



# Klimaresilienter Ackerbau 2035

## Autorinnen und Autoren

Nathalie Wuyts, Alice Baux, Luca Bragazza, Pierluigi Calanca,  
Boulos Chalhouh, Brice Dupuis, Juan M. Herrera, Jürg Hiltbrunner,  
Lilia Levy Häner, Didier Pellet, Thomas Toschini, Christoph Carlen



## Impressum

---

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich <a href="http://www.agroscope.ch">www.agroscope.ch</a>
Auftraggeber	Schweizer Hagel, Fenaco, Schweizer Bauernverband
Auskünfte	Christoph Carlen, <a href="mailto:christoph.carlen@agroscope.admin.ch">christoph.carlen@agroscope.admin.ch</a>
Gestaltung	Natacha Vioget
Titelbild	Gabriela Brändle, Agroscope
Download	<a href="http://www.agroscope.ch/science">www.agroscope.ch/science</a>
Copyright	© Agroscope 2023
ISSN	2296-729X
DOI	<a href="https://doi.org/10.34776/as177g">https://doi.org/10.34776/as177g</a>

---

### Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

---

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Résumé</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Summary</b> .....	<b>13</b>
<b>4 Einleitung</b> .....	<b>16</b>
<b>5 Aktuelle und künftige pedoklimatische Zonen für den Ackerbau</b> .....	<b>18</b>
5.1 Zusammenfassung .....	18
5.2 Einleitung .....	18
5.3 Bodenkartierung und landwirtschaftliche Eignung - Situation und Ausblick .....	20
5.4 Klimaeignung für Schweizer Kulturen .....	23
5.5 Zukünftige Entwicklung des Klimas und des Bewässerungsbedarfs .....	25
5.5.1 Entwicklung von Temperatur und Niederschlag .....	25
5.5.2 Entwicklung des Wasserbedarfs der Kulturen .....	27
5.5.3 Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit .....	27
5.5.4 Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs .....	28
5.6 Fazit .....	30
5.7 Literaturverzeichnis .....	32
<b>6 Bewässerung als Mittel zur Erhaltung von Ertrag und Qualität bei Trockenheit</b> .....	<b>36</b>
6.1 Zusammenfassung .....	36
6.2 Aktuelle Bewässerungssituation in der Schweiz .....	38
6.3 Wasserreserven in der Schweiz für die Bewässerung und ihre Verteilung .....	43
6.3.1 Oberflächenwasser .....	44
6.3.2 Grundwasser .....	47
6.3.3 Konzessionen für die Entnahme von Oberflächenwasser und Grundwasser .....	48
6.3.4 Bewässerungsgenossenschaften und Projekte .....	49
6.3.5 Netzwerke für die Überwachung von Boden, Wasser und Wetter .....	51
6.4 Rechtliche Aspekte und Konflikte bei der landwirtschaftlichen Wassernutzung .....	53
6.5 Erwartete Veränderungen der Wasserverfügbarkeit für die Bewässerung in der nahen Zukunft .....	59
6.5.1 Wasserbedarf und -verfügbarkeit .....	59
6.5.2 Alternative Wasserressourcen .....	63
6.5.3 Abwassernutzung auf landwirtschaftlichen Flächen .....	63
6.6 Situation im Ausland .....	66
6.6.1 Europäische Union .....	66
6.6.2 Frankreich .....	67
6.6.3 Deutschland .....	70
6.7 Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung - Status und Trends .....	72
6.7.1 Effiziente und produktive Wassernutzung .....	72
6.7.2 Bewässerungsmanagement .....	79
6.7.3 Bewässerungsüberwachung .....	80
6.8 Fazit .....	82
6.9 Literaturverzeichnis .....	85

<b>7</b>	<b>Sortenwahl und alternative Kulturen.....</b>	<b>98</b>
7.1	Zusammenfassung .....	98
7.2	Struktur des Ackerbaus in der Schweiz.....	99
7.3	Dürre und Hitze beeinträchtigen Ackerkulturen .....	101
7.4	Phänologie der Pflanzen bei Anpassungsstrategien an Trockenheit und Hitze .....	102
7.5	Strategien zur Vermeidung, zum Aufschub oder zur Toleranz gegenüber Trockenheit und entsprechende Merkmale .....	104
7.6	Nationale Sortenprüfung.....	105
7.7	Data Mining für die Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Ertrag und die Qualität von Ackerkulturen und die Sortenauswahl.....	107
7.8	Arten- und Sortenmischungen für die Widerstandsfähigkeit von Systemen .....	108
7.9	Aktuelle Ackerkulturen.....	109
7.9.1	Getreide .....	109
7.9.2	Mais .....	114
7.9.3	Ölsaaten .....	116
7.9.4	Eiweisspflanzen.....	120
7.9.5	Kartoffeln .....	123
7.9.6	Zuckerrüben .....	126
7.10	Alternative Ackerkulturen.....	128
7.10.1	Getreide .....	128
7.10.2	Mais .....	131
7.10.3	Ölsaaten .....	133
7.10.4	Eiweisspflanzen.....	133
7.10.5	Hackfrüchte .....	135
7.11	Fazit.....	136
7.12	Literaturverzeichnis .....	141
<b>8</b>	<b>Pflanzenzüchtung auf Trockenheitsresistenz .....</b>	<b>155</b>
8.1	Zusammenfassung .....	155
8.2	Einleitung .....	155
8.3	Entdeckung von Genen für Trockenheitsresistenz .....	155
8.4	Züchtung auf Trockenheitstoleranz mit genom-basierten Werkzeugen wie marker-assisted selection und genomic selection.....	156
8.5	Gentechnisch veränderte, trockenheitsresistente Pflanzensorten.....	157
8.6	Gene editing für Trockenheitsresistenz.....	157
8.7	Fazit.....	158
8.8	Literaturverzeichnis .....	159
<b>9</b>	<b>Agronomische Managementstrategien zur Verbesserung der Resilienz von pflanzen gegenüber dem Klimawandel.....</b>	<b>162</b>
9.1	Zusammenfassung .....	162
9.2	Reduzierte Bodenbearbeitung und Schutz des Bodenwassers.....	162
9.3	Holzabfälle als organisches Ergänzungsmittel zur Verbesserung des Wasserhaltevermögens landwirtschaftlicher Böden .....	163
9.4	Diversifizierung der Fruchtfolge (Deckfrüchte enthalten).....	164
9.5	Agroforst-Systeme.....	165

9.6	Biostimulanzien für Pflanzen .....	166
9.7	Fazit .....	168
9.8	Literaturverzeichnis .....	170
<b>10</b>	<b>Verdankung</b> .....	<b>178</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>179</b>
11.1	Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 5 .....	179
11.2	Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 6 .....	182
11.3	Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 7 .....	195

## Abkürzungsverzeichnis

FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der EU
GE	gene editing
GS	genomic selection
GVO	gentechnisch veränderte Organismen
GWAS	genome-wide association study
KOBO	Kompetenzzentrum Boden
MAS	marker-assisted selection
QTL	quantitative trait locus
RCP	representative concentration pathway
PTGE	projet de territoire pour la gestion de l'eau
SAGE	schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SANE	syndicat d'arrosage de Nyon et environs
SNP	single-nucleotide polymorphism
SOC	soil organic carbon
VAT	offiziellen Prüfung der Anbau- und Verwendungseignung

# 1 Zusammenfassung

Der Klimawandel und insbesondere Trockenheit und Hitze wirken sich auf die Ernteerträge und -qualität und damit auch auf die Ernährungssicherheit und das landwirtschaftliche Einkommen aus. Das Projekt "Klimaresilienter Ackerbau" sieht eine robuste und stabile landwirtschaftliche Produktion trotz Trockenheit und Hitzestress bis 2035 vor. In der ersten Phase des Projekts wird der derzeitige Stand des Wissens und der Praktiken für einen klimaresilienten Ackerbau im Jahr 2035 analysiert und es werden mögliche Anpassungen vorgeschlagen. Der vorliegende Bericht ist Teil dieser ersten Phase und stellt Informationen zu verschiedenen Themen wie pedoklimatische Zonen, Bewässerung, Sorten und alternative Ackerkulturen mit höherer Trockenheitstoleranz, Züchtung auf Trockenheitstoleranz und agronomische Massnahmen zur Erhöhung der Systemresilienz zusammen. Der Schwerpunkt liegt auf Getreide, einschliesslich Mais, Ölsaaten und Eiweisspflanzen, Kartoffeln und Zuckerrüben. Aktuelle Wissenslücken wurden identifiziert und werden in den Schlussfolgerungen am Ende jedes Kapitels aufgezeigt.

Sowohl die Boden- als auch die Klimaeignungskarten für die Schweizer Landwirtschaft sind veraltet und müssen überarbeitet werden. Eine hochauflösende Bodenkartierung nach neu definierten Standards wird durch das neu gegründete Kompetenzzentrum Boden (KOBO) aufgebaut. Die Messungen umfassen neu auch die für die Landwirtschaft bei Trockenstress wichtigen Parameter wie Wasserrückhaltevermögen und nutzbare Bodentiefe. Die landwirtschaftlichen Eignungsklassen wurden überarbeitet, aber der Beitrag des Klimas wurde hier noch nicht aktualisiert. Zu den Initiativen in diesem Sinne gehören der Nachweis der Zunahme der Länge der thermischen Vegetationsperiode im letzten Jahrhundert und die Entwicklung von Karten der thermischen Eignung von Kulturpflanzen. Aufgrund der höheren Temperaturen wird erwartet, dass der Wasserbedarf der Pflanzen bis 2035 um 20 bis 40 mm ansteigt, und der Anteil der bewässerungsbedürftigen landwirtschaftlichen Nutzflächen könnte auf 70 % ansteigen. Ein weiterer Anstieg des Bewässerungsbedarfs um 10-20 % wird in den heutigen Bewässerung-Hotspots für den Ackerbau erwartet, d. h. in der Achse Genf-Solothurn sowie in Schaffhausen und Umgebung.

Bewässerung wird als erstes Mittel zur Aufrechterhaltung von Ertrag und Qualität bei Trockenstress praktiziert und ist derzeit in Kartoffelproduktionssystemen unverzichtbar. Aktuelle, quantitative Informationen über die Bewässerung in der Schweiz als Ganzes oder in den Kantonen sind nur teilweise oder gar nicht vorhanden bzw. nicht zentralisiert und nicht öffentlich zugänglich. Aktuelle Einschätzungen zum Umfang der Bewässerung in der Schweiz beruhen auf Erhebungen des Bundesamts für Statistik zwischen 2010 und 2020. Sie zeigen eine Zunahme des Anteils bewässerten Grünlands vor allem im westlichen Mittelland, während im Osten der Gemüse- und Obstanbau, die am meisten bewässerten Kulturen bleiben. Grundwasser (Aquifere und Quellen) und Oberflächenwasser (Seen, Flüsse und Bäche) sind die wichtigsten Quellen für Bewässerungswasser, dicht gefolgt von der öffentlichen Wasserversorgung, wie eine 2016 durchgeführte Umfrage ergab. Letztere ist in einigen Fällen eine Antwort auf die Probleme, die mit der Entnahme von Bewässerungswasser aus Bächen und kleinen Flüssen verbunden sind, da Entnahmebeschränkungen häufiger und für eine längere Dauer auftreten. Infolgedessen hat sich die Wasserentnahme, soweit möglich, auf Seen verlagert, insbesondere in der Broye- und Drei-Seen-Region. Diese Praxis wird heute und auch in naher Zukunft als nachhaltig angesehen. In einigen Fällen trifft dies auch auf die Grundwasserentnahme zu. Die Landwirte sind zunehmend in Genossenschaften organisiert, um die Infrastruktur und die Wassernutzung zu verwalten. Bewässerungsprojekte werden seit etwa 2003 von der Abteilung "Strukturverbesserung" des Bundesamtes für Landwirtschaft und den jeweiligen kantonalen Ämtern unterstützt. Die Projekte müssen nun die mittelfristige Wasserverfügbarkeit nachweisen und Massnahmen zur Sicherstellung der Bewässerungseffizienz aufzeigen. Die Subventionen sind derzeit auf bewässerungsfähige Kulturen beschränkt, was den Ackerbau mit Ausnahme von Kartoffeln ausschliesst. Die Strategie des Bundesamtes für Landwirtschaft zur Strukturverbesserung sieht vor, den Ausbau der Bewässerungsinfrastruktur weiterhin finanziell zu unterstützen. In Regionen ohne Zugang zu zuverlässigen und nachhaltigen Wasserressourcen werden Alternativen in Form von lokalen Wasserspeichern und Wasserrückhaltmassnahmen geprüft. Die direkte Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser ist derzeit nicht erlaubt, wird aber geprüft.

Rollmatten mit Starkregnern oder Düsenwagen sind die am häufigsten eingesetzten Bewässerungsgeräte im Ackerbau in der Schweiz. Die Bewässerungseffizienz ist nicht optimal, kann aber durch Investitionen in neuere Modelle verbessert werden. Ober- und unterirdische Tropfbewässerungssysteme sind teuer und aus agronomischer

Sicht nicht immer geeignet, weisen aber eine höhere Wasser- und Energieeffizienz auf. Empfehlungsinstrumente zur Bestimmung des Zeitpunkts und der Anzahl Bewässerungen basieren entweder auf oberirdischen oder unterirdischen Umweltmessungen oder auf einer Kombination aus beiden. Ihre Anwendung im Ackerbau (hauptsächlich Kartoffeln) ist in Arbeit. Alternative pflanzenbasierte Methoden, die die Bewässerungseffizienz weiter steigern können, befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium. Im Bereich der Modellierung werden Fortschritte bei Bewässerungsempfehlungen auf der Grundlage von Boden-, Wetter- und Kulturpflanzeninformationen oder auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten erzielt, allerdings meist in Nachbarländern.

Die Auswirkungen von Trockenheit und Hitzestress auf das Wachstum, die Entwicklung, die physiologischen Prozesse und schliesslich den Ertrag von Kulturpflanzen hängen von der Intensität und der Dauer der Stressfaktoren sowie von ihrem Zeitpunkt während der Vegetationsperiode ab. Bei Kulturen, die Samen produzieren, sind die späte vegetative Phase (vor der Blüte), die Blüte und der frühe Samenansatz die empfindlichsten Phasen gegenüber abiotischem Stress und bestimmen weitgehend den endgültigen Ertragsverlust. Bei den meisten Ackerkulturen können früh blühende oder früh reifende Sorten dem sommerlichen Hitze- oder Trockenstress entgehen, allerdings mit potenziell geringeren Erträgen. Eine frühere Aussaat ist eine weitere Option, die jedoch durch das anhaltende Frostrisiko und die relativ begrenzte Erwärmung im zeitigen Frühjahr im kommenden Jahrzehnt eingeschränkt wird. Neben dieser Strategie, dem Stress zu entgehen, können Sortenunterschiede bei den Trockentoleranzmechanismen auftreten, von denen die osmotische Anpassung die wichtigste ist. Der Aufschub oder die Vermeidung von Trockenheit kann eine Vielzahl von Wachstums-, Entwicklungs- und physiologischen Prozessen beinhalten.

Die Kriterien für die agronomische Prüfung von neuen Sorten beinhalten derzeit keine Prüfung auf abiotischen Stress. Eine mögliche Änderung ist im Gange, die den Züchtern und ihren Vertretern einen Anreiz bieten könnte, trockenheits- und hitzetolerante Sorten für den Schweizer Ackerbau vorzuschlagen. Nationale Sortenversuche sind zudem ein wertvolles Instrument für die Analyse von Ertrags- und Qualitätsreaktionen auf Umweltfaktoren (derzeit vor allem das Wetter), sowie für Studien zur Interaktion von Genotyp, Umwelt und Management. Letztere können auch zur Entwicklung von Sortenmischungen beitragen, um die Stabilität des Produktionssystems gegenüber abiotischen Stressfaktoren zu erhöhen.

Die kritischen Wachstumsphasen von Getreide, einschliesslich Mais, treten im späten Frühjahr und Sommer auf, wenn Trockenheit und Hitze das Ertragspotenzial, den endgültigen Ertrag und auch die Qualität beeinträchtigen können. Dennoch gibt es keine systematische quantitative Bewertung der derzeitigen Ertrags- und Qualitätsverluste aufgrund von abiotischem Stress. Raps ist die wichtigste Ölsaart im Schweizer Ackerbau, und da seine kritischen Wachstumsstadien im späten Frühjahr liegen, geht man davon aus, dass er von abiotischen Stressfaktoren verschont bleibt; derzeit wird seine Produktion eher von Schadinsekten beeinträchtigt. Der Anbau von Sojabohnen ist in der Schweiz seit etwa 30 Jahren möglich. Die Blüte- und Kornfüllungszeit fällt in den Hochsommer, was die Sojaproduktion bereits jetzt, aber noch mehr in Zukunft, gefährdet. Eiweisserbsen und vor allem Ackerbohnen und andere Hülsenfrüchte spielen in der Schweiz nur eine untergeordnete Rolle, haben aber einen hohen Stellenwert in der Fruchtfolge und bei der Produktion von Eiweissfuttermitteln im Betrieb, insbesondere im ökologischen Landbau. Der Ertrag ist jedoch aufgrund von biotischen und abiotischen Faktoren, die derzeit noch nicht genau bekannt sind, unbeständig. Die Bewässerung zur Förderung von Ertrag und Qualität wird im Kartoffelanbau wegen ihrer Empfindlichkeit insgesamt als unverzichtbar angesehen. Die Erzielung einer höheren Wasserproduktivität ist wichtig, und es zeigt sich, dass bei den Mechanismen der Reaktion auf Trockenheit auf mehreren Ebenen eine grosse ungenutzte Variation besteht: Frühreife, Wurzel- und Sprossmorphologie und physiologische Reaktionen. Bei Zuckerrüben schliesslich werden in der Schweiz Auswirkungen von Trockenstress auf Ertrag und Zuckergehalt vermutet, aber nicht quantitativ bestimmt. Die Bewässerung ist im Hinblick auf die kritischen Wachstumsstadien, den Zeitpunkt und die Menge sowie ihre Auswirkungen auf die Produktqualität nicht gut bekannt. Die meisten alternativen Kulturen mit potenziell höherer Trockenheitstoleranz haben einen Nischenstatus und/oder werden vor allem im Biolandbau angebaut. Für andere, wie Sorghum, gibt es deutliche Hinweise auf ein grosses Produktionspotenzial, insbesondere in Gebieten, in denen Mais von der Sommertrockenheit betroffen ist.

Trockenheitsresistenz ist ein quantitatives Merkmal mit einer komplexen genetischen Kontrolle. Die genetische Zerlegung und Identifizierung von Genen mit Hilfe verschiedener genetischer und genomischer Ansätze sowie die Integration der Phänotypisierung haben sich als vielversprechend für die Entwicklung von Trockenresistenz bei verschiedenen Kulturpflanzen erwiesen. Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten Züchtungstechnologien wie marker-assisted selection, genomic selection, genetic engineering und gene editing zeigen, dass es möglich ist,

Trockenheitsresistenz bei Ackerkulturen zu erreichen. Der Einsatz solcher Werkzeuge und Technologien wird durch ein integriertes Züchtungsprogramm für wichtige Ackerkulturen unter Schweizer Klimabedingungen vorgeschlagen.

Derzeit gibt es mehrere agronomische Verfahren, um die Widerstandsfähigkeit von Anbausystemen gegenüber Trockenheit und Hitze zu erhöhen. Die reduzierte Bodenbearbeitung wird in der Schweiz bereits in gewissem Umfang praktiziert und zielt vor allem darauf ab, die Menge der organischen Bodensubstanz zu erhöhen. Dies wirkt sich positiv auf die Wasserspeicherkapazität des Bodens aus, indem es seine physikalische Struktur verbessert. Die Zugabe von Holzschnitzeln als organische Ergänzung zu landwirtschaftlichen Böden verfolgt das gleiche Ziel, allerdings in einem schnelleren Tempo als bei der reduzierten Bodenbearbeitung. Die Diversifizierung der Fruchtfolge durch die Aufnahme von trockenheitstoleranteren Pflanzen und Hülsenfrüchten verbessert nachweislich die Gesamtf Fruchtbarkeit des Bodens und indirekt auch die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen, obwohl die Mechanismen noch nicht vollständig bekannt sind. Die Anwendung von Biostimulanzien wirkt vermutlich direkt auf der Pflanzenebene, aber auch hier müssen die Funktionsmechanismen noch durch weitere Studien aufgeklärt werden. Schliesslich scheinen Agroforstsysteme eine Reihe positiver Effekte auszulösen, darunter nicht nur eine Erhöhung der Kohlenstoffvorräte im Boden, sondern auch Veränderungen des Mikroklimas, die den Wasserbedarf der Pflanzen verringern. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass eine Kombination dieser Art von agronomischen Praktiken zur Widerstandsfähigkeit von Ackerbausystemen beiträgt, wenn sie mit anderen Massnahmen wie trockenheitstoleranten Pflanzen und Sorten kombiniert wird.

## 2 Résumé

Le changement climatique, et en particulier la sécheresse et la chaleur, affecte le rendement et la qualité des cultures et, par conséquent, la sécurité alimentaire et les revenus agricoles. Le projet « Grandes cultures résilientes au climat » envisage une production agricole robuste et stable malgré la sécheresse et le stress thermique d'ici 2035. Dans la première phase du projet, l'état actuel des connaissances et des pratiques pour une agriculture résiliente au climat en 2035 est évalué et des adaptations possibles sont proposées. Le présent rapport s'inscrit dans cette première phase puisqu'il vise à compiler des informations sur les différents thèmes abordés, notamment les zones pédoclimatiques, l'irrigation, le choix des variétés, les cultures alternatives présentant des niveaux plus élevés de tolérance à la sécheresse, la sélection pour la tolérance à la sécheresse et les mesures agronomiques visant à accroître la résilience du système. L'accent est mis sur les céréales, y compris le maïs, les oléagineux et les protéagineux, les pommes de terre et les betteraves sucrières. Les lacunes dans les connaissances actuelles ont été identifiées et figurent dans les conclusions à la fin de chaque chapitre.

Les cartes d'aptitude des sols et du climat pour l'agriculture suisse sont obsolètes et doivent être révisées. La cartographie des sols à haute résolution et selon des normes nouvellement définies est mise en place par le Centre de compétences sur les sols (CCSols) récemment créé. Les mesures comprennent désormais également des paramètres importants pour l'agriculture face au stress de la sécheresse, tels que la capacité de rétention d'eau et la profondeur du sol utilisable. Les classes d'aptitude à l'agriculture ont été révisées, mais la contribution du climat n'a pas encore été mise à jour. Les initiatives en ce sens comprennent la démonstration de l'augmentation de la durée de la saison de croissance thermique au cours du siècle dernier et l'élaboration de cartes d'aptitude thermique pour les cultures. En raison des températures plus élevées, la demande en eau des cultures devrait augmenter de 20 à 40 mm d'ici 2035, et la part des terres agricoles ouvertes nécessitant une irrigation pourrait atteindre 70 %. Une augmentation supplémentaire de 10 à 20 % de la demande d'irrigation est attendue dans les zones les plus irriguées aujourd'hui, c'est-à-dire l'axe Genève-Soleure, Schaffhouse et les zones environnantes.

L'irrigation est pratiquée comme premier moyen de maintenir le rendement et la qualité en cas de sécheresse, et est actuellement indispensable dans les systèmes de production de pommes de terre. Les informations quantitatives actualisées sur l'irrigation dans l'ensemble de la Suisse ou dans les cantons ne sont que partiellement ou pas du tout disponibles, ne sont pas centralisées et ne sont pas accessibles au public. Les évaluations actuelles de l'étendue de l'irrigation en Suisse sont basées sur des enquêtes menées par l'Office fédéral de la statistique entre 2010 et 2020. Elles montrent une augmentation de la part des prairies irriguées, en particulier sur le Plateau occidental, tandis qu'à l'est, les cultures maraîchères et fruitières restent les plus irriguées. Les eaux souterraines (aquifères et sources) et les eaux de surface (lacs, rivières et ruisseaux) constituent les principales sources d'eau d'irrigation, suivies de près par l'approvisionnement public en eau dans une enquête menée en 2016. Ce dernier constitue dans certains cas une réponse aux problèmes liés au captage de l'eau d'irrigation dans les ruisseaux et les petites rivières, étant donné que les restrictions de captage sont plus fréquentes et durent plus longtemps. En conséquence, et dans la mesure du possible, le captage s'est déplacé vers les lacs, en particulier dans la région de la Broye et des trois lacs. Cette pratique est considérée comme durable aujourd'hui et dans un avenir proche. Dans certains cas, il en va de même pour le captage des eaux souterraines. Les agriculteurs sont de plus en plus organisés en coopératives pour gérer les infrastructures et l'utilisation de l'eau. Depuis 2003 environ, les projets d'irrigation sont soutenus par le secteur Améliorations foncières de l'Office fédéral de l'agriculture et par les offices cantonaux respectifs. Les projets doivent désormais démontrer la disponibilité de l'eau à moyen terme et indiquer les mesures à prendre pour garantir l'efficacité de l'irrigation. Les subventions sont actuellement limitées aux cultures pouvant être irriguées, ce qui exclut les grandes cultures, à l'exception de la pomme de terre. La stratégie de l'Office fédéral de l'agriculture en matière d'améliorations structurelles propose de continuer à soutenir financièrement le développement des infrastructures d'irrigation. Dans les régions qui n'ont pas accès à des ressources en eau fiables et durables, des alternatives sont envisagées sous la forme de réservoirs de rétention d'eau locaux et de mesures de rétention d'eau. La réutilisation directe des eaux usées traitées n'est actuellement pas autorisée, mais elle est à l'étude.

Les enrouleurs avec canon ou rampe d'irrigation sont les équipements d'irrigation les plus utilisés dans les grandes cultures en Suisse. L'efficacité de l'irrigation n'est pas optimale, mais peut être améliorée en investissant dans des versions plus récentes. Les systèmes d'irrigation goutte à goutte de surface et enterré sont coûteux et ne conviennent

pas toujours d'un point de vue agronomique, mais leur efficacité en termes d'utilisation de l'eau et de l'énergie est plus élevée. Les outils de recommandation permettant de déterminer le moment et le volume d'irrigation sont basés sur des mesures de l'environnement en surface ou en sous-sol, ou sur une combinaison des deux. Leur application dans les cultures arables (principalement les pommes de terre) est en cours. D'autres méthodes basées sur les plantes, susceptibles d'améliorer encore l'efficacité de l'irrigation, se trouvent dans une phase de développement précoce. En ce qui concerne la modélisation, des progrès sont réalisés en matière de recommandations d'irrigation basées sur des informations relatives au sol, aux conditions météorologiques et aux cultures, ou basées sur des données de télédétection, mais principalement dans les pays voisins.

Les effets de la sécheresse et du stress thermique sur la croissance, le développement, les processus physiologiques et finalement le rendement des cultures dépendent de l'intensité et de la durée des stress, ainsi que du moment où ils surviennent au cours de la saison. Dans les cultures produisant des semences, les stades de la fin de la végétation (préfloraison), de la floraison et du début de la formation des graines sont les plus sensibles au stress abiotique et déterminent dans une large mesure la perte de rendement finale. Pour la plupart des grandes cultures, les variétés à floraison ou à maturation précoces peuvent échapper à la chaleur estivale ou au stress dû à la sécheresse, mais avec des rendements intrinsèquement plus faibles. Le semis précoce est une autre option, mais il est limité par le risque de gel prolongé et le réchauffement relativement limité au début du printemps au cours de la prochaine décennie. Outre cette stratégie d'évitement du stress, des différences variétales peuvent apparaître dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse, dont l'ajustement osmotique est le plus important. Le report ou l'évitement de la sécheresse peut impliquer une pléthore de processus de croissance, de développement et de physiologie visant à limiter la demande et la perte d'eau.

Les critères d'examen agronomique des nouvelles variétés ne comprennent actuellement pas de contrôle lié au stress abiotique. Un changement potentiel est en cours, qui pourrait inciter les sélectionneurs et leurs représentants à proposer des variétés tolérantes à la sécheresse et à la chaleur pour les grandes cultures suisses. Par ailleurs, les essais nationaux de variétés constituent un outil précieux pour l'analyse des réponses en termes de rendement et de qualité aux facteurs environnementaux (actuellement principalement météorologiques) et pour les études sur l'interaction génotype x environnement x gestion. Ces dernières peuvent également contribuer au développement de mélanges de variétés pour améliorer la stabilité des systèmes de production face aux stress abiotiques.

Les stades de croissance critiques des céréales, y compris le maïs, se situent à la fin du printemps et en été, lorsque la sécheresse et la chaleur peuvent affecter leur potentiel de rendement, leur rendement final et également leur qualité. Malgré cela, il n'existe pas d'évaluation quantitative systématique des niveaux actuels de perte de rendement et de qualité dus aux stress abiotiques. Le colza est la principale culture oléagineuse en Suisse et, comme ses stades de croissance critiques se situent à la fin du printemps, il est considéré être à l'abri des stress abiotiques. Actuellement, sa production est davantage affectée par les insectes ravageurs. La culture du soja est possible en Suisse depuis environ 30 ans. Les périodes de floraison et de remplissage des grains ont lieu au milieu de l'été, ce qui met en péril la production de soja dès aujourd'hui, et encore plus à l'avenir. Les pois protéagineux, et plus encore les féveroles et autres protéagineux, sont des cultures très mineures en Suisse, mais leur valeur dans la rotation des cultures et la production d'aliments protéiques à la ferme est élevée, en particulier dans l'agriculture biologique. Le rendement est néanmoins instable en raison de contraintes biotiques et abiotiques qui ne sont pas bien comprises à l'heure actuelle. L'irrigation pour soutenir le rendement et la qualité est globalement considérée comme indispensable dans la production de pommes de terre en raison de sa sensibilité. Il est important d'atteindre une plus grande productivité de l'eau et il semble qu'il existe une grande variation inexploitée dans les mécanismes de réponse à la sécheresse à de multiples niveaux : précocité, morphologie des racines et des pousses et réponses physiologiques. Enfin, dans le cas de la betterave sucrière, les effets du stress de la sécheresse sur le rendement et la teneur en sucre sont soupçonnés en Suisse, mais n'ont pas été déterminés quantitativement. L'irrigation n'est pas bien développée en ce qui concerne les stades de croissance critiques, le calendrier et les quantités, et son effet sur la qualité du produit. La plupart des cultures alternatives ayant une tolérance à la sécheresse potentiellement plus élevée ont un statut de niche et/ou sont cultivées surtout dans le segment de l'agriculture biologique. Pour d'autres, comme le sorgho, il existe des indications claires d'un potentiel de production important, en particulier dans les régions où la sécheresse estivale affecte le maïs.

La résistance à la sécheresse est un caractère quantitatif dont le contrôle génétique est complexe. La dissection génétique et l'identification des gènes à l'aide de diverses approches génétiques et génomiques, ainsi que

l'intégration du phénotypage, se sont avérées prometteuses pour le développement de la résistance à la sécheresse dans diverses cultures. Les technologies de sélection développées au cours des dernières décennies, telles que marker-assisted selection, genomic selection, genetic engineering et gene editing, démontrent qu'il est possible d'obtenir une résistance à la sécheresse chez les plantes cultivées. Le déploiement de ces outils et technologies est suggéré dans le cadre d'un programme de sélection intégré pour les principales cultures arables dans les conditions climatiques suisses.

Actuellement, plusieurs pratiques agronomiques sont disponibles pour augmenter la résistance des systèmes de culture à la sécheresse et à la chaleur. Le travail réduit du sol est déjà pratiqué dans une certaine mesure en Suisse et vise principalement à augmenter la quantité de matière organique du sol. Cela a un effet positif sur la capacité de rétention d'eau du sol en améliorant sa structure physique. L'ajout de copeaux de bois comme amendement organique aux sols agricoles a le même objectif, mais à un rythme plus rapide que le travail réduit du sol. Il a été démontré que la diversification de la rotation des cultures par l'inclusion de cultures et de légumineuses plus tolérantes à la sécheresse améliore la fertilité globale du sol et indirectement la résistance des cultures, bien que les mécanismes ne soient pas encore totalement connus. L'application de biostimulants est censée agir directement au niveau de la plante, mais là aussi, les processus fonctionnels doivent encore être élucidés par des études plus approfondies. Enfin, l'agroforesterie semble déclencher un certain nombre d'effets positifs, notamment une augmentation des stocks de carbone dans le sol, mais aussi des changements de microclimat qui atténuent la demande en eau des cultures. Dans l'ensemble, on s'attend à ce qu'une combinaison de pratiques agronomiques contribue à la résilience des systèmes de grandes cultures lorsqu'elle est associée à d'autres mesures, notamment des cultures et des variétés tolérantes à la sécheresse.

### 3 Summary

Climate change, and in particular drought and heat, affect crop yield and quality, and as a consequence also food security and farm revenues. The “Climate resilient arable farming” project envisions a robust and stable agricultural production despite drought and heat stress by 2035. In the first stage of the project, the current state of knowledge and practices for a climate resilient arable farming in 2035 is assessed and possible adaptations are proposed. The current report is part of this first stage as its goal is to compile information on different contributing themes, including pedoclimatic zones, irrigation, choice of varieties, alternative arable crops with higher levels of drought tolerance, breeding for drought tolerance, and agronomical measures for increased system resilience. The focus is on cereals, including maize, oilseed and protein crops, potatoes and sugar beet. Current knowledge gaps have been identified and feature in the conclusions at the end of each chapter.

Both soil and climate suitability maps for Swiss agriculture are outdated and need revision. Soil mapping at high spatial resolution and according to newly defined standards is being setup by the recently established Competence Centre for Soils (KOBO). The measurements now also include parameters important for agriculture in face of drought stress, such as water holding capacity and usable soil depth. Agricultural suitability classes have been revised, but here the contribution of climate has not been updated as yet. Initiatives in this sense include the demonstration of the increase in thermal growing season length over the last century, and the development of thermal suitability maps for crops. Because of higher temperatures, crop water demand is expected to increase by 20 to 40 mm by 2035, and the part of open farming land requiring irrigation may expand to 70 %. A further 10-20 % increase in irrigation demand is expected in the irrigation hotspots of today, i.e., the Geneva-Solothurn axis and Schaffhausen and surrounding areas.

Irrigation is practiced as a first means to maintain yield and quality under drought stress, and is currently indispensable in potato production systems. Up-to-date, quantitative information on irrigation in Switzerland as a whole or in the cantons is only partly or not available, or is not centralized, nor publicly available. Current assessments of the extent of irrigation in Switzerland are based on surveys conducted by the Federal Statistical Office between 2010 and 2020. They show an increase in the share of irrigated grassland especially in the western Plateau, whereas in the east, vegetable and fruit production remain the most irrigated cultures. Groundwater (aquifers and springs) and surface water (lakes, rivers and streams) constituted the principal sources of irrigation water, closely followed by the public water supply in a survey conducted in 2016. The latter is in some cases an answer to the problems associated with abstraction from streams and small rivers, as restrictions occur more frequently and for a longer duration. As a consequence, and where possible, abstraction has shifted to lakes, in particular in the Broye and three lakes region. This practice is considered sustainable now and also in the near future. In some cases, this is also true for groundwater abstraction. Farmers are increasingly organized in cooperatives to manage infrastructure and water usage. Irrigation projects are supported since about 2003 by the sector land improvements of the Federal Office for Agriculture and the respective cantonal offices. Projects now need to demonstrate medium-term water availability and indicate measures to ensure irrigation efficiency. Subsidies are currently restricted to irrigation-worthy crops which excludes arable farming except for potato. The strategy of the Federal Office for Agriculture with regards to structural improvements proposes a continued financial support for irrigation infrastructure development. In regions without access to reliable and sustainable water resources, alternatives are considered in the form of local water retention reservoirs and water retention measures. The direct reuse of treated wastewater is currently not allowed, but is under investigation.

Hose reels with sprinkler cars or irrigation booms are the most applied irrigation equipment in arable farming in Switzerland. The irrigation efficiency is not optimal, but can be improved with investments in more recent versions. Surface and subsurface drip irrigation systems are expensive and not always suitable from an agronomic point of view, but have a higher water and energy use efficiency. Recommendation tools to determine the timing and volumes of irrigation are based on either aboveground or belowground environment measurements, or a combination of both. Their application in arable farming (mostly potatoes) is in progress. Alternative plant-based methods that may further increase irrigation efficiency, are in an early development stage. On the modelling side, progress is made in irrigation recommendation based on soil, weather and crop information, or based on remote sensing data, but mostly in neighboring countries.

Drought and heat stress effects on crop growth, development, physiological processes and finally yield depend on the intensity and duration of the stresses, and their timing during the crop growing season. In crops producing seeds, the late vegetative (pre-flowering), flowering and early seed set stages are the most sensitive to abiotic stress and determine to a large extent the final yield loss. For most arable crops, early flowering or maturing varieties may escape from summer heat or drought stress, but potentially with intrinsically lower yields. Earlier sowing is another option, but is restricted by sustained frost risk and relatively limited warming in early spring in the coming decade. Besides this stress escape strategy, varietal differences may occur in drought tolerance mechanisms, of which osmotic adjustment is the most important. Drought postponement or avoidance can involve a plethora of growth, developmental and physiological processes to limit water demand and loss.

The criteria for the agronomic examination of new varieties currently do not include an abiotic stress-related check. Potential change is underway which may incentivize breeders and their representatives to propose drought and heat tolerant varieties for Swiss arable farming. Also, national variety testing trials represent a rich tool for analysis of yield and quality responses to environmental factors (currently mostly weather) and genotype x environment x management interaction studies. The latter may also contribute to the development of variety mixtures for increased production system stability in face of abiotic stresses.

The critical growth stages of cereals, including maize, occur during late spring and summer when drought and heat may affect their yield potential, final yield and also quality. Even so, no systematic quantitative assessment of the current levels of yield and quality loss due to abiotic stresses is available. Rapeseed is the major oilseed crop in Swiss arable farming and because its critical growth stages occur in late spring, it is believed to escape from abiotic stresses; currently its production is more affected by insect pests. Soybean cultivation has been possible in Switzerland since about 30 years. Flowering and grain filling periods occur in mid-summer which puts soybean production at risk already now, but even more so in the future. Field peas and even more so faba beans and other grain legumes are very minor crops in Switzerland, but their value in crop rotation and on-farm protein feed production is high, especially in organic farming. Yield is nevertheless unstable because of biotic and abiotic constraints which are not well understood at the moment. Irrigation in support of yield and quality is overall considered as indispensable in potato production because of its sensitivity. Achieving a higher water productivity is important and it seems that large unexploited variation exists in drought response mechanisms at multiple levels: precocity, root and shoot morphology and physiological responses. Finally, in sugar beet, drought stress effects on yield and sugar content are suspected in Switzerland, but not quantitatively determined. Irrigation is not well developed in the sense of critical growth stages, timing and quantities, and its effect on product quality. Most alternative crops with potentially higher drought tolerance have a niche status and/or are mostly cultivated in the organic farming segment. For others, such as sorghum, there are clear indications for a large production potential especially in areas where summer drought is affecting maize.

Resistance to drought is a quantitative trait with a complex genetic control. Genetic dissection and identification of genes using various genetic and genomic approaches, together with the integration of phenomics, have proven to be promising for the development of drought resistance in various crops. Breeding technologies developed during the last decades, such as marker-assisted selection, genomic selection, genetic engineering and gene editing, are demonstrating the feasibility of obtaining drought resistance in crop plants. The deployment of such tools and technologies is suggested through an integrated breeding program for important arable crops under Swiss climate conditions.

Currently, several agronomic practices are available to increase the resilience of cropping systems to drought and heat. Reduced tillage is already practiced to some extent in Switzerland and is aimed mainly towards increasing the amount of soil organic matter. This has a positive effect on the water holding capacity of the soil by improving its physical structure. The addition of wood chips as an organic amendment to agricultural soils has the same aim, but at a faster rate compared to reduced tillage. Crop rotation diversification by means of including more drought tolerant crops and legumes has been shown to improve overall soil fertility and indirectly crop resilience, although the mechanisms are not yet fully understood. The application of biostimulants is thought to act directly at the plant level, but here as well, functional mechanisms remain to be elucidated by further studies. Finally, agroforestry systems seem to trigger a number of positive effects, including not only an increase in soil carbon stocks, but also microclimate

changes that attenuate crop water demand. Overall, it is expected that a combination of this type of agronomic practices will contribute to the resilience of arable farming systems when associated with other measures including drought tolerant crops and varieties.

## 4 Einleitung

Nathalie Wuyts<sup>1</sup>, Christoph Carlen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Produktionssysteme Pflanzen, Anbautechnik und Sorten Ackerbau, Agroscope, Nyon

<sup>2</sup> Produktionssysteme Pflanzen, Agroscope, Nyon-Conthey

Boden, Wasser, Wärme und Sonnenlicht sind die grundlegenden Produktionsfaktoren in der Landwirtschaft. Im Zuge des Klimawandels sehen sich Ackerkulturen zunehmend mit Wasserknappheit konfrontiert, die Stressreaktionen auf Trockenheit hervorruft. Diese führen zu Ertrags- und Qualitätseinbussen, erschweren die landwirtschaftliche Produktion und führen zu unsicheren landwirtschaftlichen Erträgen und abnehmender Ernährungssouveränität in der Schweiz. Die pflanzliche Produktion ist zudem durch die Auswirkungen von Hitzestress bedroht. Zwischen Mai und Mitte August 2022 erreichten die Niederschlagssummen in der Westschweiz einen seit 140 Jahren nicht mehr beobachteten Tiefstwert von 200 mm, verglichen mit 400 mm im Durchschnitt der Periode 1990-2020. Gleichzeitig sanken die Niederschlagssummen in der Nordostschweiz auf rund 300 mm, verglichen mit 500 mm im Mittel der Periode 1990-2020. Zusammen mit dem Rekord von 2018 waren dies die niedrigsten Werte, die in der Region seit 60 Jahren beobachtet wurden [1]. Die Zahl der Sommertage mit Höchsttemperaturen über 25 °C wird im Mittelland bis 2035 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010 um mindestens 10 Tage in tiefen Lagen und um 5 Tage oder mehr in Höhenlagen über 500 m zunehmen. Die Zahl der Tage mit Temperaturen über 30 °C wird in tiefen und hohen Lagen um mindestens 5 bzw. 3 Tage zunehmen [2].

Insgesamt zeigen die Wetterbedingungen im Frühjahr und Sommer der letzten zehn Jahre die zunehmende Häufigkeit, Dauer und Schwere von Wetterextremen, aber auch die hohe Variabilität zwischen den Jahren. Die Umstellung auf klimaresistente Produktionssysteme zielt auf die Stabilisierung der pflanzlichen Erzeugung und der betrieblichen Situation ab. Die Bewässerung ist eine erste direkte und wirksame Lösung, um Niederschlagsdefiziten entgegenzuwirken, doch stellt sich die Frage nach ihrer Nachhaltigkeit. Einerseits können Massnahmen zur Steigerung der Bewässerungseffizienz ergriffen werden, andererseits ist derzeit unklar, wie sich der Bewässerungsbedarf entwickeln wird und welche Kulturen in Zukunft bewässert werden sollen oder können. Ausserdem haben nicht alle Betriebe Zugang zu nachhaltigen Wasserressourcen oder müssen mit flachgründigen oder leichten Böden mit begrenzter Wasserspeicherkapazität zurechtkommen. Für letztere gibt es agronomische Optionen zur Erhöhung des Wasserrückhaltungsvermögens des Bodens, die jedoch noch gefestigt und in die Praxis umgesetzt werden müssen. Mehr Informationen über die Bodenmerkmale auf lokaler Ebene, sowie regionale Klimaunterschiede, können bei der Entscheidungsfindung und bei der Vorhersage des Ausmasses von Trockenheit helfen. Für Gebiete oder landwirtschaftliche Betriebe, die zu wenig Niederschlag für eine optimale Produktion erhalten, und aus Gründen der Wasserverfügbarkeit oder der damit verbundenen Kosten keinen Zugang zur Bewässerung haben, sollten Pflanzensorten zur Verfügung stehen, die eine erhöhte Trockenheitstoleranz aufweisen oder die der sommerlichen Trockenheit und Hitze entgehen. Alternative, trockenheitstolerantere Kulturpflanzen können in Betracht gezogen werden, aber ihre Einführung in die reguläre landwirtschaftliche Produktion muss von Massnahmen zur Sensibilisierung, zum Marktpotenzial und zur Verarbeitung begleitet werden. Deshalb können aus heutiger Sicht die folgenden Hauptaktionsbereiche ins Auge gefasst werden:

- i) Optimierung der Bewässerung und der Wasserverfügbarkeit,
- ii) Auswahl von Sorten,
- iii) Auswahl von Kulturen, die dürre- und hitzetoleranter sind,
- iv) Anbausysteme, die das Wasser im Boden besser speichern, und
- v) Züchtung auf Dürretoleranz.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Ackerbau, einschliesslich Getreide, Ölsaaten und Eiweisspflanzen, Kartoffeln und Zuckerrüben. Nur bei Kartoffeln wird Trockenstress derzeit recht systematisch durch Bewässerung bekämpft, während Hitzestress weiterhin Ertrag und Qualität beeinträchtigt. Die anderen Ackerkulturen werden im generellen als nicht bewässerungswürdig angesehen.

In der Vision des Projekts klimaresilienter Ackerbau können Schweizer Ackerbausysteme Trockenperioden bewältigen und einen stabilen und qualitativen Ertrag erhalten. Die Klimaresilienz muss deshalb gestärkt werden. Mit einem langfristig ausgerichteten Projekt sollen bestehende Initiativen sichtbar gemacht, koordiniert, mit neuen Aktionen ergänzt und auch auf politischer Ebene die richtigen Weichen gestellt werden, um den Ackerbau in der Schweiz bis 2035 klimaresilient zu machen.

In einer ersten Phase sind die Projektpartner Schweizer Hagel, fenaco, der Schweizerische Bauernverband und Agroscope. Dabei wird der aktuelle Stand des Wissens und der Praktiken für einen klimaresistenten Ackerbau im Jahr 2035 bewertet und es werden mögliche Veränderungen (Soll-Ist-Analyse) vorgeschlagen. Der vorliegende Bericht ist Teil dieser ersten Phase, da sein Ziel darin bestand, Informationen über aktuelle und zukünftige pedoklimatische Zonen, Bewässerung, Sortenwahl, alternative Ackerkulturen mit höherer Trockenheitstoleranz, Züchtung auf Trockenheitstoleranz und schliesslich agronomische Massnahmen für eine erhöhte Systemresilienz zusammenzustellen. Sowohl für jedes Thema, als auch themenübergreifend werden Wissenslücken ermittelt und Ansätze zur Schliessung dieser Lücken vorgeschlagen.

[1] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2022). Extreme Niederschlagsarmut.

<https://www.meteoschweiz.admin.ch/ueber-uns/meteoschweiz-blog/de/2022/9/extreme-niederschlagsarmut.html>

[2] National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.). (2018). CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz.

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/ch2018-webatlas.html>

## 5 Aktuelle und künftige pedoklimatische Zonen für den Ackerbau

Nathalie Wuyts<sup>1</sup>, Thomas Toschini<sup>2</sup> und Pierluigi Calanca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Produktionssysteme Pflanzen, Anbautechnik und Sorten Ackerbau, Agroscope, Nyon

<sup>2</sup> Agrarökologie und Umwelt, Klima und Landwirtschaft, Agroscope, Zürich

### 5.1 Zusammenfassung

Sowohl die Boden- als auch die Klimaeignungskarten für die Schweizer Landwirtschaft sind veraltet und müssen überarbeitet werden. Das Kompetenzzentrum Boden wurde gegründet, um den Rahmen für eine hochauflösende Kartierung der Bodeneigenschaften nach den neuesten und aktualisierten Methoden und Richtlinien zu schaffen. Das übergeordnete Ziel ist die nachhaltige Bewirtschaftung der Schweizer Böden. Im Hinblick auf die Landwirtschaft und den Klimawandel wird dem Wasserhaltevermögen und dem Gehalt an organischer Substanz im Boden sowie die Gründigkeit mehr Bedeutung beigemessen. Auch die landwirtschaftlichen Eignungsklassen wurden entsprechend überarbeitet. Ein erster Hinweis auf die Aktualisierung der Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft wurde gegeben, indem die Zunahme der Länge der thermischen Vegetationsperiode im letzten Jahrhundert aufgezeigt wurde. Für Mais wurde eine Karte der thermischen Eignung veröffentlicht, die in erster Linie als Leitfaden für die Sortenauswahl nach Reifeklassen bei Körner- und Silomais dient. Die thermische Karte für Sorghum belegt die Eignung des Schweizer Mittellandes für den Sorghumanbau.

Die Temperatur ist in der Schweiz seit 1980 deutlich angestiegen und wird trotz Klimaschutzmassnahmen weiter zunehmen. Gleichzeitig werden sich die Niederschlagsmuster ändern, mit mehr Niederschlag (in Form von Regen) im Winter und weniger im Sommer. Die Auswirkungen der höheren Temperaturen auf den Wasserbedarf der Pflanzen können abgeschätzt werden; bis 2035 wird ein Anstieg des Wasserbedarfs der Pflanzen um 20 bis 40 mm erwartet. Grobe Schätzungen des Anteils der bewässerungsbedürftigen landwirtschaftlichen Flächen am offenen Ackerland zeigen eine Ausweitung von heute 40 bis 50 % auf etwa 70 % in naher Zukunft (2035). Eine regionale Abschätzung des jährlichen Bewässerungsbedarfs zeigt eine Zunahme entlang der Achse Genf-Solothurn sowie in Schaffhausen und Umgebung (bereits heute Hotspots) von 4 bis 12 mm (oder +10 bis 20 %).

Es wurden wichtige Schritte zur Aktualisierung der landwirtschaftlichen Eignungskarten im Hinblick auf die neuen Herausforderungen des Klimawandels unternommen. Zurzeit betreffen diese hauptsächlich Bodenaspekte. Neben der Länge der Vegetationsperiode kann noch mehr getan werden, um wichtige Umweltfaktoren einzubeziehen, die die Entwicklung und schliesslich den Ertrag und die Qualität beeinflussen. Die daraus resultierenden Karten können dann als Managementinstrumente für die Planung und Budgetierung von Anpassungs- und Klimaschutzmassnahmen angesehen werden, insbesondere wenn auch Informationen über das Bewässerungspotenzial einbezogen werden.

### 5.2 Einleitung

Der grösste Teil des Ackerbaus in der Schweiz befindet sich im Mittelland, das sich vom Genfersee im Westen bis zum Bodensee im Osten erstreckt und im Süden an die voralpine und alpine Region grenzt (Abbildung 5-1). Im nationalen Katastersystem umfasst es die Tal- und Hügelzone, was im Jahr 2022 488'619 ha bzw. 146'608 ha landwirtschaftliche Nutzfläche entspricht (Bundesamt für Statistik BFS, 2023). Im Allgemeinen bestimmen das mildere Klima, die weniger extreme Topografie und die Bodeneigenschaften wie Gründigkeit die Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung im Vergleich zu den Berggebieten. Auf subregionaler Ebene bestimmen die Unterschiede in den drei Parametern Klima, Topographie und Boden die Eignung für bestimmte Kulturen wie Kartoffeln (beste Bedingungen), für Getreide und für Futter- und Weidegrünland (ungünstigste Bedingungen).

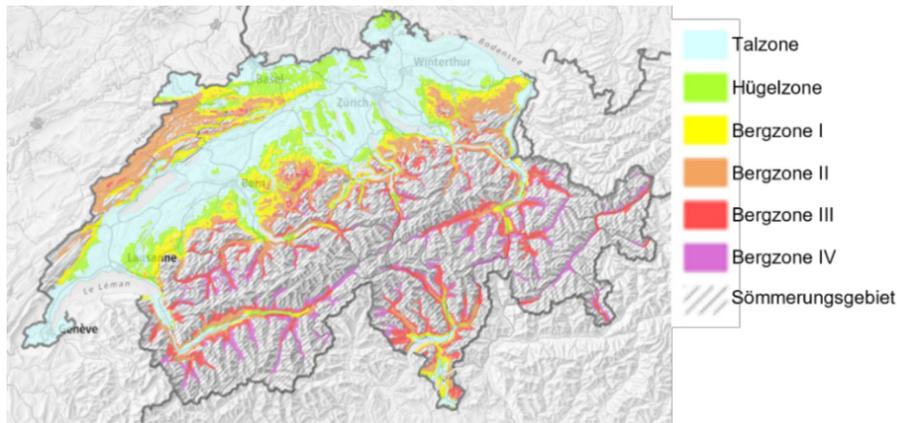


Abbildung 5-1 Schweizer Landwirtschaftszonen. Die Region Mittelland entspricht den Zonen Tal (blau) und Hügel (grün). Landwirtschaftliche Zonengrenzen Copyright © Bundesamt für Landwirtschaft.

Eine Bodeneignungskarte für die Landwirtschaft wurde in den 1970er Jahren von der Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt in Zürich-Reckenholz (Teil der heutigen Agroscope) erstellt und 1980 von den Bundesämtern für Raumplanung, für Landwirtschaft und für Forstwirtschaft veröffentlicht (EJPD et al., 1980). Später wurde sie vom Geographischen Institut der Universität Bern digitalisiert und schliesslich vom Bundesamt für Statistik überarbeitet und georeferenziert (Bundesamt für Statistik, 2001). Die ursprüngliche Karte bestand aus 144 geologischen und geomorphologischen Einheiten, die mit Daten zu Bodentypen und -merkmalen ergänzt wurden, und den kartografischen Einheiten wurden 18 Eignungsklassen für die landwirtschaftliche Bodennutzung zugeordnet. Die öffentlich zugänglichen Daten wurden zuletzt im Jahr 2008 aktualisiert (Abbildung 5-2) (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2012; GEOSTAT, Bundesamt für Statistik BFS, 2020).

Im Jahr 1977 wurde eine Klimateignungskarte erstellt, die später digitalisiert und öffentlich zugänglich gemacht wurde (Bundesamt für Landwirtschaft BLW & Meteotest, 2012; Jeanneret & Vautier, 1977). Sie enthält Zonen, die einer von 20 Klassen zugeordnet sind, basierend auf einer Bewertung der klimatischen Bedingungen und der Einschränkungen für landwirtschaftliche Erträge für drei Kulturarten mit unterschiedlichen Anforderungen: Futterpflanzen (hauptsächlich Dauergrünland), Getreide (insbesondere Weizen) und eine Hackfrucht (Kartoffel) (Abbildung 5-2). Die für die Bewertung verwendeten Klima- und Ertragsdaten stammen aus den Jahren 1901-1974.

Selbstverständlich müssen die Zonen im Hinblick auf das aktuelle Klima und künftige Prognosen überarbeitet werden, und die Eignungskriterien müssen an neue Kultursorten und -arten, aktuelle Erkenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Umwelt sowie an Bodeneigenschaften wie Wasserhaltevermögen und Gründigkeit angepasst werden. Es wird anerkannt, dass die topografische und pedologische Heterogenität in den Bodeneignungsklassen der derzeit öffentlich zugänglichen Karte gross ist und daher nur als allgemeiner Hinweis betrachtet werden sollte (Bundesamt für Landwirtschaft, 2012).

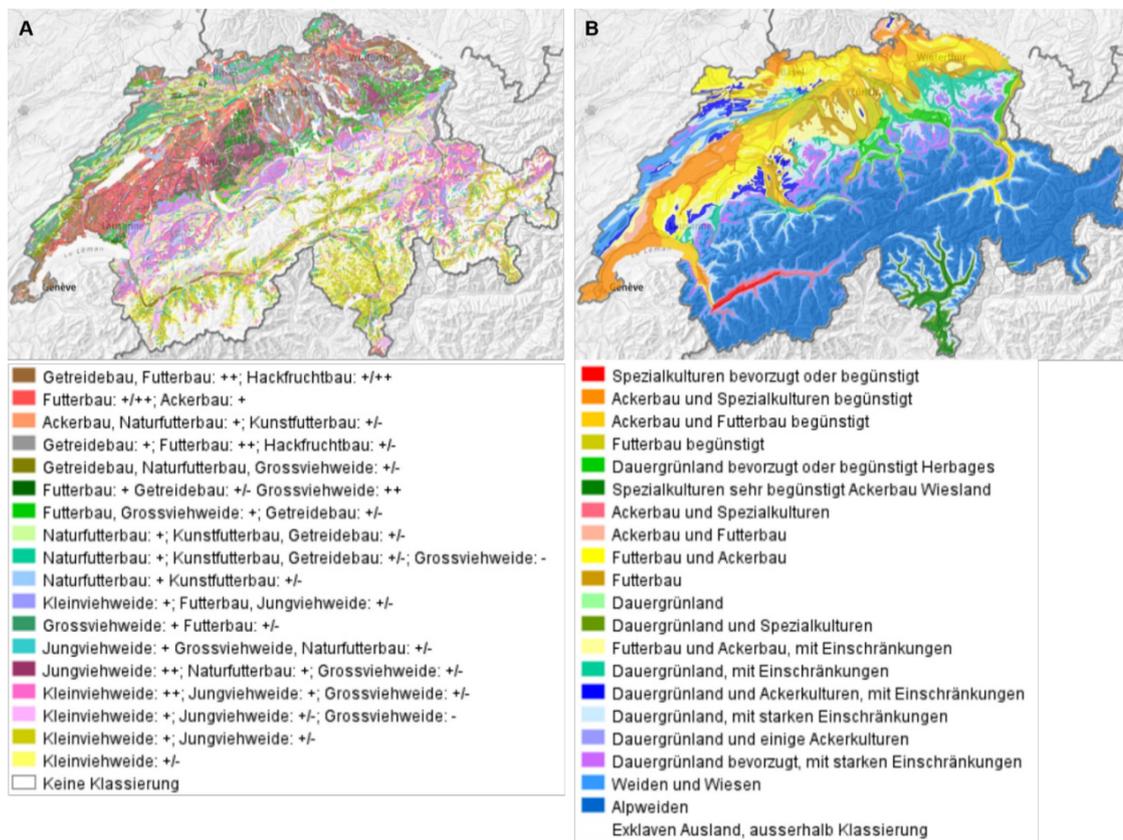


Abbildung 5-2 Vorhandene Boden- (A) und Klimaeignungskarten (B) für die Schweizer Landwirtschaft. Quelle: Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2012); Bundesamt für Landwirtschaft BLW und Meteotest (2012).

### 5.3 Bodenkartierung und landwirtschaftliche Eignung - Situation und Ausblick

Die Kartierung von Böden in landwirtschaftlichen Gebieten in der Schweiz geht auf das Jahr 1953 zurück und wurde bis 1996 im nationalen Bodenkartierungsdienst der Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt in Zürich-Reckenholz fortgesetzt. Im Jahr 2012 wurde das nationale Bodeninformationssystem NABODAT eingerichtet (Verbund NABODAT, 2023). Es sieht sowohl ein Netzwerk von Bodendiensten auf nationaler und kantonaler Ebene als auch eine Datenbank mit Webanwendung vor, in der bestehende Daten zu Bodeneigenschaften zusammengetragen und vereinheitlicht wurden und werden (Rehbein et al., 2017). Letztere beinhalten meist punktuelle Bodeninformationen (inkl. Profildaten), während die räumlichen Daten (Bodenkarten) derzeit noch sehr heterogen und verstreut sind (Rehbein et al., 2019). Die vorhandenen Bodenkarten unterscheiden sich aufgrund des langen Erfassungszeitraums (seit 1953) stark in Massstab (räumliche Auflösung) und angewandter Methodik. Rehbein, Sprecher, und Keller (2019) geben einen Überblick über die bestehenden Bodenkartendaten für die Schweizer Landwirtschaftsflächen, die sie je nach Erfassungsmassstab und -methode einer von vier Kategorien zuordnen (Abbildung 5-3).

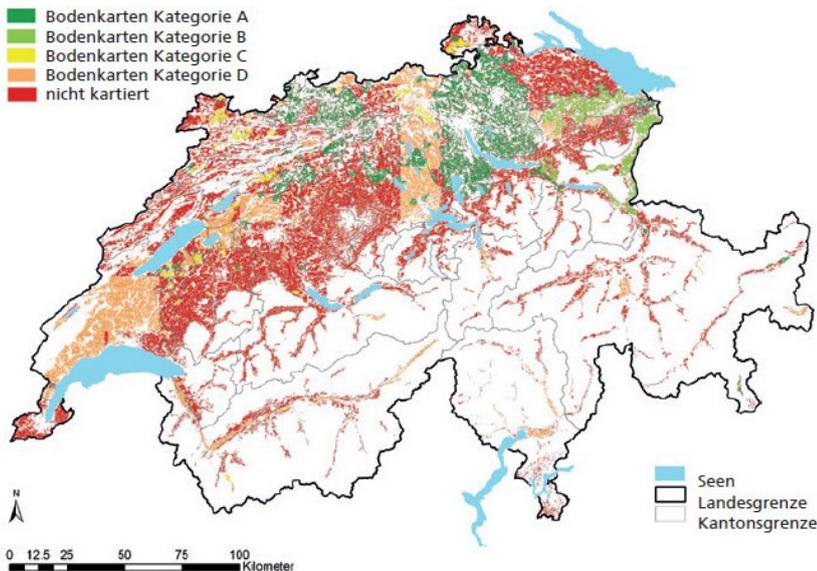


Abbildung 5-3 In der Schweiz vorhandene Bodeninformationen für Landwirtschaftsflächen. Die Kategorien A bis D gruppieren die Qualität der Bodendaten nach dem Charakterisierungsschlüssel der Bodendaten und dem räumlichen Massstab. Quelle: Keller et al. (2022); Rehbein et al. (2019).

Nur für 13 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz (Kategorie A), was 127'419 ha entspricht, liegen Bodenkarten von guter Qualität nach den heutigen Anforderungen vor. Weitere 4 % müssen noch im Feld verifiziert werden (Kategorie B), und 2 % könnten auf aktuelle Standards umgerechnet und ebenfalls im Feld verifiziert werden (Kategorie C). Insgesamt gibt es für 81 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (784'000 ha) keine oder qualitativ unzureichende Bodenkarten (Kategorie D) (Abbildung 5-3). Letztere könnten jedoch wertvolle Ausgangsinformationen für neue Kartierungsarbeiten liefern (Keller et al., 2022; Rehbein et al., 2019).

Die vom Bundesrat im Jahr 2020 verabschiedete Bodenstrategie Schweiz sieht vor, die Böden mit ihrer Fruchtbarkeit und ihren vielfältigen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Funktionen zu erhalten, indem die Übernutzung des Bodens reduziert, die Bodenfunktionen in der Nutzungsplanung berücksichtigt, der Boden vor dauerhaften Schäden geschützt und degradierte Böden saniert werden (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2020). Es wurde erkannt, dass die derzeitige Quantität, Qualität und räumliche Auflösung der Bodendaten nicht ausreichen, um eine nachhaltige Bewirtschaftung der Böden zu ermöglichen. Deshalb wurde das Nationale Kompetenzzentrum Boden (KOBO) gegründet, um moderne Methoden für eine einheitliche, effiziente und konsistente Bodenkartierung zu entwickeln, diese in Pilotprojekten in die Praxis umzusetzen, die Kantone bei der Durchführung der Kartierung zu unterstützen und die Sammlung und Publikation von Bodendaten und -produkten nach heutigen Standards zu organisieren (Keller et al., 2022; KOBO, 2023). Darüber hinaus ist vorgesehen, den Umfang der untersuchten Bodeneigenschaften um diejenigen zu erweitern, die für die Charakterisierung der Bodenfunktionen wichtig sind. Für das Mittelland wird eine räumliche Auflösung von 1:5000 angestrebt, für andere Gebiete wie Sömmerungsgebiete und Wälder wird die Auflösung geringer sein. Die Vorarbeiten für die gesamtschweizerische Bodenkartierung laufen bis 2028, und die Kartierung soll 2029 beginnen. Es wird erwartet, dass dies etwa 20 Jahre dauern wird (Kompetenzzentrum Boden, persönliche Mitteilung, 11.07.2023).

Bodeneigenschaften wie das Wasserhaltevermögen, die Gründigkeit und der Gehalt an organischem Kohlenstoff sind im Zusammenhang mit der Anpassung an Dürrestress und dessen Abschwächung in der Landwirtschaft von grosser Bedeutung. Aktuelle Bodendaten können bereits ausreichende Schätzungen der Wasserhaltekapazität liefern. Dies ist vor allem im Kanton Zürich und verteilt in den Kantonen Basel-Landschaft, Solothurn und Luzern der Fall, wo qualitative Kartierungsdaten verfügbar sind (grüne Flächen in Abbildung 5-3; Beispiel für den Kanton Solothurn im Anhang 11.1, Ergänzende Abbildung 11.1-1, Geoportal Kanton Solothurn 2023). In den übrigen Gebieten des Mittellandes, in denen Daten erhoben wurden, sind diese ungenügend aufgelöst oder entsprechen nicht den aktuellen Qualitätsstandards und können daher keine zuverlässigen Schätzungen liefern (Kompetenzzentrum Boden, persönliche Mitteilung, 11.07.2023). Die Anreize für die Kantone, sich an der neuen, umfassenden, mehrjährigen Bodenkartierung zu beteiligen, sind vielfältig. Dazu gehören unter anderem die

Abschätzung des Naturgefahrenrisikos, die Beurteilung des Dürregrads für die Wassernutzungsplanung und die Raumplanung. Letzteres ist wichtig im Hinblick auf die gesetzliche Verpflichtung der Kantone, ein bestimmtes Kontingent ihrer Flächen für die sogenannte Fruchtfolgefläche zu erhalten. Die derzeitige Fläche von rund 436'351 ha (Bundesamt für Statistik BFS, 2021a) ist durch Überbauung und zunehmende Verstädterung ständig bedroht (Abbildung 5-4), wobei teilweise auch die produktivsten Ackerflächen betroffen sind.

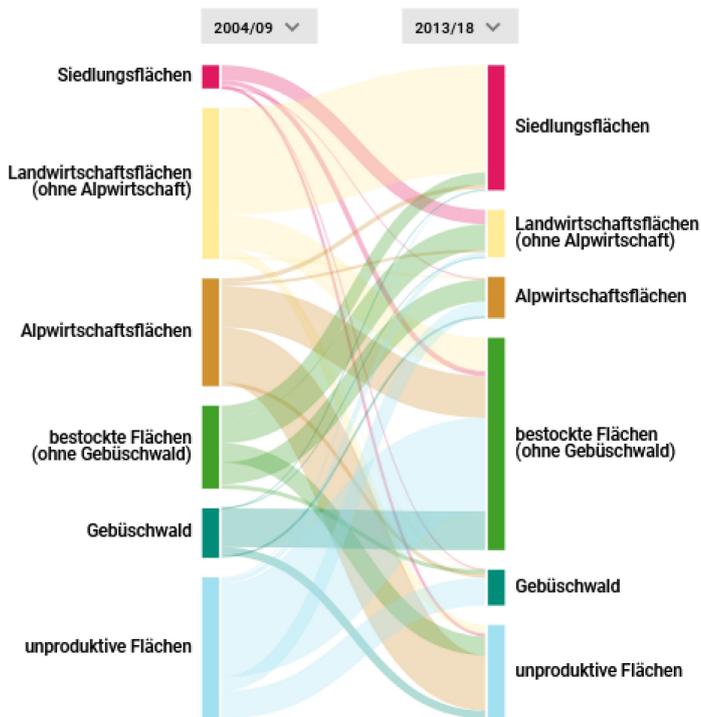


Abbildung 5-4 Konvertierte Flächen zwischen den Zeiträumen 2004-2009 und 2013-2018 mit Angabe der Änderung der Nutzungsart. Dreiundachtzig Prozent der konvertierten landwirtschaftlichen Flächen (ohne Alpwirtschaftsflächen) wurden in Siedlungsflächen umgewandelt. Quelle: Bundesamt für Statistik BFS (2021b).

Im Jahr 2020 hat der Bundesrat einen aktualisierten Sachplan für Fruchtfolgeflächen genehmigt, der einen besseren Schutz gewährleisten soll (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2020). Es wurden neue Anforderungen für die Kompensation von Fruchtfolgeflächen, die für andere Zwecke genutzt werden, eingeführt. Die ordnungsgemässe Umsetzung eines Flächennutzungsplans auf Kantonsebene setzt umfassende Kenntnisse über die verfügbaren Bodenressourcen voraus, die derzeit als unzureichend eingeschätzt werden. Die Kantone werden bei der Erweiterung ihrer Wissensbasis über die Bodeneigenschaften und die geeignete Bodennutzung vom KOBO unterstützt, und im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten für die nationale Bodenkartierung vereinbaren Bund und Kantone, die erforderlichen Gesetzesänderungen vorzunehmen, um die Kantone zur Durchführung der Bodenkartierung und zur Bereitstellung der Daten zu verpflichten (Kompetenzzentrum Boden, persönliche Mitteilung, 11.07.2023).

