ\text{C}$

In diesem Bereich findet die Kondensation des Dampfes statt. Die zugeführte Wärmeenergie entspricht der Verdampfungswärme des Wassers. Die Wärmeleitung in der vertikalen Richtung ist gegenüber der Kondensationswärme vernachlässigbar gering.

III Temperatur $< 100^\circ\text{C}$

Die Energiezufuhr erfolgt von oben durch Wärmeleitung und Sickerwasser, die Wärmeableitung nach unten ebenfalls.

In Abb. 4-7.1 sind die Trennungslinien zwischen den einzelnen Schichten idealisiert dargestellt. Wegen der unterschiedlichen Gefügestruktur und Bodenverdichtung ist die Darstellung von Abb. 4-7.2 realistischer.

Bei dieser Betrachtung gibt es im Bereich III also bei einer Bodentemperatur von 80°C keinen Dampf. Sollte sich dennoch in diesem Bereich nicht kondensierter Dampf befinden, so kann es nur daran liegen, dass sich der Dampf in einer vertikalen 'Bodenröhre' mit einer Oberflächentemperatur von 100°C befindet und dass der horizontale Energietransport noch nicht abgeschlossen ist. Diese singuläre Stelle in Bereich III ist energetisch Bereich II zuzuordnen. Für die praktische Behandlung des Modells bedeutet das, dass die Bereichsgrenzen von II nach III nicht horizontal verlaufen sondern von vielen Kanälen durchzogen wird und dass die mittlere Schichtdicke von Bereich II mit zunehmender Dämpfzeit zunimmt.

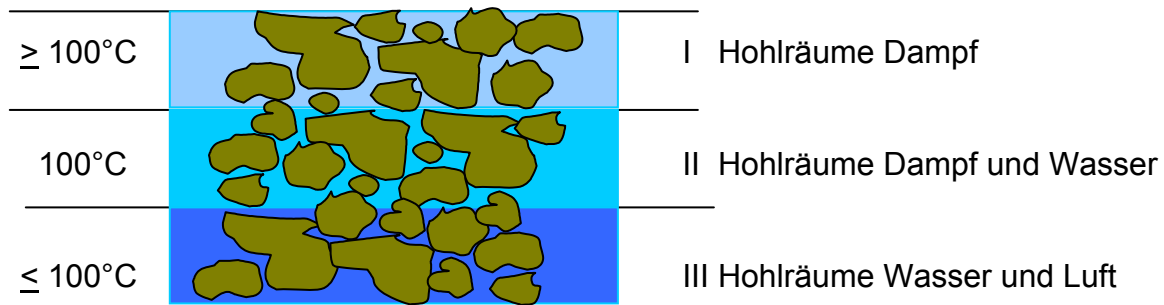


Abb. 4-7.1: schematische Verteilung von Wasser und Dampf im Boden

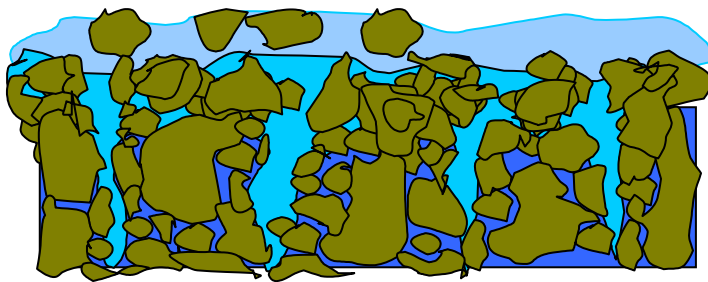


Abb. 4-7.2: Verteilung von Wasser und Dampf im Boden in Abhängigkeit von der Bodenverdichtung

4.5.3 Wärmeleitung im Boden

Zunächst soll die Wärmeleitung im Boden unabhängig vom gleichzeitig stattfindenden Wassertransport untersucht werden.

In der oben definierten Schicht II kann man davon ausgehen, dass ein Bodenteilchen an der gesamten Außenfläche von Kondensat mit einer Wassertemperatur von 100°C umgeben ist und dass die Wärme von allen Seiten langsam ins Innere eindringt.

In der Schicht III erfolgt die Wärmeleitung grundsätzlich vertikal von oben nach unten, ausgehend von der Trennungslinie II/III mit 100°C . Die Wärmeleitung wird in Bereich III dann der begrenzende Faktor sein, wenn es nicht gelingt, die Sickergeschwindigkeit des kondensierten Wasserdampfes zu erhöhen.

Bei einem nichtstationären (sich ändernden) Wärmestrom durch einen festen Körper der Dicke dx ändert sich die Temperatur nicht linear, sondern nach den Gesetzen

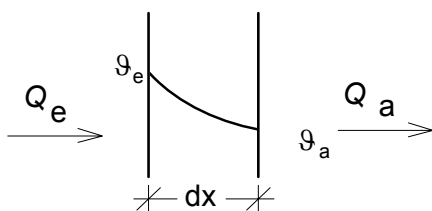


Abb. 4-8: Temperaturverlauf bei der Bodenerwärmung durch Wärmeleitung

der Thermodynamik gemäß der Form $dQ_\lambda = \lambda \cdot A \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dt$

Der Boden selbst nimmt als Speicher die Energie dQ Wh auf

$$dQ = C_B \cdot A \cdot \Delta x \cdot d\vartheta \quad (\text{vergl. Kap.4.5.5})$$

Die Zunahme der Bodenerwärmung dQ entspricht der Abnahme der Wärmeleitung dQ_λ

$$\text{Daraus folgt: } \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dt = C_B \cdot d\vartheta \quad \text{und} \quad d\vartheta = \lambda C_{Vol} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dt$$

Der Wärmedurchgang und der Temperaturverlauf ist neben dx von von der Dichte ρ kg/m^3 , der spezifischen Wärmekapazität c Wh/kgK und der Wärmeleitfähigkeit λ W/mK abhängig. Die Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda / \rho \cdot c$ $\text{m}^2/\text{h} = \lambda C_{Vol}$ kennzeichnet den Wärmetransport. Je höher die Temperaturleitfähigkeit a desto schneller stellt sich die Temperaturerhöhung ein.

Für die Lösung der Differentialgleichung bietet sich nach Schmidt (1942) ein graphisches Verfahren an, durch Umformung von

$$d\vartheta = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dt \quad \text{in} \quad \Delta \vartheta = a \frac{\Delta^2 \vartheta}{\Delta x^2} \cdot \Delta t .$$

Wie aus Tabelle 4-3 zu entnehmen, ist der Wert für Wasser und damit die Temperaturleitfähigkeit eines feuchten Bodens besonders ungünstig. Wenn im Bereich II der Boden mit Sickerwasser (kondensiertem Dampf) nahezu gesättigt ist, dauert die Bodenerwärmung entsprechend lange.

	λ J/cm s K	λ W/mK	C_{Vol} Wh/m ³ K	a 10 ⁻³ m ² /h
Quarz	0,088	8,8	586	15,02
Ton	0,029	2,9	692	4,19
Humus	0,0025	0,25	767	0,326
Wasser	0,0066	0,66	1164	0,507
Luft	0,00029	0,029	0,226	128

Tab.4-3: Thermische Eigenschaften von Bodenbestandteilen von Luft und Wasser (für gesättigte Luft von 90°C)

Die Luft leitet zwar die Wärme sehr schlecht, wegen der sehr geringen Wärmekapazität ist sie bei der Erwärmung des Bodens jedoch praktisch kein Hindernis.

Die Wärmeleitung im Boden (isoliert von den Betrachtungen des Wärmetransportes des Dampfes und des kondensierten Wassers) lässt sich folgendermaßen darstellen: Teilt man den Boden von oben nach unten in die Abschnitte Δx ein, so erhält man in

graphischer Auswertung der Vorgänge der Wärmeleitung Temperaturprofile im Boden, die nach bestimmten Zeitabschnitten Δt eintreten (Schmidt, 1942).

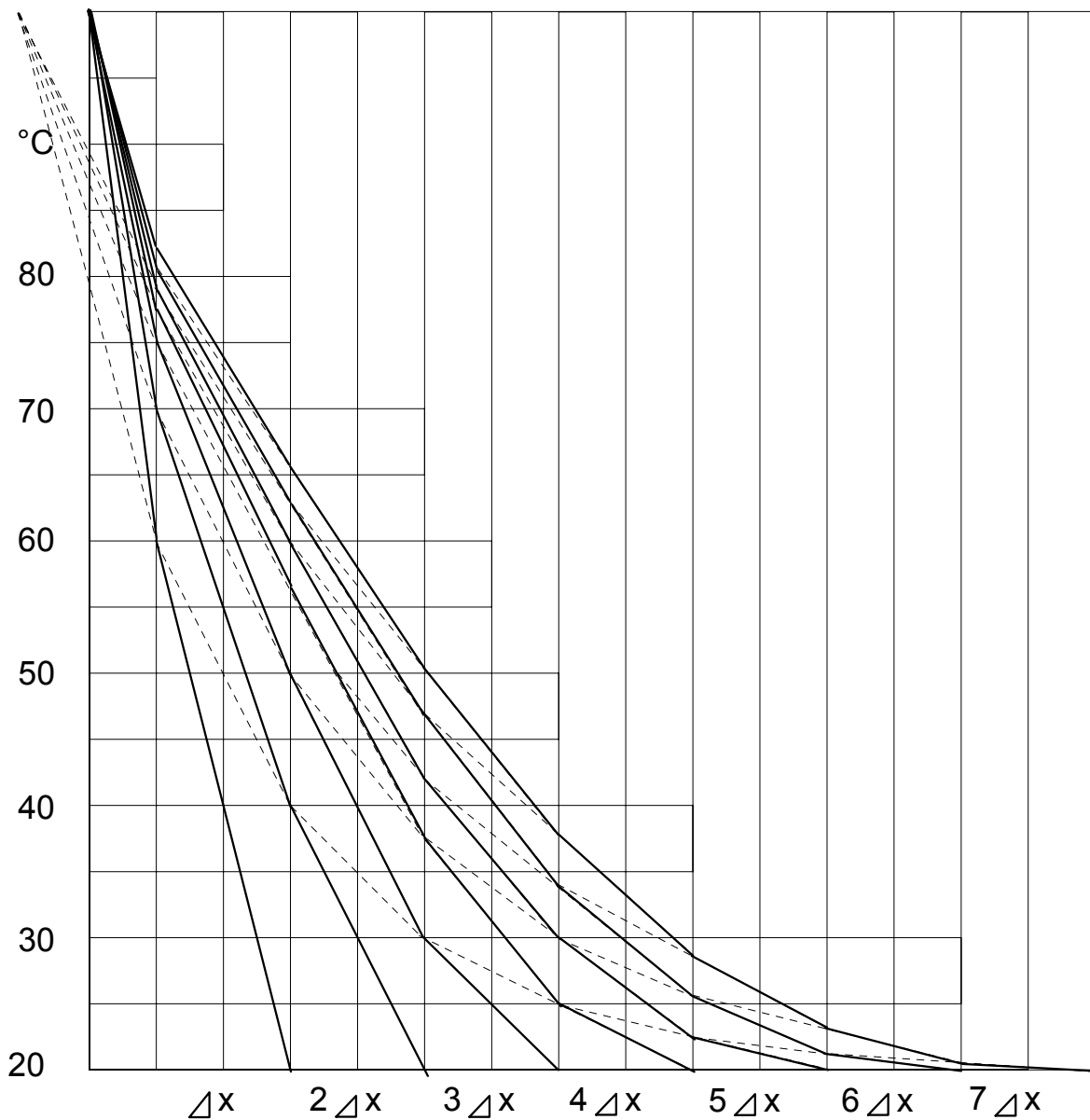


Abb. 4-9: Der Temperaturanstieg im Boden durch Wärmeleitung am Beispiel
 $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ / $\vartheta = 100^\circ\text{C}$

Die Zeitabschnitte Δt ergeben sich aus der Beziehung $\Delta t = (\Delta x)^2/2a$
 Für $\Delta x = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ und die Temperaturleitfähigkeiten a aus Tabelle 4-4 errechnen
 sich folgende Zeitabstände Δt für die einzelnen Temperaturprofile.

	Quarz	Ton	Humus	Wasser	Luft
für $\Delta x = 10 \text{ cm}$	0,3 h 20 min	1,2 h 72 min	15,3 h 920 min	8,8 h 528 min	0,06 h 1 min

Tab.4-4: Zeitabschnitte der Temperaturprofile von Abb. 4-8 für eine Schichtdicke von
 10 cm

Wegen der geringen spezifischen Wärmekapazität nimmt die in den Hohlräumen eingeschlossene Luft sofort die Temperatur der umgebenden Flächen des feuchten Bodens an. Da die Wärmeleitung im Boden gegenüber der Kondensation des Wasserdampfes und der Ausbreitung des Wassers dominiert, wenn der Boden mit Wasser relativ gesättigt ist, wird als Beispiel $a = 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,0025$ als Mittelwert von Ton und Wasser gewählt.

$$\begin{aligned} \text{Beispiel für } a = 0,0025: \quad & 0,1 \cdot 0,1 & = 0,01 \text{ m}^2 \\ & 0,0025 \cdot 2 & = 0,0050 \text{ m}^2/\text{h} \\ \Delta t = (\Delta x)^2/2a = & 0,01 / 0,005 & = 2 \text{ Stunden} \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich aus Abb. 4-8 folgende Temperaturen:

nach 2 Stunden die 1. durchgezogene Linie
in 10 cm Tiefe 40°C,

nach 4 Stunden die 2. durchgezogene Linie
in 10 cm Tiefe 55°C, in 20 cm Tiefe 30°C,

nach 6 Stunden die 3. durchgezogene Linie
in 10 cm Tiefe 62°C, in 20 cm Tiefe 40°C, in 30 cm Tiefe 25°C

nach 8 Stunden die 4. durchgezogene Linie
in 10 cm Tiefe 67°C, in 20 cm Tiefe 47°C,
in 30 cm Tiefe 32°C, in 40 cm Tiefe 22°C

Eine Bestätigung der Aussage resultiert (im Umkehrschluss der Abkühlung) aus den Messergebnissen nach Abschluss des Dämpfens, wo sich in der Regel 4 bis 5 Stunden nach Beendigung der Dampfung der Boden in 20 cm Tiefe von 100°C auf 80°C abgekühlt hat.

Bewertet man das Temperaturprofil in horizontaler Richtung unter Berücksichtigung von Dampf-/Wasserkanälen, deren Oberflächentemperaturen auf 100°C erhitzt sind, dann bieten sich kleinere Abschnitte $\Delta x = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$ an.

	Quarz	Ton	Humus	Wasser	Luft
für $\Delta x = 2 \text{ cm}$	0,8 min	2,9 min	37 min	24 min	5,6 sec

Tab.4-5: Zeitabschnitte der Temperaturprofile von Abb. 4-9 für eine Schichtdicke von 2 cm

Um das Diagramm (Abb. 4-9) für Erdkluten von 4 cm Dicke zu verwenden, müsste man es beispielsweise bei 5 Δx spiegeln und für $\Delta x = 0,4 \text{ cm}$ wählen, da die Erwärmung von 2 Seiten erfolgt. Man erkennt, dass die Bodenerwärmung in sehr feuchtem Boden besonders langwierig ist.

4.5.4 Wärmeübertragung durch kondensierenden Dampf und Wärmetransport durch nach unten absickerndes Kondensat

Bei der Modellbetrachtung kondensiert der Dampf nur in Bereich II und gibt dort seine Energie an der Oberfläche von Bodenteilchen ab, die noch nicht 100°C erreicht haben.

Die Energie- und Dampfmenge, die vom Bereich I dem Bereich II zugeführt wird, ist definiert durch die Dampfmenge \dot{m} und die Wärmemenge $\dot{q}_{zu} = \dot{m} \cdot r$.

Für einen bestimmten Zeitraum Δt ist $q_{zu} = \dot{m} \cdot r \cdot \Delta t$.

Die Bereichsdicke Δx_{II} ergibt sich aus der Überlegung, dass $\dot{m} \cdot r \cdot A \cdot \Delta t = C_B(100 - \vartheta)\Delta x \cdot A$ sein muss.

$$\Delta x(100 - \vartheta) = \dot{m} \cdot \Delta t \cdot r / C_B$$

Für $\dot{m} = 5 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$, $r_D = 627 \text{ Wh/kg}$, $C_B = 600 \text{ Wh/m}^3 \text{ K}$, $\Delta t = 1 \text{ h}$

ist $\Delta x(100 - \vartheta) = 5 \cdot 1 \cdot 627/600 \approx 5$.

Bei max. $100 - 20 = 80 \text{ K}$ ist $\Delta x = 5/80 = 0,064 \text{ m}$

Bei max. $100 - 50 = 50 \text{ K}$ ist $\Delta x = 5/50 = 0,1 \text{ m}$

Nach dieser Definition kann eine Bodenschicht von 6,4 cm Tiefe in 1 Stunde mit 5 kg Dampf auf 100°C erhitzt werden. Theoretisch muss sich in dieser Schicht noch so lange nicht kondensierter Dampf befinden, wie die 100 Grad Bodentemperatur nicht erreicht sind. Für die doppelte Dampfleistung gilt dies analog für eine Bodenschicht von 12,8 cm. Dies setzt jedoch zwangsläufig voraus, dass die gesamte Kondensationswärme auf den Boden in dieser Schicht übertragen wird, d.h. überall müssen nach einer Stunde die 100°C erreicht sein. Ist die Wärmeleitung hierzu nicht in der Lage, so hält sich der Dampf entsprechend länger in den Kanälen und die Dampfzufuhr wird zwangsläufig gedrosselt. In diesem Bereich II ist somit nicht die Aufnahmekapazität von Wasser der begrenzende Faktor sondern die Wärmeübertragung auf den Boden.

Betrachtet man die Grenzlinie von II nach III nach einer Stunde, so muss die Wassertemperatur dort theoretisch 100 °C betragen. Da nach der Definition der Bereichsgrenzen in III kein Dampf eingedrungen ist, lässt sich die 'Dampfsperre' zwischen II und III dahingehend interpretieren, dass der in II noch zur Verfügung stehende Dampf deswegen nicht nach III eindringt, weil der Grenzübergang von II nach III aus einer mit Wasser gesättigten Trennschicht besteht.

Die Dampfmenge, die der Grenzschicht II/III von oben zugeführt wird, ist somit identisch mit der Wassermenge, die nach den Gesetzen der Sickergeschwindigkeit eines mit Wasser gesättigten Bodens in tiefere (nicht gesättigte) Schichten abfließt.

Die Geschwindigkeit der in den Boden eindringenden 'Dämpffront' – die allein eine Temperaturerhöhung auf > 80°C garantiert – ist somit abhängig von der Sickergeschwindigkeit des Wassers unterhalb dieser Dämpffront.

In den unter der Trennungslinie II/III liegenden Bodenschichten entsteht durch Wärmeleitung ein Temperaturprofil entsprechend Abb. 4-9. Dieser Wärmetransport wird

noch überlagert durch das abfließende Kondensat, das entsprechend seiner Fließgeschwindigkeit Wärme abgibt und dabei selbst abkühlt. Somit verstärkt sich die Wärmezufuhr nach unten durch das Kondensat, sie wird aber gleichzeitig in der Wärmeleitung reduziert, wegen der geringeren Temperaturleitfähigkeit α des feuchteren Bodens.

