

Sci Hortic. 15. März 2021; 279: 109896.

PMCID: PMC7885021

doi: 10.1016 / j.scienta.2021.109896: 10.1016 / j.scienta.2021.109896

PMID: [33731973](#)

Kontrollierte Vergleiche zwischen Boden- und Hydroponiksystemen zeigen eine erhöhte Wassernutzungseffizienz und einen höheren Lycopin- und β -Carotingehalt in hydroponisch angebauten Tomaten

[Salvatore Gaetano Verdoliva](#), [Dylan Gwyn-Jones](#), [Andrew Detheridge](#), und [Paul Robson](#)*

Institut für biologische, ökologische und ländliche Wissenschaften (IBERS), Aberystwyth University, Gogerddan, Aberystwyth, Wales, SY23 3EE, Vereinigtes Königreich

Paul Robson: ppr@aber.ac.uk

*Entsprechender Autor. ppr@aber.ac.uk

28. Juni 2020 eingegangen; Überarbeitet am 10. November 2020; Akzeptiert am 27. November 2020.

[Urheberrecht](#) © 2021 Die Autoren

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter der CC BY-NC-ND-Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Highlights

- Der Tomatenertrag und die Qualität wurden im Boden und in zwei hydroponischen Kultursystemen verglichen.
- Umweltfaktoren wurden in drei Wachstumssystemen kontrolliert und gemessen.
- Eine höhere Wassernutzungseffizienz in der Hydrokultur war mit der Transpiration von Pflanzen verbunden.
- Die Tiefwasserkultur erzeugte einen höheren Beta-Carotin- und Lycopin-Gehalt.
- Die Kontrolle von Umweltfaktoren ermöglichte ein besseres Verständnis des potenziellen Nutzens.

Abkürzungen: DI, Tropfbewässerung; DW, Trockengewicht; DWC, Tiefwasserkultur; EC, elektrische Leitfähigkeit; NFT, Nährstoffilmtechnik; PWU, Produktwasserverbrauch; S, Boden; TAA, totale antioxidative Aktivität; TSS, insgesamt lösliche Feststoffe; WUE, Wassernutzungseffizienz; CEA, Landwirtschaft mit kontrollierter Umwelt

Schlüsselwörter: Tiefwasserkultur, Befruchtung, Hydroponik, Lycopin, Tomate, Wassernutzungseffizienz

Abstrakt

Es gibt viele verschiedene Arten von Systemen zum Anbau von Lebensmitteln, die sich durch Ideologie oder die verwendete Technologie auszeichnen. Aufgrund der komplizierten Wechselwirkungen zwischen Genotyp, Physiologie und Umwelt ist es oft schwierig, Ertrag und Qualität in verschiedenen Wachstumssystemen direkt zu vergleichen. Viele veröffentlichte Vergleiche identifizieren und erkennen keine Störfaktoren an. Es ist jedoch dringend erforderlich, kontrollierte Vergleiche durchzuführen, um die effizientesten und effektivsten Lebensmittelproduktionssysteme zu ermitteln, da die Welt mit

zunehmender Bevölkerungszahl vor erheblichen Herausforderungen für die Lebensmittelversorgung steht, anhaltende Umweltzerstörung und die Gefahr eines Klimawandels. Hier haben wir den Boden mit zwei hydroponischen Wachstumssystemen verglichen, der Tropfbewässerung und der Tiefwasserkultur (DWC). Es wird oft behauptet, dass sich solche Systeme in Bezug auf Wassernutzung, Ertrag und Erntequalität unterscheiden. jedoch, Solche Vergleiche werden häufig durch die Bewertung von Anlagen- und Systemparametern in verschiedenen Wachstumsumgebungen oder wenn Faktoren, die zwischen Systemen schwer zu standardisieren sind, wie z. B. der Nährstoffstatus, nicht kontrolliert werden, verwechselt. Wir haben Tomaten (angebaut *Solanum lycopersicum* L.) in den drei Wachstumssystemen in zwei replizierten Experimenten, entweder in einem Polytunnel oder einem Gewächshaus. Wir haben den Wasserverbrauch und den Nährstoffgehalt in allen Systemen kontrolliert und überwacht, da unterschiedliche Düngemittelanwendungen die Nährwerte der Produkte beeinflussen können. Pflanzen in den beiden Hydroponiksystemen trieben weniger Wasser durch und waren mit einem geringeren Wasserverbrauch wassereffizienter als Pflanzen, die im Boden gezüchtet wurden. Der Fruchtertrag war ähnlich und der Gesamtgehalt an löslichen Feststoffen und Zucker unterschied sich nicht signifikant zwischen den drei wachsenden Systemen. Die Lycopin- und β -Carotinspiegel waren in DWC jedoch entweder ähnlich oder signifikant höher als in Wachstumssystemen, die Boden- oder Tropfbewässerung verwendeten. Unsere Ergebnisse identifizieren Hydroponiksysteme als wasserintensiver mit DWC, das auch qualitativ hochwertigere Produkte produzieren kann.

Abkürzungen: DI, Tropfbewässerung; DW, Trockengewicht; DWC, Tiefwasserkultur; EC, elektrische Leitfähigkeit; NFT, Nährstofffilmtechnik; PWU, Produktwasserverbrauch; S, Boden; TAA, totale antioxidative Aktivität; TSS, insgesamt lösliche Feststoffe; WUE, Wassernutzungseffizienz; CEA, Landwirtschaft mit kontrollierter Umwelt

Schlüsselwörter: Tiefwasserkultur, Befruchtung, Hydroponik, Lycopin, Tomate, Wassernutzungseffizienz

1. Einführung

Die Lebensmittelproduktion steht vor vielen globalen Herausforderungen wie der Anpassung an den Klimawandel und den daraus resultierenden Extremen des Wetters, der zunehmenden und zunehmend urbanisierten menschlichen Bevölkerung, Herausforderungen für die Versorgung mit Makronährstoffen wie Phosphor und die Notwendigkeit, die Auswirkungen von Agrochemikalien auf die Umwelt zu verringern. Diese Herausforderungen treten zu einem Zeitpunkt auf, an dem sich die Ertragsverbesserungen pro Flächeneinheit für einige Kulturen und die großflächige Verschlechterung des für die Lebensmittelproduktion genutzten Landes, beispielsweise von, möglicherweise verlangsamten Bewässerung und die Zunahme von Salzland ([Brekke et al., 2011](#)). Es gibt viele mögliche Lösungen für bestimmte Herausforderungen, eine besteht darin, mehr Lebensmittel in kontrollierten Umgebungen zu produzieren ([Jensen, 1999](#)). Die Landwirtschaft in der kontrollierten Umwelt (CEA) kann als Erweiterung der Produktion und des Gartenbaus von gedeckten Kulturpflanzen angesehen werden, umfasst jedoch die Hydrokultur und die Anwendung neuartiger Technologien wie Leuchtdioden (LEDs) ([Darko et al., 2014](#)), Robotik und Bildgebung sowie einige spekulative High-Tech-Ansätze, einschließlich intensiver städtischer vertikaler Landwirtschaft ([Despommier, 2013](#); [Touliatos et al., 2016](#)). Solche Ansätze erfordern nicht immer Hydrokultur, aber der Anbau von Pflanzen in Abwesenheit von Boden hat viele potenzielle Vorteile. Ein Beispiel ist, dass die geernteten Produkte (Blätter oder Früchte) weniger Bodenpartikel enthalten ([Gonnella et al., 2004](#)), was zu weniger durch den Boden übertragenen Krankheiten und weniger Waschbehandlungen führt, was zu einer Einsparung von Wasser und Energie führt. Darüber hinaus können geschlossene Hydroponiksysteme die Verschmutzung der Wasserquellen erheblich verringern und gleichzeitig zu einer Verringerung des Wasser- und Düngemittelverbrauchs beitragen ([Carmassi et al., 2005](#); [Bar-Yosef, 2008](#)).

Im Allgemeinen ermöglichen hydroponische Systeme Flexibilität und Intensivierung und bieten einen hohen Ernteertrag und qualitativ hochwertige Produkte, selbst in Gebieten mit widrigen Wachstumsbedingungen ([Grillas et al., 2001](#)). In hydroponischen Systemen werden Bodenvorbereitung und Unkrautbekämpfung vermieden, und es kann Land verwendet werden, das für die konventionelle Bodenbearbeitung nicht geeignet ist. Der Gartenbau mit herkömmlichen Bodensystemen steht vor neuen Herausforderungen, beispielsweise wird die Bodensterilisation schwierig ([Matthiessen und Kirkegaard, 2006](#)) aufgrund internationaler Bemühungen, den Einsatz ozonschädigender Substanzen wie Methylbromid ([Marcotte, 1998](#)). Diese Verbindung erhöht nicht nur den Ammoniumspiegel und verändert gleichzeitig die mikrobielle Gemeinschaft des Bodens ([Yamamoto et al., 2008](#)), ist aber auch schädlich für den Menschen und in mehreren Ländern verboten ([Das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen, 1987](#)). Die Anwendung der Hydrokultur unter Verwendung künstlicher Substrate könnte die Notwendigkeit einer chemischen Schädlingsbekämpfung minimieren ([Polycarpou et al., 2005](#)). Die Hydroponik ist auch ideal für die ganzheitliche Kontrolle der Pflanzenentwicklung, Qualität und Einheitlichkeit ([Ho, 2004](#); [Gruda, 2009](#)) und es wurde berichtet, dass der Ertrag bis zu 20-mal höher ist (pro Fläche) als bei gleichwertigen Freilandssystemen ([Jensen, 1999](#)).

