

Neue Züchtungstechnologien: Anwendungsbeispiele aus der Pflanzenforschung



IMPRESSUM

HERAUSGEBERIN UND KONTAKT

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
Forum Genforschung
Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • Schweiz
+41 31 306 93 36 • geneticresearch@scnat.ch • geneticresearch.ch  [@ForumGenetic_CH](https://twitter.com/ForumGenetic_CH)

ZITIERVORSCHLAG

Kümin M, Oeschger F, Bearth A, Reinhardt D, Romeis J, Soyk S, Studer B (2023)
Neue Züchtungstechnologien: Anwendungsbeispiele aus der Pflanzenforschung
Swiss Academies Communications 18 (2)

AUTORINNEN

Michael Kümin (Forum Genforschung, SCNAT), Franziska Oeschger (Forum Genforschung, SCNAT),
Angela Bearth (ETH Zürich), Didier Reinhardt (Universität Freiburg), Jörg Romeis (Agroscope),
Sebastian Soyk (Universität Lausanne), Bruno Studer (ETH Zürich)

REVIEW

Etienne Bucher (Agroscope), Patrice de Werra (Schweizerische Gesellschaft für Phytomedizin),
Robert Finger (ETH Zürich), Niko Geldner (Universität Lausanne), Roland Kölliker (Schweizerische
Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften SGPW-SSA), Hans-Peter Meyer (SATW),
Adrian Rügesegger (Stiftung für Technologiefolgen-Abschätzung TA-SWISS)

WEITERE BETEILIGTE

Greta Guarda (Università della Svizzera italiana), Bernard Lehmann (Plattform Wissenschaft und Politik, SCNAT)

REDAKTION

Lucienne Rey (texterey)

ILLUSTRATIONEN

Natascha Jankovski

LAYOUT

Olivia Zwygart

Zusätzliche Beispiele von Genom-editierten Nutzpflanzen und weiterführende Informationen zu den neuen Züchtungstechnologien finden Sie auf der Webseite «Genom-editierte Nutzpflanzen erklärt»: naturwissenschaften.ch/plantediting

ISSN (online) 2297-1807

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.7919401



Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz leistet mit dieser Publikation einen Beitrag zu SDG 2: **«Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern.»**

> sustainabledevelopment.un.org

> eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html

Inhaltsverzeichnis

Neue Züchtungstechnologien: Anwendungsbeispiele aus der Pflanzenforschung	5
Reben mit Resistenz gegen Mehltau	8
Äpfel mit Resistenz gegen Feuerbrand	9
Tomaten mit Resistenz gegen das Jordanvirus	11
Kartoffeln mit Resistenz gegen Kraut- und Knollenfäule	12
Weizen mit verringertem Glutengehalt	13
Literatur	14

Neue Züchtungstechnologien: Anwendungsbeispiele aus der Pflanzenforschung

Das Schweizer Parlament hat den Bundesrat beauftragt, eine Zulassungsregelung für Produkte aus neuen Züchtungstechnologien vorzulegen. Eine Vorbedingung für die Zulassung ist, dass diese Produkte der Schweizer Landwirtschaft, der Umwelt oder den Konsumentinnen und Konsumenten einen Mehrwert bieten. Die Akademie der Naturwissenschaften stellt hier fünf Beispiele von Nutzpflanzen vor, die in der Züchtungsforschung mithilfe der Genom-Editierung entwickelt wurden und die auch für die Schweiz von Interesse sein könnten.

In der Schweiz gilt seit 2005 ein Moratorium für den Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen. Die Bundesversammlung hat dieses Moratorium im März 2022 um weitere vier Jahre verlängert. Gleichzeitig hat sie aber den Bundesrat damit beauftragt, spätestens bis Mitte 2024 einen Erlassentwurf für eine risikobasierte Zulassungsregelung für Nutzpflanzen vorzulegen, «die mit Methoden der neuen Züchtungstechnologien gezüchtet wurden, denen kein transgenes Erbmaterial eingefügt wurde und die gegenüber den herkömmlichen Züchtungsmethoden einen nachgewiesenen Mehrwert für die Landwirtschaft, die Umwelt oder die Konsumentinnen und Konsumenten haben.»¹

Welche Techniken von der Zulassungsregelung erfasst werden sollen, wurde dabei nicht explizit festgehalten. Die Genom-Editierung ist der meistdiskutierte Ansatz neuer Züchtungstechnologien. Sie ermöglicht es, an vorbestimmten Stellen im Erbgut Änderungen vorzunehmen. Die Genom-Editierung kann unter anderem genutzt werden, um kleine Mutationen zu bewirken (siehe Kasten S. 7). So entstehen Veränderungen, die im Prinzip auch spontan in der Natur oder durch Mutationszüchtung auftreten und in der herkömmlichen Züchtung genutzt werden können. In der Schweiz und in der EU gelten diese Verfahren zurzeit rechtlich als Gentechnik und die daraus entstandenen Pflanzen als gentechnisch veränderte Organismen (GVO).²

Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz stellt hier fünf Beispiele aus der internationalen Züchtungsforschung vor, die potenziell auch in der Schweiz einen Mehrwert bieten können. Um diesen Zusatznutzen einschätzen zu können, orientiert sich diese Schrift an den Zielen für die Pflanzenzüchtung, wie sie die «Strategie Pflanzenzüchtung 2050» des Bundesamts für Landwirtschaft festhält: Die Pflanzenzüchtung soll insbesondere dazu beitragen, dass weiterhin hochwertige, an die vielfältigen Standortbedingungen und Anbausysteme der Schweiz angepasste Sorten zur Verfügung stehen. Angestrebt werden also Nutzpflanzen, die auch bei sich ändernden Klimabedingungen hohe, stabile Erträge liefern und dabei die natürlichen Ressourcen schonen.³

Die vorgestellten Pflanzen enthalten keine artfremden Gene, sondern Mutationen, die durch die Genom-Editierung gezielt ausgelöst wurden. Die kurze Zusammenstellung ist nicht als umfassende Analyse der ökologischen, gesundheitlichen oder sozio-ökonomischen Auswirkungen zu verstehen, die eine Einführung der hier vorgestellten Pflanzen in die Schweizer Landwirtschaft und den Schweizer Markt hätte. Vielmehr sollen die vorgestellten Beispiele als Grundlage dienen, um darüber zu diskutieren, ob und unter welchen Bedingungen die neuen Züchtungstechniken einen Mehrwert für die Landwirtschaft, die Umwelt oder die Konsumentinnen und Konsumenten bieten könnten, wie es der parlamentarische Auftrag verlangt.