4.5.5 Zusammenfassung der einzelnen Komponenten der Wärmeübertragung

Der Boden nimmt als Speicher die Energie dQ Wh auf

$$dQ = C_B \cdot A \cdot \Delta x \cdot d\vartheta$$

Bei den zugeführten Energien sind zu unterscheiden:

die Kondensationswärme des Dampfes $dQ_D = \dot{m}_D \cdot A \cdot r_D \cdot dt$

das Eindringen des Kondensats in den Boden $dQ_w = \dot{m}_w \cdot A \cdot c_w \cdot (\vartheta_w - \vartheta) dt$

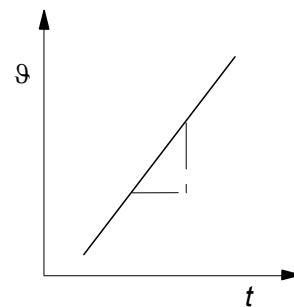
der Energietransport durch Wärmeleitung $dQ_\lambda = \lambda \cdot A \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dt$

Nach Kapitel 4.5.2 wird der Bereich II so definiert, dass dort (und nur dort) der zugeführte Dampf kondensiert. Bei konstanter Dampfzufuhr \dot{m}_D und konstanter Schichtdicke Δx gilt für eine Messstelle in unmittelbarer Nähe der Kondensationsoberfläche

somit im Bereich II

$$\frac{d\vartheta}{dt} = konst \quad \text{für} \quad \frac{\dot{m}_D}{\Delta x} = konst$$

**Abb. 4-10: linearer Temperaturverlauf
In Bereich II**



Der charakteristische Temperaturverlauf in einer bestimmten Bodentiefe enthält meistens den linearen und steilsten Temperaturanstieg, der die unmittelbare Einwirkung des Dampfes beschreibt. In der Regel bricht die Linearität bei Erreichen einer bestimmten Temperatur plötzlich ab, obwohl eine Kondensation weiterhin stattfinden muss, da ja 100°C noch nicht erreicht sind.

Auf den Bereich II bezogen wäre das so deuten, dass der Faktor $\dot{m}_D/\Delta x$ stetig abnimmt und langsam gegen Null geht. Die Dampfzufuhr \dot{m}_D nimmt im Laufe des Dämpfvorgangs zwar ständig ab, die Charakteristik des Temperaturverlaufs deutet jedoch auf einen zusätzlichen Effekt hin. Es ist davon auszugehen, dass mit Verlassen der Linearität das

Porenvolumen mit Kondensat nahezu gesättigt ist. Insbesondere in den tieferen Bodenschichten nimmt die Bodenfeuchte nicht nur durch die ständige Kondensation sondern auch durch das herabfließende Kondensat aus den darüber liegenden Bodenschichten zu. Somit muss zum Boden mit der schon vorhanden Feuchte das ständig zufließende – jedoch schon abgekühlte – Wasser wieder auf eine höhere Temperatur gebracht werden. Es handelt sich – nach der oben getroffenen Definition – zwar noch um den Bereich II, jedoch im Grenzbereich II/III mit einem spez. Wärmekoeffizienten des Bodens C_B , der ständig zunimmt.

Im Bereich III fließt Kondensat mit $\leq 100^\circ\text{C}$ nach unten ab. Dieses Kondensat wird in der Bilanz $\dot{m}_D = \dot{m}_W$ von oben aus dem Bereich II zugeführt, wo der Dampf noch in der Lage ist, die Bodenteilchen direkt zu erwärmen. In dem im in Abb. 4-11 markierten Messpunkt, der beispielsweise in 30 cm Tiefe bei 60°C liegen kann, kann man (modellhaft) davon ausgehen, dass in horizontaler Richtung der Boden gleichmäßig mit Wasser von 60°C gesättigt ist und dass in horizontaler Richtung weder ein Feuchtigkeits- noch ein Temperaturgradient existiert.

Vernachlässigt man bei einer weiteren Überlegung den Wärmetransport durch Wärmeleitung nach unten, der dennoch existiert, dann ist für den Verlauf des Temperaturgradienten maßgeblich der Wärmetransport durch das abfließende Kondensat verantwortlich.

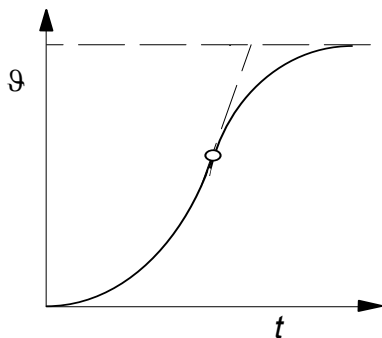


Abb. 4-11: charakteristischer Temperaturverlauf in einer bestimmten Bodentiefe

Der Wärmetransport durch das nach unten abfließende Kondensat wird dargestellt durch:

$$dQ_W = \dot{m}_W \cdot A \cdot c_W \cdot (\vartheta_W - \vartheta) \cdot dt$$

Das Kondensat hat die Temperatur ϑ_W , die bei maximal 100°C liegt

$$dQ = c_B \cdot A \cdot \Delta x \cdot d\vartheta = \dot{m} \cdot A \cdot c_W \cdot (\vartheta_W - \vartheta) dt$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\dot{m}_W \cdot c_W \cdot (\vartheta_W - \vartheta)}{c_B \cdot \Delta x}$$

Setzt man in dieser Gleichung $\vartheta_W = \vartheta_{100} = 100^\circ\text{C}$ (als konstante Größe), dann ist der Lösungsansatz

$$\vartheta = \vartheta_{100} \cdot \left(1 - e^{-t \frac{\dot{m}_W \cdot c_W}{\Delta x \cdot c_B}}\right)$$

und mit der Zeitkonstanten

$$\vartheta = \vartheta_{100} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_s}}\right)$$

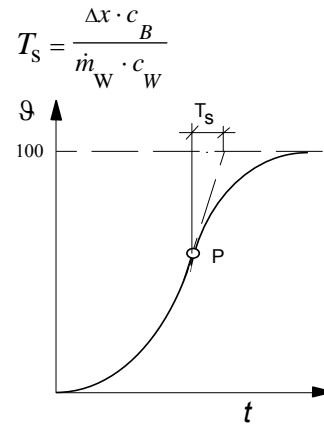


Abb. 4-12: Darstellung der Zeitkonstanten für die Bodenerwärmung bei abfließenden Kondensat

Für das mit den Abb. 4-11 und 4-12 beschriebene Beispiel, bedeutet das für die Komponenten der Zeitkonstanten T_s :

Die spez. Wärmekoeffizienten des Bodens c_B (jetzt nahezu im Sättigungszustand) und des Wassers c_W sind Konstanten. Δx ist nach Definition des dargestellten Modells der vertikale Abstand des Messpunktes zur Trennungslinie Bereich II/III. Er wird somit ständig kleiner, da die 100°C-Linie ständig näher rückt.

Die entscheidende Größe ist die abfließende Kondensatmenge \dot{m}_W , die wegen des in tieferen Schichten dichteren Bodengefüges ebenfalls ständig abnimmt und im kritischen Fall vollständig zum Erliegen kommt und damit alle weiteren Dämpfbemühungen ausschließt.

Beim Übergang des dominierenden Einflusses der Bodenerwärmung von Q_D auf Q_W ist für eine kleine Schichtdicke Δx , die in der folgenden Betrachtung auch auf die unmittelbare Umgebung eines einzelnen Bodenteilchens anzuwenden ist, gilt mit

$$dQ = C_B \cdot A \cdot \Delta x \cdot d\vartheta = \dot{m}_D \cdot A \cdot r_D \cdot dt \text{ bzw. } C_B \cdot \Delta x \cdot (100 - \vartheta) = \dot{m}_D \cdot r_D \cdot T_s \text{ und}$$

$$\dot{m}_D \cdot r = (100 - \vartheta) \dot{m}_W \cdot c_W$$

$$\frac{100 - \vartheta}{T_s} = \frac{\dot{m}_D \cdot r}{\Delta x \cdot c_B} = (100 - \vartheta) \frac{\dot{m}_W \cdot c_W}{\Delta x \cdot c_B}$$

Da $r = 626,67 \text{ Wh/kg} \gg c_W(100 - \vartheta) = 1,163 (100 - \vartheta)$, bedeutet dies, dass

$$\dot{m}_D \ll \dot{m}_W$$

An der mit Wasser gesättigten Oberfläche kann (plötzlich) nur noch sehr wenig Dampf kondensieren.

In Anlehnung an die Untergliederung der Bereiche I, II, III in vertikaler Richtung (Abschnitt 2.14) handelt es sich hierbei um den Übergang von Bereich II nach III in horizontaler Richtung.

Nach der Mengenbilanz kann an der Trennungslinie II/III nur soviel Dampf zugeführt werden, wie als Kondensat nach unten weitergeleitet wird. Nach der Energiebilanz kann nur soviel Dampf kondensieren, bzw. Kondensationswärme 'verarbeitet' werden, wie durch Wärmeleitung und Wassertransport in noch nicht erwärmte Bereiche möglich ist.

Da der kalte Boden für die akute Nutzung der Kondensationswärme sehr viel geeigneter ist, als der warme Boden, muss der Dampf über ein vorbereitetes 'Kanalsystem' möglichst schnell und möglichst tief eindringen. Dennoch lässt es sich nicht verhindern, dass sich schon im oberen Bereich eine für den Dampf undurchlässige Kondensatschicht bildet. Dieses Kondensat muss möglichst schnell in tiefere Schichten gelangen, um dem nachrückenden Dampf Platz zu machen.

Man sollte sich also nicht bemühen, möglichst viel Dampf von oben in den Boden einzupressen, sondern mehr darauf achten, dass das Kondensat zügig abfließt.

Denn:

Das Energiepotential des zur Verfügung gestellten Dampfes ist nie der begrenzende Faktor. Die Bodenerwärmung ist immer nur eine Frage des Energietransportes im Boden.

Moderne Dämpftechniken des Unterdruckdämpfens gehen in die Richtung, die Transportwege im Boden freizuhalten und verstärken den gewünschten Drainageeffekt. Wie die folgenden Versuchsergebnisse zeigen, ist die wichtigste Vorbedingung für einen gesicherten Dämpferfolg eine für das Dämpfen mechanisch vorbereitete Gefügestruktur mit ausreichendem Grobporenvolumen möglichst über die gewünschte Dämpftiefe hinaus.

5 Kostenrechnung

Eine exakte Kostenberechnung für die einzelnen Dämpfverfahren kann nur auf der Grundlage aktueller Angebote erfolgen. Unabhängig hiervon ist eine Vergleichsgröße Kosten je m² Dämpffläche davon abhängig, wie sich die Fixkosten, beispielsweise des Dampfkessels, auf die Kulturfläche und die Anzahl der Dämpfungen pro Jahr verteilen.

Die Ölkosten sind nicht allein vom Ölpreis, sondern wesentlich auch von der Dämpftiefe und von den Energieverlusten beim Dämpfen abhängig. Eine Unsicherheit bedeutet auch der Ansatz der Lohnkosten beim innerbetrieblichen Aufwand. Da die erforderliche gerätetechnische Ausrüstung, der Heizölverbrauch und der Arbeitsaufwand für das jeweilige Verfahren definiert werden können, werden diese Positionen in der folgenden Aufstellung getrennt ausgewiesen und als Kalkulationsbeispiel zu aktuellen Kosten verrechnet.

Bei den Investitionen und beim Arbeitsaufwand ist zu unterscheiden, ob es sich um Eigenleistungen oder um ein Dämpfen im Lohnverfahren handelt.

5.1 Vergleichende Kostenrechnung

Um den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen vergleichbare Größen zuzuordnen, werden für die Dämpfverfahren, bei denen eigene Untersuchungen vorgenommen wurden, feste Vorgaben definiert und die infrage kommenden Positionen der einzelnen Verfahren so gegliedert, dass eine individuelle Berücksichtigung der Kosten erfolgen kann. Es handelt sich hierbei um die vier Verfahren, die in Kapitel 3 beschrieben werden, mit den Aussagen von Abb. 3.4. Zusätzlich wird ein aktuelles Verfahren mit Dämpfhauben und das Bioflash-Verfahren mit Kostenberechnungen aus anderen Quellen aufgeführt.

Für die vier Verfahren entsprechend Abb. 3.4 werden als Betriebsgröße 7 500 m² Kulturfläche (etwa 10 000 m² Gewächshausfläche) festgelegt, die einmal im Jahr gedämpft wird. Beim Arbeitsaufwand wird unterschieden zwischen dem zeitlichen Aufwand für das eigentliche Dämpfen (Folien Auflegen – Überwachen und Abnehmen), das zu vergleichbaren Größenordnungen im Lohnverfahren und bei Eigenleistung führt. Bei den Rüstzeiten ist der Aufwand der Eigenleistung (Inbetriebnahme der Dämpftechnik und Abbau mit Aufbewahrung) nicht vergleichbar mit dem Lohnverfahren (An – und Abtransport über unterschiedliche Entfernungen mit variierendem Personal).

Für die Lohnkosten werden 20 EUR/Stunde, für die Ölkosten: 0,30 CT/Liter angesetzt. Für das Haubendämpfen, das normale Foliendämpfen und das Unterdruckdämpfen nach Fink werden einheitliche Kesselgrößen vorgegeben.

Gemessene Werte:

Dampfleistung	1 000 kg/h
Wärmeleistung	725 kW = 623 000 kcal/h
Ölverbrauch	64,8 kg/h = 75,3 l Heizöl EL/h
Kesselwirkungsgrad	93 %

Für das Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren wird eine höhere Kesselleistung gewählt

Firmenangaben:

Dampfleistung	2.000 kg/h
Wärmeleistung	1 750 kW = 1 300 000 kcal/h
Ölverbrauch	150 kg/h = 174,4 l Heizöl EL/h

5.1.1 Haubendämpfen (Rechenbeispiel 1 aus eigenen Untersuchungen)

Der für den Transport der Dämpfhauben erforderliche Traktor wird in Anbetracht der geringen Betriebsstunden nicht berücksichtigt.

Anschaffungspreis in Euro:

1 Dampfkessel mit Ölbrenner		31 542
Edelstahlvorwärmer (Nutzung der Abgaswärme)		1 636
1 Flüssigdosiervorrichtung mit Wirkstoff gegen Kesselstein und Korrosion bis 12°d.H.		513
1 Zweisäulen-Ionenaustauscher (über 12°d.H) mit Fahrwagen		2 425
3 Dämpfhauben (je 3,0 * 3,0 m)	à 2.297	6 896
mit integriertem Fahrgestell für die Hauben		
5 Dampfrohren, unisoliert (je 6 m)	à 75	375
3 Dämpfschläuche PK 90	à 480	1 440
1 Dämpfschlauch PK 90 6 m		870
1 Dampfverteiler mit 3 Abgängen		414
	Summe	<u>46.409</u>

Feste Kosten pro Jahr in Euro

1 Abschreibung		
Dämpfanlage (10 Jahre)		4 641
2 Zinssatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)		1 624
3 Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)		928
	Summe	<u>7 193</u>

Die oben angegebene Dampfleistung von 1 000 kg/h entspricht bei einer Bezugsgröße von 36,3 kg/m²h einer Dämpffläche (Haubengröße) von 27,5 m².

Tagesleistung bei 8 Stunden und 30 Minuten Dämpfzeit = 440 m²/d (ohne Rüstzeit).

Jahresstundenzahl 136 h = 17 Tage. Lohnkosten für das Dämpfen 2 720 EUR.

An Rüstzeiten und Zeiten zum Umsetzen müsste pro Tag 1 Stunde angesetzt werden. Andererseits ist im Gegensatz zum Foliendämpfen die ständige Anwesenheit nicht erforderlich.

Zusätzliche Lohnkosten 340 EUR

Ölkosten 75,3 l/h · 136 h · 0,30 EUR/h = 3.072 EUR



Abb. 5-1: Haubendämpfen in einem Gemüsebetrieb (1992)

Dämpfkosten (Jahresleistung) für 90°C in 15 cm Tiefe Dämpfzeit 30 Minuten

	EUR/7 500 m ²	EUR/ m ²
Abschreibung	4 641	0,62
Zinsansatz	1 624	0,22
Reparatur, Wartung	928	0,12
Ölkosten (0,30 EUR/l)	3 072	0,41
Lohnaufwand – reines Dämpfen	2720	0,36
Lohnaufwand – Nebenzeiten	340	0,05
Summen	<u>13 325</u>	<u>1,78</u>

5.1.2 Foliendämpfen (Rechenbeispiel 2 aus eigenen Untersuchungen)

Anschaffungspreis in Euro

1 Dampfkessel mit Ölbrenner		31 542
1 Edelstahlvorwärmer (Nutzung der Abgaswärme)		1 636
1 Flüssigdosieranlage mit Wirkstoff gegen Kesselstein und Korrosion bis 12°d.H.		513
1 Zweisäulen-Ionenaustauscher (über 12°d.H)		1 861
2 Dämpffolien 4,2 m, 48 m lang	3,6 EUR/m ²	1 451
2 Bahnen Isoliervlies 4,0 m, 48 m lang	4,1 EUR/m ²	1 574
2 Dämpfschläuche PK 50 3m	à 310	620
1 Dämpfschlauch PK 90 6 m		870
1 Dampfrohr PK 90 6 m (unisoliert),		85
2 Dampfrohre PK 90 3 m	à 75	168
1 Dampfverteiler mit 2 Abgängen		414
1 Bimetallthermometer 50 cm lang		34
	Summe	<u>38 766</u>

Feste Kosten pro Jahr in Euro

Abschreibung	
Dämpfanlage (10 Jahre)	3 876
Zinsansatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)	1 357
Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)	775
Summe	<u>6 008</u>

Die oben angegebene Dampfleistung von 1 000 kg/h entspricht bei einer Bezugsgröße von 5,4 kg/m²h einer Dämpffläche von 185 m². (Firmenangabe 160 bis 225 m²). Bei einer Folienbreite von 4,20 m und einer Dämpfbreite von 3,20 m ist dies eine Folienlänge von 58 m, die gleichzeitig unter Dampf steht.

Tagesleistung (8 Stunden) bei 6,5 Stunden Dämpfzeit = 228 m²/d. Jahresstundenzahl 264 h = 33 Tage. Lohnkosten für das Dämpfen 5 280 EUR

An Rüstzeiten muss je nach Häufigkeit der Unterbrechung zwischen 0,5 und 1,5 h je Tag angesetzt werden. Das Auflegen und Umsetzen der Folien kann parallel zum Beaufsichtigen der Folien erfolgen. Beim Lohndämpfen und einer größeren Fläche wird in der Regel Tag und Nacht durchgehend gedämpft, sodass die Rüstzeiten nahezu entfallen.

Zusätzliche Lohnkosten 660 EUR

Ölkosten 75,3 l/h · 264 h · 0,30 EUR/h = 5 964 EUR

	EUR/7 500 m ²	EUR/ m ²
Abschreibung	3 876	0,52
Zinsansatz	1 357	0,18
Reparatur, Wartung	775	0,10
Ölkosten (0,30 EUR/l)	5 964	0,80
Lohnaufwand – reines Dämpfen	5 280	0,70
Lohnaufwand – Nebenzeiten	660	0,09
Summen	<u>17 912</u>	<u>2,39</u>

Tabelle 5-1: Dämpfkosten (Jahresleistung) für 90°C in 30 cm Tiefe, Dämpfzeit 6,5 Stunden

5.1.2 Unterdruckdämpfen nach Fink (Rechenbeispiel 3 aus eigenen Untersuchungen)

Anschaffungspreis in EUR		
zuzüglich zu den Positionen des Foliendämpfens in Höhe von Fink-Absauganlage, bestehend aus		38 766
1 Fink-Hochdruckventilator 380 V, 16 A	3 290	
einschl. Steuerung und Absaugschlauch DN 50		
14 Absaugrohre PK 50 mit 4 integrierten Absaugstellen	à 95	1.330
1 4er-Verteilerraster		101
2 Endstücke verzinkt PK 50	à 7,50	15
1 T-Stück für Mittelabsaugung		64
1 Gummidampfschlauch DN 50, 3 m lang		100
30 Gummiabsaugschläuche 3/4"		
mit Schnellkupplung je 1,5 m lang	à 11,70	351
30 Gummiabsaugschläuche 3/4"		
mit Schnellkupplung je 2,5 m lang	à 19,50	585
1 Verschlussraster		41
	Summe	<u>5 877</u>
	Gesamtsumme	<u>44 643</u>

Feste Kosten pro Jahr in EUR	
Abschreibung	4 464
Dämpfanlage (10 Jahre)	
Zinsansatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)	1 357
Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)	<u>893</u>
	Summe 6 898

Die oben angegebene Dampfleistung von 1 000 kg/h entspricht bei einer Bezugsgröße von 7,3 kg/m²h einer Dämpffläche von 137 m². Bei einer Folienbreite von 4,20 m und einer Dämpfbreite von 3,20 m ist dies eine Folienlänge von 43 m, die gleichzeitig unter Dampf steht.

