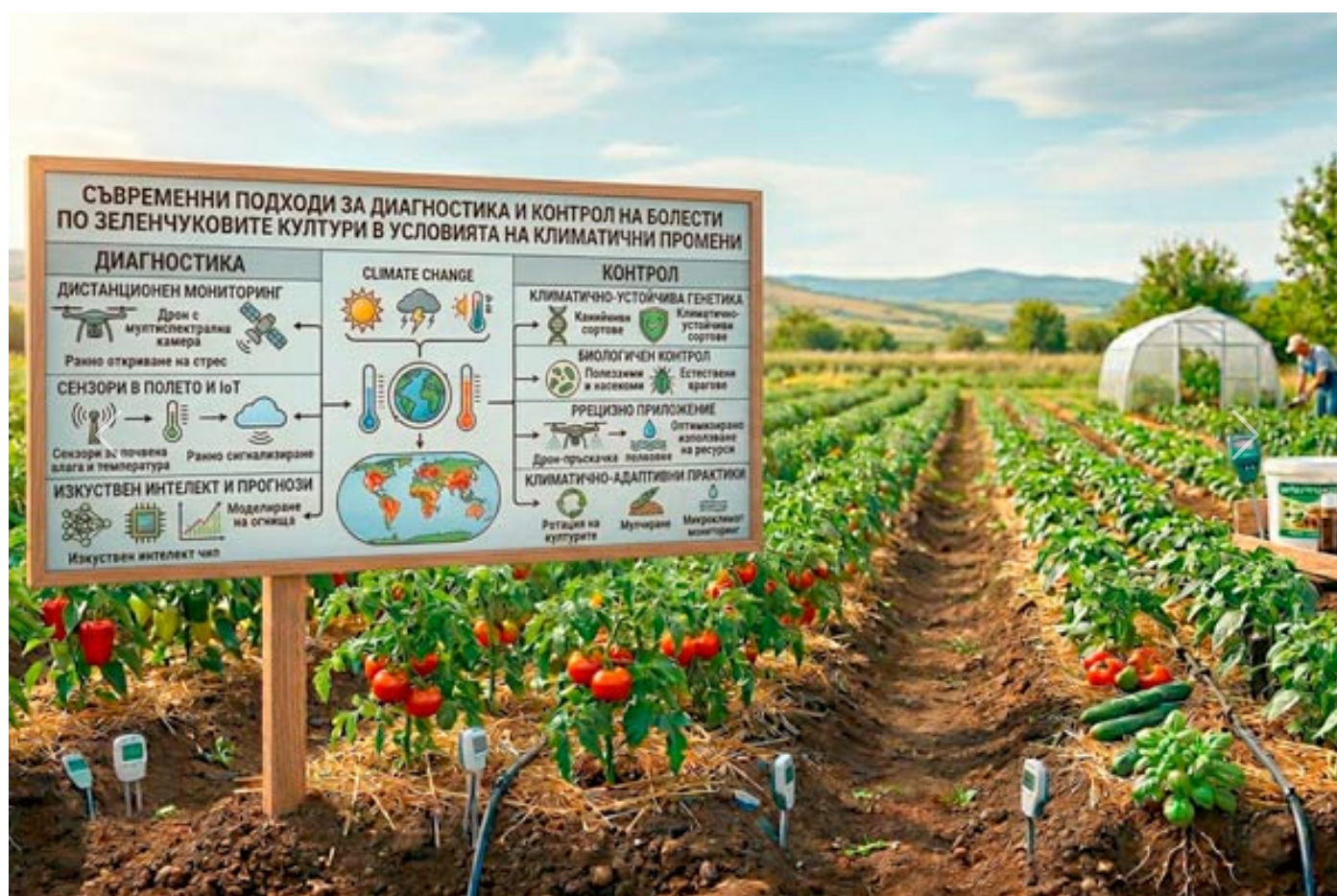


Moderne Ansätze zur Diagnose und Bekämpfung von Gemüsekrankheiten unter den Bedingungen des Klimawandels