Weltweit sind mehr als 700 Forschungsprojekte bekannt, die Nutzpflanzen mithilfe der Genom-Editierung entwickeln bzw. entwickelt haben.⁴ Diese Schrift stellt also nur eine kleine Auswahl an Beispielen vor. Die Züchtungsforschung arbeitet an Sorten mit unterschiedlichsten Eigenschaften wie verbesserter Nährstoffzusammensetzung, höherem Ertrag, Resistenz gegenüber Schädlingen und Krankheiten, Herbizidtoleranz, Widerstandskraft gegen Trockenheit und Hitze oder längerer Lagerbarkeit (siehe Tabelle).

Tabelle: Anzahl Projekte aus der weltweiten Pflanzenzüchtungsforschung mit Genom-Editierung, kategorisiert nach Züchtungsziel

Züchtungsziel	Beschreibung	Anzahl Projekte
Verbesserter Nährwert	Veränderte Zusammensetzung von Vitaminen, Stärke, Ölen, Eiweissen, Nahrungsfasern, um den Nährwert zu verbessern, sowie Reduktion natürlich vorkommender toxischer Substanzen, Allergenen etc.	156
Wachstum und Ertrag	Erhöhter Ertrag in Bezug auf die Effizienz der Photosynthese, die Grösse oder das Gewicht der Früchte oder die Anzahl Blüten, Samen und Früchte. Verbesserte Pflanzenarchitektur wie z. B. Pflanzenhöhe und -form, Wachstumsmuster und Fruchtformen.	156
Krankheits- und Schädlingsresistenz	Resistenz gegen Pflanzenkrankheiten, u.a. durch Bakterien, Viren, Pilze, Insekten oder Fadenwürmer verursacht.	126
Industrielle Anwendungen	Anwendungen von industriellem Interesse wie beschleunigte Züchtungsverfahren, Biotreibstoffproduktion, effiziente Stickstoffnutzung etc.	99
Toleranz gegen abiotischen Stress	Toleranz gegen abiotische Stressfaktoren wie Dürre, Hitze, Kälte, Salz, Überschwemmung und UV-Bestrahlung.	58
Herbizidtoleranz	Toleranz der Pflanzen gegen verschiedene Arten von Unkrautbekämpfungsmitteln (Herbiziden).	52
Geschmack und Farbe	Veränderter Geschmack oder veränderte Farbe des Produkts.	40
Lagerfähigkeit	Verbesserung der Lagereigenschaften, wie z. B. längere Haltbarkeit, veränderte Lagerungsanforderungen oder Verhinderung von Braunfärbung.	15

Weltweit sind aktuell 702 Forschungsprojekte bekannt, welche die Genom-Editierung in über 60 verschiedenen Pflanzenarten anwenden. Die am häufigsten bearbeiteten Kulturpflanzen sind Reis, Tomate, Mais, Weizen, Soja, Raps und Kartoffeln. Dabei wird die Veränderung einer breiten Palette von Eigenschaften angestrebt. Etwa ein Viertel der Projekte befassen sich mit Schädlings- und Krankheitsresistenzen (126 Projekte) oder Toleranz gegen abiotischen Stress (58 Projekte), welche für die Schweiz Landwirtschaft besonders relevant sein könnten. (Quelle: EU-SAGE⁴ und Dima et al. 2022⁵)

Für die Schweizer Landwirtschaft würden momentan in erster Linie Sorten mit Resistenz gegen Schädlinge und Krankheiten einen Mehrwert bringen, weil dadurch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln reduziert werden kann. Zudem gibt es nicht gegen alle Schädlinge und Krankheiten effektive Pflanzenschutzmittel, etwa weil die jeweiligen Erreger gegen die Mittel resistent geworden oder Wirkstoffe nicht mehr zugelassen sind. In diesen Fällen sind resistente Pflanzensorten essentiell, um Ertragsausfälle zu vermindern. Ebenfalls von Interesse für die Schweiz sind Sorten, die den veränderten Klimabedingungen, z. B. Trockenheit oder Hitze, angepasst sind. Einzelne Genveränderungen können die Hitze- und Trockentoleranz zwar verbessern, aber insgesamt handelt es sich um eine komplexe Eigenschaft, die von einer Vielzahl von Faktoren und Genen abhängt. Deshalb befinden sich die meisten Pflanzen mit den entsprechenden Merkmalen erst im Stadium der Grundlagenforschung.⁶ Für Konsumentinnen und Konsumenten könnten schliesslich auch Pflanzen einen Mehrwert bringen, die eine verbes-

serte Nährstoffzusammensetzung aufweisen, wie bspw. einen höheren Vitamingehalt, oder die weniger Allergene und natürlich vorkommende gesundheitsschädigende Substanzen enthalten.

Die fünf hier vorgestellten Beispiele fokussieren auf die beiden Eigenschaften der Krankheitsresistenz und der Allergenreduktion. Zudem wurden Nutzpflanzen gewählt, die für die Schweizer Landwirtschaft von grosser Bedeutung sind: Weizen ist der wichtigste Energielieferant in der Schweizer Ernährung und wird fast auf einem Drittel der hiesigen Ackerflächen angebaut.⁷ Kartoffeln sind ebenfalls beliebte Grundnahrungsmittel, die zudem zum grössten Teil aus Schweizer Produktion stammen.⁸ Äpfel und Tomaten gehören zu den meistkonsumierten Früchten bzw. Gemüsen. Äpfel stammen dabei grösstenteils aus der Schweiz,⁸ bei den Tomaten sind es mehr als die Hälfte.⁹ Weinreben schliesslich sind Teil der wirtschaftlich bedeutsamsten Kulturpflanzen der hiesigen Landwirtschaft. Kartoffeln, Äpfel und Weinreben sind allerdings

auch jene Kulturarten, die in der Schweiz am häufigsten mit Pflanzenschutzmitteln behandelt werden. Insgesamt wird mengenmässig etwa die Hälfte aller in der Schweiz eingesetzten Pflanzenschutzmittel für diese drei Kulturarten verwendet.¹⁰

Alle vorgestellten Beispiele befinden sich noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Sie sind in erster Linie als Modelle zu verstehen, die zeigen, dass die vorgestellten Anwendungen im Prinzip machbar sind. Ob sich die

hier präsentierten Beispiele bis zur Marktreife entwickeln lassen und sich am Markt durchsetzen würden, ist offen. Das langjährige Moratorium und die hohen regulatorischen Hürden in der Schweiz und in Europa haben bisher die Anreize reduziert, mit Hilfe der Genom-Editierung gezielt Sorten mit relevanten Eigenschaften für die Schweiz zu entwickeln und unter hiesigen Feldbedingungen zu testen. Es ist davon auszugehen, dass sich dies unter angepassten regulatorischen Rahmenbedingungen ändern würde.