Parallel zu den Vorbereitungsarbeiten des KOBO läuft ein Projekt (2019-2025) zur Überarbeitung der Methodik für die Klassifizierung und Kartierung der Schweizer Böden (HAFL, 2023). Im Jahr 2026 soll ein umfassender Leitfaden mit dem Titel "Beschreibung, Klassifikation und Kartierung der Schweizer Böden" veröffentlicht werden. Ziel ist eine homogene Beschreibung der Böden mit einer adäquaten Charakterisierung der Bodenvariabilität und eine effiziente, nutzerorientierte Bodenkartierung (HAFL, 2023). Im Rahmen der ersten Phase wurden die ursprünglich 1997 veröffentlichten Bodeneignungsklassen für die Landwirtschaft im Hinblick auf die derzeitigen Umweltbedingungen für das Wachstum und den Ertrag von Kulturpflanzen neu bewertet (Brunner et al., 1997; Wendling et al., 2022) und die Anweisungen für die Zuweisung der Klassen aktualisiert. Die landwirtschaftliche Eignung wird durch den geschätzten potenziellen Ertrag, die Ertragssicherheit sowie die Anbau- und Bodenbearbeitungsbedingungen für einen bestimmten Standort bestimmt. Daraus ergeben sich 10 Klassen, wobei Klasse 1 den besten Bedingungen mit uneingeschränkter Kulturwahl und Klasse 10 den schlechtesten Bedingungen, z. B. sehr nassen Streuwiesen,

entspricht (Greiner et al., 2023). Das Klima am Untersuchungsstandort basiert auf der 1977 veröffentlichten Klimaeignungskarte (Abbildung 5-2) (Bundesamt für Landwirtschaft BLW & Meteotest, 2012; Jeanneret & Vautier, 1977), während für den Boden ober- und unterbodenbezogene Bodeneigenschaften (Steinigkeits, Textur, Humusgehalt, pH-Wert) und eine profilbezogene Bodeneigenschaft (Untergruppe Wasserhaushalt) benötigt werden. Die Geländevariablen schliesslich umfassen die Hangneigung und einen Neigungstyp, die aus dem digitalen Höhenmodell von swisstopo abgeleitet werden sollen (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2023). Die Bedeutung der nutzbaren Bodentiefe für die Bestimmung der Wurzelzonentiefe und des pflanzenverfügbaren Wassers sowie des Auftretens von Vernässung wurde erkannt (Wendling et al., 2022) und in das ursprünglich von (Brunner et al., 1997) formulierte Kriterium der Wasserbilanzuntergruppe aufgenommen. Ein Beispiel geben (Wendling et al., 2022): Während einer regenfreien Periode kann ein mittelschwerer Boden mit einer Gründigkeit von 70 cm den Wasserstress um 10 Tage aufschieben, verglichen mit einem Boden mit einer Gründigkeit von 30 cm (berechnet bei einer durchschnittlichen Evapotranspiration von 4 mm Tag<sup>-1</sup> und einem Wasserrückhaltevermögen von 70-100 mm bzw. 10-30 mm). Im Allgemeinen gilt: Je flacher ein Boden ist und je häufiger Vernässungen auftreten können, desto eingeschränkter ist seine Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung. Dennoch werden die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt, indem flachgründige, von Grund- oder Hangwasser beeinflusste Böden einer besseren Eignungsklasse zugeordnet werden als entsprechende normal durchlässige Böden, da sich das zusätzlich verfügbare Wasser in Trockenperioden positiv auswirken kann. Zum gleichen Zweck wird auch der Gehalt an organischer Substanz berücksichtigt, da sie bis zum 3-5-fachen ihres Gewichts an Wasser zurückhalten kann (Greiner et al., 2023). Im Gegensatz zur Textur kann der Gehalt an organischer Substanz durch landwirtschaftliche Praktiken erhöht werden und so die nutzbare Reserve verbessern. Eine Erhöhung der organischen Substanz um 1 % ermöglicht es dem Boden, 40 mm Regen in pflanzenverfügbarer Form zu speichern. Dieser Beitrag ist bei Böden mit grober Textur, die von Natur aus eine geringere Wasserrückhaltekapazität haben, grösser als bei Böden mit feiner Textur (Wendling et al., 2022). Faktoren, die bisher nicht berücksichtigt wurden, hängen mit dem Klima (Frosttemperaturen, milde Winter, Hitze, Trockenheit, Länge der Wachstumsperiode), biotischem Stress (Auftreten von problematischen einheimischen Unkräutern und Neophyten, Schädlingen und Krankheiten) und strukturellen Anpassungen wie dem Bewässerungspotenzial (Verfügbarkeit von Anlagen und einer nachhaltigen Wasserquelle) zusammen (Greiner et al., 2023; Wendling et al., 2022).

## 5.4 Klimaeignung für Schweizer Kulturen

Die thermische Vegetationsperiode, definiert als der Zeitraum des Jahres, in dem die Temperaturbedingungen die Entwicklung der Pflanzen, einschliesslich des vegetativen und vollständigen reproduktiven Wachstums, ermöglichen, hat sich in der Schweiz im letzten Jahrhundert deutlich verlängert. Im Zeitraum von 1971 bis 2020 hat sich die Dauer der Vegetationsperiode um etwa +10 Tage pro Jahrzehnt verlängert. Ausgedrückt in Wachstumsgradtagen, d. h. der Summe der täglichen Durchschnittstemperaturen oberhalb einer Basistemperatur, unterhalb derer kein Wachstum stattfindet, belief sich die Zunahme auf +100 bis +150 °C-Tage pro Jahrzehnt oder auf zusätzliche 400 °C-Tage im Vergleich zum Beginn des letzten Jahrhunderts (Calanca et al., 2023). Die Dauer der thermischen Vegetationsperiode verlängerte sich durch einen früheren Beginn im Frühjahr und in geringerer Masse durch ein späteres Ende im Herbst (Abbildung 5-5). Diese Entwicklung ist am Jurasüdfuss und an der Nordgrenze des Landes, in der Drei-Seen-Region sowie im Reuss-, Glatt- und Rheintal deutlich sichtbar. Ein früherer Beginn der thermischen Vegetationsperiode korrespondiert mit kürzeren Tageslängen, die im Jahr 2020 im Vergleich zu 1971 im Mittelland - 30 Minuten betragen. Dies bedeutet, dass die Verschiebung des Beginns der thermischen Vegetationsperiode nur begrenzte Folgen für photoperiodische Pflanzen haben kann (Calanca et al., 2023).

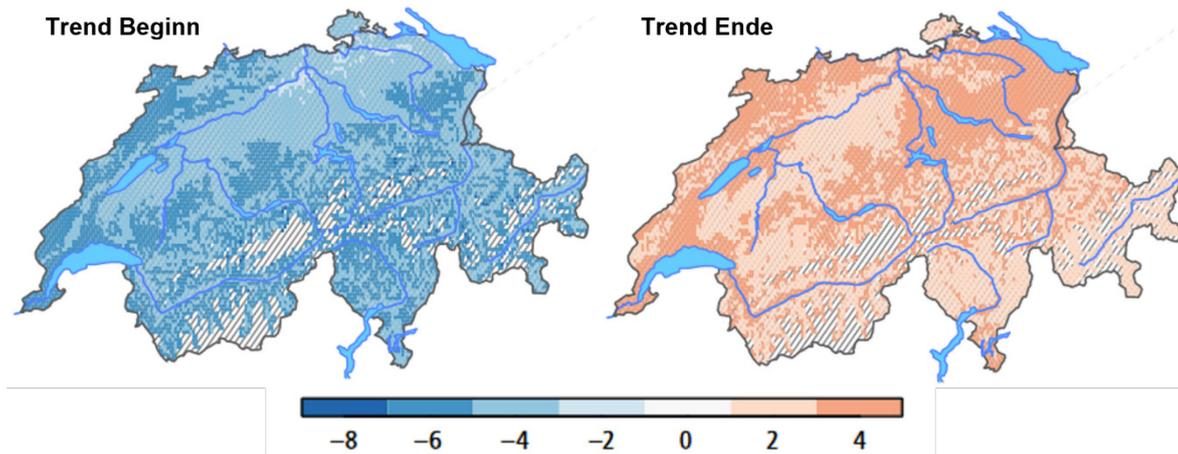


Abbildung 5-5 Karten der Entwicklung des Beginns (links) und des Endes (rechts) der thermischen Vegetationsperiode im Zeitraum 1971-2020, ausgedrückt in Tagen pro Jahrzehnt. Die schraffierten Flächen kennzeichnen Zonen oberhalb von etwa 2500 m über dem Meeresspiegel. Quelle: Calanca et al. (2023).

Ein früherer Beginn der thermischen Vegetationsperiode im Frühjahr und die potenzielle Vorverlegung der Aussaattermine können das Risiko von Frostereignissen während der frühen Pflanzenentwicklung erhöhen. Eine Studie von Vitasse et al. (2018), die den Zeitraum zwischen 1975 und 2016 für das Schweizer Mittelland (unter 800 m über dem Meeresspiegel) abdeckt, stellte einen Anstieg der mittleren minimalen Frühlingstemperatur um  $+0,34 \pm 0,01$  °C pro Jahrzehnt fest (von etwa +2,5 auf +3,5 °C im Jahr 2016), während sich der letzte Frosttag um  $2,6 \pm 1$  Tage pro Jahrzehnt verschob (von etwa 113 auf 110 Tage im Jahr), wobei jedoch immer noch extreme Jahre auftraten (118 Tage entsprechend dem 27. April 2016). Für den Ackerbau im Schweizer Mittelland hat sich das Frostrisiko in den letzten Jahrzehnten also verringert, wenn auch nicht schnell. Es muss bei früheren Aussaatstrategien für Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Sojabohnen und Sonnenblumen weiterhin berücksichtigt werden.

Für Mais und Sorghum, die in der Schweiz angebaut werden, wurden thermische Eignungskarten entwickelt, ähnlich der Karte für Maisproduzenten in Grossbritannien (Limagrain, 2023) und in Anlehnung an ein Online-Tool zur Berechnung der Silomaisreife auf der Grundlage von Temperatursummen («growing degree days»), die für Wetterstationen in der ganzen Schweiz berechnet wurden (Agroscope, 2020). Die Karten zeigen, in welchen Regionen des Schweizer Mittellandes sowohl Silo- als auch Getreidesorten bis Ende Oktober reif werden können (Bütikofer et al., 2023; Buzzi et al., 2021) und ergänzen die jährlichen Sortenempfehlungslisten (Hiltbrunner et al., 2023). Bei Mais wurden die für Bayern, Deutschland, veröffentlichten (Eder et al., 2023) erforderlichen Wachstumsgradtage für früh, mittelfrüh und mittelspät reifende Sorten mit kartierten Wachstumsgradtagedaten zwischen dem 1. Mai als Aussaattermin und dem 15. Oktober als Endreifezeitpunkt für Wetterstationen im Hauptanbaugebiet der Schweiz verglichen. Für jede Reifestufe wird der Anteil der Jahre im Referenzzeitraum von 2000 bis 2019, in denen die erforderlichen Wachstumsgradtage erreicht wurden, auf den Karten mit einer räumlichen Auflösung von 2 km x 2 km angegeben (Anhang 11.1, Ergänzende Abbildung 11.1-2). Früh reifende Silomais-Sorten können im gesamten Schweizer Mittelland angebaut werden, während mittelspäte Sorten vor allem in den Hügellzonen ausgeschlossen sind. Die thermische Eignung für Körnermais ist eingeschränkter und umfasst 60, 44 bzw. 30 % der heutigen landwirtschaftlichen Nutzfläche für frühe, mittelfrühe und mittelspäte Sorten (Buzzi et al., 2021). Ausserhalb der geeigneten Flächen besteht ein erhöhtes Risiko, dass die geforderte Kornfeuchte nicht erreicht wird und damit Kosten für die Getreidetrocknung anfallen oder dass Pflanzen als Silomais geerntet werden müssen. Basierend auf den Temperaturprognosen für die Mitte des Jahrhunderts (2041-2060) und dem Klimaszenario RCP4.5 (begrenzte Abschwächung) werden zusätzliche 150 bis 300 °C-Tage für die Maisentwicklung zur Verfügung stehen, was einer Vorverlegung der Reife um 9 bzw. 18 Tage in der West- und Ostschweiz entspricht (Buzzi et al., 2021). Der Anbau von später reifenden Sorten mit potenziell höheren Erträgen wird in grösseren Gebieten des Schweizer Mittellandes möglich werden. Der damit einhergehende erhöhte Bewässerungsbedarf (Holzkämper et al., 2020) wird jedoch neue Grenzen in Bezug auf die Wasserverfügbarkeit und potenziell auch politische Anbaustrategien setzen. Ein ähnlicher Ansatz wurde gewählt, um thermische Eignungskarten für Sorghum zu erstellen, eine alternative Kulturart zu Mais mit geringerem Wasserbedarf (Bütikofer et al., 2023; FAO, 2023). Die berechneten durchschnittlichen Temperaturanforderungen bis zur Reife sind sowohl für Silo- als auch für

Körnersorghum niedriger als für Mais, was zu recht ausgedehnten Sorghum-geeigneten Flächen im Schweizer Mittelland führt, die dem mittelfrühen Silo- bzw. dem mittelspäten Körnermais entsprechen (Anhang 11.1, Ergänzende Abbildung 11.1-3) (Bütikofer et al., 2023; Buzzi et al., 2021).

Neben einer Bewertung der künftigen Klimaeignung in Bezug auf die kulturspezifische Länge der Vegetationsperiode können die Auswirkungen des Klimawandels auf das Ertragspotenzial von Kulturpflanzen auf der Grundlage von Klimaprojektionen und kulturspezifischen oder statistischen Ertragsmodellen geschätzt werden (Ajillogba & Walker, 2023; Egerer et al., 2023; Holzkämper, 2020; Holzkämper et al., 2015; Richter et al., 2006). Künftige Ertragsschätzungen sind jedoch mit einem hohen Mass an Unsicherheit behaftet, die mit der Ungewissheit der Klimaprojektionen und der Wahl des Modellierungsansatzes zusammenhängt. Abgesehen von der Darstellung von Trends liefern die Schätzungen der Auswirkungen möglicherweise keine eindeutigen Hinweise auf Anpassungsstrategien in der landwirtschaftlichen Produktion (Asseng et al., 2013; Holzkämper, 2020; Holzkämper et al., 2015). Andererseits sind die geschätzten Veränderungen in der Häufigkeit des Auftretens begrenzender agroklimatologischer Faktoren wie Strahlungsdefizit, Hitze und Frost, Trockenheit und Wasserüberschuss weitaus weniger unklar (Holzkämper et al., 2015). Klimaeignungsfaktoren werden zur Bewertung des agroklimatischen Potenzials und der Einschränkungen verwendet, um eine kulturspezifische Eignungsklassifizierung (Mais und Weizen) (Holzkämper et al., 2013, 2015) und eine genotypspezifische Leistungsbewertung für bestimmte Umgebungen zu ermöglichen, wie für Weizen gezeigt wurde (Herrera et al., 2018). Darüber hinaus wurde gezeigt, dass durch die Verwendung von Bodenfeuchte anstelle von Niederschlag als Proxy für die Wasserversorgung 30-120 % mehr der zwischenjährigen Ertragsschwankungen bei verschiedenen Kulturpflanzen erklärt werden könnten (Proctor et al., 2022). Die Bodenfeuchte wird derzeit nicht umfassend erfasst, und auch wenn sich dies bereits in naher Zukunft durch neue Initiativen in diesem Sinne oder die Entwicklung von Methoden, z. B. der Fernerkundung, ändern könnte, bedarf es dennoch einer begleitenden Bestimmung der Bodeneigenschaften (siehe 5.3).

## 5.5 Zukünftige Entwicklung des Klimas und des Bewässerungsbedarfs

### 5.5.1 Entwicklung von Temperatur und Niederschlag

Seit 1980 ist die Temperatur in der Schweiz um ca. 2 °C angestiegen (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2023b). Gemäss aktuellen Klimaszenarien für die Schweiz (CH2018, 2018) wird sich diese Tendenz zur Erwärmung auch in Zukunft fortsetzen. Bis 2035 werden, je nach Emissionsszenario, zusätzliche 1.0 bis 3.0 °C erwartet, mit Unterschieden zwischen Winter und Sommer und, im Sommer, einen deutlichen Höhengradienten (Abbildung 5-6).

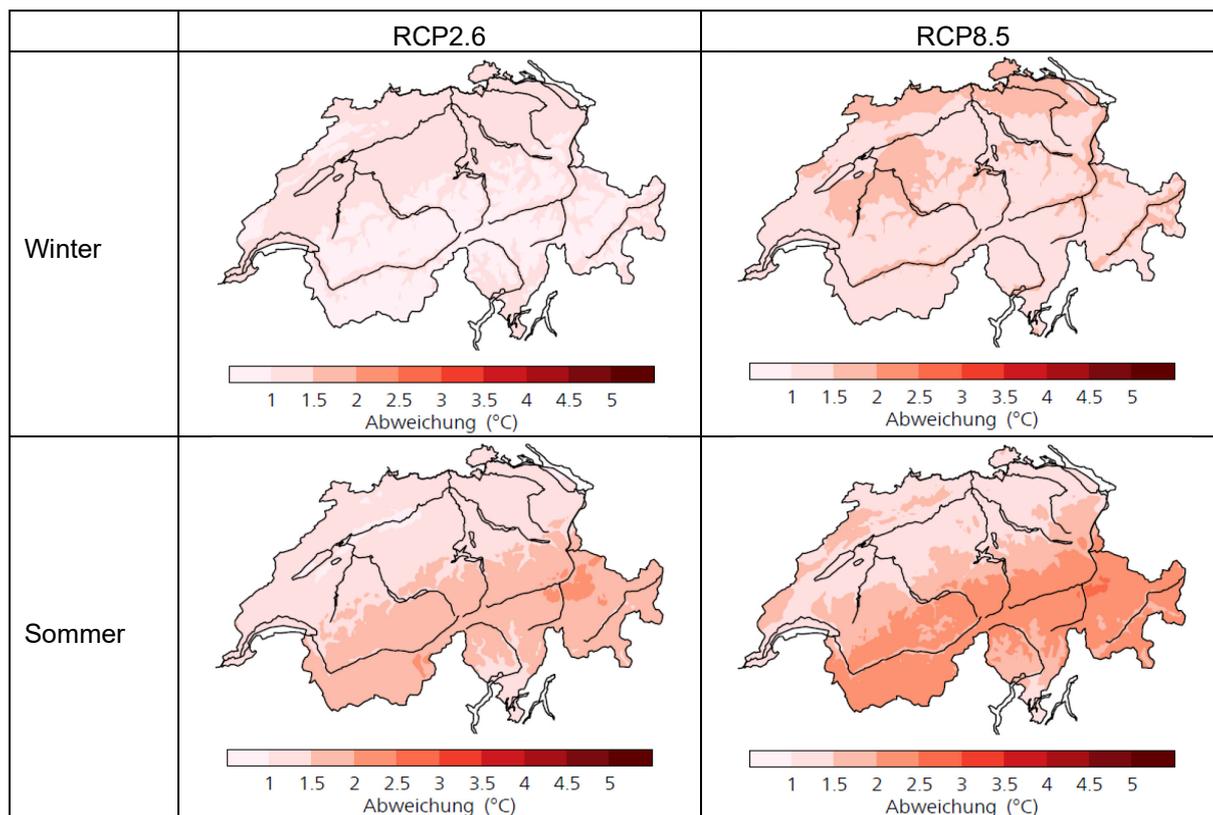


Abbildung 5-6 Erwartete Zunahme der Temperatur bis 2035 (mittlere Schätzung) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010 für ein Emissionsszenario mit (RCP2.6, links) und ohne Klimaschutz (RCP8.5, rechts). Situation im Winter oben, jene im Sommer unten. Quelle: National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.) (2018).

Was die prognostizierten Änderungen des Niederschlags betrifft (Abbildung 5-7), so ist der Unterschied zwischen Winter und Sommer noch ausgeprägter als bei der Temperatur. Die Klimaszenarien CH2018 (CH2018, 2018) geben für den Winter eine Zunahme vor, während sie für den Sommer eine Abnahme von zirka 15 % andeuten.

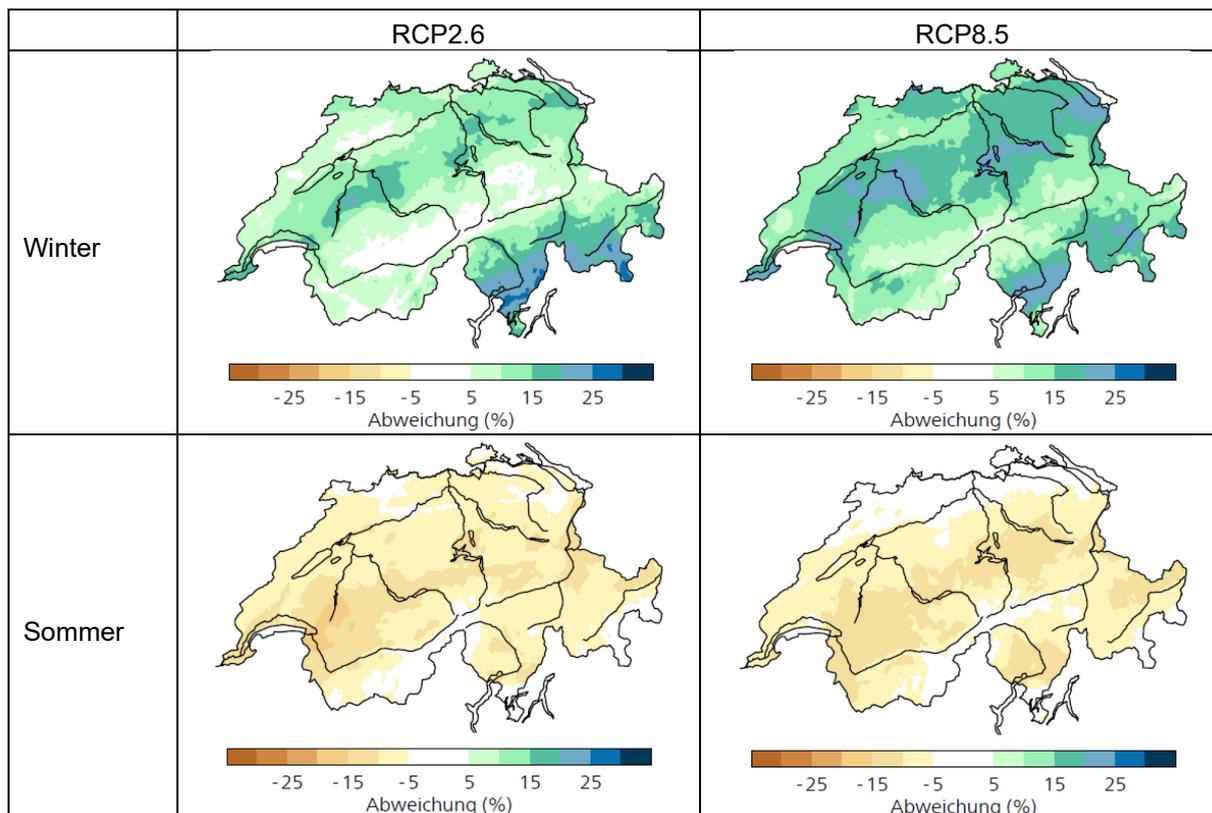


Abbildung 5-7 Erwartete Abweichung der Niederschläge bis 2035 (mittlere Schätzung) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010 für ein Emissionsszenario mit (RCP2.6, links) und ohne Klimaschutz (RCP8.5, rechts). Situation im Winter oben, jene im Sommer unten. Quelle: National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.) (2018).

### 5.5.2 Entwicklung des Wasserbedarfs der Kulturen

Viele Faktoren bestimmen den Wasserbedarf der Kulturen: Kultur und Sorte, Beschaffenheit des Bestandes, Entwicklungsstadium, etc. Das Klima schränkt in erster Linie die potentielle Verdunstung ein, d. h. jene Verdunstung, die unter gegebenen Strahlungs-, Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windverhältnissen bei uneingeschränkter Wasserverfügbarkeit auftreten würde. Für mitteleuropäischen Verhältnissen, lässt sich die potentielle Verdunstung mit Hilfe der Formel von Blaney & Criddle, (1962) schätzen (siehe auch Calanca et al., 2022) Diese Formel besagt, dass die potentielle Verdunstung annähernd linear von der Temperatur abhängt. Dies bedeutet, dass mit steigender Temperatur ein proportionaler Anstieg der potenziellen Verdunstung zu erwarten ist, wobei im Sommerhalbjahr die Verdunstung um ca. 0.15 mm für jeden zusätzlichen Grad Temperatur steigt. Bei einer Temperaturzunahme bis 2035 in der Grössenordnung von 1 bis 1.5 °C (Abbildung 5-6), würde somit der tägliche Wasserbedarf während des Sommerhalbjahrs sich um ca. 0.15 bis 0.25 mm erhöhen. Dies entspricht einer Zunahme des jährlichen Wasserbedarfs von maximal 20 bis 40 mm. Diese Schätzung liegt an der Obergrenze dessen was die Autoren des Berichts Hydro-CH2018 auf der Basis einer aufwendigeren Modellierung berechnet haben (Federal Office for the Environment FOEN (ed.), 2021, p. 27). Auch berücksichtigt sie nicht die Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre, die die Wassernutzungseffizienz verbessern und den Anstieg von die potentielle Verdunstung leicht mindern (siehe z.B. Kruijt et al., 2008; Vanuytrecht et al., 2012).

### 5.5.3 Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit

Gemäss Berechnungen von Fuhrer & Jasper (2009) sind heute rund 41 % des offenen Ackerlandes bewässerungsbedürftig, wobei in extrem trockenen Jahren (2003, 2015, 2018 und 2022) der bewässerungsbedürftige Anteil wesentlich grösser ist. Fuhrer & Jasper (2009) stufen jene Flächen als bewässerungsbedürftig ein, in denen das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Verdunstung, gemittelt über die Wachstumsperiode, in mindestens einem Drittel der Jahre unter dem Schwellenwert von 0.8 liegt.

Die Berechnungen von Fuhrer & Jasper (2009) können mit dem in Calanca et al. (2022) beschriebenen Ansatz für die Schätzung der relativen Verdunstung reproduziert werden, sofern die Bedingung bezüglich der Anzahl der Jahre, in denen das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Verdunstung den Schwellenwert von 0.8 unterschreitet, gelockert wird (50% statt 30% der Jahre). Die möglichen Veränderungen bis 2035 der bewässerungsbedürftigen Flächen innerhalb des offenen Ackerlands, die sich aus diesem vereinfachten Ansatz ergeben, sind in Abbildung 5-8 dargestellt. Demnach könnte derer Anteil insgesamt von heute 40 bis 50 % auf künftig etwa 70 % ansteigen. Dies sind jedoch nur relativ grobe Schätzungen, die durch weitere Analysen gestützt und ergänzt werden müssen.

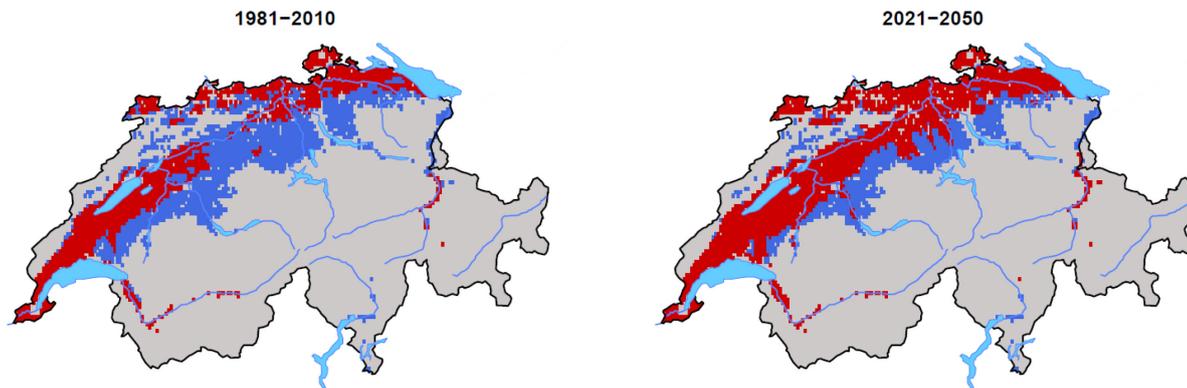


Abbildung 5-8 Zeitliche Entwicklung der bewässerungsbedürftigen Fläche (rot) zwischen 1981-2010 und 2021-2050. Eingefärbt sind nur jene Flächen die gemäss Arealstatistik als offenes Ackerlandes klassifiziert sind (Bundesamt für Statistik BFS, 2021a). Die Karte für 1981-2010 kann mit der Karte der Bewässerungsbedürftigkeit in Fuhrer & Jasper (2009) (Abbildung 1) und im Geokatalog des Bundes (Bundesamt für Landestopografie swisstopo & Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2009) verglichen werden.

#### 5.5.4 Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs

Früheren Schätzungen zufolge (Fuhrer, 2010), liegt der mittlere jährlichen Bewässerungsbedarf von bewässerungsbedürftigen Flächen (vor allem jene in der Westschweiz) in der Grössenordnung von 200 bis 300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> oder, umgerechnet, 20 bis 30 mm. Im selben Bericht wird der Bedarf in Trockenjahren auf 40 bis 50 mm geschätzt, die in Extremjahren bis auf 50 bis 100 mm steigen können. Zu ähnlichen Ergebnissen für das aktuelle Klima kommt auch die Arbeit von Eisenring et al. (2021). Diese Studie liefert auch eine gute Grundlage für die Entwicklung eines empirischen Modells für die räumliche Bewertung des zukünftigen Bewässerungsbedarfs. Die mit Hilfe dieses empirischen Modells geschätzten Werte des Bewässerungsbedarfs (für Mais, als Beispiel einer agronomisch und wirtschaftlich wichtigen Sommerkultur) unter heutigen Klimabedingungen und für 2035 sind in Abbildung 5-9 dargestellt. Innerhalb des heutigen Ackerlandes liegen die Hotspots des Bewässerungsbedarfs auf der Achse Genf bis Solothurn und im Raum Schaffhausen. In diesen Gebieten werden für eine optimale Produktion im Mittel zwischen 20 und 40 mm Wasser pro Jahr benötigt, mit Spitzen bis 50 mm. Der Bedarf steigt im Wallis auf bis zu 100 mm und mehr, jährlich.

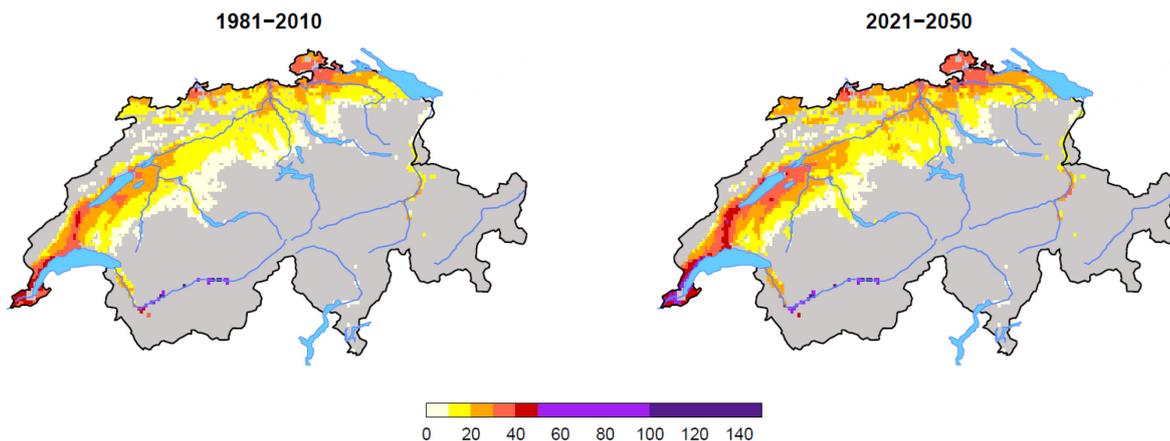


Abbildung 5-9 Jährlicher Bewässerungsbedarf für das heutige Klima (links) und für 2035 (rechts). Die Berechnungen für 2035 wurden unter der Annahme eines RCP8.5-Emissions Szenarios ohne Klimaschutz (RCP8.5) durchgeführt. Die Abgrenzung der Landnutzungskategorie «Offenes Ackerland» wurde auf der Basis der aktuellen Arealstatistik der Schweiz vorgenommen (Bundesamt für Statistik BFS, 2021a). Die Einheiten sind [mm].

Die geschätzte Zunahme des Bewässerungsbedarfs bis 2035 ist in Abbildung 5-9 dargestellt. In Regionen mit aktuell hohem Bewässerungsbedarf (West- und Nordostschweiz) bewegt sich die Zunahme im Bereich von 4 bis 12 mm, d.h. ca. 10 bis 20 % der heutigen Werte. Auf der Alpennordseite ist eine grössere relative Zunahme entlang des südlichen Rands des Ackerlands (gegen die Alpen hin) zu erwarten. Allerdings sind in diesen Randregionen sowohl der aktuelle Bedarf als auch die absolute Änderung wesentlich kleiner als in den oben genannten Hotspots.

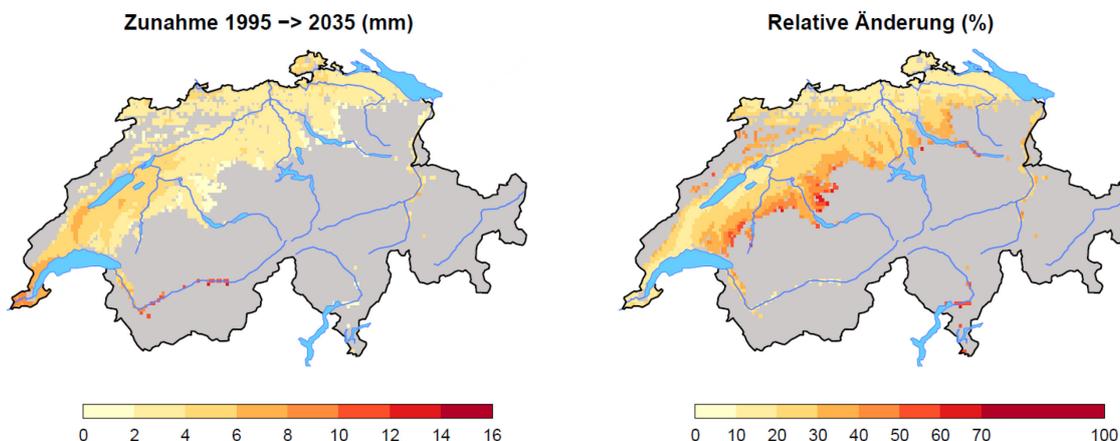


Abbildung 5-9 Zunahme des Bewässerungsbedarfs bis 2035, geschätzt als Differenz der Werte in den zwei Karten von Abbildung 5-. Links: absolute Zunahme (mm); rechts: relative Zunahme in %.

## 5.6 Fazit

### Die auf Boden- und Klimadaten basierenden Schweizer Landwirtschaftseignungskarten sind veraltet

Es besteht die Möglichkeit, diese Karten mit relevanten Parametern neben Boden und Klima zu aktualisieren, um ein Planungs- und Managementinstrument zu schaffen, das für politische Entscheidungsträger und landwirtschaftliche Beratungsstellen nützlich ist und den Landwirten als Instrument dient, um Unterstützung für Anpassungsmassnahmen zu beantragen.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche in der Schweiz ist zurückgegangen, ebenso wie die Stabilität der landwirtschaftlichen Produktion. Gleichzeitig garantiert die schweizerische Bundesverfassung die Ernährungssicherheit. Landwirtschaftskarten können als Managementinstrument in Betracht gezogen werden, die bei der regionalen Planung von Anpassungsmassnahmen helfen, um eine stabile Produktion im Ackerbau weiter zu gewährleisten und die Umwandlung von Ackerland zu verringern. Dazu gehören die Bewässerungsinfrastruktur, z. B. lokale Wasserspeicher oder strukturelle Massnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts auf Betriebsebene (siehe Kapitel 6), Massnahmen zur Bodenbewirtschaftung, z. B. dauerhafte Bodenbedeckung und Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens (siehe Kapitel 9), das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten sowie extreme Wetterereignisse. Auch die Landwirte könnten dieses Instrument nutzen, um Anträge auf Unterstützung für die genannten Massnahmen und für Versicherungspolicen zur Deckung potenzieller Risiken für Produktionsverluste zu begründen.

Es wurden wichtige Schritte in Richtung einer **Bodenkartierung** unternommen, die aktuelle und künftige Herausforderungen wie das Feuchtigkeitsdefizit im Boden berücksichtigt. Dennoch wird ein umfassender Überblick über die Eignung von Böden für den Anbau von Kulturpflanzen mit einer ausreichend hohen räumlichen Auflösung noch schätzungsweise 20 Jahre lang kontinuierliche Anstrengungen erfordern. In der Zwischenzeit sollten die bisherigen Ergebnisse genutzt werden, um das Wissen schrittweise zu erweitern und die Methoden zu verbessern, mit denen die Merkmale landwirtschaftlicher Böden und ihre Wechselwirkung mit Kulturpflanzen definiert werden können. Wichtig ist dabei die Verknüpfung von Boden- und **Klimaeignung**. Die derzeitige Überarbeitung der Kriterien für die landwirtschaftliche Eignung basiert immer noch auf Klimadaten aus der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts, da aktualisierte Informationen mit einer ausreichend hohen räumlichen Auflösung noch nicht in umfassender Weise zusammengestellt wurden. Die Gesamtzeit der Vegetationsperiode hat sich verlängert, und die Klimaeignung für Kulturen wie Mais und Weizen hat sich im Allgemeinen verbessert. Die Verfügbarkeit von Klimadaten mit einer relativ hohen räumlichen Auflösung in der gesamten Mittellandregion ermöglicht die Bestimmung der Länge der Vegetationsperiode für die wichtigsten Kulturpflanzen und Sorten innerhalb der Kulturpflanzen unter Verwendung von Temperatursummen, aber für die Umsetzung müssen noch weitere Schritte unternommen werden.

Neben den Temperatursummen können auch die (im positiven und negativen Sinne) beeinflussenden **Umweltfaktoren** anhand historischer Daten von Sortenversuchen ermittelt werden, wie sie jährlich für die wichtigsten Kulturen in der Schweiz durchgeführt werden, z.B. seit über 30 Jahren für Weizen. Diese Versuche könnten durch eine Erweiterung der Datenerfassung und -analyse noch umfassender genutzt werden:

- i. kulturspezifische Informationen in Form von Notationen zur Phänologie, um kritische Wachstumsphasen und die sie beeinflussenden Umweltfaktoren zu verstehen und zu bestätigen, sowie Temperatursummendaten für diese Wachstumsphasen pro Sorte bereitzustellen;
- ii. Vor Ort erhobene oberirdische (Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Strahlung) und unterirdische (Bodenfeuchte und -temperatur, Wasserpotenzial) Umweltdaten, um die Evapotranspiration mit der verfügbaren Bodenfeuchte zu verknüpfen und so die Bedingungen für Trockenstress bei Pflanzen besser zu bestimmen und möglicherweise eine Differenzierung mit Hitzestress vorzunehmen;
- iii. pflanzenphysiologische Daten und Notationen zu abiotischen Stressreaktionen, um die Sortenempfindlichkeit besser zu differenzieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Empfindlichkeit der verschiedenen Kulturen und Sorten gegenüber Trocken- und Hitzestress sowie deren kritische Wachstumsstadien. Letzteres ist recht gut bekannt, aber die Empfindlichkeit in Bezug auf die Messung von Wachstum, Entwicklung oder physiologischen Merkmalen während der Vegetationsperiode oder in Bezug auf den Ertrag und die Qualität wurde unter Schweizer Anbaubedingungen nicht

systematisch ermittelt. Da diese Massnahmen die Kulturpflanzen betreffen, sind sie auch Teil von Kapitel 7 und werden in diesem Kapitel näher erläutert.

Eine Alternative zu diesem Ansatz ist die Neudefinition der charakteristischen Werte für die wichtigsten Kulturen, was wahrscheinlich schneller geht und einen ersten Schritt darstellen könnte.

Darüber hinaus sollten Informationen über die regionale Verfügbarkeit oder das Entwicklungspotenzial von strukturellen Anpassungsmassnahmen wie **Bewässerung** (Wasserverfügbarkeit und Infrastruktur) und die Verbreitung von biotischen Stressfaktoren wie Schädlingen und Krankheiten einbezogen werden.

Es ist klar, dass das daraus resultierende Instrument (und die dazugehörigen Karten) dynamisch und entsprechend den neuen Fakten und Erkenntnissen anpassbar sein sollte, im Gegensatz zur aktuellen Karte der landwirtschaftlichen Eignung. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die gleiche Datenanalyse und Kartierung mit prognostizierten Wettervariablen unter den für die Schweiz definierten Klimaszenarien durchzuführen.

### **Prognosen über den künftigen Wasserbedarf der Kulturen sind unsicher**

Die aktuellen Klima- und hydrologischen Szenarien für die Schweiz machen zwar quantitative Aussagen zu den mittel-, resp. langfristigen Trends, behandeln die Klimavariabilität (und die daraus resultierenden Änderungen des Auftretens von Extremereignisse) nur qualitativ. Dies bedeutet, dass auch Aussagen zum Wasser-, resp. Bewässerungsbedarf unter extremer Trockenheit mit grosser Unsicherheit behaftet sind. Dennoch sind datenbasierte Ansätze für den Umgang mit solchen Situationen im Hinblick auf einen klimaresilienten Ackerbau unerlässlich.

Das generelle Fehlen von verlässlichen und räumlich differenzierten Daten zur Wassernutzung in der Landwirtschaft (siehe Kapitel 6) erschwert es, modellbasierte Schätzungen des Bewässerungsbedarfs mit Daten zu untermauern. Erste Schritte zur Lösung dieser Situation wurden unternommen (z.B. Antwort auf das Postulat Rieder, Projekt Swiss Irrigation Info, siehe Kapitel 6).

Derzeit beruhen die Schätzungen des Wasserdefizits nur auf Wetterdaten (Niederschlag und Evapotranspiration). Diese könnten durch die Integration von räumlich und zeitlich aufgelösten Daten zum Bodenwassergehalt verbessert werden. Zu den Quellen für Informationen über den Bodenwassergehalt (oder das Bodenwasserpotenzial) gehören Sensornetzwerke des Bundes, der Kantone und der Forschung/Kantone (siehe Kapitel 6).

### **Verfügbarkeit von Daten**

Die Massnahmen, die zur Beantwortung der oben genannten Fragen vorgeschlagen werden, stützen sich zum Teil auf Daten, die nicht unbedingt (sofort) für Austausch- oder Forschungszwecke zur Verfügung stehen. Eine offene Debatte, um zu Vereinbarungen über Datenströme und Kontexte zu gelangen, wird begrüsst.

## 5.7 Literaturverzeichnis

Agroscope. (2020). Silomaisreife online berechnen.

<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/services/dienste/futtermittel/futterkonservierung/silomaisreife/silomaisreife-online-berechnen.html>

Ajillogba, C. F., & Walker, S. (2023). Modeling climate change impact on dryland wheat production for increased crop yield in the Free State, South Africa, using GCM projections and the DSSAT model. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1067008. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1067008>

Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., ... Wolf, J. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 827–832. <https://doi.org/10.1038/nclimate1916>

Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1962). Determining consumptive use and irrigation water requirements (Technical Bulletin No. 1275, S. 59). USDA Agricultural Research Service. <https://ageconsearch.umn.edu/record/171000/files/tb1275.pdf>

Brunner, J., Jäggli, F., Nievergelt, J., & Peyer, K. (1997). Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, FAL Zurich-Reckenholz.

Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2023). SwissSURFACE3D. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/surface3d.html>

Bundesamt für Landestopografie swisstopo, & Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2009). Geokatalog. Bewässerungsbedürftigkeit. [https://map.geo.admin.ch/?lang=de&zoom=0&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&topic=ech&E=2691463.13&N=1186545.32&layers\\_opacity=0.75&layers=ch.blw.bewaesserungsbeduerftigkeit](https://map.geo.admin.ch/?lang=de&zoom=0&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&topic=ech&E=2691463.13&N=1186545.32&layers_opacity=0.75&layers=ch.blw.bewaesserungsbeduerftigkeit)

Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2012). Minimales Geodatenmodell. 77.2 Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis/bodeneignungskarte.html>

Bundesamt für Landwirtschaft BLW, & Meteotest. (2012). Minimales Geodatenmodell. 77.1 Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis/klimaeignungskarte.html>

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023a). Automatisches Messnetz. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/messsysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023b). Klima der Schweiz. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz.html>

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2020). Sachplan Fruchtfolgeflächen. <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/strategie-und-planung/konzepte-und-sachplaene/sachplaene-des-bundes/sachplan-fruchtfolgeflaechen-sp-fff.html>

Bundesamt für Statistik. (2001). Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz. [https://files.be.ch/bve/agi/geoportal/geo/lpi/BEK\\_2000\\_01\\_LANG\\_DE.PDF](https://files.be.ch/bve/agi/geoportal/geo/lpi/BEK_2000_01_LANG_DE.PDF)

Bundesamt für Statistik BFS. (2021a). Arealstatistik. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.html>

Bundesamt für Statistik BFS. (2021b). Umgenutzte Bodenflächen. Transfer zwischen den Nutzungsarten. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.assetdetail.19964706.html>

- Bundesamt für Statistik BFS. (2023). Beschäftigte, Landwirtschaftliche Betriebe, Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) und Nutztiere auf Klassifizierungsebene 1 nach Kanton. [https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000\\_101](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000_101)
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2020). Bodenstrategie Schweiz (S. 64). Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/publikationen-studien/publikationen/bodenstrategie-schweiz.html>
- Bütikofer, N., Vonlanthen, T., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2023). Thermische Eignungskarten für Sorghum in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 14, 24–33. <https://doi.org/10.34776/AFS14-24>
- Buzzi, F., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). Temperatursummen-Karten für die Sortenwahl im Maisanbau. *Agrarforschung Schweiz*, 12, 1–8. <https://doi.org/10.34776/AFS12-1>
- Calanca, P., Holzkämper, A., & Isotta, F. A. (2023). Die thermische Vegetationszeit im Wandel des Klimas. *Agrarforschung Schweiz*, 14, 150–158. <https://doi.org/10.34776/AFS14-150>
- Calanca, P., Wüst-Galley, C., Giuliani, S., & Erdin, D. (2022). Auswirkungen der Trockenheit auf die Produktivität des Schweizer Grünlands. *Agrarforschung Schweiz*, 13, 135–144. <https://doi.org/10.34776/AFS13-135>
- CH2018. (2018). CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/swiss-climate-change-scenarios/technical-report.html>
- Eder, J., Ziegltrum, A., & Eiblmeier, P. (2023). Hinweise zum Mais-Reifeprognosemodell nach AGPM. <https://web.archive.org/web/20130318031104/http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/08509/>
- Egerer, S., Puente, A. F., Peichl, M., Rakovec, O., Samaniego, L., & Schneider, U. A. (2023). Limited potential of irrigation to prevent potato yield losses in Germany under climate change. *Agricultural Systems*, 207, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103633>
- Eisenring, S., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz. *Agroscope Science*, 107, 1–55. <https://doi.org/10.34776/AS107G>
- EJPD, Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Landwirtschaft, & Bundesamt für Forstwesen. (1980). Bodeneignungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale.
- FAO. (2023). Land & Water, Databases & Software, Crop Information, Sorghum. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sorghum/en/>
- Federal Office for the Environment FOEN (ed.). (2021). Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management (Environmental Studies No. 2101, S. 125). Federal Office for the Environment. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water/water--publications/publications-water/effects-of-climate-change-on-swiss-water-bodies.html>
- Fuhrer, J. (2010). Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft (S. 26). *Agroscope*. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/26436>
- Fuhrer, J., & Jasper, K. (2009). Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung Schweiz*, 16(10), 396–401.
- Geoportal Kanton Solothurn. (2023). Geoportal Kanton Solothurn; Bodeninformationen Landwirtschaft. [https://geo.so.ch/map/?l=default&bl=hintergrundkarte\\_sw&t=default&c=2618500%2C1238000&s=200000](https://geo.so.ch/map/?l=default&bl=hintergrundkarte_sw&t=default&c=2618500%2C1238000&s=200000)
- GEOSTAT, Bundesamt für Statistik BFS. (2020). Bodeneignungskarte der Schweiz, Geodaten. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik/boden-nutzung-bedeckung-eignung/abgeleitete-und-andere-daten/bodeneignungskarte-schweiz.html>
- Greiner, L., Gunnar, P., & Keller, A. (2023). Anleitung zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung. Methode der Nutzungseignungsklassen (NEK-Methode). Aktualisierte Version 2023. Kompetenzzentrum Boden (in preparation). <https://web.boden-methoden.bfh.science/>

- HAFI. (2023). Revision der Bodenklassifikation und der Bodenkartieranleitung der Schweiz. Bodenmethoden. <https://web.boden-methoden.bfh.science/index.html>
- Herrera, J. M., Häner, L. L., Holzkämper, A., & Pellet, D. (2018). Evaluation of ridge regression for country-wide prediction of genotype-specific grain yields of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.263>
- Hiltbrunner, J., Calanca, P., Huber, T., Pignou, P., Girard, M., & Morel, I. (2023). Liste der empfohlenen Maissorten für die Ernte 2023. *Agroscope Transfer*, 471, 1–6.
- Holzkämper, A. (2020). Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agricultural Water Management*, 237, 106202. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106202>
- Holzkämper, A., Calanca, P., & Fuhrer, J. (2013). Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.004>
- Holzkämper, A., Calanca, P., Honti, M., & Fuhrer, J. (2015). Projecting climate change impacts on grain maize based on three different crop model approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.263>
- Holzkämper, A., Cochand, F., Rössler, O., Brunner, P., & Hunkeler, D. (2020). AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. *Agroscope*. <https://doi.org/10.34776/NCCS21AA>
- Jeanneret, F., & Vautier, P. (1977). Kartierung der Klimaeignung für die Landwirtschaft in der Schweiz / Levé cartographique des aptitudes climatiques pour l'agriculture en Suisse. *Geographica Bernensia*. <https://doi.org/10.4480/GB2020.G6>
- Keller, A., Grob, U., Greiner, L., Stumpf, F., & Behrens, T. (2022). Flächenhafte Bodeninformationen? Eckpunkte für eine zukünftige Plattform für Bodeninformationen. *Waldböden – intakt und funktional*, 75–80. <https://doi.org/10.55419/wsl:32071>
- KOBO. (2023). Kompetenzzentrum Boden. <https://ccsols.ch/de/home/>
- Kruijt, B., Witte, J.-P. M., Jacobs, C. M. J., & Kroon, T. (2008). Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.052>
- Limagrain. (2023). LG HEATMAP TOOL. <https://lgseeds.co.uk/heat-map/>
- National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.). (2018). CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/ch2018-webatlas.html>
- Proctor, J., Rigden, A., Chan, D., & Huybers, P. (2022). More accurate specification of water supply shows its importance for global crop production. *Nature Food*, 3(9), 753–763. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00592-x>
- Rehbein, K., Grob, U., Klausner, L., & Keller, A. (2017). Nationales Bodeninformationssystem NABODAT – Datenmodell- Version 1.5 [Software]. *Agroscope, Servicestelle NABODAT*. [www.nabodat.ch](http://www.nabodat.ch)
- Rehbein, K., Sprecher, Ch., & Keller, A. (2019). Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz—Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus Meliorationsprojekten (S. 73). *Agroscope, Servicestelle NABODAT*. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/43189>
- Richter, G. M., Qi, A., Semenov, M. A., & Jaggard, K. W. (2006). Modelling the variability of UK sugar beet yields under climate change and husbandry adaptations. *Soil Use and Management*, 22(1), 39–47. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00018.x>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P., & Geerts, S. (2012). Quantifying field-scale effects of elevated carbon dioxide concentration on crops. *Climate Research*, 54(1), 35–47. <https://doi.org/10.3354/cr01096>

Verbund NABODAT. (2023). Nationales Bodeninformationssystem—Servicestelle NABODAT.

<https://www.nabodat.ch/index.php/de/>

Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>

Wending, M., Schmid, N., & Charles, R. (2022). Etude de l'importance des paramètres sol permettant d'évaluer l'aptitude agricole d'un site (S. 20). Centre de compétences sur les sols. <https://ccsols.ch/de/home/>

## 6 Bewässerung als Mittel zur Erhaltung von Ertrag und Qualität bei Trockenheit

Nathalie Wuyts, Alice Baux, Brice Dupuis, Juan M. Herrera, Lilia Levy Häner und Didier Pellet

Produktionssysteme Pflanzen, Anbautechnik und Sorten Ackerbau, Agroscope, Nyon

### 6.1 Zusammenfassung

Bewässerung wird als erstes Mittel zur Erhaltung von Ertrag und Qualität unter Trockenstress praktiziert und gilt als ein Muss für einige Kulturen und Anbausysteme, einschliesslich Kartoffeln, Gemüse-, Beeren- und Obstanbau und unter bestimmten Umständen auch Reben und Grünland. Die aktuelle Bewässerungssituation in der Schweiz wird zusammen mit der Verfügbarkeit von Wasserressourcen (jetzt und in Zukunft), potenziellen Konflikten und rechtlichen Aspekten diskutiert. Es wird ein Einblick in die Bewässerungssituation in der EU sowie in Frankreich und Deutschland als Nachbarländer gegeben. Schliesslich werden die für den Ackerbau relevanten Bewässerungssysteme im Hinblick auf die Wasserproduktivität und die Bewässerungseffizienz untersucht. Die wichtigsten Punkte werden hier zusammengefasst. In den Schlussfolgerungen am Ende des Kapitels wird ein Überblick über aktuelle Themen und Wissenslücken gegeben.

- Aktuelle, quantitative Informationen über die Bewässerung in der ganzen Schweiz oder in den Kantonen sind nur teilweise oder gar nicht vorhanden bzw. nicht zentralisiert und nicht öffentlich zugänglich. Dazu gehören aktuelle Daten über die bewässerte Fläche insgesamt oder pro Kulturart, die genutzten Wasserressourcen und die entnommenen Mengen pro Saison. In den Konzessionen ist eine genehmigte Durchflussmenge festgelegt, aber Daten über die Volumen oder die bewässerten Flächen sind selten verfügbar bzw. werden nicht zur Verfügung gestellt.
- Die Ergebnisse der vom Bundesamt für Statistik durchgeführten Erhebungen zeigen, dass im Jahr 2020 in der Schweiz 4,7 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert wurden. Das Wallis hat den höchsten Anteil an bewässerten Flächen (25-30 %) im Vergleich zu den anderen Kantonen (2,5-5 %) und die meisten Betriebe, die für die Bewässerung ausgerüstet sind (60 % gegenüber 10-20 %).
- Kunstwiesen und Grünland bilden insgesamt und insbesondere im Wallis die wichtigste berechnete Kultur. Der Anteil der Grünlandbewässerung hat zwischen 2010 und 2020 in fast allen Kantonen, die Bewässerung anwenden, zugenommen, insbesondere im westlichen Mittelland. Im Osten bleiben die Gemüse- und Obstproduktion die am meisten bewässerten Kulturen. Im Kanton Freiburg hat die bewässerte Fläche und die Zahl der ausgerüsteten Betriebe am stärksten zugenommen, wobei der Anteil der Grünland- und Getreidekulturen (vermutlich Mais) gestiegen ist. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die Entwicklung von Bewässerungsprojekten und -genossenschaften in der Region Broye - Drei Seen zurückzuführen.
- Grundwasser (Aquifere und Quellen) und Oberflächenwasser (Seen, Flüsse und Bäche) waren die wichtigsten Quellen für Bewässerungswasser, dicht gefolgt von der öffentlichen Wasserversorgung (Trinkwasser) in einer 2016 durchgeführten Umfrage.
- Die Entnahme von Wasser für Bewässerungszwecke aus kleinen Flüssen ist problematisch geworden, da die Entnahme häufig eingeschränkt wird, weil der Abfluss zu gering ist und/oder die Wassertemperaturen zu hoch sind, was die Ökosysteme der Flüsse gefährdet. Infolgedessen wurde die Wasserentnahme, soweit möglich, auf Seen verlagert, insbesondere in der Broye- und Drei-Seen-Region.
- Da die Dürreperioden der letzten 20 Jahre keine grösseren Auswirkungen auf die Wasserstände hatten, wird die Entnahme aus Seen auch in Zukunft als zuverlässige Quelle angesehen. Die Konzessionen für die Wasserentnahme können mit der öffentlichen Trinkwasserversorgung geteilt werden, so dass die erforderlichen Mengen (Durchflussmengen) während langer Trockenperioden und erhöhter Temperaturen im Sommer sorgfältig geprüft werden sollten. Die jüngste Dürre von 2022 hat die Konzessionen (Anzahl und Durchflussmenge) in den Kantonen, die eine Grundwasserentnahme für die Bewässerung erlauben, nicht verändert, in einigen Kantonen hat sich die Anzahl der Konzessionen sogar erhöht. Ausserdem werden die

Wehrregelungen für einen erhöhten Seeabfluss in Flüssen und Bächen überdacht, um unter diesen Bedingungen Mindestwasserstände zu erhalten.

- Für die Bewirtschaftung der grossflächigen Bewässerungsinfrastruktur sind die Landwirte zunehmend in Bewässerungsgenossenschaften organisiert. Der Aufbau der Infrastruktur und die notwendigen Investitionen werden seit etwa 2003 von den Abteilungen "Strukturverbesserungen" des Bundesamtes für Landwirtschaft und den jeweiligen kantonalen Ämtern mittels Bewässerungsprojekte unterstützt. Diese müssen nun die mittelfristige Wasserverfügbarkeit nachweisen und Massnahmen zur Sicherstellung der Bewässerungseffizienz aufzeigen. Ein aktueller Bericht über die Strategie des Bundesamtes für Landwirtschaft in Bezug auf Strukturverbesserungen schlägt vor, die Entwicklung der Bewässerungsinfrastruktur weiterhin finanziell zu unterstützen.
- In Gebieten ohne direkten Zugang zu zuverlässigen Quellen im Mittelland werden alternative Wasserquellen für die Bewässerung in Betracht gezogen. Der Kanton Basel-Landschaft hat Richtlinien für die Einrichtung von Wasserreservoirs auf Betriebsebene entwickelt. Auch regionale Reservoirs sind nicht ausgeschlossen. Ausserdem wurde eine Initiative zur Rückhaltung von Regenwasser im Betrieb und zur Verhinderung von Erosion durch Wasserrückhaltungsmassnahmen gestartet. Die direkte Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser ist derzeit nicht erlaubt, wird aber geprüft. Die Wasserqualität dürfte kein Problem darstellen (ausser vielleicht der Salzgehalt), wenn entsprechende Investitionen getätigt werden können. Andererseits kann es sowohl bei Wasserspeichern als auch bei geklärtem Abwasser zu neuen Nutzungskonflikten und zu Fragen der öffentlichen Akzeptanz kommen.
- Auf EU-Ebene besteht eine Herausforderung darin, die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie (Wiederherstellung und Erhaltung der Wasserressourcen) und der Gemeinsamen Agrarpolitik, die den Ausbau der Bewässerungsinfrastruktur unterstützt, miteinander in Einklang zu bringen. Frankreich hat eine lange Tradition in der Bewässerung von hochwertigen Kulturen und Exportprodukten, einschliesslich Mais, Getreide und vielen anderen Kulturen, die in der Schweiz nicht als bewässerungswürdig gelten. Im Rahmen der EU-Richtlinien und aufgrund von Konflikten, insbesondere im Zusammenhang mit der Entnahme von Oberflächenwasser im Süden, hat Frankreich eine Regulierungsstruktur auf mehreren Einzugsgebietsebenen und auf der Ebene der Departements entwickelt. Die Transparenz der Wassernutzung und der Beschränkungen der Wasserentnahme wird durch öffentlich zugängliche Websites gewährleistet, die zentralisierte und aktuelle Informationen bieten. In Deutschland hingegen wird die Bewässerung hauptsächlich im Gemüse- und Obstanbau in bestimmten Bundesländern eingesetzt. Die jüngsten Zahlen zeigen jedoch eine erhebliche Zunahme der bewässerten Fläche und der damit ausgestatteten Betriebe in anderen Bundesländern (und wahrscheinlich auch der Ackerkulturen). Die Entnahme erfolgt hauptsächlich aus dem Grundwasser, und insgesamt werden hier keine Probleme bei Dürreereignissen erwartet. Um die EU-Wasserrahmenrichtlinie einzuhalten, gibt es ein System von Wasserkatastern und -gebühren, das jedoch nicht in allen Bundesländern in gleichem Masse angewandt wird.
- Rollomaten mit Starkregnern sind derzeit die am häufigsten eingesetzten Bewässerungsgeräte im Ackerbau in der Schweiz. Die Wasserproduktivität ist nicht optimal, kann aber durch Investitionen in neuere Versionen und die damit verbundene Ausbildung und das Engagement der Landwirte verbessert werden. Letzteres ist vor allem bei den ober- und unterirdischen Tropfbewässerungssystemen erforderlich. Diese sind zwar teuer, haben aber im Vergleich zu Beregnungssystemen eine Reihe von Vorteilen, vor allem in Bezug auf die Wasser- und Energieausnutzung. Aus agronomischer Sicht erfordert die Tröpfchenbewässerung eine gründliche Berücksichtigung der Bodeneigenschaften und der Bewirtschaftungspraktiken.
- Bewässerungsgeräte oder -anlagen können mit Empfehlungsinstrumenten kombiniert werden, um den Zeitpunkt und die Menge von Bewässerungsereignissen zu bestimmen. Diese basieren entweder auf oberirdischen oder unterirdischen Umweltmessungen oder vorzugsweise auf einer Kombination aus beidem. Die derzeit bekanntesten Systeme basieren auf der Wasserbilanz oder dem Wasserzustand des Bodens. Ihre Anwendung im Ackerbau (hauptsächlich Kartoffeln) ist in Arbeit. Alternative pflanzenbasierte Methoden, bei denen Sensoren den physiologischen Zustand oder damit verbundene Signale der Pflanzen messen, befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium, können aber die Bewässerungseffizienz weiter erhöhen, da die Pflanzen uns "sagen", wann sie Wasser benötigen.

- Im Modellierungsbereich werden interessante Fortschritte bei Bewässerungsempfehlungen auf der Grundlage von Boden-, Wetter- und Kulturpflanzeninformationen oder auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten erzielt. Für das Bewässerungsmanagement gibt es Beispiele in Frankreich und Italien. Ein neues Konzept in Frankreich ist das Bewässerungsmanagement auf der Grundlage der Ressourcenverfügbarkeit und nicht der Maximierung des Ernteertrags. In diesem Fall hilft das Modell dabei, die effektivste Fruchtfolge unter Berücksichtigung der Betriebsführung und der Ressourcen (Inputs und Outputs) zu finden.
- Die Bewässerungsüberwachung auf der Grundlage von Satellitendaten als Alternative zur Erhebung von Bewässerungsdaten an der Quelle hat sich in Ländern und Regionen mit sehr ausgedehnten Bewässerungsgebieten, die durch konstitutive (jährliche und lange Perioden) und schwere Dürre gekennzeichnet sind, erfolgreich entwickelt. Dies steht im Gegensatz zu der Situation in der Schweiz.

## 6.2 Aktuelle Bewässerungssituation in der Schweiz

Heute werden auf nationaler Ebene nur sehr wenige Daten zur Bewässerung erhoben, wie z. B. bewässerte Flächen, Kulturen, verbrauchte Wassermengen und Wasserquellen. Erhebungen des Bundesamts für Statistik, die zwischen 2006 und 2020 durchgeführt wurden, geben einen Überblick, aber gleichzeitig müssen manchmal grosse Konfidenzintervalle der Daten berücksichtigt werden. Im Jahr 2020 wurden von insgesamt 1'044'034 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche zwischen 45'457 und 53'363 ha bewässert, was im Durchschnitt 4,73 % entspricht. Von 49'363 Betrieben waren zwischen 6'169 und 6'819, oder 13 % im Durchschnitt, für die Bewässerung ausgerüstet (Bundesamt für Statistik BFS, 2022). Die bewässerte landwirtschaftliche Fläche blieb zwischen 2010 und 2016 trotz einer sommerlichen Dürre im Jahr 2015 stabil, wurde aber bis 2020 deutlich ausgeweitet (Abbildung 6-1). Dies ist höchstwahrscheinlich Abhängig von der Errichtung neuer Bewässerungsanlagen, in Verbindung mit einer Zunahme des Anbaus von bewässerungsbedürftigen Kulturen. Ein weiterer Grund kann das Auftreten eines Bewässerungsbedarfs bei Kulturen sein, die vorher nicht existierte oder nicht in Betracht gezogen wurde, wie z.B. Mais. Zwischen 2010 und 2020 stieg die Anbaufläche von Freilandgemüse um 28 % und zwischen 2016 und 2020 um 6 %, während die Obstanbaufläche zwischen 2010 und 2020 um das Zwölfwache stieg und zwischen 2016 und 2020 um 77 %. Die Kartoffelanbauflächen blieben gleich in diesem Zeitraum (Bundesamt für Statistik BFS, 2023). Die Anzahl der Betriebe, die Bewässerung betreiben, hat sich zwischen 2010 und 2020 nicht verändert (Abbildung 6-1).

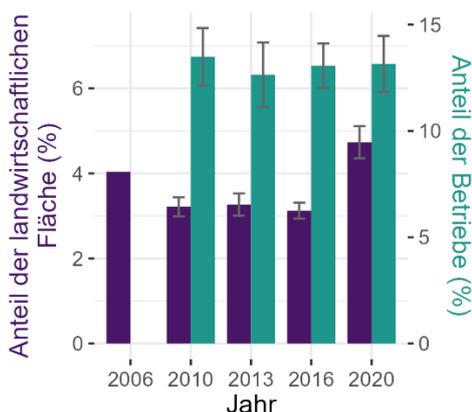


Abbildung 6-1 Entwicklung der bewässerten landwirtschaftlichen Flächen (violett) und der Anzahl bewässerungs-fähiger Betriebe (grün), ausgedrückt in Prozent der jeweiligen Gesamtfläche, in der Schweiz zwischen 2006 und 2020. Für 2006 liegt nur eine Schätzung der bewässerten landwirtschaftlichen Flächen vor (Weber & Schild, 2007). Für die anderen Jahre sind die Daten das Ergebnis von Erhebungen des Bundesamtes für Statistik. Die Fehler-balken geben das 95%-Konfidenzintervall der Daten an (Bundesamt für Statistik BFS, 2022).

Die verfügbaren Daten auf Kantonsebene zeigen, dass das Wallis (VS) den höchsten Anteil an bewässerter landwirtschaftlicher Nutzfläche aufweist (25-30 % gegenüber 2,5-5 % in den anderen Kantonen) und der Zahl der bewässernden Betriebe (60 % gegenüber 10-20 %) bleibt, mit einem leichtem Flächenanstieg zwischen 2016 und 2020 (Abbildung 6-2). Dies gilt auch für die anderen Kantone, mit Ausnahme von Graubünden (GR), und ist für

Freiburg (FR) am stärksten ausgeprägt. Auch die Anzahl mit Bewässerung ausgerüsteten Betrieben hat im Jahr 2020 zugenommen, im Vergleich zu 2010-2016. In GR bewässerten in 2020 mehr Betriebe als in 2016, während in Bern (BE) und Zürich (ZH) die Zahl der Betriebe zu sinken scheint (Abbildung 6-2).

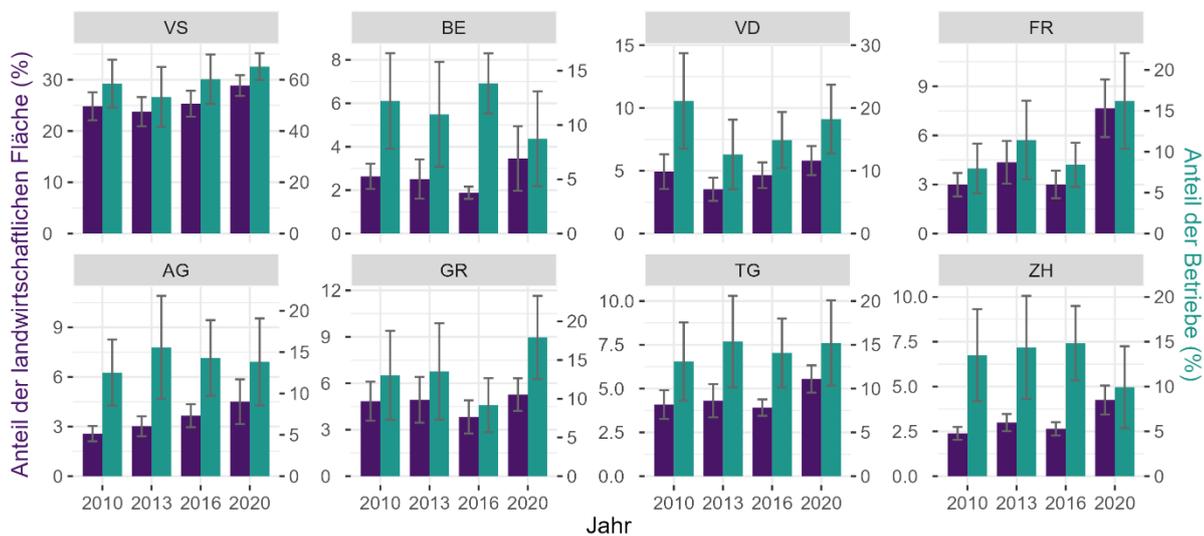


Abbildung 6-2 Entwicklung der bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche (violett) und der Zahl der bewässerungsfähigen Betriebe (grün), ausgedrückt als Prozentsatz der jeweiligen Gesamtfläche, in den Kantonen, die zusammen 80 % der bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz ausmachen. Die Daten sind geordnet vom Kanton mit dem grössten Anteil an bewässerter Landwirtschaftsfläche (VS, oben links) bis zum Kanton mit dem kleinsten Anteil (ZH, unten rechts). Die Daten sind das Ergebnis von Erhebungen des Bundesamtes für Statistik zwischen 2010 und 2020. Die Fehlerbalken geben das 95 %-Konfidenzintervall der Daten an (Bundesamt für Statistik BFS, 2022). Abkürzungen der Kantone: VS, Wallis; BE, Bern; VD, Waadt; FR, Freiburg; AG, Aargau; GR, Graubünden; TG, Thurgau; ZH, Zürich.

Die acht Kantone die in Abbildung 6-2 dargestellt sind, repräsentieren zusammen 80 % der gesamten bewässerten landwirtschaftlichen Fläche und der Gesamtzahl der Bewässerungsbetriebe in der Schweiz im Jahr 2020. Mit Ausnahme von VS und GR, gehören sie alle zum Schweizer Mittelland. In letzteren wird jedoch der grösste Teil der Bewässerung für Obst und Grünland und für VS auch für Weinreben verwendet, während im Mittelland der Anteil von Getreide, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Sonderkulturen wie Gemüse und Obst grösser ist (Abbildung 6-3).

Die Verteilung der Bewässerung auf die verschiedenen Kulturarten in Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche und die Anzahl der Betriebe für die gesamte Schweiz im Jahr 2020 zeigt, dass die Erhaltung der Produktivität von Kunstwiesen und Dauergrünland in Trockenperioden ein wichtiger Treiber für die Bewässerung ist (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-1). Betriebe mit Gemüse-, Obst- oder Weinbau stellen die zweitwichtigste Gruppe dar, und generell hat die bewässerte Gemüseanbaufläche in der jüngsten Vergangenheit stark zugenommen (+24 % zwischen 2010 und 2016). Die Bewässerung von Getreide ist flächenmässig nicht zu vernachlässigen, was höchstwahrscheinlich mit der Bewässerung von Mais im Westen des Mittellandes zusammenhängt. Nur 5 % der Betriebe, die über Bewässerungsanlagen verfügen, wenden die Bewässerung im Zuckerrübenanbau an. Im Vergleich zu 2010 wird 2020 im gesamten Mittelland ein höherer Anteil der Bewässerung für Grünland eingesetzt (Abbildung 6-3). Am deutlichsten ist dies in VD, FR und BE, wo der Anteil von Gemüse zurückgegangen ist. In FR und BE ist auch der Anteil der Kartoffeln zurückgegangen, zugunsten von Getreide (Mais) in FR. Auch im Aargau ist eine Verschiebung festzustellen, mit höheren Anteilen von Grünland und Getreide im Jahr 2020. In ZH und TG liegt der Schwerpunkt weiterhin auf der Bewässerung von Gemüse und in TG auch von Obst. Zu den weiteren Kulturen, die auf Ackerland angebaut werden, gehört der Tabak, dessen Bewässerung in VD bekannt ist.