Tagesleistung (8 Stunden) bei 6,5 Stunden Dämpfzeit = 167 m²/d

Jahresstundenzahl 356 h = 46 Tage.

Lohnkosten für das Dämpfen 7.120 EUR.

Hier ist bedingt durch das Umsetzen der Absauganlage ein etwas höherer Arbeitsaufwand erforderlich als beim Foliendämpfen, da die Absauganlage umgesetzt werden muss. Für 54 Umrüstvorgänge von je 1 Stunde sind neben 660 EUR zusätzlich 1 080 Euro zu veranschlagen. Im einzelnen ist dann zu überprüfen, ob eine höhere Investition bei der Absauganlage vorteilhafter ist, da das Umsetzen parallel zur Überwachung des Dämpfens erfolgen kann.

Zusätzliche Lohnkosten 1.740 EUR

Ölkosten 75,3 l/h · 356 h · 0,30 EUR/h = 8.042 EUR

	EUR/7 500 m ²	EUR/ m ²
Abschreibung	4 464	0,60
Zinsansatz	1 563	0,21
Reparatur, Wartung	893	0,12
Ölkosten (0,30 EUR/l)	8 042	1,07
Lohnaufwand – reines Dämpfen	7 120	0,94
Lohnaufwand – Nebenzeiten	1 740	0,23
Summen	<u>23 822</u>	<u>3,17</u>

Tabelle 5-2: Dämpfkosten (Jahresleistung) für 90°C in 35 cm Tiefe, Dämpfzeit 6,5 Stunden

5.1.2 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren (Rechenbeispiel 4 aus eigenen Untersuchungen)

Die Positionen des Foliendämpfens in Höhe von 38 822 EUR mit Faktor 1,53 pauschal umgerechnet für eine Anlage mit 2 000 kg/h Dampf	59 398
Unterdruckanlage komplett (gemittelt aus 4 Installationen)	<u>19 140</u>
Summe	78 538

Feste Kosten pro Jahr in EUR

Abschreibung	7 854
Dämpfanlage (10 Jahre)	
Zinsansatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)	2 749
Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)	<u>1 571</u>
Summe	12 164

Die oben angegebene Dampfleistung von 2 000 kg/h entspricht bei einer Bezugsgröße von 9,4 kg/m²h einer Dämpffläche von 212 m². Bei einer Folienbreite von 4,20 m und einer Dämpfbreite von 3,20 m ist dies eine Folienlänge von 66 m, die gleichzeitig unter Dampf steht.

Tagesleistung (8 Stunden) bei 6,5 Stunden Dämpfzeit = 182 m²/d

Jahresstundenzahl 329 h = 41 Tage.

An Rüstzeiten muss je nach Häufigkeit der Unterbrechung zwischen 0,5 und 1,5 h je Tag angesetzt werden. Das Auflegen und Umsetzen der Folien kann parallel zum Beaufsichtigen der Folien erfolgen.

Beim Lohndämpfen und einer größeren Fläche wird in der Regel Tag und Nacht durchgehend gedämpft, sodass die Rüstzeiten nahezu entfallen.

Für einen realistischen Vergleich der einzelnen Dämpfverfahren, wird bei der Kalkulation davon ausgegangen, dass nur alle zwei Jahre gedämpft wird.

Lohnkosten	3 290 EUR
Zusätzliche Lohnkosten	820 EUR
Ölkosten 174,4 l/h · 329/2 h · 0,30 EUR/h	= 8 607 EUR

	EUR/7.500 m ²	EUR/ m ²
Abschreibung	7 854	1,05
Zinsansatz	2 749	0,37
Reparatur, Wartung	1 571	0,21
Ölkosten (0,30 EUR/l)	8 607	1,15
Lohnaufwand – reines Dämpfen	3 290	0,44
Lohnaufwand – Nebenzeiten	1 571	0,21
Summen	25 642	3,42

Tabelle 5-3: Dämpfkosten (Jahresleistung) für 90°C in 30 cm Tiefe, Dämpfzeit 6,5 Stunden

5.1.3 Mobile Dämpfeinheit mit Fahrer (aktuelles Beispiel 5 aus einer Dämpfung in Italien. Firmenangaben: Möschle)



Abb. 5-2: Mobile Dämpfeinheit mit Fahrer (Werkbild Möschle)

Die Abweichungen gegenüber Rechenbeispiel 1 resultieren aus einer höheren Dampf- und Flächenleistung, bedingt durch größere und schwerere Dämpfhauben und einer wesentlich geringeren Dämpfzeit von nur 8 Minuten.

Dampfleistung 1350 kg/h
 Ölverbrauch 100 kg/h = 118 l Heizöl EL/h
 Dämpfhaube 7,2 m · 3,8 m = 27,36 m²

Die Dampfleistung kann bei dieser Dämpfhaube vollständig untergebracht werden und erreicht somit bezogen auf 1 m² Dämpffläche eine Stundenleistung von 49,3 kg Dampf/m²h.

Bei einer Dämpfzeit von 8 Minuten und einer Umrüstzeit von 2 Minuten wird für 12 cm Dämpftiefe - umgerechnet auf 1 m³ Bodenvolumen - ein Dampfverbrauch von 55,24 kg Dampf/m³ angegeben. (Vgl. Ausführungen in Kapitel 3).

Anschaffungspreis in Euro	
Dampfkessel	51 129
Dämpfhaube	25 565
Traktor 25%	10 225
Summe	<u>86 920</u>

Feste Kosten pro Jahr in Euro	
Abschreibung	8 691
Dämpfanlage (10 Jahre)	
Zinsansatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)	3 042
Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)	2 607
Jährliche Fixkosten	<u>14 341</u>

Die Fixkosten verteilen sich auf einen Betrieb von 90.720 m² (mit 60 Häusern von je 1.512 m²/Haus)

Ölverbrauch = 0,57 l/m²

Ölkosten (0,30 EUR/l)

Lohnkosten 200 EUR/d (Arbeitstag 10 h je 20 EUR/h)

Tagesleistung 1512 m²/d

Kosten in EUR/m ²	
Fixkosten 14 341/90 720	0,16
Ölkosten	0,17
Lohnkosten 200/1 512	<u>0,13</u>
	0,46

5.1.4 Mobile Dämpfeinheit ohne Fahrer sog. Vollautomat (aktuelles Beispiel 6 Firmenangaben: Möschle – Ferrari)

Anschaffungspreis in Euro	
Dampfkessel (500 kg/h), einschl. Dämpfhaube 12 m ² (8 m x 1,5 m), sowie automatisch (~ 200 m) arbeitenden Transporteinheit	120 000

Feste Kosten pro Jahr in Euro	
Abschreibung	12 000
Dämpfanlage (10 Jahre)	
Zinsansatz (7% von 0,5 * Anschaffungskosten)	4 200
Reparatur, Wartung (2% der Anschaffungskosten)	3 600
Jährliche Fixkosten	<u>19 800</u>

Zum Vergleich der höheren Investitionskosten der Automatik gegenüber den geringeren Lohnkosten wird die Betriebsgröße von Beispiel 4.1.5 gewählt.

Die Fixkosten verteilen sich auf einen Betrieb von 90 720 m²

(mit 60 Häusern von je 1 512 m²/Haus, 8 · 189 m

Reine Dämpfzeit $90\,720/12 \cdot 8/60 = 1.008$ Stunden

Ölverbrauch = 36 kg Öl/h = 41,9 l/h

Gesamter Ölverbrauch = 41,9 l/h · 1008 = 42 235 Liter = 0,47 l/m².

Ölkosten $0,47 \cdot 0,3 = 0.13$ Euro/ m².

Für einen realistischen Vergleich bei vergleichbarer Dämpfqualität sollten die gleichen Ölkosten wie im vorangegangenen Beispiel angesetzt werden.

Somit Ölkosten = 0,17 EUR/ m².

Lohnkosten:

Für eine Länge von 198 m sind 126 Steps a 10 Minuten = 1260 Minuten = 21 Stunden erforderlich.

Bei 60 Häusern und 60 Tagen mit einer Umrüstzeit von (geschätzt) jeweils 1 Stunde

		EUR/m ²
Fixkosten	19 800/90.720	0,22
Ölkosten		0,17
Lohnkosten	20/1 512	0,03
		<hr/>
		0,42

Die Firma Regero hat eine vergleichbare Einheit mit gleichen Haubenabmessungen jedoch mit Gummibereifung.

Preise liegen nicht vor.

5.1.5 Bioflash (aktuelles Beispiel 6 aus einer Veröffentlichung: Celli-Italien)

		Selbstfahrer	Gezogene Maschine
Investitionskosten	EUR	123 967	72 314
Lebensdauer	Jahre	10	10
jährliche Nutzung	Stunden	1 500	1 500
Kosten je Stunden	EUR/h	70	81
Kosten je Hektar	EUR/ha	3 661	3 347
Kosten der Behandlung			
Dampf + 1000kg/ha KOH	Euro/ha	4 177	3 863
Dampf + 1000kg/ha CaO	Euro/ha	3 919	3 605
Dampf + 4000kg/ha KOH	Euro/ha	5 725	5 411
Dampf + 4000kg/ha CaO	Euro/ha	4 693	4 379

Tabelle 5-4: Kostenanalyse beim Einsatz der Maschine Ecostar
Zur Desinfektion des Bodens nach dem System bioflash

Quelle: PERUZZI, A., RAFFAELI, M. und 4 weitere Autoren (2002): Messa a punto del sistema 'bioflash' ed evoluzione delle macchine operatrici per la disinfezione e disinfestazione del terreno: Risultati di un quadriennio di sperimentazione, Seite 41

5.2 Einzelpositionen aktuelle Preisangaben von Herstellerfirmen(2002)

5.2.1 Kessel (Dampferzeuger)

Dampfleistung	Wärmeleistung	Abmessungen	Preis
kg/h	kW	Länge, Breite, Höhe m	Euro
100	74	2,2 x 1,0 x 1,65	8 106
250	185	2,6 x 1,1 x 2,00	11 540
300	220	3,0 x 1,2 x 1,80	13 577
400	290	3,1 x 1,2 x 2,00	15 645
550	410	3,7 x 1,4 x 2,20	20 077
800	580	4,1 x 1,5 x 2,50	26 788
1 000	740	4,5 x 1,7 x 2,60	31 542
1 350	1 030	5,0 x 1,8 x 2,70	35 857
1 500	1 500	5,7 x 2,1 x 3,00	48 247

Tabelle 5-5: Kesselpreise (Angaben Möschle)

5.2.2 Dampfleitungen (jeweils mit Schnellkupplungsanschlüssen)

	verzinkte Rohre				flexible Rohre (Schläuche)	
	isoliert		nicht isoliert		nicht isoliert	
PK	3 m	6 m	3 m	6 m	3 m	6 m
50	100	120	50	60	295	480
70	120	135	60	70	415	780
90	130	150	75	85	480	870
110	180	200	95	105	720	1275
133	250	300	120	150		

Tabelle 5-6: Preise für Dampfleitungen (Angaben Möschle)

5.3 Technik bei zentralen Dämpfverfahren

5.3.1 Behälterdämpfung mit dem Erd-Pasteurisiertapparat Sterilo

Die in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Modelle kosten (Firmenangaben-2002):

Sterilo 1 K	EUR 1 590
Sterilo 7 K	3 200
Sterilo-Wagen luftbereifte Lenkrollen	2 180
Hebebügel mit Drahtseilgehänge	570

5.3.2 Schnelldämpfer der Firma Kiefl

Die in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Modelle kosten (Firmenangaben-2002):

KRW 4000 mit Einfülltrichter und kleinem Rührwerk	Euro 14 790
Mischwanne mit Schneckengetriebe zusätzlich	8 000
KRW 6000 mit Einfülltrichter und kleinem Rührwerk	Euro 17 345
Mischwanne mit Schneckengetriebe zusätzlich	8 000

6 Bewertung einzelner Dämpftechniken auf der Grundlage von Messungen in Praxisbetrieben

Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten hat in den Jahren 1989 bis 1993 mehrere Forschungsvorhaben zur umweltfreundlichen Bodenentseuchung durch Dämpfen gefördert. Die Untersuchungen wurden von der Fachhochschule Osnabrück in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Westfalen Lippe und der Fachhochschule Münster Steinfurt durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden wesentliche Ergebnisse aus den fünf Abschlussberichten der Jahre 1993 bis 1995 wiedergegeben. Die Messungen wurden in sechs Praxisbetrieben und an der Fachhochschule Osnabrück durchgeführt.

Untersucht wurde das Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren in 4 Gartenbau-betrieben mit unterschiedlichen betrieblichen Vorgaben, mehreren Lohnunternehmen und unterschiedlichen Verfahren der Bodenlockerung. Das Unterdruckdämpfen nach dem System Fink und das Haubendämpfen wurde jeweils in einem Betrieb überprüft. Hinzu kamen Vergleichsmessungen mit dem normalen Foliendämpfen.

Bei jedem Dämpfvorgang wurden 10 bis 24 Messstellen an charakteristischen Punkten in den Mittel- und Randlagen ausgewählt und Temperaturen mit Thermoelementen in 20, 40, 60 und 80 cm Tiefe, bzw. beim Haubendämpfen in 10, 15, 20 und 25 cm, beim System Fink in 20, 25, 30, 35 und 45 cm gemessen. Außerdem wurden Bodenproben vor der Messung entnommen und dabei der Wassergehalt bestimmt. (DIN 18121 Teil1, April 1976).

Zur Ermittlung der Bodenverfestigung wurde eine Schlagsonde (DIN 4094 Teil 2, Mai 1980) verwendet. Schlagzahlen unter 10 sind sehr günstig, bis 30 für das Dämpfen geeignet, bis 50 in tieferen Lagen nur noch sehr bedingt und über 60 völlig ungeeignet. Einzelheiten zu den Verfahren und zur Messgenauigkeit sind bei Gudehus, H. (1994, Band I) beschrieben. Bei der Wiedergabe von Versuchsergebnissen in den folgenden Beispielen wurde auf Details der Abschlussberichte, insbesondere auf Angaben zur Anordnung der Messstellen, verzichtet.

In den letzten zehn Jahren kam es zu einer technischen Weiterentwicklung der Dämpfhaube und zu einer Verfahrenstechnik mit sehr kurzen Dämpfzeiten unter 10 Minuten, um eine nur dünne Bodenschicht - zwar mit einer umfangreicheren Maschinenteknik jedoch mit geringerem Aufwand - zu erhitzen. Diese Entwicklung wurde mit eigenen Versuchsanstellungen nicht mehr verfolgt. Deshalb sind im folgenden Kapitel 6.1 Mitteilungen von Ergebnissen von Firmenuntersuchungen mit aufgenommen worden. Die interessante technische Entwicklung des Bioflash-Verfahrens, das in Kapitel 2 beschrieben ist, wurde in mehreren Praxisuntersuchungen überprüft, auf die in Kapitel 6.2 hingewiesen wird.

6.1 Messmethoden

6.1.1 Temperaturmessung

Für die Messung der Temperaturen wurden NiCr-Ni-Thermoelemente Typ K verwendet. Die Thermoelemente wurden zum Schutz vor dem Eindringen von Kondensationswasser in ein Glasrohr mit einer Länge von 35 mm und einem Durchmesser von 8 mm eingeklebt. Für die Messungen im Boden wurden Messsonden gebaut, die unmittelbar vor dem Dämpfen senkrecht in den Boden geschlagen wurden und die die Struktur des Bodens möglichst wenig beeinflussen sollten.

Die Messsonde besteht aus einem quadratischen Eichenholzstab mit einer Kantenlänge von 35 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,17 W/m K. Sie hat 4 waagerechte Bohrungen im Abstand von 20 cm für die Aufnahme der Glaskörper.

Zum besseren Eindringen in den Boden wurde der Stab an einem Ende angespitzt und am anderen Ende mit einer Metallkappe versehen. Die Metallkappe schützt den Stab beim Einschlagen in den Boden. Zusätzlich zu den Messsonden für das Unterdruckdämpfen (Abb. 6.1) mit den Längen 950 mm und den Bohrungen in 20, 40, 60 und 80 cm Tiefe, wurden bei anderen Verfahren Längen von 500 mm und Bohrungen in 10, 15, 20, 25 und 35 cm Tiefe verwendet.

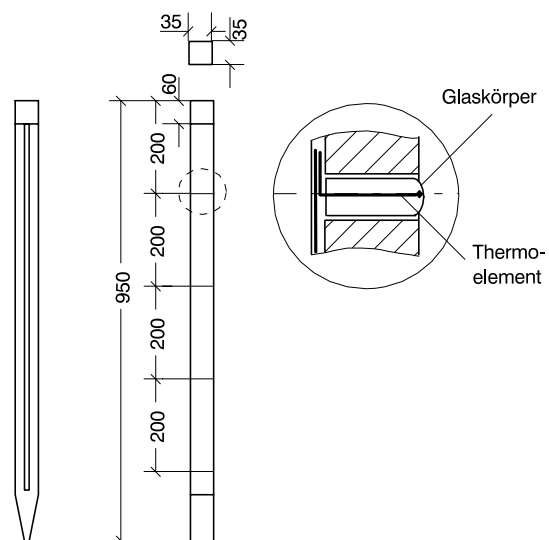


Abb. 6-1: Messsonde zur Bodentemperaturmessung

Diese Methode der Bodentemperaturmessung beeinflusst die Struktur des Bodens relativ wenig. In unmittelbarer Nähe der Messstelle können normalerweise keine vertikal verlaufenden Kanäle auftreten, da der Boden beim Einbringen des Stabes zur Seite gedrückt wird und somit dicht an der Messsonde anliegt. Dies wird dadurch bestätigt, dass bei fast allen Messungen eine erste Reaktion einer Temperaturänderung in 20 cm Tiefe erst nach einer längeren Zeitspanne der Dampfeinwirkung von oben erfolgt.

Häufig wird zur Überprüfung der Bodentemperatur während des Dämpfens eine Metallmesssonde in den Boden gestoßen. Wenn die Sonde 50 cm tief in den Boden eindringt, kurz herausgezogen und dann sofort wieder eingeführt wird, lassen sich Temperaturen von beispielsweise 80°C messen, obwohl der Boden an dieser Stelle noch eine Temperatur von 20°C hat. In diesem Fall kann der Dampf sofort in diese Tiefe eindringen.

Versuchsweise wurde auch der Boden vor dem Dämpfen mit Sonden von oben bearbeitet. In unmittelbarer Umgebung dieser Röhren wurde dann ein sehr schneller Temperaturanstieg beobachtet. (Für eine flächendeckende Wirkung sind nach unserer Auffassung jedoch die bereits angesprochenen Bodenbearbeitungsgeräte geeigneter.)

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Bodens (in diesem Fall in horizontaler Richtung) ist jedoch andererseits kein Argument, diese Temperaturmessung als fehlerhaft zu bezeichnen, da der Abstand von Messsonde zur unbeeinflussten Bodenstruktur sehr gering (weniger als 1 cm) ist.

Berücksichtigt man, dass durch die geringfügige Bodenverdichtung direkt an der Messstelle eine Temperatur gemessen wird, die etwas zu niedrig ist, dann ist die Schlussfolgerung, dass sich dies nur auf das zeitliche Verhalten auswirken kann und dass die realistische Temperatur einige Minuten später gemessen wird.

Abschließend sei bemerkt, dass bei den Praxismessungen die Arbeiten zur Einbringung der Messstellen zügig erfolgen mussten. Ein großer Vorteil dieser Methode war, dass an einer Stelle in mehreren Bodentiefen gemessen wurde und dass die Holzmessfühler nach Durchführung der jeweiligen Messung wiederverwendet werden konnten.