Genom-Editierung

Bei der Genom-Editierung wird das Erbgut einer Pflanze an bestimmten Stellen verändert, um dadurch gewünschte Eigenschaften zu erhalten. Dabei werden molekulare Werkzeuge wie das CRISPR/Cas-System genutzt, die den DNA-Doppelstrang der Pflanze an einer zuvor festgelegten Stelle durchtrennen können. Bei der nachfolgenden Schliessung der Schnittstelle durch das natürliche Reparatursystem der Pflanze können Veränderungen (Mutationen) im Genom entstehen. Die Methode kann unterschiedlich verwendet werden: Bisher werden in den meisten Fällen kleine Mutationen genutzt, um ein einzelnes Gen auszuschalten. Es ist aber auch möglich, mehrere Gene gleichzeitig auszuschalten oder gezielt umzuschreiben. Ausserdem kann die Methode auch genutzt werden, um zusätzliche Gene an bestimmten Stellen im Genom einzubauen. Diese Gene können aus der gleichen Art (cisgen) oder einer anderen Art (transgen) stammen.

Das CRISPR/Cas-System kann auf verschiedene Arten in die Pflanze gebracht werden: Es kann in das Genom eingebaut und anschliessend durch Kreuzung oder andere Methoden wieder entfernt werden. Das System kann aber auch nur temporär in einzelne Zellen eingeführt werden, die es mit der Zeit wieder abbauen. In beiden Fällen ist das CRISPR/Cas-System im Endprodukt nicht mehr enthalten. Die beabsichtigte Veränderung, die durch die Pflanze an der Schnittstelle eingefügt wurde, bleibt hingegen an der festgelegten Stelle im Genom bestehen und ruft die gewünschten Eigenschaften hervor.

Die Werkzeuge der Genom-Editierung werden laufend weiterentwickelt und können so in naher Zukunft voraussichtlich noch effizienter und zielgerichteter eingesetzt werden.¹¹ So können beispielsweise mit dem sogenannten «Base-Editing» einzelne Buchstaben im Genom umgeschrieben werden, ohne dass der DNA-Doppelstrang durchtrennt wird.

Reben mit Resistenz gegen Mehltau



Das Wichtigste in Kürze

- Der Echte und der Falsche Mehltau verursachen erhebliche Ernteaufschläge im Schweizer Weinbau.
- Die Krankheitserreger werden mit grossen Mengen an Pflanzenschutzmitteln bekämpft.
- Die Züchtung von resistenten Weinreben ist sehr aufwendig und dauert Jahrzehnte.
- Mit CRISPR/Cas wurden Reben resistenter gegen Mehltau gemacht, ohne neue Gene einzufügen.

Herausforderung

Der Falsche Mehltau (*Plasmopara viticola*) und der Echte Mehltau (*Erysiphe necator*) der Weinrebe gehören zu den häufigsten Krankheiten im Schweizer Weinbau. Die Erreger können alle grünen Teile der Rebe befallen und lassen die Trauben klein und trocken werden. Insbesondere der Falsche Mehltau breitet sich bei längerem Regenwetter oft rasant in Schweizer Rebbergen aus und führt zu grossen Ernteaufschlägen. Im Sommer 2021 fiel dem Mehltau in einzelnen Weinbergen und Parzellen die gesamte Traubenernte zum Opfer.¹²

Aktuelle Strategie

Um den Befall mit Mehltau zu verhindern, werden Reben sowohl im konventionellen als auch im biologischen

Anbau präventiv mit Schwefel- und/oder Kupferfungiziden behandelt. Kupfer hat dabei den Nachteil, dass er sich im Boden anreichert. Nach einem Befall werden im konventionellen Anbau zusätzlich synthetische Fungizide verwendet. Allerdings ist bei Regenwetter eine Behandlung oft nicht möglich, oder es müssen grosse Mengen an Pflanzenschutzmitteln ausgebracht werden.¹³ Insgesamt werden ca. ein Drittel aller in der Schweizer Landwirtschaft eingesetzten Pflanzenschutzmittel im Weinbau eingesetzt, die meisten davon sind Fungizide.¹⁰ Es gibt gegen Mehltau resistente Rebensorten, die weniger Fungizide benötigen. Allerdings werden diese in der Schweiz momentan nur auf 1–2 Prozent der Anbauflächen angebaut.¹⁴

Potenzial der neuen Züchtungsverfahren

Bei der Rebe gestaltet sich das Einkreuzen von Resistenzen in etablierte Sorten als sehr aufwendig. Die resistente Sorte muss immer wieder mit einer etablierten Sorte gekreuzt werden, bis sie die für die Weinproduktion erwünschten Eigenschaften (z. B. Aroma, Farbe) erhält. Da Reben eine lange Generationszeit haben, kann dieser Prozess 15–20 Jahre dauern. Die charakteristischen Eigenschaften einer etablierten Sorte gehen dabei verloren. Die Genom-Editierung bietet die Möglichkeit, eine etablierte Sorte, wie z. B. 'Chasselas' oder 'Pinot Noir', gegen Krankheiten resistenter zu machen, ohne dass dabei ihre anderen Eigenschaften verändert werden.

Entwicklungsstand

Das Genom der kernlosen Tafeltraube 'Thompson Seedless' konnte mit CRISPR/Cas an vier Stellen so verändert werden, dass die Rebe deutlich resistenter gegen den Befall durch Echten Mehltau und Grauschimmelfäule, eine weitere häufige Rebenkrankheit, wurde. Dafür wurde das CRISPR/Cas-System durch ein Bakterium vorübergehend in die Pflanze eingebracht und nicht in das Genom integriert. Deshalb sind in der Pflanze nach einer Generation keine artfremden Gene oder Proteine mehr vorhanden. Auch unbeabsichtigte Veränderungen (sogenannte Off-Target-Effekte) konnten im Genom nicht nachgewiesen werden.¹⁵

Ausblick

Es ist zu prüfen, ob sich die Genom-editierte Rebe gegen den Falschen Mehltau ebenfalls bewährt oder ob sie ansonsten mittels zusätzlicher Veränderungen auch gegen diesen Erreger resistent gemacht werden kann. Wenn dies gelingt, könnten in Zukunft mit dieser Methode verschiedene beliebte und etablierte Weinrebensorten mit ungleich weniger Züchtungsaufwand resistenter gegen die drei häufigsten Krankheiten (Falscher und Echter Mehltau sowie Grauschimmelfäule) gemacht werden. Dies könnte dazu beitragen, Ernteaufschläge zu verhindern und den Fungizideinsatz im Weinbau deutlich zu reduzieren.