Die Pflanzenqualität hat in letzter Zeit zunehmend Interesse geweckt, und für einige Verbraucher umfasst die Auswahl der Lebensmittel die Berücksichtigung von Gesundheitswerten sowie des Geschmacks ([Ho, 2004](#)). Einige Pflanzenverbindungen wurden mit potenziellen gesundheitlichen Vorteilen in Verbindung gebracht, beispielsweise zeigte Anthocyan eine krebserzeugende Aktivität in Zellkulturmodellen und in Tumorsystemen für Tiermodelle ([Wang und Stoner, 2008](#)). Es wurde vorgeschlagen, dass der Gehalt an anderen Pigmenten wichtig ist, was zu den allgemeinen Ratschlägen für eine abwechslungsreichere und farbenfrohere Ernährung führt ([WHO, 2005](#)). Insbesondere können einige Pigmente Lipoproteine und Gefäßzellen vor Oxidation schützen, was die allgemein akzeptierte Theorie für die Entstehung von Atherosklerose ist ([Willcox et al., 2003](#)).

Die Tomate ist in vielen verschiedenen Ländern ein Grundnahrungsmittel und gemessen an der Produktionsmenge die zweitwichtigste Gemüseernte neben Kartoffeln (FAOSTAT, 2018). Tatsächlich beträgt die derzeitige Weltproduktion etwa 100 Millionen Tonnen frisches Obst aus 3,7 Millionen ha (FAOSTAT, 2001), wobei der jährliche Wert auf rund \$ 65,4 Milliarden geschätzt wird (FAOSTAT 2016). Tomaten enthalten einen hohen Gehalt an wichtigen Pigmenten wie Lycopin, und die Aufnahme von Tomaten in die Ernährung kann mit einem geringeren Krebsrisiko verbunden sein ([Giovannucci, 1999](#)). Tomaten werden routinemäßig sowohl in Boden- als auch in Hydroponiksystemen angebaut, und die Produkte wurden aus diesen verschiedenen Produktionssystemen verglichen. Zum Beispiel, [Kunsch et al. \(1994\)](#) fanden heraus, dass Tomaten, die hydroponisch angebaut wurden, ein höheres Zucker / Säure-Verhältnis hatten als Tomaten, die im Boden angebaut wurden, und Tomaten, die durch Nutrient Film Technique (NFT) hydroponisch gezüchtet wurden, fester und in Vitamin C höher waren ([Benoit und Ceustermans, 1987](#)). Mit NFT angebaute Tomaten wiesen im Vergleich zu in Torfbeuteln angebauten Tomaten einen höheren Gehalt an titrierbaren Säuren und Kalium auf ([Cronin und Walsh, 1983](#)). In einigen Studien wurde berichtet, dass im Boden angebaute Tomaten verbesserte Qualitätsmerkmale aufweisen, beispielsweise, [Granges \(1980\)](#) fand heraus, dass bodengewachsene Tomaten eine höhere Trockenmasse hatten. Der Ascorbinsäuregehalt wurde durch den Anbau von Tomaten auf organischen Substraten im Vergleich zu Torfperlit erhöht ([Premuzic et al., 1998](#)) und während der Lagerung nach der Ernte synthetisierten Tomaten aus Hydroponik Lycopin mit einer geringeren Rate als im Boden angebaute Tomaten ([Ajlouni et al., 2001](#)).

Der Vergleich von Quantität, Qualität oder Effizienz der Produktion zwischen Kultursystemen wird durch eine unangemessene Kontrolle von Faktoren erschwert, die zwischen Systemen unterschiedlich sind. Zum Beispiel wird die Qualität von Tomaten von der Umgebung beeinflusst, in der die Ernte angebaut wird. Dazu gehören der Lichtgehalt und der Nährstoffgehalt im Futter. Hohe Kaliumanteile in der Nährlösung können die Produktion von Lycopin und insgesamt löslichen Feststoffen (TSS) erhöhen ([Fanasca et al., 2006](#)) und ein höheres Vorhandensein von Schwefel kann die Produktion von Lycopin erhöhen ([Zelená et al., 2009](#)) während niedrig N zu einer positiven Wirkung auf Vitamin C und einige Phenole

führt ([Erba et al., 2013](#)). Daher könnten eine Reihe von Vergleichsstudien durch die komplexen Umweltwechselwirkungen, die sich auf die Qualität der Tomatenkultur auswirken, verwechselt worden sein, und einige Studien haben lediglich Vergleiche vermarkteter Produkte zwischen verschiedenen Produktionssystemen durchgeführt ([Hernández Suárez et al., 2007, 2008](#)). Entscheidungen über Ansätze in der Landwirtschaft sollten kontrollierte Vergleiche zwischen Produktionssystemen umfassen, bei denen Faktoren, die sich auf die Erntemenge oder -qualität auswirken können, zwischen den Anbausystemen so weit wie möglich überwacht und standardisiert werden. Ein Beispiel für das Potenzial von Störfaktoren, um genaue Schlussfolgerungen zu verdecken, ist das jüngste Interesse an den relativen Vorteilen organischer und konventioneller Wachstumssysteme. Einige der Unterschiede, die beispielsweise in TSS gemeldet wurden und kürzlich auf wachsende Systeme zurückzuführen sind, können tatsächlich auf Sorten, Unterschiede in den agronomischen Praktiken und Unterschiede in den Erntephasen zurückgeführt werden ([Pieper und Barrett, 2008](#)).

Ziel unserer Experimente war es, einen kontrollierten Vergleich zwischen drei verschiedenen Wachstumssystemen zu ermöglichen, um die Auswirkungen von Störfaktoren zu verringern. Wir haben die Produktion von Tomaten verglichen, die am selben Ort entweder im Boden, in der Tiefwasserkultur oder in der Tropfbewässerung wachsen. Ähnliche Mengen an Schlüsselnährstoffen N, P, K, Ca, Mg und S wurden in allen drei Anbausystemen geliefert und wir untersuchten die Aufnahme von Nährstoffen durch die Ernte- und Wassernutzungseffizienz zwischen Systemen. Wir haben Experimente in zwei verschiedenen Wachstumsumgebungen wiederholt, einem Polytonnel und einem Gewächshaus. Dies stellte sicher, dass unsere Schlussfolgerungen in den beliebtesten Wachstumsumgebungen für Tomaten allgemein gehalten werden konnten. Während der Experimente haben wir den Gesamtertrag und die Wachstumsraten verglichen und Umgebungsvariablen einschließlich Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (RH) aufgezeichnet. Die Ernährungsqualität der geernteten Tomaten wurde hinsichtlich des Lycopinspiegels, der gesamten antioxidativen Aktivität (TAA) und TSS in geernteten Früchten verglichen.

2. Materialien und Methoden

Die Studie fand am Institut für Bio-, Umwelt- und Ländliche Wissenschaften (IBERS), Aberystwyth University Gogerddan Campus (Wales, statt, Vereinigtes Königreich) im Spätsommer 2018 und Frühjahr 2019 unter Verwendung von Samen von runden Tomaten-Lebensläufen. Forticia F1 (Rijk Zwaan Samen, Holland). Samen wurden in nährstoffarmen Bodenstopfen (S) (Bulrush Horticulture Ltd) in 2 cm gesät³ Würfel Rockwool (Grodan Rockwool B.V., Holland) mit Tropfbewässerung (DI) und in 2 cm³ Würfel inert wachsender Schwamm (Changzhou Dengyue Sponge Co., Ltd.) für Tiefwasserkultur (DWC). Es wurde jedoch festgestellt, dass der inerte Schwamm im ersten Experiment im Polytonnel eine schlechte Leistung erbrachte, und anschließend wurde in beiden ruhenlosen Systemen eine Steinwolle verwendet. Pflanzen wurden in beiden Umgebungen bis zum Sämling gezüchtet und mit der im Rest des Experiments verwendeten Standardnährstofflösung bewässert. Nach 3 Wochen wurden die etablierten Sämlinge in die größeren Anbaueinheiten überführt, entweder in ein größeres Bodenvolumen oder in den Polystyrolschwimmer oder die Steinwollplatte eingeführt, wie nachstehend für die beiden Hydroponiksysteme beschrieben. Die Sämlinge wurden am 06.08.2008 im Polytonnel-Experiment und am 04.03.2019 im Gewächshaus-Experiment übertragen, um Vergleiche von kontrastierenden Temperaturprofilen in beiden Umgebungen zu ermöglichen. Das experimentelle Design in jeder Umgebung wurde mit 7 Wiederholungen pro Behandlung vollständig randomisiert. Die Pflanzen wurden bis zum ersten Fachwerk gezüchtet und das vegetative Wachstum in der 8. Woche gestoppt und nur 3 Blätter wurden nach dem ersten Fachwerk erhalten ([Jiang et al., 2017](#)). Einmal pro Woche wurden Seitentriebe entfernt. Die Früchte wurden gemäß der in diskutierten Geschäftspraxis auf vier pro Fachwerk (Abb. S1) beschnitten ([Wu und Kubota \(2008\)](#)) und Früchte wurden am selben Tag aus allen drei Behandlungen geerntet. Während der gesamten Wachstumsphase wurden Temperatur (Minimum und Maximum) und relative Luftfeuchtigkeit unter Verwendung von Datenloggern im Anbaubereich aufgezeichnet (Tinytag Ultra 2, Ge-

mini Data Loggers, UK). Am Ende der Experimente wurde die Anzahl der geernteten Früchte aufgezeichnet; Im Polytunnel-Experiment führten niedrige Nachttemperaturen während des Reifungsstadiums zum Verlust einiger Früchte, Die Verluste betrug jedoch nie mehr als eine Frucht pro Fachwerk.