6.1.2 Bodenfeuchte

Zur Ermittlung des Wassergehaltes (Bodenfeuchte) wurde das Verfahren "Trocknung von Proben durch Trockenofen" (DIN 18 121 Teil 1, April 1976) angewandt. Die für die Ermittlung des Bodenfeuchte erforderliche Erdmenge wurde an der jeweiligen Temperaturmessstelle mit einer Schlitzsonde (Pürckhauer-Stab) bis in einer Tiefe von 80 cm entnommen. Die Erdproben wurden in Bereichen von je 10 cm markiert und entsprechend verpackt. Im Labor für Technik der Fachhochschule wurden die Erdproben gewogen und im Trockenofen bei einer Temperatur von 105°C etwa 12 Stunden getrocknet; danach wurde erneut gewogen. Der Wassergehalt w wird in Gew.-% (d.h. Massen-%) angegeben und ist das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers m_W zur Masse m_D der trockenen Probe:

$$w = m_W \cdot 100 / m_D$$

Der Wassergehalt wurde jeweils vor und nach jedem Dämpfvorgang in den unterschiedlichen Bodentiefen der Messstellen ermittelt.

6.13 Ermittlung der Bodenverfestigung

Das Ziel dieser Messungen ist es, den Bodenverfestigungszustand in den untersuchten Bodentiefen von 20 cm, 40 cm, 60 cm und 80 cm aufzuzeigen. Hierzu wurde eine Schlagsonde (DIN 4094 Teil 2, Mai 1980) verwendet.

Die Schlagsonde besteht aus einem 180 cm langen Metallstab mit einer konischen Spitze, einem Amboss und einem Fallgewicht von 940 g. Auf der Schlagsonde befinden sich ausgehend von der unteren Spitze - Markierungen in Abständen von 10 cm bis zu einer Länge von 100 cm. Darüber befindet sich der Amboss. Die Fallhöhe zwischen Unterkante Fallgewicht und Amboss beträgt 72 cm, die Fallhöhe wird durch einen Anschlag begrenzt. Somit ist eine gleichmäßige Fallhöhe gewährleistet.

Die Anzahl der Schläge werden für je 10 cm Eindringtiefe notiert. Das Gewicht wird kontinuierlich fallengelassen bis zur gewünschten Schlagtiefe von 80 cm. Werden mehr als 60 Schläge je 10 cm Eindringtiefe notwendig, wird abgebrochen.

Der auf diese Weise vorgenommenen Ermittlung der Bodenverfestigung kann keine exakt definierte physikalische Messgröße zugeordnet werden. Die Anzahl der jeweils ermittelten Schläge sind von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig, die insgesamt - durch den ermittelten Widerstand der Eindringung eines Metallstabes in den Boden auch - eine Bewertungszahl für den Widerstand der Eindringung des kondensierenden Wassers in den Boden erwarten lassen.

Das relativ einfache Messverfahren kann problemlos vor jedem Dämpfen vorgenommen werden. Eine Aufgabe dieser Arbeit besteht darin, dieses Verfahren hinsichtlich seiner Aussagekraft für den zu erwartenden Dämpferfolg vor der Dämpfung zu überprüfen.

6.2 Darstellung der Wärmeübertragung beim Haubendämpfen

Beispiel 1 Haubendämpfung vom 16.02.93 (Versuch 1) Messstellen I und V

Bei der Messstelle I (siehe Abb. 6-2) erfolgt die erste Temperaturreaktion in 10 cm Bodentiefe 8 Minuten nach Dämpfbeginn. Der schwache Temperaturanstieg zu Beginn (von 12 auf 18°C) wird durch das heruntersickernde Kondensat verursacht. 10 Minuten nach Dämpfbeginn entsteht ein steiler linearer Temperaturanstieg bis auf 90°C, der charakteristisch für die unmittelbare Einwirkung des kondensierenden Dampfes ist.

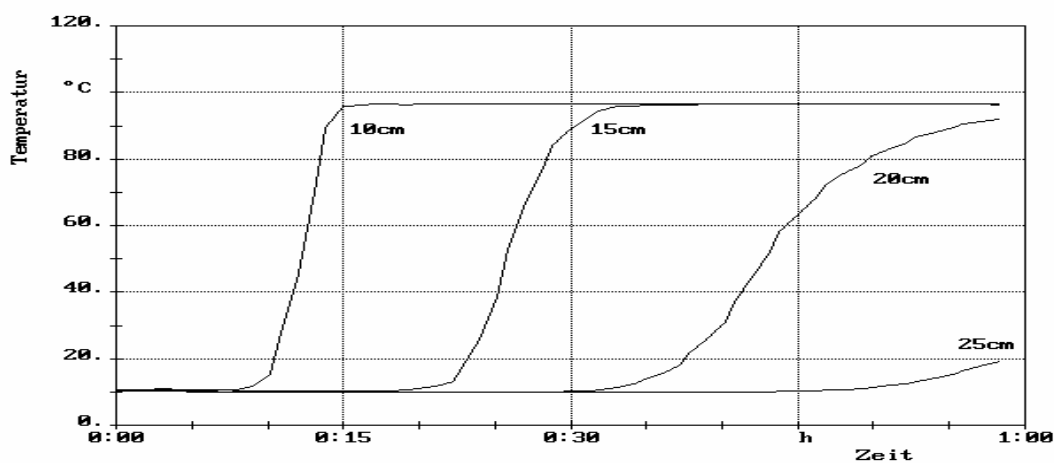


Abb.6-2: Haubendämpfen (Versuch 1) vom 16.02.93 Messstelle I

Nach 15 Minuten Dämpfdauer und einer Temperatur von 100°C in 10 cm Tiefe, ist offensichtlich in 12 cm Tiefe zwar Kondensat mit einer Temperatur $\leq 100^\circ\text{C}$ angelangt, es ist, jedoch noch keine nennenswerte Bodenerwärmung erfolgt.

Bei dem gut gelockerten Boden werden für die Berechnung im oberen Bereich maximal 35 Vol % mineralische Substanz einschließlich einem geringen Humusanteil mit $C_{\text{Vol}} = 230 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ zuzüglich 20 Vol % Wasser (entspr. 18 Gew % bezogen auf die Trockensubstanz) mit $C_{\text{W}} = 233 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ zugrunde gelegt.

Die Energie des nach 15 Minuten = 15/60 h zugeführten Dampfes

$$\begin{aligned} q_D &= \dot{m}_D \cdot 15/60(r + c\{100-\theta\}) = \dot{m}_D \cdot 0,25(627 + 1,15 \cdot 80) \\ &= \dot{m}_D \cdot 0,25 \cdot 719 = \dot{m}_D \cdot 180 \text{ Wh/m}^2 \end{aligned}$$

somit ist $\dot{m}_D = 4328/180 = 24 \text{ kg Dampf/m}^2\text{h}$.

Aus Tabelle 6.1 ist zu entnehmen, dass 5 Minuten nach Dämpfbeginn 2,85 kg Dampf in den Boden geleitet wurden. Das entspricht einer stündlichen Dampfzufuhr von $\dot{m} = 2,85 \cdot 12 = 34,2 \text{ kg/m}^2\text{h}$.

Für die jeweils folgenden 5 Minuten errechnet sich aus der Tabelle 6.1 angegebene aktuelle Dampfzufuhr $\dot{m}_D \text{ kg/m}^2\text{h}$. Die Werte \dot{m}_D liegen nach 10 Minuten bei 22,2 kg/m²h und nach 15 Minuten bei 27,4 kg/m²h und entsprechen dem oben ermittelten Wert von 24 kg Dampf/m²h. Die Temperaturgradienten haben einen linearen Verlauf, solange der Einfluss der Kondensation (Kap. 4.5) überwiegt.

Bei Messstelle V (s. Abb. 5.2) reduziert sich die Zeitspanne, in der in 10 cm Bodentiefe 100°C erreicht sind, von 15 auf 5 Minuten. Bei einer ansonsten analogen Betrachtung bedeutet dies eine zugeführte Energie durch den Dampf von $\dot{m}_D = 24 \cdot 3 = 72 \text{ kg Dampf/m}^2\text{h}$.

Gemessen wurden insgesamt 34 kg Dampf/m²h. Der Messwert liegt somit nur unwesentlich über dem Messergebnis der Messstelle I mit 27,4 kg/m²h. Für Messstelle V muss ein größeres Porenvolumen in die Berechnung eingehen.

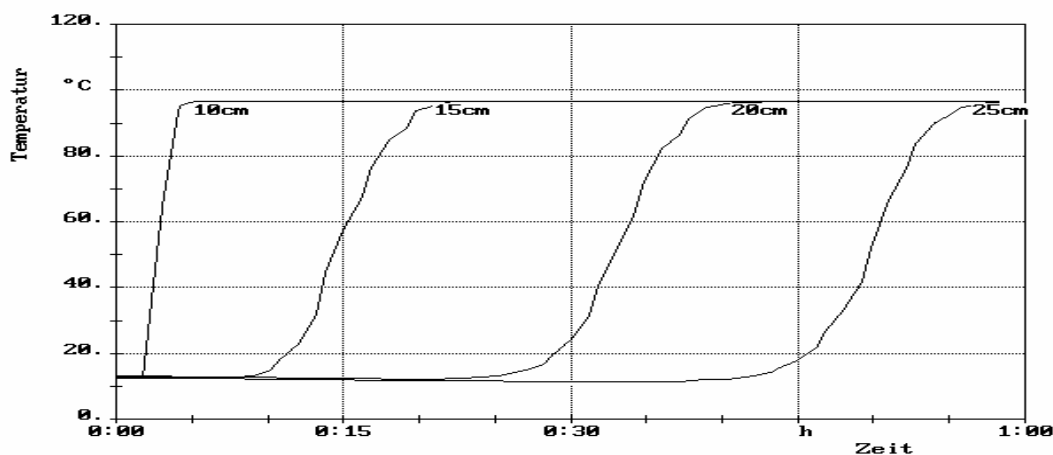


Abb. 6-3: Haubendämpfen (Versuch 1) vom 16.02.93 Messstelle V

Legt man für Messstelle V maximal 20 Vol% Bodensubstanz und 19 Gew % Wasseranteil zugrunde, so erhält man nach Kap. 4 $C_{Vol} = 246 \text{ Wh/m}^3\text{K}$. Die erforderliche Wärme ist dann gegenüber Messstelle I lediglich $246/463 = 0,53$ oder 53 %. Somit reduziert sich der Dampfbedarf von 72 kg/m²h auf $72 \cdot 0,53 = 38 \text{ kg/m}^2\text{h}$. Dieser Wert liegt nur noch geringfügig über der mittleren Dampfzufuhr von 34 kg/m²h.

Durch die Verschiebung der (noch annähernd gleichartigen) Temperaturgradienten von 10 cm nach 15 cm Bodentiefe innerhalb von 15 Minuten ergibt sich sowohl eine

Sickergeschwindigkeit als auch ein Vorrücken der Dampffront von etwa 0,05 m/15 min oder von 20 cm/h bzw. 200 mm/h.

Sowohl bei Messstelle I als auch bei V ist eindeutig zu entnehmen, dass der Dampf (bei einer Bodentiefe von nur 10 cm) nicht in der Lage ist, in tiefere Schichten vorzudringen. Er schiebt immer die Kondensatschicht vor sich her.

Durch Bilanzierung der zugeführten Wassermenge ergibt sich bis in 12 cm Tiefe eine mittlere Wasserzufuhr von $0,25 \text{ h} \cdot 28 \text{ kg/m}^2\text{h} = 7 \text{ kg/m}^2$. Das sind $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ Wasser}/0,12 \text{ m}^3 \text{ Boden}$ und entspricht einer Wasseraufnahme von 6 Vol %.

Da im oberen Bereich (in den ersten 10 cm schon 100°C erreicht sind), wird das dort vorhandene Kondensat durch den nachfolgenden (überhitzten) Dampf teilweise wieder verdampfen, bzw. das nach unten sickende Kondensat nicht durch nachfolgendes Kondensat ersetzt werden. Es wird also im unteren Bereich eine wesentlich höhere Bodenfeuchte vorliegen.

Das Messergebnis zeigt, dass eine hohe Dampfzufuhr \dot{m}_D zu Beginn des Dämpfens allein keine Gewähr für ein Eindringen in tiefere Bodenschichten ist. Vielmehr besteht die Gefahr, dass durch den hohen Kondensatanfall in geringen Bodentiefen eine Verschlämmung erfolgt, und dass durch die dann entstandene - meist nur relativ dünne wassergesättigte Schicht - das Vordringen in tiefere Bodenschichten gebremst wird.

Die Temperaturgradienten in 15 cm, 20 und 25 cm Tiefe sind etwa zeitgleich um 18 Minuten verschoben, sodass beispielsweise für 20 cm Tiefe davon ausgegangen werden kann, dass für $\Delta x = 5 \text{ cm}$, die zugeführte Dampfmenge gerade zur Erwärmung dieser Schicht erforderlich ist.

Bei dem in den tieferen Schichten weniger stark gelockerten Boden werden für die Berechnung maximal 45 Vol % mineralische Substanz einschließlich einem geringen Humusanteil mit $C_{Vol} = 296 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ zuzüglich 20 Vol % Wasser (entspr. 15 Gew % bezogen auf die Trockensubstanz) mit $C_W = 233 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ zugrundegelegt.

$$Q_{B,x} = 0,05 = C_B \cdot \Delta x \cdot \Delta \vartheta = 530 \text{ Wh/m}^3\text{K} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 85 \text{ K} = 2252 \text{ Wh/m}^2,$$

$$q_D = \dot{m}_D \cdot 18/60 \text{ h} = \dot{m}_D \cdot 0,3 \cdot 627 = \dot{m}_D \cdot 188 \text{ Wh/m}^2;$$

somit ist $\dot{m}_D = 2252/188 = 12 \text{ kg Dampf/m}^2\text{h}$ und die

Sickergeschwindigkeit $0,05 \text{ m}/0,3 \text{ h} = 0,167 \text{ m/h}$.

Die an dieser Messstelle errechnete Dampfzufuhr ist mit $12 \text{ kg Dampf/m}^2\text{h}$ weniger als die Hälfte der gemessenen Dampfmenge von ca. $28 \text{ kg/m}^2\text{h}$ aus Tabelle 6.1. Die anfänglich sehr hohe (über dem Durchschnitte liegende) Dampfzufuhr wurde gegenüber den anderen Messstellen in tieferen Schichten (evtl. wegen der höheren Kondensatanreicherung) sehr stark reduziert.

Versuch 1	Messtag: 16.02.93		Fläche 7m ²	
Uhrzeit	Dampfmenge			
	Δm kg	m kg/m ²	\bar{m} kg/m ² ·h	\dot{m}_D kg/m ² ·h
11:05	0	0	0	
11:10	19,96	2,85	34,22	34,2
11:15	12,97	4,70	28,20	22,2
11:20	15,97	6,98	27,91	27,4
11:25	11,97	8,69	26,07	20,5
11:30	21,96	11,83	28,39	37,7
11:35	19,96	14,68	29,36	34,2
11:40	11,97	16,39	28,10	20,5
11:45	17,96	18,96	28,44	30,8
11:50	11,98	20,67	27,55	20,5
11:55	15,97	22,95	27,54	27,4
12:00	8,98	24,24	26,44	15,4
	169,66			

Tab. 6-1: Messprotokoll der Dampfungführung

Hierbei bedeuten:

- Δm die in den jeweiligen Zeitabschnitten zugeführte Dampfmenge
 m die gesamte seit Dämpfbeginn zugeführte Dampfmenge bezogen auf 1m²
 \bar{m} die Dampfmenge m , jedoch bezogen auf eine Stunde
 \dot{m}_D die zum jeweiligen Zeitpunkt aktuelle zugeführte Dampfmenge

Bewertung:

Diese beiden Messergebnisse zeigen besonders deutlich, dass der von oben zugeführte Dampf (auch bei großem Porenvolumen) nicht sofort in tiefere Schichten eindringt. Die hohe Kondensationswärme des Dampfes bewirkt zwar eine relativ schnelle Bodenerhitzung auf 100°C in unmittelbarer Nähe der Kondensation, das kondensierte Wasser verhindert jedoch ein Eindringen des Dampfes in tiefere Schichten, auch dann, wenn dort noch ein ausreichendes Luftporenvolumen vorhanden ist. Charakteristisch ist, dass - selbst bei einer Dampfungführung von mehr als 20 kg/m²h - bei Messstelle I nach einer Viertelstunde Dämpfzeit in 10 cm Tiefe 100°C erreicht sind, in 15 cm Tiefe jedoch noch nicht die geringste Temperaturreaktion erfolgte. Auf Grund des Temperaturverlaufes, muss an der Messstelle I eine etwas größere Bodenverdichtung vorliegen als an Messstelle V. Somit bindet die Messstelle I beispielsweise in 20 cm Tiefe mehr Kondensat als die Messstelle V. Die höhere Kondensatmenge setzt einerseits dem nachfolgenden Dampf einen höheren Widerstand entgegen, andererseits verzögert sie die weitere Temperaturerhöhung von beispielsweise 60 auf 100°C.

Beispiel 2 Haubendämpfung vom 16.02.93 (Versuch 2) Messstelle III

Am gleichen Tag wie bei Beispiel 1 wurde bei gleichen Bodenbedingungen der Versuch 2 durchgeführt, der über die ersten 5 Minuten eine höhere Dampfzufuhr von $42 \text{ kg/m}^2\text{h}$ (gegenüber $28 \text{ kg/m}^2\text{h}$) ermöglichte. Auch hier wurden an den einzelnen Messstellen unterschiedliche Temperaturverläufe gemessen.

Charakteristisch war jedoch der Verlauf von Messstelle III, der sowohl einen späteren als auch einen flacheren Temperaturanstieg aufzeigt (Abb. 6-4).

Bewertung

Dieses Ergebnis untermauert die Erkenntnis, dass eine (zu) hohe Dampfzufuhr bei Beginn des Dämpfens, das Eindringen des Dampfes in tiefere Schichten geradezu blockiert.