Äpfel mit Resistenz gegen Feuerbrand



Das Wichtigste in Kürze

- Der Feuerbrand ist eine der grössten Gefahren für den Schweizer Obstbau.
- Es gibt kaum effektive Mittel gegen den bakteriellen Krankheitserreger.
- Die Züchtung robuster Sorten ist aufwendig, und charakteristische Eigenschaften etablierter Sorten gehen dabei verloren.
- Mit CRISPR/Cas ist es gelungen, etablierte Apfelsorten resistenter gegen Feuerbrand zu machen.

Herausforderung

Das aus den USA kommende Feuerbrandbakterium (*Erwinia amylovora*) breitet sich seit 30 Jahren in der Schweiz aus und hat zu grossen Schäden in Obstanlagen geführt. Insbesondere die ökologisch und kulturlandschaftlich wertvollen Hochstammobstbäume (Quitten-, Birnen- und Apfelbäume) sind stark gefährdet. Blätter und Blüten befallener Pflanzen welken und verfärben sich braun oder schwarz. Junge Pflanzen sterben innert weniger Wochen ab, ältere nach einigen Jahren. Das Bakterium entwickelt sich im Frühjahr unter bestimmten Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen und breitet sich im Sommer rasch durch Regen, Wind, Vögel, Insekten und den Menschen aus. Die Krankheit gilt als besonders schwierig zu bekämpfen.

Aktuelle Strategie

Lange hat man in der Schweiz versucht, den Erreger mit Quarantäne und dem grossräumigen Fällen von befallenen Bäumen zu eliminieren. Schätzungen zufolge wurden zwischen 2000 bis 2014 zur Bekämpfung des Feuerbrands über 300 000 Apfel- und Birnenbäume gerodet, davon etwa 100 000 Hochstammobstbäume.¹⁶ Diese Strategie wurde 2020 aufgegeben. Seither beruht das Feuerbrand-Management auf der Wahl robuster Sorten sowie auf der Überwachung und Sanierung von Obstanlagen, der Umsetzung von Hygienemassnahmen und der Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln.¹⁷ Als Pflanzenschutzmittel kommen ein Hefepräparat, essigsaurer Tonerde und Aluminiumkaliumsulfat zum Einsatz. Mit diesen lässt sich der Befall um 50 bis 70 Prozent reduzieren.¹⁸ Der Einsatz von Antibiotika, die hierzulande während einigen Jahren als Notfallmassnahme gegen Feuerbrand verwendet werden durften, ist seit 2016 nicht mehr erlaubt.¹⁹

Die meisten der im Handel erhältlichen Apfel- und Birnensorten (wie 'Braeburn', 'Gala' oder 'Golden Delicious' bzw. 'Conference' und 'Williams Christ') sind hoch anfällig für Feuerbrand.²⁰ Es gibt mehrere alte Sorten mit erhöhter Widerstandskraft gegen die Krankheit, und auch einige wenige neuere Sorten (z. B. 'Ladina' und 'Rewena'), die bisher allerdings kaum verbreitet sind. Diese Sorten können zwar auch befallen werden, aber das Bakterium breitet sich nach erfolgter Blüten- oder Triebinfektion weniger schnell in der Wirtspflanze aus als bei anfälligen Sorten.

Potenzial der neuen Züchtungsverfahren

Die Züchtung neuer Kernobstsorten ist ein langer Prozess. Nach einer Kreuzung können die Früchte von Apfelsämlingen erst nach mehreren Jahren zum ersten Mal geerntet und beschrieben werden. Zudem sind meistens mehrere Kreuzungen nötig, um Resistenzeigenschaften mit optimaler Fruchtqualität zu kombinieren. Deshalb dauert es bis zu zwanzig Jahre, bis eine neue resistente Sorte vorliegt.²¹ Danach müssen nochmals fünf Jahre für die Sortenprüfung und die Markteinführung eingerechnet werden. Genom-Editierung verfügt über das Potenzial, bereits am Markt erfolgreiche Apfelsorten gezielt resistenter gegen Feuerbrand zu machen, und das deutlich schneller als durch konventionelle Züchtungen. Denn bei der Genom-Editierung sind keine Rückkreuzungen nötig, um unerwünschte Eigenschaften zu verhindern. Ausserdem können mehrere Resistenzmechanismen in einer Sorte kombiniert werden. Dies senkt die Gefahr, dass das Bakterium Resistenzen durchbrechen kann.

Entwicklungsstand

Mittels CRISPR/Cas konnten Forscherinnen und Forscher in Pflanzen der Apfelsorten 'Gala' und 'Golden Delicious' ein Gen ausschalten, das ihre Empfindlichkeit für Feuerbrand erhöht. Das CRISPR/Cas-System wurde nur vorübergehend in das Genom integriert und anschliessend wieder entfernt. Dabei blieben funktionslose Fragmente der für das CRISPR/Cas-System eingefügten DNA im Genom zurück. Ansonsten wurden keine unbeabsichtigten Veränderungen im Erbgut festgestellt. Die editierten Pflanzen zeigten unter Versuchsbedingungen nach einer Feuerbrandinfektion ca. 50 Prozent weniger Symptome.²²

Ausblick

Falls sich die oben vorgestellte Strategie zur Verbesserung der Resistenz gegen Feuerbrand unter Feldbedingungen bewährt, kann sie auch in anderen anfälligen Apfelsorten angewendet werden. Temporär eingebrachte CRISPR/Cas-Systeme könnten die Züchtung zusätzlich beschleunigen und zudem verhindern, dass Fragmente des molekularen Werkzeugs im Genom der Apfelsorten zurückbleiben.²³ Um die Abwehrkraft gegen Feuerbrand noch weiter zu verbessern, könnten mithilfe von CRISPR/Cas allenfalls mehrere Resistenzmechanismen kombiniert werden. Eine Kombination mehrerer Resistenzmechanismen zusammen mit einem guten Resistenzmanagement drängt sich auch deshalb auf, weil sich die Feuerbrandbakterien relativ schnell genetisch anpassen können.

