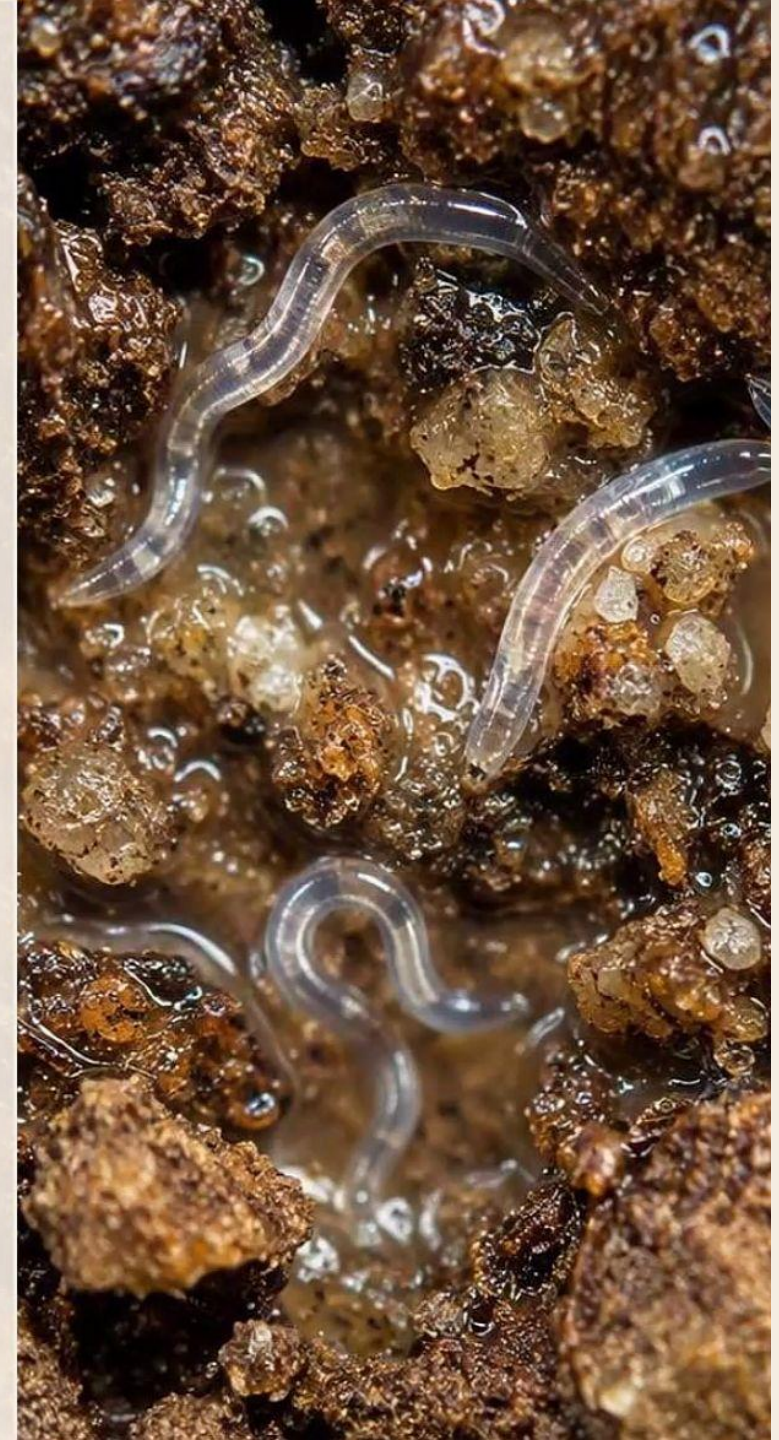


VORTRAG · UNIVERSITÄT TÜBINGEN · AUGUST 2026

Pflanzenparasitäre Nematoden

Zystennematoden und Wurzelgallennematoden: Manipulation der Wirtspflanze, wirtschaftliche Bedeutung, Lebenszyklen, molekular erzeugte Resistenz und praktische Mikroskopie.



Überblick über den Vortrag

01 Nematoden im Boden

Häufigkeit, Anatomie, Fossilbelege,
Modellorganismus

02 Praktische Mikroskopie

Extraktion, Präparation, Bestimmung

03 Umprogrammierung

Gallen bei Insekten, Milben und Mikroben

04 Zysten- und Gallennematoden

Biologie, Lebenszyklen, wirtschaftliche Bedeutung

05 Engineered Resistance

Promotoren, Cystatine, RNAi, Genomeditierung

06 Kernaussagen

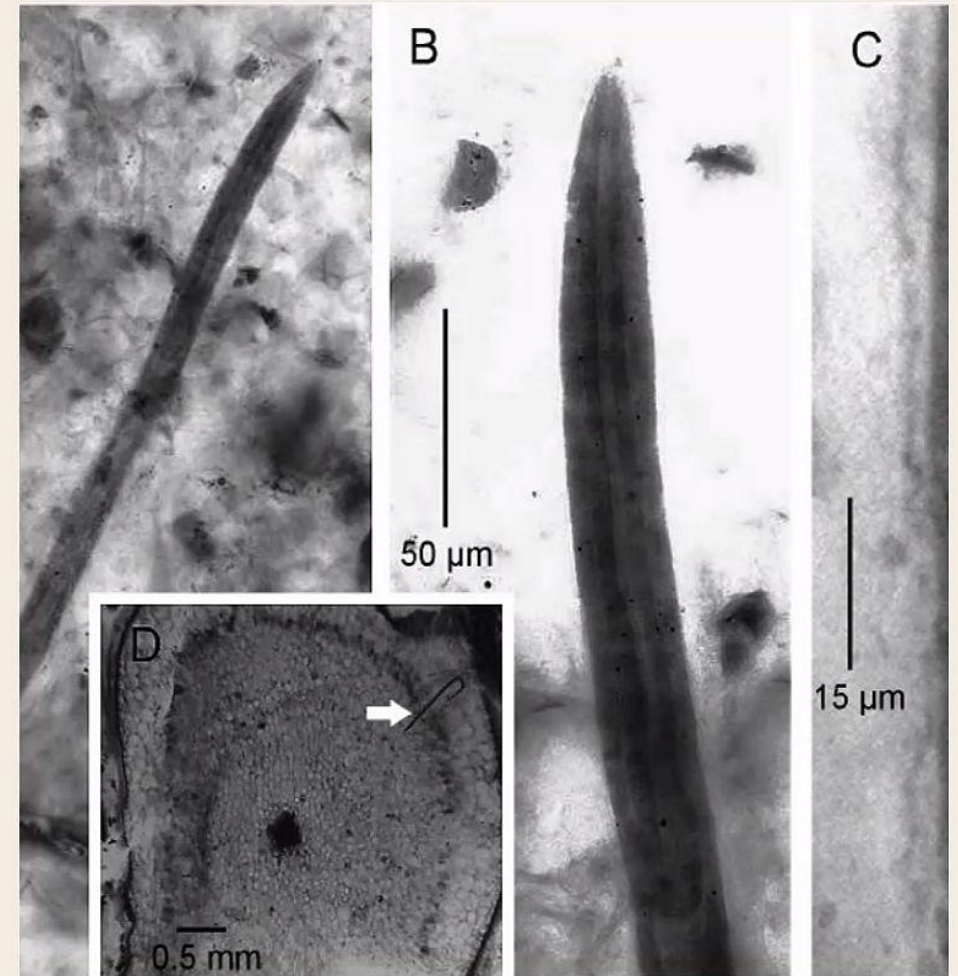
Was diese Tiere so außergewöhnlich macht