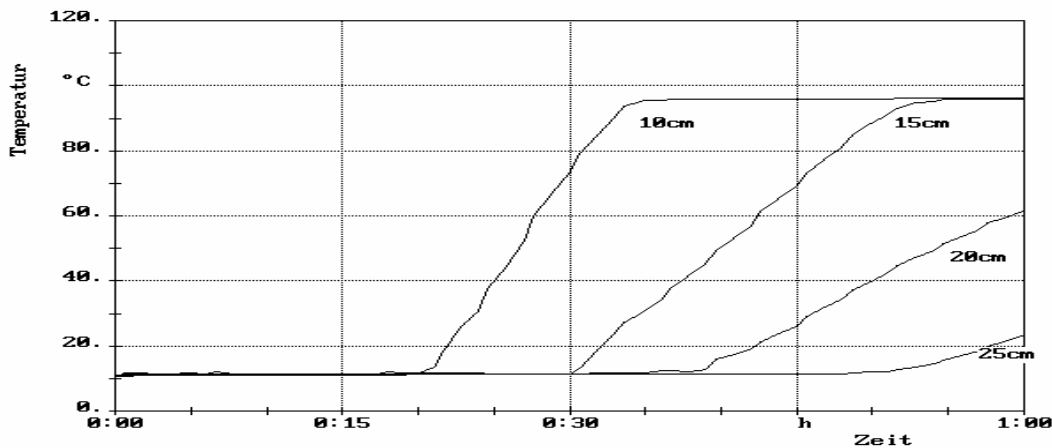


Abb. 6-4: Haubendämpfen (Versuch 2) vom 16.02.93 Messstelle III

Versuch 2	Messtag: 16.02.93		Fläche 7m^2	
Uhrzeit	Dampfmenge		\bar{m} $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$	\dot{m}_D $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$
	Δm kg	m kg/m^2		
12:14	0	0	0	0
12:20	44,51	6,36	63,59	76,3
12:25	17,96	8,93	48,71	30,8
12:30	15,97	11,21	42,04	27,4
12:35	22,95	14,49	41,40	39,3
12:40	12,97	16,34	37,70	22,2
12:45	13,97	18,34	35,49	23,9
12:50	9,98	19,77	32,83	17,1
12:55	15,97	22,05	32,27	27,4
13:00	7,98	23,19	30,25	13,7
13:05	16,97	25,61	27,44	29,1
13:10	6,99	26,61	28,51	12,0
13:15	12,97	28,46	27,99	22,2

Tab. 6-2: Gegenüberstellung der Messergebnisse zu Tab 6-1

Beispiel 3 Messergebnis aus den USA (keine eigene Messung)

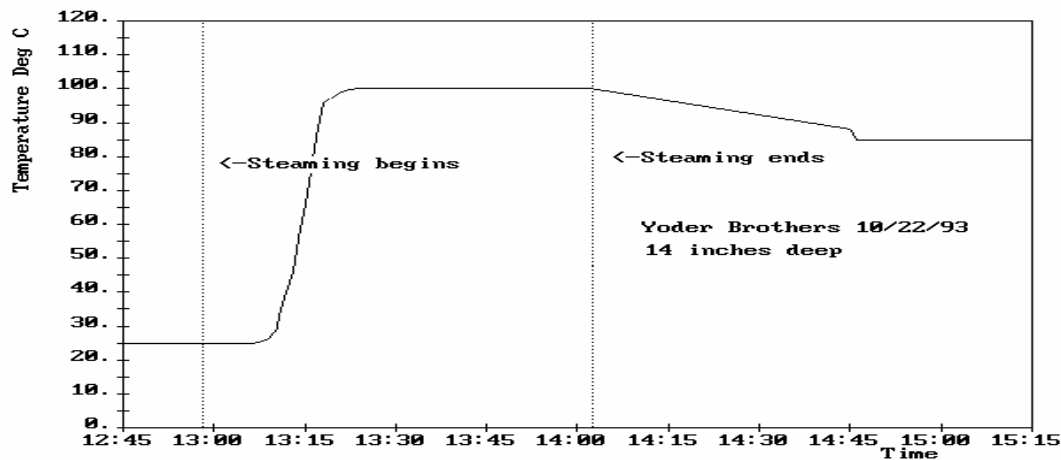


Abb. 6-5 Haubendämpfen in Florida

Die in Abb. 6.5 dargestellten Ergebnisse einer Haubendämpfung in Florida, die von Herrn Seifert (Fa. Möschle) zur Kenntnis gebracht wurden, zeigen, dass innerhalb von 24 Minuten in 35 cm Tiefe 100°C erreicht wurden und zwar offensichtlich mit einer Dampfmenge von 11,5 kg/m² bzw. einer Dampfleistung von 27,6 kg/m²h.

Nach den Ausführungen in Kapitel 3 liegt der Mindestdampfbedarf für 35 cm Bodentiefe bei 14 kg/m². Hierfür sind 30% Bodensubstanzvolumen (SV) und 10% Wasservolumen (WV) zugrundegelegt. Bei einem etwas geringeren Substanz- und Wasservolumen sind 11,5 kg/m² durchaus möglich. Interessant ist allerdings in diesem Fall, dass das Kondensat offensichtlich innerhalb von 16 Minuten und der Dampf innerhalb von 20 Minuten eine Tiefe von 35 cm erreicht haben. Das entspricht einer Geschwindigkeit von 130 bzw. 105 cm/h. Diese Werte ließen sich bei den von uns durchgeführten Messungen nur beim Unterdruckdämpfen erreichen. Sie deuten auf ein sehr lockeres Bodengefüge auch in 35 cm Tiefe hin.

Beispiel 4 größere und schwerer Dämpfhaube (aktuelles aus Firmenangaben einer Dämpfung in Italien – Seifert-Möschle)

Die Abweichungen gegenüber den Beispielen 1 und 2 resultieren aus einer höheren Dampf- und Flächenleistung, bedingt durch größere und schwerere Dämpfhauben und einer wesentlich geringeren Dämpfzeit von nur 8 Minuten.

(Die Firma Regero arbeitet mit einem Automatik Dämpfhauben-System mit noch kürzeren Dämpfzeiten.)

Dampfleistung 1.350 kg/h
 Ölverbrauch 100 kg/h = 118 l Heizöl EL/h
 Dämpfhaube 27,36 m²

Die Dampfleistung kann bei dieser Dämpfhaube vollständig untergebracht werden und erreicht somit bezogen auf 1 m² Dämpffläche eine Stundenleistung von 49,3 kg Dampf/m²h.

Bei einer Dämpfzeit von 8 Minuten und einer Umrüstzeit von 2 Minuten wird für 12 cm Dämpftiefe ein Dampfverbrauch von $6,58 \text{ kg/m}^2$ – und umgerechnet auf 1 m^3 Bodenvolumen ein Dampfverbrauch von $55,24 \text{ kg Dampf/m}^3$ angegeben. (Vergl. Ausführungen in Kapitel 3). Nach Tab. 6.2 werden nach 6 Minuten Dämpfzeit $6,3 \text{ kg Dampf/m}^2$ vom Boden aufgenommen.

Bewertung

Die stündliche Dampfleistung erreicht zwar mit $49,3 \text{ kg /m}^2\text{h}$ einen wesentlich höheren Wert als früher möglich war, bezogen auf die kurze Dämpfzeit von 8 Minuten treten jedoch kaum Unterschiede auf. Ein wesentlicher Vorteil bei diesem Verfahren ist darin zu sehen, dass die maximale Kesselleistung – mit Ausnahme der 2 Minuten für das Umsetzen der Haube – kontinuierlich genutzt werden kann. In der kurzen Dämpfzeit minimieren sich auch die Energieverluste durch Abstrahlung und Konvektion. Physikalisch unberührt bleibt natürlich die Tatsache, dass nur soviel Wärmeenergie dem Boden zugeführt werden kann, wie im Dampf enthalten ist und dass somit die Erwärmung der Bodensubstanz einschließlich der Wassererwärmung der Bodenfeuchte nach den Aussagen von Kapitel 3 auf die reduzierte Dampfzufuhr begrenzt ist. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Problematik der Abschnürung der Dampfzufuhr wegen Verschlämmung des Bodens beim Haubendämpfen, wird hier wegen der kurzen Dämpfzeit zwangsläufig umgangen.

6.3 Darstellung der Wärmeübertragung beim Foliendämpfen

Beispiel 5 Foliendämpfen vom 22.10.92, Messstelle V

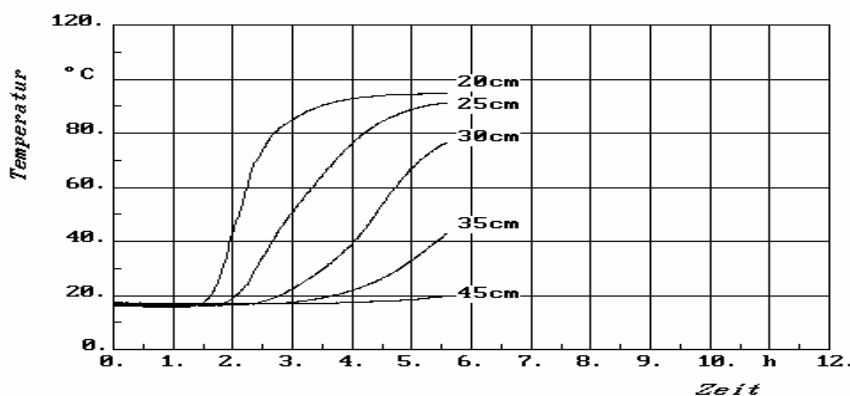


Abb. 6-6: Foliendämpfen vom 22.10.92 Messstelle V

Der Boden ist bis in 30 cm Tiefe gut gelockert. Die erste Temperaturreaktion erfolgt in 20 cm Tiefe nach 1 h 30 min. (Abb. 6-6). Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 22 cm/h oder 220 mm/h . Gekennzeichnet durch den Übergang in den steilen Anstieg des Temperaturgradienten ist der Dampf nach ca. 1 h 40 min in 20 cm Tiefe angelangt. Nach 4 h ist in 20 cm Tiefe die Temperatur von 100°C annähernd erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Dampf bei etwa 32 cm angelangt.

Aus den Messaufzeichnungen ist

nach 2 Stunden $\dot{m} = 6,38 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
 nach 2,5 Stunden $\dot{m} = 5,80 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
 nach 4 Stunden $\dot{m} = 4,08 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$.

Auf Grund der gut gelockerten Bodenstruktur und der durch das Dämpfen verursachten zusätzlichen Bodenbefeuchtung ist für die spez. Wärmekapazität des Bodens $C_B = 550 \text{ Wh}/\text{m}^3\text{K}$ anzusetzen.

Im Vergleich mit den anderen Messstellen stellt die Messstelle V einen Mittelwert dar. Die Temperaturgradienten zeigen, dass der Dampf durchaus eine Tiefe von 35 cm erreichen kann, dass durch die in dieser Tiefe - wegen der Bodenverdichtung - sehr stark reduzierte Kondensatableitung jedoch gleichzeitig die Dampfung zur Seite gedrosselt wird und somit eine Bodenerwärmung (wiederum bedingt durch das sehr geringe Wärmeleitvermögen des Bodens) nicht mehr möglich ist.

Der flachere Temperaturgradient (im Bereich des linearen Anstieges) bei 25 cm Tiefe gegenüber 20 cm wird mit der höheren spez. Wärmekapazität des Bodens (höhere Dichte und höhere Feuchte) begründet.

Der Übergang des Temperaturgradienten in 25 cm Tiefe bei 50°C in einen zunehmend degressiven Anstieg zeigt die Problematik der Wärmeleitfähigkeit auf.

Obwohl beim Beispiel 4 die nach unten gehenden Kanäle offensichtlich relativ gut ausgebildet sind, kann dennoch nicht mehr als 7 kg Dampf/h kondensieren, weil der Wärmetransport zur Seite nur sehr langsam verläuft und auch der Wassertransport in tiefere Schichten begrenzt ist. Der Dampf steht quasi in isolierten Röhren und kann nicht schneller kondensieren. Wie die späteren Beispiele zeigen, kann die Dampfung nur dadurch erhöht werden, dass durch Unterdruck im Boden das Kondensat abgesaugt wird und damit die in die Tiefe reichenden Kanäle verlängert werden.

Bewertung

Das Ergebnis zeigt, dass mit dem Foliendämpfen in 30 cm Tiefe eine Temperatur von 80°C erzielt werden kann, wenn der Boden bis in diese Tiefe gut gelockert ist.

Versuch 2	Messtag:22.10.92		Fläche 134,4m ²	
Uhrzeit	Dampfmenge			
	Δm kg	\dot{m} kg/m ²	\bar{m} kg/m ² ·h	\dot{m}_D kg/m ² ·h
12:30	0	0	0	0
13:00	498,78	3,71	7,42	7,42
13:30	465,00	7,17	7,17	6,92
14:00	449,19	10,51	7,01	6,68
14:30	428,23	13,70	6,85	6,38
15:00	390,12	16,60	6,64	5,80
15:30	339,28	19,13	6,38	5,06
16:00	299,46	21,35	6,10	4,44
16:30	274,22	23,39	5,85	4,08
17:00	264,68	25,36	5,64	3,94
17:30	259,61	27,30	5,46	3,88
18:00	249,23	29,15	5,30	3,70
	3917,80			

Tab. 6-3:

6.4 Darstellung der Wärmeübertragung beim Unterdruckdämpfen nach System Fink

Die Versuchsflächen wurden bis auf zwei Ausnahmen immer gleich bearbeitet. Eine Docox-Spatenmaschine älteren Baujahres, mit einer Arbeitsbreite von 1,65 m und einer Arbeitstiefe von 0,35 m, wurde von einem Traktor (Massey Ferguson 135) angetrieben und gezogen. Die Zugmaschine wurde dabei im ersten Langsamgang mit Standgas bewegt, welches einer Geschwindigkeit von 0,19 m/s (10 m in 52 s) entspricht. Jede Fläche wurde so zweimal gespatet. Eine Einarbeitung von Stroh in den Boden war nicht befriedigend. Das Stroh sammelte sich in der Docox-Spatenmaschine und setzte diese dann zu, so dass sie nach wenigen Metern von Hand freigeräumt werden musste. Dadurch war Verteilung des Strohs im Boden sehr ungleichmäßig. In einem weiteren Versuch wurde Stroh mit einer Holderfräse eingearbeitet, mit dem Nebeneffekt, dass das Stroh ein wenig zerkleinert wurde. Das Stroh wurde in den oberen 20 cm des Bodens eingebracht. Ein positiver Einfluss des Strohs auf die Bodenerwärmung war nicht nachweisbar.

Um den Boden tiefer zu lockern und um mit den Absaugschläuchen des Systems Fink tiefer in den Boden zu gelangen, wurde in einem besondere Versuch die Spatenmaschine mit einer Geschwindigkeit von 0,77 m/s (10 m in 13 s) bewegt. Das Beet wurde insgesamt dreimal gespatet.

Die Folienbefestigung bei den Beeten an den Seiten des Gewächshauses durch Eingraben benötigte mehr Zeit als die Befestigung mit Schiffsketten. So wurden immer eine Längsseite und die beiden Querseiten der Folie mit 3,5 m langen Schiffsketten (Gewicht: 10 kg/m) beschwert.

Da in der Anfangsphase des Dämpfens der durch das Gebläse bewirkte Unterdruck die Folie am Boden festsaugt, muss das Gebläse – sofern man die Dämpffläche nicht begrenzt - häufig abgeschaltet werden. Bei jedem Einschalten erfolgte dann (im oberen Bereich) ein intensiver Dampfeintritt mit entsprechender Kondensation. Wird das Gebläse anschließend abgeschaltet, dann verschlämmt der Boden. Beim Unterdruckdämpfen darf der Absaugvorgang nicht unterbrochen werden. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass man die Dämpffläche in der Anfangsphase durch Aufschütten von Boden auf die Folie reduziert.

Ein Versuch mit gefrästem Boden und Intervallbetrieb des Gebläses führte zu wesentlich schlechteren Ergebnissen als bei einer normalen Foliendämpfung (ohne Unterdruck) mit grobschollig gelockertem Boden.

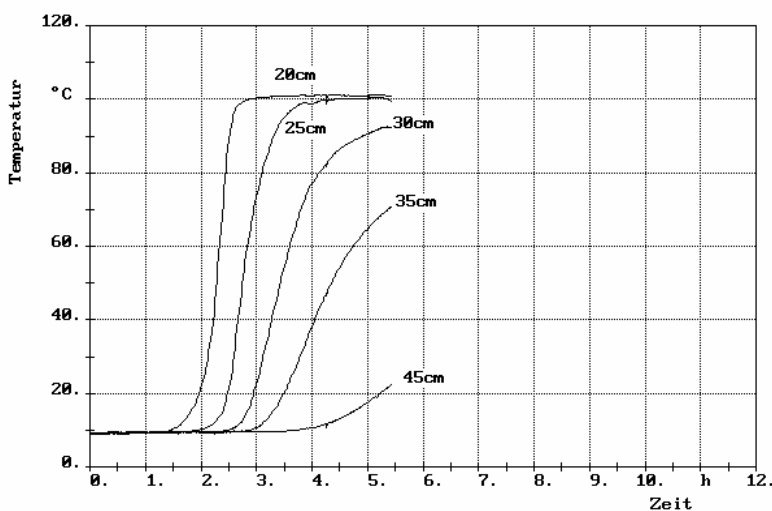
Von 8 Versuchsreihen schnitten die Versuche 4 (trotz zeitweiligem Abschalten des Gebläses) und 8, die in Beispiel 6 und 7 mit je einer Messstelle dargestellt sind, am besten ab.

Beispiel 6 Unterdruckdämpfen nach System Fink vom 10.12.92,

Der Boden ist bis in 30 cm Tiefe gut gelockert (2 mal gespatet). Die erste Temperaturreaktion erfolgt in 20 cm Tiefe nach 1 h 20min. (Abb. 6-7). Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 25 cm/h.

Gekennzeichnet durch den Übergang in den steilen Anstieg des Temperaturgradienten ist der Dampf nach ca. 1 h 50 min in 20 cm Tiefe angelangt. Nach 2 h 30 min ist in 20 cm Tiefe die Temperatur von 100°C annähernd erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Dampf bei etwa 27 cm angelangt.

Von den 14 Messstellen erreichten 90°C nach 5 Stunden Dämpfdauer in 20 cm Tiefe alle Messstellen, in 25 cm Tiefe 13 Messstellen. Die Messstelle I, die etwas schlechter abschnitt, hatte auch die ungünstigste Randlage. 80°C erreichten in 30 cm Tiefe ebenfalls alle Messstellen bis auf Messstelle I (70°C). In 35 cm Tiefe wurden 80°C nur noch von 2 Messstellen erzielt, die in etwa 50 cm Abstand von den Absaugschläuchen in günstiger Position lagen; einige Messpunkte, die etwas dichter an den Absaugstellen lagen, schnitten nicht so gut ab.



Messstelle VII

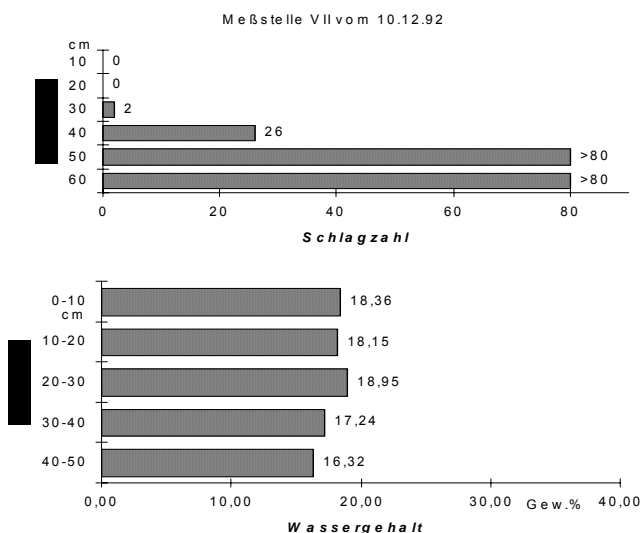


Abb. 6-7: Unterdruckdämpfen nach dem System Fink (Hinweis zu Schlagzahl und Wassergehalt zu Beginn von Kap. 6.1)

Aus den Messaufzeichnungen ist

nach 2 Stunden	$\dot{m} = 9,85 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
nach 2,5 Stunden	$\dot{m} = 9,80 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
nach 3 Stunden	$\dot{m} = 6,00 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
nach 3,5 Stunden	$\dot{m} = 5,90 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$

Auf Grund der gut gelockerten Bodenstruktur und der durch das Dämpfen verursachten zusätzlichen Bodenbefeuchtung ist für die spez. Wärmekapazität des Bodens $C_B = 550 \text{ Wh}/\text{m}^3\text{K}$ anzusetzen.

Der Vergleich des Unterdruckdämpfens (Fink) mit dem Foliendämpfen zeigt, dass zu Beginn (nach 2 Stunden) wesentlich mehr und später immer noch erkennbar mehr Dampf in den Boden eingeleitet werden kann. Dies führt jedoch nicht (wie beim Haubendämpfen) zu einer Verschlämmung. Offensichtlich wird durch das Absaugen der Luft auch das (Kondensat-)Wasser beschleunigt nach unten geleitet.

Unterstellt man die Hypothese, dass die erreichbare Dämpftiefe nur von der genügend großen Sickergeschwindigkeit des Wassers an dieser Stelle abhängt, dann ist die Folie (mit Unterdruck) gegenüber der Haube hinsichtlich der Steigerung der Dampffuhr begünstigt.