Tomaten mit Resistenz gegen das Jordanvirus



Das Wichtigste in Kürze

- Das Jordanvirus breitet sich weltweit rasch aus, ist schwer zu bekämpfen und führt zu Ausfällen in der Tomatenproduktion.
- In der Genom-Editierung steckt das Potenzial, schnell und effizient Resistenzen in eine Vielzahl von Tomatensorten einzubringen.
- Durch die Kombination verschiedener Resistenzmechanismen würde das Durchbrechen der Resistenz deutlich erschwert.

Herausforderung

Das Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV), auch Jordanvirus genannt, gehört zur Gattung der Tobamoviren und wurde erstmals 2014 in Israel beschrieben. Seither hat es sich schnell stark ausgebreitet und befallt weltweit Tomatenpflanzen. Auch in Europa werden seit 2018 immer wieder Befälle gemeldet, darunter auch ein Fall in der Schweiz.²⁴ Die Blätter infizierter Pflanzen wachsen weniger stark und verfärben sich mosaikartig. Mit der Zeit fängt die Pflanze an zu welken und stirbt ab. Die Tomaten zeigen gelbe Flecken und bleiben orange und damit unverkäuflich. Tobamoviren sind besonders gefährlich, weil sie schon in kleinsten Mengen infektiös, sehr langlebig und hitzestabil sind. Deshalb kann das Jordanvirus leicht durch kontaminierte Samen über lange Strecken transportiert und im Gewächshaus durch Hände oder Werkzeuge verteilt werden.²⁵⁻²⁷

Aktuelle Strategie

Das Jordanvirus gilt in der Schweiz und der EU als «potenzieller Quarantäneorganismus»²⁴ und ist somit melde- und bekämpfungspflichtig. Tomatenkulturen lassen sich bisher nur mittels aufwendiger Hygienemassnahmen schützen. In Verdachtsfällen gilt es, den Bereich abzusperren und die verdächtigen Pflanzen zu testen. Da bereits befallene Pflanzen nicht behandelt werden können, muss der ganze Pflanzenbestand entfernt und verbrannt werden. Betroffene Gewächshäuser müssen anschliessend aufwendig desinfiziert werden. Erste gegen das Jordanvirus resistente Sorten sind erhältlich und werden in der Schweiz versuchsweise angebaut.²⁸

Potenzial der neuen Züchtungsverfahren

Das Jordanvirus ist nahe verwandt mit dem Tomaten-Mosaikvirus, das lange die grösste Bedrohung für den Tomatenanbau darstellte. In den 1950er- und -60er-Jahren wurden jedoch zwei Resistenzgene gegen das Mosaikvirus entdeckt und in einzelne Elitesorten eingekreuzt. Die Fokussierung der Tomatenzucht auf diese Resistenzgene hat zwar das Mosaikvirus 50 Jahre lang in Schach gehalten, gleichzeitig aber auch zu einer Verarmung der genetischen Vielfalt bei den angebauten Tomaten geführt.²⁹ Das Jordanvirus hat nun diese Resistenz überwunden und kann sich in den heutigen Tomatenkulturen schnell verbreiten. Mittels Genom-Editierung könnten zusätzliche Resistenzmechanismen sowohl in verschiedene Elitesorten als auch in alte Sorten eingebracht werden. So liesse sich die Widerstandskraft einer Vielfalt von Tomatensorten gegen das Jordanvirus relativ rasch erhöhen. Eine grössere genetische Vielfalt der angebauten Tomaten und die gleichzeitige Kombination mehrerer Resistenzmechanismen würden das Risiko verringern, dass die Resistenzen der Tomaten erneut überwunden werden und neue Virenarten entstehen.

Entwicklungsstand

Es ist schon lange bekannt, dass Tobamoviren in der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* zwei bestimmte Gene (*TOM1* und *TOM3*) für ihre Vermehrung benötigen. *TOM1* kommt in Tomaten in fünf Varianten vor (*TOM1a-e*). Einer Forschungsgruppe ist es gelungen, mit CRISPR/Cas9 in Pflanzen der kommerziellen Tomatensorte 'Craigella' die vier relevanten Versionen (*a-d*) des Gens auszuschalten. Das CRISPR/Cas9-System wurde anschliessend ausgekreuzt, so dass es nicht mehr im Genom vorhanden ist. Unter Versuchsbedingungen erwies sich dieser Ansatz als sehr erfolgreich: Einige Tage nach dem Einbringen des Jordanvirus konnten in den Genom-editierten Tomatenpflanzen keine Viruspartikel nachgewiesen werden, während die nicht-editierten Pflanzen stark vom Virus befallen waren.³⁰

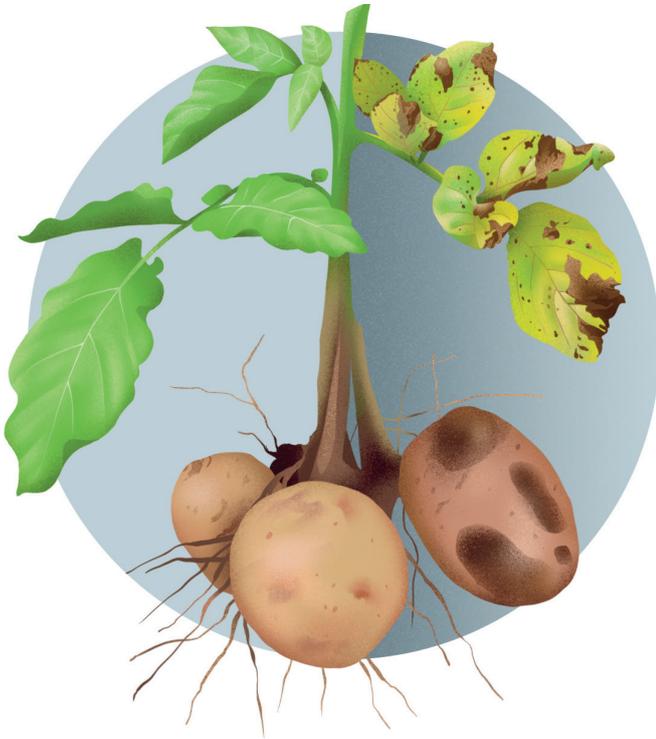
Eine andere Forschungsgruppe hat mit derselben Methode sowohl *TOM1a* als auch *TOM3* ausgeschaltet. Diese Tomatenpflanzen waren ebenfalls deutlich resistenter gegen das Jordanvirus als nicht-editierte Pflanzen. Die Resultate hingen allerdings stark von der verwendeten Sorte ab.³¹