Bodenbehandlung (S).

Im Polytunnel-Experiment war die wachsende Einheit ein 35-l-Topf und im Gewächshaus-Experiment war die wachsende Einheit ein 14-l-Topf. Die verwendeten Bodenmedien waren Bulrush-Kompost (Bulrush Horticulture Ltd, Magherafelt, UK), der einen vom Hersteller gemessenen vernachlässigbaren Nährstoffgehalt aufweist (Tabelle S1). Während des Experiments wurde jede Pflanze von einem Tropfer bewässert, der Nährstofflösung lieferte. Die Bodenbehandlung wurde mit der gleichen Nährlösung wie die anderen Behandlungen geliefert.

Tropfbewässerung (DI) Behandlung.

Sämlinge wurden in 2 cm hergestellt³ Rockwool (Grodan Rockwool B.V., Holland), die in größere Rockwool-Platten eingesetzt wurden. Rockwool ist inert und es fehlen Nährstoffe, die nur mechanische Unterstützung bieten. Die Rockwool-Platten wurden auf einen abgerundeten Behälter gelegt, um den Überfluss der Nährlösung nach jedem Bewässerungsereignis zu sammeln. Die überschüssige Lösung wurde zusammen mit früheren Bewässerungen gesammelt, um die Pflanzen weiter zu bewässern. Dadurch wurde ein vollständiger geschlossener Regelkreis erstellt, aus dem der gesamte Nährstoff und der Wasserverbrauch bestimmt werden konnten.

Behandlung der Tiefwasserkultur (DWC).

Sämlinge wurden im Polytunnel in 2 cm gesät³ wachsende Schwammwürfel (Changzhou Dengyue Sponge Co., Ltd.) und in eine Polystyrolscheibe gegeben, die in einem 35-l-Topf auf der flüssigen Oberfläche schwimmt. Im Gewächshausexperiment wurde der gleiche Steinwollwürfel verwendet und die Sämlinge wurden in eine Polystyrolscheibe gegeben, die in einem 14-l-Topf auf der flüssigen Oberfläche schwebte. In beiden Fällen war die Flüssigkeit die Nährlösung der gleichen Zusammensetzung wie andere Behandlungen. Der Polystyrolschwimmer bedeckte in beiden Fällen den größten Teil der Flüssigkeitsoberfläche. Der Topf war innen mit einer Kunststoffolie bedeckt, um ein Auslaufen zu verhindern, und unten wurde ein Luftstein platziert, um die Lösung mit Sauerstoff zu versorgen und Wurzelanoxie zu vermeiden.

Die gelieferten Nährstoffe waren bei allen drei Behandlungen und bei beiden Experimenten gleich. Die Befruchtungsformel basierte auf [Kaya und Higgs, 2002](#) (Tabelle S2) und wurde angepasst, um Nährstoffe im Kompost zu berücksichtigen (Tabelle S1). Die Nährlösung wurde regelmäßig überprüft und der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit (EC) wurden aufgezeichnet und eingestellt. Der pH-Wert wurde zwischen 5,5 und 6,0 gehalten. Die EG wurde während der ersten 4 Wochen niedrig gehalten, um die Akklimatisierung zu unterstützen, und anschließend wurde die EG auf 2,4 mS cm erhöht, um die gewünschten Nährstoffwerte zu erreichen⁻¹. Die Nährstoffgehalte wurden unter Verwendung von Ionenaustauschchromatographie auf einem Metrohm IC 700-System gemessen, das mit einer Anionensäule von Metrosep A sup 5 und einer Kationensäule von Metrosep C4 250 / C4 (Metrohm AG, Schweiz). Diese Proben wurden wöchentlich für DI und DWC im Polytunnel-Experiment (2018) und zweiwöchentlich im Gewächshaus-Experiment (2019) gesammelt.

Pflanzenparameter wurden wie in beschrieben geschätzt [Hussain Shah et al., 2011](#) und kurz wie folgt. Die Pflanzenhöhe wurde wöchentlich von der Medienoberfläche bis zum obersten Blattknoten gemessen, bis das vegetative Wachstum aufhörte. Biomasse wurde als Frischgewicht der Luftbiomasse einschließlich aller beschnittenen Teile gemessen. Das Trockengewicht wurde nach Trocknen der Luftbiomasse auf 80 ° C geschätzt, bis ein konstantes Gewicht erreicht war. Der Ertrag (frisches Gewicht der Früchte pro Pflanze in Gramm) wurde als Gewicht der Tomatenfrüchte ohne die Rebe gemessen, die als

Teil der Luftbiomasse angesehen wurde. Obst wurde nur geerntet, wenn mindestens drei von vier Früchten pro Fachwerk das Stadium " Rot " der USA erreichten. Tomatenqualitäten und -standards ([Standards der Vereinigten Staaten für frische Tomaten, 1991](#)) ([Abb. 1](#)).

Der Wasserverbrauch wurde wöchentlich in beiden ruhenlosen Systemen als das Wasser erfasst, das erforderlich ist, um jede unabhängige Wachstumseinheit auf ein voreingestelltes Maximalniveau zu füllen. Das im Bodensystem verbrauchte Wasser wurde aus der Durchflussrate der Tropfer geschätzt ($L h^{-1}$) und Anzahl der Bewässerungsereignisse pro Tag. In beiden Experimenten wurden drei wachsende Einheiten mit Boden ohne Pflanzen und drei hydroponische Einheiten ohne Pflanzen platziert. Diese Wachstumseinheiten wurden genauso behandelt wie diejenigen, die Pflanzen enthielten, und zur Abschätzung des Verdunstungsverlusts verwendet. Durch Subtrahieren des gemittelten Verdunstungsverlusts vom im Boden verwendeten Gesamtwasser und den Hydroponiksystemen beim Anbau jeder Pflanze, Es wurde das gesamte transpirierte Wasser geschätzt, das zur Berechnung der Wassernutzungseffizienz (WUE) verwendet wurde. Der WUE wurde als Frischgewicht der pro Liter transpiriertem Wasser produzierten Früchte berechnet. Der Produktwasserverbrauch (PWU) wurde als das Gesamtvolumen an verdampftem Wasser geschätzt, das zur Herstellung eines Kilogramms frischer Produkte verwendet wurde ([Nederhoff und Stanghellini, 2010](#)).

Die gesamten löslichen Feststoffe (TSS) wurden unter Verwendung eines Refraktometers (HI-96.801 Hanna Instruments Ltd.) aus dem Brechungsindex bestimmt. USA) nach der Methodik von [Patanè et al. \(2017\)](#). Alle vier Früchte jeder Pflanze wurden homogenisiert, um ein repräsentatives Probenpüree herzustellen. Ein Tropfen des Tomatenpürees wurde auf das Prisma des Refraktometers gelegt und der Messwert in ° Brix ([AOAC, 1990](#)).

Zur Abschätzung der gesamten antioxidativen Aktivität (TAA) wurde ein modifizierter kolorimetrischer Assay unter Verwendung von DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) verwendet ([Barbagallo et al., 2013](#)). Jede Analyse umfasste 3 technische Replikate. Zu 2 ml frisch zubereiteter DPPH-Stammlösung (25 mg in 100 ml Methanol) wurden 100 µl Tomatenextrakt (1 g ml) gegeben $^{-1}$ in Methanol) oder 100 µl Methanol (Kontrolle) und gründlich gemischt. Nach 30-minütiger Inkubation bei Raumtemperatur im Dunkeln wurde die Absorption bei 517 nm unter Verwendung eines UV - vis-Spektrophotometers im Vergleich zum Kontrollassay ohne Tomatenextrakt gemessen. Wenn eine DPPH-Lösung mit einer Substanz gemischt wird, die ein Wasserstoffatom spenden kann, entsteht die reduzierte Form mit dem Verlust der violetten Farbe ([Molyneux, 2004](#)), daher wurde die gesamte antioxidative Aktivität aus der Absorption unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$T. . EIN . EIN . (\%) = (C.ontrol einbsorbeinnce - - S.einmple einbsorbeinnce) / C.ontrol einbsorbeinnce$$

Zur Schätzung des Lycopin- und β -Carotingehalts der Frucht a 4:6 Gemisch aus Aceton: Hexan (10 ml) wurde einem Gramm Tomatenprobe in einem 15-ml-Testrohr zugesetzt und die Mischung homogenisiert. Die optische Dichte des Polarextraktsüberstands wurde bei 663, 645, 505 und 453 nm in einer Glaskuvette (1400 µL) bestimmt. Die Werte von Lycopin und β -Carotin ($mg 100 ml^{-1}$) wurden unter Verwendung der Gleichungen 2 bzw. 3 (Nagata & Yamashita, 1992) berechnet:

$$L.ycopene (mg 100mL. ^{-1}) = - - 0,0458 * EIN663 + 0,204 * EIN645 + 0,372 * EIN505 - 0,0806 * EIN453$$

$$\beta ceinrotene (mg 100mL. ^{-1}) = 0,216 * EIN663 - - 1.22 * EIN645 - - 0,304 * EIN505 - - 0,452 * EIN453$$

Wobei A453, A505, A645 und A663 die Absorptionswerte bei 453, 505, 645 bzw. 663 nm sind.