Fink	Messtag:10.12.92		Fläche 100,64m ²	
Uhrzeit	Dampfmenge			
	Δm kg	m kg/m ²	\bar{m} kg/m ² ·h	\dot{m}_D kg/m ² ·h
11:30	0	0	0	0
12:00	534,40	5,31	10,62	10,62
12:30	515,28	10,43	10,43	10,24
13:00	477,26	15,17	10,11	9,48
13:30	494,14	20,08	10,04	9,82
14:00	493,88	24,98	9,99	9,80
14:30	301,92	27,98	9,33	6,00
15:00	296,88	30,93	8,84	5,90
15:30	206,31	32,98	8,25	4,10
16:00	202,87	35,00	7,78	4,04
16:28	187,67	36,85	7,42	3,70
	3710,61			

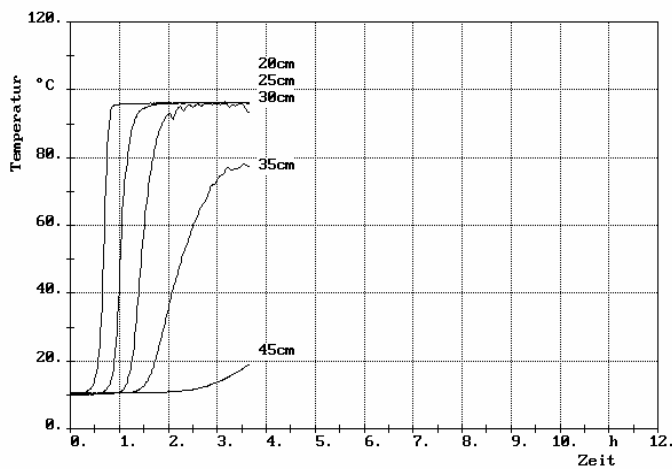
Tab. 6-4

Beispiel 7 Unterdruckdämpfen nach System Fink vom 16.02.93

Die Dämpffläche ist zu Beginn bei Auslastung der Kesselleistung so begrenzt, dass das Absauggebläse ständig eingeschaltet ist. Man erhält eine sehr viel kürzere Reaktion und eine größere Tiefenwirkung. Dies wird aus Abb. 6.8 ersichtlich. Der Boden ist wie bei Beispiel 5 ähnlich gut gelockert. Die erste Temperaturreaktion erfolgt in 20 cm Tiefe nach 20 min. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 60 cm/h oder 600 mm/h.

Gekennzeichnet durch den Übergang in den steilen Anstieg des Temperaturgradienten ist der Dampf nach ca. 30 min in 20 cm Tiefe angelangt. Nach 45 min ist in 20 cm Tiefe

die Temperatur von 100°C annähernd erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Dampf bei etwa 25 cm angelangt.



Messstelle III

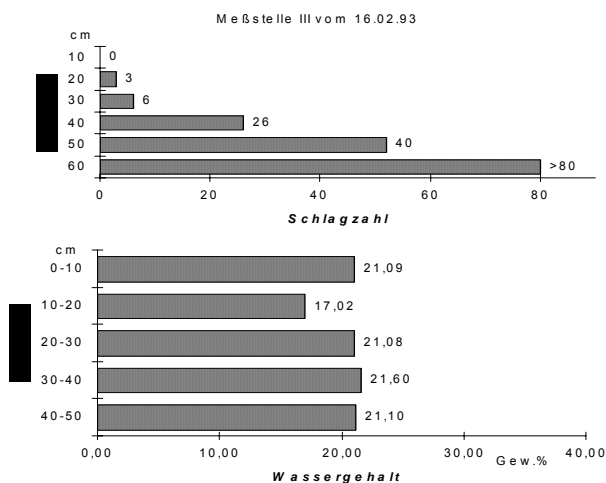


Abb. 6-8: Unterdruckdämpfen nach System Fink vom 16.02.93 Messstelle III

Aus den Messaufzeichnungen ist nach 55 Minuten $m = 751 \text{ kg}_D$ auf eine Fläche von 47 m^2 eingeleitet worden.

Das sind nach 55 Minuten $\dot{m} = 17,40 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
nach 2 Stunden $\dot{m} = 9,58 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$
nach 3 Stunden $\dot{m} = 6,74 \text{ kg}_D/\text{m}^2\text{h}$.

Geht man analog zu Beispiel 6 davon aus, dass die spez. Wärmekapazität des Bodens bei $C_B = 550 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ liegt, dann ist für 1 m^2 Dämpffläche und $0,2 \text{ m}$ Bodentiefe (also für $0,2 \text{ m}^3$) nach 50 Minuten $Q = 0,2 \cdot 550 \cdot 90 = 9900 \text{ Wh}$ oder mit $r = 626,67 \text{ Wh/kg}$ ein Dampfbedarf von $9900/626,67 = 15,8 \text{ kg}$ anzusetzen.

Für den Bereich von 20 bis 25 cm ist $Q = 0,05 \cdot 550 \cdot 40 = 1100 \text{ Wh}$ und der Dampfbedarf $1,75 \text{ kg}$.

Der theoretische Dampfbedarf liegt somit nach 50 Minuten in der Größenordnung von 18 kg/m².

Die Temperaturkurven machen nochmals deutlich, dass auch bei diesem sehr effektiven Dämpfvorgang erst nach 1 Stunde in 30 cm Tiefe die erste Temperaturreaktion entsteht, obwohl schon in 21 cm Tiefe 100°C erreicht sind.

Der Dampf dürfte nach einer Stunde erst eine Tiefe von 27 cm erreicht haben. Da die Bodenerwärmung nach etwa 1 Stunde und 20 Minuten auch in 30 cm Tiefe zügig und bis zu einer Temperatur von 80°C relativ linear verläuft, kann in diesem Bereich die Bodenfeuchte die Wärmeleitung nicht wesentlich behindern. Da die Absaugrohre in etwa 40 cm Tiefe wirken, kommt es zwangsläufig in diesem Bereich zu einer intensiven Wasseransammlung und damit auch zu einer Unterbrechung der Tiefenwirkung.

Bewertung

Der Vergleich mit Beispiel 6 zeigt, dass beim Unterdruckdämpfen der Absaugvorgang (gerade in der Anfangsphase) kontinuierlich ablaufen muss, um die Vorteile des Verfahrens voll auszuschöpfen. Die anfängliche Reduzierung der Dämpffläche bedeutet für den weiteren Dämpfverlauf keine Bevorzugung dieser Fläche, da sich der Dampfbedarf beispielsweise bei Erreichen einer Dämpftiefe von 30 cm stark verringert und somit der zum späteren Zeitpunkt zugeführte Dampf nicht mehr für die bereits gedämpfte Fläche sondern für die (aufnahmebereite) noch nicht gedämpfte Fläche zur Verfügung steht.

Fink	Messtag:16.02.93		Fläche 94,3m ²	
Uhrzeit	Dampfmenge			
	Δm kg	m kg/m ²	\bar{m} kg/m ² ·h	\dot{m}_D kg/m ² ·h
14:05	0	0	0	0
14:35	409,88	4,35	8,69	8,69
15:05	410,25	8,70	8,70	8,70
15:35	418,25	13,13	8,75	8,86
16:05	451,37	17,92	8,96	9,58
16:35	449,04	22,68	9,07	9,52
17:05	317,37	26,05	8,68	6,74
17:35	236,53	28,55	8,16	5,00
18:05	240,68	31,11	7,78	5,12
18:35	243,22	33,69	7,49	5,16
19:05	192,65	35,73	7,15	4,08
	3369,22			

Tab. 6-5:

6.5 Darstellung der Wärmeübertragung Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren

Die Verlegung der Dränagerohre, die Bodenlockerung und das Dämpfen wurde in 4 Gartenbaubetrieben mit unterschiedlichen Firmen, bzw. Lohnunternehmen aus den Niederlanden und Deutschland (aus dem Raum Venlo – Straelen) durchgeführt. Die Gärtner, die sich an diesen Untersuchungen beteiligten, waren an dem Verfahren interessiert, da sie eine Wirkung in Bodentiefen wünschten, die mit dem konventionellen Foliendämpfen nicht zu erreichen waren. Aus der Vielzahl der Messungen, die von Misserfolgen wegen zu hoher Bodenverdichtung und Bodenfeuchte begleitet waren, wird zuerst ein Messergebnis gezeigt, das bei guten Ausgangsbedingungen realistisch erzielbar ist (Beispiel 8). Es folgen charakteristische Beispiele, bei denen keine günstigen Ausgangsbedingungen für ein erfolgreiches Dämpfen vorlagen (Beispiele 9 und 10).

Beispiel 8 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 13.06.89

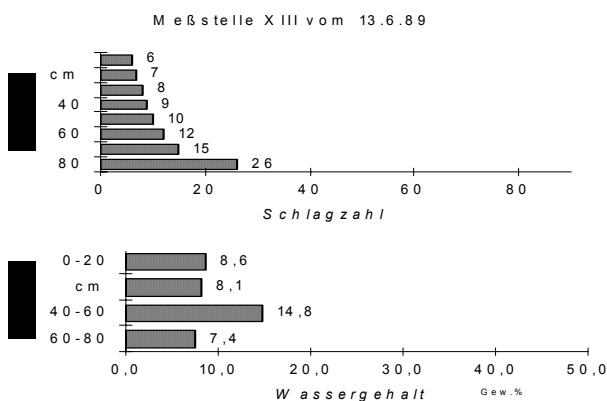
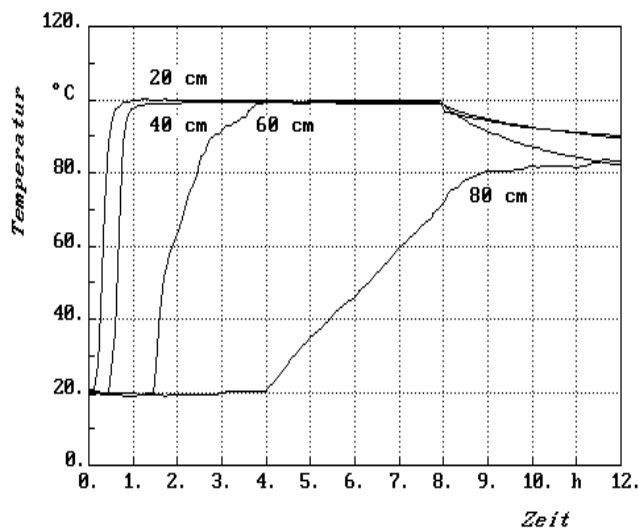
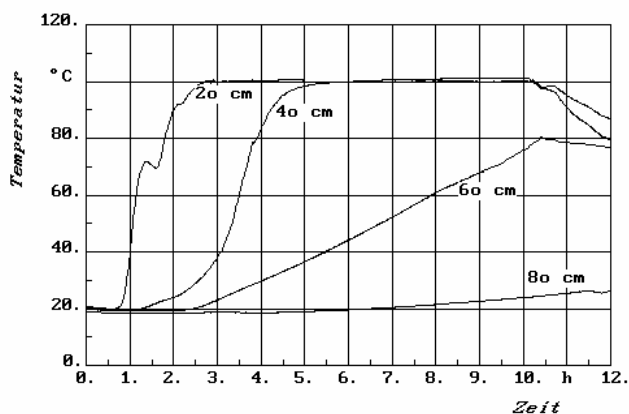


Abb. 6-9: Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 13.06.89 Messstelle XIII

Das Beispiel zeigt das Ergebnis für einen bis zu 80 cm tief gelockerten Boden mit sehr geringer Bodenfeuchte. Bei diesem Dämpfvorgang sind an anderen Messstellen ähnlich günstige Temperaturverläufe aufgetreten.

Insgesamt steht dieses Beispiel für optimale Ausgangsbedingungen; bei keinem anderen Dämpfversuch mit Dränagerohren konnte ein besseres Ergebnis erzielt werden. Hervorzuheben ist, dass nach einer Stunde in 40 cm Tiefe 100°C erzielt wurden, und dass die Temperaturverläufe auch in dieser Tiefe noch keine Feuchtigkeitsansammlung signalisieren. In 60 cm Tiefe werden innerhalb einer Stunde (von Beginn der Bodenerwärmung) 80°C erreicht. Es dauert dann aber noch 1,5 Stunden bis auch hier 100°C gemessen werden. Der Dämpfzeit von 1 Stunde (100°C) in 40 cm Tiefe stehen 4 Stunden in 60 cm Tiefe und 8 Stunden (bei 80°C) in 80 cm Tiefe gegenüber.

Beispiel 9 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 28.07.89
Der Boden ist zwar gut gelockert, jedoch zu feucht.



Messstelle II

Meßstelle II vom 28.7.89

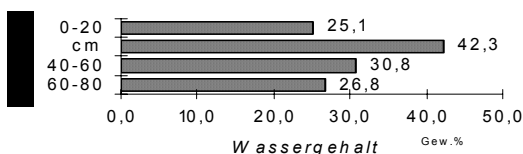
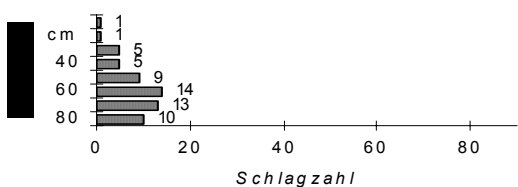


Abb. 6-10: Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 28.07.89 Messstelle II

Die Voraussetzungen hinsichtlich der Bodenlockerung waren ähnlich gut wie bei Beispiel 8, die Bodenfeuchte zu Beginn der Messung lag jedoch wesentlich höher. Das Gebläse konnte zwar auch in 60 cm Tiefe das Kondensat noch nach unten ziehen, offensichtlich bildeten sich aber keine Kanäle mehr für den nachrückenden Dampf.

Beispiel 10 Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 27.06.89, Messstellen I und IV

Der Boden ist in tieferen Schichten zu wenig gelockert

Dieses Beispiel soll für einen Dämpfvorgang den Einfluss der Bodenlockerung (bei relativ geringer Bodenfeuchte) verdeutlichen. Bei Messstelle I (Abb. 6-11) war eine Bodenlockerung tiefer als 40 cm nicht möglich, wohingegen bei Messstelle IV (Abb. 6-12) eine Bodentiefe von 80 cm zwar erreicht wurde. Die Bodenlockerung war jedoch offensichtlich nicht ausreichend.

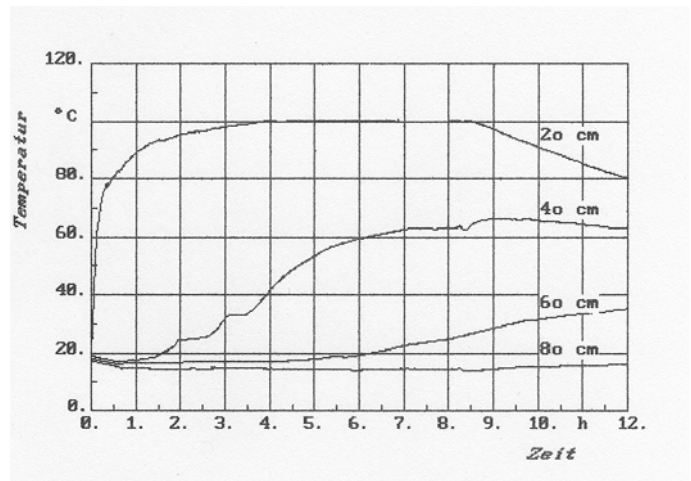
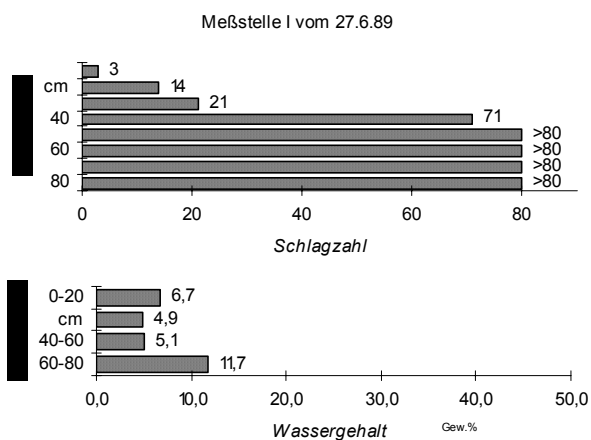


Abb. 6-11: Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 27.06.89 Messstelle I

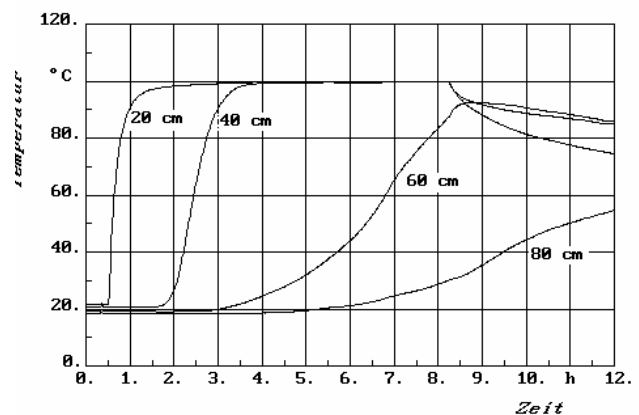
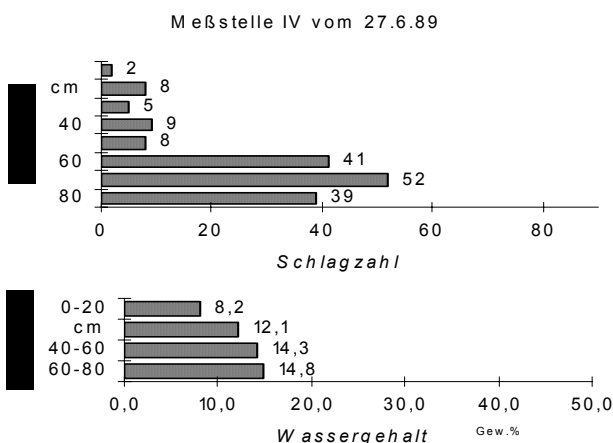


Abb. 6-12: Unterdruckdämpfen mit Dränagerohren vom 27.06.89 Messstelle IV

Bewertung der Praxisversuche:

Die Messungen in Praxisbetrieben sind aus Sicht der versuchstechnischen Methodik und Aussagekraft aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln zu sehen.

Der positive Aspekt liegt darin, dass unter den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten und betriebsspezifischen Vorgaben, über professionelle Unternehmen, mit dem hierfür erforderlichen technischen Aufwand, das bestmögliche Ergebnis realisiert wird. Der eher negative Aspekt ist darin zu sehen, dass versuchstechnisch interessante Varianten schwierig zu realisieren sind, dass bei auftretenden Störungen, Wiederholungen nahezu ausgeschlossen sind und dass sich die messtechnische Betreuung in den zügigen Arbeitsablauf einbinden muss.

Der letztere Aspekt führt dazu, dass eine Messtechnik eingesetzt wurde, die auch jederzeit in der gärtnerischen Praxis angewendet werden könnte, wenn man von der hier vorgenommenen elektronischen Datenerfassung und Versuchsauswertung absieht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Unterdruckdämpfen nicht in jedem Fall erfolgreich eingesetzt werden konnte. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bestimmte Bedingungen erfüllt sein müssen, die den Dämpferfolg dann aber nicht nur ermöglichen, sondern auch garantieren und, dass diese Bedingungen vor dem Dämpfen nachgewiesen und während des Dämpfens eingehalten werden können.

Zwingend erforderlich ist die Bodenlockerung bis in mindestens 60 cm Tiefe, nach Möglichkeit bis an die Dränagerohre. Weicht man hiervon ab, kann die erforderliche Temperatur maximal nur bis in die Eindringtiefe des Gerätes zur Bodenlockerung gelangen. Eine zu feine Krümelung durch eine Fräse im Bereich des Oberbodens hat grundsätzlich negative Auswirkungen.

Die Bodenfeuchte darf 20 Gewichtsprozent nicht überschreiten. Je trockener der Boden, desto sicherer ist der Dämpferfolg. Beide Kriterien, sowohl die Lockerung als auch die geringe Feuchte müssen jedoch gleichzeitig erfüllt sein.

Das Dämpfvorgang darf nicht unterbrochen werden. Gleichermäßen schädlich ist ein längeres Abschalten des Gebläses wie die Unterbrechung der Dampfzufuhr.

Der durch das niederländische Venloraster in der Praxis eingeführte Abstand der Dränagerohre von 3,20 m ist grundsätzlich empfehlenswert. Über die gesamte Dämpfzeit gesehen, sind die Bereiche zwischen den Dränagerohren nicht benachteiligt. Der Dampf wird zwar zu Beginn unmittelbar über den Dränagerohren schneller angesaugt und gelangt somit auch schneller in die Tiefe. Wegen der zunehmenden Bodenfeuchte erzielen jedoch die benachbarten längeren Wege im Laufe der Dämpfzeit Vorteile. Auch die Randzonen (an den Gewächshäusern) sind nur deswegen kritisch zu sehen, weil an diesen Stellen in der Regel die Bodenlockerung nicht befriedigend durchgeführt werden kann.