Palaeonema phyticum: Parasitismus im Devon

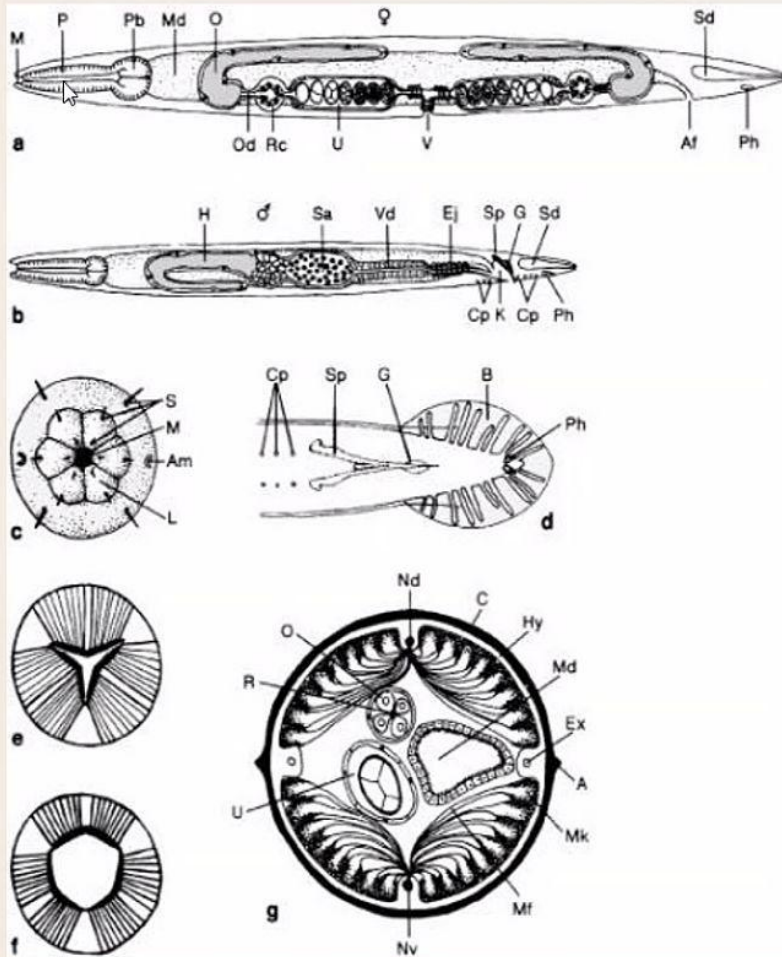
- Erstes anerkanntes Nematoden-Fossil, aus dem Rhynie Chert in Schottland, frühes Devon.
- Gefunden in einer der frühesten Landpflanzen, Aglaophyton - in den Räumen unter den Stomata.
- Eier, Juvenile und adulte Tiere lagen gemeinsam vor: Vermehrung fand innerhalb der Pflanze statt.
- Möglicherweise ein früher Beleg für pflanzlichen Parasitismus überhaupt.

Poinar Jr, G., Kerp, H., & Hass, H. (2008). *Palaeonema phyticum* gen. n., sp. n. (Nematoda: Palaeonematidae fam. n.), a Devonian nematode associated with early land plants. *Nematology*, 10(1), 9-14.

<https://doi.org/10.1163/156854108783360159>



Allgemeine Anatomie der Nematoden



- **a** Seitenansicht eines Weibchens, **b** eines Männchens (schematisiert);
- **c** Vorderende (Frontalansicht); **d** Schwanzregion eines Männchens (Ventralansicht), eines Vertreters mit Bursa und distal verwachsenen Spicula;
- **e, f** Pharynx-Querschnitte, **e**: Ruhestellung: Pharynx-Lumen eng, **f**: Saugwirkung: Muskulatur kontrahiert, dadurch Pharynx-Lumen erweitert;
- **g** Querschnitt durch mittlere Körperregion eines Weibchens.
 A Ala (Cuticular-Flügel), Af After, Am Amphid (Seitenorgan), B Bursa copulatrix, C Cuticula, Cp Caudal-Papillen, Ej Ejakulationskanal (muskulös), Ex Exkretionskanal in lateraler Epithelleiste, G Gubernaculum, H Hoden, Hy Hypodermis, K Kloake, L „Lippe“, M Mund, Md Mitteldarm, Mk Fortsatz einer Muskelzelle, Nd Nerv (in dorsaler Epithelleiste), Nv Nerv (in ventraler Epithelleiste), O Ovar (Oogonien und Oocyten), Od Ovidukt, P Pharynx, Pb Pharynx-Bulbus, Ph Phasmid (nur bei Secernentea!), R Rhachis, Rc Receptaculum seminis, S 6+6+4 Sinnesborsten, Sa Samenblase mit Spermien, Sd Schwanzdrüsen (nur bei Adenophorea!), Sp Spiculum (meist paarig), U Uterus mit unterschiedlich weit entwickelten Eiern, V Vagina und Vulva (mehr oder weniger muskulös), Vd Vas deferens (mehr oder weniger drüsiger)

Zellkonstanz und der Modellorganismus *C. elegans*

- Viele Nematodenarten bestehen aus einer festen Anzahl von Zellen.
- Genau deshalb wurde *Caenorhabditis elegans* als Modelltier ausgewählt.
- Adulter Hermaphrodit: 959 nukleäre Zellen; Männchen: rund 1031 Zellen.
- Vom befruchteten Ei an teilen sich die Zellen in einem hoch reproduzierbaren Muster und bilden die Gewebe.



01

Praktische Mikroskopie von Bodennematoden

Wie Bodennematoden gefunden, präpariert und erkannt werden.

Probenahme und Extraktionsmethoden

Probenahme bei trockenen Bedingungen

- Natürlich trockenen Feldboden nicht weiter trocknen, sondern langsam wieder befeuchten.
- Sofortige Extraktion mit Proben nach 24-48 h Erholungszeit vergleichen: quieszente bzw. anhydrobiotische Tiere brauchen Zeit.
- Für Zysten eine separate trockene Fraktion zurückbehalten - Flotation trockener Zysten ist nützlich.

Extraktionsmethoden

- Whitehead-Schale / Baermann-Trichter: aktive Tiere wandern aus feuchtem Boden ins Wasser - einfach, aber selektiv.
- Nasssiebung und Dekantieren: nutzt Partikelgröße und Sedimentationsgeschwindigkeit.
- Zentrifugal-Zuckerflotation: quantitativer, erfasst auch weniger aktive Tiere, braucht Laborausrüstung.
- Fenwick-Kanne / Flotation: ideal für Globodera- und Heterodera-Zysten aus luftgetrocknetem Boden.

Whitehead-Schale



Lebendbeobachtung in Wasser



Lebendbeobachtung, Abtöten und Einbettung

Lebendbeobachtung

Zunächst sinusförmige Fortbewegung, Körperform und Verhalten beobachten; einen Teil der Tiere lebend belassen statt alles zu fixieren.

Abtöten durch Wärme

Rasches, schonendes Erwärmen auf etwa 55-65 °C entspannt und tötet die Tiere; Kochen und starke Verformung vermeiden.





Lebendbeobachtung, Abtöten und Einbettung

Lebendbeobachtung

Zunächst sinusförmige Fortbewegung, Körperform und Verhalten beobachten; einen Teil der Tiere lebend belassen statt alles zu fixieren.