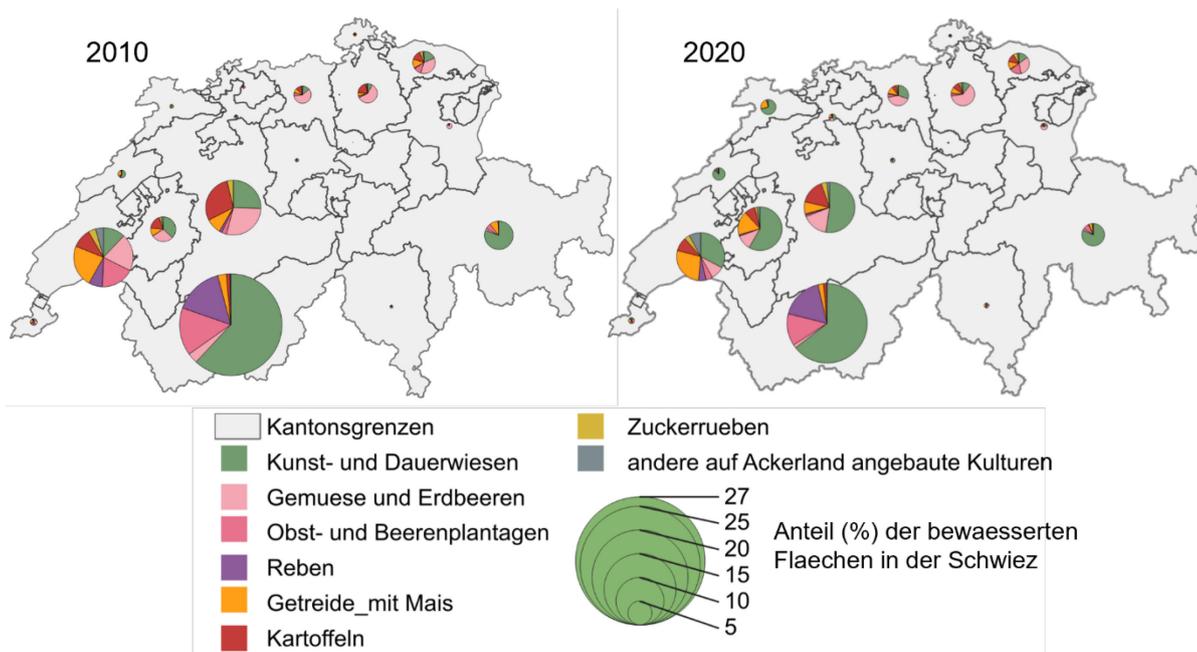


Abbildung 6-3 Bewässerte landwirtschaftliche Nutzfläche pro Kanton in Prozent der gesamten bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz und Anteil jeder Kulturart an der gesamten bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche pro Kanton im Jahr 2010 (links) und 2020 (rechts). Die Daten sind das Ergebnis von Erhebungen des Bundesamtes für Statistik zwischen 2010 und 2020 (Bundesamt für Statistik BFS, 2022). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

Da sich die bewässerte landwirtschaftliche Fläche zwischen 2016 und 2020 vergrößert hat (Abbildung 6-1), und die Frühjahrs- und Sommeranbauzeiten mit Ausnahme des Jahres 2021 trockener geworden sind, ist ein Anstieg der in der Landwirtschaft zur Bewässerung eingesetzten Wassermenge zu erwarten. Die letzte verfügbare Schätzung der für die Bewässerung in der Schweiz entnommenen Wassermenge stammt aus dem Jahr 2006: 144'000'000 m<sup>3</sup> oder 2'618 m<sup>3</sup> pro ha (Weber & Schild, 2007). Neuere, aber fragmentierte Daten sind für das effektiv entnommene Wasser in einige Kantone für das Dürrejahr 2018 verfügbar (HAFL et al. (Hrsg.), 2023). Was die wichtigsten Bewässerungskantone betrifft, wurden nur Daten für Thurgau (TG) und Aargau (AG) berichtet. Im Jahr 2018 wurden in TG insgesamt 3'712'014 m<sup>3</sup> Grund- und Oberflächenwasser für die Bewässerung entnommen, in AG 96'031 m<sup>3</sup> Grundwasser. Hier wurden keine Daten für Oberflächengewässer gemeldet. Im Kanton Schaffhausen wurden 615'762 m<sup>3</sup> Grund- und Oberflächenwasser für die Bewässerung verwendet, während für den Kanton Zug im Jahr 2018 eine Menge von 700 m<sup>3</sup> Oberflächenwasser als Krisenerfassung gemeldet wurde (HAFL et al. (Hrsg.), 2023). Die Verteilung des Oberflächenwassers, des Grundwassers oder des öffentlichen Wasserversorgungsnetzes als Hauptquellen für die Bewässerung ist dargestellt in Abbildung 6-4. Die Zahl der Betriebe mit Bewässerungsanlagen ist kleiner als die Summe der verschiedenen Quellen, was darauf hindeutet, dass die Betriebe verschiedene Quellen nutzen. Die Nutzung von Oberflächenwasser (einschliesslich Flüssen, Bächen und Seen) ist zwischen 2010 und 2016 zurückgegangen (Bundesamt für Statistik BFS, 2022), was vermutlich grösstenteils darauf zurückzuführen ist, dass die Wasserentnahme aus kleinen Flüssen und Bächen aufgrund von Abflussbeschränkungen aufgegeben wurde. Im Jahr 2016 nutzte die Mehrheit der Betriebe die Beregnungsbewässerung (5625), gefolgt von der Tropfbewässerung (1593). Die Schwerkraftbewässerung wurde noch von 919 Betrieben genutzt, davon 671 im Wallis, wo das Wasser unter anderem aus den "Suonen" abgeleitet wird, historischen Bewässerungskanälen aus dem 14. Jahrhundert. Neuere offizielle Daten sind nicht verfügbar.

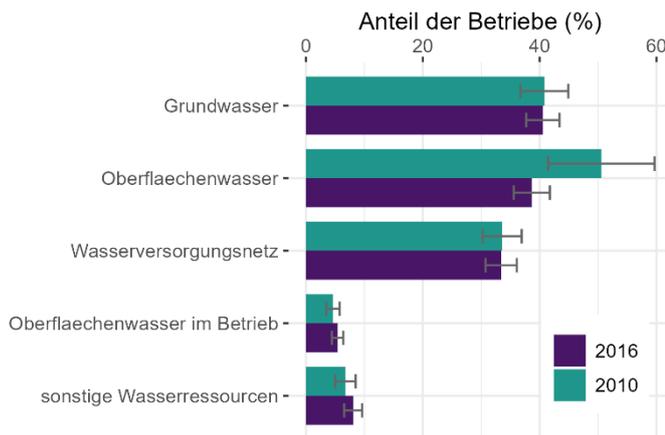


Abbildung 6-4 Quelle des für die Bewässerung verwendeten Wassers in den Jahren 2010 (grün) und 2016 (violett), ausgedrückt als Prozentsatz der Betriebe, die Bewässerung betreiben. Die Daten sind das Ergebnis von Erhebungen des Bundesamtes für Statistik. Die Fehlerbalken geben das 95 %-Konfidenzintervall der Daten an (Bundesamt für Statistik BFS, 2022).

In den Jahren 2010 und 2016 bezogen etwa 35 % der landwirtschaftlichen Betriebe Wasser aus einem externen Wasserversorgungsnetz für Bewässerungszwecke (Abbildung 6-4). Diese Zahl erscheint im Hinblick auf den Trinkwasserpreis hoch. Aus diesen Daten geht nicht klar hervor, ob das ausserbetriebliche Versorgungsnetz auch Trinkwasserunternehmen umfasst, die die Konzession für das Pumpen von Wasser, beispielsweise aus Seen, besitzen, bei denen jedoch ein Teil des Wassers ("Rohwasser") an Bewässerungsgenossenschaften geliefert wird. Ein Beispiel hierfür ist das "Syndicat d'arrosage de Nyon et environs" (SANE) im Kanton Waadt (Services industriels (SI) Nyon, 2023). Dennoch wird Trinkwasser für Bewässerungszwecke verwendet, wenn die Entnahme aus anderen Wasserquellen, meist Bächen und Flüssen, in Zeiten mit geringem Abfluss oder erhöhter Wassertemperatur verboten ist (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020; Linder, 2021). Grosse Nachteile sind die hohen Kosten und der Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung für Haushalte und kommunale Dienste wie die örtliche Feuerwehr. Es kann jeweils nur eine begrenzte Anzahl von Hydranten genutzt werden oder die Nutzung für die Bewässerung kann eingeschränkt oder verboten werden. Ausserdem befinden sich die Hydranten in der Nähe von Wohn- oder Industriegebieten und nicht unbedingt in der Nähe von landwirtschaftlichen Feldern (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020; Linder, 2021). Die rechtliche Entscheidung über die öffentliche Wasserversorgung liegt bei den Gemeinden, die auch den Preis für Trinkwasser festlegen. Die Kantone können die Gemeinden nicht dazu verpflichten, die Bewässerung aus dem öffentlichen Wasserversorgungsnetz zu genehmigen, noch dokumentieren sie die Nutzung oder die Preisgestaltung (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020; HAFL et al. (Hrsg.), 2023; Seiler et al., 2022). Auch die Gebühren für Bewässerungswasser variieren von Kanton zu Kanton, von Pauschalbeträgen pro bewässerte Fläche oder Pumpleistung bis hin zu Grundgebühren kombiniert mit Verbrauchsgebühren (HAFL et al. (Hrsg.), 2023).

Die aktuelle Situation mit fehlenden effektiven Entnahmedaten für Grund- und Oberflächenwasser für verschiedene Nutzungen, grob gesagt für die öffentliche Trinkwasserversorgung, die Industrie, die Energieproduktion und die Landwirtschaft, wurde im Fall der Landwirtschaft im vom Bundesamt für Umwelt finanzierten Projekt Swiss Irrigation Info (HAFL et al. (Hrsg.), 2023) und insgesamt in der Antwort des Bundesrates auf das Postulat "18.3610 Rieder - Grundlagenbericht zur Wasserversorgungssicherheit und Wasserbewirtschaftung, 15. Juni 2018" deutlich aufgezeigt (Conseil fédéral, 2022; Dübendorfer, Huwiler, Tratschin, et al., 2021). Als Gründe werden von der zuständigen kantonalen Verwaltung u.a. die kommunale Zuständigkeit für Bewilligungen, die Aufnahme der beantragten Durchflussmenge in die Konzessionen und nicht der tatsächlich entnommenen Wassermenge sowie das Fehlen eines rechtlichen Rahmens oder einer technischen Vorschrift für die Berichterstattung an die Bundesebene angeführt (Conseil fédéral, 2022). Eine Erklärung für dieses Manko wurde von Weber und Schild im Jahr 2007 für den Kanton Waadt formuliert (Weber & Schild, 2007): "Da im Kanton seit einem restriktiven politischen Entscheid des Bundesamtes für Landwirtschaft Mitte der 1980er Jahre keine Bewässerungsprojekte mehr unterstützt wurden, führte die für Strukturverbesserungen [wie die Installation von Bewässerungsnetzen oder -anlagen] zuständige kantonale Stelle kein Register der Bewässerungsprojekte".

Die Entscheidung eines Landwirts, zu bewässern, beruht auf einem einzelnen oder einer Kombination von drei Hauptgründen: i) Ertrags erleichterung, wenn der Anbau der Kulturpflanze ohne Bewässerung überhaupt nicht möglich wäre, ii) Ertrags sicherung, wenn der geforderte Ertrag in Bezug auf Menge und/oder Qualität ohne Bewässerung nicht erzielt werden kann, und iii) Ertrags optimierung, wenn durch Bewässerung der Ertrag so gesteigert werden kann, dass höhere Einnahmen erzielt werden können (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). Ein häufig verwendeter Begriff in diesem Zusammenhang ist die Bewässerungswürdigkeit oder das Ergebnis einer wirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Rechnung, die bestimmt, ob eine Kultur unabhängig von ihrem physiologischen Wasserbedarf bewässert werden sollte oder nicht. Im Allgemeinen werden nur Kulturen mit hoher Wertschöpfung wie Kartoffeln, Gemüse und Obst (Beeren und Obstplantagen) für die Bewässerung berücksichtigt, während Getreide und Grünland ausgeschlossen werden (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021; Zorn & Lips, 2016). Für Gemüse und Obst sind Simulationsprodukte zur Vollkostenberechnung verfügbar (für die Schweiz: Bravin et al., 2023; Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG), 2018), für andere Kulturen in der Schweiz derzeit nicht. In der Praxis werden Bewässerungsentscheidungen jedoch nicht allein auf der Grundlage der wirtschaftlichen Rentabilität getroffen, sondern es ist eine gesamtbetriebliche Betrachtung erforderlich. Eine Bewässerung nur als temporäre Notlösung war bisher wegen der Kosten nicht sinnvoll. Die Bewässerung von Mais und Grünland ist jedoch in Betrieben mit den erforderlichen Anlagen und dem Zugang zu Wasser machbar. Sie hängt dann auch von der Verfügbarkeit von Wasser in erhöhten Trockenstressperioden ab, wobei den wertschöpfungsstarken Kulturen im Betrieb Vorrang eingeräumt wird. Die Sicherung von Acker- oder Grünland für die Tierfütterung ist in Betrieben mit Viehhaltung wichtig und trägt dazu bei, den Zukauf von externem Futter einzuschränken. Darüber hinaus können politische Entscheidungen und die damit verbundenen finanziellen Massnahmen die Entscheidungsfindung in der Zukunft weiter beeinflussen.

Derzeit reagiert die Mehrheit der Landwirte noch nicht mit systematischen und grundlegenden Änderungen in ihrer Produktion auf die zunehmenden Dürreperioden, da der Schwerpunkt noch immer auf Bewässerungslösungen liegt (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). Das Bewusstsein für das mögliche Ende der Nachhaltigkeit wächst. Im Ackerbau wird allgemein davon ausgegangen, dass mehr Wintergetreide angebaut werden muss und die Sommerkulturen stark reduziert werden müssen. Im Kanton Aargau beispielsweise deuten die Klimaprognosen darauf hin, dass Zuckerrüben und Mais zunehmend bewässert werden müssen. Gleichzeitig wird die Wirtschaftlichkeit einer Ausweitung der Bewässerungsfläche in Frage gestellt und die Wirksamkeit der Bewässerung bei Hitzestress bezweifelt (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). In einer vom Amt für Landwirtschaft des Kantons Solothurn durchgeführten Umfrage waren die fünf bevorzugten Antworten der Landwirte auf verschiedene Möglichkeiten, den Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Kulturen ohne zusätzliche Bewässerung zu decken, i) die Verbesserung der Wasserspeicherkapazität des Bodens (Humuswirtschaft, permanente Bodenbedeckung), ii) die Anpassung der Aussaat- bzw. Pflanztermine, iii) die Anwendung wasser- und bodenschonender Anbausysteme (Direkt-, Mulch- oder Strip-Till-Saat), iv) trockenheitstolerante Sorten und Unterlagen und v) die Anpassung der Fruchtfolgen oder der Verzicht auf Kulturen (z. B. g., Kartoffeln) (Amt für Landwirtschaft, Kanton Solothurn, 2022). Bei der Bewältigung zunehmender Dürreperioden, die zu Ertragseinbußen führen, waren die wichtigsten Antworten die Anpassung der Kulturen einerseits und die Korrektur der Ertragserwartungen nach unten sowie die Akzeptanz von Ertragsschwankungen andererseits (33 % bzw. 27 %). Weitere 15 % zogen eine Ertragsausfallversicherung in Erwägung und 11 % eine Verringerung des Viehbestands, um den Bedarf an Futtermitteln aus dem Grünlandanbau zu reduzieren. Landwirte, die noch nicht bewässern, würden dies in erster Linie für Kunstwiesen (17 %) und bei der Aussaat für eine Reihe von Kulturen (17 %) in Betracht ziehen, gefolgt vom Obst- (18 %), Kartoffel- (13 %) und Gemüseanbau (12 %) (Amt für Landwirtschaft, Kanton Solothurn, 2022). Die Antworten zeigen, wie wichtig die Erzeugung von Viehfutter in den Betrieben ist und dass die Auswirkungen von Dürre auf den frühen Anbau von Pflanzen immer häufiger vorkommen und ins Bewusstsein gerückt werden. Die Bewässerung wird beispielsweise bei der Aussaat von Weizen im Falle eines trockenen Frühjahrs angewandt, um die Keimung zu fördern und eine frühe Vitalität zu gewährleisten (Reynald Pasche, SANE, persönliche Mitteilung, 04.07.2023). Es wird auch nach der Ernte von Winter- und Frühjahrskulturen im Juli und August eingesetzt, wenn der Boden für die Aussaat der nächsten Kultur zu trocken ist (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021).

Schweizer Hagel hat seit 2014 in zwei seiner Ackerbau-Produkte (für konventionellen und biologischen Landbau) eine Dürreerisikoversicherung für die wichtigsten Kulturen aufgenommen. Seit 2019 wurden jedes Jahr rund um

41'000 ha versichert (Abbildung 6-5). Die grösste Gesamtfläche, für die Dürreschäden gemeldet wurden, entfällt auf Jahre mit längeren Trockenperioden, insbesondere im Jahr 2022 (Schweizer Hagel, persönliche Mitteilung, 17.07.2023). Die letzte begrenzte Revision der schweizerischen Agrarpolitik ("AP22+") sieht einen Beitrag zur Senkung der Prämienkosten für private Versicherungen vor, die zur Deckung von Risiken im Falle grosser Dürre oder Frost beitragen (ATS KEYSTONE-SDA-ATS AG, 2023).

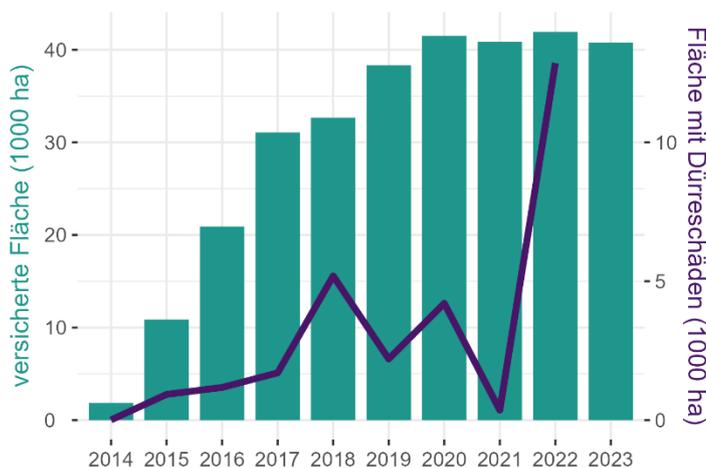


Abbildung 6-5 Entwicklung der gegen Dürre versicherten landwirtschaftlichen Fläche in der Schweiz seit 2014, als das Dürrierisiko erstmals in die Versicherungsprodukte von Schweizer Hagel aufgenommen wurde, und gemeldete Dürreschäden (Schweizer Hagel, persönliche Mitteilung, 17.07.2023).

### 6.3 Wasserreserven in der Schweiz für die Bewässerung und ihre Verteilung

In den meisten Kantonen wurde 2016 eine Kombination aus Grundwasser und Oberflächenwasser (Seen, Flüsse, Bäche), ergänzt durch Trinkwasser, für die Bewässerung der Kulturen genutzt. Nur in den Kantonen Genf und Uri war das öffentliche Wasserversorgungsnetz die einzige Quelle für die Bewässerung (letzte verfügbare Daten des Bundesamts für Statistik; Bundesamt für Statistik BFS, 2022) (Abbildung 6-6).



Abbildung 6-6 Die häufigsten Wasserquellen für die Bewässerung im Jahr 2016, spezifiziert nach Kantonen. Die Daten sind das Ergebnis einer Erhebung des Bundesamtes für Statistik (Bundesamt für Statistik BFS, 2022). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

Eine Beschreibung der derzeit verfügbaren Wasserquellen für Bewässerungszwecke und ihrer Vor- und Nachteile findet sich in Tabelle 6-1. Regenwasser scheint derzeit keine wichtige Quelle zu sein, aber das kann sich in Regionen ändern, die keinen Zugang zu grösseren Oberflächengewässern (Flüsse und Seen) haben oder in denen das Grundwasserregime keine Entnahme während der Trockenperioden im Sommer zulässt, z. B. wenn Bäche aus Quellen versorgt werden (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021).

Tabelle 6-1 Beschreibung der derzeit verfügbaren Wasserquellen für die Bewässerung in der Schweiz. Angepasst von Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al. (2021)

Wasserbezug	Beschreibung	Vor- und Nachteile
Regenwasser	Regenwasser fällt als Dach- und Platzwasser an oder kann aus Drainagen oder aus dem Trennsystem der Gemeinde entnommen werden. Bei Wasser ab Hofplatz, Drainagen oder aus Trennsystemen ist die Qualität/Verschmutzung zu überprüfen. Pro Quadratmeter fallen in der Mittellandregion bis zu 700-1300 Liter pro Jahr (1991-2020; (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2023c)	+ Günstig - Zuverlässigkeit - Grosser Speicherbedarf
Oberflächenwasser - Flüsse und Bäche	Bei kleinen Oberflächengewässern werden Entnahmen nur bei erhöhten Abflüssen genehmigt. Nutzungskonflikte sind möglich und in Trockenperioden ist ein Bezug nicht möglich. Wasserentnahmen sind bewilligungs- resp. konzessionspflichtig.	+ Günstig - Standortabhängig - Bei Trockenheit meist kein Bezug möglich
Oberflächenwasser - Seen	Die Nutzung von Wasser aus Seen muss bewilligt werden und Nutzungskonflikte sind möglich. Wenn genehmigt ist der Bezug aber planbar und zuverlässig.	+ Zuverlässigkeit - Standortabhängig - Kosten, Bewilligung
Grundwasser - Quellen	Quellen können nur genützt werden, wenn genügend Wasser fliesst und die nötigen Restwassermengen übrigbleiben. Die Quelle muss im Eigentum oder der Bezug über ein Quellrecht geregelt sein.	+ Günstig - Standortabhängig - Ergiebigkeit bei Trockenheit fraglich
Grundwasser	Die Nutzung von Grundwasser muss bewilligt werden und Nutzungskonflikte sind möglich. Bei bewilligter Grundwasserfassung ist der Bezug aber planbar und zuverlässig.	+ Zuverlässigkeit - Oft nicht verfügbar - Kosten, Bewilligung
Öffentliche Wasserversorgung	Im Winter verfügen die öffentlichen Wasserversorgungen in der Regel über genügend Wasser zur Abgabe. Da es sich um Trinkwasser handelt, ist dieses teuer. In Trockenperioden ist ein grösserer Bezug nicht möglich oder nicht gesichert. Für einen Wasserbezug aus der öffentlichen Wasserversorgung wird eine Vereinbarung über Bezugsmengen, Preise (pro m <sup>3</sup> ) und Zeitraum des Bezuges mit der lokalen öffentlichen Wasserversorgung empfohlen.	+ Zuverlässigkeit, Qualität - Bezug in Trockenheitsphase unsicher oder zu vermeiden - Kosten

Die Lage der wichtigsten Bewässerungszonen und Entnahmestellen, wie sie von den Kantonen im Rahmen des Projekts Swiss Irrigation Info (HAFL et al. (Hrsg.), 2023) gemeldet wurden, ist in Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-2, dargestellt. Es folgt eine allgemeine Beschreibung des Zustands einer Auswahl von Oberflächen- und Grundwasserquellen mit Entnahmestellen für die Bewässerung im gesamten Schweizer Mittelland. Zudem werden bestehende Bewässerungsgenossenschaften und Bewässerungsprojekte im Hinblick auf die Strategie des Bundesamtes für Landwirtschaft (Abteilung Strukturverbesserungen) diskutiert. Schliesslich werden Informationssysteme über öffentlich verfügbare Daten für Wetter-, Boden- und hydrologische Messstationsnetze, teilweise mit Warnsystemen, beleuchtet.

### 6.3.1 Oberflächenwasser

Mit Ausnahme des Wallis ist Oberflächenwasser nicht die einzige oder dominierende Wasserquelle für die Bewässerung in der Schweiz. Dennoch gelten Seen als zuverlässige Quelle, wenn die erforderliche Infrastruktur vorhanden ist. Wo keine Seen in der Nähe sind oder wo keine Infrastruktur für die Wasserentnahme vorgesehen ist, war die Entnahme von Wasser aus Flüssen durch einzelne Landwirte in der Vergangenheit gängige Praxis. Die immer häufigeren Einschränkungen während der trockenen Sommermonate und bis in den Herbst hinein aufgrund niedriger Abflussmengen und/oder erhöhter Wassertemperaturen geben den Bewässerungsbetrieben Anlass zur Sorge. Derzeit (Jan. 2023) sind in der Schweiz 34 Messstationen für den Wasserstand der Seen in Betrieb, die zum Netz der Bundesstationen gehören und digitale Daten liefern (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023a). Die Erfassung der Seewassertemperatur, die vor allem ökologischen Zwecken dient, wird derzeit ausgebaut (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023e). Bei den Flüssen und Bächen messen 213 Stationen den Abfluss, 204 davon den Wasserstand und weitere 98 liefern Temperaturdaten (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023a). Die Kantone haben Netzwerke aufgebaut, die die Bundesstationen und zusätzliche Stationen umfassen (siehe 6.3.5).

Der Indikator Q347 ist ein statistischer Wert, der zur Bestimmung von Mindestrestwassermengen in Flüssen verwendet wird. Er beschreibt die Abflussmenge, die im Durchschnitt von 10 Jahren an 347 Tagen pro Jahr erreicht oder überschritten wird (wann die entsprechende Verordnung einzuhalten ist, siehe 6.4). In Abbildung 6-7 ist für vier Flüsse im Mittelland der durchschnittliche Abfluss im Jahresverlauf für eine Referenzperiode (1981-2010) dargestellt. Die durchschnittlichen minimalen und maximalen Abflussmengen für den Referenzzeitraum und ein langfristiges Q347 sind ebenfalls angegeben, um die Auswirkungen von "trockenen" Jahren (hier 2018 und 2022) und einem "nassen" Jahr (2021) auf die Abflussmengen zu zeigen.

Die Aare und die Reuss sind grosse Flüsse mit einem hohen Abfluss, der vor allem durch die jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserabflusses in den Alpenregionen bestimmt wird. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass die Abflüsse im Winter aufgrund der Niederschläge in Form von Schnee gering sind, während die Abflüsse am Ende des Frühjahrs und bis in den Sommer hinein aufgrund der Schnee- und Gletscherschmelze sowie der Niederschläge in Form von Regen hoch sind. In den letzten so genannten trockenen Jahren haben die Abflussmengen im Sommer abgenommen (mit Minima im Herbst), ohne jedoch die entsprechenden Q347-Indikatorwerte zu erreichen (Abbildung 6-7). Dennoch wird sich das Gesamtabflussmuster in Zukunft verschieben, da für Gebirgsregionen im Winter weniger Schneefall und mehr Niederschlag in Form von Regen erwartet wird (Lanz, Klaus et al., 2020). Es entspricht dann dem Regime von Flüssen wie der Broye im Kanton Waadt und der Dünnern im Kanton Solothurn (Abbildung 6-7). Hier sind die Abflusswerte im Winter typischerweise hoch und nehmen im Frühjahr bis zum Ende des Sommers ab. Die Indikatorwerte des Q347 werden in trockenen Jahren regelmässig im Sommer und bis in den Herbst hinein erreicht. Die Thur entspringt ebenfalls im Alpenraum und wird von keinem See reguliert. An ihrer Messstelle am äusseren Ende des Einzugsgebiets ist das Regime aufgrund der grossen Schwankungsbreite der Abflussmengen zwischen den Minima und Maxima untypisch. In trockenen Jahren können niedrige Wasserstände auftreten (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-3). Für die Thur wurde ein direkter Austausch zwischen Grundwasser und Fliessgewässer nachgewiesen. Im östlichen Teil sinkt der Grundwasserspiegel in Trockenperioden ab, bis die Thur wieder ansteigt oder bis die Grundwasserneubildung durch Niederschläge im Herbst einsetzt (Hofer et al., 2017). Auch die Entnahme von Grundwasser für die Bewässerung reduziert die Speisung der Thur-Binnenkanäle im westlichen Teil (Gmünder, 2017).

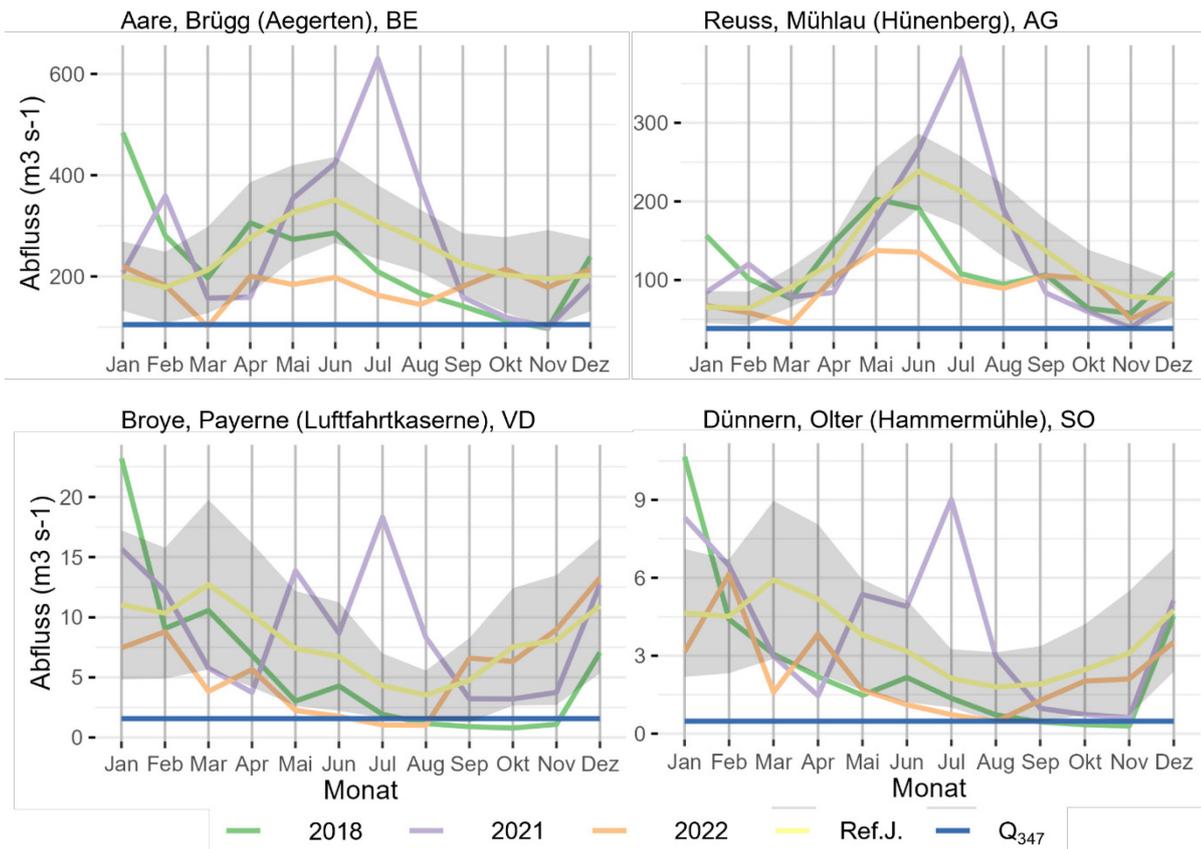


Abbildung 6-7 Monatliche Abflüsse von vier Fließgewässern, wie sie von den Messstationen im Schweizer Mittelland ermittelt wurden. Die Abflüsse sind als Mittelwerte für eine Referenzperiode (1981-2010), die beiden bekannten "Dürrejahre" 2018 und 2022 sowie das "nasse" Jahr 2021 dargestellt. Die graue Fläche um den mittleren Abfluss des Referenzzeitraums (gelbe Linie) zeigt die maximalen und minimalen Abflüsse im Monatsmittel über den Referenzzeitraum. Die blaue Linie in den Grafiken stellt den  $Q_{347}$ -Wert dar, der an diesen Messstationen über die Jahre 1935-2016 für die Aare, 1978-2018 für die Reuss, 1978-1999 für die Broye und 1978-2018 für die Dünner ermittelt wurde. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie, (2023); Kanton Aargau, Fachbereich Hydrometrie (2023).

Die meisten grossen natürlichen Seen in der Schweiz sind reguliert, d.h. der Abfluss erfolgt über eine Wehr, und der minimale und maximale Wasserstand wird durch die geltenden Wehrvorschriften bestimmt. Diese bestimmen somit auch die potenziell nutzbare Wassermenge eines Sees. Während der Sommertrockenheit 2018 wurden die Wasserstände des Zürichsees und des Vierwaldstättersees unter das in den Verordnungen festgelegte Minimum abgesenkt, um die Unterläufe der Fließgewässer (z.B. Limmat und Reuss) zu speisen und deren ökologische Funktion zu erhalten (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2021). Bei den nicht regulierten Seen, darunter der Bodensee und der Walensee (beide in der Ostschweiz), wirkt sich der Klimawandel auf die Wasserstände aus, weil er die Flüsse, die sie speisen, im Sommer und Herbst mit niedrigen Wasserständen beeinflusst (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2021). Die Situation für regulierte Seen ist noch unklar, da die derzeitigen Wehrregelungen die Auswirkungen eines geringeren Zuflusses nicht berücksichtigen. In den Sommermonaten kann es daher zu Konflikten bei der Wasserentnahme kommen. Gemäss BAFU (2021) sind Studien im Gange, die eine mögliche Anpassung der Wehrregulierung prüfen, zum Beispiel um die Wasserstände im Frühjahr für die Sommerversorgung höher zu halten (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2021).

Die Wasserentnahme für die Bewässerung aus Oberflächengewässern wurde bereits von den Bächen auf die Seen verlegt, wo dies möglich war, und Bewässerungsprojekte in diesem Sinne wurden mit Kantons- und Bundesbeiträgen für Strukturverbesserungen unterstützt. Dies ist insbesondere im westlichen Mittelland der Fall, z.B. in der Broye und in der Region zwischen Neuenburger-, Murten- und Bielersee, sowie im östlichen Mittelland am Bodensee (Lanz, Klaus et al., 2020) (siehe 6.3.3).

### 6.3.2 Grundwasser

Grundwasser umfasst beides, Grundwasserspiegeln und Quellen. Das Grundwasserregime beschreibt das jährliche Muster der Wasserstände und Durchflussmengen von Grundwasserspiegeln bzw. Quellen. In dem Schweizer Mittelland sind die Grundwasserregime entweder vom Typ Niederschlag oder Typ Import. Im Falle des Niederschlagsregimes erfolgt die Grundwasserneubildung hauptsächlich im Winter und im Frühjahr aufgrund der lokalen Niederschläge. Daher erreichen die Grundwasserstände und Quellschüttungen im Allgemeinen im Januar bis März ihre Höchstwerte, und am Ende des Sommers, von August bis September, ihre Tiefstwerte. Je tiefer das Wasser ist, desto stärker werden die Schwankungen abgeschwächt und die Anreicherung erfolgt mit einer gewissen Zeitverzögerung. Entlang der grossen Flüsse wie Rhone, Rhein und Aare infiltriert das aus den Alpen ins Schweizer Mittelland transportierte Wasser das Grundwasser, das dann als importiertes Regime bezeichnet wird (Typ Import). Er folgt dem gleichen Regime wie der Fluss, der ihn speist, d. h. er hat im Winter aufgrund der Schneefälle in den Alpen eine geringe Durchflussmenge und von Mai bis Juli nach der Schnee- und Gletscherschmelze eine maximale Durchflussmenge. Je weiter vom Flussufer entfernt, desto geringer ist der Beitrag des Flusswassers zur Grundwasseranreicherung (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023c).

Im Modul QUANT der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA wird die Grundwassermenge für typische Grundwasserstandorte in der Schweiz auf der Basis von Grundwasserständen und Quellenabflüssen erfasst. Ende 2016 umfasste das Modul insgesamt 91 Messstellen (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2019). Für 18 Grundwassermessstellen im Mittelland (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-4), darunter 15 Grundwasserspiegel (Wasserstand) und drei Quellen (Abfluss), wurden die mittleren monatlichen Wasserstände bzw. Abflüsse für Referenzperioden zwischen 1981 und 2010 sowie die mittleren monatlichen minimalen und maximalen Wasserstände bzw. Abflüsse während dieser Referenzperioden berechnet. Diese Daten sind zusammen mit den Daten für die letzten "trockenen" Jahre (hier 2018 und 2022) und ein "nasses" Jahr (2021) dargestellt (Abbildung 6-8; Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-5, Ergänzende Abbildung 11.2-6). Eine der Quellen (VD) im Datensatz wies ein klares saisonales Profil mit abnehmendem Abfluss vom Frühjahr bis zum Ende des Sommers auf (Abbildung 6-8). Die Auswirkungen trockener Jahre waren bei allen drei Quellen deutlich sichtbar (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-5). Bei den Wasserständen der Grundwasserspiegel ist zu beachten, dass die Spanne der Extremwerte etwa 0,6-3 m betrug, mit einem Mittelwert von 1,97 m und einem Medianwert von 2 m. Im Laufe des Jahres und zwischen trockenen und feuchten Jahren beträgt der maximale Unterschied also 3 m für zwei Grundwasserspiegel und weniger für die meisten. Dennoch sind die Auswirkungen trockener und/oder nasser Jahre bei etwa 10 von 15 Grundwasserspiegelmessstellen sichtbar (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-6). Die saisonale Entwicklung des Grundwasserspiegels an der Messstelle Buechberg im Thurgau zeigt in der Referenzperiode (1993-2010) eine sehr geringe Schwankungsbreite. Bis 2018 blieben die Wasserstände weitgehend innerhalb dieser Bandbreite, doch ab der zweiten Jahreshälfte 2018 sank der Wasserstand und erholte sich auch im Jahr 2021 nicht mehr vollständig (Abbildung 6-8).

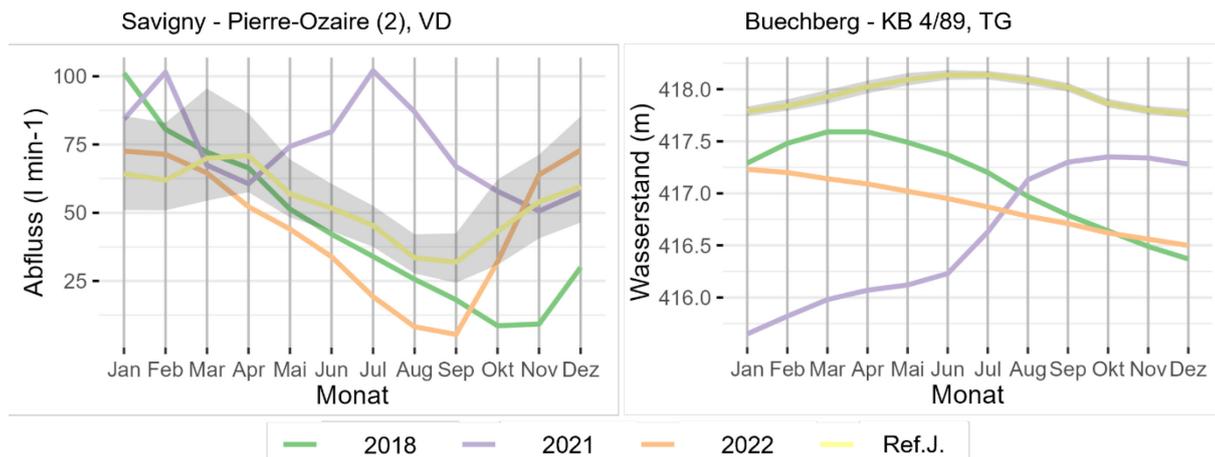


Abbildung 6-8 Monatlicher Abfluss an einer Grundwasserquelle (links) und einer Grundwasserspiegel-Messstelle (rechts) im Schweizer Mittelland. Dargestellt sind die Abflüsse bzw. Wasserstände als Mittelwerte für die jeweiligen Referenzperioden (VD: 1983-2010; TG: 1993-2010), die beiden bekannten "Dürrejahre" 2018 und 2022 sowie das "nasse" Jahr 2021. Die graue Fläche um den mittleren Abfluss bzw. Wasserstand der Referenzperiode (gelbe Linie) zeigt den maximalen und minimalen Abfluss bzw. Wasserstand im Monatsmittel der Referenzperiode. VD, Waadt; TG, Thurgau. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU & Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA (2023).

### 6.3.3 Konzessionen für die Entnahme von Oberflächenwasser und Grundwasser

Die im Rahmen des Projekts Swiss Irrigation Info durchgeführte Umfrage befragte die Kantone nach den Wasserentnahmekonzessionen für die Bewässerung, der effektiven Menge des entnommenen Wassers und der entsprechenden Fläche der landwirtschaftlichen Nutzfläche (HAFL et al. (Hrsg.), 2023). Für die meisten Kantone des Mittellandes sind die maximal zulässigen Entnahmemengen (ausgedrückt in Litern pro Minute) sowohl für Oberflächen- als auch für Grundwasser bekannt (Abbildung 6-9). Für St. Gallen, Waadt und Thurgau sind es mehr als 100'000 Liter pro Minute. In der gleichen Grössenordnung dürfte auch Bern als Kanton mit einer grossen Bewässerungsfläche liegen (6'631 ha im Jahr 2020), aber hier waren die Entnahmerechte nicht verfügbar. Andererseits scheinen die Zahlen für St. Gallen und möglicherweise auch für den Thurgau im Vergleich zu ihrer jeweiligen bewässerten Fläche (891 ha und 2'744 ha), wie sie für 2020 bekannt sind, hoch zu sein. Im Thurgau könnte dies mit der Obstproduktion zusammenhängen, die im Jahr 2022 1'540 ha umfasste (Bundesamt für Statistik BFS, 2023) und weil das Wasser sowohl für die Bewässerung als auch für den Frostschutz im Frühjahr benötigt wird. Die für die Bewässerung effektiv entnommene Wassermenge ist für 2018 nur für vier Kantone bekannt, wie bereits erwähnt und in Abbildung 6-9 zu sehen.

In der von HAFL et al. (Hrsg.) (2023) durchgeführten Erhebung wurden ausserdem Daten über die landwirtschaftliche Fläche innerhalb der Konzessionen erhoben (Abbildung 6-10). Diese wurden für vier Kantone (Freiburg, Bern, Luzern und Thurgau) als bekannt gemeldet, aber nur für drei Kantone sind Daten verfügbar. Die bewässerte Fläche reicht von 1 ha bis 247 ha in Bern und von 1 ha bis 10 ha in Luzern. In Freiburg sind in der Broye-Region grössere Genossenschaften mit einer Fläche von 50 ha bis rund 1500 ha aktiv.

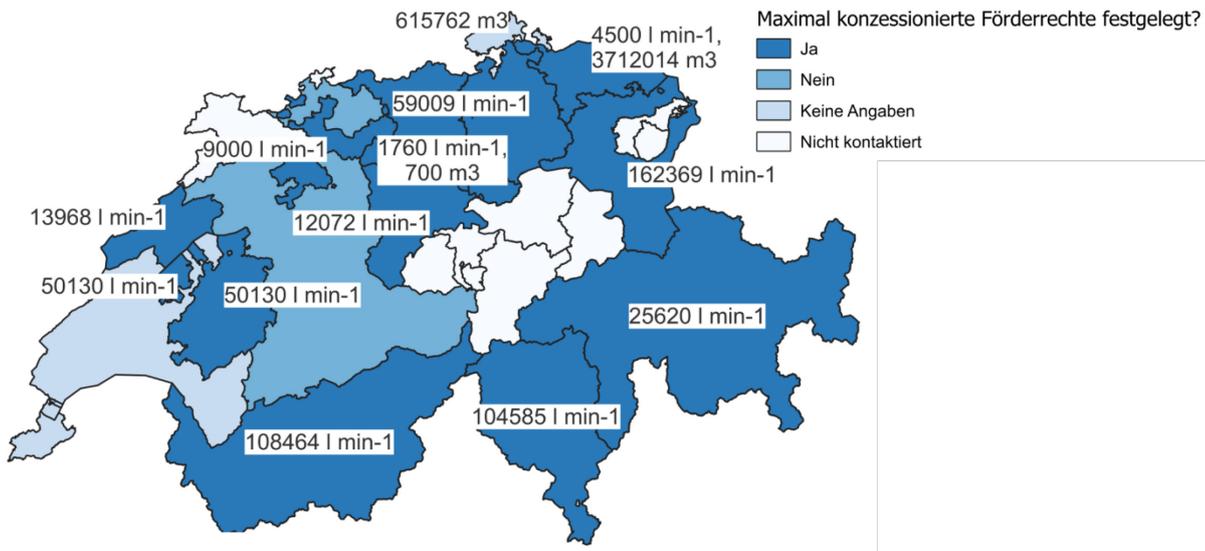


Abbildung 6-9 Summe der Konzessionen für die Entnahme von Oberflächen- und Grundwasser, ausgedrückt in Litern pro Minute, für Kantone mit festgestellten Höchstwerten (in Dunkelblau eingefärbt) und Kantone ohne festgelegte Höchstwerte (in Hellblau eingefärbt). Für Aargau sind nur die Konzessionen für das Grundwasser bekannt. Für Genf, Schaffhausen und Wallis sind keine Daten verfügbar (in Grau eingefärbt). Die Zahlen in Kubikmetern geben die effektiv entnommene Wassermenge an, die im Jahr 2018 für die Kantone Thurgau, Aargau, Schaffhausen und Zug zur Verfügung stand. Die übrigen Kantone (nicht eingefärbt) wurden bei der Umfrage im Rahmen des Projektes Swiss Irrigation Info nicht kontaktiert (HAFL et al. (Hrsg.), 2023). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

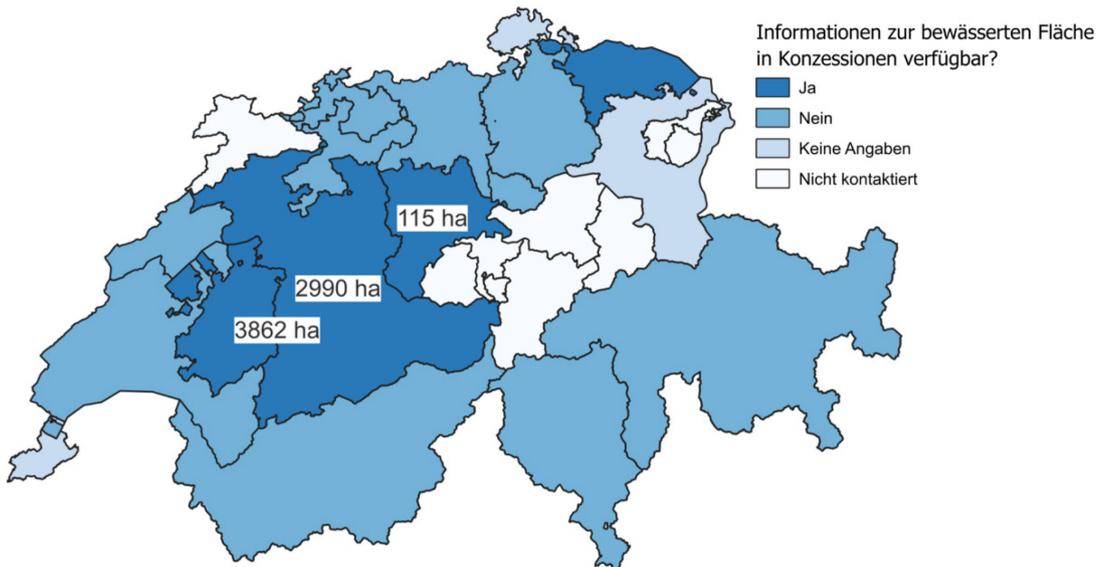


Abbildung 6-10 Verfügbarkeit von Daten über die mit Konzessionen verbundene landwirtschaftliche Fläche und die entsprechenden Flächendaten. Für den Kanton Freiburg entsprechen die Daten (3'862 ha) der bewässerten Fläche der Bewässerungsgenossenschaften im Jahr 2016. Die für den Kanton Luzern gemeldete Bewässerungsfläche (115 ha) bezieht sich auf Sonderkulturen und beinhaltet nicht die Flächen, die über die öffentliche Wasserversorgung oder private Quellen bewässert werden. Quelle: HAFL et al. (Hrsg.) (2023). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

### 6.3.4 Bewässerungsgenossenschaften und Projekte

Die Wasserquellen für die Bewässerung wurden und werden immer noch von der individuellen Entnahme aus Wasserläufen auf die organisierte Förderung durch Bewässerungsgenossenschaften umgestellt. Die Landwirte organisieren sich in Bewässerungsgenossenschaften, um den Ausbau und die Instandhaltung der Bewässerungsinfrastruktur, einschliesslich Pumpstationen, unterirdischer Leitungen und in einigen Fällen auch Stauseen, wirtschaftlich rentabler zu gestalten (Beispiele in Anhang 11.2, Ergänzende Tabelle 11.2-1). Die eigentliche Wasserentnahme erfolgt häufig aus grösseren Wasserquellen (Seen, Grundwasserspiegel) durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen, die Eigentümer der Konzessionen sind. Die Genossenschaften kaufen

dann (unbehandeltes) Wasser, das durch ein Netz von Leitungen zu den Endverbrauchern gepumpt (unter Druck gesetzt) wird. Die Genossenschaften verwalten die Verteilung des Wassers und die Abrechnung mit Wasserzählern, um die Wasserkosten für die Teilnehmer zu ermitteln. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Daten innerhalb der Genossenschaftsstrukturen gesammelt werden, aber derzeit nicht an die kantonalen Behörden weitergeleitet oder von diesen angefordert werden. Ganz anders sieht es bei den Bewilligungen für die Wasserentnahme aus den lokalen Bächen aus. Nur für den Kanton Schaffhausen ist bekannt, dass bei der Förderung von Oberflächenwasser Wasserzähler eingebaut werden müssen und diese Daten erfasst werden.

Seit etwa 2003 unterstützt die Bundesregierung Bewässerungsprojekte. In der Verordnung über die Strukturverbesserung in der Landwirtschaft von 1998 in ihrer angepassten Form vom November 2003 wird nur die Überarbeitung und Verbesserung von Bewässerungsanlagen und Kanälen als solche erwähnt (Art. 15a, Schweizerische Bundesrat (2003)). Anfang 2021 wird das Bundesamt für Landwirtschaft jedoch klarstellen, dass "eine Unterstützung für die Bewässerung zur Ertragssicherung gewährt wird, wenn in Regionen, die während der Vegetationsperiode häufig von Trockenheit betroffen sind, Verluste (quantitativ und/oder qualitativ) dokumentiert sind. Eine Bewässerungsunterstützung kann auch dann in Betracht gezogen werden, wenn diese Massnahme entscheidend dazu beiträgt, das schweizerische Angebot an Obst, Gemüse, Kartoffeln und anderen Spezialkulturen in Bezug auf Qualität, Verfügbarkeit, Preis und Service an die aktuellen Nachfrageerfordernisse anzupassen", und dass "Wasser effizient und sparsam eingesetzt werden muss". In den Projektvorschlägen müssen der Bewässerungsbedarf (Dürrierisiko, Wasserbedarf), die Rentabilität (Bodenaspekte, Marktsituation und Ertrag) und die Durchführbarkeit (Wasserverfügbarkeit, Konflikte) sowie Massnahmen zur Sicherstellung der Bewässerungseffizienz erörtert und nachgewiesen werden. Für letztere können zusätzliche Beiträge gewährt werden (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2021). Bewässerungsprojekte, die sich auf andere Ackerkulturen als Kartoffeln konzentrieren, d.h. solche, die nicht als bewässerungswürdig angesehen werden, werden derzeit nicht unterstützt. Die Zurückhaltung beruht auf Bedenken hinsichtlich der benötigten (oder angeforderten) Wassermenge und der Auswirkungen auf die lokale Wasserverfügbarkeit (Jan Béguin, Bundesamt für Landwirtschaft, persönliche Mitteilung, 26.09.2023).

In der neuen Verordnung von 2022 wird eine Bestimmung zur Wasserverfügbarkeit hinzugefügt: "Finanzielle Unterstützung für Bewässerungsanlagen ist möglich, wenn das Projekt auf die mittelfristige Wasserverfügbarkeit ausgerichtet ist" (Art. 21, Schweizerische Bundesrat (2022)). Dies wird vom Bundesamt für Landwirtschaft wie folgt konkretisiert: "Die Anforderung gilt als erfüllt, wenn die für die Bewässerung benötigte Wassermenge nachweislich für mindestens 20 Jahre zur Verfügung steht. Als Grundlage für die Berechnung von Wasserverfügbarkeit und -bedarf werden aktuelle Zahlen des National Centre for Climate Services (NCCS) verwendet. Dabei sind insbesondere die Mindestwassermengen, die zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit der betroffenen Ökosysteme erforderlich sind, sowie die Bedürfnisse der anderen Nutzer zu berücksichtigen. Die Wasserverfügbarkeit muss von den zuständigen kantonalen Behörden schriftlich bestätigt werden" (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023b).

Schliesslich enthält ein aktueller Bericht des Bundesamts für Landwirtschaft über die künftige Strategie für Strukturverbesserungen (2030+) und die damit verbundenen Anforderungen an die finanziellen Beiträge des Bundes eine strategische Linie zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Ernährungssystems, einschliesslich der Mittel zur Bewältigung des Klimawandels (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023a). Dies bezieht sich auf die Be- und Entwässerungsanlagen, wo die bisherigen Bundesbeiträge für Bewässerungsprojekte von CHF 1.74 Mio. pro Jahr (2014-2021) voraussichtlich auf CHF 8-9 Mio. pro Jahr (2030) ansteigen werden, da der Bewässerungsbedarf aufgrund der extremen Klimaereignisse der letzten Jahre weiter zunimmt. Die finanziellen Beiträge werden auf der Grundlage einer geschätzten zusätzlichen Bewässerungsfläche von 60'000 ha bis 2030 (gegenüber 45'457-53'363 ha in den offiziellen Zahlen von 2020; Bundesamt für Statistik BFS (2022)) und Kosten pro Hektar von CHF 18'000 bis 22'000 berechnet. Es wird jedoch erwartet, dass bis 2030 die meisten grossen und kostspieligen Bewässerungsprojekte geplant oder umgesetzt sein werden, so dass ab 2040 der Fokus wieder auf kleineren Projekten und dem Unterhalt und der Modernisierung bestehender Anlagen liegen dürfte (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023a). Zudem erarbeitet das Bundesamt für Landwirtschaft zusammen mit den Kantonen bis Ende 2023 einen Bewässerungsleitfaden, der als Planungs- und Entscheidungshilfe für grosse Bewässerungsprojekte dienen soll. Dies ist Teil der Klimastrategie für die Landwirtschaft des Bundesamtes für Landwirtschaft, des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen, die ab 2023 umgesetzt werden soll und einen Schwerpunkt auf Wasserfragen legt. Eine weitere Massnahme in

diesem Zusammenhang ist die Schaffung einer Bewässerungsplattform (2024) zur Förderung des Austauschs zwischen den Akteuren über die strategische Ausrichtung der Bewässerung in der Schweiz (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023a).

Seit 2003 hat das Bundesamt für Landwirtschaft die Entwicklung von 76 Bewässerungsprojekten unterstützt, die meisten davon in den Kantonen Bern (20), Freiburg (18) und Wallis (17) (HAFL et al. (Hrsg.), 2023). Dies kann die Ausweitung des Anteils der bewässerten Fläche und der Betriebe mit Bewässerungsinfrastruktur in Freiburg erklären, wie in Abbildung 6-2 zu sehen ist. Die gesamte zusätzliche Bewässerungsfläche beläuft sich auf 18'863 ha, wobei jedoch die Fruchtfolge berücksichtigt werden muss, was bedeutet, dass nicht alle in den Bewässerungsprojekten enthaltenen Parzellen jährlich bewässert werden (HAFL et al. (Hrsg.), 2023).

### 6.3.5 Netzwerke für die Überwachung von Boden, Wasser und Wetter

Tabelle 6-2 gibt einen nicht abschliessenden Überblick über Informationssysteme zu öffentlich zugänglichen Daten von Wetter-, Boden- und hydrologischen Messstationsnetzen, zum Teil mit begleitenden Beratungs- oder Warnsystemen. Da extreme Wetterereignisse oder andere Naturgefahren oft grosse Schäden verursachen und zu lebensbedrohlichen Situationen führen können, entwickeln die Regierungen Frühwarnsysteme, damit rechtzeitig Krisenmanagementpläne aktiviert werden können (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2023b). Vor allem für Hochwassersituationen wurde ein Netz zur Überwachung des Oberflächen- und Grundwasserspiegels und der damit verbundenen Gefahrenstufen entwickelt. Auch die Wassertemperatur wird gemessen und dient heute zusammen mit den Niedrigwasserständen als Entscheidungsgrundlage für wasserentnahmebeschränkende oder -verhindernde Massnahmen zum Schutz der Trinkwasserversorgung und der Ökosystemleistungen von Gewässern. In ähnlicher Weise wurden Netzwerke zur Messung der Bodenfeuchte ursprünglich entwickelt, um die Böden vor Verdichtung durch schwere landwirtschaftliche Maschinen zu schützen.

Tabelle 6-2 Nicht abschliessende Übersicht über Netzwerke für Wetter-, Hydrologie- und Bodenbeobachtung und Informationsdienste auf nationaler, kantonaler, Forschungsinstituts- und privater Ebene

Ebene	Behörde	Bezeichnung - Zweck	Referenz
National	MeteoSchweiz	<b>Trockenheitsindikatoren</b> - Verschiedene Indikatoren beschreiben die aktuelle Trockenheit oder Nässe an ausgewählten Stationen des Messnetzes von MeteoSchweiz. Die Indikatoren werden aus meteorologischen Parametern abgeleitet, unter anderem aus dem Niederschlag und der Verdunstung.	Trockenheitsindikatoren-MeteoSchweiz
National	Bundesamt für Umwelt BAFU	<b>Hydrologische Daten</b> - Aktuelle Situation der Abflüsse und Wasserstände sowie der Wassertemperaturen von Schweizer Flüssen, Seen und Grundwasser.	Hydrologische Daten (admin.ch) (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023d)
National	Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Bundesamt für Landestopografie swisstopo	<b>Früherkennungs- und Warnsystem zur Trockenheit</b> - Für die Behörden auf kantonaler und lokaler Ebene sowie für die betroffenen Sektoren wie Landwirtschaft, Wasserkraft, Trinkwasserversorgung, Schifffahrt und Naturschutz wird ein nationales Trockenfrüherkennungs- und Warnsystem entwickelt.	vorgesehen für 2025 (Der Bundesrat, 2022)
Kanton	Aargau	<b>Hydrometrie</b> - Aktuelle Daten und Grafiken für Oberflächenwasser, Grundwasser und Niederschlag für lokale Messstationen. Das ursprüngliche Ziel war wahrscheinlich ein Überwachungssystem für Hochwasserstände.	Hydrometrie - Aktuelle Messdaten (Kanton Aargau, Fachbereich Hydrometrie, 2023)
Kanton	Bern	<b>Geoportal Kanton Bern</b> - Karte des Kantons Bern mit einer Auswahl an Themen wie die Grundwasserkarte und Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern	Geoportal Kanton Bern (Kanton Bern, 2023)
Kanton	Freiburg	<b>Meldesystem des Kantons Freiburg für Wasserabfluss und Niederschlag</b> - Karte und Übersicht der Abfluss- und Niederschlagsmessungen und Prognosen mit Alarmsymbolen	fribourg.swissrivers.ch/hydroromap (Kanton Freiburg, 2023)

Tabelle 6-2 Fortsetzung

Ebene	Behörde	Bezeichnung - Zweck	Referenz
Kanton	Solothurn	<b>Hydrometrie</b> - Aktuelle Daten und Grafiken für Oberflächenwasser, Grundwasser und Niederschlag für lokale Messstationen.	Kanton Solothurn - hydrometrie (Kanton Solothurn, 2023)
Kanton	Schaffhausen und Thurgau	<b>Das Wasserportal Thurgau – Schaffhausen</b> - Aktuelle Daten und Grafiken für Oberflächenwasser, Grundwasser, Wetter und Boden für lokale Messstationen.	hydrodaten.tg.ch - Wasserstand (Kantone Schaffhausen und Thurgau, 2023)
Kanton	Waadt	<b>Veille Hydro-météorologique du Canton de Vaud</b> - Aktuelle Daten und Grafiken für Abfluss, Wasserstand, Temperatur, Grundwasser und Niederschlag für lokale Messstationen. Gegebenenfalls wird ein Indikator für einen niedrigen Wasserstand angegeben.	Veille Hydrologique (vhv.ch) (Canton de Vaud, Direction générale de l'environnement, 2023)
Kanton	Zürich	<b>Abfluss &amp; Wasserstand</b> - Aktuelle Daten und Grafiken für Abfluss, Wasserstand und Grundwasser für lokale Messstationen. Das ursprüngliche Ziel war wahrscheinlich ein Überwachungssystem für Hochwasserstände.	Abfluss & Wasserstand   Kanton Zürich (zh.ch) (Kanton Zürich, 2023)
Kanton	Ostschweiz (NW, SZ, SG, TG, UR, ZH, aktueller Stand)	<b>OSTboden</b> - Die Bodenfeuchtigkeit wird im Netz als Entscheidungshilfe zur Vermeidung von Bodenverdichtungen bei der Feldarbeit mit Maschinen gemessen.	bodenfeuchte-ostschweiz.ch (Kantone der Ostschweiz und das Fürstentum Liechtenstein sowie Nidwalden, Schwyz und Uri, 2011)
Kanton	Nordwestschweiz (AG, BE, BL, FR, GE, GL, GR, SO, VD, ZG, aktueller Stand)	<b>Bodenmessnetz</b> - Die Bodenfeuchtigkeit wird im Netz als Entscheidungshilfe zur Vermeidung von Bodenverdichtungen bei der Feldarbeit mit Maschinen gemessen.	bodenmessnetz.ch (Kantone Solothurn, Aargau und Basel-Landschaft, 2011)
Institut	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee and Landschaft (WSL)	<b>drought.ch</b> - Informationen über aktuelle und bevorstehende Trockenheit, resp. Wasserressourcendefizit werden bereitgestellt (als nicht offizielle Warnungen). [Atmosphäre und Boden]	drought.ch - WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee and Landschaft (WSL), 2013)
Institut	ETHZürich, Agroscope, MeteoSchweiz, WSL	<b>Swiss Soil Moisture EXperiment (SwissSMEX)</b> - Ziel des Forschungsprojekts war der Aufbau eines Bodenfeuchtemessnetzes in der Schweiz und die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Klima anhand der gesammelten Daten. Aktueller Stand: Saisonale Entwicklung der gemittelten Bodenfeuchteanomalien an den SwissSMEX-Grünlandstationen.	SwissSMEX (ETHZürich, Institute for Atmospheric and Climate Science, 2008; Mittelbach & Seneviratne, 2012)
Institut	Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL)	<b>bewaesserungsnetz.ch</b> - Kontinuierliche, teilflächenspezifische Messung von Bodenwassergehalt, Saugspannung und Niederschlag zur Optimierung von Bewässerungsstrategien durch gezielte Anpassung an den Wasserbedarf der Pflanzen.	bewaesserungsnetz.ch (Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), 2023)
Privat	Schweizer Hagel	<b>SWISS AGRO INDEX</b> - Für die wichtigsten Schweizer Ackerkulturen zeigen Karten die tägliche Wasserbilanz während der kulturspezifischen Vegetationsperiode mit Angabe der kritischen Wachstumsphasen (für Kunden). Die Wasserbilanz ist die kumulierte Differenz der täglichen Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten. Erhält der Ackerbau in der kritischen Wachstumsphase zu wenig Niederschlag, sind Dürreschäden möglich.	Schweizer Hagel - SWISS AGRO INDEX (Schweizer Hagel, 2023)

Heutzutage können Bodenfeuchte- und Wasserpotenzialsensoren neben einer atmosphärischen Wasserbilanz (Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration, siehe 5.5) in Entscheidungshilfen für die Bewässerung eingesetzt werden.

Mit einem gemeinsamen Auftrag an die Bundesämter für Umwelt (BAFU), Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) und Topografie (swisstopo) soll bis 2025 ein nationales Dürreerkennungs- und Frühwarnsystem

aufgebaut werden (Der Bundesrat, 2022). Im Hinblick auf die so genannte "landwirtschaftliche Trockenheit", d.h. ein Wasserdefizit, das Stressreaktionen der Pflanzen hervorruft, wird in den Jahren 2024-2025 ein Netz von Bodensensoren zur Messung von Feuchtigkeit, Bodenwasserpotenzial und Temperatur an rund 30 der bestehenden Messstationen von MeteoSchweiz (SwissMetNet, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2023a)) aufgebaut, das die Sensorknoten des Netzwerks "drought.ch" ergänzt und teilweise ersetzt (Tabelle 6-2). Die Bodeneigenschaften am Standort - wichtig für die Interpretation von Bodenfeuchte- und Potenzialdaten im Hinblick auf die Wasserverfügbarkeit für Pflanzenwurzeln - werden vom Kompetenzzentrum Boden (Kompetenzzentrum Boden, 2023) ermittelt. Die erwartete Auflösung der Indikatoren für die Landwirtschaft wird bei etwa 2 km liegen (MeteoSchweiz und BAFU, persönliche Mitteilung, 12-15.06.2023). Zusätzlich werden Satellitendaten zur Überwachung des Wasserstress von Pflanzen verwendet, darunter Beobachtungen der Oberflächentemperatur von meteorologischen Satelliten (stündliche Auflösung, räumliche Auflösung bis zu 2,5 km) und, in Zusammenarbeit mit swisstopo, Sentinel-2-Daten zur Überwachung der Vegetation (Beobachtung alle 5 Tage, Auflösung bis zu 10 m). Eine Weiterentwicklung im Sinne von Wasserstressindikatoren für spezifische Kulturen, z.B. Weizen, Mais, Soja, Zuckerrüben, kann in zukünftigen Entwicklungen (später als 2025) ins Auge gefasst werden. Ein Vorhersage-Informationssystem für hydrologische Trockenheit, mit dem das Auftreten von Niedrigwasser mit Auswirkungen auf die Bewässerung vorhergesagt werden könnte, ist ebenfalls vorgesehen, aber insbesondere bei langfristigen Vorhersagen mit Unsicherheiten behaftet (MeteoSchweiz und BAFU, persönliche Mitteilung, 12-15.06.2023).

## 6.4 Rechtliche Aspekte und Konflikte bei der landwirtschaftlichen Wassernutzung

Das Gewässerschutzgesetz (GSchG, 1991, Stand 1. Februar 2023) mit Art. 76 der Schweizerischen Bundesverfassung, legt den rechtlichen Rahmen der Wassernutzungen fest, wobei die Kantone für den Vollzug zuständig sind. Zu den wichtigsten Aspekten in Bezug auf die Bewässerung gehören: 1) die Bewilligungspflicht für Wasserentnahmen, die über den Gemeingebrauch hinausgehen (d.h. Kleinmengen), aus einem Gewässer mit regelmässigem Abfluss und aus Seen oder Grundwasservorkommen, die den Abfluss solcher Gewässer wesentlich beeinflussen (Art. 29-36 GSchG), und 2) das Verbot der langfristigen Wasserentnahme aus Grundwasservorkommen über das in den Speicher einfließende Wasser hinaus (Art. 43 GSchG). Die kantonalen Behörden müssen die minimalen Restwassermengen für die Fliessgewässer anhand des Kriteriums Q347 festlegen, das die Abflussmenge beschreibt, die an 347 Tagen pro Jahr, gemittelt über 10 Jahre, erreicht oder überschritten wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass insgesamt nicht mehr als 20 % des Abflusses Q347 und nicht mehr als 1000 Liter pro Sekunde aus einem Gewässer entnommen werden dürfen. Bei Seen dürfen die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung und insbesondere im Uferbereich die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen im Gewässer durch Wasserentnahmen nicht nachteilig verändert werden (Anhang 2, Ziff. 13 GSchG).

Das Gesetz legt auch fest, in welchen Fällen die Kantone die minimale Restwassermenge tiefer als die Q347 ansetzen können, zum Beispiel in Krisensituationen für temporäre Bewässerungsmassnahmen, und in welchen Fällen die Kantone eine Erhöhung der minimalen Restwassermenge beschliessen können. Dies ist gerechtfertigt, um die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers zu verbessern, es als wichtiges qualitatives Landschaftselement zu erhalten, die Anforderungen an die Wasserqualität langfristig zu sichern, ein ausgewogenes Grundwasserregime zu erhalten und schliesslich die landwirtschaftliche Bewässerung zu gewährleisten. Die kantonalen Behörden sind daher für die Bewirtschaftung der Gewässer zuständig, auch in Konfliktsituationen. Temporäre Entnahmerechte werden häufig von den Gemeinden erteilt, wobei die Zustimmung der zuständigen Stellen vor Ort, wie z. B. der Fischereiaufsicht, eingeholt werden muss (Lanz, Klaus et al., 2020). Neben dem Wasserstand wird bei Entscheidungen über Entnahmebeschränkungen und -verbote zunehmend auch die Wassertemperatur berücksichtigt (Linder, 2021; Tratschin et al., 2023).

In einer Umfrage zum Umgang mit der Dürre 2022, die im Auftrag des Bundesamts für Umwelt bei den zuständigen kantonalen Stellen im Herbst 2022 durchgeführt wurde, äusserten sich die Kantone zu ihren eigenen langfristigen, übergreifenden Instrumenten für den Umgang mit der Dürre (Tratschin et al., 2023) (Tabelle 6-3, die verschiedenen in Tabelle 6-3 erwähnten Instrumente sind in Box 6-1 beschrieben). Ausführlichere Informationen sowie Kommentare

zu alternativen strategischen oder planerischen Instrumenten aus den Kantonen finden sich in Tratschin et al. (Tratschin et al., 2023). Nur zwei der acht wichtigsten Bewässerungskantone (Abbildung 6-2) haben ein Wasserstrategiepapier entwickelt, während die anderen daran arbeiten oder es in Planung haben. Beim regionalen integrierten Wasserwirtschaftsplan ist unklar, ob er von den Kantonen als kantonsübergreifend betrachtet wird oder nicht. Die regionale Wasserversorgungsplanung ist kantonsübergreifend weiter fortgeschritten, wahrscheinlich weil sie sich mit der Trinkwasserversorgung befasst. Für die wichtigsten Bewässerungskantone ist eine regionale Wasserressourcenplanung für die landwirtschaftliche Nutzung in Arbeit oder geplant. In Genf hat dies die Form einer "Plattform für die Entwicklung und Anpassung der Wassernutzung in der Landwirtschaft", in der die kantonalen Ämter für Wasser, Landwirtschaft und Natur sowie Umwelt die Anpassungsmassnahmen und -projekte koordinieren. Dabei wird die Verfügbarkeit der Ressourcen berücksichtigt und in Absprache mit Vertretern des Agrarsektors eine Strategie festgelegt (Jean-Marc Sermet, Etat de Genève, Office cantonal de l'agriculture et de la nature, persönliche Mitteilung, 28.09.2023).