Ausblick

Das Beispiel zeigt, dass mit der Genom-Editierung in bestehenden Tomatensorten mehrere Gene gleichzeitig ausgeschaltet und somit rasch Resistenzen gegen neu auftretende Krankheitserreger verbessert werden können. In Sorten, die bereits tolerant oder resistent gegenüber dem Jordanvirus sind, könnte das zusätzliche Ausschalten von *TOM1/TOM3* zu einer starken und lange anhaltenden Resistenz beitragen, da das Virus mehrere Resistenzmechanismen überwinden müsste.³⁰

Allerdings scheint das Ausschalten von *TOM1/TOM3* nicht in allen Sorten dieselbe Auswirkung zu haben. Der Ansatz wird sich deshalb für verschiedene Sorten und unter Produktionsbedingungen bewähren müssen. Falls dies gelingt, könnten dank seiner Hilfe künftig eine Vielfalt von virusresistenten Tomatensorten zur Verfügung stehen.

Kartoffeln mit Resistenz gegen Kraut- und Knollenfäule



Das Wichtigste in Kürze

- Die Kraut- und Knollenfäule führt zu grossen-Ernteausschlägen im Kartoffelanbau.
- Um Kartoffeln vor der Krankheit zu schützen, werden sie jährlich mehrmals mit Fungiziden behandelt.
- Resistente Sorten zu züchten, die alle Ansprüche in Bezug auf Geschmack, Verarbeitungsfähigkeit, Haltbarkeit, usw. erfüllen, ist eine grosse Herausforderung.
- Etablierte Sorten, die mittels CRISPR/Cas verändert wurden, haben sich unter Versuchsbedingungen als robust gegen Kraut- und Knollenfäule erwiesen.

Herausforderung

Die Kraut- und Knollenfäule ist vor allem durch die grosse Hungersnot in Irland bekannt, der im 19. Jahrhundert etwa eine Million Menschen zum Opfer fielen. Aber auch heute noch sind grosse Schäden im Kartoffelanbau dieser Krankheit geschuldet. Im nasskalten Sommer 2021 breitete sie sich in der ganzen Schweiz aus und führte insbesondere bei Biokartoffeln zu grossen Ertragsausfällen.³² Die Krankheit wird vom Erreger *Phytophthora infestans* verursacht, der im Frühjahr einzelne Stauden infiziert und sich dann in Windrichtung auf den Kartoffelfeldern

verbreitet. Die Infektion befällt zuerst das Kraut und greift dann auf die Knollen über. Bei feuchtwarmer Witterung kann ein befallener Kartoffelbestand innert weniger Tage zusammenbrechen.³³

Aktuelle Strategie

Um Kartoffeln vor der Kraut- und Knollenfäule zu schützen, werden sie jährlich sieben- bis achtmal, in sehr nassen Jahren bis zu zwölfmal, mit synthetischen Fungiziden (im konventionellen Anbau) oder mit Kupferfungiziden (im Biolandbau) behandelt. Als Präventivmassnahmen haben sich die Verwendung von gesundem Saatgut und die Entfernung von Durchwuchskartoffeln aus dem Vorjahr bewährt. Ausserdem gibt es einzelne robustere Sorten, wie zum Beispiel 'Vitabella', 'Acoustic' und 'Twiner',³⁴ die zumindest in Feldversuchen deutlich seltener mit Fungiziden behandelt werden mussten.³⁵

Potenzial der neuen Züchtungsverfahren

Die Ansprüche an das Aussehen und den Geschmack sowie die Transport-, Lager- und Verarbeitungsfähigkeit von Kartoffelsorten sind sehr hoch. Je nach Verwendungszweck werden auch bestimmte Grössen und Konsistenzen vorausgesetzt. Beim Einkreuzen von Resistenzen aus Wildkartoffeln werden fast immer auch unerwünschte Eigenschaften übertragen, wie zum Beispiel ein hoher Gehalt an den giftigen Glykoalkaloiden. Diese können zwar durch Rückkreuzungen teilweise oder ganz entfernt werden, aber das dauert viele Jahre. Bisher konnten sich nur einzelne robuste Sorten auf dem Markt etablieren. Ausserdem verändert sich der Krankheitserreger schnell und ist dadurch in der Lage, auch vormals resistente Sorten zu befallen. Die Genom-Editierung bietet die Möglichkeit, Sorten, die sich auf dem Markt bewährt haben, in relativ kurzer Zeit resistenter zu machen, ohne die vorteilhaften Eigenschaften zu beeinträchtigen.

Entwicklungsstand

Mit CRISPR/Cas laufen erste Versuche zur Verbesserung der *Phytophthora*-Resistenz. So konnte zum Beispiel unter Versuchsbedingungen gezeigt werden, dass Kartoffeln der Sorte 'Desirée' durch das Ausschalten von zwei Genen deutlich widerstandsfähiger gegen *Phytophthora*-Befall gemacht werden konnten, ohne das Wachstum der Kartoffeln zu beeinträchtigen.³⁶

Ausblick

Sollten sich die Genom-editierten Pflanzen auch unter Feldbedingungen bewähren, hätten sie das Potenzial, Ernteausschläge bei Kartoffeln zu verhindern und gleichzeitig den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren. Zudem könnten verschiedene Resistenzmechanismen kombiniert werden, um die Überwindung der Resistenz durch *Phytophthora* deutlich zu erschweren.

Weizen mit verringertem Glutengehalt



Das Wichtigste in Kürze

- Menschen mit Zöliakie müssen auf Weizenprodukte verzichten, da sie auf Gluten allergisch reagieren.
- Eine Senkung des Glutengehalts ist aufgrund der Komplexität des Weizengenoms mit konventioneller Züchtung sehr schwierig zu erreichen.
- Mit CRISPR/Cas ist es gelungen, den Glutengehalt von Weizen stark zu reduzieren.