Abtöten durch Wärme

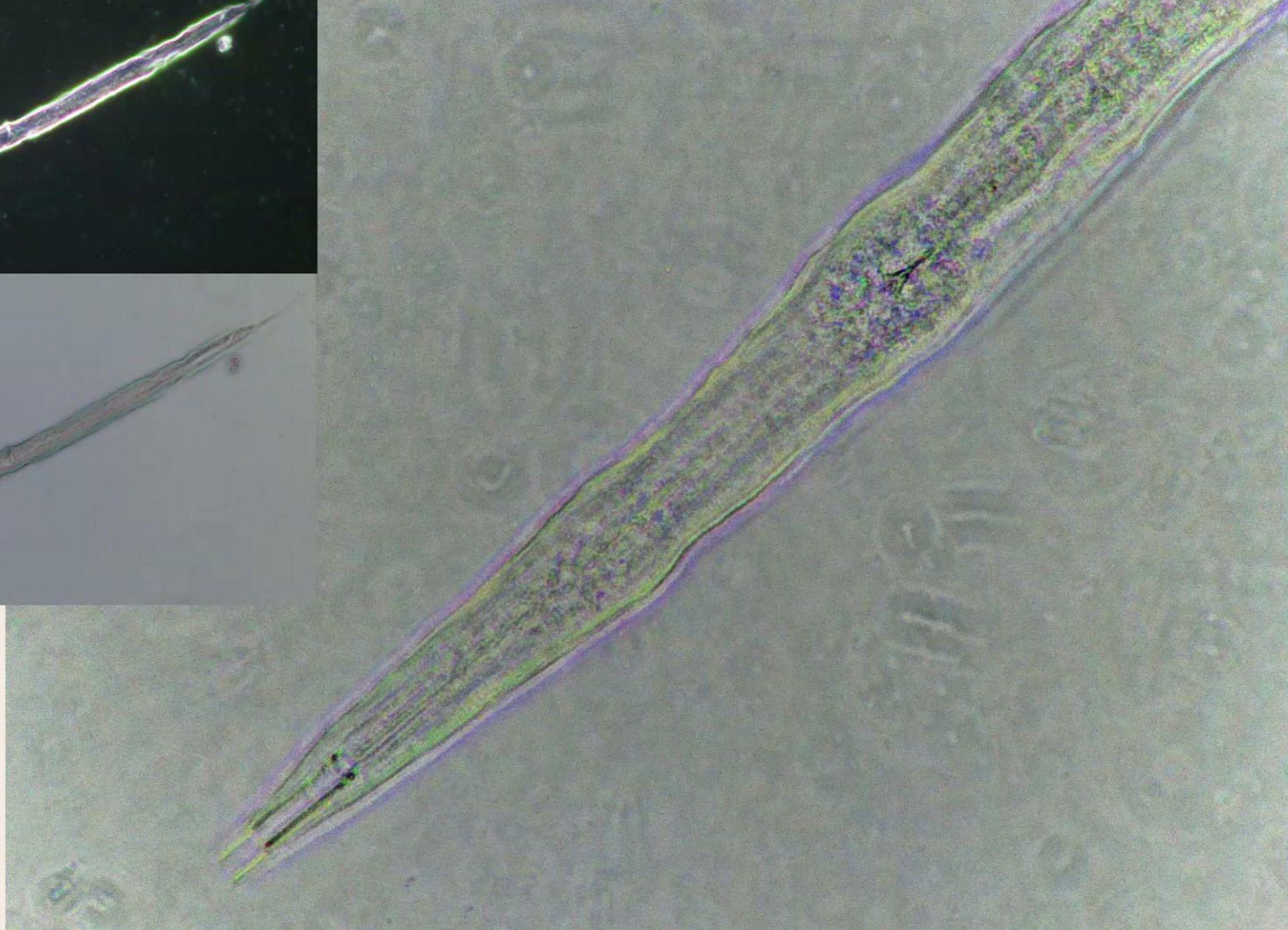
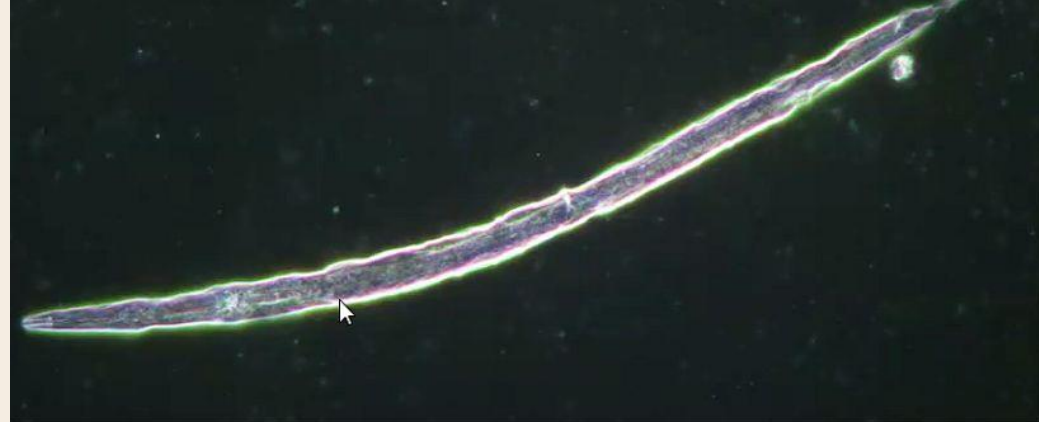
Rasches, schonendes Erwärmen auf etwa 55-65 °C entspannt und tötet die Tiere; Kochen und starke Verformung vermeiden.

Wasser und Glycerin

Wasser: sehr guter Kontrast, minimale Verarbeitung, aber nur temporär. Glycerin: klassisches permanentes Medium.

Glyceringelatine und LOCA

Ungefärbte Glyceringelatine als semi-permanentes Demonstrationsmedium; UV-härtendes LOCA nach Isopropanol-Reihe, Schrumpfung prüfen.



Bestimmung: worauf ist zu achten?

Vorderende

Mund und Buccalhöhle, Nahrungsapparat. Pflanzenparasiten besitzen meist ein Stilett
- Conus, Schaft und Basalknöpfe beachten.

Pharynx / Ösophagus

Medianbulbus und Drüsenregion helfen bei der Zuordnung größerer Gruppen.

Körper

Cuticula, gegebenenfalls Seitenfeld, Darm und Fortpflanzungsorgane.

Hinterende

Schwanzlänge und -form, Lage von Anus und Vulva, bei Männchen die Spicula.

Bei Zystennematoden: Zystenform, diagnostische Vulvakegel-Morphologie und J2-Merkmale. Das äußere Erscheinungsbild allein reicht für die Artbestimmung nicht aus.

Organismen, die Pflanzen zu neuen Strukturen veranlassen

Umprogrammierung der Wirtsentwicklung - zum Schutz, zur Ernährung oder zu beidem.

Gallbildende Insekten und Milben

Gallwespen

Hoch organisierte Gallen mit geschützter Larvenkammer und umgebendem Nährgewebe.

Gallmücken

Pflanzenzellen in Larvennähe differenzieren sich zu spezialisiertem Nährgewebe.

Blattläuse und Psylliden

Blatt-, Blattstiel- oder Stängelgallen bieten Kolonieraum und Nährstoffzugang.

Blattfaltung und -rollen

Veränderte Blattarchitektur erzeugt ein geschütztes Mikrohabitat.

Eriophyide Gallmilben

Taschen, Erineen und andere induzierte Wucherungen als Schutz- und Nahrungsplätze.



Ahornbeutel-Gallmilbe (*Aceria myriadeum*, oft auch synonym als *Aceria cephalonea* bezeichnet)



Eichenlinsengallwespe
Neuroterus quercusbaccarum



Das Bacterium *Agrobacterium tumefaciens* verursacht den sogenannten Wurzelkropf

03

Zysten- und Wurzelgallennematoden

Biologie, Lebenszyklen und wirtschaftliche Bedeutung.