In der Antwort des Bundesrates auf das Postulat "18.3610 Rieder - Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement. Grundlagenbericht, 15. Juni 2018" wird schliesslich vorgeschlagen, die Kantone durch eine Änderung des Gewässerschutzgesetzes anzuweisen, umfassende Erhebungen der Wasserressourcen zu erstellen, um die Kenntnisse über den Wasserbedarf zu verbessern und eine bedarfsgerechte Raumplanung sicherzustellen (Conseil fédéral, 2022).

Die Kantone regeln die Wasserentnahme auch in Bezug auf Konzessionen und Bewässerungsbewilligungen unterschiedlich. Im Kanton Bern sind Konzessionen für die regelmässige Entnahme von Wasser aus Oberflächengewässern und Grundwasser erforderlich, insbesondere wenn es um die Bewässerung von Gemüse und Obst geht. Die zuständige Behörde ist das Amt für Wasser und Abfall. Für andere Kulturen hingegen, bei denen die Bewässerung aufgrund von Trockenheit erfolgt und die Entnahme möglicherweise nur vorübergehend ist, ist für die Wasserentnahme eine Bewilligung erforderlich, die von den Gemeinden erteilt wird (Stucki, 2018). Entnahmebeschränkungen müssen über das Geoportal des Kantons überprüft werden (Tabelle 6-2; Kanton Bern (2023)).

Tabelle 6-3 Übersicht über die langfristigen, übergreifenden strategischen und planerischen Instrumente in den Kantonen zum Umgang mit Trockenheit. Adaptiert aus Tratschin et al. (2023)

Kantone	Wasserstrategie	Regionale Wasserressourcenbewirtschaftung (integral)	Regionale Wasserversorgungsplanungen (öWV)	Regionale Brauchwasserplanung (Landwirtschaft)
<b>Aargau</b>		–		
Appenzell A. Rh.	–	–	–	–
Appenzell I. Rh.	–	–	–	–
Basel-Landschaft		–		–
Basel-Stadt			nv	–
<b>Bern</b>				
<b>Freiburg</b>		nv		nv
Genf				
Glarus	nv	nv	nv	nv
<b>Graubünden</b>	–		–	–
Jura				–
Luzern		–		
Neuenburg				–
Nidwalden	nv	nv	nv	nv
Obwalden	–	–	–	–
Schaffhausen				
Schwyz	–			
Solothurn				
St. Gallen	–	–		–
<b>Thurgau</b>		–		
Tessin				–
Uri	–	–		–
<b>Wallis</b>				
<b>Waadt</b>				
Zug		–		–
<b>Zürich</b>				

Wo die Kantone keine Angaben gemacht haben, sind die Angaben aus der Umfrage zur Trockenheit 2018 aufgeführt (Tratschin et al., 2023). Schwarz: vorhanden; Dunkelgrau: in Erarbeitung; Hellgrau: geplant; Strich: nicht geplant; nv: Daten nicht vorhanden. Die fettgedruckten Kantone repräsentieren zusammen 80 % der bewässerten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz.

Box 6-1 Mögliche Instrumente zur Bewältigung der Dürre durch die Kantonsregierungen, wie sie von Tratschin et al. (2023) beschrieben werden

**WASSERSTRATEGIE:** Eine Wasserstrategie basiert auf der Vision einer integralen Wasserbewirtschaftung und gleicht im Idealfall die unterschiedlichen Interessen bezüglich Wassernutzung und Gewässerschutz in einer umfassenden Sichtweise aus. Die Ausgestaltung einer solchen Strategie kann sich von Kanton zu Kanton unterscheiden.

**REGIONALE WASSERRESSOURCENBEWIRTSCHAFTUNG (integral):** Die regionale Wasserressourcenplanung verfolgt das Ziel, eine integrale Bewirtschaftung der Wasserressourcen zu etablieren und ein langfristiges Gleichgewicht zwischen dem Wasserbedarf von Menschen und Natur und den verfügbaren Wasserressourcen sicherzustellen. So können Probleme frühzeitig erkannt und Wassermengenkonflikte vermieden oder gelöst werden. Im Vergleich zur oben beschriebenen Wasserstrategie sind diese Planungs- und Bewirtschaftungsinstrumente spezifischer und beziehen sich auf eine regionale Ebene. Im Mittelpunkt stehen Fragen der Wassermenge und des Wasserdargebots, die ganzheitlich über alle relevanten Nutzungen hinweg betrachtet werden.

**REGIONALE WASSERVERSORGUNGSPLANUNGEN (öWV):** Die regionale Wasserversorgungsplanung für die öffentliche Wasserversorgung stützt sich auf Art. 46 GSchV und hat zum Ziel, die genutzten und geplanten Grundwasserressourcen zu erfassen und die Wasserentnahmen so zu koordinieren, dass keine übermässigen Entnahmen erfolgen und die Grundwasserressourcen wirtschaftlich genutzt werden.

**REGIONALE BRAUCHWASSERPLANUNG (Landwirtschaft):** Die regionale Brauchwasserplanung für die Landwirtschaft zielt darauf ab, Wasserangebot und -nachfrage für die Bewässerung aufeinander abzustimmen, die Wasserverteilung (Wasserspeicher, Leitungsnetz) sowie die Genehmigungs- und Konzessionspraxis für die landwirtschaftliche Bewässerung zu klären und so Konflikte innerhalb der Landwirtschaft und zwischen Bewässerung und Wasserschutz und/oder anderen Wassernutzungen zu vermeiden. Die Planung von Brauchwasser kann auch breiter angelegt sein und neben der landwirtschaftlichen Bewässerung auch andere nicht trinkbare Wassernutzungen umfassen.

Im Kanton Freiburg bedarf jede Wasserentnahme aus einem Fliessgewässer mit ständiger Abflussmenge einer Bewilligung, die bei der Abteilung Umwelt des Kantons, Sektion Seen und Fliessgewässer, beantragt werden muss. Dies gilt auch für Seen und Grundwasser, die die Abflussmenge eines Gewässers wesentlich beeinflussen. Bei bestehenden Konzessionen oder Wasserrechten muss eine Mindestabflussmenge eingehalten werden, und der Kanton muss sie entweder wiederherstellen oder eine Entschädigung zahlen, wenn das Entnahmerecht eingeschränkt werden muss. Darüber hinaus verbietet Freiburg die Bewässerung von Getreide und Grünland, wenn das Wasser nicht aus dem wichtigsten Fluss (Sarine), Kanal (Broye-Kanal) oder den grossen Seen (Neuchâtel, Mürten, Schiffenen und Gruyère) entnommen werden kann und wenn der Bewilligungsempfänger über feste Entnahmeeinrichtungen verfügt (Steiert, 2018). Die langfristige Entnahme von Oberflächen- oder Grundwasser für die Trinkwasserversorgung mittels ortsfester Anlagen ist konzessionspflichtig; dies kann auch eine Umleitung in ein Bewässerungsnetz beinhalten (Etat de Fribourg, 2023). Die Beschränkungen werden über die Website der zuständigen Behörde (Domaine de l'eau, 2023) bekannt gegeben und gegebenenfalls mit den Kantonen Waadt, Bern und Neuenburg koordiniert.

In der Waadt können der Direktor der Abteilung Natürliche Ressourcen und Kulturerbe oder der Leiter der Abteilung Wasser über Pumpverbote in Flüssen zu landwirtschaftlichen Zwecken entscheiden. Sie informieren die kantonale interdisziplinäre Kommission (Commission de Gestion des Ressources en Eau) und den Regierungsrat über ihren Entscheid. Bei den transkantonalen Fliessgewässern werden die Entscheide gemeinsam mit den Kantonen Genf und Freiburg getroffen. Die Inhaber von Entnahmebewilligungen sind verpflichtet, sich über Verbote zu informieren (Richtlinie "Interdiction de pompage en rivière à but agricole en cas de sécheresse"). Sie können dies auf einer speziellen Website tun, von der ein Dokument heruntergeladen werden kann (Direction générale de l'environnement & Division Ressources en Eau et économie hydraulique (DGE-EAU), 2023).

Der Vorrang für die öffentliche Wasserversorgung (Trinkwasser) und das Verbot des Abpumpens in Schutzzonen sind die wichtigsten Einschränkungen für die Grundwassernutzung zur Bewässerung. Eine Karte mit den Grundwasserschutzzonen an den Trinkwasserentnahmestellen findet sich in Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung

11.2-7; Bundesamt für Umwelt BAFU (2004, 2023b). Die Schutzzonen im Mittelland sind zahlreich. Sowohl für die Oberflächengewässer als auch für das Grundwasser bestehen Überwachungsnetze, die Abflussmengen, Wasserstände und Wassertemperaturen messen (siehe 6.3), damit die Behörden die Restwassermengen erhalten können. Diese sind wichtig für den Schutz der Wasserqualität und der ökologischen Leistungen sowie für die Wiederauffüllung der Grundwasserressourcen und der grundwasserabhängigen Ökosysteme (Hoch- und Flachmoore, Quellgebiete, Auen). Oberflächengewässer sind wichtige Lebensräume für Fauna und Flora; freie Fischwanderung, Laichplätze und Lebensräume für Jungfische werden in diesem Zusammenhang oft genannt, und im Mittelland, im Wallis und im Tessin ist 2022 ein Fisch- und Flusskrebsterben aufgetreten (Tratschin et al., 2023). Die Wasserqualität hängt mit einer möglicherweise unzureichenden Verdünnung des eingeleiteten Abwassers sowie mit dem Abfluss und dem Drainagewasser von landwirtschaftlichen Flächen zusammen.

In einer vom Bundesamt für Umwelt in Auftrag gegebenen Umfrage nach der Sommertrockenheit 2022 wurden die Kantone nach Veränderungen bei der Erteilung von Nutzungsrechten für die Grundwasserentnahme zur Bewässerung seit der Trockenheit von 2018 befragt (Tratschin et al., 2023). Fünf Kantone (Aargau, Genf, St. Gallen, Waadt, Zürich) gewährten zusätzliche Rechte, und vier Kantone (Bern, Luzern, Neuenburg, Tessin) stellten keine Änderung ihrer bestehenden Nutzungsrechte (Anzahl oder Mengen) fest. Acht weitere Kantone (Appenzell A. Rh., Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Jura, Obwalden, Schaffhausen, Uri, Zug) erlauben keine Grundwassernutzung zur Bewässerung und der Kanton Solothurn erteilt nur befristete Bewilligungen (Abbildung 6-11).

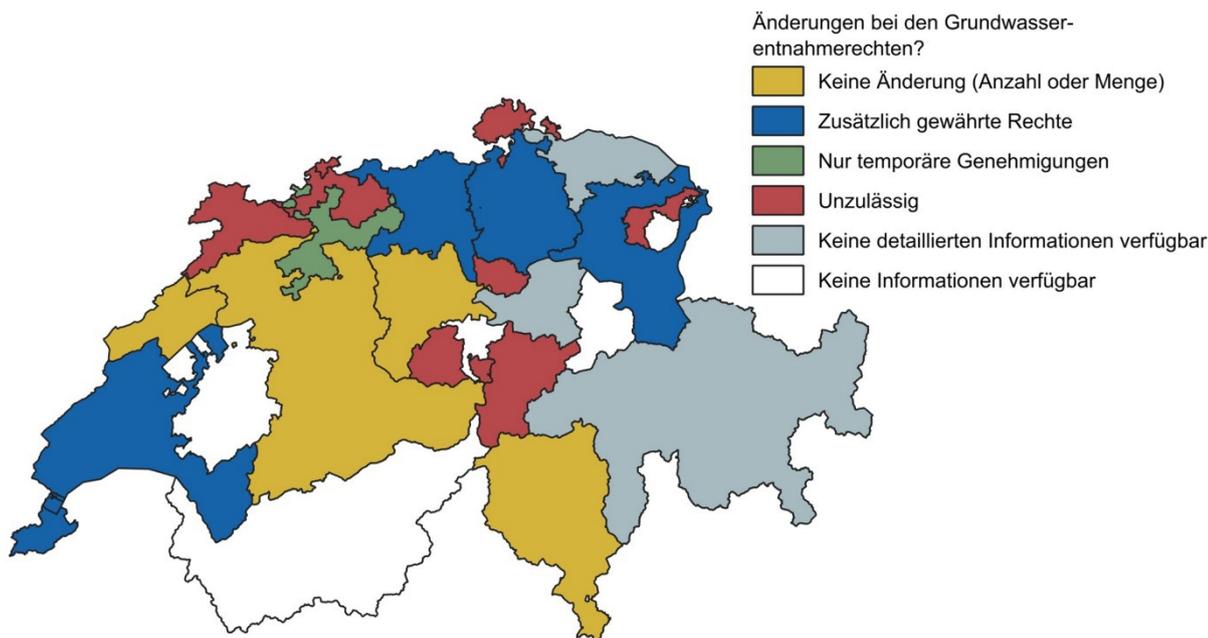


Abbildung 6-11 Änderungen der bestehenden Grundwasserentnahmerechte seit der Dürre 2018. Datenquelle: Tratschin et al. (2023). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

Die Entwicklung der Einschränkungen der Oberflächenwasserentnahme seit den Dürreereignissen von 2015, 2018 und 2022 ist in Abbildung 6-12 dargestellt. 2015 war nur das West- und Zentralmittelland betroffen, während 2022 nur fünf Kantone in der ganzen Schweiz ohne Einschränkungen blieben. Für das Wallis waren im Jahr 2022 keine Informationen verfügbar.

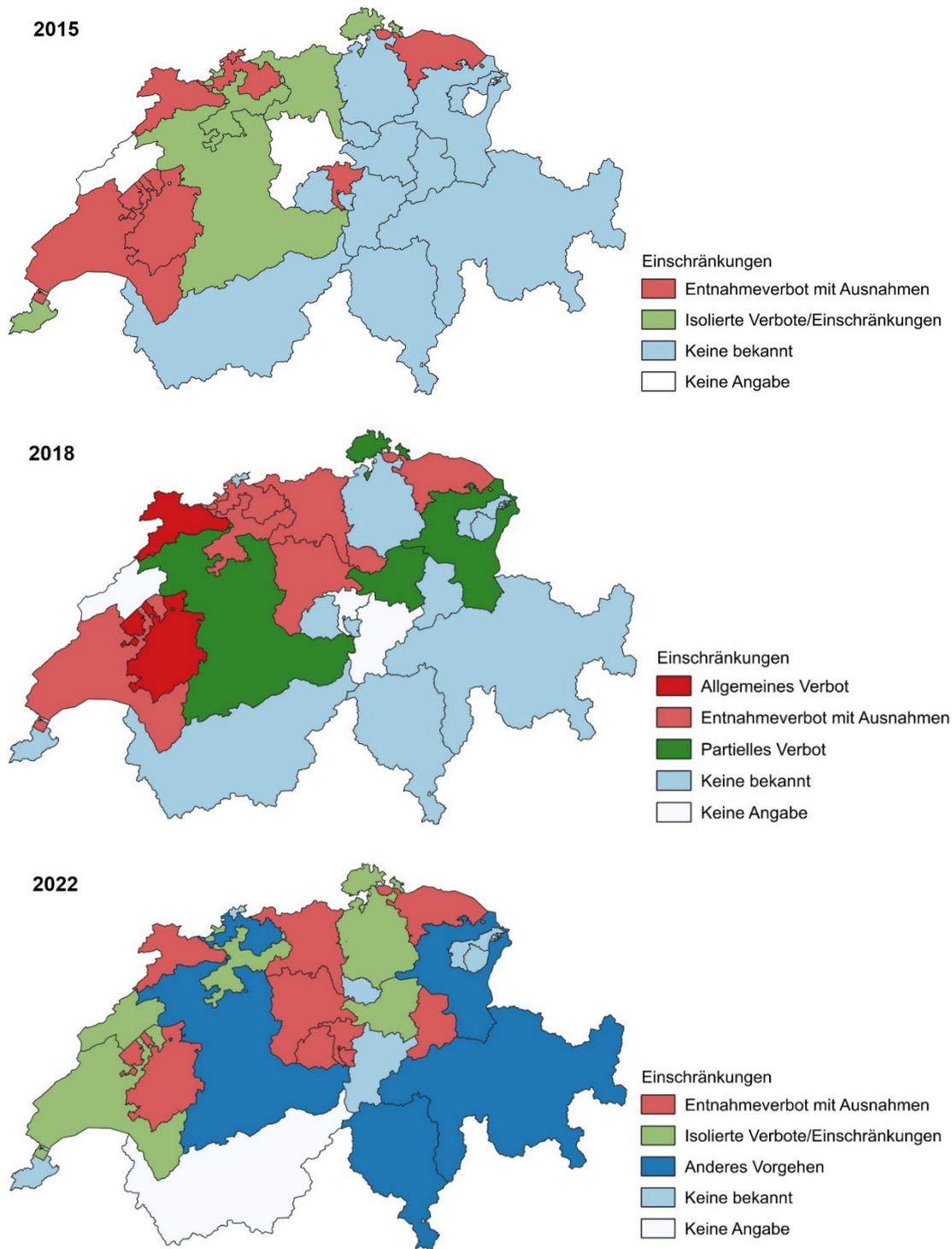


Abbildung 6-12 Einschränkungen oder Verbote der Oberflächenwasserentnahme für die Bewässerung während der Dürreereignisse von 2015 (oben), 2018 (Mitte) und 2022 (unten). Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU et al. (Hrsg.) (2019); Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2016); Tratschin et al. (2023). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

## 6.5 Erwartete Veränderungen der Wasserverfügbarkeit für die Bewässerung in der nahen Zukunft

### 6.5.1 Wasserbedarf und -verfügbarkeit

Mit Beiträgen von Thomas Toschini und Pierluigi Calanca, Agrarökologie und Umwelt, Klima und Landwirtschaft, Agroscope, Zürich

Gemäss der Prognose auf Basis der Schweizer Klimaszenarien (National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.), 2018) ist bis 2035 eine Abnahme der atmosphärischen Wasserbilanz, d.h. Niederschlag minus Verdunstung, von durchschnittlich 0,2 bis 0,3 mm pro Tag mit einer unteren Abschätzung auf -0,6 mm pro Tag zu erwarten (Abbildung 6-13). Für eine Vegetationsperiode, die am 1. Mai beginnt und bis zum 31. Oktober dauert, entspricht dies etwa 20 mm für die Nordostschweiz und 26 mm für die Westschweiz. Der damit einhergehende Anstieg des Wasserbedarfs führt zu einer Zunahme des Bewässerungsbedarfs in der gleichen Grössenordnung.

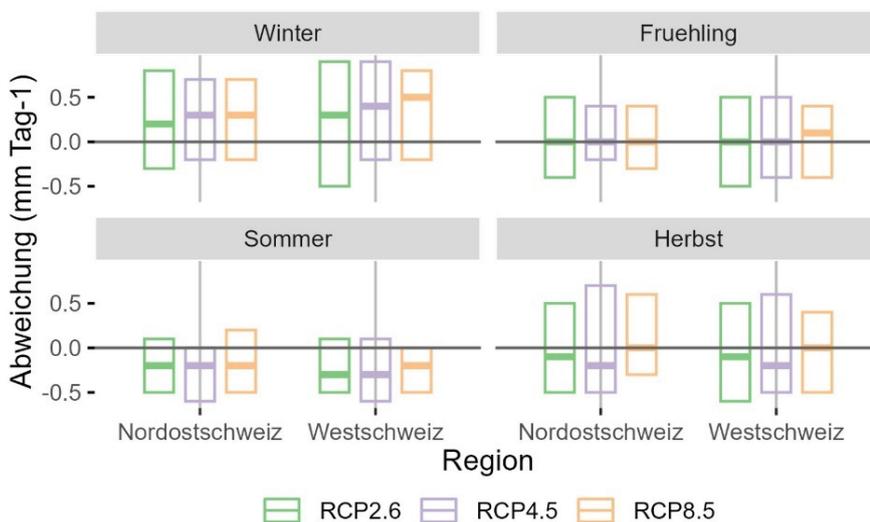


Abbildung 6-13 Saisonale Veränderungen des Indikators Niederschlag minus Verdunstung bis 2035 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 für das Schweizer Mittelland, aufgeteilt in zwei Regionen (Nordost- und Westschweiz). Mittlere, obere und untere Schätzungen für drei Emissionsszenarien mit (RCP 2.6), mit moderatem (RCP4.5) und ohne Klimamassnahmen (RCP8.5). Quelle: National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.) (2018).

Demgegenüber steht eine Abnahme der Wasserverfügbarkeit für Bewässerung. Mit Blick auf mögliche Wasserentnahmen aus Oberflächengewässer fällt vor allem die erwartete Abnahme der Sommerabflüsse ins Gewicht (Abbildung 6-14), die zum einen auf die veränderte Saisonalität des Niederschlags, zum anderen auf die Annahme der Wasservorräte im Winterhalbjahr zurückzuführen ist. Für das Emissionsszenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) gehen die Experten von einer Abnahme der Abflüsse um -5 bis -20 % im weiten Teilen des Mittellandes, und sogar -20 bis -40 % in den zentralen Landesteilen und in den Alpen. Für die Situation bis 2035 werden keine Prognosen abgegeben (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2021). Für das Emissionsszenario mit Klimaschutz (RCP2.6) können die Abschätzungen für das Jahr 2060 jedoch auch als repräsentativ für das Jahr 2035 angesehen werden, da unter der Annahme wirksamer Klimaschutzmassnahmen eine Stabilisierung des Klimas ab etwa 2040 zu erwarten ist.

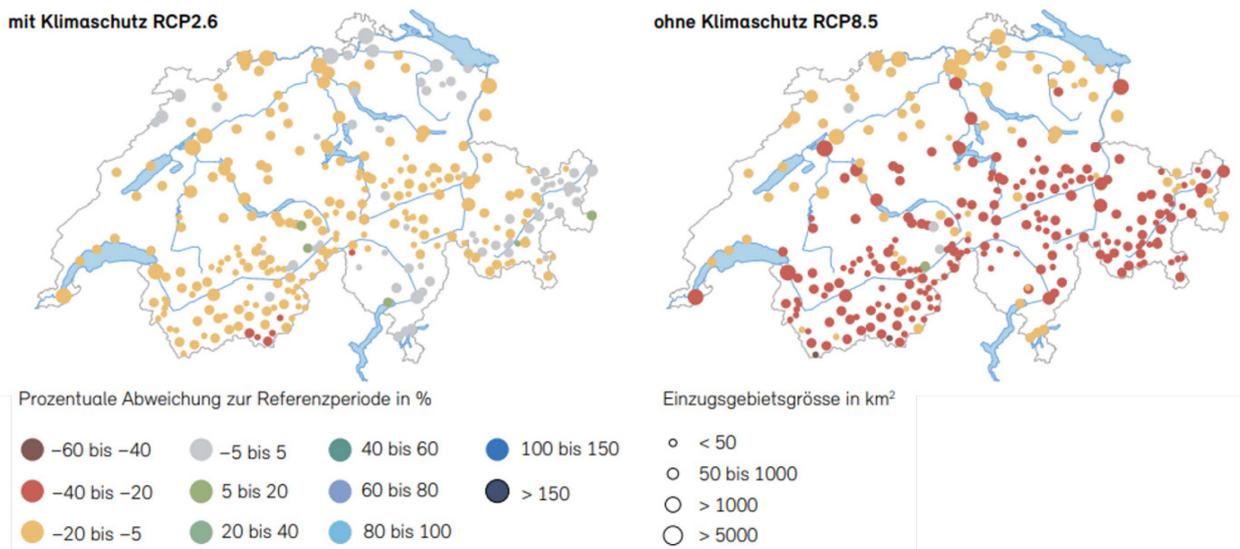
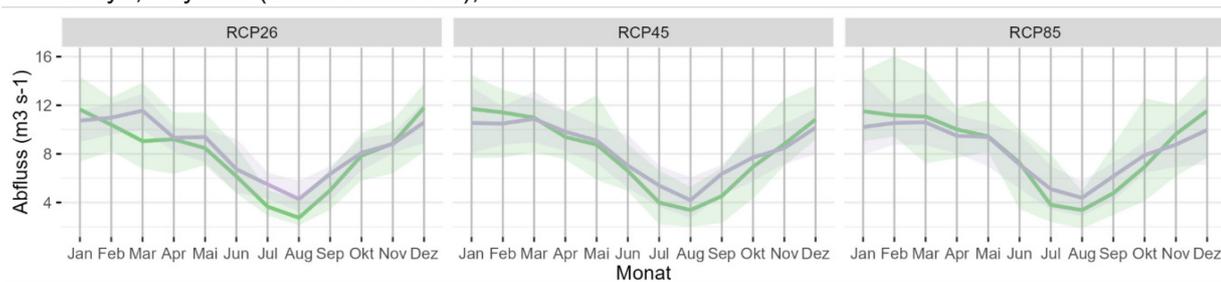


Abbildung 6-14 Prozentuale Veränderung des regionalen Abflusses im Sommer bis 2060 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010. Die Ergebnisse sind für ein Emissionsszenario mit (links) und ohne Klimaschutz (rechts) dargestellt. Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2021).

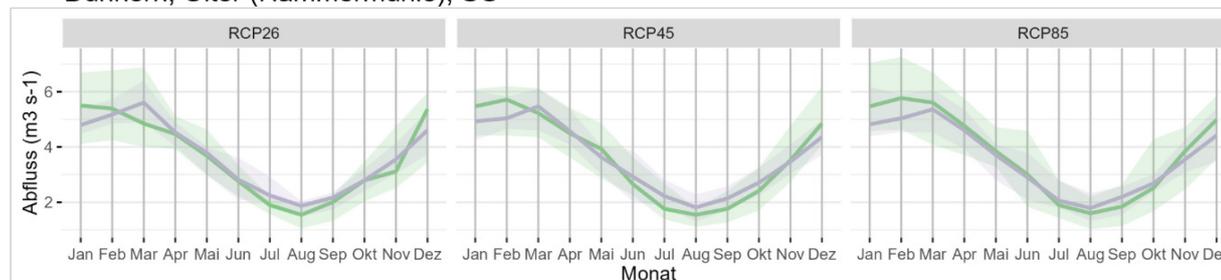
Ein genauere Blick auf die Prognosen für das Jahr 2035 (2020-2049) für drei verschiedene Flüsse im Schweizer Mittelland zeigt eine Tendenz zu geringeren Abflussmengen in den Sommermonaten (Abbildung 6-15). Die Bandbreite der Daten zwischen den geschätzten minimalen und maximalen Abflüssen lässt für keines der Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP 4.5, RCP8.5) eindeutige Schlussfolgerungen für das Jahr 2035 zu. Andererseits haben die Trockenjahre der letzten Zeit einen deutlichen Einfluss auf den Abfluss der Flüsse, unabhängig von der Abflusshöhe (Abbildung 6-7).

Der bereits erwähnte Niedrigwasserindikator Q347 stellt keine stabile Referenz dar, da er auf dem Abfluss basiert, der an 347 Tagen pro Jahr, gemittelt über 10 Jahre, erreicht oder überschritten wird (Abbildung 6-16) (Aschwanden & Kan, 1999). Es ist sehr wahrscheinlich, dass in den kommenden zehn Jahren an 9 oder mehr Tagen niedrigere Abflüsse auftreten werden, was den Wert des Indikators verringern wird. Für die Flüsse in der Zentralachse und im äusseren Mittelland wurde für den Zeitraum 2045-2074 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 und für das Emissionsszenario RCP8.5 eine Veränderung von Q347 von -10 bis 10 % bzw. -10 bis -30 % geschätzt. Dies entspricht einem zusätzlichen Tag Flusswasserknappheit pro Jahr bis 2060 für den grössten Teil des Mittellandes. Der Zeitraum um das Jahr 2035 wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt, da nur eine geringe Veränderung erwartet wurde (Linder, 2021). Eine Überarbeitung von Q347 als Niedrigwasserindikator könnte in Zukunft geeignet sein (Lanz, Klaus et al., 2020).

Broye, Payerne (Luftfahrtkaserne), VD



Dünern, Olter (Hammermühle), SO



Thur, Andelfingen, ZH

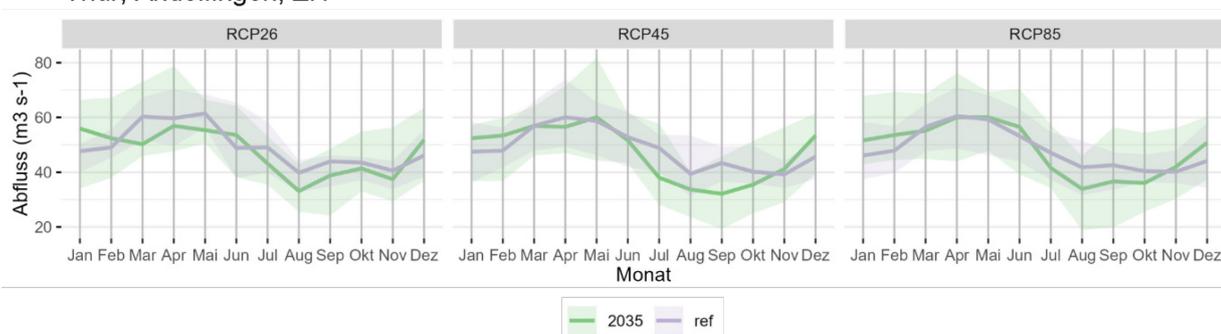


Abbildung 6-15 Veränderungen des mittleren monatlichen Abflusses für drei Flüsse im Schweizer Mittelland unter dem Einfluss des Klimawandels für die drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 und für die zukünftige Zeitperiode 2035 (2020-2049). Die farbigen Flächen um den mittleren Abfluss stellen den minimalen und maximalen monatlichen Abfluss dar. VD, Waadt; SO, Solothurn; ZH, Zürich. Datenquelle: National Centre for Climate Services NCCS (2023).

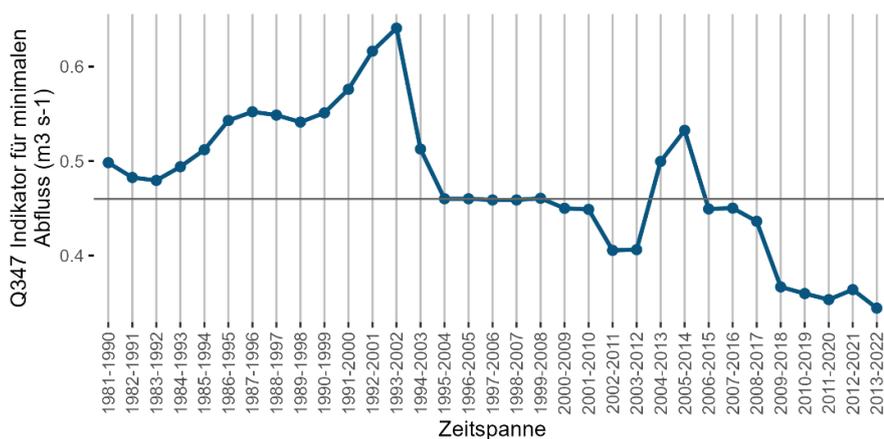


Abbildung 6-16 Entwicklung des Niedrigwasserindikators Q347, berechnet für 10-Jahres-Perioden zwischen 1981 und 2022 für die Flussmessstation Bünz in Othmarsingen (Aargau). Die horizontale Linie stellt einen langfristigen (1977-2022) Q347-Wert von 0,46 m³ pro Sekunde dar. Datenquelle: Kanton Aargau, Fachbereich Hydrometrie (2023).

Wie bereits erwähnt, ist das Grundwasser bereits heute eine wichtige Quelle für die Bewässerung, die jedoch in trockenen Jahren zeitweise unter Defiziten leidet (Abbildung 6-8, Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2021)). Insgesamt wird die Grundwasserneubildung im Winter und Frühling zunehmen und im Sommer und Herbst abnehmen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Grundwasser mit diffuser Anreicherung durch Versickerung von Niederschlägen oder mit stark lokalisierter Infiltration aus Oberflächenwasser. Letzteres kommt entlang der grossen Flusstäler im Mittelland, im Rhonetal und im Oberrheintal vor. Die Grundwasserneubildung folgt den saisonalen Verschiebungen der Flussabflüsse. Für drei Fälle der Grundwasserneubildung durch Niederschlag im Mittelland wurde eine Abschätzung des Grundwasserspiegels für ein Emissionsszenario ohne Emissionsminderung (RCP8.5) und für das Ende des Jahrhunderts vorgenommen (Abbildung 6-17 für mittlere Bodendurchlässigkeit, Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-8 für niedrige, mittlere und hohe Bodendurchlässigkeit; Hunkeler et al. (2021)).

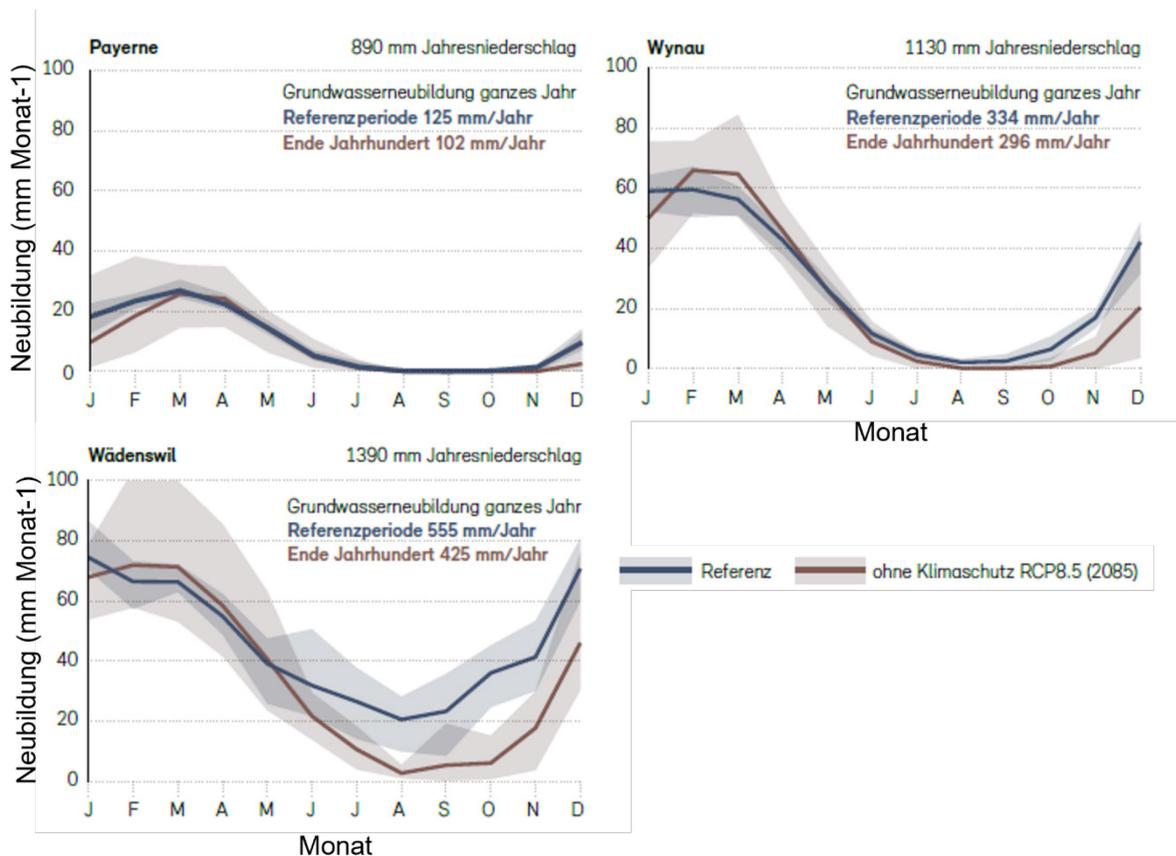


Abbildung 6-17 Simulierte Veränderungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen (Median und Unsicherheitsbereich) an drei Standorten im Schweizer Mittelland mit unterschiedlichen Niederschlagsmengen und für einen Boden mit durchschnittlicher Durchlässigkeit. Das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) ist für die ferne Zukunft (2070-2099) im Vergleich zur Referenzperiode (1981-2010) dargestellt. Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2021); Hunkeler et al. (2021).

Im Fall von Payerne findet die Grundwasserneubildung aufgrund der geringen Niederschläge im Sommer nicht statt. In Wynau und Wädenswil wird sie wegen der geringeren Niederschläge und der höheren Verdunstung im Sommer abnehmen. In beiden Fällen wird die Grundwasserneubildung später im Jahr stattfinden, weil die Vegetationsperiode länger ist und die Bodenwasserreserven nach der Sommertrockenheit mit einer insgesamt negativen Bilanz zunehmend aufgefüllt werden (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2021; Hunkeler et al., 2021). Für die nahe Zukunft kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die Menge der Grundwasserressourcen weitgehend stabil ist, da es in den letzten 20 Jahren keinen negativen Trend bei den Grundwasserständen gab (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2019). Für den Grundwasserleiter Berner See-land wurde ein Grundwassermodell mit dem potenziellen Bewässerungsbedarf unter zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) und für das Ende des Jahrhunderts verglichen: Trotz eines sehr deutlichen Rückgangs der Wasserstände im Sommer und Herbst wäre immer noch genügend Wasser vorhanden, um den Trinkwasserbedarf zu decken (Holzkämper et al., 2020). Dies stünde jedoch im Widerspruch zu Art. 43 des geltenden Gewässerschutzgesetzes (siehe 6.4).

### 6.5.2 Alternative Wasserressourcen

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verringerung der Wasserknappheit für Bewässerungszwecke wird für Regionen mit wenig oder keinem Zugang zu grossen Oberflächenwasserressourcen wie dem Zentral Mittelland erkannt (Brunner et al., 2019; Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021; Ecoplan & Sofies-Emac, 2020; Wehse et al., 2017) und ist durch das Bundesamt für Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung und Strukturverbesserungen förderfähig. Die Wasserspeicher sollen durch Winterniederschläge und in Zeiten hoher Abflüsse aus den Wasserläufen aufgefüllt werden. Sie können klein sein und auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs angelegt werden (offene Retentionsbecken, geschlossene Wasserbehälter) oder die Form einer auf kommunaler oder regionaler Ebene organisierten Wasserspeicherinfrastruktur annehmen. Sie können auch in Form von strukturellen Merkmalen erfolgen, die den Abfluss auffangen und das Wasser lokal sammeln (z. B. Slow Water Projekt; Ebenrain Zentrum für Landwirtschaft, Natur und Ernährung (2023)). Dabei geht es vor allem darum, geeignete Standorte zu finden (landschaftliche Eigenschaften, Akzeptanz, geologische und hydrologische Machbarkeit), die Verdunstung zu minimieren bzw. die erforderliche Kapazität durch Modellierung von Eintrag und Verdunstung zu verifizieren, und mögliche Konflikte mit ökologischen Funktionen des Gewässers oder neu geschaffenen oder wiederbelebten Biotopen (z.B. bei einer Kombination von Wasserrückhalt und Gewässerrevitalisierung) zu bewältigen (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021; Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). Ein zukünftiger Bedarf an zusätzlichen Wasserspeicherkapazitäten wurde auch für die Wasserentnahme aus Seen festgestellt, bei denen die konzessionierten Abflussrechte in extremen Dürreperioden nicht ausreichen, insbesondere da die öffentliche Wasserversorgung Vorrang vor der Bewässerung hat. Dies war bereits der Fall für das "Syndicat d'arrosage de Nyon et environs" (SANE) im Jahr 2022 (Reynald Pasche, SANE, persönliche Mitteilung, 04.07.2023).

Im Rahmen der Phase 2 des "Pilotprogramms zur Anpassung an den Klimawandel" (2019-2023) des National Centre for Climate Services (National Centre for Climate Services NCCS, 2023b) wurde im Kanton Basel-Landschaft das Potenzial für die Errichtung von lokalen Wasserspeichern untersucht (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021). Ein zugehöriges Factsheet gibt einen Überblick über lokale Wasserspeichermöglichkeiten für die Bewässerung, einschliesslich der Ermittlung des Wasserbedarfs (für Kartoffeln neben Obst und Gemüse, auch Zuckerrüben), einer Darstellung der Wasserversorgungsmöglichkeiten und Informationen über den Bau kleinerer und grösserer Speicher sowie Überlegungen zur Planung und zu Kosten und Nutzen (Dübendorfer, Huwiler, Reinecke, et al., 2021; National Centre for Climate Services NCCS, 2022).

Eine weitere Option, die in Betracht gezogen wird, ist die Wiederauffüllung von Grundwasserreservoirs im Winter als Quelle für Bewässerungswasser im Sommer oder die Reaktivierung stillgelegter Grundwasserbrunnen. Diese haben einen unzureichenden Schutz für die Trinkwassernutzung oder eine bereits beeinträchtigte Wasserqualität (z. B. Nitrat-, Chlorthalonil- oder Perchloratverunreinigung) (CSD Ingénieurs SA & acadie sàrl, 2020; Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). Beispiele für beide sind der Aire-Grundwasserleiter und die Saconnex-d'Arve-Quelle im Kanton Genf. Bei der letztgenannten Quelle stellt sich die Frage der Wasserqualität für Bewässerungszwecke. Die Qualitätsanforderungen sind in erster Linie abhängig von der Art der Pflanzen (für den Rohverbrauch bestimmt oder nicht), der Bewässerungsmethode (Pflanzen werden befeuchtet oder nicht) und dem Bewässerungssystem (anfällig für Verunreinigungen oder nicht) (Ecoplan & Sofies-Emac, 2020). Derzeit wird die Verwendung von Wasser, das mit den oben genannten chemischen Verbindungen verunreinigt ist, für nicht empfindliche Kulturen in Betracht gezogen. Effiziente Bewässerungspraktiken, die eine Versickerung vermeiden, und die Einrichtung eines Pufferbereichs für Wasserschutzzonen (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-7) können in Erwägung gezogen werden. Die mikrobielle Verunreinigung steht im Zusammenhang mit Oberflächenwasser und Wasserspeicherung, aber hier gibt es bereits Kriterien für den Gemüse-, Obst- und Kartoffelanbau (Drissner & Neuweiler, 2017; Verein SwissGAP, 2023). Die Übertragung von Pathogenen über Aerosole, die von Beregnungsanlagen erzeugt werden, muss ebenfalls berücksichtigt werden (Zardari et al., 2023). Zu den weiteren physikalisch-chemischen Parametern gehören der Salzgehalt und der relative Anteil von Natrium, der pH-Wert sowie das Vorhandensein von Sedimenten, die Teile der Bewässerungsanlage verstopfen können (CSD Ingénieurs SA & acadie sàrl, 2020).

### 6.5.3 Abwassernutzung auf landwirtschaftlichen Flächen

Die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung wird im Hinblick auf die potenziell grossen verfügbaren Mengen und die zuverlässige und konstante Bereitstellung als positiv angesehen. Andererseits ist die Auswirkung der Wasserqualität auf die Pflanzen, den Boden und die damit verbundene Umwelt

durch Abfluss und Versickerung, die Bewässerungsinfrastruktur sowie die pflanzenverarbeitende Industrie und die Verbraucher immer noch bedenklich (INRAe, 2020; Toze, 2006). Die Abwasserbehandlung muss sich mit Nährstoff- und Natriumkonzentrationen, Schwermetallen, Krankheitserregern, Arzneimitteln und hormonell wirksamen Stoffen befassen. Schliesslich müssen auch die Akzeptanz von Produkten, die mit gereinigtem Abwasser bewässert wurden, durch die Verbraucher und ihre Auswirkungen auf den Marktwert der Pflanzen und der daraus hergestellten Produkte berücksichtigt werden (Toze, 2006).

Richtlinien zur Abwasserbehandlung und -verwendung in der Landwirtschaft wurden 1992 von der FAO publiziert; sie erwähnten damals die Praxis in den eher trockenen Regionen Australiens und der USA, in Ländern des Nahen Ostens (Königreiche Jordanien und Saudi-Arabien) und in China (Pescod, 1992). Nach den US-Richtlinien für die Wiederverwendung von Wasser aus dem Jahr 2012 werden 29 % des aufbereiteten Wassers für die Bewässerung in der Landwirtschaft verwendet, 20 % für die Bewässerung von Landschaften und Golfanlagen, 5 % für die Grundwasseranreicherung und weitere 4 % für die Wiederverwendung in der Umwelt, einschliesslich der Wiederherstellung von natürlichen Systemen, Feuchtgebieten und Lebensräumen für Wildtiere. Behandeltes Abwasser wird nicht für die (indirekte) Trinkwasserversorgung oder die Ergänzung von Oberflächenwasser verwendet (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2012). Die EU-Verordnung 2020/741 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (angenommen im Mai 2020) trat im Juni 2023 in Kraft (EUR-Lex, 2020). Sie zielt darauf ab, harmonisierte Parameter zur Gewährleistung der Sicherheit der Wasserwiederverwendung bei der landwirtschaftlichen Bewässerung bereitzustellen, um diese Praxis zu fördern und dem Wasserdefizit in der Landwirtschaft entgegenzuwirken. Die Verordnung bezieht sich auf aufbereitetes kommunales Abwasser und enthält Mindestanforderungen an die Wasserqualität und die Überwachung sowie Regeln für das Risikomanagement und die Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit. Die Qualitätsanforderungen beziehen sich hauptsächlich auf mikrobiologische Aktivitäten, wobei die Behörden der Mitgliedstaaten zusätzliche Bedingungen festlegen können. Die EU folgt daher anderen Regionen und Ländern in der Welt bei der Verabschiedung von Normen für die Anwendung von gereinigtem Abwasser bei der Bewässerung von Nutzpflanzen, und zwar in erster Linie zum Schutz der öffentlichen Gesundheit und der Wasserressourcen. Spezifische Anforderungen an die Wasserqualität von Pflanzen müssen hingegen von den Endnutzern entwickelt werden (Pescod, 1992; U.S. Environmental Protection Agency et al., 2012).

In Deutschland ist die Wiederverwendung von Abwasser ein ausdrücklicher Bestandteil der Nationalen Wasserstrategie 2050 der Bundesregierung (März 2023) (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV, 2023b) und schliesst die landwirtschaftliche Bewässerung ein. Diese Praxis gibt es bereits in Niedersachsen, wo zwei Kläranlagen in Wolfsburg und Braunschweig gereinigtes Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung (20'000 m<sup>3</sup> pro Tag auf 1'550 ha bzw. 12 Mio. m<sup>3</sup> auf 2'700 ha pro Jahr) und für die Grundwasseranreicherung im Winter als Quelle für Bewässerungswasser bereitstellen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV, 2016). Die italienischen Wasserqualitätsstandards sind streng und mit denen von Trinkwasser vergleichbar. Aufbereitetes Abwasser wird hauptsächlich für die landwirtschaftliche Bewässerung (> 4'000 ha) sowohl im Norden als auch im Süden des Landes verwendet (Ait-Mouheb et al., 2018). In Frankreich wird derzeit eine Aktualisierung des Dekrets über die Bedingungen für die Erzeugung und Verwendung von behandeltem Abwasser für die Bewässerung von Kulturen (2010, 2014) vorgenommen, nachdem die EU-Richtlinien in Kraft getreten sind (Consultations publiques, 2023). Hier wird ein Kompromiss angestrebt zwischen einer strengen Wasserqualität (vor allem in Bezug auf Pathogene) und den damit verbundenen Behandlungskosten sowie Ausnahmeregelungen mit niedrigeren Qualitätsstandards, sofern bei der Verwendung von behandeltem Abwasser Barrieren vorhanden sind. Die Verantwortung und die Kosten liegen dann beim Endverbraucher, der zum Beispiel eine örtlich begrenzte Bewässerung durchführen muss (keine Reservoirs mit stehendem Wasser und kein Kontakt mit essbaren Pflanzenteilen) oder die Produkte vor dem Verkauf an die Verbraucher waschen/desinfizieren muss. Die frühere Änderung von 2014 enthielt Massnahmen zur Begrenzung der mit der Beregnung verbundenen Risiken (Windgeschwindigkeit und Sicherheitsabstand). Weniger als 0,3 % des gesamten für die Bewässerung verwendeten Wassers stammt aus Abwasser. Auf dem französischen Kontinentalgebiet (Clermont-Ferrand) werden 0,9 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr für die Bewässerung von 700 ha Saatmais (hochwertig), Mais, Rote Beete und Weizen verwendet (Ait-Mouheb et al., 2018). Das französische nationale Forschungsinstitut für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt (INRAe) hat eine Versuchsplattform eingerichtet, auf der Weinreben, Obstbäume und eine Ackerkultur sowie

Gemüse in Containern mit behandeltem Abwasser bewässert werden (INRAe, 2020). Untersucht werden die Persistenz von Pathogenen und Schadstoffen sowie die Auswirkungen auf Erträge und Bodeneigenschaften. Zu den Forschungsthemen gehören auch die Folgen für die Dauerhaftigkeit von Bewässerungssystemen und Fragen zur Anpassung der Abwasserbehandlung in Abhängigkeit von der landwirtschaftlichen Nutzung, d.h. für das Vorhandensein von Pflanzennährstoffen.

Obwohl sie nicht als direkte Wiederverwendung gilt, ist die Entnahme von Wasser für Bewässerungszwecke aus einem Fluss, der zu einem relativ grossen Teil von einer Kläranlage gespeist wird, bereits von der Bewässerungsgenossenschaft "Aquapool Genossenschaft Steinmauer" vorgesehen (Aquapool Genossenschaft Steinmauer, 2023). Die Glatt führt an der Stelle, an der Aquapool Flusswasser entnehmen will, 30 bis 50 Prozent gereinigtes Abwasser aus dem Grossraum Zürich. Es wird als eine dringend benötigte, zuverlässige Quelle für Bewässerungswasser angesehen, das das derzeit verwendete Trinkwasser ersetzen soll. Bezüglich der Wasserqualitätsstandards wird darauf hingewiesen, dass die für die Entnahmestelle relevante Kläranlage Niederglatt seit 2017 modernisiert und um ein Verfahren erweitert wurde, das Rückstände von Medikamenten und Pestiziden herausfiltert. Aquapool wird in seinen Anlagen ein zusätzliches Reinigungssystem implementieren. Am Ende des Produktionsprozesses müssen alle Produkte in einem Waschzyklus mit Trinkwasser gereinigt werden, um die vorgeschriebenen Anforderungen an die Lebensmittelhygiene zu erfüllen.

Derzeit ist die direkte Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser für die Bewässerung in der Schweiz gesetzlich nicht erlaubt, aber sie ist Gegenstand eines kürzlich gestarteten Projekts an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) (Prof. Dr. Eberhard Morgenroth, EAWAG, persönliche Mitteilung, 07.06.2023). Das Projekt wird vom Bundesamt für Umwelt in Auftrag gegeben und bezieht eine Reihe von interessierten Kantonen und eine Gruppe von Stakeholdern mit ein, die mit den Themen des Projekts in Verbindung stehen. Dazu gehören eine Untersuchung der aktuellen und erforderlichen gesetzlichen Grundlagen, der Anforderungen an die Wasserqualität, eine quantitative Abschätzung, einschliesslich des Wasserbedarfs der Landwirtschaft, soziologische Aspekte und die Analyse von Szenarien, einschliesslich der landwirtschaftlichen Bewässerung (Dr. Magdalena Knabl, EAWAG, persönliche Mitteilung, 26.06.2023). Die Schweiz ist weltweit führend in der Abwasserreinigung und wird bis 2040 immer noch eine Milliarde Schweizer Franken in die Modernisierung der 130 wichtigsten Kläranlagen investieren (Lanz, Klaus et al., 2020). Die Anforderungen an die Wasserqualität werden daher kein Thema sein, da die Technologie bereits vorhanden ist oder bald eingesetzt wird. Dazu gehören Schwermetalle und Mikroverunreinigungen. Für mikrobielle Pathogene wird ein zusätzlicher Desinfektionsschritt erforderlich sein. Andererseits kann gereinigtes Abwasser mit Investitionskosten verbunden sein, die den Preis beeinflussen (auch wenn dies durch eine sichere Wasserversorgung kompensiert werden kann), und der Salzgehalt kann nicht berücksichtigt werden. Schliesslich können potenzielle Nutzungskonflikte entstehen, da die landwirtschaftliche Bewässerung mit der Anreicherung von Oberflächenwasser konkurrieren kann, um Situationen mit geringem Durchfluss im Sommer zu entschärfen (Dr. Magdalena Knabl, EAWAG, persönliche Mitteilung, 30.06.2023).

Der erwähnte Salzgehalt ist ein Problem für die Landwirtschaft, muss aber in einem agronomischen Kontext untersucht werden, wobei die Empfindlichkeit der Pflanzen, die Bodeneigenschaften und die Drainage sowie die Saisonalität und Häufigkeit der Bewässerung zu berücksichtigen sind (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2012). Darüber hinaus gibt es potenzielle technologische Lösungen wie die von einem Schweizer Unternehmen entwickelten elektromagnetischen Säulen (AQUA4D©) (Planet Horizons Technologies SA, 2023). Die Technologie behandelt Probleme mit Salzgehalt und Kalkablagerungen und trägt dazu bei, Bewässerungsanlagen effizient und sauber zu halten. Die berichteten Auswirkungen von Abwasser auf die mikrobielle Aktivität im Boden und die Bildung von Biofilmen (Meli et al., 2002; Ramirez-Fuentes et al., 2002) sowie die Auswirkungen auf die Wasserrückhaltung im Boden (Loy et al., 2018; Magesan et al., 2000; Touil et al., 2022) müssen im Zusammenhang mit den für die Schweizer Landwirtschaft vorgesehenen Qualitätsanforderungen für behandeltes Abwasser ebenfalls weiter untersucht werden.

## 6.6 Situation im Ausland

### 6.6.1 Europäische Union

Die bewässerte landwirtschaftliche Gesamtfläche in der Europäischen Union (EU) betrug im Jahr 2016 10,2 Mio. ha (Eurostat, 2019a), wobei auf Spanien und Italien 3,6 Mio. bzw. 4,1 Mio. ha entfielen. Die grössten Anteile der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche finden sich ebenfalls in Südeuropa (31,4 % in Malta, 23,6 % in Griechenland, 21 % in Zypern, 20,2 % in Italien, 13,2 % in Spanien und 13 % in Portugal) (Abbildung 6-18). Der für die Niederlande gemeldete Anteil von 29,1 % erklärt sich durch die herausragende Stellung des Gemüseanbaus im dortigen Agrarsektor.

In West- und Mitteleuropa wird im Allgemeinen Bewässerung eingesetzt, um die Sommertrockenheit während der empfindlichen Wachstumsphasen der Pflanzen auszugleichen. Insgesamt wird in Deutschland und Österreich weniger bewässert (Eurostat, 2019a). Innerhalb der EU ist Frankreich der grösste Produzent von hochwertigen Kulturen wie Saatgetreide und Hackfrüchten, Industriepflanzen und grün geernteten Pflanzen auf Ackerland und steht nach Spanien an zweiter Stelle bei Trockenhülsenfrüchten und Eiweisspflanzen (Eurostat, 2021). Im Zeitraum 2006-2010 wurden in Frankreich insgesamt 1'512'000 ha bewässert, wovon etwa die Hälfte für die Maisproduktion bestimmt war (Tabelle 6-4). Eine ähnliche bewässerte Fläche für Mais wurde in Italien gefunden. Der geschätzte Anteil der bewässerten Landwirtschaft an der landwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung (BWS) betrug im Jahr 2020 19,9 % für die Schweiz und 4,7 %, 7,3 %, 15,9 % bzw. 40,7 % für Österreich, Deutschland, Frankreich und Italien (FAO, 2023). Der hohe Anteil der bewässerten BWS in der Schweiz ist weitgehend auf die Bewässerung von Obst und Gemüse zurückzuführen und stieg von 14,1 % im Jahr 2010 an. In Deutschland hat sich der Anteil der bewässerten BWS seit 2006 verdoppelt (FAO, 2023).

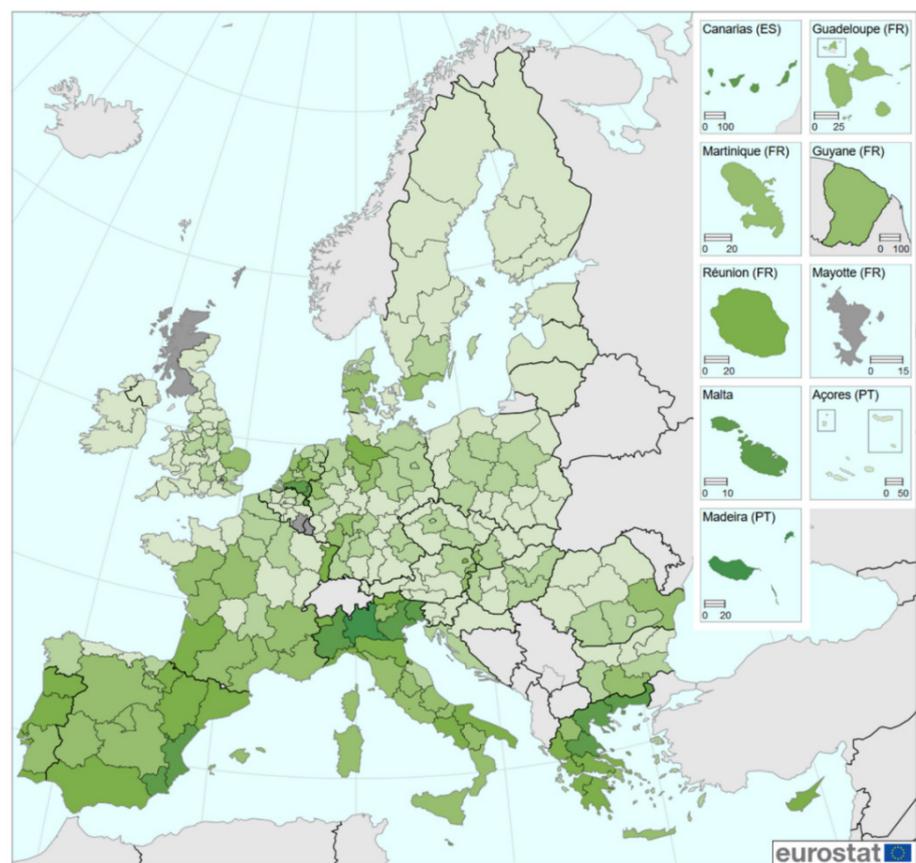
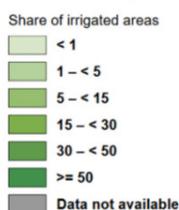
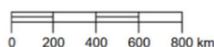


Abbildung 6-18 Anteil der bewässerten Fläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in den 28 Ländern und Regionen der Europäischen Union im Jahr 2016. Quelle: Eurostat (2019a, 2019b).



Administrative boundaries: © EuroGeographics © UN-FAO © Turkstat  
Cartography: Eurostat – IMAGE, 03/2019



Die letzten gemeldeten EU-Bewässerungsdaten stammen aus dem Jahr 2016 und enthalten keine Wasserentnahmemengen für die landwirtschaftliche Bewässerung. Das Eurostat-Quellendokument schlägt Massnahmen zur Verbesserung der Berichterstattung über die landwirtschaftliche Bewässerung durch die Erhebung von Daten über die Wassermessung (Wasserentnahmemengen), eine Analyse der Daten auf der Ebene von Flusseinzugsgebieten und die Aufnahme eines Indikators zu den Auswirkungen der Bewässerung auf die Umwelt vor (Eurostat, 2019a). Es scheint, dass die EU-Mitgliedstaaten mit ähnlichen Problemen bei der Erhebung von Bewässerungsdaten zu kämpfen haben wie die Schweiz.

Tabelle 6-4 Gesamte bewässerte landwirtschaftliche Fläche und bewässerte Fläche für Ackerkulturen in der Schweiz und den Nachbarländern. Datenquelle: FAO (2023)

Land	Gesamte bewässerte landwirtschaftliche Fläche (1000 ha)	Bewässerte Anbaufläche (1000 ha)				
		Getreide	Mais	Kartoffeln	Zuckerrübe	Öl- und Proteinkulturen
Schweiz	36,2	2,4	2,0	3,7	0,7	0,4
Österreich	43,3	8,5	7,4	3,2	6,7	4,2
Deutschland	235	49	41	23	36	15
Frankreich	1'512	90	756	60	30	45
Italien	2'666	118	736	32	97	105

Die Daten wurden von der FAO für Deutschland für das Jahr 2006, für Österreich, Frankreich und Italien für das Jahr 2007 und für die Schweiz für das Jahr 2010 erhoben und gemeldet.

Verschiedene politische Initiativen der EU wurden eingeleitet, um die Herausforderung der nachhaltigen Wassernutzung in der Landwirtschaft zu bewältigen. Dazu gehören ein stärker integrierter Ansatz für die Wasserbewirtschaftung, die Wiederverwendung von Wasser, Forschung und Innovation sowie ein ehrgeizigeres Umweltkonzept in der Agrarpolitik. Die im Jahr 2000 verabschiedete EU-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG; EUR-Lex (2014)) zielt auf eine integrierte Wasserbewirtschaftung nach Flusseinzugsgebieten, einen verstärkten ökologischen Schutz von Oberflächengewässern und den Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und übermässiger Entnahme ab. Im Bereich der Landwirtschaft müssen die Wasserrahmenrichtlinie und die Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP; European Commission (2023)) kohärent sein. Die effiziente Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen, einschliesslich Wasser, bleibt eines der wichtigsten Ziele der GAP 2023-2027. Im Allgemeinen besteht die GAP aus zwei Säulen: I. Unterstützung der Landwirte und Märkte und II. ländliche Entwicklung. Im Rahmen von Säule I ist die Einhaltung der Genehmigungsanforderungen für die Wasserentnahme für Landwirte, die GAP-Zahlungen erhalten, obligatorisch (obwohl diese Genehmigungsmechanismen viele Ausnahmen für die landwirtschaftliche Wassernutzung enthalten und die Nichteinhaltung zu geringen Kürzungen der Subventionszahlungen führt; European Court of Auditors (2019)). Im Rahmen der zweiten Säule ist die Verbesserung der Wasserbewirtschaftung und die Steigerung der Wassernutzungseffizienz in der Landwirtschaft eines der Ziele der ländlichen Entwicklung. Die Umstellung auf effizientere Bewässerungssysteme wird durch Wissenstransfer und Informationsmassnahmen sowie durch Investitionen in die Infrastruktur unterstützt (Rossi, 2019).

Die Bewässerungssituation wird weiter für Frankreich und Deutschland erläutert. Ein allgemeiner Überblick über die Bewässerung in Italien wird von Todorovic et al. (Todorovic et al., 2007) gegeben. Informationen zur Bewässerung in Österreich sind beim Kompetenzzentrum Bewässerung (KoBe) erhältlich. Dies ist eine Initiative des Landes Niederösterreich und der Landwirtschaftskammer Niederösterreich (Kompetenzzentrum Bewässerung, 2023).

### 6.6.2 Frankreich

Unter den Anreizen der GAP hat Frankreich seit den siebziger Jahren ein landwirtschaftliches System mit grossen Flächen für die intensive Produktion von hochwertigen Kulturen mit einem beträchtlichen Exportanteil entwickelt, zu denen unter anderem Körnermais (einschliesslich Saatgut), Getreide und Kartoffeln (einschliesslich Saatkartoffeln) gehören. Insgesamt werden 45 % der landwirtschaftlichen Fläche für den Anbau wichtiger Ackerkulturen genutzt (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2021). Bei Getreide bewirtschaften 65 % der Betriebe

eine Fläche von  $\geq 50$  ha (davon 35 %  $\geq 100$  ha), bei Körnermais sind es ähnlich viele. Bei Kartoffeln bewirtschaften 48 % der Betriebe grosse Flächen (20 %  $\geq 50$  ha, 28 %  $\geq 100$  ha) (Daten für 2013; Eurostat (2021)). Je nach Region wurden ab den siebziger Jahren kollektive und individuelle Wasserspeicher subventioniert und Fluss- und Grundwasserentnahmen (basierend auf der Durchflussmenge, nicht auf dem Volumen) genehmigt, um die Bewässerung in wichtigen Produktionssystemen zu unterstützen (Anhang 11.2, Ergänzende Tabelle 11.2-2; Rouillard (2020)). In diesem Zusammenhang hat die Bewässerung in Frankreich eine lange Tradition für Kulturen, die in der Schweiz nicht als bewässerungswürdig gelten. Insgesamt macht die bewässerte landwirtschaftliche Fläche nur 4,9 % der Gesamtfläche aus (Eurostat, 2019b).

Im Jahr 2019 machte die Bewässerung 9,7 % der gesamten Wasserentnahme in Frankreich (Metropolregion) aus, was 28'614 Entnahmen von insgesamt 3,2 Mrd. m<sup>3</sup> entspricht (eaufrance BNPE, 2022). Dies scheint kein grosser Verbrauch zu sein, aber die Entnahme für die Bewässerung konzentriert sich auf drei Monate im Jahr (Juni, Juli, August). Ausserdem wird dieses Wasser im Gegensatz zu anderen Verwendungszwecken nicht in die Umwelt zurückgeführt (Wittling & Ruelle, 2022). Die Bewässerungslandwirtschaft konzentriert sich hauptsächlich auf das Zentrum und den Süden, mit Ausnahme des Elsass im Osten (Abbildung 6-19). Die Grundwasserressourcen sind im Süden weitaus weniger verfügbar, was in trockenen und heissen Sommermonaten zu Engpässen führt, da die Abflüsse der Oberflächengewässer gering sind. Die mit der Wasserknappheit verbundenen Spannungen und Konflikte sowie der Druck der EU auf die Bewirtschaftung der Wasserressourcen haben dazu geführt, dass die Daten über die Wassernutzung zentralisiert werden (eaufrance, 2023; eaufrance BNPE, 2023) und die Transparenz erhöht wird, auch in Bezug auf Dürre und Entnahmebeschränkungen und -verbote (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2023; République française. notre-environnement, 2023). Die in der Nationalen Datenbank der quantitativen Wasserentnahmen (Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau, BNPE; eaufrance BNPE (2023)) verfügbaren Daten zur Wasserentnahme basieren auf den von den Wasserbehörden und -ämtern verwalteten Wasserentnahmegebühren. Nach Erteilung der Bewässerungsgenehmigung müssen die Bewässerer über ein Messsystem für die entnommenen Mengen verfügen, und für jede Messeinrichtung muss ein Register über die monatlichen Entnahmemengen geführt werden. Wer mehr als 10'000 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr entnimmt, muss Gebühren zahlen. In so genannten Wasserverteilungszonen (zones de répartition des eaux), d.h. in Gebieten, in denen ein chronischer Mangel an Ressourcen im Verhältnis zum Bedarf festgestellt wurde, wird diese Menge auf 7'000 m<sup>3</sup> reduziert (eaufrance BNPE, 2023). Einschränkungen und Verbote der Wasserentnahme sind in Frankreich seit den 2000er Jahren gängige Praxis (Wittling & Ruelle, 2022). Die in den verschiedenen Departements geltenden Massnahmen und ihre zeitliche Abfolge sind zentralisiert und können über eine Website eingesehen werden (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (2023); Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-9).

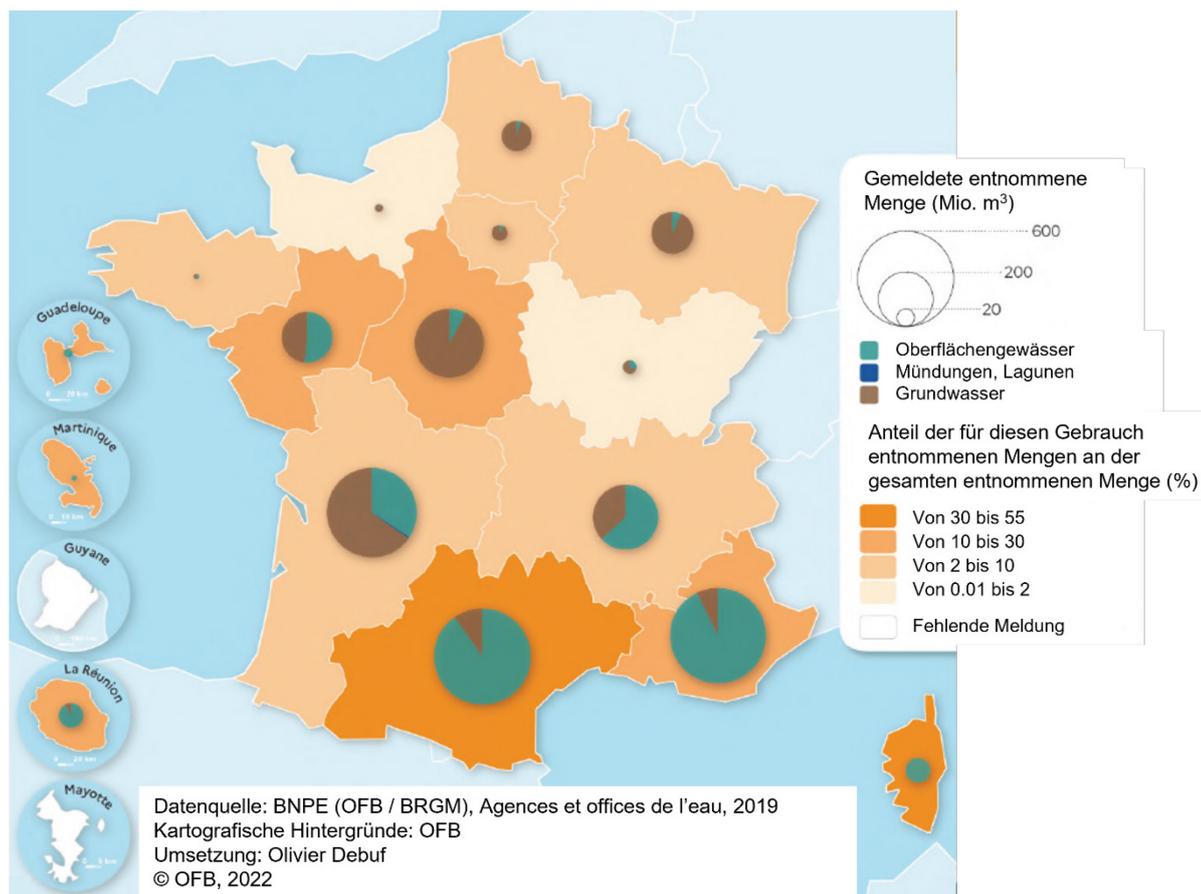


Abbildung 6-19 Infografik zur Wasserentnahme für die Bewässerung in Frankreich. Die Gesamtmenge des für die Bewässerung entnommenen Wassers wird durch die Größe der Kreisdiagramme angegeben, während die verschiedenen Regionen entsprechend dem Anteil der Bewässerung an der Gesamtmenge des für alle Zwecke entnommenen Wassers eingefärbt sind. Die Aufteilung in den Kreisdiagrammen stellt den Anteil des Oberflächenwassers (grün), des Grundwassers (braun) und der Lagunen und Flussmündungen (blau) an der Wasserentnahme für die Bewässerung dar. Die Daten beruhen auf den von den regionalen Wasserbehörden und -ämtern erhobenen Gebühren für die Wasserentnahme. Angepasst von eaufrance BNPE (2022).