Alle Ergebnisse wurden mit R Version 3.0.3 analysiert ([Das R Development Core Team, 2010](#)). Die Varianzgleichheit wurde mit dem Levene-Test getestet und eine Einweg-ANOVA wurde verwendet, um signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen zu testen.

3. Ergebnisse

Die Polytunnel- und Gewächshausumgebungen in Kombination mit der späteren Aussaatzeit im Polytunnel boten ganz unterschiedliche Umgebungen zum Testen der drei Wachstumssysteme (Abbildung S2). Im Polytunnel-Experiment waren die Mindestnachttemperaturen insbesondere im Oktober und im November niedrig ([Tabelle 1](#)). Im Oktober betrug der monatliche Mindestdurchschnitt $6,5\text{ °C} \pm 0,8$, aber für mehrere Tage in der letzten Woche wurden Mindesttemperaturwerte von unter 0 °C aufgezeichnet (Abb. S2B). Obwohl die täglichen Durchschnittswerte im ersten Wachstumsmonat (vegetatives Stadium) in beiden Experimenten ziemlich ähnlich waren ($21,1\text{ °C} \pm 0,5$ im Jahr 2018 und $21,9\text{ °C} \pm 0,2$ im Jahr 2019), Die Tagestemperaturen unterschieden sich in der ersten Stufe des Fruchtsets um etwa 5 °C ($18,0\text{ °C} \pm 0,5$ im Jahr 2018 und $23,0\text{ °C} \pm 0,3$ im Jahr 2019). Diese Unterschiede betrugen im 3. Monat mehr als 8 °C ($15,0\text{ °C} \pm 0,6$ im Jahr 2018 und $23,7\text{ °C} \pm 0,2$ im Jahr 2019), und mehr als 11 °C während des letzten Teils der Reifephase im 4. Monat ($12,2\text{ °C} \pm 0,6$ im Jahr 2018 und $23,6\text{ °C} \pm 0,3$ im Jahr 2019).

Im Polytunnel-Experiment wurden keine signifikanten Unterschiede im Nährstoffgehalt der Fruchtlösung festgestellt; jedoch im Gewächshaus-Experiment und insbesondere während der 4. Wachstumswoche, Es gab Unterschiede in den Phosphatspiegeln ($F_{2,18} = 12,01$, $p = 0,00467$). Während des gesamten Experiments im Gewächshaus wurden höhere Ammoniumspiegel in Lösung aus dem DI-System (F) gemessen ($F_{2,18} = 12,91$, $p = 0,0037$) ([Abb.2](#)). Diese Ammoniumspiegel waren jedoch sehr niedrig (< 1 ppm) und dürften von vernachlässigbarer Bedeutung sein.

Das Anbausystem hatte einen signifikanten Einfluss auf das gesamte im Polytunnel verbrauchte Wasser ($F_{2,18} = 46,79$, $p = 7,39 \times 10^{-8}$) und die Gewächshausexperimente ($F_{2,18} = 65,41$, $p = 5,54 \times 10^{-9}$) und die Rangfolge war in beiden Experimenten ähnlich. Im Polytunnel, Im Boden gezüchtete Pflanzen verbrauchten die höchste Menge an Wasser ($87,44 \pm 3,97\text{ L}$) und DWC die niedrigste ($41,70 \pm 8,14\text{ L}$), während Pflanzen im DI-System Zwischenmengen von verbrauchten Wasser ($70,34 \pm 12,55\text{ L}$). Ebenso im Gewächshaus, Im Boden gezüchtete Pflanzen verbrauchten die höchste Menge an Wasser ($102,89 \pm 4,14\text{ L}$) und DWC die niedrigste ($48,07 \pm 8,3\text{ L}$), und wieder waren Pflanzen, die im DI-System wuchsen, mittelschwer ihr Wasserverbrauch ($92,53 \pm 13,64\text{ L}$). Beim Vergleich der beiden Versuchseinstellungen Polytunnel und Gewächshaus verbrauchten Pflanzen im DWC-System eine ähnliche Menge Wasser ($F_{1,12} = 2,09$, $p = 0,173$), obwohl es sehr unterschiedliche klimatische Bedingungen gab, insbesondere im letzten Teil des Wachstumszyklus (Abbildung S2, [Tabelle 1](#)).

Im Polytunnelexperiment unterschied sich WUE nicht signifikant zwischen den drei Wachstumssystemen ($F_{2,18} = 2,007$, $p = 0,163$), aber die Rangfolge in WUE war $DWC > DI > S$; jedoch, Im Gewächshausexperiment gab es einen signifikanten Effekt des Kultivierungssystems auf WUE ($F_{2,18} = 10,61$, $p = 0,0009$) ([Tabelle 2](#)). Der Trend bei WUE im Gewächshaus war der gleiche wie beim Polytunnel, Pflanzen, die mit DWC ($0,0129 \pm 0,005\text{ kg L}^{-1}$) und DI ($0,0099 \pm 0,0039\text{ kg L}^{-1}$) waren signifikant wassereffizienter als die im Boden angebauten ($0,0044 \pm 0,0008\text{ kg L}^{-1}$).

Im Polytunnel-Experiment war der Produktwasserverbrauch (PWU) im DI signifikant niedriger als in S-Anbausystemen ($F_{2,18} = 4,831$, $p = 0,0209$), aber in DWC unterschied sich die PWU nicht signifikant von beiden Systemen. Im Gewächshausexperiment gab es auch einen signifikanten Effekt des Kultivierungssystems auf die PWU ($F_{2,18} = 41,36$, $p = 1,86 \times 10^{-7}$) und jedes System war signifikant unterschiedlich, wobei der Trend der abnehmenden PWU $DWC < DI < S$ ([Tabelle 2](#)), was bedeutet, dass die Bodenbearbeitung in beiden Experimenten mehr Wasser benötigte, um die gleiche Menge an Früchten zu produzieren.

Das vegetative Wachstum in den beiden Experimenten wurde zu unterschiedlichen Zeiten aufgrund des Stammwachstums gestoppt, da die Pflanzen ihre Reife erreichten und das Fachwerk mit unterschiedlichen Raten entwickelten ([Abb.3](#)). Obwohl die unterschiedlichen Blütezeiten die Länge des vegetativen Stadiums beeinflussten, unterschieden sich die endgültigen Höhen weder beim Vergleich der beiden Experimente noch der drei Wachstumssysteme ([Abb. 3](#)), ausgenommen Pflanzen, die im Polytonnel-Experiment im DWC wachsen, weil die Sämlinge in diesem System relativ schlecht etabliert sind, wie zuvor beschrieben.

Das gesamte Frischgewicht und das Trockengewicht der vegetativen Biomasse wurden durch das Kultivierungssystem im Gewächshausexperiment (F) nicht wesentlich beeinflusst ($F_{2,18} = 0,66$, $p = 0,53$; $F_{2,18} = 1,946$, $p = 0,172$ F W bzw. DW). Im Polytonnel-Experiment wurde, obwohl sich Pflanzen, die im DWC-System wachsen, langsam etablierten, in allen drei Anbausystemen ein ähnliches Frischgewicht erzeugt ($F_{2,18} = 1,458$, $p = 0,259$). Das Trockengewicht (DW) war jedoch signifikant unterschiedlich ($F_{2,18} = 4,133$, $p = 0,033$) ([Tabelle 3](#)), und im Boden angebaute Tomaten produzierten signifikant mehr DW-Biomasse ($57,6 \pm 12,5$) als in DWC angebaute Tomaten ($41,7 \pm 9,9$), und DW-Werte aus mit DI angebauten Tomaten lagen zwischen ($49,8 \pm 7,9$) und nicht wesentlich anders als die beiden anderen Wachstumssysteme. Die Varianz der Biomassewerte, insbesondere der FW, aller drei Anbausysteme war im Polytonnel-Experiment erheblich höher als im Gewächshaus-Experiment ([Tabelle 3](#)).