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Zusammenfassung

Der Klimawandel verändert die Dynamik von Gemüsekrankheiten erheblich, was zu einer schnelleren Pathogenentwicklung, höherer Inokulumüberlebensrate und häufigeren Epidemieausbrüchen führt. Erhöhte Temperaturen, extreme Niederschläge und Dürreperioden schaffen Bedingungen, die Infektionen durch Viren, Bakterien und Pilzpathogene begünstigen. Unter diesen Bedingungen sind traditionelle Diagnosemethoden aufgrund überlappender

Symptome und stressbedingter Veränderungen oft unzureichend. Moderne Ansätze umfassen schnelle immunochromatografische Tests, molekulare Methoden, hyperspektrale Diagnostik, Drohnentechnologien und Vorhersagemodelle. Ein effektives Krankheitsmanagement erfordert einen integrierten Ansatz, der resistente Sorten, Biofungizide, Biostimulanzien und optimierte agronomische Praktiken einbezieht. Die Kombination traditioneller und moderner Diagnosewerkzeuge, unterstützt durch eine fachphytopathologische Bewertung, ist der Schlüssel zu einer nachhaltigen Produktion unter den Bedingungen des Klimawandels.

Pflanzenkrankheiten bleiben eine der größten Herausforderungen für die moderne Landwirtschaft und verursachen erhebliche jährliche Verluste bei Ertrag, Qualität und der Widerstandsfähigkeit von Agrarökosystemen. Nach Fang und Ramasamy (2015) liegen die durch Pathogene verursachten Verluste "zwischen 20 % und 40 %" und stellen einen Schlüsselfaktor für die Bedrohung der globalen Ernährungssicherheit dar. Unter den Bedingungen des Klimawandels, intensiver Produktionssysteme und globalisierter Handelsströme erhöht sich das Risiko von Epidemien, dem Auftreten neuer Rassen und der Ausbreitung invasiver Pathogene erheblich (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Effektives Krankheitsmanagement erfordert zwei miteinander verbundene Richtungen: präzise und zeitnahe Diagnose sowie nachhaltige Bekämpfungsstrategien, die biologische, agronomische, chemische und digitale Ansätze integrieren. In den letzten Jahrzehnten hat die Diagnose einen tiefgreifenden Wandel durchlaufen – von der visuellen Beurteilung und Mikroskopie hin zu molekularen Methoden, Hochdurchsatz-Phänotypisierungsplattformen, Fernerkundungssensoren und Deep-Learning-Algorithmen. Wie Balodi et al. (2017) feststellen, hat sich "die Wissenschaft der Krankheitsdiagnose von der visuellen Inspektion zu hochempfindlichen serologischen und molekularen Techniken entwickelt", was die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Erkennung erheblich erhöht.

Parallel dazu verlagert sich das Konzept der Krankheitsbekämpfung von einseitigen chemischen Lösungen hin zu einem integrierten, ökologisch und evolutionär sinnvollen Management. He et al. (2016) betonen, dass nachhaltiges Management "Bedingungen schaffen muss, die für das Pflanzenwachstum günstig und für die Vermehrung und Evolution von Pathogenen ungünstig sind", und dabei Resistenz, Vermeidung, Eliminierung und Sanierung (RAER) kombiniert. Neue Trends umfassen biologische Bekämpfung, Pflanzenextrakte, genetische Ansätze, Vorhersagemodelle und digitale Entscheidungsunterstützungssysteme (Mukhtar et al., 2023).

In diesem Zusammenhang werden zeitgenössische wissenschaftliche Fortschritte in zwei Schlüsselrichtungen zusammengefasst:

(1) Diagnose von Pflanzenkrankheiten, einschließlich klassischer, optischer und KI-basierter Methoden;

(2) Bekämpfung und integriertes Management unter Berücksichtigung ökologischer, biologischer, genetischer und technologischer Ansätze.

Dieser doppelte Fokus ermöglicht es nachzuvollziehen, wie Fortschritte in der Diagnose ein präziseres, nachhaltigeres und anpassungsfähigeres Krankheitsmanagement im Kontext sich dynamisch verändernder Agrarökosysteme unterstützen.

Eine effektive Diagnose ist die Grundlage jeder Krankheitsmanagementstrategie. Sie bestimmt die richtige Entscheidung, minimiert Verluste und ermöglicht ein frühzeitiges Eingreifen zur Bekämpfung. Wie von Balodi et al. (2017) betont, hat sich "die Wissenschaft der Krankheitsdiagnose von der visuellen Inspektion... zu hochempfindlichen serologischen und molekularen Techniken entwickelt." Moderne Ansätze lassen sich in drei Hauptrichtungen gruppieren: klassische Labormethoden, optische und Fernerkundungstechnologien sowie künstliche Intelligenz.