Bei den heutigen Möglichkeiten der Verlegung der Dränage mit Laser und Spezialmaschinen, treten bei der Installation keine grundsätzlichen Probleme auf. Insofern sind die etwas unterschiedlichen Methoden und eingesetzten Maschinen bei der Dränageverlegung und Bodenlockerung ohne messtechnisch nachweisbaren Einfluss auf das Ergebnis, sofern - wie hier geschehen - von professionellen Unternehmen durchgeführt.

6.6 Hinweis auf Messergebnisse zum Bioflash-Verfahren

Auf der Grundlage von vergleichenden Untersuchungen mit unterschiedlichen Dosierungen von CaO und KOH wurde folgende Tabelle veröffentlicht, die auch einen Vergleich mit der alleinigen Dampfzufuhr ermöglicht.

Temperatur			Behandlung			
Dampf			KOH 1000	KOH 4000	CaO 1000	CaO 4000
ϑ_{\max}	°C	74,9	80,5	80,8	80,3	85,5
ϑ_{nach}	°C	36,6	41,0	40,0	38,8	41,6
180 min.						
$\vartheta > 35^{\circ}\text{C}$	min	>180	>180	>180	>180	>180
$\vartheta > 40^{\circ}\text{C}$	min	122	>180	>180	161	>180
$\vartheta > 45^{\circ}\text{C}$	min	72	104	101	83	120
$\vartheta > 50^{\circ}\text{C}$	min	47	59	65	53	72
$\vartheta > 55^{\circ}\text{C}$	min	29	35	41	35	46
$\vartheta > 60^{\circ}\text{C}$	min	19	21	29	24	32
$\vartheta > 70^{\circ}\text{C}$	min	7	8	14	11	17
$\vartheta > 80^{\circ}\text{C}$	min	0	4	5	5	7

Tabelle 6-6: Maximale Temperaturen, die in 15 cm Tiefe gemessen wurden und zwar in der 1. Spalte nur mit Dampf, in den übrigen Spalten mit einer zusätzlichen Dosierung von jeweils 1.000 und 4.000 kg/ha mit KOH bzw. CaO. Die 2. Zeile enthält die maximalen Temperaturen, die nach 180 Minuten gemessen wurden.

Die folgenden Zeilen geben den Zeitraum an, für den bestimmte Temperaturen beim jeweiligen Verfahren überschritten wurden Barberi, P., Moonen, C. (2002).

Ergänzend zu den Angaben in den Tabellen 6-6 und 3-7 wird in der folgenden Tabelle 6.7 ein Vergleich zu den Aussagen in Kapitel 4.1.1 und Abb. 4-4 gezogen und als Bezugsgröße 1 m² anstelle von 1 ha gewählt. Für die in Tabelle 3-7 erzielten

$\vartheta_{\max} = 74,9^{\circ}\text{C}$ in 15 cm Tiefe ist für eine Ausgangstemperatur von 20°C eine theoretische Wärmemenge $Q = 0,15 \cdot C_{\text{Vol}}(74,9-20) = 8,24 C_{\text{Vol}}$ aufzubringen. Setzt man in diese Gleichung den gemessenen Energieverbrauch ohne Berücksichtigung der zwangsläufig auftretenden Verluste ein, dann erhält man eine absolute Obergrenze für die spezifische Wärmekapazität des Bodens. Ebenso entspricht dem Heizölverbrauch ohne Berücksichtigung von Kesselwirkungsgraden eine maximal erzeugte Dampfmenge.

Betriebsdaten		Selbstfahrer	gezogene Geräte
Arbeitsgeschwindigkeit	m/h	150	150
Arbeitstiefe	m	0,2	0,2
Brennstoffverbrauch für Dampferzeugung (Heizöl EL)	kg/m ² l/m ²	0,183 0,2137	0,3146 0,3658
Energieverbrauch mit $H_u = 11,7$ kWh/kg	kWh	2,15	3,681
maximale spez. Wärme- kapazität des Bodens	C_{Vol} Wh/m ³ K	261	446
maximale Dampfmenge	kg/m ²	3,00	5,11

Tabelle 6-7: Ergänzende Angaben zu Tabelle 3-7

6.7 Überprüfung einer Neuentwicklung eines Dampfkessels mit verbesserten Emissionswerten und einem hohen Kessel- wirkungsgrad

Für den neu entwickelten Typ S 950 der Firma Möschle mit einer Nennleistung von 740 kW und 1000 kg Dampf/h wurde eine eingehende Überprüfung der Leistungs- und Emissionsdaten im Praxiseinsatz vorgenommen Rottmann, F. (1993). Die Ergebnisse sind im Teilbericht Dampfkesselanlage des Forschungsvorhabens *Umweltfreundliche Bodenentseuchung durch Dämpfen mit dem 'System Fink' und einer neuen Dampfkesseltechnik mit Dampfmengenregulierung und vergrößertem Abgaswärmetauscher* aufgeführt.

Messergebnisse	Nennleistung 740 kW Dampfleistung 1.000 kg/h	
	bei Nennlast	bei Teillast
Brennstoffverbrauch	64,8 kg/h	35,9
Feuerungsleistung	776,3 kW	430
Nennleistung	725,3 kW	412,8 kW
Abgasverluste	6,7 %	4,0 %
Abgastemperatur	165 °C	125 °C
Dampf Temperatur nach Überhitzer	210 °C	180 °C
Kesseldruck (Überdruck)	0,4 bar	0,15 bar

Tabelle 5-8: Messwerte der Überprüfung eines modernen Heizkessels

7 Besondere Maßnahmen bei der Dämpfung

In diesem Kapitel sollen Gesichtspunkte angesprochen werden, die beim Flächen-dämpfen zu beachten sind. Die hier aufgeführten Maßnahmen basieren zum Teil aus Erfahrungen der Praxis, die teilweise auch widersprüchlich sein können.

Beispielsweise wurde in den vorangegangenen Kapiteln immer wieder darauf betont, dass der Boden möglichst trocken sein soll. In der Literatur wird andererseits darauf hingewiesen, dass das nicht für Sandböden gelte; der müsste vor dem Dämpfen - allerdings nur schwach - befeuchtet werden, sofern er durch die Hand rieselt. Er darf sich in der Hand jedoch nicht kneten lassen. Eine plausible Erklärung hierfür dürfte sein, dass eine sehr dünne feinkörnige Sandschicht mit einer sehr geringen Wärmekapazität nur so wenig Kondensationswärme benötigt, um 100°C zu erreichen, dass keine nennenswerte Bodenfeuchte entsteht und somit auch kaum Wasser nach unten abfließt. Die Sandstruktur bietet dem Dampf praktisch keine Kanäle, um in tiefere Schichten zu gelangen und somit wird die Bodenerwärmung auf Wärmeleitung beschränkt. Der feuchte Boden würde zwangsläufig mehr Kondensat benötigen, da auch das Wasser erwärmt werden muss. Derartige Ausgangsbedingungen waren bei unseren Messungen nicht vorhanden.

Unterschiedliche Angaben werden auch hinsichtlich des Zeitpunkts der Bodenlockerung gemacht.

1. Zitat: "Es ist sehr darauf zu achten, dass der Boden unmittelbar (gleichentags) vor dem Dämpfen gelockert wird, da dieser sich sonst wieder verfestigt und eine optimale Sterilisation verunmöglicht."

2. Zitat: "Die Bodenvorbereitung sollte (beim Unterdruckdämpfen) möglichst eine Woche vor dem Dämpfen erfolgen. Durch diese Maßnahme werden evtl. die schwer erfassbaren Dauerorgane der Schaderreger zum Keimen angeregt; diese werden dann empfindlicher gegenüber Hitze."

Auch die Angaben über die Wartezeiten bis zur Neubepflanzung nach dem Dämpfen divergieren, sie lassen sich wegen der unterschiedlichen Einflüsse von Mangan und Stickstoff jeweils im speziellen Fall begründen.

7.1 Bodenbearbeitung vor dem Dämpfen

Die wichtigste Voraussetzung dafür, dass der Boden über den von oben aufgebrauchten Dampf in der Tiefe erhitzt wird, ist ein gut gelockerter und trockener Boden. Beim Haufendämpfen darf das Substrat bzw. der Kompost ebenfalls nicht nass sein.

Zur Bodenlockerung sollten Maschinen wie Tiefenbodenlockerer und Spatenmaschinen eingesetzt werden. Zur Steigerung der Bodenlockerung sollte die zu dämpfende Fläche mit einer Spatenmaschine in Längs- und Querrichtung bearbeitet werden. Ein Boden, der mit einer Fräse verhältnismäßig feinkrümelig bearbeitet wurde, neigt zur Verschlammung und ist damit zum Dämpfen ungeeignet.

Eine Einarbeitung von Stroh in den Boden war bei unseren Untersuchungen nicht befriedigend. Das Stroh sammelte sich in der Docox-Spatenmaschine und setzte diese dann zu, so dass sie nach wenigen Metern von Hand freigeräumt werden musste. Dadurch war Verteilung des Strohs im Boden sehr ungleichmäßig. In einem weiteren Versuch wurde Stroh mit einer Holderfräse eingearbeitet, mit dem Nebeneffekt, dass das Stroh ein wenig zerkleinert wurde. Das Stroh wurde in den oberen 20 cm des

Bodens eingebracht. Ein positiver Einfluss des Strohs auf die Bodenerwärmung war nicht nachweisbar.

Der Tiefenbodenlockerer bewirkt, dass die Einlagerungsverdichtungen von z.B. Ton, Kalk und Humus im Unterboden gelockert und vermischt werden. Der Boden wird zusätzlich in einer Tiefe von 60 bis 80 cm gelockert, die mit einer Spatenmaschine nicht erreicht werden kann.

Außerdem kann mit Hilfe des Gebläses der Boden entfeuchtet werden.

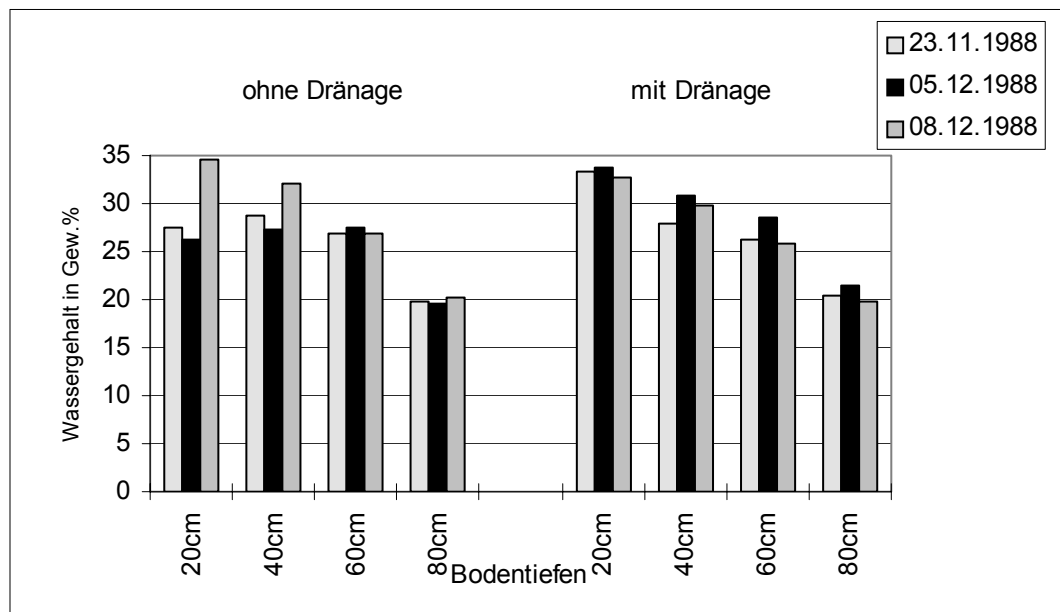


Abb. 7-1: Vergleich der Bodenentfeuchtung zweier Gewächshausflächen mit und ohne Dränage in den Bodentiefen von 20 cm, 40 cm, 60 cm und 80 cm.

Da die Messproben in zwei unterschiedlichen Gewächshäusern gezogen wurden, sind die Ausgangswerte nicht vergleichbar. Während in dem Gewächshaus ohne Dränage die Bodenfeuchte vom 5. 12. auf den 8.12. zugenommen hat, konnte dies mit dem Gebläse verhindert werden. Andererseits konnte mit Gebläse auch keine deutlicher Trocknungseffekt nachgewiesen werden.

7.2 Weitere wichtige Maßnahmen vor dem Dämpfen

Vor dem Dämpfen sind die Stehwände und Fundamente zu desinfizieren. Pflanzenrückstände an Gewächshauseinrichtungen müssen entfernt werden. Ein Abflammen mit Hilfe eines propangasbetriebenen Gasflamngerätes ist wegen des geringen Arbeitsaufwandes zu empfehlen. Befestigte Wege sollten zum Schutz einer Reinfektion des darunter ungedämpften Bodens mit einer Folie abgehängt werden. Dies müsste auch an der Innenseite der Außenfundamente geschehen, um einer unnötigen Wärmeableitung vorzubeugen [BELKER, N (1990)].

Bei der Haufendämpfung ist eine feste Grundfläche, z.B. eine Betonfläche im Gewächshaus, zu wählen und diese vorab zu entseuchen.

Beim Verlegen der Folien ist darauf zu achten, dass beim Abnehmen und Umsetzen keine ungedämpfte Erde auf die gedämpfte Fläche gelangt. Man beginnt in der Mitte (des Gewächshauses) und lässt dann grundsätzlich ein Feld frei um die Folie nach dem Dämpfen umzulegen.

7.3 Maßnahmen während des Dämpfens

Beim Foliendämpfen soll immer ein Isoliervlies aufgelegt werden. Der Wärmeverlust an der Oberfläche einer Folie mit 100°C ist sehr hoch, da neben der konvektiven Wärme ein hoher Anteil an Strahlungswärme – auch im Sommer an die Gewächshausbedachung – abgeführt wird. Er beträgt nach Messungen in den Niederlanden und auch nach theoretischen Überlegungen bei einer Gewächshautemperatur von 25°C ca. 1 000 Wh/m² Gewächshausfläche und stellt somit einen Energieverlust von 20 bis 30% dar. Nach holländischen Angaben lassen sich mit dem Isoliervlies 12 bis 17% Energie einsparen. Dies entspricht auch den Aussagen von Abb. 4-4.

Das Einleiten von Nassdampf muss verhindert werden. Zu Beginn sollte die Folie jedoch mit Satttdampf angeblasen werden. Es ist zu überprüfen, ob der Kessel in Waage steht. Bei größeren Abständen zwischen Kessel und Dämpffläche sind ggf. größere Nennweiten für die Zuleitungen zu wählen. Die Zuleitungen sind bei einer Länge über 50 m grundsätzlich zu isolieren, es empfiehlt sich schon ab 30 m.



Abb. 7-2: Das Auflegen eines Isoliervlieses ist zwingend erforderlich



Abb. 7-3: Einfache und zuverlässige Methode, den Dampf unter die Folie zu leiten

Wenn die Folie reißt, so sollte sie ohne den Dämpfvorgang lange zu unterbrechen, schnell repariert werden. Hierfür ist ein für die Folie geeigneter Kleber erforderlich. Unter den Riss wird ein Brett gelegt, das dann dort während des Dämpfens liegen bleibt.



Abb. 7-4: Vorbereitungen zum Reparieren der Folie sind vor dem Dämpfen zu treffen

Beim Foliendämpfen ist nach wie vor eine ständige Überwachung erforderlich. Untersuchungen haben ergeben, dass Taster, die die Folienhöhe registrieren und die Dampfzufuhr regulieren, zwar relativ zuversichtlich arbeiten; dennoch lässt es sich nicht vermeiden, dass undichte Stellen, an denen der Dampf durchbricht, umgehend zugeschüttet werden müssen. Zur Temperaturkontrolle dienen lange Stabfühler. Beim Einstechen in den Boden mit 20°C und kurzem Herausziehen, strömt soviel Dampf in den kleinen Kanal, dass beim abermaligen Einstechen Temperaturen über 80°C gemessen werden.

7.4 Maßnahmen nach dem Dämpfen

Die wichtigste Maßnahme ist, alle erforderlichen Hygieneforderungen zu erfüllen. Völlig unterbleiben muss das Betreten des gedämpften Bodens mit Schuhwerk, mit dem zuvor unbehandelter Boden betreten wurde.

Auf die Probleme von Mangan und Stickstoff wird in der Literatur verschiedentlich hingewiesen. [BOROS, G. (1954)], [DERCKX, J. M. H. und andere Autoren (1981)], [GEIER, H. u. Leber, B. (1990)], [GYSI, C. und andere Autoren (1990)].

Die wesentlichen Aussagen zu diesem Thema sind in Kapitel 2 zu finden.

Die Aussagen der Praxis zum anschließenden Auswaschen des Bodens sind in der Regel negativ. Es bringt offensichtlich sehr wenig und ist somit auch nicht unbedingt sinnvoll.

Den Boden in Hinsicht auf eine effektive Wiederbelebung mit den gewünschten Mikroorganismen zu impfen und damit gleichzeitig pflanzenschädliche Erreger zurückzuhalten, wird von Fuchs, Biophyt AG, unter der Bezeichnung *integrierte Dämpfung* empfohlen. Der Bodenaktivator wird unmittelbar nach der Abkühlung auf 40°C beigemischt und führt zu gesünderen, stärkeren Pflanzen. Es wird auf die Firmeninformation und Literatur verwiesen.

8 Literatuur

- Awuah, R.T., Lorbeer, J.W. 1986: A sorbosebased selective medium for enumerating propagules of *Fusarium oxysporum* f.sp. *apii* Race 2 in organic soil. *Phytopathology*, 76, 1202-1205
- Baker, K.F., Cook, R.J. 1974: Biological control of plant pathogens. Amer. Phytopath. Society, St.Paul, MN
- Bartels, A. 1985: Der Baumschulbetrieb. Ulmer, Stuttgart, 3. Auflage
- Barberi, P., Moonen, C. 2002: Effetto del vapore e di sostanze a reazione esotermica sul controllo della flora infestante reale e potenziale. Convegno: Vapor d'acqua e sostanze a reazione esotermica: una combinazione a ridotto impatto ambientale per la disinfezione e la disinfezione del terreno, 103-105
- Belker, N. 1990: Bodenentseuchung durch Dämpfen. Sonderveröffentlichung, 4, KTBL, Darmstadt
- Ben-Yephet, Y., Reuven, M., Genizi, A. 1994: Effects of inoculum depth and density of *Fusarium* wilt in carnations. *Phytopathology*, Heft 84, 1393-1398
- Berkelmann, B. 1992: Charakterisierung der Bakterienflora und des antagonistischen Potentials in der zirkulierenden Nährlösung einer Tomatenkultur (*Lycopersicon esculentum* MILL.) in Steinwolle. Geisenheimer Berichte, Band 10.
- Börner, H. 1981: Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. UTB Ulmer, 4. Aufl.
- Bollen, G. J. 1969a: The selective effect of heat treatment on the microflora of a greenhouse soil. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, Heft 75, 157-163
- Bollen, G. J. 1969b: De invloed van het stomen op biologische eigenschappen van de grond. *Tuinbouwmededelingen*, 32, 475-480
- Bollen, G. J. 1985: Lethal temperatures of soil fungi. In: Parker, C.A., Rovira, A.D., Moore, K.J. and Wong, P.T.W. (eds.). *Ecology and management of soil borne plant pathogens*. American Phytopathological Society, St.Paul: 191-193.
- Broer, S., Sonneveld, C. 1973: Mangaanvergiftiging bij roos (var. Ilona). *Vakblad voor de Bloemisterij*, Heft 28(48), 10-11
- Boros, G. 1954: Untersuchungen über die Wirkung der Erhitzung von Unkrautsamen auf die Keimfähigkeit von Unkrautsamen und auf physikalische und chemische Eigenschaften des Bodens, Prom. Nr. 2388 an der ETH Zürich
- Derckx, J. M. H. 1972: Grondstomen, Profuin Noord Limburg, Venlo
- Derckx, J. M. H. et al. 1981: Grondstomen Proefstation voor de Tuinbouw onder Glas te Naaldwijk, Proefstation voor de Blomesterij te Aalsmeer, Profuin Noord-Limburg te Venlo, Consulentschappen voor de Tuinbouw

DIN 18121 Teil 1, April 1976:
 DIN 4094 Teil 2, Mai 1980:
 DIN 18 121 Teil 1, April 1976

Geier, H., Leber, B. 1990: Neues zum Dämpfen. Reichenauer Hefte, Heft 1

Gudehus, H. 1994: Messtechnische Überprüfung aktueller Dämpfverfahren,
 Abschlussbericht zu Forschungs- und Entwicklungsverfahren für Umweltschutz im
 Agrarbereich des Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Band I

Gysi, C. et al. 1990: Ertragsfähigkeit des Bodens. 25. Arbeitstagung für den
 überdeckten Gemüsebau. Eidgen. Forschungsanstalt, Wädenswil

Hege, H., Ross, H. 1972: Das Dämpfen von Böden und Erden.
 KTBL-Schrift 153, Frankfurt

Heikki 1967: Vergiftungserscheinungen bei Erddämpfung.
 Gartenbauwirtschaft, 12, 311

Jarvis, W. R. 1992: Managing diseases in greenhouse crops. APS-press, St. Paul

Johnson, d., Aas, K. 1960; Investigations of the technique of soil steaming. Acta
 Agriculturae Scandinavica, Supplementum 9, Stockholm

Koch, W., Hurle, K. 1978: Grundlagen der Unkrautbekämpfung. Ulmer, Stuttgart.