Lycopingehalt, Der TSS- und TAA-Gehalt wurde im Polytonnel-Experiment signifikant vom Kultivierungssystem beeinflusst, diese Unterschiede wurden jedoch größtenteils auf niedrige Werte abgeleitet, die mit dem schlechten anfänglichen Wachstum des DWC-Systems aufgrund von verbunden waren Verwendung von Wachstumsschwamm. Die Zusammensetzung der Früchte von Pflanzen, die in DI und S gezüchtet wurden, war ähnlich. Im Gewächshaus-Experiment hatte das Kultivierungssystem keinen signifikanten Einfluss auf TSS und TAA, obwohl die Werte bei im Boden kultivierten Tomaten immer am niedrigsten waren und in den beiden Hydroponiksystemen ähnlicher waren. Das Wachstumssystem hatte einen signifikanten Einfluss auf den Lycopingehalt ($F_{2,18} = 32,59$, $p = 1,04 \times 10^{-6}$) Im Gewächshausexperiment waren die Früchte von im Boden angebauten Tomaten im Lycopingehalt signifikant niedriger als die in beiden Hydroponiksystemen angebauten Früchte ([Tabelle 4](#)). Ein zusätzlicher Qualitätsparameter wurde im Gewächshausexperiment bewertet und es gab einen signifikanten Einfluss des Wachstumssystems auf den β -Carotingehalt ($F_{2,18} = 10,8$, $p = 8,29 \times 10^{-4}$) und in DWC gezüchtete Tomaten hatten signifikant höhere Mengen an β -Carotin und die niedrigsten Werte wurden von im Boden gezüchteten Pflanzen produziert.

4. Diskussion

Die Vorteile von Hydrokultursystemen wurden oft angegeben, aber selten werden Kultivierungssysteme direkt verglichen, während versucht wird, Umweltvariablen, die Vergleiche verwirren können, so weit wie möglich zu kontrollieren, insbesondere beim Vergleich der Pflanzenqualität. Unterschiedliche Wachstumsumgebungen können Variablen mehr oder weniger signifikant beeinflussen, beispielsweise wirken sich warme und kühle Umgebungen auf das Dampfdruckdefizit und damit auf die Verdunstungsspannung aus ([Lu et al., 2015](#)) und kann Unterschiede im Wasserverbrauch verringern oder übertreiben ([Leonardi et al., 2000](#)). Daher ist es nützlich, verschiedene Umgebungen zu vergleichen, um allgemeinere Schlussfolgerungen zu ziehen. Andere Umweltparameter können Ernährungsvergleiche beeinflussen. Hohe elektrische Leitfähigkeitsniveaus (EC) können das TSS in den Tomatenfrüchten erhöhen ([Rodríguez et al., 2019](#)), und Nährstoffe können die gesamte Antioxidationskapazität beeinflussen ([Fanasca et al., 2006](#)). Um diese Einschränkungen und potenziellen Stör- oder Verschleierungsfaktoren zu überwinden, haben wir die drei Wachstumssysteme sowohl in einem Polytonnel als auch in einem Gewächshaus getestet, zwei verschiedene Wachstumsumgebungen, die üblicherweise für den Tomatenanbau verwendet werden.

Der Schwamm, der 2018 im Polytunnel-Experiment als Stützmedium im DWC-System verwendet wurde, führte zu einer relativ schlechten Etablierung der Sämlinge, obwohl einst etablierte Pflanzen in allen drei Bereichen ähnliche Wachstumsraten zeigten Systeme ([Abb.3](#)) war die Anreicherung von Biomasse nicht signifikant unterschiedlich und die Obstproduktion wurde in allen drei Wachstumssystemen abgeschlossen. Die beiden Experimente setzten Tomaten ganz unterschiedlichen Durchschnittstemperaturen aus, $8,7^{\circ}\text{C} \pm 0,4$ im Polytunnel und $18,9 \pm 1,0$ im Gewächshaus ([Abb. S2](#)). Hohe und niedrige Temperaturen sind abiotische Belastungen, die Gartenbaukulturen schädigen können, und Tomaten sind eine Ernte in der warmen Jahreszeit. Lufttemperaturen unter 10°C verzögern die Keimung der Samen und hemmen die vegetative Entwicklung, Reduzieren Sie den Fruchtsatz und beeinträchtigen Sie die Fruchtreife ([Haghighi et al., 2014](#)). Daher können wir erwarten, dass einige Ergebnisse des Polytunnel-Experiments im Jahr 2018 durch niedrige Temperaturen beeinflusst werden. Beispielsweise war der Wasserverbrauch im Polytunnel im Allgemeinen geringer, möglicherweise aufgrund einer höheren Luftfeuchtigkeit in der kühleren Luft und damit eines niedrigeren Dampfdruckgradienten. Die Varianz in den Daten war höher und die Lycopinspiegel niedriger ([Tabelle 4](#)) und anders als einige veröffentlichte Werte ([Barbagallo et al., 2013](#)) im kühleren Polytunnel angebaute Tomaten, die möglicherweise die langsamere und weniger vollständige Reifung der Früchte widerspiegeln. Licht und Temperatur haben keinen signifikanten Einfluss auf den endgültigen Zuckergehalt von Tomaten ([Gautier et al., 2008](#)) wurde dies in ähnlichen TSS-Werten reflektiert ([Tabelle 4](#)) trotz der Umweltunterschiede zwischen den beiden Experimenten und der Ähnlichkeit der TSS-Werte mit denen, die in anderen Studien veröffentlicht wurden ([Nasrin et al., 2008](#)).

Trotz der kontrastierenden Umgebungen gab es mehrere Konsistenzen zwischen Experimenten, wobei der Hauptbestandteil der Unterschied in der Wassernutzung zwischen Kultivierungssystemen war. Tomaten aus dem Boden verbrauchten mehr Wasser als Hydroponiksystem, und DWC verwendete weniger als DI ([Tabelle 2](#)). DWC war das einzige wachsende System, das in beiden Experimenten trotz der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen eine ähnliche Menge Wasser verwendete, Dies deutet darauf hin, dass der Wasserverbrauch in diesem wachsenden System weniger anfällig für Klimaschwankungen ist. Der Produktwasserverbrauch (PWU) war in beiden Experimenten für Bodenpflanzen immer höher, was bedeutete, dass mehr Wasser benötigt wurde, um den gleichen Ertrag zu erzielen. Obwohl wir erwartet hatten, dass das Design der beiden Hydroponiksysteme die Verdunstung begrenzen würde, war der Unterschied zwischen WUE (basierend auf transpiriertem Wasser) und PWU (basierend auf dem Gesamtwasserverbrauch) konsistent und der Wassernutzung Effizienz war nicht nur auf Unterschiede in der Verdunstung zurückzuführen. Die signifikante Verringerung des transpirierten Wassers, insbesondere bei DWC, kann durch die teilweise Induktion von Reaktionen verursacht werden, die in überfluteten Pflanzen mit stomatalem Verschluss häufig sind ([Kozłowski, 1984](#)) und in Tomaten führt eine Überschwemmung zu einem stomatalen Verschluss aufgrund einer Blattdehydratation, die mit einer hydraulischen Permeabilität mit geringer Wurzel (verbunden ist [Dell'Amico et al., 2001](#)).

Die Verwendung von weniger Wasser kann einen geringeren Ertrag oder eine geringere Biomasseansammlung und damit weniger Blatttranspiration widerspiegeln. Dies war jedoch nicht der Fall, und Erträge und Biomasseansammlungen unterschieden sich mit Ausnahme von DWC nicht signifikant im ersten Experiment ([Tabelle 3](#)). Der größte Teil des Nährstoffverbrauchs war zwischen den Anbausystemen ähnlich, insbesondere im Polytunnel. Es wurden jedoch einige Unterschiede in den Nährstoffgehalten in der Lösung festgestellt, wie z. B. Phosphat-, Kalium- und Ammoniumgehalte ([Abb.2](#)); Diese Unterschiede waren jedoch entweder nicht konsistent, traten nur zu einem bestimmten Zeitpunkt der Probenahme auf oder waren aufgrund sehr geringer Mengen, z. Die Ammoniumkonzentration lag unter 1 ppm. Wir gehen daher davon aus, dass Unterschiede im Nährstoffgehalt bestehen ([Tabelle 4](#)) wurden nicht durch Variationen des Nährstoffgehalts (Simone) verursacht ([Fanasca et al., 2006](#); [Zelená et al., 2009](#); [Erba et al., 2013](#)).