Herausforderung

Etwa ein Prozent der Bevölkerung leidet an Zöliakie, einer immunologisch bedingten chronisch entzündlichen Dünndarmerkrankung, die durch das Klebereiweiss Gluten ausgelöst wird. Weil dieses in wichtigen Getreidearten wie Weizen, Roggen und Gerste enthalten ist, müssen Betroffene zahlreiche Nahrungsmittel meiden. Vor allem der Verzicht auf Weizen, der in vielen Lebensmitteln wie Brot und Teigwaren enthalten ist, schränkt die Lebensmittelwahl stark ein. Deshalb fällt es Betroffenen oft schwer, sich ausgewogen zu ernähren. Eine Unterversorgung mit Kohlenhydraten, Ballaststoffen und Mikronährstoffen kann die Folge sein.³⁷

Aktuelle Strategie

Anstatt Weizen zu essen, weichen Zöliakie-Betroffene auf Nischengetreide wie Hirse und Hafer oder Pseudogetreide wie Buchweizen und Quinoa aus. Auch Reis- oder Maismehl kann zum Backen verwendet werden, unterscheidet sich aber geschmacklich stark von Weizen.

Potenzial der neuen Züchtungsverfahren

Damit Zöliakie-Betroffene trotz Glutenallergie wieder Weizen essen können, wird schon lange versucht, stark Gluten-reduzierte Weizensorten zu züchten. Die Allergie-auslösenden Bestandteile des Glutens (bestimmte Gliadine und Glutenine) sind im Weizengenom allerdings durch eine Vielzahl von Genen codiert.³⁸ Mit konventioneller Mutationszüchtung müssten zufällig mutierte Gliadin- und Gluteningene durch Kreuzungen kombiniert und dann rückgekreuzt werden, um unerwünschte Eigenschaften zu entfernen. In Anbetracht der grossen Anzahl involvierter Gene sowie der Komplexität des Weizengenoms ist dies praktisch unmöglich. Die Genom-Editierung hingegen erlaubt es, gleichzeitig und gezielt viele Gene auszuschalten.

Entwicklungsstand

In Brotweizen ist es mittels CRISPR/Cas gelungen, den Gliadin-Anteil in zwei Brotweizen- und einer Hartweizen-Linie um bis zu 82 Prozent zu reduzieren, indem man bis zu 35 von 45 Genen, die eine bestimmte Gruppe der Gliadine (α -Gliadine) codieren, ausgeschaltet hat. Das dabei verwendete CRISPR/Cas-System wurde anschliessend ausgekreuzt und ist danach nicht mehr im Genom vorhanden. Ungewollte Mutationen wurden nicht gefunden.³⁹

Ausblick

Mit dieser Methode sollte es möglich sein, den Glutengehalt auch in anderen Weizensorten zu senken. Um den Weizen für Menschen mit Zöliakie tatsächlich verträglich zu machen, müsste der Gehalt an Allergie-auslösenden Glutenbestandteilen allerdings noch stärker reduziert werden. Damit der Weizen sich weiterhin zum Backen eignet, müssten gleichzeitig andere Glutenbestandteile, die keine Allergie auslösen, erhalten bleiben. Dies könnte durch das gezielte Ausschalten oder Umschreiben bestimmter Gliadin- und Gluteningenen erreicht werden.^{38, 40} Um zu wissen, ob sich mit dieser Methode ein Weizen entwickeln lässt, der sich sowohl zum Backen eignet als auch für Menschen mit Zöliakie verträglich ist, bedarf es weiterer Forschung.