Koch, W. 1988: Mikrowellenbestrahlung - einen neue Methode des Pflanzenschutzes,
 Lu/Journal 2, 72-75

Kunisch, M. 1988: Bodenentseuchung mit Mikrowellen erst in einigen Jahren praxisreif,
 Taspo Zeitschrift 122, 29, Seite 3

Kuntze, H. et al. 1983: Bodenkunde. UTB 1106, Ulmer, Stuttgart,
 ISBN 3-8001-2513-7

Matthews, R. E. F. 1991: Plant Virology (3rd ed.), Academic Press, San Diego

Messing, J. H. L. 1964: Manganese toxicity. Glassh. Crops Res. Inst. Ann. Report,
 1963, 63-64

Otto, G., Winkler, H., Szabo, K. 1993: Zum Stand der Erkenntnisse über die Ursache
 der Bodenmüdigkeit bei einigen Rosaceen-Arten. Mitteilungen der Biologischen
 Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem, H. 289, 11 -25

Peruzzi, A., Raffaelli, M. , vier weitere Autoren 2002a: Messa a punto del sistema
 'bioflash' ed evoluzione delle macchine operatrici per la disinfezione e disinfestazione
 del terreno: Risultati di un quadriennio di sperimentazione Convegno: Vapor d'acqua e
 sostanze a reazione esotermica: una combinazione a ridotto impatto ambientale per
 la disinfezione e la disinfestazione del terreno, 35-43,

- Peruzzi, A., Raffaelli, M., Ginnasi, M., Mainardi, M. 2002b: Development of innovative machines for soil disinfection by means of steam and substances in exothermic reaktion. Proceedings of the 5th EWRS Workshop On 'Physical and Cultural Weed Control', Pisa 11-13 March 2002, 220-229
- Peruzzi, A., Raffaelli, M., acht weitere Autoren 2000: Messa a punto di un prototipo di sterilizzatore del terreno per mezzo di vapore e di sostanze a reazione esotermica. Rivista di Ingegneria Agraria 31, 226-242
- Rannertshauser, J. 1990: Thermische Unkrautbekämpfung, KTBL-Arbeitsblatt 655
- Rottmann, F. (1993): Teilbericht Dampfkesselanlage des Forschungsvorhabens Umweltfreundliche Bodenentseuchung durch Dämpfen mit dem 'System Fink' und einer neuen Dampfkesseltechnik mit Dampfmengenregulierung und vergrößertem Abgaswärmetauscher, Abschlussbericht zu Forschungs- und Entwicklungsverfahren für Umweltschutz im Agrarbereich des Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- Runia, W. T. 1983: Stoemen, Groenten en Fruit 38, 27-30
- Runia, W. T. 1986: Disinfestation of substrates used in protected cultivation. Soilless Culture, 2 (1), 30-44
- Schinner, F. , Sonnleitner, R. 1996: Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York
- Sonneveld, C. 1968: De mangaanhuishouding van de grond en de mangaanopname van sla. Meded. Dir. Tuinbouw (Neth.), 31, 476-483
- Sonneveld, C. 1969: De invloed van stomen op de stikstofhuishouding van de grond. Tuinbouwmededelingen (Neth.), 32, 197-203
- Sonneveld, C. 1979: Changes in chemical properties of soil by steam sterilization. In: Mulder, D. (Hsg.), Soil disinfestation. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 39-50
- Weil, B. 1960: Über die Bedeutung des Untergrundes als Infektionsquelle. Gartenwelt, 60, 208-209
- Wiebe, H. J., Wetzold, P. 1969: Nebenwirkungen der Bodensterilisation mit Dampf auf die Entwicklung von Kopfsalat. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 76, 340-348

9 Firmen der Dämpftechnik

Hersteller von Geräten und Materialien

Biophyt AG, Dr. Jacques Fuchs, Schulstraße 13, CH-5465 Melikon

Celli Costruzione Macchine Agricole, Via A. Masetti 32, I-47100 Forlì
Tel.: 0039 (0)543 794711, Fax: 0039 (0)543 794747
www.celli.it

Ferrari-Möschle, Via valletta 1A, I-46040 Guidizzola
Tel.: 0039 (0)376 819342, Fax: 0039 (0)376 840205
E-Mail: ferraricost61@tiscali.it,
www.Ferraricostruzioni.com

Harter Elektrotechnik, Schlosshof 95, D-77773 Schenkenzell
Tel.: 07836 7667, Fax: 07836 7540
E-Mail: info@harter-elektrotechnik.de
www.harter-elektrotechnik.de

Hombach – Wärmetechnik GmbH, Betzdorfer Straße 25-29, D-57520 Rosenheim
Tel.: 02747 2017-19, Fax: 02747 3443

Kiefl HG, Nerieder Str. 53, D-82131 Gauting
Tel.: 089 8931660, Fax: 089 8508535

Mayer GmbH & Co., Poststraße 30, D-89522 Heidenheim
Tel.: 07321 959437
E-Mail: info@mayer.de
www.mayer.de

MSD Agrar- und Umwelttechnik GmbH Möschle Dämpftechnik und Dämpfsysteme,
Stollenberg 8, D-77770 Durbach
Tel.: 0781 91936919,
E-Mail: info@moeschle.de
www.moeschle.de

Regero, Rue de l'Allemagne-Federale, Centre de Gros, F-44084 Nantes
Tel.: 0033 240493820, Fax: 0033 240930685

Scheper Maschinenbau GmbH, Industriering 18, D-49393 Lohne
Tel.: 04442 92670, Fax: 04442 926741

Lohndämpfen, Dränagerohre verlegen, Bodenlockerung

All-drain, Zeelandsedijk 26-28, NL-5424 TL Elsendorp
Tel.: 0031 492351672

Wymo Venlo B.V., Zoutpad1 7, NL-5916 Venlo
Tel.: 0031 77 3517607, Fax: 0031 77 3514474
E-Mail: wymo@worldonline.nl

Hay Aerts Grondverbetering, Genenberg 28, NL-5872 AL Broekhuizen
Tel.: 0031 77 4631876, Fax: 0031 77 4632545
E-Mail: info@hayaerts.nl

Tissens's Loonbrijf, Luuschweg 10, NL-5926 PW Blerick-Boekend
Tel.: 0031 773824315, Fax: 0031 773873215

10 Anhang Grundlagen zur Wärmetechnik

10.1 physikalische Größen im international gültigen Maßsystem

Die Temperatur ϑ wird als Wert der Temperaturskala in °C (Grad Celsius) angegeben.

Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ hat die Einheit K (Kelvin).

Die Masse m der verwendeten Stoffe wird in kg (Kilogramm) angegeben.

Die Dichte ρ hat die Einheit kg/m^3 .

Bei gasförmigen Stoffen wie bei der Luft und beim Wasserdampf ist sie abhängig vom Luftdruck.

Die Kraft F wird in N (Newton) angegeben und ist definiert über $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$.

Der Druck p als Kraft je Fläche hat folgende Einheiten:

$$1 \text{ Pa (Pascal)} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100.000 \text{ Pa} = 10 \text{ N/cm}^2.$$

Häufig wird noch mit den früher üblichen Druckeinheiten gearbeitet.

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \text{ mm QS (Quecksilbersäule)}.$$

Da die Temperaturskala in Grad C so definiert ist, dass 0°C der Gefrierpunkt und 100°C der Siedepunkt von Wasser bei 1 atm ist, liegt der Siedepunkt umgerechnet bei 100°C und 1.013 bar.

In den technischen Disziplinen bevorzugte man früher die technische Atmosphäre at, die dem Druck einer 10 m hohen Wassersäule entspricht. Dies führt zu der Umrechnung

$$1 \text{ bar} = 1,02 \text{ at} = 0,987 \text{ atm} = 750 \text{ Torr}.$$

Die Energie E , W , Q

Die Einheit - sowohl für die mechanische wie die elektrische wie auch die Wärmeenergie W , E - wird in J (Joule) oder Wh (Wattstunden) angegeben.

Sie ist folgendermaßen definiert:

mechanische Energie = Kraft x Weg

$$W = F \cdot s \quad 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$$

elektrische Energie = Stromstärke x Spannung x Zeit

$$W = I \cdot U \cdot t \quad Ws = 1 \text{ J} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$$

Wärmeenergie = spez. Wärmekapazität x Masse x Temperaturdifferenz

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta.$$

Früher wurde die Kilokalorie (kcal) über die Temperaturerhöhung von 1 kg Wasser um 1 K definiert.

$$1 \text{ kcal} = 1 \text{ kcal/kg K} \cdot 1 \text{ kg} \cdot (15,5^\circ\text{C} - 14,5^\circ\text{C}),$$

mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

$$c = 1 \text{ kcal/kg K} = 4,19 \text{ kJ/kg K} = 1,163 \text{ Wh/kg K}.$$

Bei der Wärmeenergie sind noch zusätzliche Definitionen zu beachten. Der Begriff Wärme wird grundsätzlich nur im Zusammenhang mit dem Wärmetransport (Energietransport) verwendet.

Wird dem Boden Wärme zugeführt, so erhöht sich um den Betrag
Der Wärmemenge in Wh seine Enthalpie.

Zusätzlich ist auch noch zu unterscheiden, ob die Wärme unter konstantem Druck (Enthalpie) oder konstantem Volumen (Wärmeinhalt) zugeführt wird. Dies ist allerdings nur bei Gasen, also Luft oder Wasserdampf erforderlich.

Unsere Betrachtungen beziehen sich (außerhalb des Kessels) immer auf konstanten Druck und somit die Enthalpie, auch wenn der Druck unter der Folie um 50 Pa (geringfügig) über der Atmosphäre liegt.

Die Leistung P ist Energie je Zeiteinheit

$$P = W/t$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/1 s}$$

10.2 Physikalische und technische Definitionen beim Wasserdampf

Wasserdampf entsteht bei einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur. Anders ausgedrückt: zu jeder Temperatur gehört ein bestimmter Dampfdruck. (Sättigungsdruck). In einem mit Wasser gefüllten geschlossenen Gefäß entsteht der Sättigungsdruck spontan, wenn die Luft abgesaugt wird. Unter (normalen) Luftdruck-Bedingungen erfolgt die Verdunstung nur langsam und erreicht meist nicht den Sättigungswert.

Die relative Luftfeuchte ist definiert als Verhältnis von erreichtem Dampfdruck zum Sättigungsdruck.

In einem geschlossenen Dampfkessel entsteht Wasserdampf

z.B bei 80°C und 0,474 bar
 100°C und 1,013 bar
 110°C und 1,433 bar
 130°C und 2,701 bar.

In einem Kessel mit 1,013 bar steigt die Temperatur auch bei ständiger Wärmezufuhr nicht an, solange noch Wasser in flüssiger Form vorhanden ist. Der Zustand von Wasser und Wasserdampf wird als Nassdampf bezeichnet. Ist der letzte Wassertropfen verdampft spricht man von trockengesättigtem Dampf oder Sattedampf. Wird weiter Wärme zugeführt, entsteht überhitzter Dampf.

In einem entsprechend konstruierten Dampfkessel kann man den erzeugten Dampf in eine nachgeschaltete Kammer leiten und dort überhitzen. Somit lassen sich kontinuierlich durch Wasserzufuhr trocken gesättigter und überhitzter Dampf erzeugen und bei Einstellung eines bestimmten Druckes auch Dampf einer bestimmten Temperatur. Verlässt der Dampf den Kessel mit 1 bar (1,013 bar) und 130°C so hat er noch eine Reserveenergie von 19 kJ/kg bevor er wieder auskondensiert. Verlässt der Dampf von 1,5 bar und 130°C den Kessel, so nimmt er sofort den Umgebungsdruck (1 bar) an. Durch diesen Drosselvorgang geht keine Enthalpie verloren. Der Dampf hat jedoch eine geringere Dichte und niedrigere Temperatur. Mit dem Hochdruckdampfkessel lässt sich somit bei gleichem Volumeninhalt mehr Niederdruckdampf erzeugen.

Trockengesättigter Dampf von 80°C und 0,474 bar kann andererseits nur über eine Venturidüse in einen Raum von 1 bar unter Beimischung von Umgebungsluft geleitet werden. Bei allen Dämpftechniken, bei denen die Dampfzufuhr von oben in den Boden erfolgt, ist der Luftanteil negativ zu bewerten.

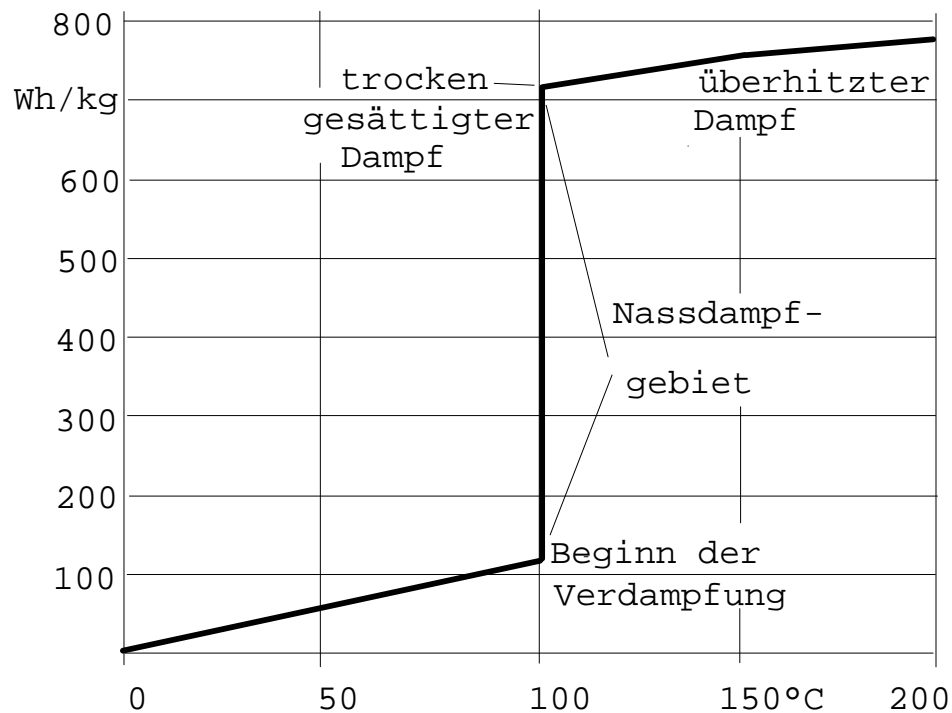


Abb. 10.1: Enthalpie des Wassers und Dampfes zwischen 0 und 200°C.

ϑ °C	Dampfdruck	spez. Volumen		Enthalpie		Verdampfungs- wärme
	p bar	Wasser v' dm ³ /kg	Dampf v'' m ³ /kg	Wasser h' kJ/kg	Dampf h'' kJ/kg	r kJ/kg
0	0,006107	1,0002	206,29	0	2500,6	2500,6
10	0,012270	1,0004	106,42	63,0	2528,4	2465,4
20	0,02337	1,0018	57,84	83,9	2537,6	2453,7
30	0,04242	1,0044	32,93	125,7	2555,7	2430,0
40	0,7375	1,0079	19,55	167,5	2573,7	2406,2
50	0,12335	1,0121	12,045	209,3	2591,5	2382,2
60	0,1992	1,0171	7,678	251,1	2609,0	2357,9
70	0,3116	1,0228	5,045	293,0	2626,3	2333,3
80	0,4736	1,029	3,408	335,0	2643,2	2308,2
90	0,7011	1,036	2,361	377,0	2659,8	2282,8
100	1,0133	1,043	1,673	419,1	2675,8	2256,7
110	1,433	1,052	1,210	461,4	2691,4	2230,0
120	1,985	1,060	0,8917	503,8	2706,6	2202,5
130	2,701	1,070	0,6684	546,4	2720,5	2174,1

Tab10-1: Spezifische Größen von Wasser und Dampf bei unterschiedlichen Temperaturen

Bei Wärmezufuhr ist das Wasser bis 100°C nur in flüssiger Form im Kessel. Bei 100°C beginnt die Verdampfung. Das Wasser-Dampf-Gemisch verharrt trotz ständiger Wärmezufuhr bei 100°C bis das gesamte Wasser restlos verdampft ist. Dies gilt für einen Kesseldruck von 1 atm = 1,013 bar. Im realen Fall ist der Kesseldruck und damit auch die Verdampfungstemperatur etwas höher. Bei weiterer Wärmezufuhr steigt die Temperatur im überhitzten Bereich wieder an. Das Diagramm zeigt deutlich, dass die Energiereserven beim überhitzten Dampf und die Energieverluste zwischen 70 und 100°C relativ gering sind.

10.3 Wasserqualitäten bei Heizungskesseln

Das Kesselwasser muss ggf. durch eine Wasseraufbereitung die erforderliche Qualität erhalten, um den Kessel wasserseitig vor Kesselstein und Sauerstoff- oder Kohlensäurekorrosion zu schützen. Die im Wasser gelösten Erdalkalien bilden die Härte. In den meisten Wässern sind sie nur als Calcium(CaH)- und Magnesiumsalze(MgH). Deren Summe bildet die Gesamthärte. Man unterscheidet temporäre Härte oder Karbonathärte und permanente oder Nichtcarbonathärte. Unter Carbonathärte versteht man den Anteil an Ca- und Mg-Ionen, der an Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3) gebunden ist.

Bei der Enthärtung werden die Härtebildner Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) gegen Natrium ausgetauscht. Die Enthärtung erfolgt im Ionenaustauscher gegen Kochsalz.

1°dH (deutscher Härtegrad) = 10 mg CaO/l Wasser
oder umgerechnet in Milliäquivalent pro Liter

1 mval/l = 1°dH/2,8 oder mit Äquivalentgewicht 28

1 mol/m³ = 2,8°dH Carbonathärte

1 mol/m³ = 5,6°dGesamthärte (Summe der Erdalkalien)

Bei der Umwandlung von $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ und Wärme in $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ entsteht im Wasser gelöste Kohlensäure. Kohlensäure kann durch Trinatriumphosphat Na_3PO_4 und Sauerstoff durch (früher mit Hydrazin N_2H_4) Natriumsulfit Na_2SO_3 gebunden werden.