Es ist allgemein bekannt, dass im Boden angebaute Tomaten einen besseren Geschmack haben oder gesünder sind. Der Geschmack von Tomatenfrüchten wird durch Reifebedingungen bestimmt, und wenn Tomaten vom Weinstock gereift werden, nimmt die Schmeckhaftigkeit signifikant ab ([Sorrequieta et al., 2013](#)). Zusammen mit der Zucht, die sich eher auf Ertrag als auf Qualität konzentriert hat ([Klee und Tie-](#)

[man, 2013](#)) kann dies zur Wahrnehmung eines schlechten Geschmacks bei Tomaten beitragen. Daher kann es beim ' -Mangel an Geschmack ' mehr um die frühe Ernte und die Reifebedingungen während des Versands als vielmehr um die Wachstumsbedingungen gehen. Wir haben gezeigt, dass die getesteten ruhenlosen Anbausysteme mindestens so gute Tomaten wie das Bodensystem mit ähnlichen Zuckerwerten produzierten, insbesondere im Gewächshausexperiment. Die Fruchtqualität repräsentiert die komplexen Wechselwirkungen vieler Chemikalien, und die analysierten Parameter in dieser Studie sind möglicherweise nicht vollständig repräsentativ. jedoch, Der Lycopin- und β -Carotinspiegel war bei Tomaten, die im Gewächshausexperiment im Boden wuchsen, signifikant niedriger und stellte einen niedrigeren Nährwert aus diesem System dar. Die höheren Gehalte dieser Pigmente in hydroponisch gezüchteten Pflanzen, insbesondere in Pflanzen, die in DWC wachsen, kann durch erhöhte Mengen an reaktiven Sauerstoffspezies induziert werden, die häufig von überfluteten Pflanzen (auftreten [Rasheed et al., 2018](#)). Unabhängig von den stomatalen und Stressreaktionsmechanismen, die für ein verbessertes WUE und einen verbesserten Nährstoffgehalt verantwortlich sind, schränkten diese die Anreicherung von Biomasse in hydroponisch gezüchteten Pflanzen nicht ein. Wir zeigen, dass mit einem ähnlichen Befruchtungssystem ganz unterschiedliche Anbausysteme bereitgestellt werden, Es ist möglich, in Hydroponiksystemen im Vergleich zum Boden eine ähnliche oder bessere Pflanzenqualität zu erzielen und die Ernte mit deutlich weniger Wasser zu produzieren.

CRediT-Beitragserklärung zur Urheberschaft

Salvatore Gaetano Verdoliva: Konzeptualisierung, Methodik, Untersuchung, formale Analyse, Schreiben - Originalentwurf. **Dylan Gwyn-Jones:** Finanzierungserfassung, Schreiben - Überprüfung und Bearbeitung. **Andrew Detheridge:** Ressourcen, Schreiben - Überprüfen und Bearbeiten. **Paul Robson:** Finanzierungserwerb, Konzeptualisierung, Ressourcen, Schreiben - Originalentwurf, Schreiben - Überprüfung & Bearbeitung, Überwachung.

Erklärung des konkurrierenden Interesses

Die Autoren erklären keinen Interessenkonflikt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Knowledge Economy Skills Stipendien (KESS 2) unterstützt, die von der Bangor University im Auftrag des HE-Sektors in Wales geleitet wurden, und teilweise finanziert durch das Konvergenzprogramm des Europäischen Sozialfonds (ESF) der walisischen Regierung für West Wales und die Täler sowie den britischen Forschungsrat für Biotechnologie und Biowissenschaften (Bewilligungsnummer BBS / E / W/0012843A).

Fußnoten

Anhang A. Ergänzendes Material zu diesem Artikel finden Sie in der Online-Version unter doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109896>.

Anhang A. Ergänzende Daten

Das Folgende sind ergänzende Daten zu diesem Artikel:

Referenzen

- Ajlouni S., Kremer S., Masih L. Lycopingehtalt in hydroponischen und nicht hydroponischen Tomaten während der Lagerung nach der Ernte. *Essen Australien*. 2001;**53**(5): 1 – 14.
- AOAC . Band 1. Vereinigung offizieller Agrarchemiker; Washington, D.C.: 1990. S. 136 – 138. (AOAC Official Methods of Analysis). 15.
- Barbagallo R.N., Di Silvestro I., Patanè C. Ausbeute, physikalisch-chemische Merkmale, Antioxidationsmuster, Polyphenoloxidaseaktivität und vollständige visuelle Qualität der feldgewachsenen Verarbeitungstomate cv. Brigade, wie vom Wasserstress im mediterranen Klima betroffen. *J. Sci. Lebensmittelagric*. 2013;**93**(6): 1449 – 1457. [PubMed: 23070982]
- Bar-Yosef B. Vol. 2008. Akademische Presse; San Diego: 2008. Düngungsmanagement und Reaktion der Pflanzen auf das Lösungsrecycling in halbgeschlossenen Gewächshäusern; S. 341 – 424. (Soilless Culture: Theorie und Praxis).
- Benoit F., Ceustermans N. Einige qualitative Aspekte von Tomaten, die auf NFT angebaut werden. *Nötenloser Kult*. 1987;**3**(3): 3 – 7.
- Brekke B., Edwards J., Knapp A. Auswahl und Anpassung an die hohe Pflanzendichte in der Population von synthetischem Mais mit steifem Stiel (L.) in Iowa. *Crop Sci*. 2011;**51**(5): 1965.
- Carmassi G., Incrocci L., Maggini R., Malorgio F., Tognoni F., Pardossi A. Modellierung des Salzgehalts in der Umwälzkultur von Nährstofflösungen. *J. Plant Nutr*. 2005;**28**(3): 431 – 445.
- Cronin D.A., Walsh P.C. Ein Vergleich der chemischen Zusammensetzung, Festigkeit und des Geschmacks von Tomaten aus Torf- und Nährstofffilmanbausystemen. *Irish J. Food Sci. Technol*. 1983;**Vol. 7**
- Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalian M.R. Photosynthese unter künstlichem Licht: die Verschiebung des Primär- und Sekundärstoffwechsels. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci*. 2014;**369**(1640) [PMCID: PMC3949401] [PubMed: 24591723]
- Dell'Amico J., Torrecillas A., Rodríguez P., Morales D., Sánchez-Blanco M.J. Unterschiede in den Auswirkungen einer frühen und späten Überflutung des Bodens in der Photoperiode auf die Wasserverhältnisse von Tomatenpflanzen aus dem Topf. *Plant Sci*. 2001;**160**(3): 481 – 487. [PubMed: 11166435]
- Despommier D. Landwirtschaft in der Stadt: der Aufstieg städtischer vertikaler Bauernhöfe. Trends in der Biotechnologie. *Trends Biotechnol*. 2013;**31**(7): 388 – 389. [PubMed: 23790758]
- Erba D., Casiraghi M. C., Ribas-Agustí A., Cáceres R., Marfà O., Castellari M. Nährwert von Tomaten (*Solanum lycopersicum* L.), die im Gewächshaus durch verschiedene agronomische Techniken angebaut werden. *J. Food Compos. Anal*. 2013;**31**(2): 245 – 251.
- Fanasca S., Colla G., Maiani G., Venneria E., Roupheal Y., Azzini E., Saccardo F. Veränderungen des Antioxidansgehalts von Tomatenfrüchten als Reaktion auf die Zusammensetzung der Sorte und der Nährlösung. *J. Agric. Food Chem*. 2006;**54**(12): 4319 – 4325. [PubMed: 16756362]
- Gautier H., Diakou-Verdin V., Bénard C., Reich M., Buret M., Bourgaud F. Wie variiert die Tomatenqualität (Zucker, Säure und Ernährungsqualität) mit dem Reifungsstadium, der Temperatur, und Bestrahlungsstärke? *J. Agric. Food Chem*. 2008;**27**(4): 1241 – 1250. 56. [PubMed: 18237131]
- Giovannucci E. Tomaten, Produkte auf Tomatenbasis, Lycopin und Krebs: Überprüfung der epidemiologischen Literatur. *J. Natl. Cancer Inst*. 1999;**91**(4): 317 – 331. [PubMed: 10050865]
- Gonnella M., Serio F., Conversa G., Santamaria P. Produktion und Nitratgehalt in Lammsalat, der im schwimmenden System angebaut wird. *Acta Hort*. 2004;**644**:61 – 68.
- Granges A. Tomates en Culture Hydroproponique Sur Film Nutritif (NFT). Einfluss auf den Kulturmodus auf die Zusammensetzung der Früchte. *Revue Suisse Vitic. Arborisch. Hort*. 1980;**12**:59 – 63.

Grillas S., Lucas M., Bardopoulou E., Sarafopoulos S., Voulgari M. Perlite-basierte ruhenlose Kultursysteme: aktuelle kommerzielle Anwendungen und Perspektiven. *Acta Hortic.* 2001;**548**:105 – 114.

Gruda N. Haben soilless Kultursysteme einen Einfluss auf die Produktqualität von Gemüse? *J. Appl. Bot. Essen Qual.* 2009;**82**:141 – 147.

Haghighi M., Abolghasemi R., Teixeira da Silva J.A. Stress bei niedrigen und hohen Temperaturen beeinflusst die Wachstumseigenschaften von Tomaten in der hydroponischen Kultur mit der Änderung von Se und Nano-Se. *Sci. Hortic.* 2014;**178**:231 – 240.

Hernández Suárez M., Rodríguez Rodríguez E. M., Díaz Romero C. Mineral- und Spurenelementkonzentrationen in Tomatensorten. *Food Chem.* 2007;**104**(2): 489 – 499.

Hernández Suárez M., Rodríguez Rodríguez E. M., Díaz Romero C. Chemische Zusammensetzung von Tomaten (*Lycopersicon esculentum*) aus Teneriffa, den Kanarischen Inseln. *Food Chem.* 2008;**106**(3): 1046 – 1056.

Ho L.C. Der Beitrag der Pflanzenphysiologie zur glasigen Tomatenkultur. *Acta. Hortic.* 2004;**648**:19 – 25.