In Frankreich werden die Wasserressourcen von sechs Wasserbehörden (Agences de l'eau) auf der Grundlage von sieben grossen Wassereinzugsgebieten auf dem französischen Festland verwaltet (Korsika ist in der Agentur Rhône méditerranée enthalten) (Anhang 11.2, Ergänzende Abbildung 11.2-10). Das bestehende wasserpolitische Planungsinstrument ist das SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux), von den lokalen Versionen für Teileinzugsgebiete, das SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux), abgeleitet werden (Les agences de l'eau, 2023). Die SAGE integrieren alle wasserbezogenen Aspekte des Teileinzugsgebiets: Ressourcen (Grundwasser, Flüsse, Seen), Nutzer und das natürliche Funktionieren der aquatischen Umwelt. Die lokale Wasserkommission (Commission Locale de l'Eau) beaufsichtigt den Erstellungsprozess des SAGE, der einen Plan für nachhaltige Entwicklung und Bewirtschaftung (Plan d'Aménagement et de Gestion Durable, PAGD), Vorschriften und grafische Dokumente umfasst. Er dient als Leitfaden für die lokale Wasserwirtschaft. Auf der Ebene der Départements, die territorial organisiert sind, sind die Landwirtschaftsämter (Chambres d'agriculture) beteiligt. Auf dieser Ebene werden die Genehmigungen und Beschränkungen für die Wasserentnahme erteilt und die Vorschriften umgesetzt (INRAe, 2022). Die französische Regierung fördert darüber hinaus die Durchführung territorialer Projekte für die quantitative Wasserbewirtschaftung (Projet de territoire pour la Gestion de l'Eau, PTGE). PTGEs erstellen, implementieren und evaluieren ein Programm von Massnahmen, um den Wasserbedarf und die Wasserressourcen innerhalb eines Wassereinzugsgebiets (100 bis 1'000 km<sup>2</sup>) auszugleichen und gleichzeitig die natürliche Umwelt zu erhalten. Sie beinhalten eine zukunftsorientierte Vision (10-30 Jahre), die den Klimawandel berücksichtigt. Sie müssen alle Interessengruppen einbeziehen und den Dialog insbesondere zwischen Landwirten und Umweltschutzverbänden fördern. Ein PTGE gilt für ein Wassereinzugsgebiet, das häufig durch ein spezifisches Problem gekennzeichnet ist (Wasserknappheit, Überschwemmungen, Wasserqualität) und das mit verschiedenen

wirtschaftlichen Aktivitäten in Einklang gebracht werden muss (INRAe, 2022; Wittling & Ruelle, 2022). Für Gebiete, in denen Wasserdefizit mit der Entnahme von Wasser für die Bewässerung zusammenhängt, ist die Gründung einer Organisation für die kollektive Bewirtschaftung von Bewässerungswasser (Organisme Unique de Gestion Collective, OUGC) gefördert. Diese Struktur ist der Inhaber einer Gesamtgenehmigung für die Entnahme von Bewässerungswasser und ist für die Verwaltung und Verteilung des entnommenen Wassers zuständig. Das übergeordnete Ziel ist es, das ordnungsgemässe Funktionieren der aquatischen Umwelt in problematischen Gebieten durch eine Reduzierung der Entnahmen zu gewährleisten. Der Druck liegt dann auf der Modernisierung oder Umstrukturierung der Bewässerungsnetze zur Verbesserung der Wassereffizienz, die Anpassung der Fruchtfolge und die Schaffung von Ersatzreservoirs (Wittling & Ruelle, 2022). In der aktuellen GAP der EU gibt es nach wie vor Subventionen für die Verbesserung von Bewässerungsanlagen und -infrastrukturen, allerdings mit dem Schwerpunkt auf deklarationspflichtigen Wassereinsparungen. Das Ziel der Wasserresilienz umfasst neben anderen Massnahmen auch die Unterstützung des Anbaus von an Trockenheit angepassten Pflanzen und der Agroforstwirtschaft (European Commission, 2023). In Frankreich laufen Forschungsarbeiten zur resilienten Bewässerung, d. h. Bewässerung zur Sicherheit und Ertragsstabilisierung statt zur Maximierung, zur Diversifizierung von Fruchtfolgen und zu agrarökologischen Massnahmen (INRAe, 2022).

### 6.6.3 Deutschland

Nach Frankreich steht Deutschland an zweiter Stelle, dicht gefolgt von Spanien und Polen, was die Ackerfläche in der EU betrifft (Eurostat, 2023). Der grösste Teil der Ackerfläche ist dem Getreideanbau zugewiesen (viertgrösster Produzent in der EU im Jahr 2016, nach Frankreich, Polen und Spanien). Die Produktion von Hackfrüchten (Kartoffeln und Zuckerrüben) ist vergleichbar mit dem Frankreich und die höchste in der EU. Deutschland ist auch ein wichtiger Erzeuger von Pflanzen für die Produktion erneuerbarer Energien, von Tierfutter und Futtermitteln sowie von Industriepflanzen einschliesslich Ölsaaten (Eurostat, 2021). Getreide und Raps gelten als nicht bewässerungswürdig, mit Ausnahme von Mais, während Kartoffeln als bewässerungsbedürftig eingestuft werden. In Regionen mit einem hohen Anteil an Sonderkulturen wie Gemüse und Obst ist die Bewässerung gängige Praxis (Schimming & Sand, 2021). Landesweite Bewässerungsdaten wurden in der Vergangenheit nicht regelmässig erhoben. Die letzten offiziellen Zahlen zur Fläche stammen aus dem Jahr 2019, in dem rund 506'482 ha von 14'888 Landwirten bewässert wurden. Etwa 55 % der Fläche und 28 % der Landwirte befinden sich in Niedersachsen und betreiben Obstbau. Zwischen 2013 und 2019 hat die bewässerte Gesamtfläche um 38,5 % zugenommen (Tabelle 6-5). Auf Ebene der Bundesländer wurde die grösste Ausweitung der bewässerten Fläche und der Anzahl der Betriebe, die Bewässerung betreiben, in Nordrhein-Westfalen festgestellt, flächenmässig gefolgt von Bayern und Brandenburg (Tabelle 6-5). Dies könnte auf eine stärkere Bewässerung von Ackerkulturen wie Mais und Kartoffeln hinweisen.

Tabelle 6-5 Bewässernde Betriebe und effektiv bewässerte Fläche in den Jahren 2013 und 2019 für die fünf Bundesländer mit den grössten bewässerten Flächen in Deutschland. Datenquelle: DISTATIS Statistisches Bundesamt (2021); Eurostat (2019b)

Bundesland	Betriebe			bewässerte Fläche (ha)		
	2013	2019	Zunahme (%)	2013	2019	Zunahme (%)
Deutschland	13'670	14'888	8,9	365'590	506'482	38,5
Niedersachsen	3'840	4'156	8,2	206'930	278'153	34,4
Nordrhein-Westfalen	2'040	2'412	18,2	26'660	52'578	97,2
Brandenburg	360	407	13,1	20'910	32'048	53,3
Bayern	2'100	2'235	6,4	16'810	26'742	59,1
Baden-Württemberg	2'430	2'638	8,6	15'200	19'218	26,4

Die meisten Betriebe (79 %) nutzen Beregnungsanlagen, während 32 % der Betriebe Tropfbewässerung einsetzen. Deutschlandweit ist die Entnahme von Grundwasser (einschliesslich Quellen) die wichtigste Ressource für die Bewässerung; die Entnahme von Oberflächenwasser und die öffentlichen oder privaten Wasserversorgungsnetze machen jeweils 11 % aus (2015; DISTATIS Statistisches Bundesamt (2017)). Auf die Bewässerung entfiel im Jahr

2019 eine Wasserentnahme von 0,4 Mrd. m<sup>3</sup>, was etwa 2,2 % der gesamten Entnahmemenge für alle Nutzungen in Deutschland entspricht. Die Auswirkungen der Trockenheit auf die Ernte von Getreide, Raps und vor allem Körnermais wurden im Jahr 2022 festgestellt; Mais musste als Silage geerntet werden, um noch etwas zu retten (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2022).

Im Allgemeinen scheinen Dürresituationen keine Wasserkonflikte in dem Sinne zu verursachen, dass die landwirtschaftliche Bewässerung eingeschränkt wird. Ein geringer Wasserdurchfluss in den Flüssen, der sich auf die aquatischen Ökosysteme auswirkt, wird zwar beobachtet, steht aber nicht im Zusammenhang mit der Bewässerung, da das meiste Wasser aus Grundwasserquellen entnommen wird. Beobachtungen an Grundwasserüberwachungsbrunnen zeigen niedrigere Wasserstände in Dürre Jahren, die sich in den Folgejahren nicht unbedingt wieder vollständig erholen. Zu den vorgeschlagenen Massnahmen zur Verringerung der Wasserentnahme für die Bewässerung aus dem Grundwasser im Hinblick auf den Klimawandel gehören der Bau von Speicherbecken und die Verwendung von Klarwasser (Riedel et al., 2021).

Die Nationale Wasserstrategie 2050 der Bundesregierung wurde am 15. März 2023 veröffentlicht (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV, 2023b) und soll die weitere Einhaltung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG; EUR-Lex (2014)) sicherstellen. Im Hinblick auf die Bewässerung wird neben standortangepassten Anbaumethoden und -kulturen und geeigneten Fruchtfolgen die Schaffung lokaler Wasserspeicher in Form von Bewässerungsteichen oder Zisternen vorgeschlagen. In ganz Deutschland ist seit 2002 ein zunehmendes Interesse an der Beregnung zu beobachten, das mit einer Vergrößerung der bewässerten Flächen einhergeht. Seit 2014 werden betriebsübergreifende Anlagen für die Beregnung durch den Bund, die Länder und die GAP finanziell unterstützt, wobei die jüngsten Subventionen an Bedingungen für wassersparende Anlagen geknüpft sind (Schimming & Sand, 2021). Auf Bundesebene regelt das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) den Schutz und die Nutzung von Grundwasser und Oberflächengewässern. Entnahmen für die landwirtschaftliche Bewässerung bedürfen der behördlichen Genehmigung durch die Untere oder Obere Wasserbehörde des jeweiligen Bundeslandes (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV, 2023a). Die Bundesländer erstellen Wasserbücher, die die Wasserrechte, d.h. wesentliche wasserwirtschaftliche Rechtsaspekte, sowie die wasserwirtschaftlich begründeten Schutzgebiete enthalten, was für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie und die Information der zuständigen Behörden und der Öffentlichkeit wichtig ist. Sie enthalten alle genehmigten Entnahmegenehmigungen und deren Standorte. Das Wasserkataster dient auch der Erfassung der Entnahmemengen, die für die Berechnung der Wasserentnahmegebühren (WEG) benötigt werden. Wer ein Entnahmerecht hat, ist verpflichtet, die jährlich entnommene Gesamtmenge zu melden, was aber nicht in allen Bundesländern durchgesetzt wird (Schimming & Sand, 2021). Wassergebühren werden auch auf Bundesländerebene erhoben und unterscheiden sich ganz wesentlich in der Höhe (Grundwasser: 0,5-17 Cent m<sup>-3</sup>, Median 4 Cent m<sup>-3</sup>; Oberflächenwasser: 0,3-5 Cent m<sup>-3</sup>, Median 0,64 Cent m<sup>-3</sup>; oder gar keine Gebühr), den Bedingungen (Oberflächenwasser, Grundwasser oder beides) und in der Gewährung von Ausnahmen, meist für die Landwirtschaft (Römer, 2019).

Schliesslich hat der Deutsche Wetterdienst einen Online-Beratungsdienst für die Bewässerung, "agrowetter Berechnung", entwickelt, der etwa 30 verschiedene Kulturarten abdeckt (Deutscher Wetterdienst, 2023). Sein Netz von etwa 500 Wetterstationen in ganz Deutschland liefert räumlich aufgelöste Informationen zur Evapotranspiration. Die Nutzer geben Daten über die Kultur, die Bodeneigenschaften, den lokalen Niederschlag und die ausgebrachten Bewässerungsmengen an. Das Tool berechnet das Bodenfeuchteprofil ab dem eingegebenen Aussaat- oder Pflanzdatum bis zu 4 Tage in die Zukunft und liefert eine optimierte Bewässerungsmenge bei bestehenden oder zu erwartenden Wasserdefiziten. Das Tool ist gegen eine Abonnementgebühr für die Dauer einer Anbausaison erhältlich. Ein ähnliches Beratungssystem wurde von der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Bauwesen in Bayern e.V. (ALB Bayern e.V., 2023) entwickelt.

## 6.7 Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung - Status und Trends

### 6.7.1 Effiziente und produktive Wassernutzung

Aufgrund wirtschaftlicher Verluste durch Ertrags- und Qualitätseinbussen bei Trockenheit und der gleichzeitigen Sorge um die Verfügbarkeit von Wasser für Bewässerungszwecke sollten Bewässerungssysteme so konzipiert werden, dass eine hochproduktive Wassernutzung, d. h. eine höhere Pflanzenproduktion pro Einheit eingesetzten Wassers, erreicht wird (Perry, 2007). Ein Wasserbilanzansatz liefert theoretische Überlegungen zur Auswahl oder Gestaltung von Bewässerungssystemen aus der Perspektive der Wasserressourcen, die jedoch durch Anforderungen aus der Sicht der Pflanzenphysiologie, der Agronomie und der Ökonomie (Kosten, Arbeitsaufwand, Wert) moduliert werden (Molden et al., 2003). Das für die Bewässerung aus verschiedenen Quellen entnommene Wasser verändert die Speicherung der Quelle und wird in einen verbrauchten und einen nicht verbrauchten Teil aufgeteilt. Der verbrauchte Teil besteht aus dem nutzbringenden Verbrauch, d. h. dem Wasser, das von den Pflanzen transpiriert und für das Wachstum und den Nährstofftransport verwendet wird, und dem nicht nutzbringenden Verbrauch, der hauptsächlich auf Verdunstung und Unkrautwachstum zurückzuführen ist. Der nicht verbrauchte Teil umfasst sowohl einen verwertbaren als auch einen nicht verwertbaren Anteil. Ziel ist es, den nicht nutzbringenden Verbrauch und die nicht rückgewinnbaren Anteile in Bewässerungssystemen zugunsten des nutzbringenden Verbrauchs zu verringern. Mit anderen Worten: Es geht darum, die geeignete Wassermenge mit der richtigen Ausbringungsrate und gleichmässig auf das gesamte Feld auszubringen, und zwar zum richtigen Zeitpunkt, mit dem geringsten nicht nutzbringenden Wasserverbrauch (Verluste) und so wirtschaftlich wie möglich (Reinders et al., 2013). Ähnliche Rahmenwerke für die Bewässerungsoptimierung wurden von Hsiao et al. (Hsiao et al., 2007) und Serra-Wittling und Molle (Serra-Wittling & Molle, 2017) formuliert und angewendet. In den folgenden Paragraphen werden Bewässerungssysteme, die für den Ackerbau relevant sind, sowohl im Hinblick auf die Wasserproduktivität als auch auf die Wassernutzung oder die Bewässerungseffizienz, d.h. den Prozentsatz des der Pflanze zugeführten Wassers, der tatsächlich von der Pflanze aufgenommen wird (Stanhill, 1986), diskutiert. Dazu gehören Bewässerungsgeräte oder -anlagen sowie Kontrollmethoden zur Bestimmung von Zeitpunkt und Menge der Bewässerung. Verringerungen der Bewässerungseffizienz aufgrund von Verlusten vor dem Eintritt in die Geräte oder Anlagen auf den Feldern werden hier nicht behandelt, umfassen aber im Allgemeinen Leckagen in Transportkanälen und Verdunstung aus (temporären) Wasserreservoirs. Der Energieverbrauch in diesem Teil des Systems kann durch energieeffizientes Pumpen und Druckbeaufschlagung sowie eine effektive Wartung optimiert werden.

#### **Bewässerungssystem: Ausstattung und Installation**

Eine Übersicht und detaillierte Beschreibung der verschiedenen Arten von Bewässerungsanlagen finden sich in Fuhrer und Smith (Fuhrer & Smith, 2015). Die derzeit im Ackerbau in der Schweiz eingesetzten Systeme (Kartoffeln, Mais, Zuckerrüben, in der Reihenfolge ihrer Bedeutung) sind meist mobil und haben alle Komponenten (Bewässerungsköpfe, Schläuche) oberirdisch. Sie bieten Flexibilität, da sie während der Vegetationsperiode auf- und abgebaut und bewegt werden können, sind für die kleine Fläche der Schweizer Parzellen geeignet und behindern die Feldarbeit nicht (Fuhrer & Smith, 2015). Am häufigsten werden Rollmatten mit Starkregnern oder Düsenwagen verwendet. Sie müssen zu Beginn der Vegetationsperiode nicht vorbereitet werden, aber während der Bewässerungskampagnen müssen sie zwischen den Parzellen bewegt werden (Arvalis-Institut du végétal, 2017). Die Tröpfchenbewässerung wird für Kartoffeln getestet, sowohl in der oberirdischen als auch in der unterirdischen Variante (Projekt Efficiency Irrigation Vaud, Prométerre (2023)). Die Tropfbewässerung mit einer festen (mehrjährigen) unterirdischen Installation mit fortschrittlichen Schläuchen und Tropfer wird in Frankreich für Ackerkulturen wie Getreide, Mais, Sojabohnen und Sonnenblumen untersucht und gefördert, wenn eine flache Bodenbearbeitung oder minimale Bodenbearbeitung möglich ist (Chambre d'agriculture et Conseil départemental de la Haute-Garonne OGAYA, 2023; Lacroix et al., 2015).

Im Vergleich zu mobilen Systemen erfordert der Ein- und Ausbau von Tropfbewässerungsanlagen einen hohen Zeit- und Arbeitsaufwand obwohl es bereits Landmaschinen mit Haspeln für Tropf-schläuche gibt. Das System gilt als weniger anspruchsvoll während der Saison insbesondere, wenn es vollautomatisch ist aber der Zeitaufwand für die Überwachung und Wartung (z. B. für Leckagen, Verstopfungen) des Systems ist nicht unerheblich (Arvalis-Institut du végétal, 2017). Der grösste Nachteil der Tropfbewässerung sind die hohen Investitionskosten im Vergleich zu Rollmatten (das Doppelte bis Dreifache, Arvalis-Institut du végétal (2017)) vor allem wenn es sich um hochentwickelte Schläuche mit integrierten selbstregulierenden Tropfen handelt die mehrere Jahre lang in Betrieb

bleiben können (Chambre d’agriculture et Conseil départemental de la Haute-Garonne OGAYA, 2023). Eine Schätzung und ein Vergleich der Lebensdauer der Veralterung und der Abschreibung von Tropf- und Sprinklerbewässerungssystemen (Rollomaten) im Ackerbau sowie ein Vergleich der Kosten dieser Bewässerungssysteme sind in Anhang 11.2 Ergänzende Tabelle 11.2-3 und Ergänzende Tabelle 11.2-4 enthalten. Die Kostenberechnung basiert auf einer theoretischen Fallstudie für eine 30-ha-Maisfläche in Frankreich (Lacroix et al., 2015).

Es ist eine zusätzliche Wasserfiltration erforderlich um Verstopfungen in den Tropfschläuchen und Tropfern zu verhindern aber im Allgemeinen sind die Energiekosten niedriger, weil weniger Druck erforderlich ist (0,5-2 bar im Vergleich zu 3-6 bar an der Bewässerungspistole, 10-12 bar am Eingang der Rollomat, Granier et al. (2003)). Der grösste Vorteil ist jedoch die Einsparung von Bewässerungswasser (Tabelle 6-6) die je nach Quelle (Kulturen und Anbaubedingungen) zwischen 10 und 40 % betragen kann (23-36 % im Vergleich zu Rollomat für Kartoffeln im Projekt Efficiency Irrigation Vaud, Prométerre (2023)). Dies liegt daran, dass das Wasser direkt auf den Boden oder in den Boden in der Nähe des Wurzelsystems aufgebracht wird so dass das Wasser nicht durch Dispersion (Wind) Auffangen durch das Blätterdach und Verdunstung (wichtig an heissen Tagen) verloren geht wie es bei der Beregnung der Fall sein kann (Serra-Wittling & Molle, 2017). Die Gleichmässigkeit der Ausbringung auf dem gesamten Feld wird ebenfalls als Vorteil angesehen aber weniger bei Alterung und Verstopfung der Schläuche sowie bei Böden mit einer ungeeigneten hydraulischen Leitfähigkeit: zu hoch bei sandigen oder felsigen Böden oder zu niedrig mit der Bildung lokaler nasser Stellen um die Tropfer (Lacroix et al., 2015; Prométerre, 2023b; Serra-Wittling & Molle, 2017).

Tabelle 6-6 Wassereinsparungen, die durch die Erneuerung von Geräten oder den Wechsel von Rollomat- zu Tropfbewässerungsmethoden im Ackerbau<sup>1</sup> erzielt werden. Angepasst von Serra-Wittling & Molle (2017)

	Wassereinsparung (%)	Neue		
		Rollomat	Oberirdisch Tropfbewässerung	Unterirdische Tropfbewässerung
Alte	Rollomat	10	10-20 (15-25) <sup>2</sup>	15-35 (20-40) <sup>2</sup>
	Oberirdische Tropfbewässerung	-	10-20	15-20
	Unterirdische Tropfbewässerung	-	-	10-20

<sup>1</sup> Weizen, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben; <sup>2</sup> unter windigen Bedingungen.

Die Tröpfchenbewässerung wird häufig mit Automatisierungssystemen kombiniert (Sensoren zur Messung der Bodenfeuchtigkeit in Verbindung mit den oberirdischen Umweltbedingungen, siehe 6.7, Zeitpunkt und Menge der Bewässerung) und ermöglicht die Fertigation, d. h. die Ausbringung von Flüssigdünger (Chambre d’agriculture et Conseil départemental de la Haute-Garonne OGAYA, 2023; Fan et al., 2020). Zu den agronomischen Auswirkungen gehören ein geringeres Auftreten von Blattkrankheiten und im Falle einer unterirdischen Bewässerung eine geringere Unkrautentwicklung aufgrund einer trockenen Bodenoberfläche. Andererseits ist die Anwendung durch die Grösse des Feldes und die Hanglage begrenzt (je nach Quelle oder Hersteller unterschiedlich), und die Oberflächen-Tropfbewässerung kann Feldarbeiten wie das mechanische Unkrautbekämpfung behindern. Ein wichtiger Aspekt für die Landwirte ist ausserdem das erhöhte Risiko von anhaltendem Trockenstress nach einem Ausfall oder einer Störung des Systems, da das daraus resultierende Wasserdefizit im Boden nicht mehr vollständig ausgeglichen werden kann. Ein Rollomat kann ein Sicherheitsnetz darstellen und wird unter Umständen auch benötigt, um bei trockenen Frühlingen beim Auflaufen der Pflanzen zu bewässern (Serra-Wittling & Molle, 2017). Die Wurzelsysteme sind dann noch unterentwickelt und können nicht ausreichend von der Bewässerung durch Tropfer profitieren. Eine ausführliche Studie von Serra-Wittling et al. (Serra-Wittling et al., 2019) über Wassereinsparungen bei der Umstellung von Beregnung auf lokale Systeme (Tropfbewässerung oder Mikroberieselung) kam zu dem Schluss, dass die mit lokalen Systemen erzielten Wassereinsparungen im Vergleich zur Beregnung geringer sind, wenn das Verhältnis zwischen der kumulierten potenziellen Evapotranspiration und dem kumulierten Niederschlag (hydrisches Defizit) während der Anbausaison hoch ist und wenn die Wasserhaltekapazität des Bodens hoch ist. Mit anderen

Worten, die Wassereinsparungen durch Tröpfchenbewässerung sind von den pedoklimatischen Bedingungen abhängig.

Bei der Regnerbewässerung stellt der Oberflächenabfluss auf nicht ebenen Feldern und insbesondere auf Böden mit verringerter Wasserinfiltrationskapazität, z. B. aufgrund von Verdichtung, einen Verlust dar, der potenziell mit der Erosion durch den Tropfenaufschlag kombiniert wird. Beides lässt sich minimieren, indem die Durchflussmenge der Bewässerungspistole auf Kosten der Dauer angepasst wird. Wasserverluste durch Versickerung in tiefere Bodenschichten treten auf, wenn die Kombination aus Bewässerung und Niederschlag die Wasserspeicherkapazität des Bodens übersteigt. Unzureichende Kenntnisse über die Bodeneigenschaften und möglicherweise deren Heterogenität auf dem Feld oder ein unregelmässiges Fortschreiten der Sprinklerwagen oder Bewässerungssperren aufgrund technischer Probleme oder Unregelmässigkeiten der Feldoberfläche sind mögliche Ursachen (Serra-Wittling & Molle, 2017). Bei der Tropfbewässerung ist dies wahrscheinlich weniger der Fall, da die ausgebrachten Mengen pro Bewässerungsrunde weitaus geringer sind (10 mm im Vergleich zu 15-30 mm). Ein weiterer Verlust durch unsachgemässes Bewässerungsmanagement ist das Restwasser im Boden nach der Ernte. Je nach Fruchtfolge können diese durch Folge- oder Deckfrüchte genutzt werden, aber wenn sie später im Jahr auftreten, werden die Bodenreserven ohnehin durch Regenwasser aufgefüllt (Serra-Wittling & Molle, 2017).

Obwohl Rollomaten mit Starkregnern weitaus weniger wasser-sparend gelten, kann dies durch einige praktische und technische Anpassungen verbessert werden. So bewässern die Landwirte beispielsweise in der Nacht oder am frühen Morgen (wann immer es die Bedingungen zulassen), um die Dispersion durch Wind und Verdunstung in der Luft zu minimieren. Der kombinierte Verlust beträgt schätzungsweise 4 % der ausgebrachten Menge über einen Zeitraum von 24 Stunden an einem sonnigen Tag in Südfrankreich (Molle et al., 2012) und 13,5 % über eine Wachstumsperiode in Spanien (Merchán et al., 2015). Bei Beregnungsbalken können einige Einsparungen erzielt werden, indem die Sprinklerköpfe mit Hilfe von Einstellstangen in Richtung der Pflanzen abgesenkt werden (Arvalis-Institut du végétal, 2017). Andererseits kann die Verdunstung aus der Beregnung und aus dem an den Blattoberflächen abgefangenen Wasser das Mikroklima in den Beständen zeitlich verändern; eine niedrigere Temperatur und eine höhere relative Luftfeuchtigkeit führen zu einem geringeren Dampfdruckbedarf und zu kühleren Baumkronen. Der Effekt ist jedoch gering im Vergleich zu dem nicht nutzbringenden Verbrauch (Cavero et al., 2009; Playán et al., 2005; Serra-Wittling & Molle, 2017). Das Gleiche gilt für die Verdunstung von Bewässerungswasser von der Bodenoberfläche und die Transpiration durch Unkräuter. Letzteres kann auch dazu beitragen, die Bodenverdunstung vor der vollständigen Abdeckung mit Pflanzen zu minimieren, obwohl das Mulchen wahrscheinlich als bessere Option angesehen wird.

Die Modernisierung von Rollomaten kann zu einer Wassereinsparung von bis zu 10 % führen (Tabelle 6-6), aber die Zahl der Landwirte, die die Vorteile der ausgefeilteren Steuerungseinstellungen am Rollomat oder an der Bewässerungspistole nutzen, ist möglicherweise aufgrund unzureichender Kenntnisse oder Arbeits- und Zeitmangel begrenzt (Granier et al., 2003). Der prozentuale Anteil der Wassereinsparungen könnte durch den heutigen Stand der Technik und künftige Fortschritte im Bereich der Präzisionslandwirtschaft und Automatisierung noch erhöht werden. Ein Beispiel, das im Rahmen des Projekts *Efficiency Irrigation Vaud* (Prométerre, 2023a) gefördert wird, ist eine Bewässerungspistole mit einstellbarem Winkel, um das Überqueren von Feldgrenzen oder nicht bewässerten Teilen des Feldes zu vermeiden, sowie eine doppelte Bewässerung (raindancer©, IT-Direkt Business Technologies GmbH (2023)) (Arvalis-Institut du végétal, 2017; Serra-Wittling & Molle, 2017). Die Steuerung erfolgt über ein GPS-Modul an der Rollomat und die von den Landwirten bereitgestellten geografischen Feldinformationen. Im Allgemeinen wird die Vorschubgeschwindigkeit bei modernen Rollomaten elektronisch gesteuert, was es den Landwirten ermöglicht, die Bewässerungsdosen an Feldabschnitte mit unterschiedlichem Bewässerungsbedarf anzupassen (Arvalis-Institut du végétal, 2017). Eine wahrscheinliche Entwicklung in naher Zukunft, falls noch nicht vorhanden, ist die Steuerung dieser Funktion auf der Grundlage von GPS und räumlichen (Präzisions-)Feldkarten für die Bewässerung. Eine potenziell noch präzisere Steuerung der Bewässerungsmenge könnte erreicht werden, wenn der Rollomat mit einem Bewässerungsbaum kombiniert wird, der mit elektronischen Ventilen an einzelnen oder Gruppen von Sprühköpfen ausgestattet ist (Arvalis-Institut du végétal, 2017). Ein autonomer Bewässerungsroboter mit Rollomat und Potenzial für kamerabasierte Präzisionsbewässerung wird derzeit für Kartoffeln entwickelt (OSIRIS agriculture, 2023).

## Zeitpunkt und Menge der Bewässerung

Erhebliche Einsparungen bei den Wasser- und Energiekosten können erzielt werden, wenn die von den Pflanzen benötigte Wassermenge zum richtigen Zeitpunkt in der Vegetationsperiode verabreicht wird. Die Tröpfchenbewässerung bietet die Möglichkeit, kleinere Wassermengen auf einmal und in kürzeren Abständen auszubringen. Für solche Systeme muss der Bewässerungsbedarf in ausreichend kleinen Intervallen oder in Echtzeit ermittelt werden, was eine manuelle Überwachung nicht zulässt (Jones, 2004). Unter Bedingungen begrenzter Wasserverfügbarkeit sollte ausserdem kritischen Wachstumsperioden Vorrang eingeräumt werden, oder es kann eine Rationierung vorgenommen werden, indem die Schwellenwerte für die Bewässerungsauslösung so angepasst werden, dass der verfügbare Wassergehalt des Bodens im Wurzelbereich aufgebraucht wird (Wittling & Ruelle, 2022). Entscheidungshilfen für die Bewässerung oder automatisierte Instrumente basieren derzeit auf den klimatischen Bedingungen und dem gemessenen Wasserzustand von Boden und Pflanzen (Jones, 2004).

### *Wasserbilanzbasierte Methoden*

Wetterstationen liefern Referenzwerte für die Evapotranspiration, die zusammen mit einem Pflanzenkoeffizienten (pflanzen- und wachstumsstadienspezifisch, in der Regel auf der Grundlage von Literaturdaten; FAO, 1998) ein Mass für die Evapotranspiration der Pflanzen ergeben. Der Wasserbedarf der Pflanzen kann durch im Boden vorhandenes Wasser, Niederschlag und Bewässerung gedeckt werden. Eine Bewässerung ist erforderlich, wenn die Evapotranspiration der Pflanzen das Wasserangebot aus Bodenwasser und Niederschlägen übersteigt. Der Bodenwassergehalt wird nicht immer gemessen; der Ausgangszustand des Bodenwassergehalts oder des pflanzenverfügbaren Wassers ist dann ein fester Wert für einen bestimmten Standort zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr. Diese Art der Bodenwasserbilanzierung gilt als leicht anwendbar und liefert Bewässerungsmengen (in mm). Die Genauigkeit hängt jedoch vom anfänglichen pflanzenverfügbaren Wasser ab, und im Laufe der Saison akkumulieren sich Fehler, die im Prinzip eine Neukalibrierung erfordern. Die Genauigkeit hängt auch von der Korrektheit des Pflanzenkoeffizienten, der Verfügbarkeit lokaler Klimadaten und einer Schätzung des Anteils des Niederschlags ab, der potenziell durch Abfluss verloren geht (Jones, 2004).

Bodensensoren können dazu verwendet werden, die Bewässerung entsprechend dem tatsächlichen Wasserstand im Boden zu planen und so eine Überbewässerung zu vermeiden, was wiederum den Abfluss, die Drainage und das Restwasser im Boden nach der Ernte reduziert (Serra-Wittling et al., 2019). Klassische Bodenwassermessungen bestehen entweder aus dem Wasserpotenzial oder dem Wassergehalt oder aus beidem. Das Wasserpotenzial gibt einen Hinweis darauf, wie leicht Wasser für die Pflanzenwurzeln verfügbar ist, da ein Teil des Wassers an Bodenpartikel gebunden wird, wenn der Wassergehalt sinkt. Der Wassergehalt des Bodens, bei dem dies geschieht, hängt von den Bodeneigenschaften ab und wird durch eine Bodenwasserrückhaltekurve beschrieben. Wenn diese Beziehung zwischen Wasserpotenzial und Wassergehalt für einen bestimmten Boden bestimmt wurde, ist die untere Schwelle für den Bodenwassergehalt und der Auslösepunkt für die Bewässerung bekannt. Messungen des Bodenwassergehalts allein sind dann ebenfalls ausreichend, da sie quantitative Informationen über die erforderliche Bewässerung liefern. Kommerzielle Systeme sind sowohl für die klima- als auch für die bodenwasserbasierte Bewässerungsplanung verfügbar. Seit 2016 wurde ein Netzwerk aufgebaut, das derzeit rund 250 Bodenfeuchtesensoren umfasst, die auf Feldern im gesamten Schweizer Mittelland installiert sind. Die Landwirte können Informationen zur Bewässerungsplanung (Zeitpunkt und Menge) vor allem für den Kartoffel-, aber auch für den Zwiebel-, Erdbeer- und Gerstenanbau abrufen (Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), 2023; RMA, 2023).

Ein alternativer Ansatz für die Bewässerungsplanung sind Modelle, die auf der Grundlage einer Kombination von Klima- und Bodendaten trainiert werden. In einigen Kantonen des Mittellandes kann auf eine Anwendung zugegriffen werden, die von der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Bauwesen in Bayern (ALB Bayern e.V., Deutschland) entwickelt wurde. Sie berechnet eine Bewässerungsempfehlung für Zeitpunkt und Menge auf der Grundlage von Wetterdaten und vom Benutzer eingegebenen Informationen über die Bodenart und die Kultur (einschliesslich Aussaatdatum und Wachstumsstadien, hauptsächlich Ackerkulturen und Gemüse) (ALB Bayern e.V., 2023; Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), 2023). Ähnliche modellbasierte Anwendungen wurden in Frankreich entwickelt, z. B. "Irré-LIS" (Arvalis-Institut du végétal, 2023) und "NetIrrig" (Seabex, 2023) (weitere Beispiele in Wittling & Ruelle (2022)), und in Italien, z. B. "Irriframe" (ANBI, 2023) und "Irrisat" (Ariospace srl, 2023). Sowohl "NetIrrig" als auch "Irrisat" nutzen Satellitenprodukte für Klima-, Ernte- und

Bodendaten. Der Deutsche Wetterdienst bietet auch mehrere Online-Beratungsinstrumente an, darunter die "agrowetter Berechnung" für die Bewässerung (Deutscher Wetterdienst, 2023).

Ungenauigkeiten bei der geschätzten Evapotranspiration von Pflanzen hängen mit einer falschen Einschätzung der Wachstumsstadien der Pflanzen und mit Unterschieden in der Reaktion auf den Verdunstungsbedarf zwischen den Sorten zusammen. Die Heterogenität des Feldes und des Bodens erschwert die Bestimmung der geeigneten horizontalen und vertikalen räumlichen Position der Sensoren (Orouskhani et al., 2023) und die Auswahl einer Position die für die Wurzelzone der Pflanze repräsentativ ist ist ebenso schwierig. Wenn Pflanzen transpirieren (je nach Verdunstungsbedarf) ist das verfügbare Wasser an der Wurzeloberfläche erschöpft was zu einer Diskrepanz mit der Bodenmasse führen kann wo die Sensoren positioniert sind (Bohaienko et al., 2023; Jones, 2004). Wurzelsysteme können auch in tiefere Bodenschichten vordringen und die Transpiration fortsetzen ohne dass Stressreaktionen ausgelöst werden obwohl ein Bodenwasserdefizit durch einen falsch positionierten Sensor angezeigt wird. Darüber hinaus können Sensorausfälle Kalibrierungsprobleme Probleme bei der Installation vor Ort sowie Probleme bei der Datenerfassung und -kommunikation die Landwirte davon abhalten die Bewässerungsempfehlung in vollem Umfang zu nutzen da die Sensoren als unzuverlässig wahrgenommen werden. Im Rahmen des Projekts Efficiency Irrigation Vaud wurden über 100 Bodensensoren auf 634 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche installiert um die Umsetzung der Bewässerungsempfehlungen durch die Landwirte zu bewerten. Die Auswertungen der wissenschaftlichen Begleitung zeigten dass etwa 40 % der Bewässerungsereignisse ausgelöst wurden bevor die Bodenfeuchte laut Bodenfeuchtemessungen in einem kritischen Bereich lag. Die Landwirte gaben an, dass die Bodensensoren dringend benötigte Informationen darüber lieferten wann die Bewässerung in der Wachstumsperiode eingeleitet werden sollte (Prométerre, 2023a).

### *Pflanzenbasierte Sensoren*

Pflanzen sind sowohl mit ihrer oberirdischen als auch mit ihrer unterirdischen Umgebung hydraulisch verbunden. Pflanzenbasierte Sensoren, die bei der Erforschung physiologischer Reaktionen auf Trockenheit und bei der Bestimmung des Wasserbedarfs von Pflanzen eingesetzt werden, zielen darauf ab, Veränderungen in der Pflanzenphysiologie im Zusammenhang mit dem Wasserstatus zu erfassen. Diese zeigen dann ein Wasserdefizit (in der Atmosphäre und/oder im Boden) an, das von den Pflanzen als stressig empfunden wird. So können die Sensoren zur Optimierung der Schwellenwerte bei der Bewässerungsplanung auf der Grundlage von Bodenwassersensoren verwendet werden, wobei die Einstellungen je nach Wachstumsstadium dynamisch und je nach Sorte differenziert sein können. Sie können auch direkt zur Bestimmung des Bewässerungszeitpunkts verwendet werden. Um die erforderliche Bewässerungsmenge zu ermitteln, sind dann Versuche und Modellierungen erforderlich. Das pflanzliche Wasserpotenzial und die stomatäre Leitfähigkeit oder die Transpirationsrate gelten als empfindliche Indikatoren für das von der Pflanze wahrgenommene Wasserdefizit, die bei Ackerkulturen eingesetzt werden können (Box 6-2; Jones (1990)). Es gibt Sensoren für andere physiologische Reaktionen, doch handelt es sich dabei oft um komplexe Geräte, die nur für Laborbedingungen geeignet sind (Ihuoma & Madramootoo, 2017; Jones, 2004).

## Box 6-2. Wasserpotenzial, stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate als pflanzenbasierte Indikatoren für Trockenstress

Im Allgemeinen versuchen die Pflanzen, Veränderungen im Wasserhaushalt der Sprossen oder Blätter zu minimieren, wenn der Boden austrocknet oder der Verdunstungsbedarf steigt. Dazu gehört die Verringerung der Wachstumsrate, um die transpirierende Oberfläche zu reduzieren, und die Ausdehnung der Wurzeln zur weiteren Erforschung des Bodens bei längerer Trockenheit. Eine unmittelbare Auswirkung der Trockenheit ist eine Abnahme des Wasserpotenzials der Pflanze, der die Pflanze durch Schließen der Stomata entgegenzuwirken versucht, um den Wasserverlust durch Transpiration zu verringern. Daher sind das Wasserpotenzial und die stomatäre Leitfähigkeit oder die Transpirationsrate empfindliche Indikatoren für das von der Pflanze wahrgenommene Wasserdefizit. Dennoch sind sie Teil normaler Kontrollmechanismen bei der Reaktion der Pflanzen auf tageszeitliche Veränderungen der Umweltbedingungen, insbesondere gegen Mittag und am frühen Nachmittag, wenn der Verdunstungsbedarf am höchsten ist und das Wasser in der Nähe der Wurzeloberfläche bereits verbraucht sein kann. Die Pflanzen erholen sich von dieser temporären Stressreaktion am Abend und in der Nacht, wenn der Verdunstungsbedarf und die Transpirationsrate niedrig sind und die Wasserreserven nahe der Wurzeloberfläche wieder aufgefüllt werden. Anzeichen für schwereren oder anhaltenden Trockenstress sind ein niedriges Wasserpotenzial der Pflanze und die Schließung der Stomata in den Morgenstunden, wenn der Verdunstungsbedarf langsam steigt. Die Aufzeichnung tageszeitlicher Veränderungen des Wasserpotenzials oder der stomatären Leitfähigkeit oder die Messung des Wasserpotenzials vor der Morgendämmerung oder am frühen Morgen können Auslöser für die Bewässerung sein.

Sowohl das Wasserpotenzial (Stamm und Blatt) als auch die stomatäre Leitfähigkeit können manuell mit einer Druckkammer und einem Blattgasaustauschsystem bzw. einem Porometer gemessen werden. Selbst unter kontrollierten Versuchsbedingungen erfordern diese Methoden Fachwissen und sind recht mühsam und werden meist nur punktuell und nicht im Tagesverlauf durchgeführt. Die Messung des Wasserpotenzials im Stamm kann heutzutage automatisiert werden, indem Psychrometer (Dixon & Tyree, 1984; ICT International, 2023) oder Mikrotensiometer (FloraPulse, 2023; Pagay, 2022) während der gesamten Vegetationsperiode in den Stämmen installiert werden. Leider wurden diese Geräte hauptsächlich für Bäume und Weinstöcke und nicht für Ackerkulturen entwickelt. Das Gleiche gilt für die Messung des Saftstroms und des Stammdurchmessers (Eastham & Gray, 1998; Steppe et al., 2008; Van de Put & Steppe, 2022; Vandegehuchte & Steppe, 2012). Ein kleinerer Typ von Psychrometern (ICT International, 2023) kann für kontinuierliche, zeitaufgelöste Messungen des Blattwasserpotenzials in Kulturen mit einer maximalen Messdauer von etwa einer Woche verwendet werden; danach muss der Sensor an einem anderen Blatt angebracht werden. Diese können für die Feinabstimmung der Bewässerungsplanung auf der Grundlage des Bodenwassers, wie oben erwähnt, oder für die experimentelle Forschung zur Trockenheitsempfindlichkeit von Pflanzensorten und kritischen Wachstumsstadien von Pflanzen geeignet sein.

Die Blatt- oder Kronentemperatur ist ein Indikator für die stomatäre Leitfähigkeit und die Transpirationsrate (Jones, 1999). Die Temperatur wird auf der Grundlage der thermischen Infrarotmessung mit bodenbasierten Infrarot-Thermometern und Kameras oder mit Hilfe der Fernerkundung (meist unbemannte Flugzeuge und Satelliten) ermittelt (Maes & Steppe, 2012, 2019). In seiner ursprünglichen Anwendung wird ein Wasserstress-Index für Kulturpflanzen (crop water stress index, CWSI) auf der Grundlage der Differenz zwischen der Temperatur des Kronendachs und einer Basistemperatur ohne Wasserstress berechnet, die für jede Kulturpflanze (und potenziell jede Kultursorte) und agroklimatische Zone zu bestimmen ist (Gonzalez-Dugo & Zarco-Tejada, 2022; Idso, 1982; Idso, Jackson, et al., 1981; Jackson et al., 1981). Es wurden zahlreiche Anwendungen des CWSI für das Bewässerungsmanagement in Obst- und Rebflächen, aber auch für Ackerkulturen entwickelt (z. B. DeJonge et al. (2015); Garrot et al. (1994); Idso, Reginato, et al. (1981); Nakabuye et al. (2023); Rud et al. (2014)). Die meisten von ihnen haben gemeinsam, dass sie für Pflanzen entwickelt wurden, die unter Bedingungen mit hohem Dampfdruckdefizit (hohe Temperatur und niedrige relative Luftfeuchtigkeit) und hoher Strahlung (wolkenloser Himmel) angebaut werden, bei denen der Unterschied zwischen Luft- und Kronentemperatur ( $T_a - T_k$ ) für eine transpirierende Baumkrone gross ist. Es ist klar, dass solche Bedingungen in Klimazonen mit hohen klimatischen Schwankungen nicht gewährleistet sind (Jones, 1999). Unter bewölkten oder windigen Bedingungen oder bei geringerem Dampfdruckdefizit ist der Unterschied ( $T_a - T_k$ ) zwischen einer transpirierenden und einer nicht transpirierenden Pflanze viel geringer. Es wurden einige Arbeiten durchgeführt, um dieses Problem zu lösen, indem

die Auswirkungen der Umweltbedingungen modelliert und das Wasserpotenzial der Pflanzen zur Festlegung von Schwellenwerten im kleineren Bereich der  $(T_a - T_k)$ -Differenz verwendet wurden (Katz et al., 2023; Nakabuye et al., 2023). Eine Alternative für die Messung des Wasserpotenzials der Pflanzen oder der Kronentemperatur ist die Verwendung von Spektralinformationen, um Vegetationsindizes zu erhalten, die sich auf den Wasserstatus der Pflanzen beziehen (Wong et al., 2022; Zarco-Tejada et al., 2013), oder um Vorhersagemodelle für das Wasserpotenzial der Pflanzen auf der Grundlage von Spektralinformationen zu entwickeln (Tang et al., 2022).

Eine neuere pflanzenbasierte Messmethode basiert auf der Elektrophysiologie von Pflanzen (Fromm & Fei, 1998; Fromm & Lautner, 2007). Die Signalaufzeichnung durch einen elektrophysiologischen Sensor in Kombination mit Techniken des maschinellen Lernens für die Datenverarbeitung haben die Erkennung von Trockenstress und die Erholung bei Tomatenpflanzen im Gewächshaus gezeigt (Tran et al., 2019). Der Sensor und die Datenverarbeitungsalgorithmen sind derzeit kommerziell verfügbar und/oder werden von dem in der Schweiz basierten Unternehmen Vivent SA (Vivent SA, 2023) und dem französischen Startup-Unternehmen Vegetal Signals (Vegetal Signals, 2023) entwickelt. Vivent und Agroscope (Agroscope, 2023a) haben bei der Entwicklung von Anwendungen unter Gewächshaus-, Obstgarten- und Feldbedingungen zusammengearbeitet. Das Unternehmen hat seine Feldversuche zur Entwicklung von Anwendungen, einschliesslich der Erkennung von Trockenstress und Bewässerungsmanagement bei Kartoffeln, Zuckerrüben, Sojabohnen und Mais, weiter ausgebaut und die Sensoraufbauten an die Feldbedingungen angepasst (Abbildung 6-20) (Carrol Plummer, Vivent SA, persönliche Mitteilung, 18.08.2023).



Abbildung 6-20 Feldinstallation von Vivent Elektrophysiologie-Sensoren. (A) Zuckerrüben, (B, C) Kartoffeln. Quelle: Carrol Plummer, Vivent, 18.08.2023.

### Fernerkundung

Wie bereits erwähnt, verringert die Heterogenität der Felder die Genauigkeit der Bewässerungsempfehlungen, insbesondere wenn diese auf punktuellen Messungen (boden- oder pflanzenbasierte Sensoren) beruhen. Die Feldkenntnisse der Landwirte können dies teilweise kompensieren, stellen aber keine effektive Lösung dar. Die Abgrenzung von Feldzonen mithilfe von Messungen der elektrischen Leitfähigkeit ist eine weitere Option, die jedoch ebenfalls nicht ohne Weiteres verfügbar und aufgrund vieler (relevanter) Faktoren, die das Messergebnis beeinflussen, potenziell schwierig zu interpretieren ist (Hawkins et al., 2017). Ein grosser Vorteil der Fernerkundung sind die räumlich aufgelösten Informationen, die aus Kamera- und heutzutage auch aus Satellitendaten gewonnen werden. So liefert beispielsweise die kürzlich gestartete kommerzielle Satellitenkonstellation "Planet" zeitlich (täglich) und räumlich (etwa 3 m) hoch aufgelöste Daten (Dhungel et al., 2023; Planet Labs PBC, 2023). Die Leistungsfähigkeit von Fernerkundungsprodukten zur Darstellung des Wasserstressniveaus der Pflanzen wird dann zum wichtigsten Faktor für eine genaue Bewässerungsplanung. Die Erkennung einfacher Pflanzenreaktionen auf Stress, wie z. B. das Rollen von Blättern, Veränderungen der Blattfarbe, Welken und Veränderungen der dreidimensionalen Struktur der Baumkronen, kann gezielt eingesetzt werden. Eine weitere Option ist die Entwicklung von Prognosemodellen für physiologische Merkmale wie Wasserpotenzial und Transpirationsrate oder ein einfacher Stress/Nicht-Stress-Klassifikator, der auf sehr umfangreichen Trainingsdaten und maschinellen Lernansätzen basiert. Für jede dieser Optionen werden grosse Datensätze als Basisdaten und/oder Trainingsdaten benötigt. Die Modelle sind berüchtigt

dafür, dass sie entwicklungskontextspezifisch sind, was bedeutet, dass die Parameter für jede Kultur und sogar für die Sorten innerhalb der Kulturen, für eine breite Palette lokaler Klimaszenarien und möglicherweise auch für externe Faktoren wie die Hangneigung des Feldes angepasst werden müssen.

#### *Defizitbewässerung*

Was die Bewässerungsmenge betrifft, so können weitere Wassereinsparungen durch Defizitbewässerung erzielt werden. Das Ziel kann entweder sein, die Wasserproduktivität zu maximieren, ohne den Ertrag zu beeinträchtigen, oder die Bewässerung auf die empfindlichsten Pflanzenstadien zu beschränken, um den Ertrag zu stabilisieren statt zu maximieren (Chenafi et al., 2016; Geerts & Raes, 2009). Die Bestimmung der Auswirkungen des Ausmasses des Trockenstresses (Intensität und Dauer) und des Zeitpunkts in der Wachstumsaison (kritische Wachstumsstadien) auf die Biomasse, den Ertrag und die Qualitätsparameter der Pflanzen ist dann von entscheidender Bedeutung, um die Defizitbewässerung richtig zu steuern. Darüber hinaus sind diese Informationen für jede Sorte erforderlich, da die Auswirkungen eines Bodenwasserdefizits oder eines hohen Verdunstungsbedarfs unterschiedlich sein können, z. B. aufgrund der Variabilität der Phänologie und von Merkmalen wie der Tiefe des Wurzelsystems. Bei der Entwicklung und Optimierung von Strategien zur Defizitbewässerung ist es ratsam, Feldforschung mit der Modellierung der Wasserproduktivität von Pflanzen zu kombinieren (Geerts & Raes, 2009).

#### *Bewässerungsberatung*

Als Zwischenlösung zu betriebs-, feld- und flächenspezifischen Bewässerungsempfehlungen können Bewässerungsberatungsdienste nützlich sein, um Landwirte auf der Grundlage von Wetter- und Bodenwasserdaten an regionalen Messstationen (oder mit Hilfe von Satellitenprodukten ermittelt) oder über ein partizipatives Landwirtenetzwerk zu warnen. In der Region Seeland-Broye können Landwirte das Online-Tool "isb.swissrivers.ch" für Bewässerungsprognosen nutzen, das auch eine Warnung zur Verfügbarkeit von Flusswasserressourcen enthält (Thomet, 2016). In den Kantonen Waadt und Freiburg wird ein partizipatives wöchentliches Bewässerungsbulletin entwickelt (2023-2026), das auf einem Wasserbilanzmodell und der Überwachung von Kulturen und Böden in 14 Feldparzellen in den Regionen La Côte, Broye und Seeland basiert (Prométerre, 2023b). Der von Schweizer Hagel entwickelte Swiss Agro Index ist nicht als Bewässerungsberatung gedacht, liefert aber dennoch Hinweise auf potenzielle Ertragseinschränkungen durch atmosphärische Trockenheit in kritischen Wachstumsstadien von Ackerkulturen wie Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Weizen, Raps, Sojabohnen und Sonnenblumen in einer interaktiven Karte für die gesamte Schweiz (Schweizer Hagel, 2023).

#### *Wassereinsparungen und Verfügbarkeit regionaler Wasserressourcen*

Die Forschung zeigt, dass staatliche Anreize und die Förderung von wassersparenden Bewässerungsmassnahmen und -systemen nicht unbedingt zu einer geringeren Belastung der regionalen Wasserressourcen führen (Grafton et al., 2018). Eine unvollständige Bilanzierung der Ressourcen und unzureichend bewertete Reaktionen der Landwirte auf die Vorteile einer verbesserten Bewässerungseffizienz bilden die Grundlage für den sogenannten "Rebound-Effekt". Eine erhöhte Wasserentnahme wurde mit Änderungen der Kulturarten und Fruchtfolgen sowie einer allgemeinen Ausweitung der bewässerten Fläche in Verbindung gebracht, die durch geeignete Gegenmassnahmen vermieden werden können (Berbel et al., 2015; Pfeiffer & Lin, 2014).

### **6.7.2 Bewässerungsmanagement**

Das Bewässerungsmanagement umfasst die Planung, Organisation und Durchführung der Bewässerung. Neben Entscheidungen über den optimalen Zeitpunkt und die optimale Menge spielen auch agronomische, betriebswirtschaftliche, wirtschaftliche und externe Faktoren eine Rolle. Im schweizerischen Kontext mit relativ kleinen durchschnittlichen Parzellengrößen und Dürreperioden, die in Länge und Intensität innerhalb der Vegetationsperiode und zwischen den Jahren variieren können, ist ein flexibles Bewässerungsmanagement erforderlich. Dies steht im Gegensatz zu Situationen, in denen die Bewässerung aufgrund der zu bewirtschaftenden Fläche oder aufgrund langanhaltender und/oder schwerer Dürreperioden und geringer Schwankungen zwischen den Jahren eine sehr grosse Feldoperation darstellt. Das Bewässerungsmanagement kann dann mit Hilfe von Optimierungs- und Simulationsmodellen für die Bewässerungsplanung unterstützt werden. Ein Beispiel ist "Optirrig", das vom französischen Forschungsinstitut für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt (INRAe) entwickelt wurde (Box 6-3, Cheviron et al. (2020)).

Simulationsmodelle, die ein flexibles Bewässerungsmanagement für Ackerkulturen im schweizerischen landwirtschaftlichen Kontext und mit vollständiger Betriebskostenrechnung ermöglichen, könnten jedoch sowohl für Landwirte als auch für Beratungsdienste nützlich sein. Dies wäre eine Erweiterung der derzeit verwendeten Formulierung "Bewässerungswürdigkeit". Eine unterentwickelte Komponente ist wahrscheinlich die Simulation des erzielbaren Ertrags und der Qualität von Kulturpflanzen in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch unter Regen- und Bewässerungsbedingungen (Hodges et al., 2022; Li et al., 2018; Steduto et al., 2009). Eine weitere interessante Entwicklung im Bereich des Bewässerungsmanagements sind Instrumente zur Steuerung des Wassereinsatzes auf der Grundlage begrenzter Ressourcen und nicht des optimalen Bedarfs der Pflanze. Arvalis (Frankreich) hat beispielsweise ein strategisches Entscheidungsinstrument auf Betriebsebene entwickelt, das Fruchtfolgeszenarien je nach Wasserverfügbarkeit vergleicht (Arvalis, 2023).

Box 6-3 Optirrig: Erstellung, Analyse und Optimierung von Bewässerungsszenarien für Nutzpflanzen (Cheviron et al., 2020).

Optirrig basiert auf einer vereinfachten Beschreibung des Pflanzenwachstums (Blattflächenindex, Biomasseakkumulation) in Abhängigkeit von Veränderungen der Wasser- und Stickstoffressourcen im Boden. Es kann zum Vergleich der Vorzüge verschiedener Bewässerungsstrategien unter verschiedenen Bedingungen (Wasserquote, Zeiten begrenzter Verfügbarkeit, Entnahmebeschränkungen, Wasser- und Energiekosten) und für operative Ziele auf Parzellen-, Betriebs- oder regionaler Ebene verwendet werden. Es enthält mehrere Module, darunter eine hydro-agronomische Schleife, ein Modul zur Bewässerungseffizienz und ein Modul zur Betriebswirtschaft. Es ermöglicht die Simulation und Optimierung von Bewässerungsszenarien unter Berücksichtigung von Beschränkungen und meteorologischen Bedingungen. In der Gesamtbetrachtung sind die Schlüsselparameter des hydro-agronomischen Kreislaufs die Feldkapazität und die Profiltiefe (d.h. die korrekte Bestimmung der Nutzreserve) und die zentrale Variable ist der Blattflächenindex LAI. Das Effizienzmodul basiert auf einer Kaskade von Ereignissen zwischen der Quelle des Bewässerungswassers und der tatsächlichen Aufnahme und Transpiration der Pflanzen. Die Effizienz der Bewässerung und letztlich ihre Produktivität wird durch technische Verluste im System und eine Reihe strategischer Verluste bestimmt, die auf der Ebene der Ausbringung, der Bodenspeicherung, des Verbrauchs durch das Wurzelsystem und der Evapotranspiration beschrieben werden. Das System wurde für die Analyse vergangener Bewässerungsstrategien entwickelt, sobald alle Variablen bekannt sind, ermöglicht aber auch eine Optimierung in nahezu Echtzeit, um die Effizienz zu steigern. Ein typisches Optimierungsproblem besteht darin, die Szenarien zu finden, die den finanziellen Ertrag bei ausreichendem landwirtschaftlichem Ertrag, aber weniger Bewässerung als eine bestimmte Quote maximieren. Zusätzliche Beschränkungen bei der Formulierung von Bewässerungsszenarien (z. B. Wasserwechsel und technische Beschränkungen, begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen während bestimmter Zeiträume, Entnahmebeschränkungen) werden ebenfalls berücksichtigt.

### 6.7.3 Bewässerungsüberwachung

Für die Überwachung und Planung von Wasserressourcen auf regionaler Ebene sind qualitativ hochwertige Daten über die Wassernutzung für die öffentliche Trinkwasserversorgung, die Industrie und Freizeiteinrichtungen, die Energieerzeugung und die Landwirtschaft erforderlich. Die aktuelle Situation in der Schweiz mit fehlenden Daten zur landwirtschaftlichen Wassernutzung für die Bewässerung wurde im vom Bundesamt für Umwelt finanzierten Projekt Swiss Irrigation Info (HAFL et al. (Hrsg.), 2023) und insgesamt in der Antwort des Bundesrats auf das Postulat "18.3610 Rieder - Grundlagenbericht zur Wasserversorgungssicherheit und Wasserwirtschaft, 15. Juni 2018" (Conseil fédéral, 2022; Dübendorfer, Huwiler, Tratschin, et al., 2021) deutlich aufgezeigt. Neben der Zusammenstellung aktueller Informationen zur Bewässerung und der Erarbeitung von Empfehlungen für die künftige Datenerfassung hatte das Projekt Swiss Irrigation Info auch zum Ziel, auf Fernerkundung und Modellierung basierende Methoden zur Abschätzung des Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft zu entwickeln und die bestehenden Informationslücken zu schliessen (Agroscope, 2023b).

Satelliten zur Erdbeobachtung ermöglichen die Überwachung von Prozessen, die mit der Bewässerung zusammenhängen, z. B. Bodenfeuchtigkeit, Bodenbedeckung oder Vegetationsaktivität, und zwar relativ häufig und fast weltweit, was zu Forschungsarbeiten über die Ermittlung von bewässerten Flächen (Kartierung), die Häufigkeit der Bewässerung und die verbrauchte Wassermenge anhand von Satellitendaten geführt hat (European Commission, Defence Industry and Space, 2023; Massari et al., 2021). Eine Zusammenfassung des Potenzials

satellitengestützter Fernerkundungsbeobachtungen zur Erkennung von Bewässerungsinformationen aus dem Weltraum in Abhängigkeit vom Massstab der Anwendung (lokal, Einzugsgebiet, regional und global) findet sich in Anhang 11.2, Ergänzende Tabelle 11.2-5 (Massari et al., 2021).

Lösungen für die Kartierung und Abschätzung der Bewässerungswassernutzung wurden für Wassereinzugsgebiete in Marokko und Südfrankreich (Le Page et al., 2012, 2020), Australien (Bretreger et al., 2020; Peña-Arancibia et al., 2014), den USA (Deines et al., 2017), China (Jin et al., 2016) und Saudi-Arabien (Aragon et al., 2018) entwickelt. Diesen Beispielen ist gemeinsam, dass ihre Entwicklung auf extensiven Anbauflächen mit grossen Feldgrössen und unter Bedingungen starker Trockenheit (im Vergleich zu Schweizer Dürreszenarien) mit langen Dürrezeitreihen und geringer Klimavariabilität erfolgte. Dies steht in Kontrast zur Bewässerung unter Schweizer Bedingungen. Einem erster Versuch Bewässerungsereignisse zu erkennen, welche unabhängig von dem physiologischen Status der Pflanzen – also gegebenenfalls präventiv ohne einen Eintritt von Pflanzenstress – durchgeführt wurden, konnte in Schweizer Feldparzellen auf der Basis von Satellitendaten (die im Zeitrahmen des Projekts Swiss Irrigation Info zur Verfügung standen, Agroscope (2023b)) keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden. Daher sollte die Erkennung in Zukunft auf physiologische Merkmale von Stress fokussieren (Helge Aasen, Agroscope, persönliche Mitteilung, 24.08.2023). In einer Studie in Mittelitalien mit komplexen Feldkonfigurationen konnten die Bewässerungsmengen quantifiziert werden, aber hier waren Bewässerungsreferenzdaten für die Feldparzellen verfügbar (Maselli et al., 2020).

## 6.8 Fazit

### Zu wenig Bewässerungsdaten verfügbar für Ressourcenmanagement und Forschung

Aktuelle, quantitative Informationen über die Bewässerung in der Schweiz oder in den Kantonen sind nur teilweise oder gar nicht vorhanden bzw. nicht zentralisiert und nicht öffentlich zugänglich. Dies betrifft Daten über die entnommenen Wassermengen, die auf die Kulturen aufgebrauchten Mengen, die bewässerten Kulturarten, die bewässerte Fläche usw. Bewässerungsdaten ermöglichen eine bessere Bewirtschaftung der Wasserressourcen, die Validierung von Modellen für den Wasserbedarf von Kulturen und die Verringerung der Unsicherheiten bei Prognosen des Wasserbedarfs von Kulturen und des Bewässerungsbedarfs und liefern grundlegende Daten für die Entwicklung von Modellen zur Bewässerungssteuerung.

Das generelle Fehlen von (zentralen) Daten über die Bewässerung wirft eine Reihe von Problemen im Hinblick auf die allgemeine Bewirtschaftung und Planung der Wasserressourcen auf, sowohl auf territorialer Ebene (Bund, Kantone, Gemeinden) als auch auf Ebene der Einzugsgebiete. Dies wiederum erhöht die Unsicherheit für die weitere Entwicklung der Bewässerungsinfrastruktur, was durch den Strategievorschlag des Bundesamts für Landwirtschaft zur Strukturverbesserung unterstützt wird. Das Problem ist auf Bundes- und Kantonsebene als solches erkannt, und es sind wahrscheinlich Verbesserungen im Gange. Ob dies zu einer zentralen Datensammel- und -abrufstelle führen wird, bleibt fraglich.

Aus Sicht der Forschung und Entwicklung ist das Fehlen von räumlich und zeitlich aufgelösten Ground-Truth-Daten der Hauptgrund für die grosse Unsicherheit bei modellbasierten Schätzungen des Wasserbedarfs für die Bewässerung. Die prekäre Datenlage verhindert zudem das Training von **Bewässerungsmonitoringmodellen** auf der Basis von Satellitendaten; bei komplexen Feldkonfigurationen wie in der Schweiz kann die Entwicklung von satellitenproduktbasierten Instrumenten zur Bestimmung von Bewässerungsmengen durch die Nutzung von Referenzdaten zur Bewässerung unterstützt werden. Satellitendatenprodukte mit einer potenziell geeigneteren zeitlichen (Wiederholungszeit) und räumlichen Auflösung (Parzellenebene), wie sie beispielsweise bei Agroscope verfügbar sind, könnten die Entwicklung in diesem Sinne weiter vorantreiben. Dies steht im Zusammenhang mit der **Erkennung von Trockenstress bei Kulturen** und wird im Kapitel über Nutzpflanzen weiter erörtert (siehe Kapitel 7).

Frankreich hat einen zentralen Informationsdienst über die aus Oberflächen- und Grundwasserquellen entnommenen Wassermengen und deren Verwendung für die öffentliche Wasserversorgung, die Landwirtschaft, die Industrie und den Tourismus eingerichtet. Ein zweiter zentraler Dienst informiert über Einschränkungen der Wasserentnahme aus Oberflächen- oder Grundwasserressourcen. Ein solches Mass an Transparenz ist in der Schweiz wahrscheinlich noch nicht erforderlich, auch weil die Wasserbewirtschaftung im Wesentlichen eine kantonale Angelegenheit ist, kann aber in Betracht gezogen werden, um künftigen öffentlichen Konflikten zu begegnen.

### Wasserquellen in Regionen ohne Zugang zu nachhaltigen Oberflächen- oder Grundwasserressourcen für die Bewässerung

Die Entwicklung von **Wasserspeichern** wird vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Ländliche Entwicklung und Strukturverbesserungen gefördert, und zwar sowohl für lokale Lösungen in landwirtschaftlichen Betrieben (z. B. bis zu 100 m<sup>3</sup>) als auch für regionale Wasserspeicher, insbesondere in Regionen ohne Zugang zu nachhaltigen Wasserressourcen (derzeit meist Seen und in einigen Fällen Grundwasser).

Auch die Nutzung von **gereinigtem Abwasser** zu Bewässerungszwecken und/oder zum Ausgleich von Niedrigwassersituationen in Flüssen wird erforscht. Das BLW hat das Projekt in Auftrag gegeben, und eine Reihe interessierter Kantone des Mittellandes sind ebenfalls beteiligt. Neben den Investitionen und den potenziell höheren Wasserkosten können auch Probleme mit dem Salzgehalt für Pflanzen und Bewässerungsinfrastruktur auftreten. Das französische Forschungsinstitut für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt (INRAe) hat eine Versuchsplattform eingerichtet, auf der die Auswirkungen der Bewässerung mit gereinigtem Abwasser auf Pflanzen, Produkte, Böden und Geräte untersucht werden. Sie untersuchen auch die Anpassung der Abwasserbehandlung an die landwirtschaftliche Nutzung, d. h. an den Gehalt an Pflanzennährstoffen.

## Bodeneigenschaften sind für die Bewässerungssteuerung erforderlich

Kenntnisse über das Wasserhaltevermögen des Bodens und die Bodengründigkeit im Zusammenhang mit dem Bewässerungsmanagement und in Kombination mit der regionalen oder lokalen Verfügbarkeit von Wasserressourcen können eine weitere Informationsebene darstellen, die in landwirtschaftlichen Eignungskarten enthalten ist (siehe Kapitel 5). Instrumente zur Bewässerungssteuerung benötigen Schwellenwerte, um einen Auslösepunkt für die Bewässerung zu liefern. Diese können durch Kenntnisse über die Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens verbessert werden.

Das Bodenwasserpotenzial, d. h. die Stärke, mit der Wasser von den Bodenteilchen gehalten wird, ist ein guter Indikator für die Bestimmung des Bewässerungszeitpunkts, gibt aber keine Auskunft über die Wassermenge. Der Wassergehalt des Bodens ist in diesem Sinne besser. Wenn die Wasserrückhalteeigenschaften des Bodens bestimmt wurden, ist das Verhältnis zwischen Bodenwasserpotenzial und -gehalt bekannt, und es sind nur noch Messungen des Bodenwassergehalts erforderlich.

Im Hinblick auf die Optimierung von Bewässerungsentscheidungen (Zeitpunkt und Menge) können in der Schweiz weitere Schritte zur Entwicklung modellbasierter Bewässerungsempfehlungen unternommen werden.

## Technologische Lösungen zur Verbesserung der Wasserproduktivität und der Bewässerungseffizienz

Die Wasserproduktivität und insbesondere die Effizienz der Bewässerungsnutzung sind wichtige Themen, da der Bewässerungsbedarf und die Verfügbarkeit der Ressourcen noch immer mit Unsicherheiten behaftet sind. Bewässerungsprojekte müssen auch Massnahmen zur Effizienz der Bewässerungsnutzung enthalten, für die ein Bonus gewährt wird.

Angemessene **Ausbildung** von landwirtschaftlichen Beratern und Landwirten sowie offene **Diskussionen** zu diesem Thema sind wichtige Voraussetzungen, um **wirtschaftlich tragfähige und strukturelle oder langfristige Verbesserungen** zu erreichen. Technologische Lösungen, einschliesslich Sensorsysteme, müssen zuverlässig und stabil sein und gegebenenfalls im Hinblick auf die Art der Kultur und die Heterogenität der Felder richtig positioniert werden. Jeder schwerwiegende Ausfall oder eine Reihe kleinerer Fehler erhöht das Risiko, dass die Technologie aufgrund von Misstrauen aufgegeben wird.

Weitere Fortschritte bei den auf Bodensensoren basierenden Entscheidungshilfen für die Bewässerung können durch die Einbeziehung der mit **pflanzenbasierten Sensoren** gewonnenen Ergebnisse erzielt werden. Diese erkennen pflanzenphysiologische Reaktionen auf atmosphärisches oder Bodenwasserdefizit und können so bei der Feinabstimmung des Schwellenwerts für den Bodenwassergehalt helfen, der Trockenstress auslöst. Sie können auch dabei helfen, Unterschiede im Wasserbedarf zwischen den verschiedenen Wachstumsstadien der Pflanzen zu erkennen. Die Anwendung pflanzenbasierter Sensoren als Auslöser für die Bewässerung muss weiter erforscht und mit den derzeit auf dem Markt befindlichen Sensoren (sehr wenige für Ackerkulturen) getestet werden. So werden beispielsweise Sensoren zur Erkennung von elektrophysiologischen Signalen von Pflanzen für den Feldeinsatz bei Ackerkulturen angepasst. Ihre Wirksamkeit hängt von ihrer Stabilität unter Feldbedingungen und von den landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken ab. Die Qualität der Datenalgorithmen, einschliesslich ihrer Empfindlichkeit bei der Erkennung von Trockenheitsstress, der eine Bewässerung erforderlich macht, wird ihre Anwendung weiter bestimmen.