Serologische Techniken wie ELISA, Immunfluoreszenz und schnelle immunochromatografische Tests bleiben aufgrund ihrer Spezifität und Anwendbarkeit unter Feldbedingungen weit verbreitet. ELISA ist eine der am weitesten verbreiteten Methoden, bei der "die visuelle Farbänderung eine einfache Detektion ermöglicht" (Fang & Ramasamy, 2015). Die Empfindlichkeit für bakterielle Pathogene ist jedoch begrenzt.

Molekulare Methoden, insbesondere PCR und ihre Varianten (nested, multiplex, real time), bieten die höchste Genauigkeit. Balodi et al. (2017) stellen fest, dass PCR-basierte Analysen "spezifisch, empfindlich, effizient, schnell und relativ wirtschaftlich" sind. Die Echtzeit-PCR ermöglicht eine quantitative Bewertung und ist besonders wertvoll für Saatgutuntersuchungen und Quarantänepathogene.

Phänotypisierungsplattformen (Chlorophyllfluoreszenz, hyperspektrale und thermische Bildgebung) ermöglichen eine zerstörungsfreie und wiederholte Beobachtung. Laut Balodi et al.

(2017) sind "diese Methoden zerstörungsfrei... und ermöglichen die Visualisierung lokalisierter Reaktionen." Die hyperspektrale Diagnostik ist besonders vielversprechend für die Früherkennung, da sie physiologische Veränderungen erfasst, bevor sichtbare Symptome auftreten.

Fang und Ramasamy (2015) betonen, dass hyperspektrale Techniken "weit verbreitet sind, um Krankheiten durch Veränderungen der Reflexion zu identifizieren." Thermografie und Fluoreszenz ergänzen die Analyse, sind jedoch empfindlich gegenüber externen Bedingungen und erfordern oft eine Kombination mit anderen Methoden.

In den letzten Jahren ist Deep Learning zu einem Schlüsselwerkzeug für die automatische Krankheitserkennung geworden. Li et al. (2021) stellen fest, dass "Deep Learning die Nachteile der manuellen Merkmalsauswahl vermeidet... und die Merkmalsextraktion objektiver macht." CNN-Architekturen wie AlexNet, GoogLeNet, ResNet und DenseNet erreichen auf kontrollierten Datensätzen Genauigkeiten von über 95–99 %. Saleem et al. (2019) zeigen, dass GoogLeNet auf PlantVillage AlexNet übertrifft, und Demilie (2024) kommt zu dem Schluss, dass CNNs "oft die bevorzugte Wahl sind... aufgrund ihrer Fähigkeit, räumliche Hierarchien zu erfassen." Reale Feldbedingungen bleiben jedoch eine Herausforderung und erfordern komplexere Modelle in Kombination mit Fernerkundungssensoren und Vorhersagesystemen.

Moderne Bekämpfungsstrategien entwickeln sich von chemisch dominierten Ansätzen hin zu integrierten, ökologisch orientierten und evolutionär nachhaltigen Systemen. Das Hauptziel ist es, den Pathogendruck zu reduzieren und gleichzeitig Produktivität und ökologisches Gleichgewicht aufrechtzuerhalten.

Der Klimawandel verändert die Krankheitsepidemiologie und erfordert adaptive Strategien. Juroszek und von Tiedemann (2011) stellen fest, dass "präventive Maßnahmen... in Zukunft besonders wichtig werden können." Mukhtar et al. (2023) betonen, dass IPDM "die am besten geeignete und relevanteste Methode unter den gegenwärtigen Umständen" ist. Neue Trends umfassen: Pflanzenextrakte – z.B. *Lantana camara*, deren Extrakte "das Wachstum von *Pyricularia oryzae* und *Xanthomonas* spp. unterdrücken"; genetische Ansätze – Expression von Regulatoren wie AtMYB12, die "die Flavonoidspiegel und die Resistenz gegen mehrere Pathogene erhöht"; Pathogen-abgeleitete Resistenz (PDR) – transgene Strategien gegen Viren.