Hussain Shah A., Munir S.U., Hussain Shah S. Bewertung von zwei Nährstofflösungen für den Anbau von Tomaten in einem nicht zirkulierenden Hydroponiksystem. *Sarhad J. Agric.* 2011;**27**(274): 557 – 567.

Jensen M.H. Hydroponik weltweit. *Acta. Hortic.* 1999;**481**:719 – 729.

Jiang C., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S., Ebihara M., Nakaminami A., Maruo T. Photosynthese, Pflanzenwachstum, Die Obstproduktion von Einzeltomaten verbessert sich durch zusätzliche Beleuchtung, die von unten oder innerhalb des inneren Baldachins bereitgestellt wird. *Sci. Hortic.* 2017;**222**:221 – 229.

Kaya C., Higgs D. Reaktion von Tomatensorten (*Lycopersicon esculentum* L.) auf die Blattapplikation von Zink, wenn sie in Sandkulturen bei niedrigem Zinkgehalt gezüchtet werden. *Sci. Hortic.* 2002;**93**(1): 53 – 64.

Klee H.J., Tieman D.M. Genetische Herausforderungen der Geschmacksverbesserung bei Tomaten. Trends in der Genetik. *Elsevier Curr. Trends.* 2013;**29**(4): 257 – 262. [PubMed: 23332147]

Kozłowski T.T. Pflanzenreaktionen auf Bodenfluten. *BioScience.* 1984;**34**(3): 162 – 167.

Kunsch U., Scharer H., Durr P., Hurter J., Martinoni A., J. & G., Sulser H., Seeger B. Gibt es Unterschiede in der Qualität zwischen ruhenlosen und konventionell hergestellten Tomaten und Kopfsalat. *Mitt. Geb. Lebensmittelunter. Hyg.* 1994;**85**:18 – 21.

Lu N., Nukaya T., Kamimura T., Zhang D., Kurimoto I., Takagaki M. Die Kontrolle des Dampfdruckdefizits (VPD) im Gewächshaus steigerte das Wachstum und die Produktivität der Tomaten während der Wintersaison. *Sci. Hortic.* 2015;**197**:17 – 23.

Marcotte M. Bestrahlung als Desinsektionsmethode — Aktualisierung des Auslaufens von Methylbromid, regulatorischer Maßnahmen und aufkommender Möglichkeiten. *Radiat. Phys. Chem.* 1998;**52**(6): 85 – 90.

Matthiessen J.N., Kirkegaard J.A. Biofumigation und verbesserter biologischer Abbau: Chancen und Herausforderungen bei der Behandlung von durch Boden übertragenen Schädlingen und Krankheiten. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2006;**25**(3): 235 – 265.

Molyneux P. Die Verwendung des stabilen radikalfreien Diphenylpicryl-Hydrazyl (DPPH) zur Abschätzung der antioxidativen Aktivität. *Songklanakarín J. Sci. Technol.* 2004;**26**(2): 211 – 219.

Nasrin T., Molla M. M., Alamgir Hossain M., Alam M. S., Yasmin L. Beeinflussen Sie pf Nacherntebehandlungen die Haltbarkeit und die Qualität der Tomaten. *Bangladesch J. Agril. Res.* 2008;**33**(3): 579 – 585.

Nederhoff E.M., Stanghellini C. Vol. 2010. 2010. S. 52 – 59. (Wassernutzungseffizienz von Tomaten - in Gewächshäusern und Hydrokulturen). 115.

Patanè C., Pellegrino A., Saita A., Siracusa L., Ruberto G., Barbagallo R. Mediterrane Langlager-Tomaten als Quelle neuartiger Produkte für die Agrarlebensmittelindustrie: Ernährungs- und technologische Merkmale. *Lwt Food Sci. Technol.* 2017;**85**:445 – 448.

Pieper J. R., Barrett D. M. 2008. Auswirkungen organischer und konventioneller Produktionssysteme auf die Qualitäts- und Ernährungsparameter der Verarbeitung von Tomaten.

Polycarpou P., Neokleous D., Dora Chimonidou I.P. Ein geschlossenes System für eine Bodenkultur, die an die Bedingungen Zyperns angepasst ist. Tagungsband der ICID-Konferenz 7-11 Dezember 2004; Kairo Ägypten. Optionen Mediterranees, Serie B, Nr. 53; 2005. S. 237 – 241. 241.

Premuzic Z., Bargiela M., Garvia A., Rendina A., Iorio A. Calcium-, Eisen-, Kalium-, Phosphorus- und Vitamin C-Gehalt von organischen und hydroponischen Tomaten. *Hortic. Sci.* 1998;**33**(2)

Rasheed R., Iqbal M., Ashraf M. A., Hussain I., Shafiq F., Yousaf A., Zaheer A. Glycin-Betain wirkt den hemmenden Wirkungen der Wasserablagerung auf Wachstum, photosynthetische Pigmente, oxidatives Abwehrsystem, Nährstoffzusammensetzung und Fruchtqualität in Tomaten entgegen. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 2018;**93**(4): 385 – 391.

Sorrequieta A., Abriata L., Boggio S., Valle E. Die Reifung von Tomatenfrüchten außerhalb des Weinstocks führt zu einer Veränderung der primären Metabolitenzusammensetzung. *Metaboliten.* 2013;**3**(4): 967 – 978. [PMCID: PMC3937827] [PubMed: 24958260]

Das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen . 1987. Das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen. [PubMed: 1506990]

Das R Development Core Team . 2010. R: Eine Sprache und Umwelt für das statistische Rechnen.

Touliatos D., Dodd I.C., McAinsh M. Die vertikale Landwirtschaft erhöht den Salatertrag pro Flächeneinheit im Vergleich zur herkömmlichen horizontalen Hydrokultur. *Food Energy Secur.* 2016;**5**(3): 184 – 191. [PMCID: PMC5001193] [PubMed: 27635244]

Standards der Vereinigten Staaten für frische Tomaten . 1991. US-Standards für frische Tomaten.

Wang L.-S., Stoner G.D. Anthocyane und ihre Rolle bei der Krebsprävention. *Krebs-Lett.* 2008;**269**(2): 281 – 290. [PMCID: PMC2582525] [PubMed: 18571839]

WHO . WHO; 2005. Förderung des Obst- und Gemüsekonsums weltweit.

Willcox J.K., Catignani G.L., Lazarus S. Tomaten und kardiovaskuläre Gesundheit. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2003;**43**(1): 1 – 18. [PubMed: 12587984]

Wu M., Kubota C. Auswirkungen einer hohen elektrischen Leitfähigkeit der Nährlösung und ihres Anwendungszeitpunkts auf die Lycopin-, Chlorophyll- und Zuckerkonzentrationen hydroponischer Tomaten während der Reifung. *Sci. Hortic.* 2008;**116**(2): 122 – 129.

Yamamoto T., Ultra V.U., Tanaka S., Sakurai K., Iwasaki K. Auswirkungen der Methylbromid-Begasung, Chlorpicrin-Begasung und Dampfsterilisation auf die Bodenstickstoffdynamik und die mikrobiellen Eigenschaften in einem Topfkulturexperiment. *Boden Sci. Plant Nutr.* 2008;**54**(6): 886 – 894.

Zelená E., Hološová M., Zelény F., Fiedlerová V., Novotná P., Houška M. Auswirkung der Schwefeldüngung auf den Lycopinegehalt und die Farbe von Tomatenfrüchten. *Sonderausgabe Tschechisch J. Food Sci.* 2009: 27.

Abb. 1



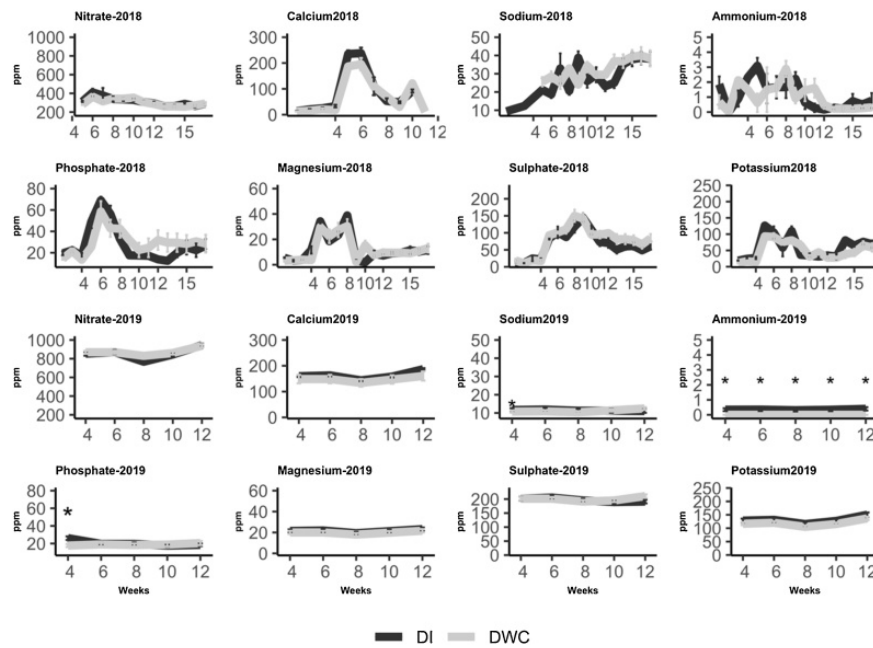
Beispiel für die verschiedenen Reifungsstadien von Tomaten. 9 Wochen nach dem Transplantatstadium 2 “BREAKERS” (A) und in der Erntephase 6 “RED” (B) (Zur Interpretation der Verweise auf Farbe in dieser Figurenlegende, Der Leser wird auf die Webversion dieses Artikels verwiesen).