Wirtsfindung und Penetration der Wurzel

1

Signal

Infektiöse J2 reagieren über anteriore Sinnesorgane, besonders die Amphiden, auf chemische und physikalische Wurzelsignale.

2

Exsudat

Wurzelexsudate leiten die Juvenilen; bei Kartoffelzystennematoden stimulieren wirtsabhängige Substanzen zusätzlich das Schlüpfen aus den Eiern.

3

Eindringen

Meloidogyne dringt nahe der Streckungszone ein und wandert überwiegend interzellulär.

4

Migration

Zystennematoden migrieren weitgehend intrazellulär, bevor sie eine Nährstelle auswählen.

Ei → J1 → J2 → J3 → J4 → Adulttier. Die erste Häutung findet im Ei statt, daher ist J2 das infektiöse Stadium.

Die Nährstelle als metabolische Senke

Transport

Zucker- und Aminosäuretransporter werden verändert exprimiert.

Stoffwechsel

Gene des Kohlenhydrat- und Stickstoffstoffwechsels werden umgesteuert.

Zellzyklus

Zellzyklusregulatoren und Cytoskelett-Gene ermöglichen Hypertrophie und Endoreduplikation.

Zellwand und Gefäße

Zellwand-Remodelling und Gefäßentwicklungswege sichern die Versorgung.

Hormone

Auxin- und Cytokininwege werden stark manipuliert.

Abwehr

Abwehrwege werden zugleich aktiviert und selektiv unterdrückt bzw. umprogrammiert.

Zentrales Konzept: Die Nährstruktur ist genetisch Pflanzengewebe – ihre Entwicklung wird jedoch durch den tierischen Parasiten umgelenkt.

Wirtschaftliche Bedeutung: Vereinigtes Königreich

- Kartoffelzystennematoden (PCN), *Globodera rostochiensis* und *G. pallida*, sind bedeutende Einschränkungen der britischen Kartoffelproduktion.
- Kosten durch Ertragsverluste, Bodenuntersuchungen, resistente Sorten, längere Fruchtfolgen, Nematizide, Maschinenhygiene und Auflagen in der Pflanzguterzeugung.
- Die langlebige Zyste macht den Befall zu einem Problem langfristiger Flächennutzung - weit über eine einzelne Kultur hinaus.
- Starke H1-basierte Resistenz verbesserte die Bekämpfung von *G. rostochiensis* erheblich; *G. pallida* blieb schwieriger und ist besonders bedeutsam geworden.
- *Heterodera schachtii* tritt in East Anglia auf; Zuckerrübe, einige Brassicaceae und Wirtunkräuter erhalten die Populationen.



Deutschland und Kontinentaleuropa

- Dieselben zwei Problemtypen: PCN im Kartoffelanbau und H. schachtii in der bedeutenden europäischen Zuckerrübenwirtschaft.
- Wurzelgallennematoden besitzen ein deutlich breiteres Wirtsspektrum und gewinnen in wärmeren Regionen, im geschützten Anbau und mit fortschreitender Erwärmung an Bedeutung.
- Keine einzelne globale Schadenssumme als exakten Wert darstellen: veröffentlichte Schätzungen sind hoch, methodisch aber unsicher.



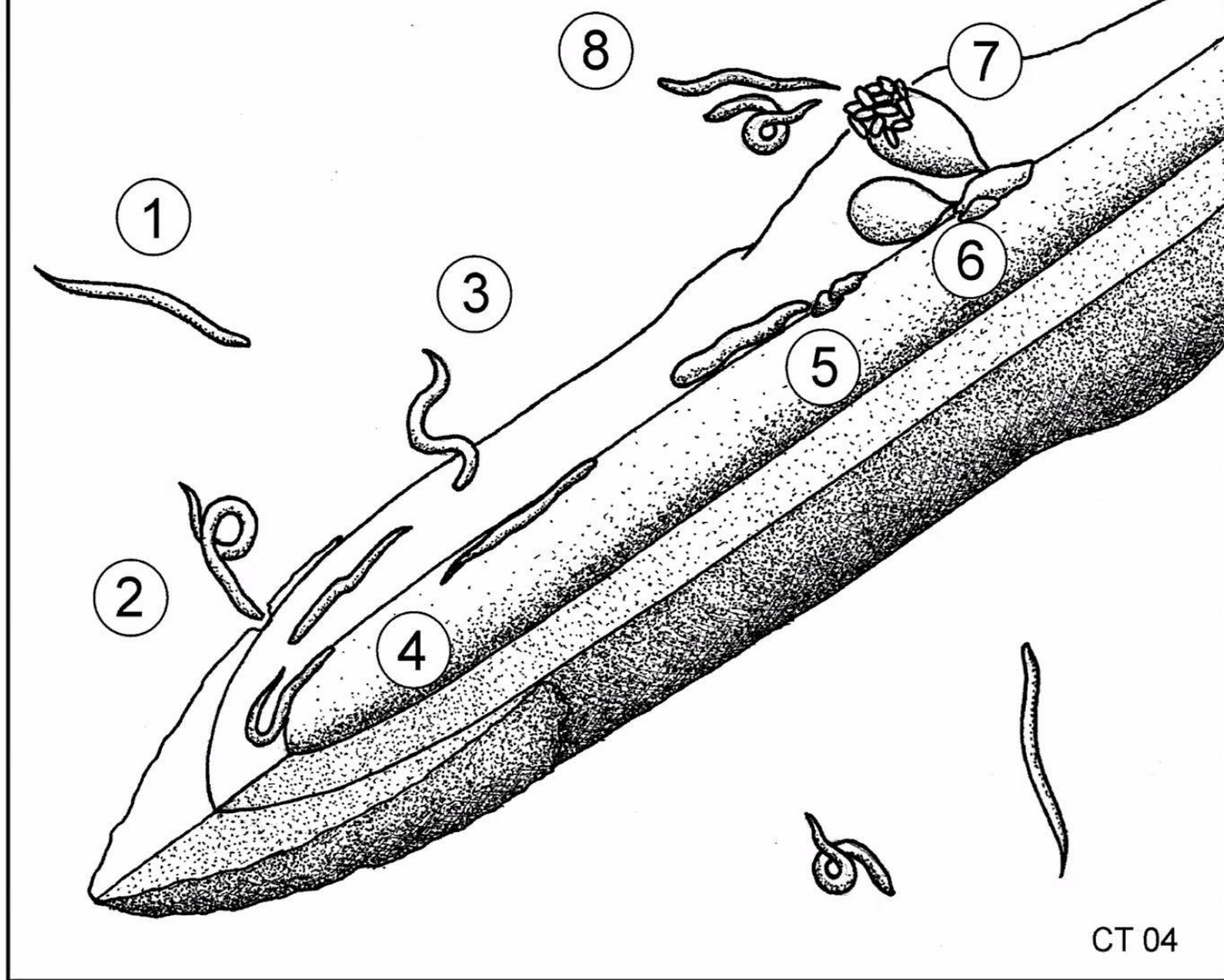
Management heißt integriertes Populationsmanagement, nicht Eradikation

Bodenproben und Diagnostik, lange Fruchtfolgen mit Nichtwirten, resistente und tolerante Sorten, Bekämpfung von Durchwuchskartoffeln und Wirtunkräutern, Maschinen- und Bodenhygiene, Fang- und Zwischenfrüchte sowie zugelassene nematizide oder Biofumigationsverfahren.

04

Engineered Resistance für Gallen- und Zyst-nematoden

Von nährstellenaktiven Promotoren zur Genomeditierung.