Aufgrund des Wasser- und Energiesparpotenzials der Tröpfchenbewässerung wird diese Art der Bewässerung nun auch im Ackerbau empfohlen. Dennoch muss noch Raum für die Umsetzung von Verbesserungen bei den Rollomaten und deren Einsatz bleiben. Dazu gehört auch die Einführung der **Präzisionsbewässerung auf der Grundlage von Feldkarten**. Für die Erstellung dieser Karten werden wahrscheinlich Fernerkundungs- oder Satellitendaten benötigt. Letztere sind potenziell besser geeignet, da sie ohnehin verfügbar sind (wenn auch für kommerzielle Produkte auf hohem Niveau zu einem Preis), doch müssen Wetterinstabilitäten und insbesondere die Bewölkung berücksichtigt werden. Diese Faktoren erschweren auch die Erfassung und Auswertung von Daten aus der Fernerkundung (Kamera). Für die Entwicklung von Trockenstressindizes, physiologischen Merkmalsmodellen oder Klassifikatoren für gestresst/nicht gestresst werden umfangreiche Datenmengen benötigt, die für jede Kultur und jede Pflanzensorte spezifisch sind (insbesondere in Bezug auf die Empfindlichkeit bei der Erkennung von

Trockenstress), und höchstwahrscheinlich auch externe Faktoren in Bezug auf den Standort (z. B. Feld, Boden, Wetter) und die agronomischen Praktiken. Diese Ground-Truth-Daten sind derzeit nicht verfügbar (siehe Kapitel 7).

### **Ausser bei Kartoffeln fehlen in der Schweiz Kenntnisse und Erfahrungen mit der Bewässerung von Ackerkulturen**

Die Kartoffelproduktion erfordert eine Bewässerung und gilt als bewässerungswürdige Kultur, während andere Ackerkulturen nicht bewässert werden können. Bewässerungsprojekte, die sich auf andere Ackerkulturen als Kartoffeln konzentrieren, werden nicht subventioniert. Es ist jedoch nicht auszuschliessen, dass diese Kulturen in Zukunft von der Bewässerung profitieren können, zumal trockenheitstolerante Sorten möglicherweise nicht sofort verfügbar sind. Daher muss in Vorbereitung darauf eine Wissensbasis geschaffen werden.

Im Falle der Kartoffel wurden Erfahrungen mit Bodensensoren gesammelt. Aufgrund des eher flachen Wurzelsystems der Kartoffel sind diese für die Bewässerungssteuerung geeignet. Die Schwellenwerte können, wie bereits angedeutet, durch pflanzenphysiologische Messungen (oder pflanzengestützte Sensoren) weiter feinabgestimmt werden.

Insgesamt und insbesondere für andere Ackerkulturen muss die Erforschung der **Auswirkungen der Bewässerung auf Ertrag und Qualität**, die Anwendung der Bewässerung in kritischen Wachstumsstadien und die Bewässerungsmengen zur Erzielung einer optimalen Wasserproduktivität noch in Angriff genommen werden. Ausserdem kann anhand der in Sortenversuchen gesammelten Daten in einem ersten Schritt untersucht werden, wie sich **Trockenheit und Hitze** auf Ertrag und Qualität ausgewirkt haben (siehe auch Kapitel 7).

### **Ein Kompetenzzentrum "Bewässerung" oder "Landwirtschaft im Klimawandel"?**

Die Herausforderung des Klimawandels wird für die landwirtschaftliche Produktion und die Betriebsführung immer komplexer. Ein Bewässerungsleitfaden für die Entwicklung von Bewässerungsprojekten ist in Arbeit, und eine neue Plattform für den Austausch zum Thema Bewässerung ist in Vorbereitung. Man könnte sich fragen, ob diese Initiativen ausreichen, um die verschiedenen **Dimensionen der Bewässerung**, u.a. Wasserverfügbarkeit, Infrastruktur und Technologie, Pflanzenphysiologie und Wasserbedarf, und ihre Anwendung in der Praxis zu behandeln.

Gleichzeitig benötigen die Landwirte eine Diskussions- und Austauschplattform sowie angemessene (betriebsangepasste, wirtschaftliche und zuverlässige) Lösungen für die Bewässerung. Die Komplexität wird durch die Dimension der **Bodenbewirtschaftung** und die Wahl **geeigneter Kulturen und Sorten** im Einklang mit der Optimierung der **Fruchtfolgen** in Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit noch erhöht. Im Hinblick auf die Herausforderungen des Klimawandels kann der Geltungsbereich sogar noch weiter auf die Viehzucht ausgeweitet werden.

Zu den Aufgaben eines Kompetenzzentrums könnten unter anderem gehören:

- Projektkoordination
- Entwicklung von technischen Lösungen für die Bewässerungssteuerung
- Plattform für Feldversuche mit Bewässerung, um die Reaktionen von Pflanzen und Sorten zu testen
- Entwicklung von agronomischen Massnahmen
- Organisation von Demonstrationsversuchen und Veranstaltungen
- Informationsaustausch, Entwicklung von Lehrmaterial usw.

## 6.9 Literaturverzeichnis

- Agroscope. (2023a). Agroscope. Gutes essen, gesunde Umwelt. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home.html>
- Agroscope. (2023b). Wie viel Wasser braucht die Schweizer Landwirtschaft jetzt und in Zukunft? <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/klima-lufthygiene/landwirtschaft-im-klimawandel/swissirrigationinfo.html>
- Ait-Mouheb, N., Bahri, A., Thayer, B. B., Benyahia, B., Bourrié, G., Cherki, B., Condom, N., Declercq, R., Gunes, A., Héran, M., Kitir, N., Molle, B., Patureau, D., Pollice, A., Rapaport, A., Renault, P., Riahi, K., Romagny, B., Sari, T., ... Harmand, J. (2018). The reuse of reclaimed water for irrigation around the Mediterranean Rim: A step towards a more virtuous cycle? *Regional Environmental Change*, 18(3), 693–705. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1292-z>
- ALB Bayern e.V. (2023). BEWÄSSERUNGS-APP. [https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/Steuerungsmodelle/steuerung-berechnung-entscheidungshilfe\\_BewaesserungsApp.html?expert=true](https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/Steuerungsmodelle/steuerung-berechnung-entscheidungshilfe_BewaesserungsApp.html?expert=true)
- Amt für Landwirtschaft, Kanton Solothurn. (2022). Bewässerung in der Landwirtschaft. Resultate der Umfrage September 2022 (S. 6). <https://so.ch/verwaltung/volkswirtschaftsdepartement/amt-fuer-landwirtschaft/landschaft-und-pflanzen/klimawandel/>
- ANBI. (2023). Irriframe-il portale dell'irrigazione. <https://www.irriframe.it/irriframe>
- Aquapool Genossenschaft Steinmaur. (2023). Aquapool Genossenschaft Steinmaur. <https://agst.ch/>
- Aragon, B., Houborg, R., Tu, K., Fisher, J. B., & McCabe, M. (2018). CubeSats enable high spatiotemporal retrievals of crop-water use for precision agriculture. *Remote Sensing*, 10(12), 1867. <https://doi.org/10.3390/rs10121867>
- Ariespace srl. (2023). Irrisat. <https://www.irrisat.com/en/home-2>
- Arvalis. (2023). Quelles stratégies d'assolement en volume d'eau limité? <https://www.arvalis.fr/l-institut/nos-actualites/quelles-strategies-dassolement-en-volume-deau-limite>
- Arvalis-Institut du végétal (Hrsg.). (2017). Matériels d'irrigation des grandes cultures. Éditions Arvalis.
- Arvalis-Institut du végétal. (2023). Irré-LIS. <https://irrelis.arvalisinstitutduvegetal.fr/>
- Aschwanden, H., & Kan, C. (1999). Die Abflussmenge Q347. Eine Standortbestimmung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Hydrologische Mitteilungen LHG, 27, 129.
- ATS KEYSTONE-SDA-ATS AG. (2023). PA22+ adoptée sans exigences supplémentaires pour la biodiversité. [https://www.parlament.ch/fr/services/news/Pages/2023/20230607085146582194158159038\\_bsf029.aspx](https://www.parlament.ch/fr/services/news/Pages/2023/20230607085146582194158159038_bsf029.aspx)
- Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C., Rodríguez-Díaz, J. A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2015). literature review on rebound effect of water saving measures and analysis of a spanish case study. *Water Resources Management*, 29(3), 663–678. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0839-0>
- Bohainenko, V., Romashchenko, M., Sardak, A., & Gladky, A. (2023). Mathematical modelling technique to mitigate soil moisture measurement inaccuracies under the conditions of drip irrigation. *Irrigation Science*, 41(3), 413–424. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00835-6>
- Bravin, E., Carint, D., Zürcher, M., & Mouron, P. (2023). Arbokost [Software]. Agroscope. [arbokost.agroscope.ch](http://arbokost.agroscope.ch)
- Bretreger, D., Yeo, I.-Y., Hancock, G., & Willgoose, G. (2020). Monitoring irrigation using landsat observations and climate data over regional scales in the Murray-Darling Basin. *Journal of Hydrology*, 590, 125356. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125356>

- Brunner, M. I., Björnson Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of The Total Environment*, 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2023). SwissBOUNDARIES3D. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/boundaries3d.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2021). Weisungen und Erläuterungen vom 1. Januar 2021 zur Verordnung über die Strukturverbesserungen in der Landwirtschaft (Strukturverbesserungsverordnung, SVV; SR 913.1) vom 7. Dezember 1998 (Stand am 11. November 2020).
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2023a). Strategie Strukturverbesserungen 2030+ (Bericht in Erfüllung des Auftrags der Finanzkommission des Nationalrats an das BLW vom 22.02.2022 BLW-421.00-6261/4; S. 36). <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-95157.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2023b). Weisungen vom 1. Januar 2023 zur Verordnung über die Strukturverbesserungen in der Landwirtschaft (Strukturverbesserungsverordnung, SVV; SR 913.1) vom 2. November 2022.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023a). Automatisches Messnetz. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/messsysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023b). Erläuterungen der Gefahrenstufen. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/gefahren/erlaeuterungen-der-gefahrenstufen.html>
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023c). Klima der Schweiz. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz.html>
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023d). Trockenheitsindikatoren. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel/hitze-trockenheit-kaelte-und-schnee/klima-indikatoren/trockenheitsindikatoren.html>
- Bundesamt für Statistik BFS. (2022). Landwirtschaftsbetriebe: Bewässerung im Freiland im Kalenderjahr nach Grössenklasse LN. [https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000\\_227](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000_227)
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023). Landwirtschaftliche Betriebe und Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) auf Klassifizierungsebene 3 nach Kanton. [https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000\\_106](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000_106)
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2004). Wegleitung Grundwasserschutz. Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/wegleitung-grundwasserschutz.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2023a). Basismessnetz: Wasserstand und Abfluss an Oberflächengewässern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--messnetze/basismessnetz--wasserstand-und-abfluss-an-oberflaechengewaessern.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2023b). Grundwasser- und Gewässerschutzkarten. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/karten-und-abgeleitete-daten/grundwasser--und-gewaesserschutzkarten.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2023c). Grundwasserregime. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-des-grundwassers/grundwasser-quantitaet/grundwasserregime.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2023d). Hydrologische Daten und Vorhersagen, Übersichtskarten. <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/aktuelle-lage>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2023e). Messnetze Wassertemperatur. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--messnetze/messnetz-wassertemperatur.html#582415345>

- Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie. (2023). Datenservice Hydrologie. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/daten/messwerte-zum-thema-wasser-beziehen/datenservice-hydrologie-fuer-flieessgewaesser-und-seen/datenservice-hydrologie--verfuegbare-produkte--mit-beispielen-.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU et al. (Hrsg.). (2019). La canicule et la sécheresse de l'été 2018. Impacts sur l'homme et l'environnement. (Umwelt-Zustand Nr. 1909, S. 91). Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/canicule-et-secheresse.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.). (2016). Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (Umwelt-Zustand Nr. 1629, S. 108). Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-und-trockenheit.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.). (2019). Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. (Umwelt-Zustand Nr. 1901, S. 138). Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/uz-1901-d>
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.). (2021). Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft (Umwelt-Wissen Nr. 2101, S. 134). Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-schweizer-gewaesser.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU, & Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA. (2023). Daten der nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-des-grundwassers/grundwasser-quantitaet/grundwasserstaende-und-quellabfluesse.html>
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2022). Erntebericht 2022. Mengen und Preise. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau/ernte-2022.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV. (2016). Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Texte 34/2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_34\\_2016\\_rahmenbedingung\\_en\\_fuer\\_die\\_umweltgerechte\\_nutzung\\_von\\_behandeltem\\_abwasser\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_34_2016_rahmenbedingung_en_fuer_die_umweltgerechte_nutzung_von_behandeltem_abwasser_0.pdf)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV. (2023a). Das Wasserhaushaltsgesetz. <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/gewaesserschutzrecht/deutschland/das-wasserhaushaltsgesetz>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV. (2023b). Nationale Wasserstrategie. <https://www.bmu.de/download/nationale-wasserstrategie-2023>
- Canton de Vaud, Direction générale de l'environnement. (2023). Veille Hydro-météorologique du Canton de Vaud. [https://www.vhv.ch/xt\\_vh\\_718536/index.php?ck3\\_page\\_reloaded=1](https://www.vhv.ch/xt_vh_718536/index.php?ck3_page_reloaded=1)
- Cavero, J., Medina, E. T., Puig, M., & Martínez-Cob, A. (2009). Sprinkler irrigation changes maize canopy microclimate and crop water status, transpiration, and temperature. *Agronomy Journal*, 101(4), 854–864. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0224x>
- Chambre d'agriculture et Conseil départemental de la Haute-Garonne OGAYA (Regisseur). (2023). Le goutte à goutte enterré en Grandes Cultures? <https://www.youtube.com/watch?v=as1ICzXeSHY>
- Chenafi, A., Monney, P., Arrigoni, E., Boudoukha, A., & Carlen, C. (2016). Influence of irrigation strategies on productivity, fruit quality and soil-plant water status of subsurface drip-irrigated apple trees. *Fruits*, 71, 69–78. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015048>.

- Cheviron, B., Serra-Wittling, C., Dominguez Bohorquez, J. D., Molle, B., Lo, M., Elamri, Y., & Delmas, M. (2020). Efficiencie et optimisation de l'irrigation: Le modèle Optirrig. *Sciences Eaux & Territoires*, 34, 66–71.
- Conseil fédéral. (2022). Rapport de base sur la sécurité de l'approvisionnement en eau et sur la gestion de l'eau (Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.3610 Rieder du 15 juin 2018, S. 30). Le Conseil fédéral. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/71508.pdf>
- Consultations publiques. (2023). Projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures et projet d'arrêté relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts. <https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-d-arrete-relatif-aux-conditions-de-a2861.html>
- CSD Ingénieurs SA, & acadé sarl. (2020). Office Cantonal de l'Agriculture et de la Nature. Irrigation des terres agricoles. Rapport de synthèse (S. 91). <https://agriculture-durable-geneve.ch/fr/changements-climatiques/irrigation>
- Deines, J. M., Kendall, A. D., & Hyndman, D. W. (2017). Annual irrigation dynamics in the U.S. northern high plains derived from landsat satellite data. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9350–9360. <https://doi.org/10.1002/2017GL074071>
- DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>
- Der Bundesrat. (2022, Mai 18). Trockenheit: Bundesrat will nationales System zur Früherkennung und Warnung. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/mitteilungen.msg-id-88854.html>
- Deutscher Wetterdienst. (2023). Agrowetter Berechnung. [https://www.dwd.de/DE/leistungen/agrowetter\\_berechnung/agrobereg.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/agrowetter_berechnung/agrobereg.html)
- Dhungel, R., Anderson, R. G., French, A. N., Skaggs, T. H., Saber, M., Sanchez, C. A., & Scudiero, E. (2023). Early season irrigation detection and evapotranspiration modeling of winter vegetables based on Planet satellite using water and energy balance algorithm in lower Colorado basin. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00874-7>
- Direction générale de l'environnement, & Division Ressources en Eau et économie hydraulique (DGE-EAU). (2023). Etat des restrictions de pompage en rivière. <https://www.vd.ch/themes/environnement/eaux/lacs-et-cours-deau-espace-reserve-aux-eaux-cheminement-entretien-amenagement-hydrologie/interdiction-saisonniere-de-pompage-en-rivieres>
- DISTATIS Statistisches Bundesamt. (2017). Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben /Agrarstrukturerhebung. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/betriebe-bewaesserung-5411205169004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/betriebe-bewaesserung-5411205169004.pdf?__blob=publicationFile)
- DISTATIS Statistisches Bundesamt. (2021). Landwirtschaftliche Betriebe mit Bewässerungsmöglichkeit auf Freilandflächen—Ohne Frostschutzberechnung—Und bewässerte Fläche 2019. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Tabellen/bewaesserungsmoeglichkeiten.html>
- Dixon, M. A., & Tyree, M. T. (1984). A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell & Environment*, 7(9), 693–697. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11572454>
- Domaine de l'eau, S. de l'Environnement, Etat de Fribourg. (2023). Sécheresse: Information destinée aux bénéficiaires d'autorisations de pompage. <https://www.fr.ch/energie-agriculture-et-environnement/eau/lacs-et-cours-deau/utilisation-de-leau/prelevement-deau>

- Drissner, D., & Neuweiler, R. (2017). Empfehlung zur Beurteilung der mikrobiologischen Qualität von Bewässerungswasser und Ernteprodukt im Salatanbau. Agroscope Merkblatt, 61, 1–4.
- Dübendorfer, C., Huwiler, A., Reinecke, T., Spycher, S., & Zysset, A. (2021). Handlungsoptionen entlang kleiner und mittlerer Gewässer bei Sommertrockenheit: Regionale Wasserspeicherung (Projekt B.04 im Rahmen des Pilotprogramms des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel, S. 32). <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/projekphase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-0/b-04-wasserspeicher-fuer-die-bewaesserung.html>
- Dübendorfer, C., Huwiler, A., Tratschin, R., Zysset, A., & Haering, B. (2021). Hintergrundbericht Wassernutzungsdaten. Grundlage zur Beantwortung des Postulats Rieder 18.3610 (S. 34) [Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)]. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home.html>
- Eastham, J., & Gray, S. A. (1998). A Preliminary Evaluation of the Suitability of Sap Flow Sensors for Use in Scheduling Vineyard Irrigation. American Journal of Enology and Viticulture, 49(2), 171–176. <https://doi.org/10.5344/ajev.1998.49.2.171>
- eaufrance. (2023). eaufrance. Le service public d'information sur l'eau. <https://www.eaufrance.fr/>
- eaufrance BNPE. (2022). L'infographie annuelle de la BNPE (S. 5). Office français de la biodiversité. <https://bnpe.eaufrance.fr/prelevements-france>
- eaufrance BNPE. (2023). Données sur les prélèvements en eau. <https://bnpe.eaufrance.fr/>
- Ebenrain Zentrum für Landwirtschaft, Natur und Ernährung. (2023). «Slow Water» für unsere Kulturlandschaft. <https://www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/volkswirtschafts-und-gesundheitsdirektion/landw-zentrum-ebenrain/landwirtschaft/slow-water>
- Ecoplan, & Sofies-Emac. (2020). Landwirtschaft und Bewässerung im Klimawandel – Anpassung als Chance! - Grundlagenbericht für die Region Bünzthal (S. 127).
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). (2013). Drought.ch. <https://drought.wsl.ch/de/index.html>
- Etat de Fribourg. (2023). RSF 750.1—Loi sur le domaine public (LDP). Etat de Fribourg. [https://bdlf.fr.ch/app/fr/texts\\_of\\_law/750.1](https://bdlf.fr.ch/app/fr/texts_of_law/750.1)
- ETH Zürich, Institute for Atmospheric and Climate Science. (2008). Swiss Soil Moisture EXperiment (SwissSMEX). <https://iac.ethz.ch/group/land-climate-dynamics/research/swissmex.html>
- EUR-Lex. (2014). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>
- EUR-Lex. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>
- European Commission. (2023). Common agricultural policy. Agriculture and Rural Development. [https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy_en)
- European Commission, Defence Industry and Space. (2023). Copernicus. [https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/copernicus\\_en](https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/copernicus_en)
- European Court of Auditors. (2019). Special Report. Sustainable water use in agriculture: CAP funds more likely to promote greater rather than more efficient water use. [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21\\_20/SR\\_CAP-and-water\\_EN.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21_20/SR_CAP-and-water_EN.pdf)
- Eurostat. (2019a). Agri-environmental indicator—Irrigation. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_irrigation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_irrigation)

- Eurostat. (2019b). Share of irrigable and irrigated areas in utilised agricultural area (UAA) by NUTS 2 regions. Eurostat Data Browser. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei\\_ef\\_ir/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei_ef_ir/default/table?lang=en)
- Eurostat. (2021). Main crops by NUTS 2 regions. Eurostat Data Browser. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/EF\\_LAC\\_MAIN\\_custom\\_6463715/default/table](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/EF_LAC_MAIN_custom_6463715/default/table)
- Eurostat. (2023). Land use: Number of farms and areas of different crops by agricultural size of farm (UAA) and NUTS 2 regions. Eurostat Data Browser. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/EF\\_OLUAAREG\\_custom\\_6471793/default/table](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/EF_OLUAAREG_custom_6471793/default/table)
- Fan, J., Lu, X., Gu, S., & Guo, X. (2020). Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 241, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106352>
- FAO. (2023). AQUASTAT - Irrigated crop calendars. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/aquastat/en/>
- FloraPulse. (2023). FloraPulse: The most accurate irrigation guidance for orchards and vineyards. <https://www.florapulse.com/>
- Fromm, J., & Fei, H. (1998). Electrical signaling and gas exchange in maize plants of drying soil. *Plant Science*, 132(2), 203–213. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00010-7)
- Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants: Electrical signals in plants. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 249–257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
- Fuhrer, J., & Smith, P. (2015). Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft (S. 30) [Auftraggeber: Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft; Ein Projekt im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel, gefördert durch das Bundesamt für Umwelt BAFU]. Agroscope.
- Garrot, D. J., Ottman, M. J., Fangmeier, D. D., & Husman, S. H. (1994). Quantifying wheat water stress with the crop water stress index to schedule irrigations. *Agronomy Journal*, 86(1), 195–199. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010034x>
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Gmünder, C. (2017, November 10). Wird die Bewässerung im Thurtal zur Konkurrenz der Trinkwasserversorgung? Eawag-CHYN-PEAK-Kurses Landwirtschaft und Grundwasser. [https://www.simultec.ch/files/theme/pdf/20171110\\_gmuender.pdf](https://www.simultec.ch/files/theme/pdf/20171110_gmuender.pdf)
- Gonzalez-Dugo, V., & Zarco-Tejada, P. J. (2022). Assessing the impact of measurement errors in the calculation of CWSI for characterizing the water status of several crop species. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00819-6>
- Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D., & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748–750. <https://doi.org/10.1126/science.aat9314>
- Granier, J. M., Molle, B., Deumier, J. M., & Lacroix, B. (2003). Optimisation des réglages et de l'utilisation des systèmes d'irrigation par canon enrouleur. *Ingénieries eau-agriculture-territoires, spécial Technologies pour les agrosystèmes durables*, 135.
- HAFL et al. (Hrsg.). (2023). Datengrundlage und künftige Datenerfassung zur landwirtschaftlichen Bewässerung in der Schweiz Projekt «Swiss Irrigation Info»: Schlussbericht Modul 1 (S. 94). Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen. <https://bewaesserungsnetz.ch/assets/files/Schlussbericht-Modul-1-190427.pdf>

- Hawkins, E., Fulton, J., & Port, K. (2017). Using soil electrical conductivity (EC) to delineate field variation. FABLE-565, Agriculture and Natural Resources. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-565#:~:text=High%20clay%20content%20will%20have,conductivity%2C%20directly%20influencing%20yield%20potential.>
- Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). (2023). Bewässerungsnetz.ch. <https://bewaesserungsnetz.ch/>
- Hodges, B., Tagert, M. L., & Paz, J. O. (2022). Use of a crop model and soil moisture sensors for estimating soil moisture and irrigation applications in a production soybean field. *Irrigation Science*, 40(6), 925–939. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00802-1>
- Hofer, S., Egli, T., Steingruber, N., & Lehner, M. (2017). Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel «Umgang mit Wasserknappheit in der Thurgauer Landwirtschaft» (S. 74). Amt für Umwelt Kanton Thurgau / Landwirtschaftsamt Kanton Thurgau, Egli Engineering. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/pilotprogramm-anpassung-an-den-klimawandel2/pilotprogramm-anpassung-an-den-klimawandel/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-pilotprojekt-zur-anpassung-an-den-klimawandel--entwicklung-von-i.html>
- Holzschläger, A., Cochand, F., Rössler, O., Brunner, P., & Hunkeler, D. (2020). AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. *Agroscope*. <https://doi.org/10.34776/NCCS21AA>
- Hsiao, T. C., Steduto, P., & Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25(3), 209–231. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0063-2>
- Hunkeler, D., Malard, A., Arnoux, M., Jeannin, P., & Brunner, P. (2021). Effect of climate change on groundwater quantity and quality in Switzerland. Hydro-CH2018 Project. (S. 80). Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN). <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/externe-studien-berichte/hydro-ch2018-groundwater.pdf.download.pdf/hydro-ch2018-groundwater.pdf>
- ICT International. (2023). PSY1 psychrometer for plant water potential. <https://ictinternational.com/product/psy1-psychrometer-for-plant-water-potential/>
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27(1–2), 59–70. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90020-6)
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Idso, S. B., Reginato, R. J., Jackson, R. D., & Pinter, P. J. (1981). Measuring yield-reducing plant water potential depressions in wheat by infrared thermometry. *Irrigation Science*, 2(4), 205–212. <https://doi.org/10.1007/BF00258374>
- Ihuoma, S. O., & Madramootoo, C. A. (2017). Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.026>
- INRAE. (2020). Irriguer avec des eaux usées traitées: Une plateforme expérimentale. <https://www.inrae.fr/actualites/irriguer-eaux-usees-traitees-plateforme-experimentale>
- INRAE. (2022). Changement climatique et risques. Le partage de l'eau dans les territoires. <https://www.inrae.fr/dossiers/lagriculture-va-t-elle-manquer-deau/partage-leau-territoires>
- IT-Direkt Business Technologies GmbH. (2023). Raindancer. <https://www.raindancer.com/DE/>
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133–1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

- Jin, N., Tao, B., Ren, W., Feng, M., Sun, R., He, L., Zhuang, W., & Yu, Q. (2016). Mapping irrigated and rainfed wheat areas using multi-temporal satellite data. *Remote Sensing*, 8(3), 207. <https://doi.org/10.3390/rs8030207>
- Jones, H. G. (1990). Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience*, 25(1), 19–25.
- Jones, H. G. (1999). Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell & Environment*, 22(9), 1043–1055. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00468.x>
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Kanton Aargau, Fachbereich Hydrometrie. (2023). Hydrometrie. <https://www.ag.ch/app/hydrometrie/liste/>
- Kanton Bern. (2023). Geoportal Kanton Bern. <https://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?>
- Kanton Freiburg. (2023). Warnsystem für Wasserabfluss und Niederschlag. <https://fribourg.swissrivers.ch/hydromap?site=fribourg>
- Kanton Solothurn. (2023). Hydrometrie. <https://so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/umweltdaten/wasser/hydrometrie/karten/>
- Kanton Zürich. (2023). Abfluss & Wasserstand. <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/wasser-gewaesser/messdaten/abfluss-wasserstand.html>
- Kantone der Ostschweiz und das Fürstentum Liechtenstein sowie Nidwalden, Schwyz und Uri. (2011). OSTboden. <https://www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch/>
- Kantone Schaffhausen und Thurgau. (2023). Das Wasserportal Thurgau—Schaffhausen. <http://hydrodaten.tg.ch/app/index.html#Wasserstand>
- Kantone Solothurn, Aargau und Basel-Landschaft. (2011). Bodenmessnetz. <https://bodenmessnetz.ch/>
- Katz, L., Ben-Gal, A., Litaor, M. I., Naor, A., Peres, M., Peeters, A., Alchanatis, V., & Cohen, Y. (2023). A spatiotemporal decision support protocol based on thermal imagery for variable rate drip irrigation of a peach orchard. *Irrigation Science*, 41(2), 215–233. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00830-x>
- Kompetenzzentrum Bewässerung. (2023). Kompetenzzentrum Bewässerung KoBe. <http://www.kompetenzzentrum-bewaesserung.at/>
- Kompetenzzentrum Boden. (2023). Messnetz zur Bodenfeuchte der MeteoSchweiz entsteht. <https://ccsols.ch/de/messnetz-zur-bodenfeuchte-der-meteoschweiz-ist-am-entstehen/>
- Lacroix, B., Berrodier, M., Gendre, S., Molle, B., Dejean, C., Deumier, J.-M., Fontaine, B., & Bouthier, A. (2015). What interest of drip irrigation for cash crops in France? 6. [https://icid2015.sciencesconf.org/75846/75846\\_Bernard\\_Lacroix.pdf](https://icid2015.sciencesconf.org/75846/75846_Bernard_Lacroix.pdf)
- Lanz, Klaus, Wechsler, Tobias, Reynard, Emmanuel, Calianno, Martin, & Milano, Marianne. (2020). Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. *International water affairs*, Evillard. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4110314>
- Le Page, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, L., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., & Chehbouni, G. (2012). An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing. The case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water Resources Management*, 26(11), 3209–3230. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0068-3>
- Le Page, M., Jarlan, L., El Hajj, M. M., Zribi, M., Baghdadi, N., & Boone, A. (2020). Potential for the detection of irrigation events on maize plots using Sentinel-1 soil moisture products. *Remote Sensing*, 12(10), 1621. <https://doi.org/10.3390/rs12101621>

- Les agences de l'eau. (2023). Les agences de l'eau. <https://www.lesagencesdeleau.fr/les-agences-de-leau/priorites-et-missions>
- Li, J., Song, J., Li, M., Shang, S., Mao, X., Yang, J., & Adedoye, A. J. (2018). Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 208, 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.029>
- Linder, Z. (2021). Climate change impacts on irrigation water resource available from rivers in Switzerland [Master's thesis, University of Bern]. <https://occrdata.unibe.ch/students/theses/msc/461.pdf>
- Loy, S., Assi, A. T., Mohtar, R. H., Morgan, C., & Jantrania, A. (2018). The effect of municipal treated wastewater on the water holding properties of a clayey, calcareous soil. *Science of The Total Environment*, 643, 807–818. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.104>
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: A review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), 4671–4712. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers165>
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- Magesan, G. N., Williamson, J. C., Yeates, G. W., & Lloyd-Jones, A. R. (2000). Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. *Bioresource Technology*, 71(1), 21–27. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00054-1)
- Maselli, F., Battista, P., Chiesi, M., Rapi, B., Angeli, L., Fibbi, L., Magno, R., & Gozzini, B. (2020). Use of Sentinel-2 MSI data to monitor crop irrigation in Mediterranean areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 102216. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102216>
- Massari, C., Modanesi, S., Dari, J., Gruber, A., De Lannoy, G. J. M., Giroto, M., Quintana-Seguí, P., Le Page, M., Jarlan, L., Zribi, M., Ouaadi, N., Vreugdenhil, M., Zappa, L., Dorigo, W., Wagner, W., Brombacher, J., Pelgrum, H., Jaquot, P., Freeman, V., ... Brocca, L. (2021). A review of irrigation information retrievals from space and their utility for users. *Remote Sensing*, 13(20), 4112. <https://doi.org/10.3390/rs13204112>
- Meli, S., Porto, M., Belligno, A., Bufo, S. A., Mazzatura, A., & Scopa, A. (2002). Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition. *Science of The Total Environment*, 285(1–3), 69–77. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00896-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00896-8)
- Merchán, D., Causapé, J., Abrahão, R., & García-Garizábal, I. (2015). Assessment of a newly implemented irrigated area (Lerma Basin, Spain) over a 10-year period. I: Water balances and irrigation performance. *Agricultural Water Management*, 158, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.016>
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2023). Bienvenue sur PROPLUVIA. Le site de l'information sécheresse du Gouvernement. <https://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluviapublic/>
- Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. (2021). Infographics—Farming France. <https://agriculture.gouv.fr/infographics-farming-france>
- Mittelbach, H., & Seneviratne, S. I. (2012). A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: Temporal dynamics versus time-invariant contributions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2169–2179. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2169-2012>
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., & Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In J. W. Kijne, R. Barker, & D. Molden (Hrsg.), *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (1. Aufl., S. 1–18). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0001>
- Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M., & Granier, J. (2012). Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. *Irrigation and Drainage*, 61(2), 240–250. <https://doi.org/10.1002/ird.648>

- Nakabuye, H. N., Rudnick, D. R., DeJonge, K. C., Ascough, K., Liang, W., Lo, T. H., Franz, T. E., Qiao, X., Katimbo, A., & Duan, J. (2023). Weather data-centric prediction of maize non-stressed canopy temperature in semi-arid climates for irrigation management. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00863-w>
- National Centre for Climate Services NCCS. (2022). B.04 Wasserspeicher für die Bewässerung. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/projektephase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-0/b-04-wasserspeicher-fuer-die-bewaesserung.html>
- National Centre for Climate Services NCCS. (2023a). Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100. [https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl\\_hds/NULL](https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds/NULL)
- National Centre for Climate Services NCCS. (2023b). Pilotprogramm zur Anpassung an den Klimawandel. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak.html>
- National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.). (2018). CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/ch2018-webatlas.html>
- Orouskhani, E., Sahoo, S., Agyeman, B., Bo, S., & Liu, J. (2023). Impact of sensor placement in soil water estimation: A real-case study. *Irrigation Science*, 41(3), 395–411. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00845-y>
- OSIRIS agriculture. (2023). Oscar. Le premier robot d'irrigation autonome et polyvalent pour les cultures d'industries européennes. <https://www.osiris-agriculture.fr/>
- Pagay, V. (2022). Evaluating a novel microtensiometer for continuous trunk water potential measurements in field-grown irrigated grapevines. *Irrigation Science*, 40(1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00758-8>
- Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Paydar, Z., Li, L., Guerschman, J. P., Donohue, R. J., Dutta, D., Podger, G. M., Van Dijk, A. I. J. M., & Chiew, F. H. S. (2014). Dynamic identification of summer cropping irrigated areas in a large basin experiencing extreme climatic variability. *Remote Sensing of Environment*, 154, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.016>
- Perry, C. (2007). Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrigation and Drainage*, 56(4), 367–378. <https://doi.org/10.1002/ird.323>
- Pescod, M. B. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm>
- Pfeiffer, L., & Lin, C.-Y. C. (2014). Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2), 189–208. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.12.002>
- Planet Horizons Technologies SA. (2023). AQUA4D. <https://www.aqua4d.com/>
- Planet Labs PBC. (2023). Data driven precision agriculture with Planet. <https://www.planet.com/markets/monitoring-for-precision-agriculture/>
- Playán, E., Salvador, R., Faci, J. M., Zapata, N., Martínez-Cob, A., & Sánchez, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, 76(3), 139–159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.01.015>
- Prométerre. (2023a). Efficience Irrigation Vaud. <https://www.prometerre.ch/prestations/projets-et-acquisitions-de-references/efficience-irrigation-vaud>
- Prométerre. (2023b). Journée technique. Eau et agriculture. [https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwixhoGu5fSAAxXwiP0HHQRzBfUQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.prometerre.ch%2Fs3%2Fsite%2F1687429681\\_cataloguetechnequgrandesculturesetherbages2023eauetagricultureetprojetsagricoles.pdf&usq=AOvVaw1XJJa4dqTTsO01uOlouAaG&opi=89978449](https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwixhoGu5fSAAxXwiP0HHQRzBfUQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.prometerre.ch%2Fs3%2Fsite%2F1687429681_cataloguetechnequgrandesculturesetherbages2023eauetagricultureetprojetsagricoles.pdf&usq=AOvVaw1XJJa4dqTTsO01uOlouAaG&opi=89978449)

- Ramirez-Fuentes, E., Lucho-Constantino, C., Escamilla-Silva, E., & Dendooven, L. (2002). Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. *Bioresource Technology*, 85(2), 179–187. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00035-4)
- Reinders, F. B., Van Der Stoep, I., & Backeberg, G. R. (2013). Improved efficiency of irrigation water use: A South African framework. *Irrigation and Drainage*, 62(3), 262–272. <https://doi.org/10.1002/ird.1742>
- République française. notre-environnement. (2023). Gestion de l'eau en période de sécheresse en France métropolitaine. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-utilisation-des-ressources-naturelles-ressources/article/gestion-de-l-eau-en-période-de-secheresse-en-france-metropolitaine-6326>
- Riedel, T., Nolte, C., aus der Beeck, T., Liedtke, J., Sures, B., & Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien (S. 310). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/niedrigwasser-duerre-grundwasserneubildung>
- RMA. (2023). Agri soil moisture sensor. <https://rmacompany.nl/de/bewässerung/agrar-bodenfeuchtesensor>
- Römer, J. (2019). Die Wasserentnahmeentgelte der Länder. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/die-wasserentnahmeentgelte-der-laender/>
- Rossi, R. (2019). Irrigation in EU agriculture. European Parliamentary Research Service EPRS. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/644216/EPRS\\_BRI\(2019\)644216\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/644216/EPRS_BRI(2019)644216_EN.pdf)
- Rouillard, J. (2020). Tracing the Impact of Agricultural Policies on Irrigation Water Demand and Groundwater Extraction in France. In J.-D. Rinaudo, C. Holley, S. Barnett, & M. Montginoul (Hrsg.), *Sustainable groundwater management* (Bd. 24, S. 461–479). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_24)
- Rud, R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderoy, C., Heuer, B., Markovitch, T., Dar, Z., Rosen, C., Mulla, D., & Nigon, T. (2014). Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture*, 15(3), 273–289. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9351-z>
- Schimming, L., & Sand, H. (2021). Markt- und Branchenstudie zur landwirtschaftlichen Bewässerung in Deutschland (S. 72). ideas into energy GmbH and German Water Partnership e.V. <https://germanwaterpartnership.de/wp-content/uploads/2022/01/Branchenstudie-LanBew-Deutschland.pdf>
- Schweizer Hagel. (2023). SWISS AGRO INDEX. <https://swissagroindex.hagel.ch/>
- Schweizerische Bundesrat. (2003). Verordnung über die Strukturverbesserungen in der Landwirtschaft (Strukturverbesserungsverordnung, SVV). Änderung vom 26. November 2003. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2003/781/de>
- Schweizerische Bundesrat. (2022). Verordnung über die Strukturverbesserungen in der Landwirtschaft (Strukturverbesserungsverordnung, SVV) vom 2. November 2022. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2022/754/de>
- Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG)). (2018). ProfiCost Gemüse [Software]. <https://www.szg.ch/proficost/proficost-gemuese/>
- Seabex. (2023). NetIrrig. <https://seabex.com/netirrig-by-seabex/>
- Seiler, F. L., Mann, S., & Holzkämper, A. (2022). Steigende Ausgaben für Wassernutzung in der Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz*, 13, 96–102. <https://doi.org/10.34776/afs13-96>
- Serra-Wittling, C., & Molle, B. (2017). Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation (S. 149) [Etude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation]. INRAe. <http://www.g-eau.fr/index.php/fr/umr-geau/actualites/item/758-etude-irstea-2017-sur-l-evaluation-des-economies-d-eau-potentielles-a-la-parcelle-realises-par-la-modernisation-des-systemes-d-irrigation-c-serra-wittling-et-b-molle>

- Serra-Wittling, C., Molle, B., & Cheviron, B. (2019). Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context. *Agricultural Water Management*, 223, 105682. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.017>
- Services industriels (SI) Nyon. (2023). L'essentiel sur l'eau. À Propos De L'eau Potable. <https://www.sinyon.ch/nos-energies/eau/l-essentiel-sur-l-eau/>
- Stanhill, G. (1986). Water Use Efficiency. In *Advances in Agronomy* (Bd. 39, S. 53–85). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60465-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60465-4)
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Steiert, J.-F. (2018). Directive pour la gestion des prélèvements dans les eaux superficielles en cas de sécheresse. Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions DAEC. [https://www.fr.ch/sites/default/files/2019-09/fr\\_DVI\\_DAEC\\_secheresse\\_prelevements\\_eaux\\_superficielles.pdf](https://www.fr.ch/sites/default/files/2019-09/fr_DVI_DAEC_secheresse_prelevements_eaux_superficielles.pdf)
- Steppe, K., De Pauw, D. J. W., & Lemeur, R. (2008). A step towards new irrigation scheduling strategies using plant-based measurements and mathematical modelling. *Irrigation Science*, 26(6), 505. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0111-6>
- Stucki, T. (2018). Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern. AWA Amt für Wasser und Abfall, Abteilung Wassernutzung, Bern. <https://www.bvd.be.ch/de/start/themen/wasser/wassernutzung/wasserentnahmen-bei-trockenheit.html>
- Tang, Z., Jin, Y., Alsina, M. M., McElrone, A. J., Bambach, N., & Kustas, W. P. (2022). Vine water status mapping with multispectral UAV imagery and machine learning. *Irrigation Science*, 40(4), 715–730. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00788-w>
- Thomet, M. (2016). Irrigation Seeland-Broye: Prévision online des besoins et des ressources en eau pour l'irrigation. *Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement*, 114(7), 257–259. <https://doi.org/10.5169/SEALS-630642>
- Todorovic, M., Caliandro, A., & Albrizio, R. (2007). Irrigated agriculture and water use efficiency in Italy. In *Water use efficiency and water productivity: WASAMED project*. Bari (S. 101–136). CIHEAM. <http://om.ciheam.org/om/pdf/b57/00800782.pdf>
- Touil, S., Degre, A., Chabaca, M. N., Naziha, M. C., & Amina, R. (2022). Impact of treated wastewater irrigation on long-term soil water retention. *Desalination and Water Treatment*, 255, 172–178. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28338>
- Toze, S. (2006). Reuse of effluent water—Benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.010>
- Tran, D., Dutoit, F., Najdenovska, E., Wallbridge, N., Plummer, C., Mazza, M., Raileanu, L. E., & Camps, C. (2019). Electrophysiological assessment of plant status outside a Faraday cage using supervised machine learning. *Scientific Reports*, 9(1), 17073. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53675-4>
- Tratschin, R., Bozzini, V., Dübendorfer, C., & Hirt, E. (2023). Trockenheit im Sommer 2022. Befragung der kantonalen Gewässerschutz- und Fischereifachstellen zu Auswirkungen und Massnahmen (S. 59) [Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU]. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/externe-studien-berichte/trockenheit-im-sommer-2022-befragung-der-kantonalen-gewaesserschutz-und-fischereifachstellen-zu-auswirkungen-und-massnahmen.pdf.download.pdf/Trockenheit\\_2022\\_Befragung\\_Kant\\_Fachstellen.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/externe-studien-berichte/trockenheit-im-sommer-2022-befragung-der-kantonalen-gewaesserschutz-und-fischereifachstellen-zu-auswirkungen-und-massnahmen.pdf.download.pdf/Trockenheit_2022_Befragung_Kant_Fachstellen.pdf)
- U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, & U.S. Agency for International Development. (2012). Guidelines for Water Reuse. <https://www.globalwaters.org/sites/default/files/usepa-guidelines-for-water-reuse.pdf>

- Van de Put, H., & Steppe, K. (2022). Automated detection of atmospheric and soil drought stress in *Ficus benjamina* using stem diameter measurements and modelling. *Irrigation Science*, 40(1), 29–43. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00757-9>
- Vandegehuchte, M. W., & Steppe, K. (2012). Sapflow+: A four-needle heat-pulse sap flow sensor enabling nonempirical sap flux density and water content measurements. *New Phytologist*, 196(1), 306–317. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04237.x>
- Vegetal Signals. (2023). Vegetalsignals. <https://vegetalsignals.com/entreprise/>
- Verein SwissGAP. (2023). SwissGAP. <https://www.swissgap.ch/index.html>
- Vivent SA. (2023). Vivent. <https://vivent.ch>
- Weber, M., & Schild, A. (2007). Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bericht zur Umfrage 2006. (S. 17). Bundesamt für Landwirtschaft BLW. [https://www.blw.admin.ch/dam/blw/de/dokumente/Nachhaltige%20Produktion/Umwelt/Wasser/Bericht%20zum%20Stand%20der%20Bew%C3%A4sserung%20in%20der%20Schweiz.pdf.download.pdf/blw\\_bericht\\_umfrage\\_st\\_and\\_bewaesserung\\_d%20%281%29.pdf](https://www.blw.admin.ch/dam/blw/de/dokumente/Nachhaltige%20Produktion/Umwelt/Wasser/Bericht%20zum%20Stand%20der%20Bew%C3%A4sserung%20in%20der%20Schweiz.pdf.download.pdf/blw_bericht_umfrage_st_and_bewaesserung_d%20%281%29.pdf)
- Wehse, H., Chaix, O., Gander, Y., Birrer, A., Fritsch, M., Meylan, B., & Zahner, S. (2017). Erarbeitung von Massnahmen zur langfristigen Sicherstellung der Wasserressourcen. Ein Vorgehen gestützt auf bestehende Planungsinstrumente (S. 88) [Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU]. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/uebergeordnete-instrumente/wasserressourcenmanagement.html>
- Wittling, C., & Ruelle, P. (2022). Guide pratique de l'irrigation (4e éd). Éditions Quae.
- Wong, C. Y. S., Bambach, N. E., Alsina, M. M., McElrone, A. J., Jones, T., Buckley, T. N., Kustas, W. P., & Magney, T. S. (2022). Detecting short-term stress and recovery events in a vineyard using tower-based remote sensing of photochemical reflectance index (PRI). *Irrigation Science*, 40(4), 683–696. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00777-z>
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Williams, L. E., Suárez, L., Berni, J. A. J., Goldhamer, D., & Fereres, E. (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sensing of Environment*, 138, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.024>
- Zardari, M., Tomas, S., Molle, B., & Courault, D. (2023). Empirical modeling of aerosol transport from sprinkler irrigation. *Irrigation Science*, 41(3), 425–444. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00822-x>
- Zorn, A., & Lips, M. (2016). Wirtschaftlichkeit der Bewässerung ausgewählter Kulturen im Kanton Basel-Landschaft (S. 34) [Auftraggeber: Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft; Ein Projekt im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel, gefördert durch das Bundesamt für Umwelt BAFU]. Agroscope. [https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/klima/externe-studien-berichte/Wirtschaftlichkeit%20Bewaesserung.pdf.download.pdf/Wirtschaftlichkeit\\_der\\_Bew%C3%A4sserung\\_ausgew%C3%A4hlter\\_Kulturen\\_im\\_Kanton\\_Basel-Landschaft.pdf](https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/klima/externe-studien-berichte/Wirtschaftlichkeit%20Bewaesserung.pdf.download.pdf/Wirtschaftlichkeit_der_Bew%C3%A4sserung_ausgew%C3%A4hlter_Kulturen_im_Kanton_Basel-Landschaft.pdf)

## 7 Sortenwahl und alternative Kulturen

Nathalie Wuyts<sup>1</sup>, Alice Baux<sup>1</sup>, Brice Dupuis<sup>1</sup>, Juan M. Herrera<sup>1</sup>, Jürg Hiltbrunner<sup>2</sup>, Lilia Levy Häner<sup>1</sup> und Didier Pellet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Produktionssysteme Pflanzen, Anbautechnik und Sorten Ackerbau, Agroscope, Nyon

<sup>2</sup> Pflanzen und pflanzliche Produkte, Extension Ackerbau, Agroscope, Zürich

### 7.1 Zusammenfassung

Seit Anfang der achtziger Jahre sind 12 % der Ackerfläche reduziert worden. Die Ackerflächen wurden vor allem durch Grünlandflächen, und in einigen Kantonen auch durch Gemüsekulturen ersetzt. Die Waadt und Bern verfügen über die grösste Ackerfläche. In der Waadt macht die Ackerfläche mehr als 40 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus. Der Getreideanbau (hier ohne Mais) ist in allen Kantonen des Mittellandes bei weitem am umfangreichsten, gefolgt von Mais und Ölsaaten (hauptsächlich Raps). Kartoffeln und Zuckerrüben werden auf 4 % bzw. 6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche angebaut. Eiweisspflanzen spielen nur eine geringe Rolle.

Die Auswirkungen von Trockenheit und Hitzestress auf das Wachstum, die Entwicklung, die physiologischen Prozesse und schliesslich den Ertrag von Kulturpflanzen hängen von der Intensität und der Dauer der Stressfaktoren sowie von ihrem Zeitpunkt während der Vegetationsperiode ab. Bei samenbildenden Pflanzen sind die späte vegetative Phase (vor der Blüte), die Blüte und der frühe Samenansatz die empfindlichsten Phasen für abiotischen Stress und bestimmen weitgehend den endgültigen Ertragsverlust. Die Kornfüllung und die Ertragsqualität werden von der Quellstärke der verbleibenden Biomasse beeinflusst. Letztere bestimmt auch den endgültigen Ertrag bei Hackfrüchten. Ein gutes Verständnis der Pflanzenphänologie, ihrer Unterschiede zwischen den Sorten und ihrer Beeinflussung durch Stress ist wichtig für die Entwicklung von Anpassungsstrategien. Bei den meisten Ackerkulturen besteht die Möglichkeit, dass früh blühende oder früh reifende Sorten dem sommerlichen Hitze- oder Trockenstress entgehen, allerdings mit potenziell geringeren Erträgen. Eine frühere Aussaat ist eine weitere Option, aber das anhaltende Frostrisiko und die relativ begrenzte Erwärmung im zeitigen Frühjahr in diesem Jahrzehnt setzen den frühen Aussaatterminen für die meisten Kulturen Grenzen. Neben dieser Strategie, dem Stress zu entkommen, können Sortenunterschiede bei den Mechanismen der Trockenheitstoleranz auftreten, von denen die osmotische Anpassung die wichtigste ist. Sie ermöglicht es, den Zellturgor zu erhalten und die Wasserentnahme aus dem Boden länger aufrechtzuerhalten. Der Aufschub oder die Vermeidung von Trockenheit kann eine Vielzahl von Wachstums-, Entwicklungs- und physiologischen Prozessen beinhalten, um den Wasserbedarf und -verlust zu begrenzen, allerdings um den Preis einer frühen Blüte und einer reduzierten Quellen- und Senkenstärke bei anhaltender Trockenheit.

Die Kriterien für die agronomische Prüfung neuer Sorten umfassen derzeit keine Kriterien auf abiotischen Stress, mit Ausnahme von Frühreife oder Frühzeitigkeit der Blüte oder der Reife. In den meisten Fällen bezieht sich dies jedoch eher auf das Potenzial der Sorte, unter Schweizer Anbaubedingungen die Reife zu erreichen oder Schädlingsbefall und -schäden zu vermeiden. Hier ist ein Wandel im Gange, der die Züchter und ihre Vertreter dazu anregen könnte, trockenheits- und hitzetolerante Sorten für den Schweizer Ackerbau vorzuschlagen. Nationale Sortenversuche sind ausserdem ein wertvolles Instrument für die Analyse von Ertrags- und Qualitätsverhalten gegenüber Umweltfaktoren (derzeit vor allem das Wetter) sowie für Studien zur Wechselwirkung zwischen Genotyp, Umwelt und Management dar. Letztere können auch zur Entwicklung von Sortenmischungen beitragen, um die Stabilität des Produktionssystems gegenüber abiotischen Stressfaktoren zu erhöhen.

Winterweizen ist in der Schweiz flächenmässig die wichtigste Ackerkultur und wird für den menschlichen Verbrauch verwendet und es werden hohe Anforderungen an die Eiweissqualität gestellt. Mais und Gerste sind für die Tierfütterung sehr wichtig. Ihre kritischen Wachstumsphasen liegen im späten Frühjahr und Sommer, wenn Trockenheit und Hitze das Ertragspotenzial, den Endertrag und auch die Qualität beeinträchtigen können. Dennoch gibt es keine systematische quantitative Bewertung der gegenwärtigen Ertrags- und Qualitätsverluste aufgrund von abiotischem Stress. Raps ist die wichtigste Ölsaat im Schweizer Ackerbau, und da seine kritischen Wachstumsstadien im späten Frühjahr liegen, geht man davon aus, dass er von abiotischem Stress verschont bleibt; gegenwärtig wird seine Produktion eher von Schadinsekten beeinträchtigt. Umweltfaktoren wie die Sonneneinstrahlung bestimmen jedoch ihr Ertragspotenzial, und Hitze- und Trockenstress während der Blüte- und

Kornfüllungsphase beeinträchtigen den endgültigen Ertrag und die Ölqualität. Der Anbau von Sojabohnen ist in der Schweiz seit etwa 30 Jahren möglich und wichtig, um die heimische Produktion von pflanzlichem Eiweiss und Ölen zu steigern. Die Blüte- und Samenfüllungszeit fällt in den Hochsommer, was die Sojaproduktion schon jetzt, aber noch mehr in Zukunft, gefährdet. Eiweisserbsen und noch mehr Ackerbohnen und andere Hülsenfrüchte sind in der Schweiz sehr unbedeutende Kulturen, aber ihr Wert in der Fruchtfolge und bei der Erzeugung von Eiweissfuttermitteln im Betrieb ist hoch, insbesondere im ökologischen Landbau. Die Erträge sind jedoch aufgrund von limitierenden biotischen und abiotischen Faktoren, die derzeit noch nicht genau bekannt sind, instabil. Im Kartoffelanbau wird die Bewässerung zur Förderung von Ertrag und Qualität wegen ihrer Empfindlichkeit insgesamt als unverzichtbar angesehen. Das Erreichen einer höheren Wasserproduktivität ist wichtig, und es scheint, dass es bei den Mechanismen der Reaktion auf Trockenheit auf mehreren Ebenen eine grosse ungenutzte Variation gibt: Frühreife, Wurzel- und Sprossmorphologie und physiologische Reaktionen. Bei Zuckerrüben schliesslich sind in der Schweiz Auswirkungen von Trockenstress auf Ertrag und Zuckergehalt vorhanden, bisher wurde dies aber nicht quantitativ bestimmt. Die Bewässerung ist in Bezug auf die kritischen Wachstumsstadien, den Zeitpunkt und die Menge sowie ihre Auswirkungen auf die Produktqualität nicht gut bekannt.

Alternative Kulturen mit höherer Trockentoleranz werden im Hinblick auf ihre potenzielle agronomische Leistung und die Eignung für die Anbaubedingungen diskutiert. Viele von ihnen haben derzeit einen Nischenstatus und/oder werden im Segment des ökologischen Landbaus angebaut. Bei anderen, wie z.B. Sorghum, gibt es deutliche Hinweise auf ein grosses Produktionspotenzial, insbesondere in Gebieten, in denen Mais von der Sommertrockenheit betroffen ist. Viel Bedarf, aber auch Möglichkeiten gibt es bei der Sortenwahl für Ertragsstabilität und -verbesserung angesichts von Trockenheit und Hitzestress sowie bei der Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Produktionssystemen auf regionaler und lokaler Ebene, einschliesslich des Anbaus von Pflanzen, die heute einen Nischenstatus haben.

## 7.2 Struktur des Ackerbaus in der Schweiz

Neben einem Gesamtverlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche von 3,4 % zwischen dem letzten Maximum im Jahr 1996 (1'082'876 ha) und 2022 (1'042'014 ha) ist der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche, der dem Ackerbau zugeordnet ist, stetig zurückgegangen (Bundesamt für Statistik BFS, 2023b, 2023a). Über einen Zeitraum von rund 30 Jahren, beginnend in den frühen Achtzigerjahren, gingen in der ganzen Schweiz 11 % und im Mittelland 12,5 % der Ackerfläche verloren (Abbildung 7-1). Ein ähnlicher Flächenrückgang war beim Naturwiesen zu verzeichnen, während die Fläche der Heimweiden in der Schweiz um 35 % und im Mittelland um 46 % zunahm. Vor allem im Mittelland hat der Gemüseanbau seinen Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche um fast 37 % erhöht. Bei der Obstanbaufläche war hingegen ein starker Rückgang von rund 50 % zu verzeichnen (Abbildung 7-1).

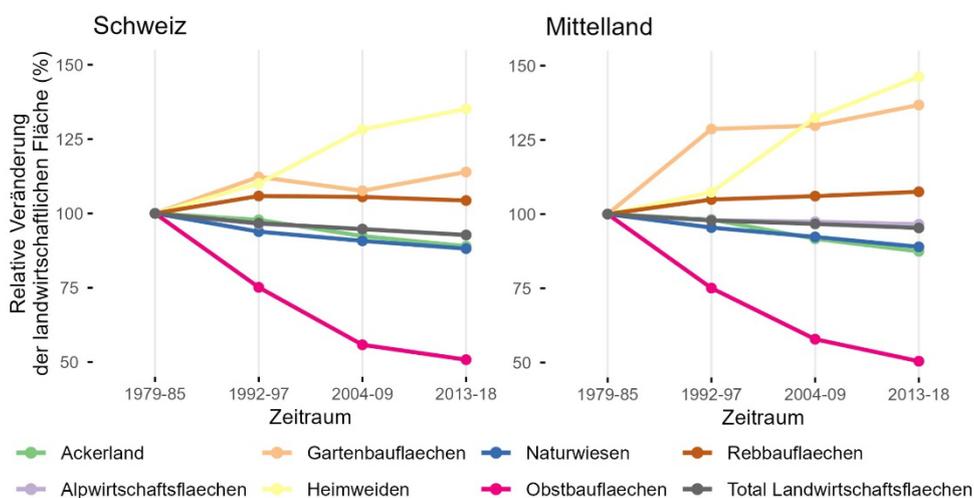


Abbildung 7-1 Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Vergleich zu 1978-1985 für die Schweiz (links) und das Mittelland (rechts). Die Veränderung der für den Ackerbau genutzten Fläche ist in grüner Farbe dargestellt und beträgt für den Zeitraum 2010-2018 in der Schweiz 89 % und im Mittelland 87 %. Angepasst aus Bundesamt für Statistik BFS (2023a).

Die Veränderung der landwirtschaftlichen Bodennutzung in den Kantonen des Mittellandes und der Südschweiz ist in Anhang 11.3, Ergänzende Abbildung 11.3-1, 11.3-2 und 11.3-3 dargestellt. Die landwirtschaftliche Nutzfläche für den Ackerbau verringerte sich in den Kantonen, die eine Ackerfläche von mehr als 1'000 ha hatten, im Durchschnitt um 12,5 %. Im Tessin und im Wallis war der Rückgang mit 33,1 % bzw. 26,5 % am grössten, während in Luzern und im Jura mehr Fläche für den Ackerbau reserviert wurde. Bern und Waadt wiesen im Zeitraum 2013-2018 die grösste landwirtschaftliche Nutzfläche für den Ackerbau auf (73'947 ha bzw. 70'042 ha), allerdings mit einem Verlust von 13,1 % bzw. 9,3 % im Vergleich zu den frühen 80er Jahren (Bundesamt für Statistik BFS, 2023b). Die grösste Flächenzunahme im gleichen Zeitraum verzeichnete der Gemüsebau in Freiburg (116 %), Luzern (62,4 %) und Thurgau (53,3 %).

Alle Kantone des Mittellandes tragen zum Ackerbau in der Schweiz bei, wobei die Kantone Waadt und Bern den grössten Anteil am Ackerbau haben, gefolgt von Zürich, Freiburg und Aargau. Dies hat sich seit mindestens 40 Jahren nicht geändert (Abbildung 7-2). Innerhalb der Kantone wird der Ackerbau in Schaffhausen und Genf auf mehr als 50 % der verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche betrieben, in der Waadt und im Aargau auf mehr als bzw. fast 40 %. Zwischen 1980 und 2022 haben Luzern (42 %) und Thurgau (36 %) am stärksten zugenommen, während in Basel-Landschaft der Anteil des Ackerbaus um 18 % zurückging (Bundesamt für Statistik BFS, 2023b). Zu den hier betrachteten Ackerkulturen gehören Getreide (ohne Körnermais), Körner- und Silomais, Ölsaaten und Eiweisspflanzen, Kartoffeln und Zuckerrüben (Abbildung 7-2). Im Jahr 1980 wurde auf 70 % der Ackerfläche Getreide angebaut, gefolgt von Mais mit 22 % (Bundesamt für Statistik BFS, 2023c). Der Anteil von Getreide ging auf 50 % im Jahr 2022 zurück, was zum Teil auf die Ausweitung des Anteils von Ölsaaten von 5 % auf 13 % zurückzuführen ist (vor allem auf Raps). Dies ist vor allem in den Regionen mit dem höchsten Verdunstungsbedarf der Fall (Genf, Waadt, Schaffhausen; siehe 5.5). Leguminosen (Eiweisspflanzen) sind in den meisten Kantonen noch in der Minderheit mit einer Gesamtfläche von 4'703 ha (2 %) und maximal 1'307 ha in der Waadt. Mais wird in der ganzen Schweiz angebaut, mit einem Anteil von 24 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Jahr 2022 (22 % im Jahr 1980). In der Waadt ist der Anteil der Ölsaaten (20 %) höher als der von Mais (15 %), während in Luzern Mais auf 41 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche angebaut wird. In den anderen Kantonen des Mittellandes wird Mais auf 21 % bis 30 % der Ackerfläche angebaut. Kartoffeln werden heute auf 4 % der Ackerfläche angebaut, gegenüber 9 % im Jahr 1980. Bern hat die grösste Kartoffelanbaufläche, gefolgt von der Waadt und Freiburg, allerdings mit einem Rückgang von 38 %, 61 % bzw. 54 % gegenüber 1980. Rüben (hauptsächlich Zuckerrüben) werden auf 6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in der Schweiz angebaut, wobei die grössten Flächen in der Waadt, in Bern und in Zürich liegen. Hier ist der Anteil der Rüben innerhalb der Kantone höher als im Durchschnitt von Zürich und Bern, aber auch in Schaffhausen und Thurgau (Bundesamt für Statistik BFS, 2023c).

Was den Selbstversorgungsgrad im Schweizer Ackerbau betrifft, so wurden 2021 hohe Werte für Raps (94 %), Zuckerrüben (83 %) und daraus gewonnene Saccharose (90 %) und etwa 50 % für die meisten Getreidearten (ausser Hartweizen und Hafer) erreicht. Letztere waren im Zeitraum 2018-2020 höher. Bei Körnermais lag der Anteil der Selbstversorgung im Jahr 2021 bei 24 % und zwischen 2018 und 2020 zwischen 36 % und 49 % (Agristat, 2023b).

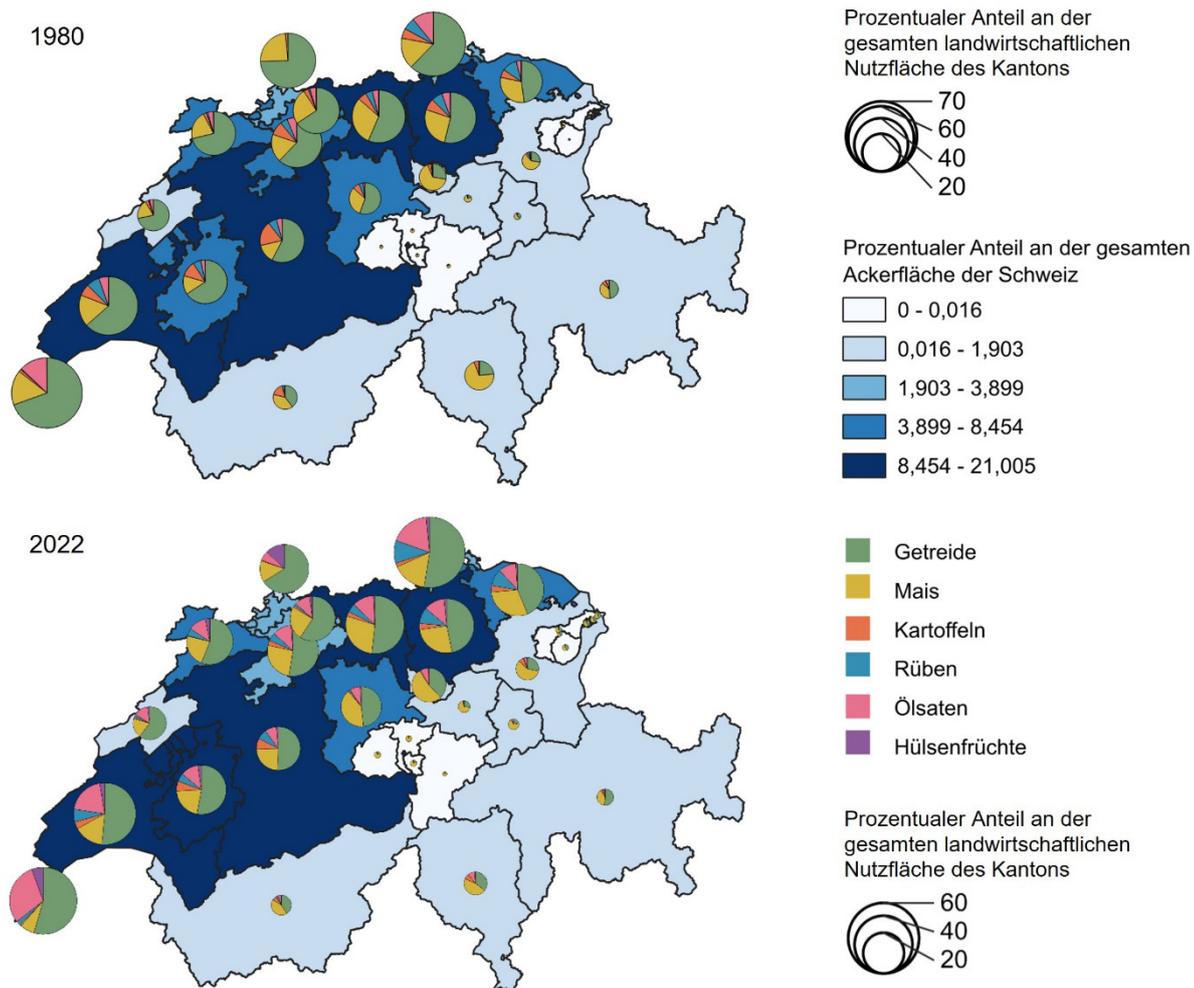


Abbildung 7-2 Struktur des Ackerbaus in den Schweizer Kantonen im Jahr 1980 (oben) und 2022 (unten). Datenquelle: Bundesamt für Statistik BFS (2023c). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

### 7.3 Dürre und Hitze beeinträchtigen Ackerkulturen

Trockenheit und hohe Temperaturen beeinflussen die Entwicklung, das Wachstum und die Physiologie der Pflanzen. Sie treten oft gleichzeitig auf und können ihre Wirkung auf die Pflanzen gegenseitig verstärken. Atmosphärische Dürre tritt auf, wenn hohe Temperaturen und eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit ein grosses Dampfdruckdefizit in der die Pflanzen umgebenden Luft erzeugen. Dies führt zu einem hohen Verdunstungswasserverlust der Pflanzen durch Transpiration. Die Pflanzen können dann vorübergehend unter Stress geraten, wenn der Boden um die Wurzeln zu schnell zu trocken wird. Dieser kann sich wieder ausgleichen, wenn der Verdunstungsbedarf an Intensität verliert. Das Wasserdefizit im Boden als solches verursacht Trockenstress, da die Wurzeln nicht in der Lage sind, genügend Wasser für die Grundtranspiration zu entnehmen. Wenn die Transpiration durch das Schliessen der Stomata reduziert wird, werden die Auswirkungen der Hitze nicht durch Verdunstungskälte kompensiert. Dies führt zu einer Verlangsamung der Entwicklungsprozesse aufgrund nicht optimaler Organtemperaturen (Parent & Tardieu, 2012). Neben der Verschärfung der Trockenheit und ihrer Auswirkungen auf die Pflanzen hat Hitze auch direkte Auswirkungen auf die Blüte und den Samenansatz sowie bei Hackfrüchten auf die Knollenentwicklung und beeinträchtigt somit den Ertrag und die Qualität (Hancock et al., 2014; Jacott & Boden, 2020; Mayer et al., 2016).

Der Schwere und die Dauer der Trockenheit sowie der Zeitpunkt in der Vegetationsperiode bestimmen das Ausmass der Auswirkungen von Trockenstress auf die Biomasseakkumulation, den Ertrag und die Produktqualität. Endgültige Trockenheit bezieht sich auf Bedingungen, bei denen das Wasserdefizit bis zum späten Reproduktionsstadium an Intensität zunimmt, oder auf schwere Trockenheit über einen langen Zeitraum. Milde oder mittlere Trockenheit hingegen bezieht sich auf ein weniger starkes Wasserdefizit, das über einen langen Zeitraum anhalten kann, aber

aufgrund von Anpassungsmechanismen nicht den Ertrag stark beeinträchtigt. Sie umfasst auch vorübergehende Episoden eines schweren Wasserdefizits, zum Beispiel an heissen Sommertagen (hoher Verdunstungsbedarf), wenn der Bodenwassergehalt in unmittelbarer Nähe der Wurzeln bereits erschöpft ist (Berger et al., 2016; Tardieu, 2012; Tardieu et al., 2018). Ein Wasserdefizit im Boden bei der Aussaat beeinträchtigt die Keimung und kann den Pflanzenaufgang gefährden. Ein angemessener (ausreichender, aber nicht übermässiger) Zugang zu Wasser unterstützt die frühe Entwicklung der Sämlinge, was wichtig ist, da das Pflanzenmeristem, d. h. der Wachstumspunkt, an dem die vegetativen und reproduktiven Organe entstehen, durch die physiologische Aktivität der ersten Blätter und des expandierenden Wurzelsystems zur Entwicklung angeregt wird (Levy & Dean, 1998). Jeglicher Stress in diesem Stadium kann das Wachstumspotenzial in späteren Entwicklungsstadien beeinträchtigen. Die Blütenentwicklung ist das nächste kritische Stadium, da das Ertragspotenzial durch die Anzahl der initiierten und sich entwickelnden Blütenmeristeme bestimmt wird. Bei Getreide und Mais geschieht dies während der Stängelstreckung (Gonzalez et al., 2012; Strachan, 2016). Das entsprechende Stadium bei Hackfrüchten ist die Einleitung und Entwicklung des sekundären Wachstums der Pfahlwurzel bei Zuckerrüben, die zwischen 10 und 40 Tagen nach der Aussaat erfolgt (Jammer et al., 2020), und die Einleitung der Knollenbildung bei Kartoffeln 12 bis 18 Tage nach dem Auflaufen (Haverkort et al., 1990; Kim & Lee, 2019). Die weitere Entwicklung von Pfahlwurzeln oder Knollen wird durch Trockenheit und Hitzestress direkt beeinflusst (Brown et al., 1987; Kenter et al., 2006; Nasir & Toth, 2022). Bei Saatgutpflanzen reagiert die Blütezeit sowohl auf Trockenheit als auch auf Hitze, und Stress in diesem Stadium hat Auswirkungen auf den Samenansatz und die endgültige Anzahl der Körner. Während der Kornfüllungsphase wirkt sich Stress auf das Endgewicht und die Zusammensetzung der Körner aus (Gooding et al., 2003; Mayer et al., 2016; Wiegand & Cuellar, 1981; Wilhelm et al., 1999). Kurze Trockenperioden in unkritischen Stadien haben im Allgemeinen keinen Einfluss auf Biomasse, Ertragspotenzial und Endertrag. Längere Trockenperioden in vegetativen Stadien können jedoch die Biomasseakkumulation verringern und eine frühe Blüte auslösen (Levy & Dean, 1998).