Tabelle 1

Monatliche Durchschnittswerte der relativen Luftfeuchtigkeit (RH), der minimalen (Tmin) und der maximalen (Tmax) Temperatur, die während beider Experimente in einem Polytonnel (2018) und einem Gewächshaus (2019) aufgezeichnet wurden.

Monat	Polytonnel (2018)			Monat	Gewächshaus (2019)		
	Tmin	Tmax	RH		Tmin	Tmax	RH
August	12,8 ± 0,6	29,1 ± 1,0	51,5 ± 2,9	März	18,1 ± 0,1	28,8 ± 0,7	59,1 ± 1,4
September	9,9 ± 0,6	27,1 ± 0,9	57,9 ± 2,7	April	18,5 ± 0,2	30,5 ± 0,7	62,1 ± 1,6
Oktober	6,5 ± 0,8	23,9 ± 0,9	66,8 ± 2,9	Mai	19,3 ± 0,2	30,0 ± 0,5	64,7 ± 1,3
November	5,7 ± 0,6	17,9 ± 0,9	71,6 ± 2,8	Juni	19,8 ± 0,1	30,5 ± 0,9	67,8 ± 1,5

Abb. 2



Nährstoffgehalt (ppm) in den hydroponischen Lösungen von Tomaten, die entweder in der Tiefwasserkultur (DWC) (schwarze Linie) oder unter Verwendung von Tropfbewässerung (DI) (hellgraue Linie) wachen; Die Probenahme erfolgte wöchentlich in Pflanzen aus Polytonnel (2018) und zweiwöchentlich in Pflanzen aus Gewächshäusern (2019).

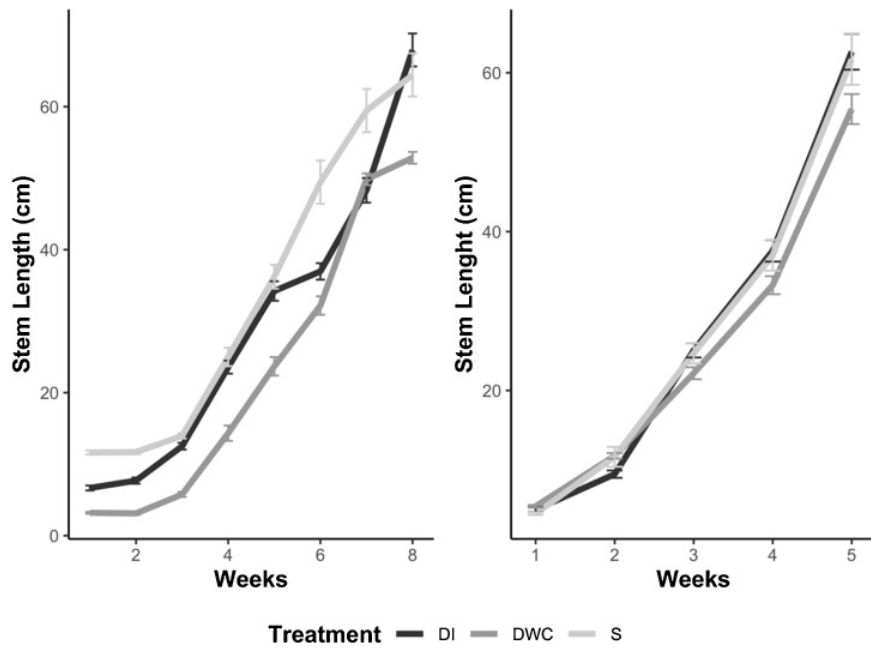
Tabelle 2

Gesamtwasserverbrauch, Wassernutzungseffizienz (WUE), Produktwasserverbrauch (PWU) und transpiriertes Wasser in Tomaten, die im Boden wachsen (S), Tiefwasserkultur (DWC) und Tropfbewässerung (DI) in einem Polytonnel (2018) und Gewächshaus (2019).

Parameter	Wachstumsumfeld			Wachstumsumfeld		
	Polytonnel-Experiment (2018)			Glasshouse-Experiment (2019)		
	DWC	DI	S.	DWC	DI	S.
Wasserverbrauch (L-Anlage ⁻¹)	41,7 ± 8,14 ^c	70,34 ± 12,55 ^b	87,44 ± 3,97 ^{ein}	48,07 ± 8,3 ^b	92,53 ± 13,64 ^{ein}	102,89 ± 4,14 ^{ein}
	0,0059 ± 0,0050	0,0072 ± 0,0029	0,0035 ± 0,0022	0,0124 ± 0,0046 ^{ein}	0,0099 ± 0,0033 ^{ein}	0,0044 ± 0,0008 ^b
PWU (L Kg ⁻¹)	325,1 ± 89,9 ^{ab}	192,5 ± 68,5 ^b	497,7 ± 298,4 ^{ein}	120,2 ± 23,7 ^c	224,98 ± 30,7 ^b	275,9 ± 41,1 ^{ein}
	31,8 ± 15,3 ^b	57,16 ± 9,9 ^{ein}	70,83 ± 3,24 ^{ein}	35,83 ± 11,38 ^b	49,77 ± 30,28 ^b	87,64 ± 5,65 ^{ein}

Kleinbuchstaben weisen auf signifikante Unterschiede nach Tukeys hin *post hoc* Test (Bedeutungsgrad $p < 0,05$). Mittel mit Standardfehlern wurden aus 7 Wiederholungen berechnet.

Abb. 3



Stammwachstum von im Boden wachsenden Tomatenpflanzen (hellgraue Linie) und zwei hydroponischen Systemen, Tropfbewässerung (DI) (schwarze Linie) und Tiefwasserkultur (DWC) (dunkelgraue Linie) in einem Polytunnel (A) oder Gewächshaus (B).

Tabelle 3

Frisches Gewicht der Biomasse (FW), Gesamttrockengewicht (DW) und Gesamtfrucht pro Pflanze und Fruchtgewicht (Ertrag) pro Pflanze von Tomaten, die im Boden wachsen (S), und zwei Hydroponiksysteme; Tiefwasserkultur (DWC) und Tropfbewässerung (DI).

Parameter	Wachstumsumfeld			Wachstumsumfeld		
	Polytunnel-Experiment (2018)			Glasshouse-Experiment (2019)		
	DWC	DI	S.	DWC	DI	S.
FW (g)	594,69 ± 172,5	649,8 ± 128,4	739,4 ± 174,9	405 ± 67,6	351 ± 48,4	389,9 ± 132,4
DW (g)	41.7 ± 9.9 ^b	49.9 ± 7.9 ^{ab}	57.6±12.5 ^a	24.9±8.6	17.1±4.7	23.5±9.4
Yield (g)	138.1 ± 52.5 ^b	399.5 ± 127.3 ^a	247.1 ± 159.2 ^{ab}	401.3 ± 14.8	411.1 ± 15.7	379.4 ± 51.8
Fruit per plant	3.0 ± 0.0 ^b	3.7 ± 0.5 ^a	3.3 ± 0.5 ^{ab}	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0

Means with standard errors were calculated from 7 replicates. Each replicate comprised a maximum of 4 but sometimes 3 fruits.

Table 4

Composition of lycopene, β -carotene, total soluble solids (TSS) and total antioxidant activity (TAA) content of tomatoes growing in soil, and two hydroponic systems; deep water culture and drip irrigation.

Parameter	Growth environment			Growth environment		
	Polytunnel experiment (2018)			Glasshouse experiment (2019)		
	DWC	DI	S	DWC	DI	S
Lycopene (mg/100 m L ⁻¹)	0.008 ± 0.007 ^b	0.02 ± 0.006 ^a	0.016 ± 0.01 ^{ab}	0.16 ± 0.03 ^a	0.14 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.02 ^b
β -carotene (mg/100 m L ⁻¹)	n.d.	n.d.	n.d.	0.098 ± 0.03 ^a	0.039 ± 0.03 ^b	0.028 ± 0.01 ^b
TSS (Brix°)	2.9 ± 0.9 ^b	4.2 ± 0.3 ^a	3.6 ± 0.6 ^{ab}	3.4 ± 0.6	3.7 ± 0.24	3.0 ± 0.8
TAA (%)	20.2 ± 10.1 ^b	53.2 ± 26.1 ^a	67.3 ± 9.0 ^a	79.1 ± 9.1	77.3 ± 16.7	65.9 ± 25.1

n.d. = β -Carotinspiegel in Tomaten wurden im Polytunnel-Experiment nicht bewertet. Mittel mit Standardfehlern wurden aus 7 Wiederholungen berechnet.