Literatur

- 1 **Bundesgesetz** über die Gentechnik im Ausserhumanbereich, Art. 37a Abs. 2.
- 2 Bundesrat (2023) **Regulierung der Gentechnik im Ausserhumanbereich**. Bericht des Bundesrats in Erfüllung der Postulate 20.4211 Chevalley: Gentechnik. Welcher Geltungsbereich? 21.3980 WBK-N: GVO-Moratorium. Belastbare Informationen als Grundlage für gute Entscheide; 21.4345 WBK-S: Züchtungsverfahren mit Genom-Editiermethoden. BAFU-212.1-53180/13/2/10/5/10.
- 3 Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2016) **Strategie Pflanzenzüchtung 2050**. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzliche-produktion/pflanzenzuechtung.html>
- 4 **Datenbank des Netzwerks European Sustainable Agriculture Through Genome Editing (EU-SAGE)**. <https://www.eu-sage.eu/genome-search> (Letzter Zugriff: 1. Mai 2023)
- 5 Dima O, Heyvaert Y, Inzé D (2022) **Interactive database of genome editing applications in crops and future policy making in the European Union**. Trends in Plant Science 27 (8): 746-748.
- 6 Clemens CM et al. (2022) **An exploration of the potential contribution of genetic modification and genome editing to the development of abiotic stress-tolerant crops as compared to conventional breeding**. <https://research.wur.nl/en/publications/an-exploration-of-the-potential-contribution-of-genetic-modificat>
- 7 Schweizer Bauernverband Agristat (2022) **Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2021**. Kapitel 2. Pflanzenbau. https://www.sbv-usp.ch/fileadmin/user_upload/02_SES2021_Pflanzenbau.pdf
- 8 Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2022) **Agrarbericht 2022. Markt – Selbstversorgungsgrad**. <https://www.agrarbericht.ch/de/markt/marktentwicklungen/selbstversorgungsgrad>
- 9 Schweizer Bauer (2021) **Rüebli bleibt Lieblingsgemüse**. 14.5.2021. <https://www.schweizerbauer.ch/pflanzen/spezialkulturen/ruebli-bleibt-liebblingsgemuese>
- 10 Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2020) **Agrarbericht 2020**. <https://www.agrarbericht.ch/de/service/archiv/agrarbericht-2020>
- 11 Grossniklaus U et al. (2020) **Pflanzenzüchtung – von klassischer Kreuzung bis Genom-Editierung**. Swiss Academies Factsheet 15 (3). <https://geneticresearch.scnat.ch/de/publications>
- 12 Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2022) **Das Weinjahr 2021**. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzliche-produktion/weine-und-spirituosen/weinwirtschaftliche-statistik.html>
- 13 Swissinfo (2021) **Falscher Mehltau bedroht Weinernte in der Schweiz**. <https://www.swissinfo.ch/ger/falscher-mehltau-bedroht-weinernte-in-der-schweiz/46823306>
- 14 Finger R, Zachmann L, McCallum C (2023) **Short supply chains and the adoption of fungus-resistant grapevine varieties**. Applied Economic Perspectives and Policy, im Druck.
- 15 Olivares F et al. (2021) **CRISPR/Cas9 targeted editing of genes associated with fungal susceptibility in Vitis vinifera L. cv. Thompson Seedless using geminivirus-derived replicons**. Frontiers in Plant Sciences 12.
- 16 Herrmann M, Wiedmer E (2016) **Phytopsanitäre Massnahmen gegen Feuerbrand**. Evaluation 2000-2014.
- 17 Agroscope. **Feuerbrand – Bekämpfungsstrategie**. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/obstbau/feuerbrand/bekaempfungstrategie.html> (Letzter Zugriff: 1. Mai 2023)
- 18 Reininger V (2019) **Feuerbrand-Strategieversuche – gute Wirkung trotz hohem Befall**. Die Rote – Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau 18.
- 19 Bundesamt für Landwirtschaft (2016) **Kein Einsatz von Streptomycin im Kampf gegen den Feuerbrand**. Medienmitteilung vom 10.02.2016. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-60619.html>
- 20 Agroscope (2017) **Feuerbrand – Anfälligkeit von Kernobstsorten**. Agroscope Merkblatt Nr. 723.
- 21 Gleichauf B et al. (2009) **Moderne Methoden der Apfelzüchtung**. Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau 3/09.
- 22 Pompili V et al. (2019) **Reduced fire blight susceptibility in apple cultivars using a high-efficiency CRISPR/Cas9-FLP/FRT-based gene editing system**. Plant Biotechnology Journal (3): 845-858.
- 23 Malnoy M et al. (2016) **DNA-Free genetically edited grapevine and apple protoplast using CRISPR/Cas9 ribonucleoproteins**. Frontiers in Plant Science 7.
- 24 Bundesamt für Landwirtschaft. **Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)**. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/Pflanzengesundheit/schaedlingeundkrankheiten/quarantaeneorganismen/tobrfv.html> (Letzter Zugriff: 1. Mai 2023)
- 25 Strickhof. **Das Jordanvirus – eine Übersicht**. <https://www.strickhof.ch/publikationen/das-jordanvirus-eine-uebersicht> (Letzter Zugriff: 1. Mai 2023)
- 26 Sostizzo T et al. (2020) **Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)**. Agroscope Merkblatt 2019 (102), aktualisierte Auflage.
- 27 Wilstermann A, Ziebell H (2019) **Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)**. JKI Datenblätter Pflanzenkrankheiten und Diagnose 2019 (4), 2. aktualisierte Auflage.
- 28 Eggenberger D (2022) **Die Angst vor dem Jordan-Virus**. Schweizer Bauer. <https://www.schweizerbauer.ch/pflanzen/die-angst-vor-dem-jordan-virus> (Letzter Zugriff: 4. Mai 2023)
- 29 Caruso AG et al. (2022) **Tomato brown rugose fruit virus: a pathogen that is changing the tomato production worldwide**. Annals of Applied Biology 181 (3): 258-274.
- 30 Ishikawa M et al. (2022) **Tomato brown rugose fruit virus resistance generated by quadruple knockout of homologs of TOBAMOVIRUS MULTIPLICATION1 in tomato**. Plant Physiology 189 (2): 679-686.
- 31 Kravchik M et al. (2022) **Knockout of SITOM1 and SITOM3 results in differential resistance to tobamovirus in tomato**. Molecular Plant Pathology 23: 1278-1289.
- 32 Swisspatat (2021) **Herausfordernde Kartoffelernte steht an**. Medienmitteilung vom 31. August 2021. https://www.kartoffel.ch/_Resources/Persistent/84e33b4a06548473e906a21e599d8633e8db124f/PM_Herbstpreise%202021_d.pdf
- 33 Agroscope. **Kraut- und Knollenfäule**. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/kartoffeln/krankheiten/kraut-knollenfaeule.html> (Letzter Zugriff: 1. Mai 2023)

- 34 Schwärzel R et al. (2022) **Schweizer Sortenliste für Kartoffeln 2023**. Agroscope Transfer Nr. 453.
- 35 Vogel S, Keiser A (2022) **Anbau robuster Kartoffelsorten & nachhaltige Kartoffelwirtschaft**. Workshop Pflanzkartoffeln Swissem, 2.12.2022.
https://www.swissem.ch/wp-content/uploads/2022/12/800-RobusteSorten_2022_WorkshopSwissem_SV2.pdf
- 36 Kieu NP et al. (2021) **Mutations introduced in susceptibility genes through CRISPR/Cas9 genome editing confer increased late blight resistance in potatoes**. Scientific Reports 11: 4487.
- 37 Eidgenössische Ernährungskommission EKK (2010) **Zöliakie und Ernährung in der Schweiz – eine Standortbestimmung**.
<https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/das-blv/organisation/kommissionen/eek/zoeliakie-und-ernaehrung-in-der-schweiz.html>
- 38 Gilissen LJWJ, Smulders MJM (2021) **Low gluten and coeliac-safe wheat through gene editing**. In: Ricroch A, Chopra S, Kuntz M (Hg.) Plant biotechnology. Experience and future prospects. Cham: Springer: 231-248.
- 39 Sánchez-León S et al. (2017) **Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9**. Plant Biotechnology Journal 16 (4): 902-910.
- 40 Altenbach SB et al. (2020) **Reducing the immunogenic potential of wheat flour: silencing of alpha gliadin genes in a U.S. Wheat Cultivar**. Frontiers in Plant Science 11.

SCNAT – vernetztes Wissen im Dienste der Gesellschaft

Die **Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)** engagiert sich regional, national und international für die Zukunft von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie stärkt das Bewusstsein für die Naturwissenschaften als zentralen Pfeiler der kulturellen und wirtschaftlichen Entwicklung. Ihre breite Abstützung macht sie zu einem repräsentativen Partner für die Politik. Die SCNAT vernetzt die Naturwissenschaften, liefert Expertise, fördert den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft, identifiziert und bewertet wissenschaftliche Entwicklungen und legt die Basis für die nächste Generation von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern. Sie ist Teil des Verbundes der Akademien der Wissenschaften Schweiz.

Das **Forum Genforschung** der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) fördert einen differenzierten und sachlichen Umgang mit neuen Entwicklungen in der Genforschung. Dazu stellt es wissenschaftliche Informationen zu einem breiten Spektrum an gesellschaftsrelevanten Themen zur Verfügung und fördert auf dieser Basis den Dialog zwischen Forschung, Politik und Gesellschaft.