Das Auftreten kritischer Entwicklungsstadien in der Vegetationsperiode von Kulturpflanzen zeigt, wie wichtig das Wissen über die Entwicklung von Pflanzen ist und wie diese durch regionale und/oder zukünftige Umweltbedingungen beeinflusst wird. Dabei müssen auch die Entwicklungsunterschiede berücksichtigt werden, die zwischen Sorten derselben Art auftreten können. Sorten können auch aufgrund morphologischer und physiologischer Merkmale oder Anpassungen unterschiedlich auf Trockenheit und Hitzestress reagieren. Zusätzliche Bewässerung kann eine wichtige Anpassungsstrategie für Trockenheit in Ackerbausystemen darstellen, insbesondere während der Etablierung und in kritischen Wachstumsstadien (Hsiao et al., 2007). Letzteres ist sowohl für den Ertrag als auch für den Schutz des Ertragspotenzials und eine effizientere Wassernutzung wichtig. Ein gründliches Verständnis der Auswirkungen von Trockenheit in verschiedenen Entwicklungsstadien auf die Biomasseakkumulation, den Ertrag und die Qualität ist erforderlich, um kritische Stadien für jede Pflanzenart zu definieren. Schliesslich ist anzumerken, dass die Auswirkungen von Trockenheit oder Hitzestress auf das Erntegut und dessen Qualität im Schweizer Ackerbau bisher nicht systematisch und direkt quantitativ bestimmt worden sind. Unterdurchschnittliche Erträge oder Qualitäten werden in der Regel mit einer nachträglichen qualitativen Beurteilung der Witterungsverhältnisse während der Vegetationsperiode in Verbindung gebracht. Auch die Auswirkung der Bewässerung auf die Qualität der Produkte wurde - ausser bei Kartoffeln - nicht untersucht. In den folgenden Abschnitten werden diese Themen zunächst allgemein und dann ausführlicher für Getreide, Mais, Ölsaaten und Eiweisspflanzen, Kartoffeln und Zuckerrüben erörtert. Im letzten Teil des Kapitels werden alternative Kulturarten mit potenziell höherer Trockenheitsresistenz untersucht.

## 7.4 Phänologie der Pflanzen bei Anpassungsstrategien an Trockenheit und Hitze

Die Phänologie der Pflanzen, d. h. der zeitliche Ablauf der aufeinanderfolgenden vegetativen und reproduktiven Entwicklungsstadien im Jahresverlauf, wird stark vom Klima beeinflusst. Dazu gehören in erster Linie Temperatur und/oder Photoperiode, aber auch Niederschlag und Strahlung. Unterschiede in diesen Parametern bestimmen die regionale Eignung für die Entwicklung von Pflanzen, vom Erreichen eines erntereifen Stadiums bis hin zu rentablen Erträgen und der Ertragsqualität. Darüber hinaus ermöglicht das Wissen über die Empfindlichkeit der phänologischen Stadien gegenüber Klimafaktoren die Entwicklung von Strategien zur Anpassung an den Klimawandel durch eine geeignete Auswahl von Pflanzensorten (Frühreife, abiotische Stresstoleranz) und Anbaupraktiken (Aussaattermin, Fruchtfolgeplanung). Abbildung 7-3 zeigt eine typische Vegetationsperiode (ohne Extremfälle) der wichtigsten

Ackerkulturen von der Aussaat bis zur Ernte. Die für Trocken- und Hitzestress empfindlichsten Phasen, d.h. Blüte, Samen-/Körneransatz und Samen-/Körnerfüllung, sind ebenfalls angegeben.

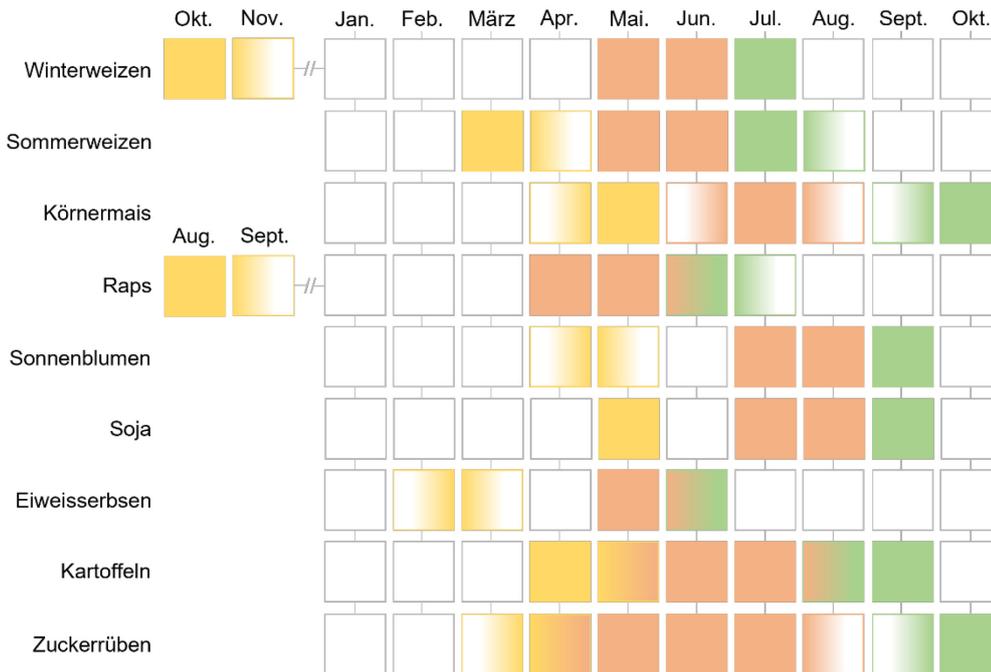


Abbildung 7-3 Typische Wachstumsperiode (ohne Extremfälle) der wichtigsten Ackerkulturen von der Aussaat (gelb) bis zur Ernte (grün). Die für Trocken- und Hitzestress empfindlichsten Phasen, d. h. Blüte, Samen-/Körneransatz und Samen-/Körnerfüllung, sind rot gekennzeichnet.

Es besteht eine negative Korrelation zwischen der Länge der Wachstumsperiode von der Aussaat bis zur Reife und der Temperatur, während positive, neutrale oder variable Wechselwirkungen mit dem akkumulierten Niederschlag und den Sonnenstunden während der Saison auftreten (Xiao et al., 2021). Die Verkürzung der Kornfüllungsphase aufgrund erhöhter Temperaturen führt bei vielen Ackerkulturen zu Ertragsminderungen und auch zu Qualitätsverschiebungen (Bruckner & Froberg, 1987; Dias & Lidon, 2009; Halford et al., 2015; Mayer et al., 2016; Poggi et al., 2022; Wiegand & Cuellar, 1981; Wilhelm et al., 1999). Andererseits können durch verkürzte Wachstumszyklen die extremsten abiotischen Stressfaktoren (Hitze, Trockenheit) vermieden werden, und höhere Temperaturen ermöglichen den Anbau später reifender Sorten, die im Allgemeinen höhere Erträge liefern. Die letztgenannte Strategie kann jedoch den Bewässerungsbedarf weiter erhöhen (Holzkämper, 2020) und berücksichtigt weder Aspekte der Futterqualität wie den Gehalt an verdaulicher organischer Substanz, Stärke und mehrfach ungesättigten Fettsäuren noch den Zeitpunkt des Auftretens von Schädlingen und Krankheiten (Hiltbrunner et al., 2023). Was die Verschiebung des Aussaatdatums betrifft, so wird eine spätere Aussaat als Anpassungsmassnahme für Winterkulturen empfohlen, um ein übermässiges Wachstum und eine übermässige Entwicklung vor dem Wintereinbruch zu vermeiden, während eine frühere Aussaat für Sommerkulturen in Betracht gezogen werden kann, um abiotischen Stress (Hitze und Trockenheit) während kritischer Entwicklungsstadien zu vermeiden oder um später reifende Sorten anzubauen (Holzkämper et al., 2020). Wie in Kapitel 5 erläutert, muss das Frostrisiko jedoch auch in naher Zukunft bei Strategien für eine frühere Aussaat von Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Sonnenblumen und Sojabohnen berücksichtigt werden.

Kürzere vegetative Phasen aufgrund höherer Temperaturen unter künftigen Wachstumsbedingungen könnten es den Pflanzen ermöglichen, dem Hitzestress während der Blüte und der Kornfüllung zu entgehen. Um diese Hypothese zu untersuchen, wurden in einer Studie von Rogger et al. (Rogger et al., 2021) für Winterweizen die Termine für das Ährenschieben, d. h. den Ährenaufgang kurz vor der Blüte, bis zum Jahr 2099 vorhergesagt. Es wurden vier Winterweizensorten und vier Standorte im Schweizer Mittelland, mehrere Aussaattermine und zwei Emissionsszenarien (RCP2.6 mit Klimaschutz und RCP8.5 ohne Klimaschutz) einbezogen. Die Klimaszenarien hatten im Vergleich zu den anderen Faktoren den grössten Einfluss auf die Vorhersage des Blühtermins. Es wurde

geschätzt, dass die Blüte bis zum Ende des Jahrhunderts 6 bis 19 Tage früher erfolgen würde als im Referenzzeitraum (1982-2006). Dies bedeutet, dass bis 2035 nur begrenzte Auswirkungen zu erwarten sind (0,24-3,12 Tage). In kühleren Gebieten des Mittellandes, wo die Entwicklung unter dem RCP8.5-Szenario noch langsamer verlaufen wird, dürfte die Belastung durch Hitzestress grösser sein. Generell wurden weitere Studien vorgeschlagen, um mögliche Nachteile einer früheren Aussaat in Form von Spätfrost, geringerer Strahlung und niedrigeren Temperaturen während der Vegetations- und frühen Reproduktionsphase oder Nachteile kürzerer Entwicklungsphasen in Form von geringeren Erträgen zu untersuchen (Rogger et al., 2021). Eine Weizensimulationsstudie, das unter Verwendung von Klimaszenarien auf lokaler Ebene in ganz Europa angewandt wurde, hat für ein Szenario aus dem Jahr 2055 frühere Blüte- und Reifetermine vorhergesagt, wodurch Trockenstress in der Reproduktionsphase vermieden werden kann, aber ein erhöhtes Hitzestressrisiko in der Blütezeit besteht (Semenov & Shewry, 2011).

## 7.5 Strategien zur Vermeidung, zum Aufschub oder zur Toleranz gegenüber Trockenheit und entsprechende Merkmale

In der wissenschaftlichen Literatur wird die Widerstandsfähigkeit von Kulturpflanzen gegenüber Trockenheit (und teilweise auch Hitze, da die Verdunstungskälte bei Trockenheit begrenzt ist) anhand eines Rahmens von Strategien beschrieben, die mehr oder weniger grob in drei Kategorien eingeteilt werden: Vermeidung, Aufschub und Toleranz. Ausweichen vor Trockenheit bedeutet, dass die Pflanzen ihren Lebenszyklus vor dem Einsetzen einer schweren Dürre abschliessen. In der Regel geht es dabei um die Blütezeit und deren Vorzeitigkeit. Obwohl diese Strategie für Ackerkulturen in der Schweiz vorgeschlagen werden kann, ist sie in Gebieten mit sehr vorhersehbarer Trockenheit während der Saison wie dem Mittelmeerraum oder den halbtrockenen Tropen weiter verbreitet (Berger et al., 2016). Sie ist mit Ertragseinbussen verbunden, vor allem, wenn keine schwere Dürre auftritt (Tardieu, 2012). Andererseits verbessert die Remobilisierung von nicht struktureller Trockensubstanz, die während der vegetativen Phasen akkumuliert wurde, zum Zeitpunkt der Trockenheit während der reproduktiven Phasen den Ertrag und wird auch als Mechanismus zur Vermeidung von Trockenheit betrachtet (Berger et al., 2016; Yang et al., 2001).

Die osmotische Anpassung, d. h. die Anhäufung von Soluten in den Zellen zum Schutz vor Turgorverlust (Zellkollaps), gilt als ein Mechanismus der Trockentoleranz bei schwerer oder anhaltender Trockenheit. Sie wird mit dem Überleben von Sojabohnen (James et al., 2008) und der Erhaltung von Erträgen bei Weizen (Morgan & Condon, 1986) in Verbindung gebracht. Die osmotische Anpassung gehört ebenfalls zu einer Reihe von Merkmalen, die mit einer erhöhten Wasseraufnahme oder -verfügbarkeit bei Strategien zum Aufschub der Trockenheit verbunden sind; das Wasserpotenzial der Pflanzen kann negativer werden, ohne dass die Zellen kollabieren, so dass auch bei einem niedrigeren Bodenwasserpotenzial noch Wasser entnommen werden kann (Blum, 2016; Morgan & Condon, 1986). Weitere Merkmale in dieser Kategorie sind tiefe Wurzelsysteme, eine verringerte Wurzelseneszenz nach der Blüte und ein erhöhtes Wurzel-Spross-Verhältnis (Berger et al., 2016; Li et al., 2019; Zheng et al., 2022), das in tiefen Böden mit Wasser in tieferen Bodenschichten eine maximale Wirkung hat (Tardieu, 2012). Bei Weizen kann dies in einer Hemmung der Bodenbearbeitung und einer Zunahme der Gesamtwurzellänge und Biomasse bestehen (Hendriks et al., 2016).

Ein Aufschub der Trockenheit kann auch durch Anpassungen der hydraulischen Leitfähigkeit von Blättern und Wurzeln erreicht werden, wobei Aquaporine eine Rolle spielen (Bramley et al., 2009; Passioura, 1983; Tardieu et al., 2018). Auf der Ebene der Triebe tragen eine Verringerung der Blattfläche (Tardieu et al., 2018) und das Abwerfen von Blättern oder die Blattseneszenz (Cai et al., 2020; Hussain et al., 2018) zur Wassererhaltung durch geringeren Wasserverlust über die Transpiration bei. Zu den meist vorübergehenden Reaktionen auf der Blattebene zur Verringerung der einfallenden Strahlung, Wärme und überschüssigen Transpiration gehören das Einrollen (Getreide, Mais), das Anheben (Paraheliotropismus, Sonnenblume) oder Umklappen (Sojabohne) der Blätter (Abbildung 7-4) (Berger et al., 2016). Bei Getreide kann dies mit einer Veränderung der Eigenschaften des Blattepidermiswachses einhergehen, wodurch sich die Blätter gräulich verfärben. Bei Sojabohnen ist die untere Blattseite silbergrün, um mehr Licht zu reflektieren (Abbildung 7-4).

Die Hauptkontrolle über den Wasserverlust durch Transpiration erfolgt über die stomatäre Anpassung als Reaktion auf ein erhöhtes Luftdampfdruckdefizit. Das Schliessen der Stomata verringert die Transpiration und bewahrt das Bodenwasser, aber gleichzeitig steht weniger Kohlendioxid für die Photosynthese zur Verfügung und die

Blatttemperatur steigt (Tardieu, 2012; Tardieu et al., 2018). Die Empfindlichkeit der Stomata gegenüber dem Dampfdruckdefizit wird als konservative Wassernutzungsstrategie angesehen, die insbesondere für Dürreperioden im Endstadium geeignet ist, da sie die Wassernutzung während der vegetativen Phasen einschränkt, um sie für die Reproduktionsphasen zu erhalten. Eine verschwenderischere Wassernutzung bei Trockenheit, d. h. eine fortgesetzte Wasseraufnahme und hohe Transpiration, ist eine Strategie, die bei vorübergehender und weniger schwerer Trockenheit, wie sie in der Schweiz auftreten kann, günstiger ist. Sie ermöglicht ein anhaltendes Wachstum und ein höheres Ertragspotenzial.

Die Eigenschaft, grün zu bleiben, d. h. die Eigenschaft des Blattgewebes, Pigmente und photosynthetische Funktionen beizubehalten und die Seneszenz zu verzögern, tritt in der Regel unter Feldbedingungen auf, wenn das Bodenwasser bis zum Ende der Saison nicht aufgebraucht ist, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass die Trockenheit während der vegetativen Entwicklungsstadien aufgeschoben wird (Christopher et al., 2008; Reynolds et al., 2005). Eine geringere Kornabortion bei blühenden Pflanzen ist ein Merkmal, das sich stark auf den Ertrag in Bezug auf die Anzahl der Körner auswirkt, aber auch mögliche Folgen für das Korngewicht und die -qualität hat, wenn der Stress nach der Blüte anhält. Bei nur vorübergehendem Stress während der Blüte bringt sie dagegen Ertragsvorteile (Tardieu, 2012). Die Abortion von Körnern unter Trockenstress wird durch männliche oder weibliche Blütensterilität oder durch Konkurrenz um eine begrenzte Kohlenstoffquelle verursacht. Bei Erbsen besteht eine lineare Beziehung zwischen der Wachstumsrate der Pflanze während des Kornansatzes und der endgültigen Kornzahl (Guilioni et al., 2003). Bei Mais hängt der Mechanismus mit einem verzögerten Auflaufen den Narbenfäden (Silks) bei Trockenheit und der Länge des Anthesis-Silking-Intervalls zusammen (Oury et al., 2016). Letzteres ist daher ein Merkmal, das bei der Bewertung von Sortenunterschieden in der Reaktion auf Trockenstress von Interesse ist.



Abbildung 7-4 Mechanismen auf Blattebene zur Verringerung übermässiger Strahlung und Transpiration, einschliesslich des Einrollens von Blättern bei Mais (links) und des Umklappens von Blättern bei Sojabohnen (rechts).

## 7.6 Nationale Sortenprüfung

Der Schweizerische Eidgenossenschaft stellt die Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Saat- und Pflanzgut für Ackerkulturen sicher. Agroscope (Agroscope, 2023b) hat den Auftrag, Sorten im agronomischen Kontext zu prüfen, bevor sie vom Bundesamt für Landwirtschaft (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2022) für die landwirtschaftliche Produktion zugelassen werden können. Das Sortenprüfungsnetz für Ackerkulturen besteht aus Feldversuchsstandorten in der ganzen Schweiz, in den für die jeweiligen Kulturen relevanten Regionen (z.B. Mittelland, Wallis und Jura). Die bei der offiziellen Prüfung der Anbau- und Verwendungseignung (VAT) angewandten Kriterien haben eine gesetzliche Grundlage, da sie in einer Verordnung über Pflanzenvermehrungsmaterial festgelegt sind (Anhang 2 der Verordnung des WBF über Vermehrungsmaterial von Ackerpflanzen-, Futterpflanzen- und Gemüsearten; Fedlex (2021). Bewertet werden nicht nur der Ertrag und die Qualität (auf der Grundlage der

schweizerischen Normen), sondern auch die Anfälligkeit für Schädlinge und Krankheiten sowie anbautechnische Merkmale wie Frühreife, Pflanzenlänge und Standfestigkeit. Die Sorten, die der Prüfung unterzogen werden, werden von Züchtern oder ihren Repräsentanten in der Schweiz vorgeschlagen, die ihr Angebot auf die für die Prüfung festgelegten Kriterien stützen, um die Chance zu erhöhen, dass eine Sorte in den nationalen Sortenkatalog der Schweiz (und auch in den EU-Katalog; Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2022) aufgenommen wird.

Eine im Rahmen dieses Berichts durchgeführte Umfrage bei Züchtern, die regelmässig neue Sorten für den Schweizer Markt vorschlagen, hat ergeben, dass insgesamt keine trockenheits- oder hitzetoleranten Sorten von Getreide, Kartoffeln und Raps vorgeschlagen wurden oder in naher Zukunft vorgeschlagen werden, mit Ausnahme von Mais. Gegenwärtig ist man bestrebt, Sorten anzubieten, die unter verschiedenen Anbau- und Wetterbedingungen ertragsstabil sind. Die Züchtungsbemühungen gehen jedoch in Richtung Trockenheits- und Hitzetoleranz für andere europäische Märkte. Die kürzlich veröffentlichte Klimastrategie für Landwirtschaft und Ernährung 2050, die vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), dem Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) entwickelt wurde, zielt auf ein nachhaltigeres Ernährungssystem angesichts des Klimawandels ab. Eines der Ziele, die bis 2050 erreicht werden sollen, sieht vor, dass die Landwirtschaft eine an das Klima und die lokalen Bedingungen angepasste Produktion mit einem Selbstversorgungsgrad von mindestens 50 % gewährleistet (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023b). Das bedeutet, dass die landwirtschaftliche Produktion widerstandsfähiger gegenüber klimatischen Bedingungen werden sollte. Die Massnahme im Aktionsplan, die mit diesem Ziel verbunden ist, besagt, dass die agronomische Prüfung neuer Sorten (VAT) im Hinblick auf ihre Kriterien und Überprüfungsverfahren gründlich überarbeitet werden sollte. Die Toleranz gegenüber extremen Umweltbedingungen und die Entwicklung des Auftretens von Schädlingen und Krankheiten infolge des Klimawandels müssen berücksichtigt werden (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023b). Die neuen Kriterien und Methoden werden bis 2025 festgelegt, und anschliessend werden die entsprechenden Rechtsvorschriften angepasst. Die Auswirkungen der Änderungen werden sich in der Praxis voraussichtlich ab 2035 zeigen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023b). Das bedeutet, dass die Züchtungsunternehmen und ihre Repräsentanten damit beginnen können, neues trockenheitstolerantes Material für den Schweizer Markt vorzuschlagen, wenn die neuen Kriterien in den Sortenversuchen angewendet werden. Dies gilt zumindest, sofern die Kriterien in diesem Sinne in der neuen Gesetzgebung beibehalten werden.

Aus den obigen Ausführungen wird deutlich, dass das Auftreten von Trockenheits- oder Hitzetoleranz oder von Anpassungsstrategien im Allgemeinen in den Sortenversuchen der letzten 20 Jahre oder mehr nicht strukturiert untersucht wurde. Dies hängt zum einen mit den bestehenden Kriterien und zum anderen mit den für die Sortenprüfung bereitgestellten Mitteln zusammen, die wenig Spielraum für zusätzliche Arbeiten (Personal, Material) lassen. Was die Phänologie betrifft, so werden die Aussaat- bzw. Pflanz- und Erntetermine systematisch erfasst, ebenso wie das Ährenschieben bei Getreide und die Blühtermin beim Raps. Bei letzterem wird der frühe Blühzeitpunkt im Zusammenhang mit dem Auftreten von Schädlingen interpretiert, während er bei Getreide einen Hinweis auf die Vermeidung von Dürre- und Hitzestressperioden gibt. Sowohl bei Mais als auch bei Kartoffeln geben die Reifeklassen die Länge der Vegetationsperiode für die Planung der Fruchtfolgen an. Ausserdem entscheiden sich die Landwirte in Regionen, in denen die Wasserentnahme im Sommer oft eingeschränkt ist, für den Anbau früher Sorten, um den Bewässerungsbedarf zu minimieren (Linder, 2021).

Neue Kriterien für die Sortenprüfung können auf der Grundlage der in 7.5 beschriebenen Mechanismen zur Vermeidung von Trockenheit, zum Aufschub und zur Toleranz entwickelt werden. Im Allgemeinen können die Bonituren zur Phänologie erweitert werden, insbesondere für kritische phänologische Stadien. Dies könnte eine nachträgliche Analyse des potenziellen Auftretens von Dürre- oder Hitzestress in diesen Stadien auf der Grundlage der Umweltbedingungen und ihrer Beziehung zu Ertrags- und Qualitätsparametern ermöglichen. Idealerweise werden die Umweltbedingungen vor Ort gemessen und umfassen zumindest die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sowie den Wasserzustand des Bodens (Bodenwassergehalt und Bodeneigenschaften, einschliesslich nutzbarer Tiefe und Wasserrückhaltevermögen des Bodens). Insgesamt ist eine bessere Charakterisierung von Dürre- und Hitzeereignissen, d. h. ihrer Intensität und Dauer, erforderlich. Die Daten der kritischen Entwicklungsstadien müssen in thermische Zeit (oder Wachstumsgradtage) umgewandelt werden, um die Sorten zu charakterisieren und einen Vergleich zwischen den Standorten zu ermöglichen. Unter nicht gestressten Bedingungen sollte sich der Zeitpunkt der Entwicklungsstadien einer Sorte, ausgedrückt in der thermischen Zeit, zwischen den Standorten nicht unterscheiden, während Abweichungen auf das Auftreten von Stress hinweisen

können. Die sortenspezifische thermische Zeit für die wichtigsten Wachstumsstadien kann auch dazu beitragen, die regionale Eignung von Sorten und nicht von Kulturen als Ganzes zu verfeinern.

Sichtbare Anzeichen für Trockenstress während der Vegetationsperiode sind das Einrollen (Getreide, Mais) und Umklappen der Blätter (Sojabohne) oder das Aufstellen nach oben (Raps) sowie die Verfärbung, das Absterben der unteren/älteren Blattstadien oder das allgemeine Welken oder Schlawfwerden der Blätter (Sonnenblume, Kartoffel, Zuckerrübe). Die Unterschiede zwischen den Sorten sollten ermittelt werden. Da dies zeitaufwendig und manchmal subjektiv ist, kann die Fernerkundung für Veränderungen der Bodenbedeckung, der Architektur des Kronendachs oder von Vegetationsindizes wie NDVI (Grün der Pflanzen) eingesetzt werden. Auch Unterschiede in der Transpirationsrate, die mit der Empfindlichkeit des Luftdampfdruckdefizits oder dem Zugang zu tieferem Bodenwasser zusammenhängen, können durch Wärmebild- oder thermische Punktsensoren anstelle von oder zusätzlich zu manuellen Punktsensormessungen ermittelt werden. Insgesamt kann mit höheren Investitionen in Sortenversuche eine grosse Menge an Informationen gewonnen werden. Darüber hinaus können die gesammelten Daten als dringend benötigte Ground-Truth-Daten oder Referenzdaten für die fernerkundungs- oder satellitengestützte Erkennung von Trockenstress für die Bewässerungsplanung verwendet werden (siehe 6.7).

## **7.7 Data Mining für die Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Ertrag und die Qualität von Ackerkulturen und die Sortenauswahl**

Die Auswirkungen von Trockenheit oder Hitzestress auf den Ertrag und die Qualität von Kulturpflanzen im Schweizer Ackerbau sind bisher nicht systematisch quantifiziert worden. Um diese Wissenslücke zu schliessen, können drei Ansätze verfolgt werden, zwei experimentelle und ein analytischer. Erstens können Gewächshaus- und Feldexperimente (unter halbkontrollierten Bedingungen) durchgeführt werden, um die Reaktion von Pflanzen auf Bodenwasserdefizit und atmosphärische Trockenheit (hohes Dampfdruckdefizit) in verschiedenen Entwicklungsstadien zu untersuchen (Çakir, 2004; Fang et al., 2017; Lama et al., 2023; Li et al., 2019; NeSmith & Ritchie, 1992; Varga et al., 2015). Dies setzt Notationen zur Phänologie und die Messung der ober- und unterirdischen Umweltbedingungen voraus. Sowohl die Intensität als auch die Dauer von Trockenheit kann durch kontrollierte Bewässerung oder Bewässerungsanlagen und den Einsatz von Regenschutzanlagen moduliert werden (Kant et al., 2017; Kottmann et al., 2016; Schittenhelm et al., 2014; Thaler et al., 2023). Gemessen werden sollten Wachstumsrate und Biomasseakkumulation, Physiologie (Wassernutzungsverhalten und Photosynthese), Ertragskomponenten (zum Beispiel Kornzahl und -gewicht, Kornabbruch) und Qualitätsfaktoren. Ziel ist es, die Auswirkungen von Trockenstress auf den Ertrag quantitativ zu bewerten und den Zusammenhang zwischen den beobachteten Dürresymptomen und dem Ertrag aufzuzeigen. Korreliert zum Beispiel die Häufigkeit oder Dauer des Turgorverlustes in den Blättern oder das Einrollen der Blätter mit dem Ertragsverlust?

Der zweite experimentelle Ansatz besteht darin, Schweizer Sorten unter trockeneren und wärmeren Feldbedingungen in einer geeigneten Region in der Schweiz (Wallis) oder im Ausland anzubauen, um ihre Phänologie und Leistung zu vergleichen. Eine Studie in diesem Sinne wurde kürzlich für deutsche Weizensorten und -hybriden veröffentlicht, die in Moldawien zusammen mit osteuropäischen Sorten angebaut wurden (Kunz et al., 2023). Dies muss nicht unbedingt im Ausland geschehen: Die Kartoffelversuche in Conthey (Wallis) sind fast jedes Jahr dem Risiko von Trockenstress ausgesetzt.

Bei einem alternativen Data-Mining-Ansatz werden vorhandene Daten verwendet, um Fragen zu den Auswirkungen der Umwelt an sich (Chmielewski & Köhn, 1999) oder zu den Wechselwirkungen zwischen Genotyp und Umwelt auf Ertrag und Qualität (Herrera et al., 2020) zu beantworten. In einer kürzlich veröffentlichten Fallstudie für den deutschen Weizenanbau wurden deutschlandweit auf Gemeindeebene erhobene Weizenertragsdaten zusammen mit räumlich aufgelösten (gerasterten) Umwelt- und Phänologiedaten, niedrig aufgelösten Bodeneigenschaften und Landnutzungsdaten analysiert (Riedesel et al., 2023). Aus Umweltdaten abgeleitete Wetterindizes in Form von Aggregaten (Temperatursummen oder Schwellenwerte für Tage mit hohen Temperaturen) in bestimmten Entwicklungsstadien erklärten die Ertragsbeschränkungen. Hier wirkten sich moderater Trockenstress kurz vor der Blüte und moderater Hitzestress während der Blüte und der Kornfüllung auf den Ertrag aus. Zwischen den verschiedenen Bundesländern wurden Unterschiede in den Ertragsreaktionen auf Wetterindizes beobachtet (Riedesel et al., 2023). Die Ertragsdaten in dieser Studie stammen aus dem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) verwalteten Betriebsbuchhaltungsdatennetz, während der Deutsche Wetterdienst sowohl

tägliche meteorologische Daten als auch Schätzungen des pflanzenverfügbaren Wassers in einer Bodenschicht von 0-60 cm mit Hilfe eines Modells lieferte. Diese Studie zeigt das enorme Potenzial vorhandener Landnutzungs- und Ertragsdaten für die Bewertung der Auswirkungen von abiotischem Stress auf die landwirtschaftliche Produktion oder die Bestimmung von Umweltauflagen für die Landwirtschaft im Allgemeinen.

Daten aus nationalen Sortenversuchen enthalten Informationen über Ertrags- und Qualitätskomponenten von Genotypen (Referenzsorten und neu gezüchtete Sorten), die mit Umweltdaten (Wetterdaten) kombiniert werden können, um die Wechselwirkung zwischen Genotyp und Umwelt oder die Auswirkungen der Umwelt an sich auf den Ertrag und die Qualität von Pflanzen zu untersuchen. Im Fall der Schweizer Winterweizensortenversuchsdaten wurde bereits gezeigt, dass die Sorten unterschiedlich auf Trockenheit reagieren, da der Beitrag der Genetik zur Entwicklung des Kornertrags in zwei Jahren mit schwerer Trockenheit in der Schweiz, 2003 (Systeme mit geringem Input) und 2015 (unabhängig vom Input), über dem Durchschnitt für konventionelle Anbausysteme lag (Herrera et al., 2020). Datenanalysen zur Erforschung des Zusammenhangs zwischen Ertrags- und Umweltvariablen können für Weizen und andere Kulturen weiter ausgebaut werden, um das Anpassungspotenzial von Kulturen zu verstehen, die über Jahre und Standorte hinweg in der Schweiz variablen Umweltbedingungen ausgesetzt sind.

Während die bisher für die Schweizer Landwirtschaft vorgeschlagenen Sorten darauf abzielten, schweizweit und über mehrere Jahre hinweg Ertragsstabilität zu gewährleisten, erfordert die Variabilität der Witterungsbedingungen zwischen und innerhalb von Vegetationsperioden und zwischen landwirtschaftlichen Regionen regionale (Umwelt-) Sortenoptimierungsstrategien. Anhand von Daten aus nationalen Sortenversuchen können statistische Ertragsvorhersagemodelle für einzelne Sorten entwickelt werden, die über mehrere Jahre einer Kombination von regional unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Dies basiert derzeit auf Klimaeignungsfaktoren zu geschätzten phänologischen Stadien (Holzkämper et al., 2013, 2015), ähnlich wie die Wetterindizes in Riedesel et al. (Riedesel et al., 2023). Ihr Potenzial wurde bereits für Weizen demonstriert (Herrera et al., 2018), kann aber noch weiter verbessert werden, indem mehr sortenspezifische und umfassende Phänologiedaten, Umweltdaten vor Ort oder in der Nähe des Standorts, Informationen über den Wasser- und Nährstoffzustand des Bodens (Proctor et al., 2022) und möglicherweise das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten während der Versuche einbezogen werden. Diese Arten von Daten wurden früher als "Metadaten" bezeichnet, werden aber heute besser genutzt oder im Rahmen des "Envirotyping" als notwendige Ergänzung zur Genotypisierung und Phänotypisierung aufgewertet (Xu, 2016). Eine weitere Verbesserung der agroklimatischen Faktoren in Kombination mit einer besseren Auswahl der Entwicklungsstadien könnte ihre Erklärungskraft erhöhen. Insgesamt kann das Modell verwendet werden, um eine Auswahl von Sorten vorzuschlagen, die an einen Standort angepasst sind, basierend auf einem oder mehreren vergangenen Wettermustern für den Standort. Ein statistisches Modell hat hier den Vorteil, dass für neue Sorten nur zwei Jahre an Sortenversuchsdaten erforderlich sind, während für die Kalibrierung von Kulturpflanzenmodellen für neue Sorten fünf Jahre an Versuchsdaten erforderlich sind.

## 7.8 Arten- und Sortenmischungen für die Widerstandsfähigkeit von Systemen

Artenmischungen werden derzeit hauptsächlich aus agronomischen Gründen eingesetzt. So werden beispielsweise Erbsen zusammen mit Getreide angebaut, wobei letzteres die Lagerung von Erbsen verhindert, während Erbsen als Bodendecker Unkraut unterdrücken und N fixieren (Hauggaard-Nielsen et al., 2001; Klaiss, 2021). Die Kombination von Erbsen mit Gerste wird regelmässig in Sortenversuchen für den ökologischen Landbau getestet (Dierauer & Klaiss, 2023). Auch Schweizer Landwirte bauen teilweise Mischungen verschiedener Maissorten an, u.a. um das Risiko bezüglich Lager zu verringern, aber auch aus Qualitätsgründen oder zur Krankheitsunterdrückung. Auch bei der Kartoffel laufen Versuche, bei denen Ko-Kulturen oder krautige Arten als Fallen für Viren dienen (Dupuis et al., 2017). Insgesamt werden Arten- oder Sortenmischungen angebaut, um den Ertrag entweder zu verbessern oder zu stabilisieren. Die Mechanismen hinter dem Mehrertrag, d. h. dem Produktivitätsunterschied einer Arten- oder Sortenmischung im Vergleich zum gewichteten Mittelwert der einzelnen Sorten in Reinbeständen (Borg et al., 2018), sind nicht immer klar, wenn er auftritt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei Kombinationen von Getreide mit Leguminosen die Ressourcen besser genutzt werden. Die Pflanzen konkurrieren weniger um den aus dem Boden stammenden Stickstoff (N), weil Leguminosen symbiotisch N aus der Atmosphäre fixieren oder verschiedene Arten zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder aus unterschiedlichen Bodentiefen während der Saison N abrufen (Engbersen et al., 2021; Schöb et al., 2023). Die Kulturpflanzenvielfalt trägt auch zu einer höheren relativen Abundanz von

wachstumsfördernden Mikroorganismen bei (Stefan et al., 2021). Andererseits werden weniger Ressourcen für die Entwicklung von Saatgut aufgewendet, so dass im Vergleich zu Monokulturen ein niedrigerer Ernteindex erzielt wird (Chen et al., 2021). Sortenmischungen anstelle von Arten scheinen in konventionellen Anbausystemen und bei der Ertragsverarbeitung aufgrund der begrenzten Heterogenität bei relevanten agronomischen Merkmalen besser geeignet zu sein (Barot et al., 2017; Kopp et al., 2023; Mundt, 2002). Hier scheinen Mehrerträge konsistenter und in grösserem Umfang unter Stressbedingungen, wie sie durch Krankheiten hervorgerufen werden, aufzutreten, wenn Mischungen verwendet werden, die in Bezug auf Krankheitsresistenz oder Phänologie heterogen sind (Borg et al., 2018; Creissen et al., 2016; Mundt, 2002).

Das Ziel von Sortenmischungen kann auch die Ertragsstabilität (oder eine minimale Ertragsgarantie) als Anpassung an extremere oder intensivere Dürreereignisse und unvorhersehbare Niederschläge sein. Der Leitgedanke besteht darin, Sorten zu kombinieren, die unterschiedlich auf die Umweltbedingungen reagieren, um unerwartete und grosse Ertragsverluste zu vermeiden. Der Unterschied kann in den Mechanismen zur Bewältigung von oder Reaktion auf Trockenheit liegen. Ein offensichtliches Beispiel ist die Kombination einer Sorte mit einem tiefreichenden Wurzelsystem, das Wasser aus grösserer Tiefe aufnehmen kann, mit einer trockenheitsempfindlichen, aber ertragreicheren Sorte unter nicht gestressten Bedingungen. Neben diesem Kompensationseffekt könnte man sich auch eine Wechselwirkung vorstellen, bei der der verschwenderische Wasserverbrauch einer Sorte (aufgrund des Zugangs zu Wasser in grösserer Tiefe) die Blattflächen abkühlt und den Verdunstungsbedarf auch für andere Sorten senkt. Eine Wirkung von Sortenmischungen unter Trockenheits- und Hitzestressbedingungen wurde für Weizen nachgewiesen; der Kornertrag war im Vergleich zu reinen Beständen höher, die Auswirkungen von Hitzestress auf das Korngewicht wurden gemildert und die Wassernutzungseffizienz des Korns wurde verbessert (Kong et al., 2023).

Sortenmischungen für die kommerzielle Produktion im Ackerbau werden in der Schweizer Landwirtschaft kaum berücksichtigt, im Gegensatz zur betriebseigenen Futtermittelproduktion, wie z.B. bei Mais. Die Unsicherheit über die ertragssteigernde oder stabilisierende Wirkung und den wirtschaftlichen Ertrag ist immer noch gross. Potenzielle agronomische Herausforderungen und das begrenzte Angebot führen ebenfalls zu Fehleinschätzungen. Bei Getreide sind drei Kombinationen von zwei Winterweizensorten, eine pro Qualitätsklasse (Top, I und II), verfügbar. In der Anbausaison 2021-2022 machte die Spitzenmischung Isuela (eine Kombination aus den Sorten Molinera und Combin in dieser Saison) nur 1,6 % des gesamten Weizensaatgutabsatzes aus (swissem, 2023). Die Entwicklung leistungsfähiger Mischungen ist eine Herausforderung, da die Sorten untereinander keine sehr unterschiedlichen Morphologien oder Funktionen aufweisen im Vergleich zu Kombinationen aus verschiedenen Arten (Kopp et al., 2023; Wuest et al., 2021). Ausserdem müssen die klimatischen Anforderungen, die Länge der Vegetationsperiode, die Pflanzenhöhe und auch die Qualitätsaspekte ähnlich sein, um agronomische Komplikationen zu vermeiden und den Anforderungen der Verarbeitungsindustrie gerecht zu werden. Die Zusammensetzung der Mischung kann auf der Heterogenität der Eigenschaften der Sorten beruhen. Diese Merkmale sind jedoch nicht immer klar für Trockenheit oder Hitzestress definiert, oder die Sorten wurden in diesem Sinne nicht charakterisiert (was im Moment der Fall ist). Dies bedeutet, dass Versuche durchgeführt werden müssen, die die Merkmalsunterschiede zwischen den Sorten aufzeigen. Andererseits können Daten aus nationalen Sortenprüfungen oder Züchtungsversuchen genutzt werden, um Sorten zu identifizieren, die sich in ihrer Reaktion auf die Umweltbedingungen unterscheiden (siehe 7.6). Wuest et al. (Wuest et al., 2021) haben gezeigt, dass der Mehrertrag von Sortenmischungen in dänischen Weizenversuchen aus der sortenspezifischen Ertragsvariation im Reinbestand über Jahre und Standorte hinweg bis zu einem gewissen Grad vorhergesagt werden kann. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Ertragsreaktionen auf Umweltfaktoren ohne Fokussierung auf Merkmale und innerhalb des Umweltbereichs, für den die Sorte geeignet ist, bewertet werden (Kopp et al., 2023).

## 7.9 Aktuelle Ackerkulturen

### 7.9.1 Getreide

Getreide wird in der ganzen Schweiz angebaut und nimmt im Mittelland zwischen 10 und 20 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein (hier inklusive Körnermais; Abbildung 7-5). Weizen (*Triticum aestivum* L.) ist die mit Abstand am meisten angebaute Getreideart im Mittelland, gefolgt von Gerste (*Hordeum vulgare* L.) und Mais (*Zea mays* L.) (Abbildung 7-5; Tabelle 7-1). Der Selbstversorgungsgrad bei Weizen schwankte zwischen 2018 und 2021 zwischen 47,3 % und 60,8 %; die Verwendung im Inland bestand zu 58 % aus dem menschlichen Verbrauch

und zu 34 % aus der Verfütterung (Agristat, 2023b). Gerste wird hauptsächlich für die Tierfütterung (67 %) und die industrielle Verwendung (Malz, 25 %) angebaut; der Selbstversorgungsgrad liegt zwischen 51,2 % und 56,4 % (2018-2021). Für Triticale (x *Triticosecale* Wittmack.), der fast ausschliesslich für die Tierfütterung angebaut wird, sind nur sehr geringe Einfuhren erforderlich. Die Erzeugung von Roggen (*Secale cereale* L., 71 % für den menschlichen Verbrauch) und Hafer (*Avena sativa* L., 49 % für den menschlichen Verbrauch, 48 % für die Tierernährung) ist recht begrenzt. Hafer wird hauptsächlich wegen des niedrigeren Preises und der höheren Qualität importiert (Clémence et al., 2022). Bei Roggen liegt der Selbstversorgungsgrad bei etwa 80 % (mit Ausnahme von 54 % im Jahr 2021), aber 90 % des im Inland verwendeten Hafers werden eingeführt (Agristat, 2023b). Die Fläche von Dinkel (*Triticum spelta* L.) hat im Laufe der Jahre zugenommen, aber der Ertrag scheint nicht stabil zu sein (Tabelle 7-1). Insgesamt hat die Getreidefläche in den letzten 20 Jahren abgenommen (Tabelle 7-1, siehe 7.2). Die Erträge bei Winter- und Sommergetreide schwanken zwischen 56 und 70 dt ha<sup>-1</sup> bzw. 40 und 50 dt ha<sup>-1</sup>. Der geringere Ertrag ist ein Hauptgrund für die marginale Stellung von Sommerweizen im Vergleich zu Winterweizen in der Schweiz. Dennoch ist der Sommerweizen Teil des Weizenzuchtprogramms in der Schweiz und zeichnet sich durch eine hohe Backqualität aus. Sommerweizen wird mit Winterweizen gekreuzt, um einen ertragreichen und hochwertigen Weizen zu erhalten, der im Winter ausgesät werden kann (Brabant et al., 2006).

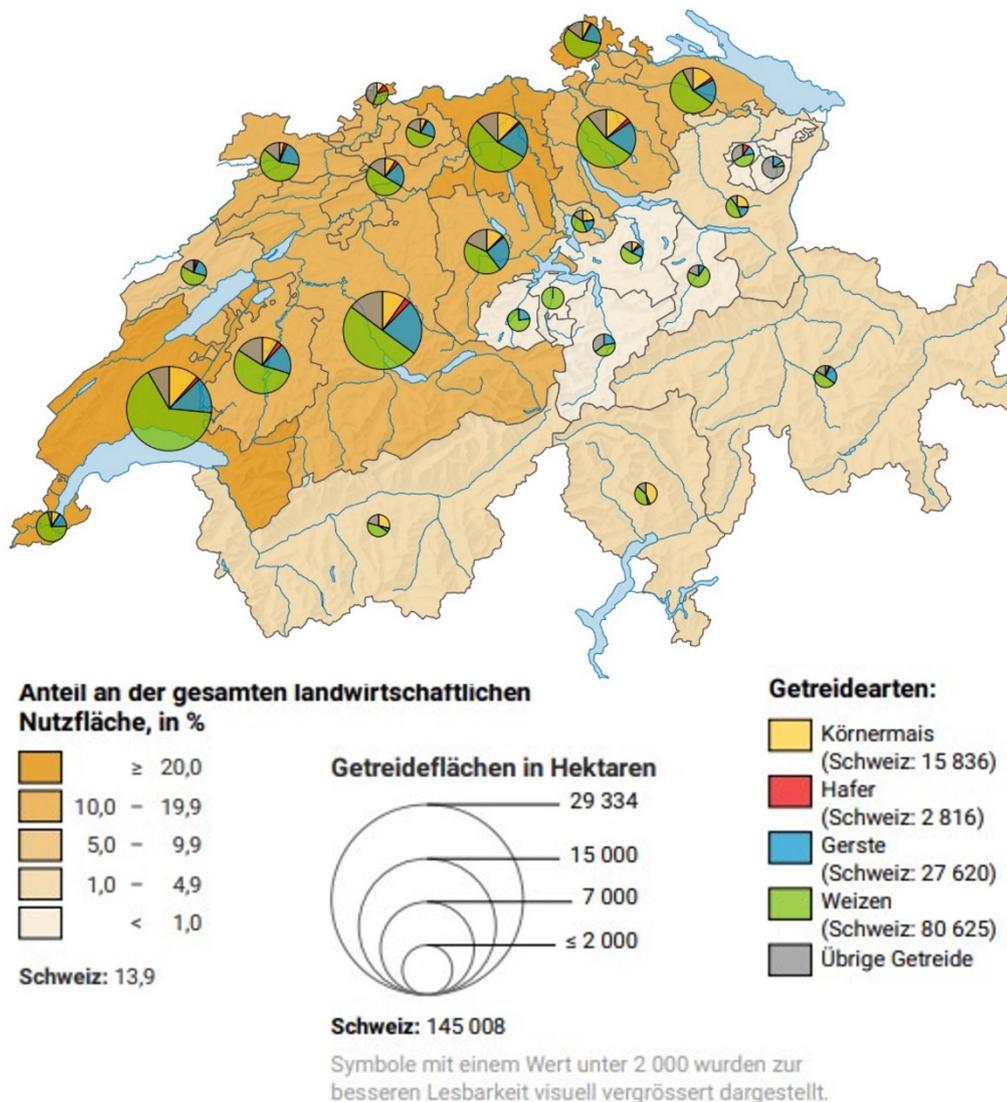


Abbildung 7-5 Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Jahr 2022 für die Produktion von Getreide, einschliesslich Körnermais, an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche des Kantons, die Gesamtfläche für Getreide in Hektar pro Kanton (Grösse des Kreisdiagramms) und die Anteile der verschiedenen Getreidekulturen pro Kanton (Teile des Kreisdiagramms). Die Produktion von Getreide, einschliesslich Körnermais, nimmt 13,9 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz ein. Die Gesamtanbaufläche (ha) der verschiedenen Getreidearten in der Schweiz ist neben den entsprechenden Symbolen angegeben. Angepasst aus Bundesamt für Statistik BFS (2023d).

Tabelle 7-1 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von Getreide. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
Getreide <sup>1</sup>	160'664	134'580	127'662	125'005	124'226	128'844	129'173
Winterweizen (inkl. Hartweizen)	90'823	78'657	74'706	72'741	66'905	71'572	
Sommerweizen	3'285	1'196	1'007	878	2'205	1'149	80'625
Futterweizen	nv	7'057	6'612	6'715	9'613	9'713	
Wintergerste	42'094	27'664	26'935	25'929	26'728	26'995	27'620
Sommergerste	3'647	1'285	963	925	1'080	1'012	
Triticale	10'306	10'274	7'960	7'683	7'457	7'425	7'123
Dinkel	1'404	4'136	5'367	5'692	5'933	6'650	7'966
Hafer	3'643	2'248	1'855	1'905	1'798	1'824	2'816
Roggen	5'067	1'789	1'628	1'713	1'793	1'918	1'854
Emmer, Einkorn	63	82	284	430	330	283	nv <sup>2</sup>
Mischel von Futtergetreide	291	170	222	266	256	199	242
Reis	nv	nv	89	90	90	62	nv <sup>2</sup>
Mischel von Brotgetreide	41	22	34	38	38	42	450
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>3,4</sup></b>							
Weichweizen	59,6	58,4	57,6	58,9	64,1	53,3	56,7
Winterweizen	59,8	57,7	57,2	58,5	63,9	53,3	56,2
Sommerweizen	53,5	51,0	40,7	42,3	44,9	44,6	46,2
Futterweizen	nv	64,8	63,2	65,0	70,3	54,3	61,4
Gerste	59,9	60,1	64,8	70,4	69,1	60,6	66,3
Wintergerste	60,9	60,5	65,6	71,0	69,9	61,4	67,0
Sommergerste	48,5	51,8	42,6	52,7	48,0	38,4	45,0
Triticale	62,2	56,8	59,4	60,2	62,9	50,8	60,2
Dinkel	49,9	38,9	40,5	39,9	39,8	30,7	36,6
Hafer	51,9	49,9	50,7	56,3	49,7	38,4	45,4
Roggen	61,5	61,0	54,5	58,7	57,5	43,6	56,5
Mischel von Futtergetreide	50,2	51,9	50,4	50,7	53,1	37,9	45,3
Mischel von Brotgetreide	60,4	61,1	54,5	57,4	54,2	43,7	51,0
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>3,5</sup></b>							
Weichweizen	561'164	507'469	474'123	472'936	500'986	435'188	453'676
Winterweizen (inkl. Hartweizen)	543'591	442'671	428'220	425'607	423'477	377'300	391'682
Sommerweizen	17'573	6'104	4'105	3'709	9'897	5'125	4'954
Futterweizen	nv	58'694	41'798	43'620	67'612	52'763	57'040
Gerste	274'107	174'113	180'948	189'096	192'050	169'718	183'159
Wintergerste	256'414	167'449	176'845	184'220	186'862	165'829	179'111
Sommergerste	17'693	6'664	4'103	4'876	5'188	3'889	4'048
Triticale	64'080	58'332	47'342	46'260	46'872	37'747	42'854
Dinkel	7'314	16'093	21'796	22'693	23'615	20'404	29'190
Hafer	26'295	8'932	8'256	9'646	8'905	7'359	12'790
Roggen	22'404	13'708	10'112	11'184	10'333	7'948	10'485
Mischel von Futtergetreide	1'462	883	1'120	1'349	1'358	809	1'097
Mischel von Brotgetreide	248	135	184	217	205	185	324

<sup>1</sup> ohne Körnermais, ohne Alternativen zu Weizen; <sup>2</sup> die Fläche der Kategorie "Sonstiges Getreide" (Bundesamt für Statistik BFS, 2023c) wurde zur Gesamtfläche für Getreide hinzugefügt; <sup>3</sup> die Zahlen für das Jahr 2022 für sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>4</sup> Verwendbare Produktion geteilt durch Anbaufläche; <sup>5</sup> Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb. nv, nicht vorhanden.

Getreidewurzelsysteme entwickeln sich zum Zeitpunkt der Stängelverlängerung bis zu 1 m tief und bis zur Blüte in unbegrenzten Böden bis zu 2 m tief (King et al., 2003). Für Weizen und Mais wurden grössere maximale Tiefen berichtet, aber insgesamt befinden sich bei Getreide 95 % der Wurzelmasse in den oberen 90 bis 100 cm (Fan et al., 2016). Wintergetreide hat den Vorteil, dass es bei der Wiederaussaat nach dem Winter einen grösseren Teil des Bodenwassergehalts nutzen kann als Frühjahrsgetreide. In einer Umfrage unter Züchtern, die Getreidesorten zur

Prüfung in die Schweiz liefern, wurde für Deutschland und die Schweiz ein zunehmender Trend zur Aussaat von Sommergetreide im Herbst genannt, während dies in Frankreich und Italien bereits gängige Praxis ist. Der Grund dafür ist das vermehrte Auftreten von Frühjahrstrockenheit. Von den beiden hochwertigen Schweizer Frühjahrsorten auf der Empfehlungsliste für 2024 kann eine im Herbst gesät werden (wenn auch mit leichten Qualitätseinbußen). Dies gilt auch für eine Triticale-sorten auf der Liste (Strebel et al., 2023). Triticale gilt als trockenheitstoleranter als Weizen, kann aber gleichzeitig auf Böden angebaut werden, die im Winter zu Staunässe neigen. Neben einem höheren Ertrag an Stroh kann er auch niedrige Ährenzahlen besser ausgleichen, indem er die Kornzahl pro Ähre erhöht (Arvalis, 2014). Roggen wird eher auf wenig fruchtbaren Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität angebaut, vermutlich wegen seiner relativ höheren Trockentoleranz im Vergleich zu Triticale, Gerste und Weizen (Schittenhelm et al., 2014). Roggen blüht auch früher, vergleichbar mit Gerste (Schittenhelm et al., 2014). Bei der in Frankreich angebauten Wintergerste gilt dies als Schutzmechanismus vor Trockenheit und Hitzestress (Bouthier et al., 2012). Hafer gilt als leistungsfähige Deckfrucht, da er ein grosses Blattwerk produziert, das Unkraut unterdrückt, während sein feines und tiefes Wurzelsystem die Bodenstruktur verbessert.

Ob Trockenheit und Hitzestress bei Getreide in der Schweiz bereits zu Ertrags- und Qualitätseinbußen führen, konnte bisher nicht quantitativ festgestellt werden (siehe 7.7). In Weizensortenversuchen von Agroscope Changins (Nyon) wurden Symptome wie starkes Blattrollen bereits gegen Ende der Vegetationsperiode im Jahr 2023 und noch früher im Jahr 2022 beobachtet. Für die Getreideproduktion in Frankreich wurden die folgenden allgemeinen Überlegungen zum Auftreten von Trockenstress während der Vegetationsperiode angestellt (Bouthier et al., 2012). Bei der Aussaat können der Termin und die Saattiefe angepasst werden, um das verfügbare Wasser zu nutzen, während sich der Aufgang bei Wasserdefizit im Boden verzögert. Bei der Bestockung sind keine grösseren Probleme zu erwarten, da sich das Wurzelsystem schnell entwickelt und das im Winter gesammelte Bodenwasser genutzt wird. Tritt Trockenheit auf, kann dies die Stickstoffverfügbarkeit beeinträchtigen, da 15-20 mm Wasser (Niederschlag, Bewässerung, Bodenwasser) für die Auflösung und Aufnahme durch die Wurzeln erforderlich sind (Bouthier et al., 2012). Eine weitere Folge von Trockenheit in der Bestockungsphase könnte eine verringerte Wachstumsrate und ein Absterben der Pollen sein. Die Phase der Stängelstreckung ist sehr empfindlich, da die Entwicklung von Quellen und Senken noch nicht abgeschlossen ist. Eine Bewertung des Bodenwasserdefizits ist zu diesem Zeitpunkt schwierig, da es sich schrittweise entwickeln könnte. Das Wurzelsystem dehnt sich noch in die Tiefe aus, was bedeutet, dass in tiefen Böden ein Wasserdefizit unwahrscheinlich ist. Aber auch hier kann die Stickstoffaufnahme unter trockenen Bedingungen Probleme bereiten. Die frühe Phase der Kornfüllung reagiert besonders empfindlich auf Trockenstress, da das Gewichtspotenzial der Körner durch die Zellausdehnung in den sich entwickelnden Samen bestimmt wird (Bouthier et al., 2012). Auch die Photosynthese und damit die Quellstärke wird beeinträchtigt, wenn die Transpiration reduziert ist. Es steht weniger Kohlendioxid zur Verfügung, und in Ermangelung von Verdunstungskälte erwärmen sich die Blätter auf Temperaturen, die über dem Optimum für die Photosynthese liegen.

Insgesamt erstreckt sich die kritischste Phase für die Bestimmung der Kornzahl und des Ertrags vom Beginn der Stängelstreckung bis zu 7-10 Tagen nach der Anthese (Fischer, 1985). Die Wachstumsrate während dieser Zeit und die erreichte Biomasse bestimmen die Reproduktionsentwicklung (potenzielle Kornzahl und potenzielle Korngrösse). Eine Verkürzung dieser Phase sowie eine verringerte Wachstumsrate und Photosynthese aufgrund von Trockenheit oder geringer Strahlung schwächt die Quellstärke und hemmt die Entwicklung der Senkenstärke (Slafer et al., 2023). Genetische Variationen gibt es bei der Temperaturreaktion auf die Geschwindigkeit und Dauer der Stammverlängerung (Kronenberg et al., 2021). Darüber hinaus hat die Dauer des Wachstums vor der kritischen Stängelstreckungsphase keinen Einfluss auf die Kornzahl und den Samenansatz. Es hat sich auch gezeigt, dass eine frühere Blüte und Kornfüllung bei Sorten, die an die klimatischen Bedingungen angepasst sind, nicht unbedingt zu einem geringeren Kornertrag führt (Kunz et al., 2023). Diese Anpassung hängt dann mit der Entwicklung der Quellstärke in der kritischen Phase zusammen.

Ein Simulationsmodell für die Auswirkungen künftiger Trockenheit und Hitzebelastung auf die Produktivität von Weizen in ganz Europa hat für das Jahr 2050 geringere Ertragseinbußen aufgrund von Trockenheit vorausgesagt als erwartet, da Weizen früher reifen wird. Andererseits wird der Hitzestress um die Blüte herum zunehmen, was insbesondere die heutigen hitzeempfindlichen Sorten beeinträchtigen kann (Semenov & Shewry, 2011). Es wurden verschiedene Studien über optimale und extreme Werte für das Wachstum und die Entwicklung von Weizen während der Vegetationsperiode durchgeführt. Im Allgemeinen liegt der optimale Bereich der Tagesmitteltemperaturen während der gesamten Vegetationsperiode bei 17 bis 23 °C, mit Extremwerten bei 0 °C und 37 °C (Porter & Gawith,

1999). In anderen Studien wurden die kritischen Temperaturen in einem Zeitraum von fünf Tagen vor der Blüte und während der Blüte mit 31 °C (Wheeler, Batts, et al., 1996; Wheeler, Hong, et al., 1996) und 27,3 °C ± 0,5 °C (Liu et al., 2023) angegeben. Oberhalb dieser Temperaturen wird eine hohe Anzahl steriler Körner beobachtet, was auf Auswirkungen auf die Blütendynamik und die Blütenentwicklung, Bestäubung und Befruchtung zurückzuführen ist. Prozesse wie Cleistogamie (Selbstbestäubung bei sich nicht öffnenden Blüten) und das Öffnen sekundärer Ährchen (für Kreuzbestäubung) erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Bestäubungserfolgs bei Weizen unter hohem Temperaturstress (Liu et al., 2023). Darüber hinaus kann die Verdunstungskälte auch ohne Trockenstress zur lokalen Kühlung der Blüten beitragen.

Neben dem Kornertrag und seinen Bestandteilen sind die Proteinmenge und -qualität wichtig, insbesondere für Brotweizenmehl, da ein relativ hoher Proteingehalt und ein starkes Gluten erforderlich sind. Bisher wurden sowohl positive als auch negative Auswirkungen von Trocken- und Hitzestress auf den Protein- und Glutengehalt und die Glutenfestigkeit berichtet (Lama et al., 2022, 2023; Porter & Semenov, 2005).

Schweizer Klimaszenarien prognostizieren für das Mittelland bereits bis 2035 und selbst bei Abschwächung des Klimawandels (RCP2.6) eine deutliche Zunahme der Sommertage, d.h. der Tage mit Höchsttemperaturen über 25 °C (Abbildung 7-6). Bereits heute überschreiten die Maximaltemperaturen im Zeitraum Mai bis August an der MeteoSchweiz-Messstation in Changins (Nyon) regelmässig die kritische Temperatur von 27 °C (Liu et al., 2023) (Abbildung 7-7).

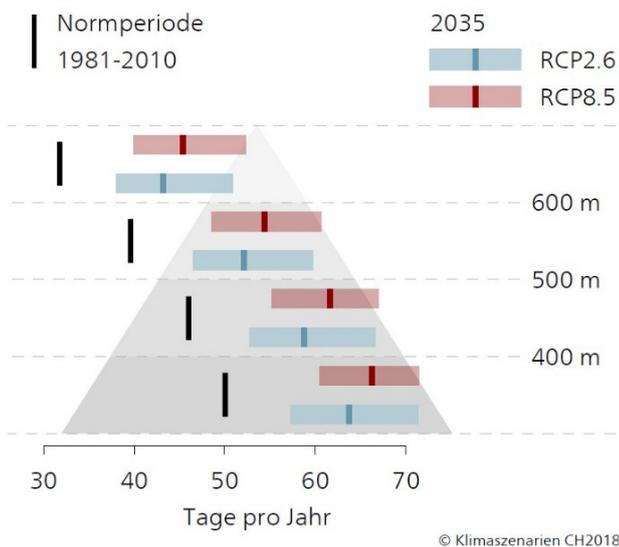


Abbildung 7-6 Geschätzte Anzahl Sommertage, d.h. Tage, an denen die Temperatur 25 °C oder mehr erreicht (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2023), für verschiedene Höhen über dem Meeresspiegel im Schweizer Mittelland, für 2035 im Vergleich zur Referenzperiode (1981-2010) und zu Emissionsszenarien mit (RCP2.6) und ohne Klimaschutz (RCP8.5). Quelle: National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.) (2018).

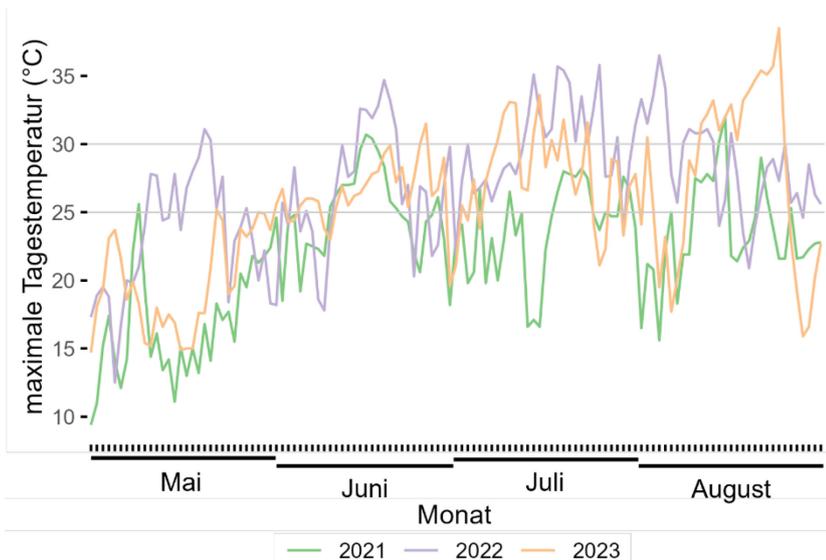


Abbildung 7-7 Tägliche Maximaltemperaturen von Anfang Mai bis Ende August in den Jahren 2021, 2022 und 2023, gemessen an der MeteoSchweiz-Wetterstation in Changins (Nyon). Datenquelle: MeteoSchweiz.

Verschiedene Quellen nennen unterschiedliche Vernalisationstemperaturen (3-10 °C, 0-7 °C oder 0-12 °C) und -zeiträume (30 bis 60 Tage) für Wintergetreide. Frühjahrssorten benötigen für die Blüteninduktion Temperaturen zwischen 7 °C und 18 °C für 5 bis 15 Tage (Gooding & Shewry, 2022). Die Befürchtung, dass die Anforderungen an die Vernalisation von Wintergetreide im Zuge des Klimawandels nicht mehr erfüllt werden, ist daher für die Schweizer Getreideanbausaison nicht gerechtfertigt.

Für das Auftreten von Trockenstress bei Getreide im kommenden Jahrzehnt wird nicht nur das Ausbleiben von Niederschlägen ausschlaggebend sein. Ein tiefes Wurzelsystem kann Trockenheit aufschieben oder ihr sogar entgehen, zumindest wenn die Pflanzen in tiefen Böden mit guter Wasserspeicherkapazität oder mit noch verfügbarem Wasser angebaut werden (Fang et al., 2017). Eine Studie von Friedli et al. (Friedli et al., 2019) hat Hinweise auf ein nachblühendes Wurzelwachstum bei modernen Weizensorten gefunden, das bei spätsaisonalen Trockenheit von besonderer Bedeutung sein kann, da diese Sorten in der kritischen Phase der Stängelstreckung ohne Trockenheit kein tiefes Wurzelsystem haben.

Getreide (mit Ausnahme von Körnermais in einigen Fällen) wird in der Schweiz nicht als bewässerungswürdig angesehen. Daten über die Bewässerung von Getreide in Frankreich, die zwar üblich, aber nicht weit verbreitet ist, können einen Eindruck von den Anforderungen und den potenziellen Gewinnen vermitteln. Bei Brotweizen werden zwischen dem Beginn der Stängelstreckung und der Kornreife etwa 350 bis 420 mm Wasser verbraucht, um einen Ertrag von etwa 100 dt ha<sup>-1</sup> zu erreichen (Daten für 1992-2009, Sorten unterscheiden sich nicht). Dies entspricht etwas weniger als 0,5 mm<sup>3</sup> Wasser pro kg erzeugtem Weizenkorn (Bouthier et al., 2012). Die Verteilung beträgt 15 % (60 mm) während des Beginns der Stängelstreckung bis zum Zweiknotenstadium, 35 % (160 mm) vom Zweiknotenstadium bis zur Blüte, 30 % (140 mm) von der Blüte bis zum Milchkornstadium und 20 % (90 mm) von diesem Stadium bis zur Reife. Die Bewässerung bringt einen Ertragszuwachs von 16-20 dt ha<sup>-1</sup> bei 70-100 mm Bewässerung auf oberflächlichen Böden (weniger als 80 mm verfügbares Wasser im Boden) und 8,6 bis 9,6 dt ha<sup>-1</sup> auf tieferen Böden mit mehr als 150 mm verfügbarem Wasser und bei 40-56 mm Bewässerung (Situation für Poitou-Charentes in Frankreich). Wichtige Überlegungen zur Bewässerung sind das Risiko der Einlagerung am Ende der Saison, wenn die Bewässerung zu früh erfolgt, weil sich zu viele Ähren entwickelt haben. Es besteht auch ein höheres Risiko des Austriebs vor der Ernte, und eine Bewässerung um die Blüte herum sollte nur bei trockenen Bedingungen in Betracht gezogen werden, um die Entwicklung von Ährenkrankheiten zu vermeiden (Bouthier et al., 2012).

### 7.9.2 Mais

Mais ist flächenmässig die dritt wichtigste Getreideart und nach Gerste die zweit wichtigste Futterpflanze (gemessen an den Körnern) (Abbildung 7-5, Tabelle 7-2). Etwa 25 % (in Fläche) der Inlandserzeugung besteht aus Körnermais, aber je nach den Witterungsbedingungen während der Vegetationsperiode und den sonst vorhandenen Futtermitteln können die Landwirte entscheiden, Mais als Ganzpflanzensilage zu ernten; dies auch wenn der

Körnermais nicht rechtzeitig abreift. Insgesamt werden jährlich zwischen 2,4 und 2,8 Millionen Tonnen Silomais (in Frischmasse) als Tierfutter in den Betrieben verwendet, und es wird ein Selbstversorgungsgrad von 100 % erreicht. Bei Körnermais werden rund 300'000 Tonnen importiert, verglichen mit einer Inlandsproduktion von 134'000 bis 220'000 Tonnen (Agristat, 2023b).

Maissorten unterscheiden sich stark in der Dauer der Vegetationsperiode, die hauptsächlich von den erreichbaren Temperatursummen abhängt. Körnermais benötigt bis zur Reife höhere Temperatursummen als Silomais (siehe 5.4). Die Wahl der Sorte hängt daher von den örtlichen Umweltbedingungen und den Entscheidungen der Landwirte bei ihrer Fruchtfolgegestaltungen ab. Letztere bestimmen den möglichen Aussaattermin und die zu erwartenden Erntedaten. In der Schweiz ist es nicht ungewöhnlich, dass die Aussaat bis in den Juni hinein stattfindet, weil noch vorgängig Kunstfutter in Form von Heu oder Silage genutzt wird oder wenn Niederschläge oder kaltes Wetter die Aussaat verzögern. Im Allgemeinen werden die potenziellen Erträge innerhalb von Reifegruppen (Frühreife) bewertet (Hiltbrunner et al., 2023). Die Flexibilität der Landwirte bei Entscheidungen über Fruchtfolgen, Aussaattermine und Sortenwahl ist grösser, wenn Mais für die betriebseigene Viehfütterung erzeugt wird. Zu diesem Zeitpunkt werden eher spät reifende Sorten wegen ihres höheren Ertragspotenzials gewählt. Sollten die Erträge aufgrund ungünstiger Umweltbedingungen während der Saison ausfallen, können sie durch eine Ernte vor der Reife als Silomais noch (teilweise) gerettet werden. Jährlich werden etwa 50 neue Sorten in den nationalen Sortenversuchen getestet, von denen ca. 25 die zweijährige Prüfung abschliessen. Etwa 10 neue Sorten werden anschliessend via die Liste der empfohlenen Sorten empfohlen. Bisher konzentrierten sich die Prüfungskriterien auf Frühzeitigkeit (Länge der Vegetationsperiode), Korn- oder Biomasseertrag, Faktoren der Futterqualität, Wurzellagerung sowie Schädlings- und Krankheitstoleranz (Hiltbrunner et al., 2023). Indikatoren für Trockenstress, wie z.B. das Blattrollen oder der Länge des Anthesis-Silking-Intervalls (siehe 7.5), werden nicht systematisch oder teilweise erfasst, und nicht in Wert gesetzt.

Tabelle 7-2 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von Mais. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
Mais	62'492	63'657	62'703	62'707	64'502	62'891	62'472
Körnermais (inkl. Saatgut)	22'006	16'898	15'700	16'015	17'655	17'214	15'836
Silo- und Grünmais	40'486	46'759	47'003	46'692	46'847	45'677	46'636
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>1,2</sup></b>							
Körnermais (inkl. Saatgut)	96,5	94,3	97,7	109,0	110,0	78,6	98,9
Silomais	456,0	478,0	513,0	550,3	572,6	588,2	514,5
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>1,3</sup></b>							
Körnermais (inkl. Saatgut)	212'391	143'502	134'853	174'627	219'692	98'216	125'317
Silo- und Grünmais <sup>4</sup>	541'756	698'764	839'176	879'772	911'447	955'529	867'762

<sup>1</sup> die Zahlen für das Jahr 2022 sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>2</sup> Verwendbare Produktion geteilt durch Anbaufläche; <sup>3</sup> Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb; <sup>4</sup> Trockensubstanz.