Meloidogyne javanica: Riesenzellen

- J2 dringt in die Wurzel ein, wandert in die Gefäßregion, wird sessil und induziert mehrere Riesenzellen.
- Das Weibchen vergrößert sich stark und produziert Eier.
- Riesenzellen entstehen durch tiefgreifende Umprogrammierung: Hypertrophie, wiederholte Kernteilungen und Endoreduplikation, abnorme Zytokinese, hohe Stoffwechselaktivität.
- Histologische Wurzelschnitte zeigen Riesenzellen, vergrößerte Kerne und Nukleolen, das sessile Weibchen und die Gallenarchitektur.



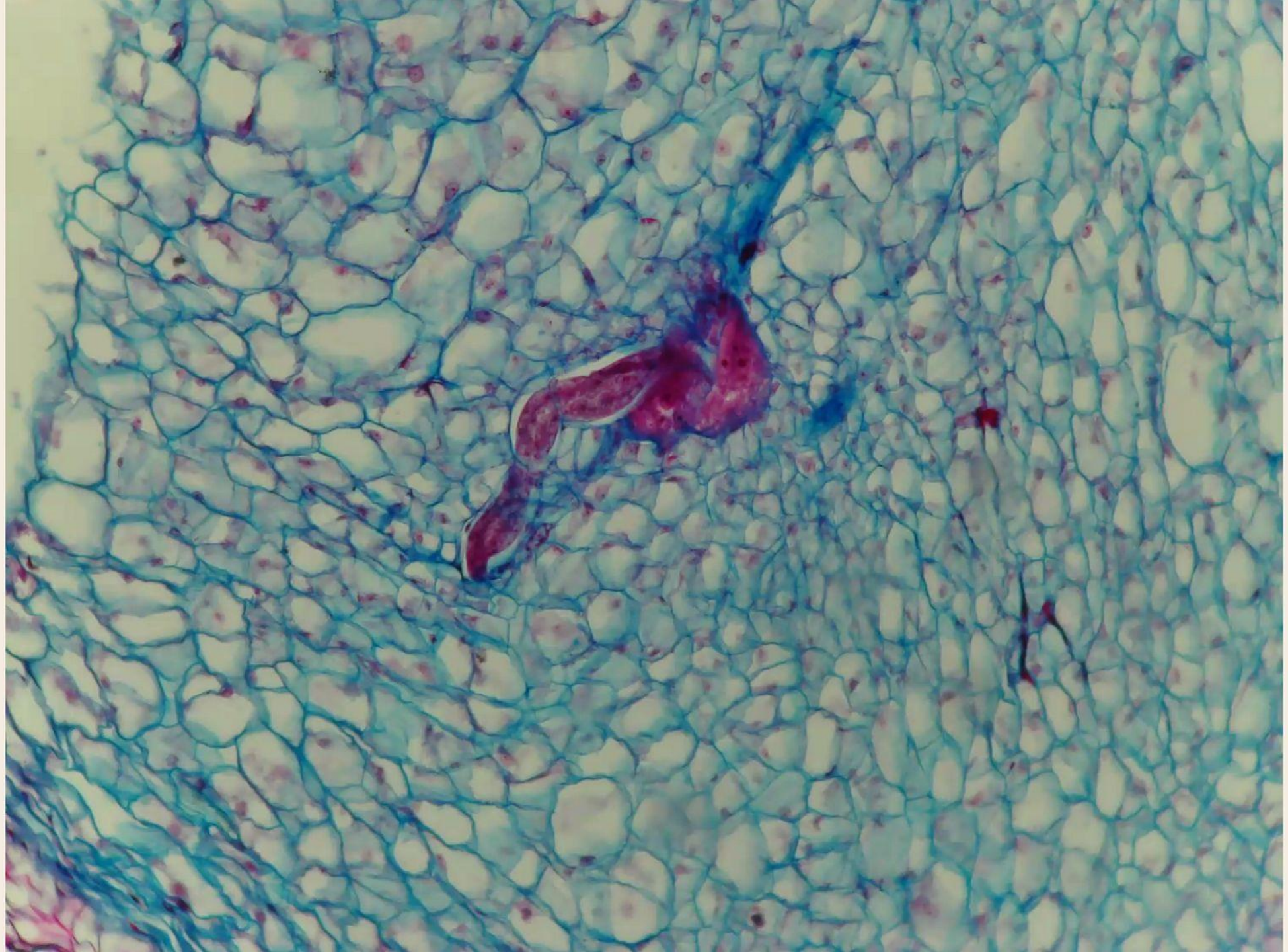
Zystennematoden: Synzytien

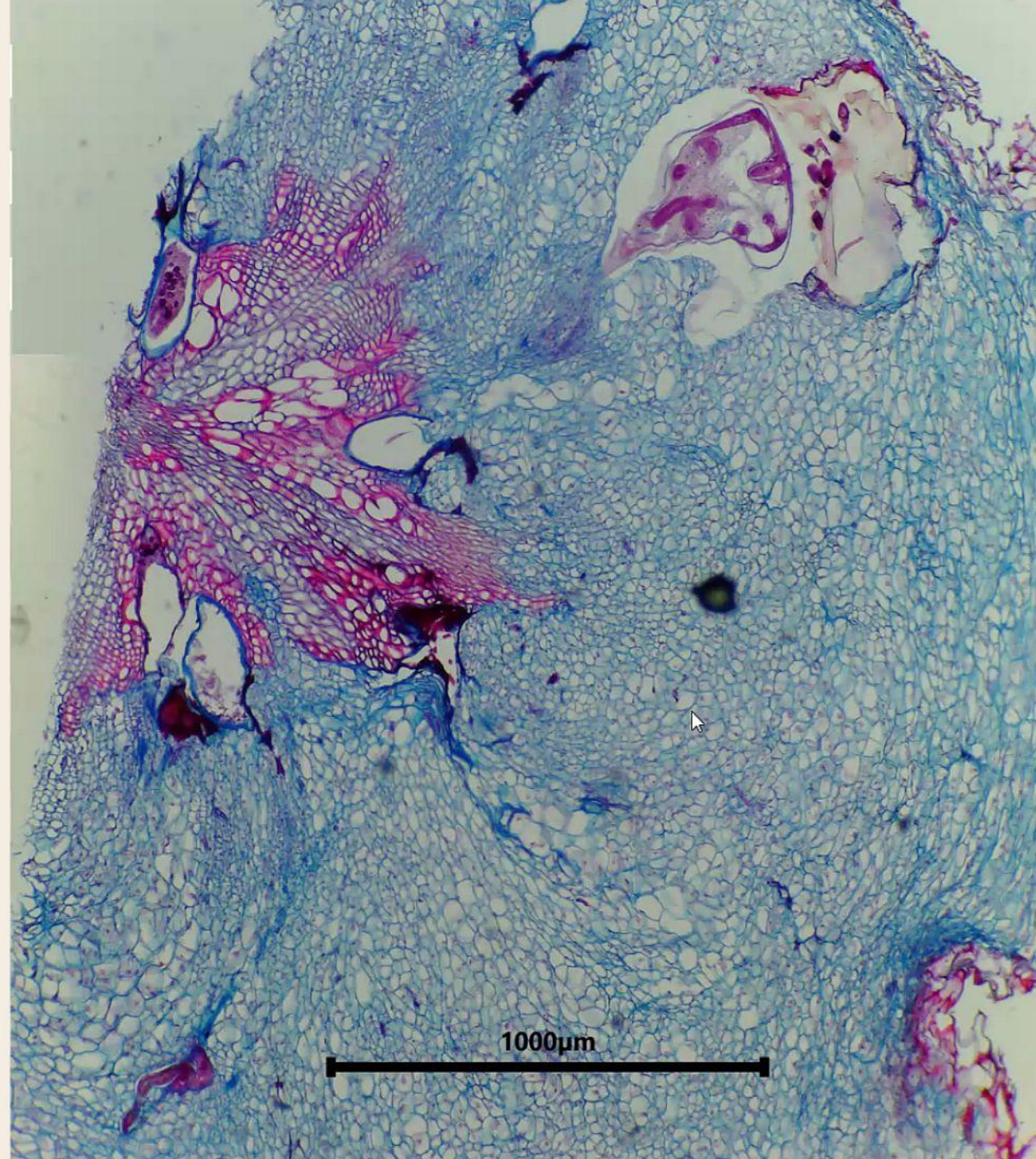
- J2 dringt ein und migriert intrazellulär, dann wird eine initiale Nährzelle ausgewählt.
- Benachbarte Zellen werden schrittweise in ein multinukleäres Synzytium einbezogen.
- Das Weibchen schwillt an, die Eier entwickeln sich; die Cuticula des abgestorbenen Weibchens bildet die schützende Zyste.
- *H. schachtii* vollendet in einer nordeuropäischen Vegetationsperiode meist etwa zwei Generationen, unter wärmeren Bedingungen mehr.