Diagnose- und KI-basierte Systeme unterstützen das Management durch: Früherkennung und Lokalisierung von Ausbrüchen; Reduzierung unnötiger Behandlungen; Integration mit

Vorhersagemodellen; Überwachung von Wirksamkeit und Resistenz.

Wie Demilie (2024) feststellt, verbessern Machine Learning und Deep Learning "die Leistung und Geschwindigkeit der Erkennung und Klassifizierung" und sind damit eine Schlüsselkomponente moderner IPM-Systeme.

Die Synergie zwischen moderner Diagnose und integriertem Management schafft neue Möglichkeiten für eine präzise, effektive und ökologisch nachhaltige Landwirtschaft. Diese Kombination ermöglicht nicht nur eine Verringerung der Verluste, sondern auch den Aufbau widerstandsfähigerer Agrarökosysteme, die in der Lage sind, auf zukünftige Herausforderungen zu reagieren.

Materialien und Methoden

Die Hauptpathogene, die Gemüsekulturen betreffen, sind Viren (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), Bakterien (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) und Pilzpathogene wie *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* und *Botrytis* (Abbildung 1).



Abbildung 1. Symptome von Krautfäule bei Kartoffeln, Verticillium-Welke bei Paprika, bakteriellen Flecken bei Paprika, bakterieller Krebs bei Tomate

Der Klimawandel führt zu "erhöhten Temperaturen → schnellerer Pathogenentwicklung" und "längeren Vegetationsperioden → mehr Infektionszyklen." Für diagnostische Zwecke wurden sowohl traditionelle als auch moderne Methoden verwendet. Die anfängliche Bewertung war die visuelle Diagnose, die schnell, aber subjektiv ist, da "Symptome zwischen verschiedenen Pathogenen oder abiotischen Faktoren überlappen können." Die Mikroskopie wurde zur Beobachtung morphologischer Strukturen eingesetzt, wobei in einigen Fällen spezifische Färbungen verwendet wurden. Kultivierungsmedien wurden zur Isolierung von Bakterien und Pilzen verwendet, während Viren mit immunochromatografischen Tests diagnostiziert wurden.

Die verwendeten schnellen immunochromatografischen Tests waren: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® und LOEWE® FAST, die den Nachweis von Viren, Bakterien und einigen Pilzpathogenen innerhalb von 5-10 Minuten ermöglichen und "für Feld und Labor geeignet" sind (Abbildung 2).



Abbildung 2. Schnelle immunochromatografische Tests: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® und LOEWE® FAST

Zur Bestätigung der Ergebnisse werden molekulare Methoden (PCR, qPCR, LAMP) empfohlen, die sich durch "sehr hohe Empfindlichkeit" und "hohe Spezifität" auszeichnen, aber ein spezialisiertes Labor erfordern. Hyperspektrale Methoden zur Früherkennung von Infektionen und Bewertung von

physiologischem Stress sind weit verbreitet, wobei die Technologie als "nicht-invasiv, schnell und skalierbar" definiert wird. Drohnen mit RGB-, Multispektral-, Hyperspektral- und Thermalsensoren wurden für Feldmonitoring, Krankheitskartierung und Biomassebewertung eingesetzt.

Vorhersagemodelle basierend auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Mikroklima wurden verwendet, um das Infektionsrisiko vorherzusagen und den Behandlungszeitpunkt zu optimieren. In der Gemüseproduktion weit verbreitet sind Biofungizide (z.B. *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), Biostimulanzen (Aminosäuren, Algen, Huminsäuren) und chemische Fungizide (kupferbasierte Produkte, Mancozeb, Azoxystrobin, Difenconazol usw.).

Ergebnisse

Der Einfluss des Klimawandels auf die Pathogendynamik und Krankheitshäufigkeit bei Gemüsekulturen ist deutlich ausgeprägt. Erhöhte Temperaturen beschleunigen die Entwicklung mehrerer Pathogene, und wärmere Winter erhöhen das Überleben des Inokulums. Extreme Niederschläge schaffen günstige Bedingungen für die Entwicklung von Pilz- und Bakterienkrankheiten, da "hohe Luftfeuchtigkeit > 90 % die Sporulation beschleunigt" und Regentropfen die Fernverbreitung von Bakter