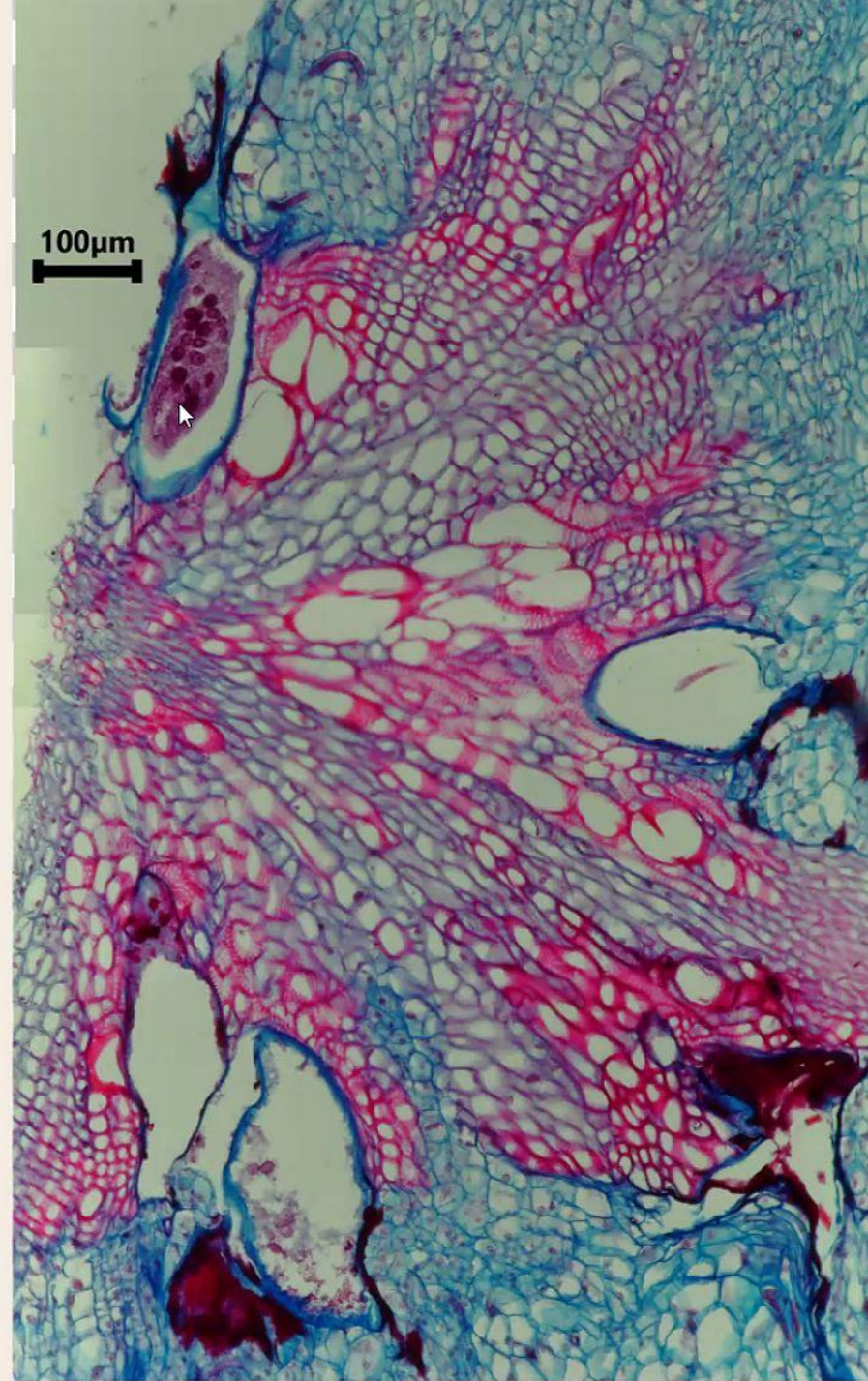
Zwei Lösungen, ein Problem

Meloidogyne macht wenige Zellen enorm groß. Zystennematoden rekrutieren benachbarte Zellen in ein gemeinsames Synzytium.

Trockenheit und Persistenz: Aktive Bodennematoden gehen in Quieszenz oder - bei manchen Arten - in Anhydrobiose über. Zystennematoden schützen die nächste Generation zusätzlich als Eier innerhalb der Zyste.



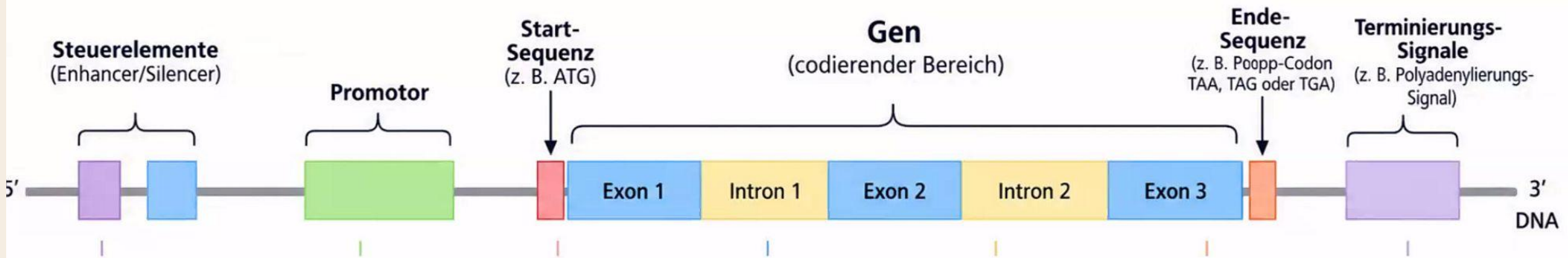




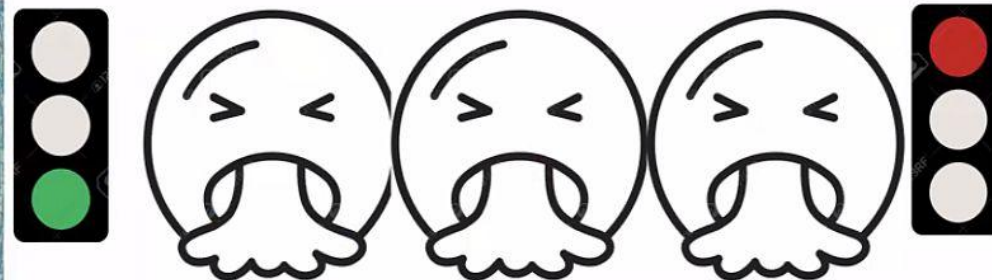
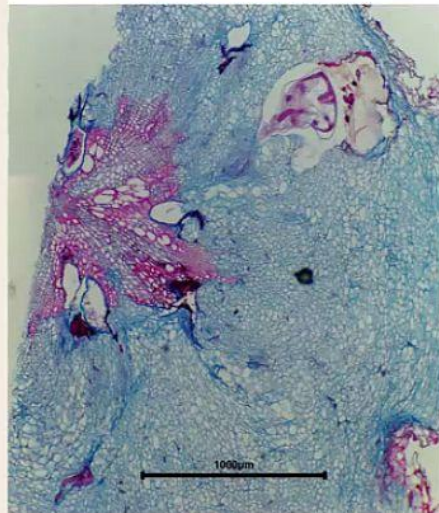
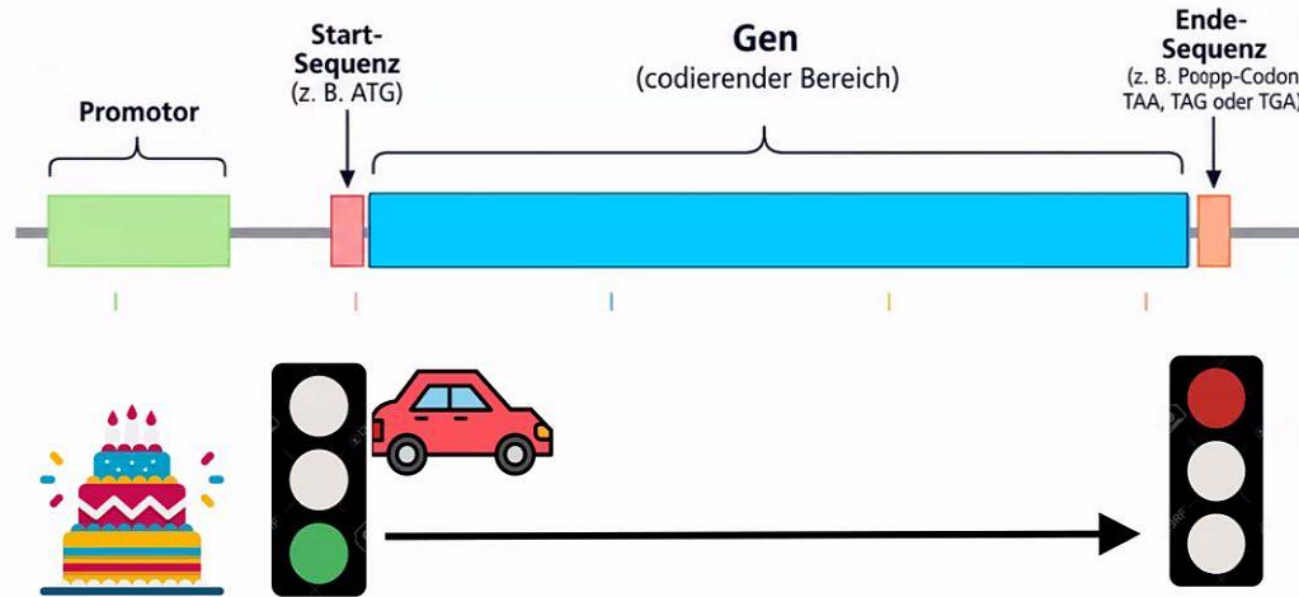
Frühere Forschung: die Promotorstrategie

- Historischer Kontext: In den 1990er- und frühen 2000er-Jahren legte die Biologie der Nährstellen nahe, Resistenz genau dort zu erzeugen, wo der Nematode frisst.
- Arbeiten bis 2004 bei Advanced Technologies Cambridge Ltd, einem früher von British American Tobacco gehaltenen Forschungsunternehmen, in Zusammenarbeit mit der University of Leeds (Mike McPherson, Gruppen von Prof. Howard Atkinson).
- Pflanzliche Promotoren identifizieren, die in nematodeninduzierten Riesenzellen stark aktiviert werden.
- Diese Promotoren beschränken die Expression eines Abwehr-Transgens weitgehend auf das vom Nematoden erzeugte Gewebe.
- Konzeptioneller Vorteil: Die Manipulation der Pflanze durch den Parasiten aktiviert den Promotor selbst - die Infektion löst den Resistenzmechanismus mit aus.

Ein Gen – vereinfacht!

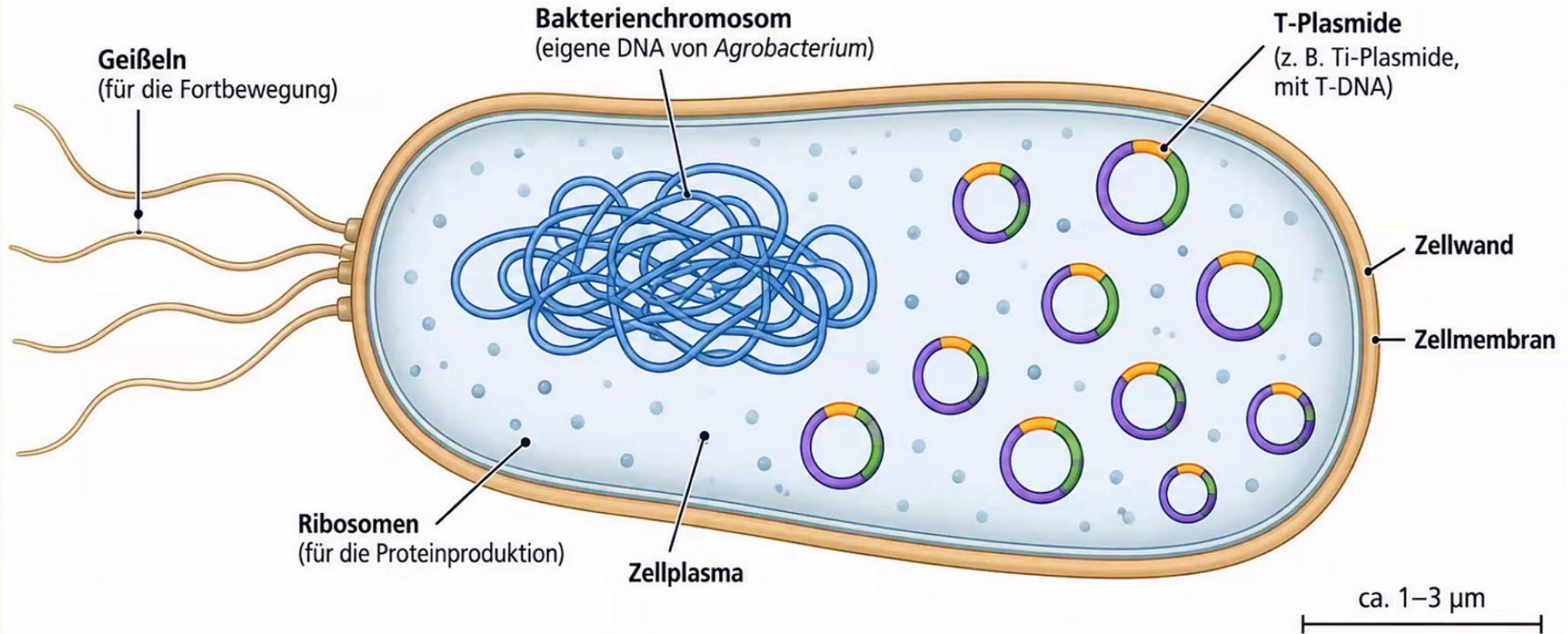


Anti-Nematoden-Gen



Eine Agrobacterium-Bazille

mit ihrer eigenen DNA und vielen T-Plasmiden

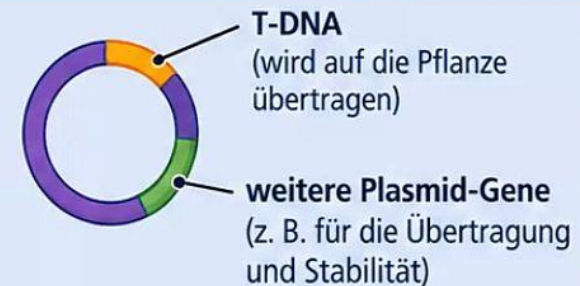


Agrobacterium tumefaciens

- bodenlebendes Bakterium
- besitzt ein eigenes Chromosom
- enthält oft mehrere Kopien des T-Plasmids
- kann DNA (T-DNA) aus den Plasmiden auf Pflanzenzellen übertragen

T-Plasmid

- kreisförmige, extrachromosomale DNA
- trägt einen Abschnitt (T-DNA), der auf Pflanzenzellen übertragen werden kann
- mehrere Kopien pro Zelle sind häufig



Linke Border (LB)

Grenzsequenz der T-DNA
(markiert den Anfang des
zu übertragenden Abschnitts)

Rechte Border (RB)

Grenzsequenz der T-DNA
(markiert das Ende des
zu übertragenden Abschnitts)

T-DNA

(wird auf die Pflanzenzelle
übertragen)

Weitere Plasmid-Gene

z. B. für die Stabilität
des Plasmids.

vir-Gene

Codieren Proteine, die
den Transfer der T-DNA
in die Pflanzenzelle
ermöglichen.

T-Plasmid

(*Agrobacterium tumefaciens*)

ca. 200.000 Basenpaare

Selektionsgene

(z. B. für Antibiotika-
resistenz)
Helfen dabei, das Plasmid
in der Bakterienzelle zu
erhalten.

Replikationsursprung (ori)

Sorgt dafür, dass das
Plasmid in der Bakterienzelle
vervielfältigt wird.

Cystein-Protease-Inhibitoren (Cystatine)

1

Nährstellenaktiver Promotor treibt ein Cystatin-Transgen

2

Der Nematode nimmt den Inhibitor beim Saugen auf

3

Digestive Cystein-Proteasen werden gehemmt

4

Wachstum, Entwicklung und Reproduktion vermindert

- Ein anschauliches Beispiel: Die Pflanze wird so verändert, dass die vom Parasiten induzierte Nahrungsquelle für ihn physiologisch ungeeignet wird.
- Transgene Cystatin-Ansätze zeigten später erhebliche Resistenz gegen PCN in Kartoffel-Feldversuchen.
- Kombinationen mit natürlicher Resistenz illustrierten das Pyramiding von Resistenzmechanismen.

Engineered Resistance: heutiger Stand

Natürliche Resistenz

Resistenzgene und quantitative Resistenz bleiben die wichtigsten kommerziell genutzten Werkzeuge.

Proteinbasierte Ansätze

Protease-Inhibitoren und Cystatine bleiben ein wichtiges Proof-of-Principle.

HIGS / RNAi

Die Pflanze produziert dsRNA gegen ein essentielles Nematodengen; die RNAi-Maschinerie des Tieres unterdrückt das Zieltranskript.

Pyramiding

Erkennungsmechanismen kombinieren, um das Spektrum zu verbreitern und Virulenzevolution zu verlangsamen.

Untersuchte RNAi-Ziele umfassen Effektoren sowie Gene für Entwicklung, Stoffwechsel, neuromuskuläre Funktionen und Parasitismus.

Genomeditierung statt Toxine

- Konzeptioneller Wandel: nicht nur toxische Gene hinzufügen, sondern pflanzliche Suszeptibilitäts- bzw. Kompatibilitätsgene verändern, die der Nematode benötigt.
- Kann die Pflanze einen kritischen Schritt der Riesenzell- oder Synzytiumbildung nicht mehr ausführen, dringt der Nematode zwar ein, scheitert aber an der Reproduktion.
- Kandidatenwege ergeben sich direkt aus der Transkriptomik der Nährstellen: Zellzykluskontrolle, Hormonsignale, Zellwand-Remodelling, Transport und Immunität.
- RNAi, Editierung von Suszeptibilitätsgenen und promotorgesteuerte Ansätze sind wissenschaftlich vielversprechend, kommerziell aber noch deutlich weniger verbreitet als konventionelle Resistenzzüchtung.
- Dauerhaftigkeit ist zentral: Jeder starke Resistenzmechanismus erzeugt Selektionsdruck auf genetisch variable Nematodenpopulationen.

Kernaussagen

- Nematoden besitzen einen relativ einfachen Grundbauplan, zeigen aber außerordentlich raffinierte Wechselwirkungen mit Pflanzen.
- Zysten- und Wurzelgallennematoden ernähren sich nicht nur von Wurzeln: Sie programmieren lebende Pflanzenzellen um.
- Meloidogyne erzeugt Riesenzellen, Globodera und Heterodera erzeugen Synzytien - zwei entwicklungsbiologische Lösungen desselben Ernährungsproblems.
- Die wirtschaftliche Bedeutung folgt direkt aus der Biologie: verborgener Wurzelbefall, hohes Vermehrungspotenzial, langlebige Zysten.
- Die Arbeiten an nährstellenaktiven Promotoren und Cystatinen nahmen die heutige Strategie vorweg, die molekulare Abhängigkeit gezielt auszunutzen.
- Moderne Resistenzforschung verbindet natürliche Resistenz mit RNAi, Effektorbiologie, Transkriptomik und Genomeditierung.
- Nematoden sind für die praktische Mikroskopie gut zugänglich und verbinden molekulare Konzepte mit dem tatsächlichen Tier.

SCHLUSSSATZ

„Das Außergewöhnliche an diesen winzigen Tieren ist nicht nur, dass sie auf Kosten von Pflanzen leben, sondern dass sie eine Pflanze dazu bringen können, die Struktur zu bauen, von der sie sich anschließend ernähren.“

Ausgewählte Quellen zur Vorbereitung

- EPPO-Diagnoseprotokolle für *Globodera rostochiensis* und *G. pallida*; AHDB-Leitlinien zum PCN-Management; BBRO-Leitlinien zu Rübenzystennematoden.
- Blaxter, M. L. et al. (1998): A molecular evolutionary framework for the phylum Nematoda. *Nature* 392: 71-75.
- Quist, C. W., Smant, G. & Helder, J. (2015): Evolution of plant parasitism in the phylum Nematoda. *Annual Review of Phytopathology* 53: 289-310.
- Gheysen, G. & Mitchum, M. G. (2011): How nematodes manipulate plant development pathways for infection. *Current Opinion in Plant Biology* 14: 415-421.
- Mitchum, M. G. et al. (2013): Nematode effector proteins: an emerging paradigm of parasitism. *New Phytologist* 199: 879-894.
- Szakasits, D. et al. (2009): The transcriptome of syncytia induced by *Heterodera schachtii* in *Arabidopsis* roots. *The Plant Journal* 57: 771-784.
- Seinhorst, J. W. (1959): A rapid method for the transfer of nematodes from fixative to anhydrous glycerin. *Nematologica* 4: 67-69.