Die Bewässerung von Mais ist im westlichen Mittelland bereits weit verbreitet, während sie im Zentrum und im Osten viel stärker von der Verfügbarkeit von Bewässerungsinfrastrukturen und Wasserverfügbarkeit abhängt. Die Bewässerung wird meist zur Unterstützung der Futtermittelproduktion in den Betrieben eingesetzt. Eine Studie in der Region Berner Seeland über die künftige Wassernachfrage und -verfügbarkeit für die Bewässerung kam zu dem Schluss, dass später reifende Sorten von Körnermais mit höherer Produktivität von den künftigen höheren Temperaturen profitieren werden, allerdings mit einem starken Anstieg des Bewässerungsbedarfs (bis zu 80 % bis Ende des Jahrhunderts in Klimaszenarien ohne Abschwächung, RCP8.5). Bei frühen und mittelfrührefen Sorten hängt der Bewässerungsbedarf von den Aussaatterminen ab (Holzkämper, 2020). Die Landwirte können sich zwar für die hohe Produktivität spät abreifender Sorten entscheiden, doch hängt dies von der Verfügbarkeit von Wasser für die Bewässerung ab. Zu den Optionen für Regionen ohne Zugang zu grossen Wasserreservoirs wie Seen (siehe 6.3) oder für eine verbesserte Wasserproduktivität im Allgemeinen gehören früh abreifende Sorten und frühere

Aussaattermine, um das Erntestadium zu erreichen, ohne dass saisonale Trockenheit das Ertragspotenzial oder den Ertrag zu stark beeinträchtigt. Gleichzeitig könnten Perioden mit Hitzestress, die die Produktivität beeinträchtigen, vermieden werden (Holzkämper, 2020). Es ist jedoch zu bedenken, dass Mais bereits in frühen Wachstumsstadien Temperaturen von deutlich über 10 °C benötigt, unter anderem um Kältestress für den Photosyntheseapparat zu vermeiden (Leipner et al., 1999), und dass ungünstige Bedingungen (niedrige Temperaturen, Überschwemmungen) die Morphogenese beeinträchtigen können, d. h. den Beginn der vegetativen und reproduktiven Strukturen (Kolben und Rispe) sehr früh in der Entwicklung (Lejeune & Bernier, 1996; Miedema, 1982). Bei der künftigen Sortenwahl muss möglicherweise auch die Futterqualität gegenüber einem hohen Ertragspotenzial in den Vordergrund gestellt werden, indem frühe Sorten für eine gleichbleibende Futterqualität (guter Stärkegehalt und hohe Verdaulichkeit) bevorzugt werden. Ein weiterer Grund für die Wahl früherer Sorten ist der zunehmende Bedarf an Zwischenfruchtaussaaten zur Überbrückung der Wintersaison, was in der späten Saison schwierig sein kann (Limagrain UK Ltd., 2022).

Die für das Ertragspotenzial, den Ertrag und die Qualität kritischen Wachstumsstadien entsprechen denen für Getreide im Allgemeinen, nämlich das Vorblütenstadium, das gleichzeitig mit der Stängelstreckung auftritt, die Blüte (Anthesis und Silking) und das frühe Nachblütenstadium (Abbildung 7-3). Trockenheit in diesen Phasen beeinträchtigt den Kornertrag und die Qualität (Butts-Wilmsmeyer et al., 2019; Çakir, 2004; Denmead & Shaw, 1960; NeSmith & Ritchie, 1992; Turc & Tardieu, 2018). Hitzestress ist wahrscheinlich ein Grund für die Aufgabe der Maissaatgutproduktion im Tessin, und auch die Saatgutproduzenten in der Region La Côte (Genfersee, Waadt) haben in dieser Hinsicht Probleme. Die kritische Hochttemperaturschwelle für den Samenansatz (Bestäubung und Befruchtung) bei Mais wurde auf 37,9 °C ± 0,4 °C festgelegt (Liu et al., 2023). Hitzestress (33,5 °C/25 °C, Tag/Nacht) während der Kornfüllung führt zu einem vorzeitigen Wachstumsstillstand, während der Stärke-, Protein- und Ölgehalt entweder unterschiedlich betroffen oder in gleicher Weise proportional reduziert ist (Mayer et al., 2016; Wilhelm et al., 1999).

Das Wurzelwachstum von Mais muss durch eine ausreichende, aber nicht zu hohe Wasserverfügbarkeit angeregt werden, um die Böden früh in der Entwicklung zu erkunden. Das Wurzelwachstum setzt sich auch in der Reproduktionsphase fort; zwischen dem 12. Blattstadium (Stängelstreckung) und dem Rispenschieben (Erscheinen der männlichen Blüte) nimmt die Länge des Wurzelsystems immer noch um das Doppelte zu und dehnt sich bis zum Stadium der Kornfüllung aus (Dwyer et al., 1988). Wie bei anderen Getreidearten sind 95 % der Wurzelmasse bis zu einer Tiefe von 90 cm vorhanden, während die Wurzeln bis zu 240 cm tief reichen können (Fan et al., 2016). Späte Dürreereignisse könnten daher kompensiert werden, wenn in tieferen Bodenschichten noch Wasser verfügbar ist.

Maiszüchter schlagen entweder bereits trockenolerante Sorten für den Schweizer Markt vor oder beabsichtigen, dies in den kommenden Jahren zu tun. Sie ziehen auch Sorghum oder Hirse als alternative Kulturen für Mais in der Schweiz oder in Europa im Allgemeinen in Betracht. Im Sorghum-Zuchtprogramm hat die Trockenoleranz oberste Priorität. Die Züchtung von Mais auf Trockenoleranz ist für Südeuropa sehr wichtig, wird aber auch für den Rest Europas immer wichtiger. Das Gleiche gilt für die Hitzetoleranz. Abiotische Stressfaktoren werden für die Maiszüchtung als wichtiger angesehen als Pflanzenkrankheiten oder gleichwertig. Die Züchter haben auch darauf hingewiesen, dass es sowohl für Trockenheit als auch für Hitze Feldversuchsplattformen gibt, in denen die Auswirkungen von Stress in verschiedenen Entwicklungsstadien getestet und physiologische Reaktionen gemessen werden. Es besteht auch die feste Überzeugung, dass die Entwicklung von Trockenoleranz bei Mais möglich ist (oder zumindest in hohem Masse) und dass in Südeuropa bereits Ergebnisse erzielt wurden. Diese Entwicklungen werden Regionen zugutekommen, in denen eine Bewässerung nicht möglich ist. Bei schwerem Trockenstress wird jedoch Sorghum als Alternativkultur angeboten.

Die Bewässerung von Mais ist in Frankreich weit verbreitet und wird als nahezu unverzichtbar für die Erzeugung von Saatmais angesehen, für den Frankreich weltweit den höchsten Exportanteil hat. Für die Produktion von 1 kg Silo- und Körnermais werden 238 l bzw. 454 l Wasser benötigt. Hier wird geschätzt, dass 100 mm Bewässerung einen Mehrertrag von 45 dt ha<sup>-1</sup> liefern können (nach semae. Ressources pédagogiques de la filière semences (2023)).

### 7.9.3 Ölsaaten

Ölsaaten werden im gesamten Mittelland angebaut, wobei der Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Schaffhausen, Aargau, Waadt und Genf besonders hoch ist (Abbildung 7-8). In der Waadt wurden im Jahr 2022 10'000 ha mit Ölsaaten bepflanzt. Raps (*Brassica napus* L.) ist bei weitem der wichtigste (im Mittelland), gefolgt von

Sonnenblumen (*Helianthus annuus* L.) und Soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Sie nehmen in der Schweiz 77 %, 15 % bzw. 7 % der Fläche ein. Zwischen 2000 und 2010 ist die Rapsproduktion um 50 % gestiegen und scheint seither stetig zuzunehmen (Tabelle 7-3). Die Sonnenblumenproduktion schwankte, während sich die Sojabohnenfläche zwischen 2000 und heute verdreifacht hat. Ihre Produktion ist um 65 % gestiegen (Tabelle 7-3). Bei Rapskörnern wurde eine nahezu vollständige Selbstversorgung erreicht, während bei Sojabohnen mehr als das Doppelte der Inlandsproduktion importiert wird. Bei Sonnenblumenkörnern werden 40 % importiert (Agristat, 2023b). Das "nasse" Jahr 2021 scheint sich auf die Raps- und Sonnenblumenerträge ausgewirkt zu haben, während die Sojabohnenerträge in den "trockenen" Jahren 2018 und 2022 niedriger waren (Tabelle 7-3).

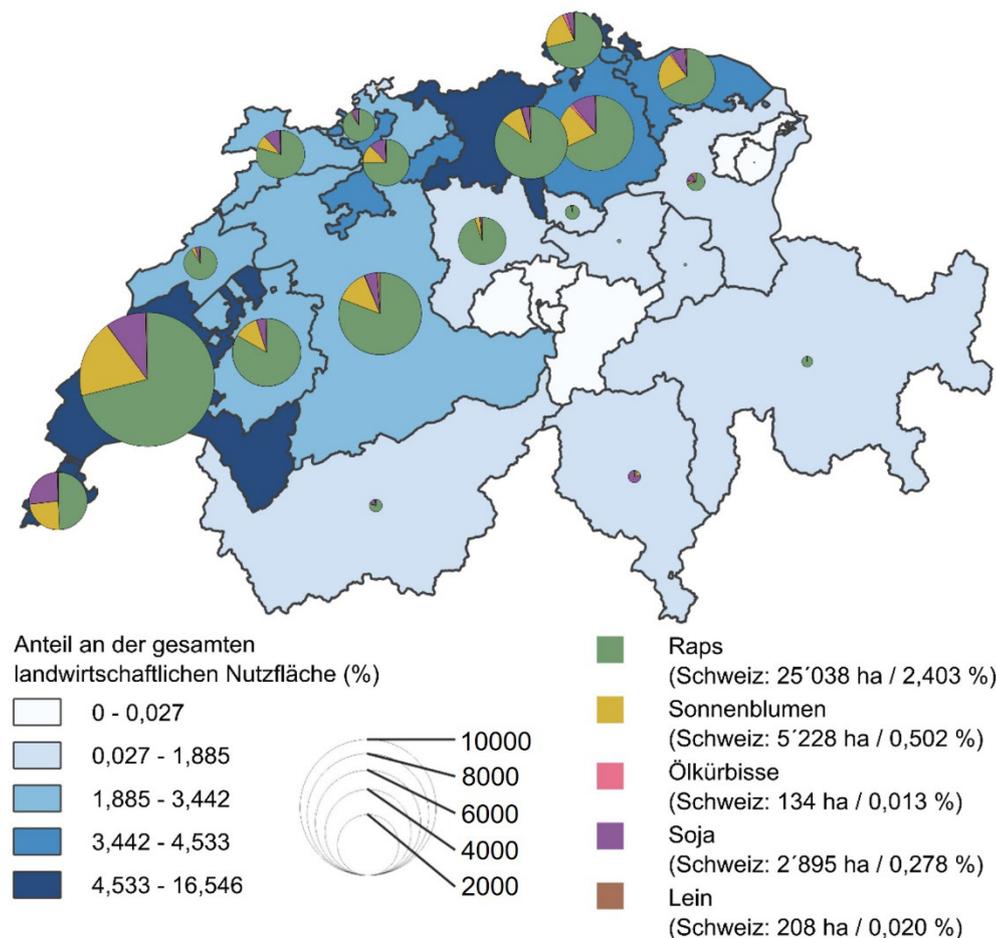


Abbildung 7-8 Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche 2022 für den Ölsaatenanbau an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche des Kantons, die Gesamtfläche des Ölsaatenanbaus in Hektaren pro Kanton (Grösse des Kreisdiagramms) und die Anteile der verschiedenen Ölsaatenanbauarten pro Kanton (Teile des Kreisdiagramms). Die Produktion von Ölsaaten nimmt 3,2 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz ein. Die Gesamtfläche und die Anteile der Ölsaatenkulturen in der Schweiz sind neben den entsprechenden Symbolen angegeben. Datenquelle: Bundesamt für Statistik BFS (2023c). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

### Raps

Der Winterraps beginnt nach dem Winter im Februar mit dem Wiederaustrieb, gefolgt vom Schossen unter dem Einfluss längerer Tage und milderer Temperaturen. Die Blüte beginnt im April und ist Ende Mai abgeschlossen. Danach folgt die Samenfüllung bis zur Reife Ende Juni (Abbildung 7-3). Dies bedeutet, dass die Blüte in der Schweiz insgesamt vor den Perioden mit extremen Temperaturen abgeschlossen ist. Ob bereits während der Samenfüllungsphase Trockenstress auftritt, ist derzeit nicht klar. Das Wurzelsystem von Raps ist flacher als das von Weizen und Mais, wobei sich 50 % der Wurzelmasse in den oberen 10 cm und 95 % in den oberen 90 cm befinden (Fan et al., 2016). Je nach Quelle beträgt die maximale Wurzeltiefe 100 bis 160 cm. In der Blütephase wird die Anzahl der potenziellen Samen pro Pflanze bestimmt. Der Blütenabbruch und die Samenfüllung bestimmen die endgültige Anzahl der Samen und deren Gewicht. Beide Stadien sind empfindlich gegenüber abiotischem Stress,

unter Schweizer Bedingungen jedoch stärker abhängig von der Strahlungsintensität. Ein niedriger photothermischer Quotient aufgrund niedriger Lichtintensitäten (und deren Tagessumme) während der Blütephase und in geringerem Masse während der Samenfüllung beeinträchtigt den Ertrag und seine Komponenten (Baux et al., 2015). Hauptsächlich wird die Anzahl der Samen pro Schote reduziert; während die Grösse der einzelnen Samen zunehmen kann, wird dies den Ertragsverlust nicht kompensieren. Kommt es während der Blüte oder Samenfüllung zu Trockenheit und/oder Hitzestress (über 28 °C), wird nicht nur der Samenertrag, sondern auch der Ölgehalt beeinträchtigt (Aksouh-Harradj et al., 2006; Tesfamariam et al., 2010; Wu et al., 2018). Ein Anstieg des Glucosinolatgehalts wurde für schwere Trockenstressbedingungen berichtet (Jensen et al., 1996).

Tabelle 7-3 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von ölsaaten. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
Ölsaaten	18'880	26'634	30'303	30'620	31'315	32'408	33'295
Raps	14'343	21'806	22'811	22'697	24'509	24'970	25'038
Sonnenblumen	3'579	3'563	5'386	5'903	4'504	4'818	4'818
Soja	952	1'087	1'801	1'721	2'032	2'240	2'895
Ölkürbisse	nv	31	62	83	85	113	134
Andere Ölsaaten <sup>1</sup>	nv	nv	69	60	68	63	nv
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>2</sup></b>							
Raps <sup>3</sup>	29,8	31,1	33,9	29,9	35,9	30,8	36,8
Sonnenblumen <sup>3</sup>	32,8	29,8	30,6	30,0	27,3	23,1	27,2
Soja <sup>3</sup>	38,3	28,3	20,8	31,1	25,8	26,0	21,3
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>2</sup></b>							
Raps <sup>4,5</sup>	42'742	67'900	77'478	67'843	88'083	77'030	92'059
Sonnenblumen <sup>4,5</sup>	11'811	10'600	16'513	17'700	12'293	11'142	14'225
Soja <sup>4</sup>	3'750	3'100	3'740	5'350	5'247	5'832	6'175
Ölkürbisse (Kerne)	nv	20	44	60	60	76	120

<sup>1</sup> Mohn, Saflor, Leindotter, Senf; <sup>2</sup> die Zahlen sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>3</sup> Erträge ermittelt als Verhältnis der abgelieferten Ware zur Anbaufläche; <sup>4</sup> Abgelieferte Ware; <sup>5</sup> Inbegriffen nachwachsende Rohstoffe. nv, nicht vorhanden.

Die wichtigsten Produktionsprobleme sind derzeit Schäden durch Schadinsekten, darunter der Rapsglanzkäfer (*Meligethes aeneus*, *M. viridescens*) und der Rapserrdfloh (*Psylliodes chrysocephala*), und Krankheiten, darunter die Wurzelhals- und Stängelfäule (*Leptosphaeria maculans*, auch bekannt als *Phoma lingam*). Unter dem Einfluss der Klimaerwärmung ist zu erwarten, dass der Druck durch biotische Belastungen noch zunehmen wird. Der frühe Blühzeitpunkt ist ein Kriterium in den nationalen Sortenversuchen, allerdings geht es dabei eher um die Vermeidung der Schädlingssaison und um Vorteile in der Fruchtfolge. Merkmale, die mit Trockenstress zusammenhängen, wie frühzeitige Seneszenz oder kürzere Kornfüllungsdauer, werden nicht erfasst. Bei der Aussaat im August wird manchmal bewässert, um das Saatbett vorzubereiten und zu befeuchten. Ein besserer Kontakt der kleinen Rapssamen mit dem Boden verbessert die Keimung und den Aufgang. Die Pflanzen können vor oder während der Überwinterung geschädigt werden, weil sie vor dem Winter zu stark wachsen und weniger gut abgehärtet sind (Pellet et al., 2002), oder weil sie im Herbst von Schädlingen befallen werden. Wenn die Schäden zu gross sind, kann die Kultur aufgegeben und im Frühjahr durch Sonnenblumen ersetzt werden.

Die Züchter prüfen Rapsorten unter sehr unterschiedlichen Umweltbedingungen in ganz Europa, wobei die Ertragsstabilität das wichtigste Zuchtziel ist. Die genetische Vielfalt hat bei Blüte- und Reifezeit, Pflanzhöhe und Gesundheit zugenommen. Die Züchtung auf Trockenheits- und Hitzetoleranz ist im Gange, insbesondere mit Blick auf Kontinentaleuropa, und es werden auch Feldversuche mit Bewässerung durchgeführt. Durch Forschungsk Kooperationen sollen weitere Faktoren für die Trockentoleranz ermittelt werden. Ausserdem werden Sorten für eine frühe oder späte Aussaat entwickelt, um den Landwirten im Falle von Trockenheit mehr Flexibilität bei der regulären Aussaat zu geben. Schliesslich wird die Züchtung auf Krankheitsresistenz wegen des

Krankheitsdrucks aufgrund der zunehmend milden und nassen Winter und des geringeren Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln weiterhin sehr wichtig sein.

### Sonnenblume

Der Anbau von Sonnenblumen in der Schweiz wurde 1996 zum ersten Mal offiziell erfasst (799 ha, davon 369 ha in der Waadt) (Bundesamt für Statistik BFS, 2023c). Die Anbaufläche wuchs bis 2003 auf die heutigen Werte (5'000 ha), schwankte aber in den letzten 20 Jahren. Die Waadt ist nach wie vor der Kanton mit der grössten Sonnenblumenanbaufläche. Das wärmere Klima im westlichen Mittelland und die weniger feuchten Bedingungen in den frühen Morgenstunden zur Reife- und Erntezeit sind wahrscheinlich die Gründe dafür. Die meisten Sorten auf der Empfehlungsliste sind früh reif (Temperatursumme von 1570 °C), um ihr Wachstum unter Schweizer Bedingungen zu ermöglichen. Die Aussaat erfolgt zwischen Mitte April und Mitte Mai, die Blütezeit ist im Juli. Die Reife wird zwischen Mitte August und Mitte September erreicht, so dass die Ernte im September beginnen kann (Abbildung 7-3). Blüte und Samenfüllung erfolgen daher während der trockensten und wärmsten Periode der Wachstumsperiode. In den nationalen Sortenversuchen wurden keine Beobachtungen zu Reaktionen auf Trockenstress gemacht. Beide Stressfaktoren können jedoch zu Ertragseinbussen, einer Verringerung des Ölgehalts und Veränderungen der Fettsäurezusammensetzung führen (Andrianasolo et al., 2017; Debaeke et al., 2021). Die Sonnenblume gilt als robuste Kulturpflanze, die wenig Aufwand erfordert und mässig trockenheitsverträglich ist. Dennoch ist ihre Produktivität aufgrund schlechter Bewirtschaftung, ungleichmässiger Bestände im Zusammenhang mit Unkrautkonkurrenz im Frühstadium, Pilzkrankheiten und Vogelschäden gering und instabil (Debaeke et al., 2021). Letzteres wird in der Schweiz als grosses Problem angesehen. In Bezug auf Trockenheit und Hitzestress muss zunächst festgestellt werden, ob diese für den Sonnenblumenanbau in der Schweiz (vor allem in der Waadt) bereits ein Problem darstellen, um eine Bewertung möglicher Anpassungsstrategien zu ermöglichen. Eine, die in Debaeke et al. (Debaeke et al., 2017) vorgeschlagen wird, ist eine Vorverlegung der Aussaatdaten in Kombination mit sehr früh reifenden Sorten (Temperatursummen von 1300-1400 °C, vergleichbar mit frühem Silomais, siehe 5.4). Unter Schweizer Bedingungen wird das Risiko einer schlechten Etablierung aufgrund von Kälteschäden im kommenden Jahrzehnt dennoch hoch bleiben.

### Soja

Im Jahr 2022 wurde Soja auf rund 3'000 ha angebaut, die meisten davon in der Waadt (979 ha), in Genf (488 ha) und in Zürich (328 ha) (Tabelle 7-3; Bundesamt für Statistik BFS (2023c)). Eine lange Tradition der Sojazüchtung in der Schweiz hat dazu beigetragen, dass sich die Sojabohne an die Anbaubedingungen angepasst und ihre Qualität verbessert hat, einschliesslich eines guten Proteingehalts für den menschlichen Verbrauch (Milch und Tofu) (Schori et al., 2003). Die derzeitige inländische Produktion ist hauptsächlich für die biologische Landwirtschaft bestimmt (Bio Suisse Öl, biologisches Tierfutter). Die Reifegrade und die erforderlichen Temperatursummen, die Mindesttemperaturen bei der Aussaat und die Kältetoleranz bei der Blüte sind die wichtigsten Faktoren, die die Wachstumszonen im Mittelland bestimmen, wobei die günstigsten Bedingungen in den Tessiner Tälern, im Rheintal in der Ostschweiz, im Rhonetal im Wallis und in der Genferseeregion (Genf und Waadt) herrschen (Schori et al. (2003), auf der Grundlage von Gass et al. (1994)). Diese Daten müssen jedoch für die Temperatursummen, die derzeit in der Schweiz erreicht werden, aktualisiert werden.

Die Aussaat erfolgt im Mai bei Bodentemperaturen von mindestens 10 °C. Die Blüte fällt in den Juli und ist empfindlich gegenüber kalten Durchschnittstemperaturen (längere Exposition gegenüber < 15 °C oder Temperatursummen von 80 °C Tagen während der Blüte). Dies kann in den ungünstigeren Anbaugebieten, z. B. oberhalb von 500-550 m Höhe, noch ein Problem sein. Kältestress während der Blüte lässt sich an einer unregelmässigen Verteilung der Schoten und Samen entlang des Stängels erkennen (Gass et al., 1996), was mit dem unbestimmten oder halbbestimmten Blütentyp der Schweizer Sorten in Verbindung gebracht wird. Dieses Blühverhalten kompensiert auch (teilweise) den geringeren Ertrag der früh reifenden Sorten, die insgesamt für den Anbau besser geeignet sind. Auf die lange Blütezeit im Juli folgt die Kornfüllung von Mitte Juli bis Ende August. Die Reife wird im September erreicht (Abbildung 7-3). Es liegt auf der Hand, dass Sojabohnen insbesondere in flachen Böden mit begrenzter Wasserspeicherkapazität während der Blüte- und Samenfüllungsphase längeren Trockenperioden ausgesetzt sein können. Sojabohnen haben ein flaches Wurzelsystem in dem Sinne, dass sich 50 % der Wurzelmasse in den oberen 10 cm des Bodens befinden. Dennoch befinden sich 95 % in einer Tiefe von bis zu 138 cm und die maximale Wurzeltiefe wurde bei 180 cm festgestellt (Fan et al., 2016). Trockenstress wirkt sich auf die Anzahl der Hülsen und

Samen, das Gewicht und die Zusammensetzung der Samen sowie auf die Dauer der Blüte- und Samenfüllungsphasen aus (Hu & Wiatrak, 2012). Eine Ertragsminderung von 30 % (ergibt 15 dt ha<sup>-1</sup>) ist zu erwarten (Staniak et al., 2023). Hitzestress während der Samenentwicklung (im August) führt zu faltigen Samen, Verfärbungen, schlechter Keimung, veränderter Proteinzusammensetzung und höherer Anfälligkeit für Pathogeninfektionen. Moderater Hitzestress tritt ab 36 °C/24 °C (Tag/Nacht) auf (Krishnan et al., 2020). Derzeit sind diese Temperaturen in der Schweiz selten (z. B. Abbildung 7-7), aber ihr Auftreten könnte in Zukunft zunehmen. Eine frühe Aussaat in Kombination mit früh reifenden Sorten (oder in Kombination mit einer spät reifenden Sorte im bewässerten Anbau) wird als Mechanismus zur Vermeidung von Trockenheit (und Hitze) empfohlen und wird in Südfrankreich bereits praktiziert (Maury et al., 2015). Versuche in diesem Sinne in der Schweiz führen zu einer frühen Blüte kleinerer Pflanzen mit reduzierter Hülsenzahl und einem erhöhten Risiko von Frostschäden. In den aktuellen nationalen Sortenversuchen werden keine systematischen Beobachtungen zu Trockenheitssymptomen durchgeführt. Die Kriterien beziehen sich auf Frühreife, Lagerungsresistenz, Ölgehalt und Samengewicht (Vonlanthen et al., 2022).

Sojabohnen werden in Frankreich bewässert; ein Ertrag von 35 dt ha<sup>-1</sup> erfordert eine Wasserverfügbarkeit von über 400-450 mm. Die Bewässerung trägt auch zur Aufrechterhaltung der symbiotischen Stickstofffixierung bei, die empfindlich auf Trockenstress reagiert, und somit zur Aufrechterhaltung des Proteingehalts. Mit 100 mm Bewässerung kann ein Ertragszuwachs von 8 bis 10 dt ha<sup>-1</sup> erzielt werden. Probleme können jedoch durch Lagerbildung (Probleme bei der Ernte und Schädlinge), Krankheitsentwicklung und Blütenabort entstehen (Terres Inovia, 2020a).

#### 7.9.4 Eiweisspflanzen

Eiweisspflanzen oder Hülsenfrüchte werden derzeit hauptsächlich für die Tierfütterung angebaut. Die Gesamtfläche von 4'703 ha im Jahr 2022 entspricht 0,5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz. Die grössten Flächen befinden sich im westlichen Mittelland (Abbildung 7-9). Die beiden wichtigsten Hülsenfrüchte sind Eiweisserbsen (*Pisum sativum* L.) und Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) (Abbildung 7-9). Ihre Anbaufläche hat sich zwischen den frühen 2000er Jahren und den letzten Jahren vergrössert, ist aber nicht stabil. Auch die Erträge schwanken von Jahr zu Jahr (Tabelle 7-4). Im Jahr 2021 wurden 2'117 Tonnen getrocknete Leguminosensamen im Inland produziert, während 2'588 Tonnen importiert wurden (Agristat, 2023b). Der Anbau von Eiweisspflanzen wird als strategisch wichtig angesehen, um die heimische Produktion von pflanzlichen Proteinen zu verbessern. Ab 2023 wurden weitere Arten von Hülsenfrüchten in die Liste der Einzelkulturen aufgenommen, für die Beiträge im Rahmen der Direktzahlungen gewährt werden, und die Bedingung für die Futtermittelproduktion wurde aufgehoben. Die Liste umfasst nun Bohnen (*Phaseolus*), Erbsen (*Pisum*), Lupinen (*Lupinus*), Wicken (*Vicia*), Kichererbsen (*Cicer*), Linsen (*Lens*) und Mischungen, die Leguminosen enthalten. Bei letzteren muss das Gewicht der Erbsen im Anteil der Hülsenfrüchte mindestens 30% betragen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023a). Leguminosen werden in der Tat häufig mit Getreide kombiniert, das das Wachstum unterstützt und die Konkurrenzfähigkeit verbessert. Neben ihrer Bedeutung für die Versorgung mit pflanzlichen Proteinen passen Hülsenfrüchte gut in Fruchtfolgen, da sie für Vielfalt sorgen und die Stickstoffbilanz des Bodens verbessern (Agroscope, 2023c). Andererseits müssen lange Fruchtfolgeintervalle (bei Erbsen sechs Jahre, bei Kichererbsen drei Jahre) eingehalten werden, da Hülsenfrüchte krankheitsanfällig sind und Pflanzenreste mit überlebenden Krankheitsorganismen genügend Zeit brauchen, um vollständig zu verschwinden. Der aufeinanderfolgende Anbau von Hülsenfrüchten auf denselben Feldern führt zu einer so genannten "Bodenmüdigkeit" (Bainard et al., 2017), bei der jedoch Unterschiede in den Reaktionen der Arten zu bemerken sind. Es wird erwartet, dass die Produktion von Hülsenfrüchten für den menschlichen Verbrauch als Alternative zu tierischen Proteinen zunehmen wird. Im Einklang mit dieser Erwartung hat BOSSY CEREALIEN, einer der Schweizer Marktführer für texturierte pflanzliche Proteine, im Jahr 2022 eine neue Verarbeitungsanlage für Sonnenblumen, Erbsen und Sojabohnen eröffnet (Bossy Céréales, 2022).

Es gibt sowohl Sommer- als auch Wintererbsen, aber der Ertrag und der Proteingehalt von Wintererbsen ist geringer. Sie werden angebaut, wenn die Frühjahrserbsen keine guten Ergebnisse liefern (Baux et al., 2018). Erbsen sind relativ kälte- und frosttolerant und können daher früh (Mitte Februar bis Mitte März) oder in höheren Lagen (max. 900 m) ausgesät werden. Sie können die Verfügbarkeit von Bodenwasser nach dem Winter nutzen (Charles et al., 2008). Die Blüte erfolgt im Mai, und die Samen werden im Juni reif (Abbildung 7-3). Die meisten Sorten sind früh in der Blüte und Reife. Dies ermöglicht (vorerst) die Vermeidung von Schädlingsbefall in den Vermehrungsstadien

(Erbsenkäfer und Blattläuse, letztere verursachen Schäden in der Phase von der Knospe bis zur Blüte). Wie andere Hülsenfrüchte ist auch die Erbse anfällig für Welke- und Wurzelfäulekrankheiten und erfordert daher, wie oben erwähnt, eine lange Fruchtfolge. Zu den aktuellen Kriterien für Sorten gehören Ertrag, Samengewicht und Proteingehalt sowie das Erntepotenzial, das sich auf die Pflanzenhöhe bei der Ernte bezieht. Der Proteingehalt variiert zwischen den Jahren und lokalen Bedingungen und scheint daher umweltabhängig zu sein (Baux et al., 2018). Insgesamt ist aufgrund der Blüte im Mai und der Samenfüllung im Juni nicht zu erwarten, dass abiotische Stressfaktoren (Trockenheit und Hitze) zu Ertragsminderungen führen. Dennoch reagieren Erbsenblüten empfindlich auf Temperaturen über 25 °C (Charles et al., 2008), und die Dauer der reproduktiven Phase wird unter diesen Bedingungen verkürzt (Bueckert et al., 2015). Die optimale Temperatur für den Erbsenanbau liegt bei 13-18 °C. Warme Tage ohne Niederschlag können im Juni auf flachen Böden oder solchen mit geringer Wasserspeicherkapazität zu Trockenheitsproblemen führen. Ihr Wurzelsystem kann bis zu 1 m tief reichen, wobei sich 50 % bzw. 95 % der Wurzelbiomasse in den oberen 20 cm bzw. 85 cm befinden (Fan et al., 2016). Andere Autoren haben das Wurzelsystem von Hülsenfrüchten als flacher als das von Weizen und Raps beschrieben (Gan et al., 2011). Bei Trockenheit oder hohen Temperaturen während der Blüte und des Samenansatzes werden die Erträge von Erbsen beeinträchtigt. Offenbar steht die Anzahl der sich entwickelnden Samen im Gleichgewicht mit der Verfügbarkeit von Ressourcen, aber der Mechanismus könnte mit hydraulischen Prozessen zusammenhängen, die die Wachstumsrate beeinflussen (Guilioni et al., 2003; Turc & Tardieu, 2018). Die symbiotische Stickstofffixierung ist unter Bedingungen des Bodenwasserdefizits reduziert, so dass wie bei Sojabohnen der Eiweissgehalt der Körner reduziert sein kann. Die Erträge von Erbsen schwanken in der Schweiz seit Jahren, aber es ist derzeit nicht klar, ob dies auf abiotische oder biotische Einschränkungen zurückzuführen ist.

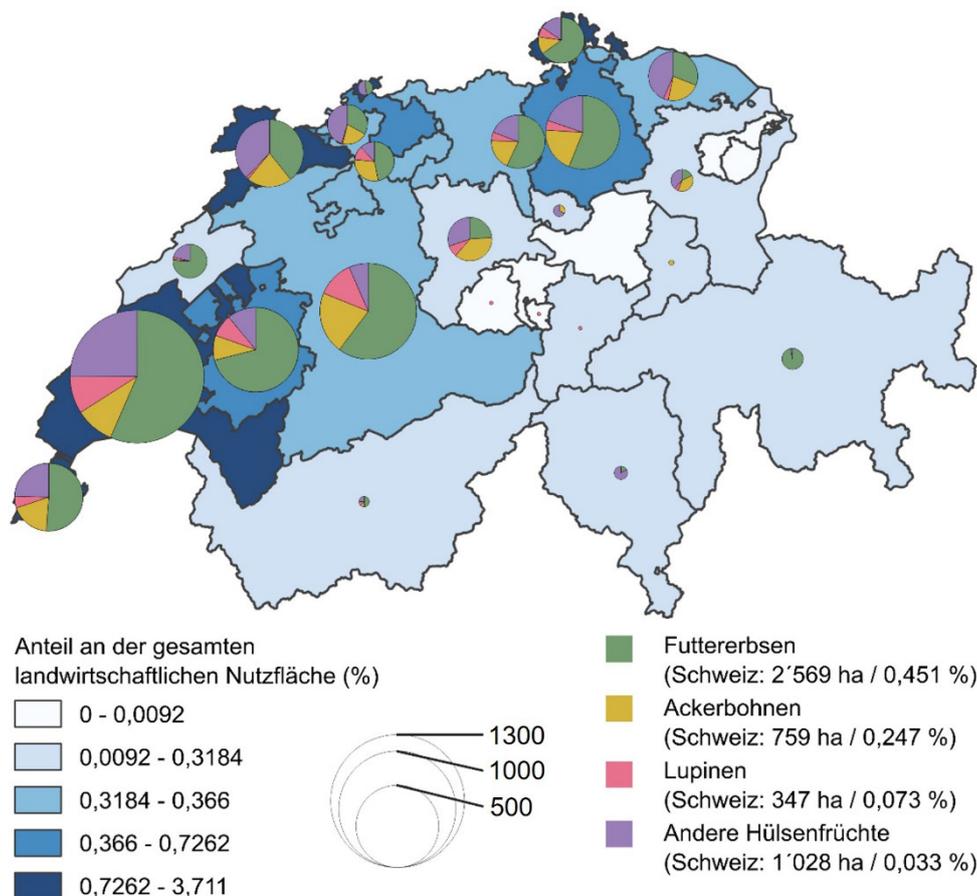


Abbildung 7-9 Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche 2022 für den Anbau von Hülsenfrüchten an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche des Kantons, die Gesamtfläche des Hülsenfruchtanbaus in Hektar pro Kanton (Grösse des Kreisdiagramms) und die Anteile der verschiedenen Hülsenfrüchte pro Kanton (Teile des Kreisdiagramms). Der Anbau von Hülsenfrüchten nimmt 0,5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz ein. Die Gesamtfläche und die Anteile der Hülsenfrüchte in der Schweiz sind neben den entsprechenden Symbolen angegeben. Datenquelle: Bundesamt für Statistik BFS (2023c). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).

Die Ackerbohne hat in ihrem Anbau und den damit verbundenen Problemen bei der Ertragsstabilität viele Eigenschaften mit der Erbse gemeinsam. Als Tierfutterprotein sind sie gegenüber Erbsen wegen antinutritiver Verbindungen benachteiligt (Clémence et al., 2022), aber für den menschlichen Verbrauch werden Verarbeitungsmethoden entwickelt (Badjona et al., 2023). Obwohl sie bis Mitte des letzten Jahrhunderts in der Schweiz recht häufig angebaut wurde (Verein Kulinarisches Erbe der Schweiz, 2019), ist sie heute eher eine Nischenkultur. In Graubünden werden alte Sorten wieder angebaut, die aber nicht ohne weiteres zugelassen werden können (Clémence et al., 2022). Die Ackerbohne ist für ihre Trockenheitsempfindlichkeit bekannt, was für ihre zukünftige Produktion problematisch ist. Es gibt jedoch genetische Ressourcen zur Verbesserung der Trockentoleranz (Alghamdi et al., 2015; Amede et al., 1999). Für die Züchtung und den Import von Saatgut ist die Schweiz auf Frankreich und Deutschland angewiesen.

Tabelle 7-4 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von Hülsenfrüchten. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
Hülsenfrüchte	2'892	3'816	5'910	5'492	5'555	5'485	nv
Futtererbsen (Eiweiss-)	2'581	3'483	3'891	3'550	3'573	3'573	2'569
Ackerbohnen	275	274	1'003	1'002	957	722	759
Mischungen mit Getreide	nv	nv	752	649	679	836	nv
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>1,2</sup></b>							
Futtererbsen (Eiweiss-)	34,3	41,7	32,1	36,2	28,5	19,4	35,8
Ackerbohnen	40,9	31,0	26,1	31,6	20,2	21,3	26,0
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>1,3</sup></b>							
Futtererbsen (Eiweiss-)	9'000	14'500	12'479	12'838	10'171	6'667	9'202
Ackerbohnen	1'100	900	2'614	3'163	1'930	1'542	1'973
Mischungen mit Getreide	nv	nv	2'343	2'142	2'877	2'839	2'787

<sup>1</sup> die Zahlen für das Jahr 2022 sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>2</sup> Verwendbare Produktion geteilt durch Anbaufläche; <sup>3</sup> Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb. nv, nicht vorhanden.

Das Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) hat Hülsenfrüchte in sein Züchtungsprogramm aufgenommen, wobei der Schwerpunkt auf Fragen der Unkrautkonkurrenz, der Toleranz gegenüber Schädlingen und Krankheiten sowie auf variablen Umweltbedingungen während der Vegetationsperiode liegt. Andere wichtige Faktoren für die Produktion und Vermarktung wie Saatguterzeugung, Mischanbausysteme, Wertschöpfungsketten und Markteinführung werden ebenfalls behandelt (Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, 2023a). Dies ist sehr wichtig geworden, da die Futtermittel für Biobetriebe alle in der Schweiz produziert werden müssen. Die weisse Lupine (*Lupinus albus* L.) ist Teil des Züchtungsprogramms des FiBL (Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, 2022), wobei die ersten Sorten in 10-15 Jahren erwartet werden (Clémence et al., 2022). Sie gilt als sehr wertvolle Eiweisspflanze, sowohl für Tierfutter als auch für die menschliche Ernährung. Erbsen haben gegenüber Sojabohnen den Vorteil, dass die Aussaat früh im Jahr (März) erfolgen kann. Andererseits reift die Weisse Lupine im Vergleich zur Erbse spät. Die Ernte ist Ende August, Anfang September möglich, kann aber bei hohen Temperaturen auf Anfang August vorverlegt werden. Die unbestimmte Wuchsform erschwert die Ernte, da Niederschläge im Juli oder August die Produktion neuer Seitentriebe anregen können (Arncken et al., 2020). Wie bei anderen Hülsenfrüchten ist das Risiko von Verlusten durch Anthraknose hoch, ausser in trockenen Sommern. In Frankreich leidet der Lupinenanbau unter Schädlingsbefall im Frühstadium, allerdings hauptsächlich bei Winterlupinen. Diese werden im September gesät und im Juli geerntet, so dass das Risiko von Trockenheitsproblemen während der Blütezeit (April) geringer ist. Es ist nicht klar, ob diese Sorten unbestimmtes Wachstum haben oder nicht. Zur Verbesserung der Unkrautbekämpfung wird Getreide, z. B. Triticale, angebaut (Terre-net, 2019). Ein wichtiger Faktor für das Wachstum der weissen Lupine ist der pH-Wert des Bodens, der unter sieben liegen muss, damit sich eine ausreichende Knöllchenbildung entwickeln kann (Arncken et al., 2020). Der Alkaloidgehalt der Körner und ihre allergene Eigenschaft erschweren die Verarbeitung. Ausserdem ist der

Alkaloidgehalt umweltabhängig und muss getestet werden, was für die Landwirte ein Risiko darstellt, da die Erzeugnisse als Futtermittel deklassiert werden könnten. Derzeit wird das Saatgut importiert, die Landwirte erhalten nicht immer die gewünschten Sorten, und auch die Verfügbarkeit von Inokulum (Bakterien, die die Nodulation auslösen) kann unsicher sein (Clémence et al., 2022).

### 7.9.5 Kartoffeln

Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L.) werden in der ganzen Schweiz angebaut, vor allem aber im Mittelland (Abbildung 7-10). In Bern und Freiburg ist der Anteil der Kartoffeln immer noch höher als derjenige der Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.), während anderswo die Anbauflächen für Zuckerrüben grösser sind. Insgesamt hat sich die Kartoffelanbaufläche im Vergleich zu den 1980er Jahren um 50 % verringert, vor allem in der Waadt und in Freiburg. In Bern beträgt der Rückgang rund 40 % (Bundesamt für Statistik BFS, 2023c). Im Jahr 2022 wurden 390'000 Tonnen Kartoffeln im Inland produziert (Tabelle 7-5), wovon 8'147 Tonnen exportiert wurden. Der Import belief sich auf 92'724 Tonnen oder 19 % der Gesamtmenge (Agristat, 2023c). Im Jahr 2021 wurden 85 % der im Inland produzierten Kartoffeln (292'510 Tonnen) für den menschlichen Verbrauch verkauft, die restlichen 21'043 Tonnen waren Saatkartoffeln. Etwa 8,5 % der inländischen Produktion wurden als Futtermittel (22'358 Tonnen) und zum Verbrauch (6'841 Tonnen) verwendet (Agristat, 2023b).

Kartoffeln werden im Frühjahr gepflanzt, aber je nach Witterungsbedingungen, insbesondere Niederschlägen und Nässe auf den Feldern, kann sich der Termin nach hinten verschieben. Etwa 20-25 Tage nach der Pflanzung schlüpfen die Kartoffelpflanzen aus den Dämmen. Sehr früh in der Entwicklung, d.h. etwa 16 Tage nach dem Auflaufen, werden die Ausläufer im Wurzelsystem initiiert. Bei einer Aussaat Mitte April ist dies im Allgemeinen bis Ende Mai zu erwarten. Die Hauptphase der Eindickung der Knollen findet im Juli statt, und die Kartoffeln erreichen ihre Reife im August, so dass sie im September geerntet werden können. Dieses allgemeine Schema berücksichtigt nicht die Frühzeitigkeitsklassen der Kartoffeln, die von sehr früh bis mittelspät reichen (Schwärzel et al., 2022). In der Genferseeregion ist auch eine frühe Aussaat gegen Mitte Februar mit Aufgang Mitte März möglich. Die Felder werden dann mit Polypropylenmembranen abgedeckt, um die Dämme aufzuwärmen. Das Stadium der Knollenanlegung ist ein kritisches Stadium, da hier die potenzielle Anzahl der Knollen bestimmt wird. Eine gute Etablierung zu Beginn der Entwicklung ist daher wichtig. Im Stadium der Knollenverdickung wird der endgültige Ertrag bestimmt, und dies geschieht in den meisten Fällen unter Sommerbedingungen. Dies ist insofern positiv, als ein hohes Mass an Photosynthese für das Knollenwachstum und die Kohlenhydratakkumulation erforderlich ist und trockenes Wetter den Druck durch Pilzkrankheiten verringert. Andererseits beeinträchtigen Bodenwassermangel und hohe Temperaturen die Quellstärke der Kartoffelpflanzen und heizen die Kartoffeldämme auf. Die Ertragseinbussen können sehr gross sein, nicht nur wegen der kleineren Kaliber der Kartoffeln und des geringeren Trockenmassegehalts. Mehrere physiologische Störungen beeinträchtigen die Qualität und damit den Marktwert der Kartoffelknollen. Dazu gehören Hohl-herzigkeit und Eisen-fleckigkeit. Schwankungen des verfügbaren Bodenwassers können Zwiewuchs und Kindelbildung verursachen, während hohe Temperaturen ebenfalls Kindelbildung hervorrufen und die Keimfähigkeit beeinträchtigen können (Hill et al., 2021).

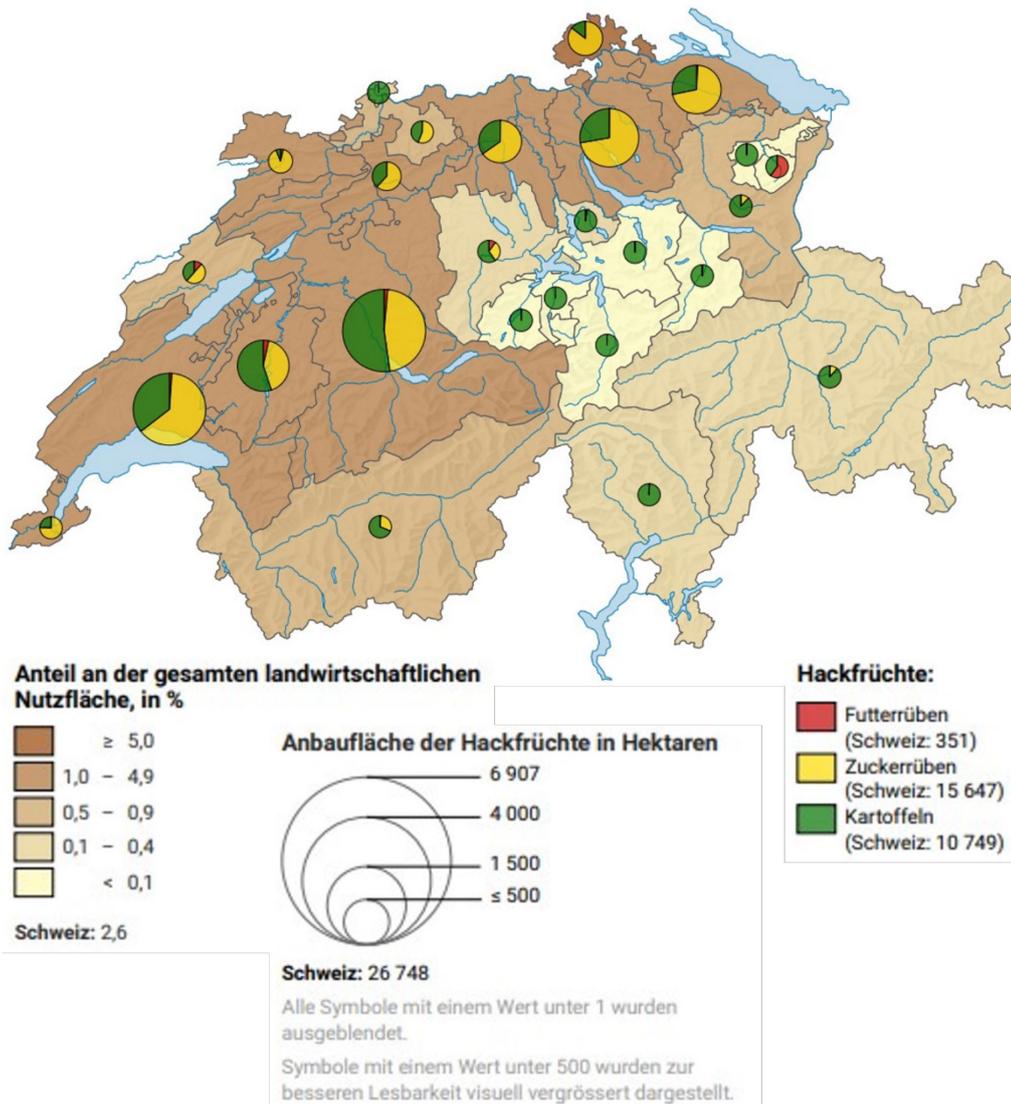


Abbildung 7-10 Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Jahr 2022 für den Hackfruchtanbau an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche des Kantons, die Gesamtfläche des Hackfruchtanbaus in Hektar pro Kanton (Grösse des Kreisdiagramms) und die Anteile der verschiedenen Hackfrüchte pro Kanton (Teile des Kreisdiagramms). Die Produktion von Hackfrüchten nimmt 2,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz ein. Die Gesamtanbaufläche (ha) der verschiedenen Hackfrüchte in der Schweiz ist neben den entsprechenden Symbolen angegeben. Angepasst aus Bundesamt für Statistik BFS (2023e).

Die Wasserproduktivität von Kartoffeln ist im Vergleich zu anderen Kohlenhydratpflanzen hoch: Kartoffeln, 105 L kg<sup>-1</sup>; Mais, 710 L kg<sup>-1</sup>; Weizen, 1159 L kg<sup>-1</sup> (nach der von Renault & Wallender (2000) verwendeten Berechnungsmethode). Andererseits hat eine Studie im Vereinigten Königreich gezeigt, dass der Bewässerungsbedarf bei Kartoffeln höher ist als beispielsweise bei Zuckerrüben und Getreide (Knox et al., 1997). Die Trockenheitsempfindlichkeit der Kartoffel wird auf ihr im Vergleich zu Getreide flaches Wurzelsystem zurückgeführt. Die Wurzellänge wurde in der Tat mit der Ertragsempfindlichkeit von Sorten gegenüber Trockenstress in Verbindung gebracht (Lahlou & Ledent, 2005; Van Loon, 1981). Auch die Sprossarchitektur hängt mit der Trockenheitsempfindlichkeit zusammen, wobei die Ertragseinbussen bei blattartigen Sorten (hohes Blatt/Stamm-Verhältnis, weniger Sprossbiomasse) grösser sind als bei stammartigen Sorten (niedriges Blatt/Stamm-Verhältnis, mehr Sprossbiomasse) (Aliche et al., 2018; Schittenhelm et al., 2006). Bei Kartoffelsorten besteht eine grosse Vielfalt in Bezug auf die morphologische (Wurzel und Spross) und physiologische Reaktion auf Trockenstress und die Wechselwirkung zwischen Frühzeitigkeit und dem Zeitpunkt der Trockenheit (Hill et al., 2021). Die optimale Temperatur für den Kartoffelanbau liegt zwischen 20 °C und 25 °C. Hitzestress tritt bei über 25 °C auf, und 30 °C oder mehr sind sehr schädlich. Es besteht kein Zweifel, dass die Zahl der Sommertage, d. h. der Tage, an denen die

Temperatur 25 °C oder mehr erreicht (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2023), und mit Temperaturen über 30 °C weiter zunehmen wird (Abbildung 7-6; Calanca & Hölzkomper (2010)).

Tabelle 7-5 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von Hackfrüchten. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
Hackfrüchte	34'774	29'640	30'133	28'971	28'972	27'268	26'397 <sup>1</sup>
Kartoffeln	17'725	17'842	18'578	17'555	17'602	16'186	10'749
Zuckerrüben	14'153	10'874	11'107	10'981	10'956	10'711	15'647
Futterrüben	2'897	924	448	434	414	371	nv
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>2</sup></b>							
Kartoffeln, inkl. Saatgut <sup>3</sup>	426,0	387,0	403,0	377,0	447,0	320,0	363,4
Zuckerrüben <sup>4</sup>	780,0	720,6	665,5	815,6	729,3	671,4	853,9
Futterrüben	894,0	866,5	668,9	809,9	725,2	651,8	832,7
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>2</sup></b>							
Kartoffeln, inkl. Saatgut <sup>5</sup>	600'600	421'000	447'600	413'984	488'638	342'752	390'000
Zuckerrüben <sup>6</sup>	1'408'448	1'302'055	1'263'462	1'454'536	1'304'494	1'102'116	1'353'352
Futterrüben	259'000	80'000	30'000	35'000	30'000	24'000	29'000

<sup>1</sup> ohne Futterrüben; <sup>2</sup> die Zahlen sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>3</sup> Verwendbare Produktion geteilt durch Anbaufläche; <sup>4</sup> Erträge ermittelt als Verhältnis der abgelieferten Ware zur Anbaufläche; <sup>5</sup> Bruttoproduktion minus Verlust auf dem Feld; <sup>6</sup> Abgelieferte Ware. nv, nicht vorhanden.

In den nationalen Sortenprüfungsversuchen werden derzeit Sorten anhand von über 40 Kriterien geprüft, von denen sich nur sehr wenige auf die Reaktion auf abiotischen Stress beziehen. Der Schwerpunkt liegt auf der Reifegruppe, der Qualität für den Endverbrauch, den agronomischen und verfahrenstechnischen Eigenschaften und der Krankheitsresistenz (Schwärzel et al., 2022). Die Klimaerwärmung erhöht auch den Schädlingsdruck und die Ausbreitung von Viruskrankheiten. Seit 2020 werden an Agroscope Changins (Nyon) Voruntersuchungen in bewässerten/nicht bewässerten Feldversuchen durchgeführt, um das Auftreten von abiotischen Stresssymptomen zwischen den Bedingungen und zwischen den Sorten zu vergleichen. Weitere Forschungsanstrengungen konzentrieren sich auf die Unterschiede zwischen den Sorten bei den physiologischen Reaktionen auf Trockenstress, die Auswirkungen von Mikroben, die Fruchtfolge und die Modellierung der Auswirkungen von Umweltfaktoren auf den Ertrag und den Stärkegehalt.

Die Bedeutung der Bewässerung für den Kartoffelanbau ist in der Schweiz allgemein anerkannt, und die Kartoffel gilt als bewässerungswürdige Kultur (hoher wirtschaftlicher Wert). Die Bewässerung von Kartoffeln wird durch Subventionen für die Bewässerungsinfrastruktur und Entwicklungen zur Verbesserung der Bewässerungseffizienz unterstützt (siehe 6.3 und 6.7). Weitere Anstrengungen sind jedoch erforderlich, um die Wasserproduktivität zu verbessern, indem Bewässerungszeitpunkt und -menge besser auf den tatsächlichen Wasserbedarf der Pflanzen abgestimmt werden (siehe 6.7). Der jährliche Wasserbedarf von Kartoffeln wird für Szenarien mit und ohne Klimaschutz um schätzungsweise 10 % bzw. 20-30 % bis 2060 ansteigen (heute: 125-210 mm, 2060: 140-259 mm; Eisenring et al. (2021)).

Hohe Temperaturen im Damm, die durch Hitzestress verursacht werden, lassen sich nicht unbedingt durch Bewässerung beheben. Ein Überdenken der agronomischen Praktiken ist erforderlich, um die Dammtemperaturen zu senken. Mögliche Lösungsansätze sind Mulchen, Intercropping (Agroforstprinzipien) und eine höhere Pflanzdichte zur besseren Bodenbedeckung (weg von den engen Dammkämmen).

Eine Umfrage unter Kartoffelzüchtern, die Sorten für den europäischen Markt liefern, hat bestätigt, dass die Züchtung auf abiotische Stresstoleranz wichtig ist. Feldversuche in trockenheits- und hitzeanfälligen Umgebungen (auch ausserhalb Europas) sind bereits im Gange, einschliesslich Versuchsreihen mit und ohne Bewässerung. Es wurde auch eine Strategie der Frühreife als Ausweg aus der Trockenheit und die Prüfung der Auswirkungen von Defizitbewässerung auf Sorten erwähnt. Ein einfacher Ansatz, bei dem Sorten mit Trockenstresssymptomen in den

Knollen bei Versuchen unter abiotischen Stressbedingungen systematisch aussortiert werden, hat sich als wirksam erwiesen, um Sorten mit einem guten Niveau an abiotischer Stresstoleranz zu erhalten.

### 7.9.6 Zuckerrüben

In den meisten Kantonen des Mittellandes (ausser Bern und Freiburg) werden Zuckerrüben auf grösseren Flächen als Kartoffeln angebaut (Abbildung 7-10). Nur 3 % der gesamten Rübenanbaufläche wurde 2021 für den Futterrübenanbau genutzt (Tabelle 7-5). Ein hoher Selbstversorgungsgrad wird bei der Zuckerrübenproduktion (83-89 %, 2018-2020) und bei der Zuckergewinnung (90-94 %, 2018-2020) erreicht (Agristat, 2023b). Die Komponenten des Zuckerrübenenertrags bestehen aus der Rübenbiomasse und dem Zuckergehalt der Rüben, die zusammen den Zuckerertrag ergeben (Abbildung 7-11). Sortenunterschiede sowie biotische und abiotische Belastungen beeinflussen sowohl den Ertrag als auch den Zuckergehalt, aber manchmal in unterschiedlichem Masse. In der Zuckerrübenzüchtung wurden bis Mitte der 2000er Jahre grosse Erfolge beim Rübenenertrag erzielt, während seither der Schwerpunkt auf der Verbesserung des Zuckergehalts der Rüben liegt (Peter, 2023). Die Erträge stagnierten in diesem Zeitraum auch wegen der Auswirkungen von Krankheiten. Im Vergleich zum "nassen" Jahr 2021, in dem die Erträge am stärksten beeinträchtigt waren, wurde 2022 ein höherer Ertrag an frischer Rübenbiomasse erzielt. Andererseits war der Zuckergehalt der Rüben niedrig, was letztlich zu einem nur durchschnittlichen Zuckerertrag führte (Abbildung 7-11). Der Rückgang des Zuckergehalts war vor allem auf die Bakterienkrankheit "Syndrome des basses richesses" (SBR) zurückzuführen, aber wahrscheinlich auch auf das erneute Wachstum der Blätter im September, als es nach der sommerlichen Trockenheit wieder regnete.

Der Zuckerrübenanbau wird derzeit stark von Schädlingen und Krankheiten in Verbindung mit der Rücknahme von Pflanzenschutzmitteln beeinträchtigt. Glasflügelzikaden sind Wirte für einen bakteriellen Erreger, der SBR verursacht. Sie besiedeln die Zuckerrübenfelder im Juni-Juli, je nach Migrationsmuster. Die Krankheit ist in der Schweiz relativ neu (2017, Waadt) und breitet sich in Richtung Osten aus (SFZ CBS, 2023). Die Krankheit beeinträchtigt vor allem den Zuckergehalt der Rüben, hat aber auch erhebliche wirtschaftliche Folgen. Die Zikaden sind in heissen und trockenen Sommern wichtiger, in schattigen Gebieten und bei Bewässerung dagegen weniger. Die Blattläuse wiederum verbreiten die Vergilbungskrankheit, die zu Ertragseinbussen führt, aber weniger Auswirkungen auf den Zuckergehalt hat. Mit der Klimaerwärmung und dem Verbot chemischer Schädlingsbekämpfungsmittel treten auch andere Insekten und Krankheiten auf, und alte Krankheiten sind wieder im Kommen, darunter die *Cercospora*-Pilzkrankheit. Es ist daher klar, dass sich die Zuckerrübeneselektion in der Schweiz und die nationalen Sortenversuche auf biotische Stressprobleme konzentriert haben und weniger auf die Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf die Produktion.

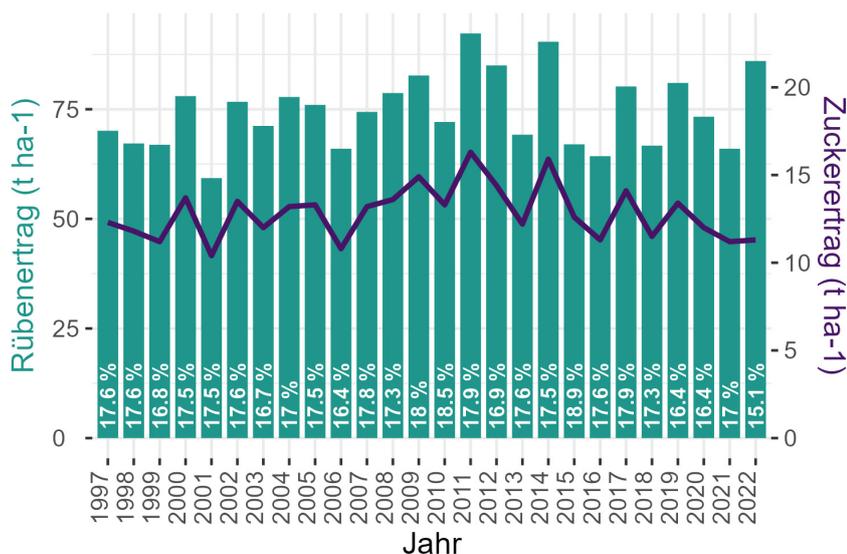


Abbildung 7-11 Daten zum Zuckerrübenenertrag zwischen 1997 und 2022, ausgedrückt als Rübenmasse (grün) und als Zuckermenge (violett) pro Hektar. Die Zahlen innerhalb der Balken geben den Zuckergehalt der Rüben in Prozent an. Datenquelle: Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau SFZ (2022).

Die Aussaat von Zuckerrüben erfolgt ab Mitte März, wenn die Bodentemperatur über 5 °C liegt. Die Aussaat auf trockenen Böden führt zu einer unregelmässigen Keimung und einem unregelmässigen Aufgang und muss vermieden werden. Die Landwirte neigen dazu, dieses Problem durch eine tiefere Aussaat zu lösen, die nur zu einem späteren Auflaufen führt. Spätfrostereignisse verursachen Probleme bis zum vierten Blattstadium, wenn die Böden nass sind. Im Rahmen der Direktzahlungen werden 50-60 % der Aussaat unter Einstreu oder ohne oder mit minimaler Bodenbearbeitung durchgeführt. Dies hat mehr mit Bodenerosion und -verdichtung zu tun als damit, die Böden länger feucht zu halten. Frühe Wuchsstärke, d. h. eine gute Etablierung zu Beginn der Entwicklung, ist für Zuckerrüben wichtig, da die Einleitung und Entwicklung des Sekundärwachstums der Pfahlwurzel bereits 10 bis 40 Tage nach der Aussaat erfolgt (Jammer et al., 2020). Wie bei den meisten Kulturpflanzen ist während des vegetativen Wachstums weniger Wasser mehr, da dies das Wurzelwachstum anregt. Ein guter Hinweis auf ein ausreichendes Wachstum und potenziell gute Erträge ist ein gut entwickeltes Blätterdach, das den Boden Ende Juni und Anfang Juli vollständig bedeckt. Dies hängt mit der Fähigkeit des Blätterdaches zusammen, Strahlung für die Photosynthese abzufangen (Brown et al., 1987; Hoffmann & Kluge-Severin, 2011). Zu diesem Zeitpunkt steht auch das Ertragspotenzial fest, da die Zellinitiation abgeschlossen ist und nur noch die Expansion stattfindet. Die Ernte beginnt im September und kann bis zum Ende des Jahres dauern, je nach dem festgesetzten Liefertermin in der Zuckerfabrik, dem Zustand des Bodens (nicht zu nass für schwere Maschinen) und der Fruchtfolgeplanung. Eine spätere Ernte bringt im Prinzip höhere Erträge an Biomasse und Zuckergehalt.

Es ist klar, dass die Ertragsentwicklung von Zuckerrüben (Biomasse und Zuckergehalt) durch Trockenheit und hohe Temperaturen in den Sommermonaten beeinträchtigt werden kann. Da Zuckerrüben ein tiefes Wurzelsystem haben, können sie Trockenstress entgegen, wenn sie auf tiefgründigen Böden mit einer guten Wasserspeicherkapazität angebaut werden (Abbildung 7-12). Je nach Bodenart und Region (eher im westlichen als im östlichen Mittelland) werden Symptome von Trockenstress in Form von schlaffen, am Boden liegenden Blättern beobachtet (Abbildung 7-12). Die Landwirte äussern sich besorgt über die Auswirkungen auf die Erträge, doch gibt es noch keine eindeutigen Antworten. Die Zuckerrübe ist zwar in der Lage, nach einer schweren Dürre Blätter nachwachsen zu lassen, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass dies den Zuckergehalt der Rübenwurzel beeinträchtigt. Es ist auch bekannt, dass das Wachstum bei Temperaturen über 30 °C aufhört, aber die Bewässerung wird in diesem Teil der Vegetationsperiode als nicht mehr rentabel angesehen. Die Bewässerung von Zuckerrüben wird angewandt, wenn die Landwirte aufgrund anderer Kulturen bereits über die erforderliche Infrastruktur verfügen und wenn das Wasser nach der Bewässerung der hochwertigen Kulturen im Betrieb verfügbar ist. In Nieder-Österreich, einer Region im Osten Österreichs, in der Bewässerung auch für Zuckerrüben praktiziert wird, werden Erträge von 60 bis 100 t ha<sup>-1</sup> mit Bewässerung im April (frühe Etablierung) und von Mitte Juni bis Ende August erzielt (Kompetenzzentrum Bewässerung, 2023).

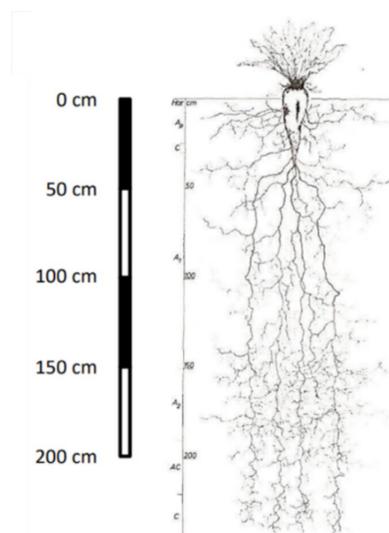


Abbildung 7-12 Zuckerrüben, die unter Trockenstress leiden, zu sehen an den schlaffen Blättern, die auf der Bodenoberfläche liegen (links, Nyon, Waadt) und einer Zeichnung des beeindruckend tiefen Wurzelsystems der Zuckerrüben (rechts). Quelle: Kutschera et al. (2018).

Trockentolerante Sorten werden von den Züchtern für den Schweizer Markt noch nicht vorgeschlagen, da sie die Schweiz als ein Land mit hohen Jahresniederschlägen betrachten. Im nationalen Sortenprüfungsprogramm werden die Symptome von Hitze- oder Trockenstress nicht erfasst. Andererseits werden Feldversuche in der ganzen Schweiz und über mehrere Jahre hinweg durchgeführt. Wenn sich Trockenheit oder Hitzestress auf den Ertrag oder den Zuckergehalt auswirken, wird dies für empfindliche Sorten nachteilig sein. Die Auswirkungen einschränkender Umweltfaktoren auf die Erträge und den Zuckergehalt wurden bisher noch nicht formell analysiert.

Die Wachstumsgeschwindigkeit sowohl des Sprosses als auch der Pfahlwurzel ist temperaturabhängig, wobei die Trockenbiomasse der Blätter vom Auflaufen bis Ende Juni linear mit den Temperatursummen zunimmt. Nach 700 °C-Tagen nimmt die Trockenbiomasse der Pfahlwurzel exponentiell mit der thermischen Zeit und einer optimalen Temperatur von 18 °C zu. Höhere Temperaturen im Juli und August verringern nachweislich den Ertrag sowie das Wasserdefizit im Boden (Kenter et al., 2006). Die Bedeutung einer gut ausgebildeten Überdachung bis Ende Juni wurde auch im Zusammenhang mit Trockenheit und Ertrag nachgewiesen. Eine frühe Trockenheit verringert die Ausdehnung des Kronendachs im Vergleich zu bewässerten Kontrollen, und die Auswirkungen auf den Ertrag können durch eine anschliessende Bewässerung nicht wieder aufgeholt werden. Im Gegensatz dazu beeinträchtigt eine späte Trockenheit das Wachstum der Baumkronen nicht mehr, wirkt sich aber immer noch auf den Ertrag aus, wenn auch in geringerer Masse (Brown et al., 1987). Dies deutet darauf hin, dass es wichtig ist, früh in der Saison eine grosse Quelle aufzubauen, um die Entwicklung des Senkenorgans zu unterstützen. Während der exponentiellen Phase des Pfahlwurzelwachstums müssen die Auswirkungen von Trockenheit auf Transpiration und Photosynthese sowie die frühe Seneszenz der Blätter berücksichtigt werden, da die Versorgung der Rüben mit Kohlenstoff reduziert wird. In einem Versuch, die Vegetationsperiode von Zuckerrüben zu verlängern, wurde eine frühe Aussaat getestet, die jedoch aufgrund der niedrigen Temperaturen eingeschränkt wurde. Die Studie zeigte, dass sich die Anzahl der Kambialringe in den Rüben nicht von den im April gesäten Rüben unterschied. Dies bedeutet, dass eine frühe Aussaat das Ertragspotenzial nicht erhöht (Hoffmann & Kluge-Severin, 2011).

Schliesslich muss auch die Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Zuckerertrag untersucht werden. In Südeuropa werden bei intensiver Bewässerung hohe Rübenwurzelerträge erzielt, aber gleichzeitig ist der Zuckergehalt niedrig, da die Rüben mehr Wasser enthalten (Hoffmann et al., 2009). Es wurde auch festgestellt, dass andere Qualitätsfaktoren wie Mineralien und Invertzuckergehalt auf Trockenheit und Hitze reagieren (Bloch et al., 2006).

## 7.10 Alternative Ackerkulturen

Die meisten der unten beschriebenen Kulturen haben derzeit einen Nischenstatus. Für einige von ihnen gibt es zwar bereits eine steigende Nachfrage, aber dann sind die Schweizer Produkte auf dem normalen Verbrauchermarkt zu teuer. Der Anbau erfolgt hauptsächlich im Biolandbau. Zudem hinken die Verarbeitung, die Vermarktung und das Konsumentenbewusstsein hinterher. Auf diese Themen soll hier nicht eingegangen werden. Der Fokus liegt vielmehr auf den agronomischen Aspekten des Anbaus, den Wachstumsperioden und dem Potenzial für Trockenheitstoleranz. Die verschiedenen Kulturen werden unter der jeweiligen Kultur bzw. Kulturgruppe beschrieben, für die sie eine Anpassung an den Klimawandel darstellen könnten. Dazu gehören Getreide (ohne Mais), Mais, Ölsaaten, Eiweisspflanzen und Hackfrüchte.

### 7.10.1 Getreide

Das Pseudogetreide Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ist höchstwahrscheinlich eine der ersten Pflanzen, die als Alternative für den Getreideanbau unter Trockenheitsbedingungen in Frage kommen (Abbildung 7-13). Die Klimateignung auf der Grundlage von Temperatur- und Niederschlagsbereichen sowie der Länge der Vegetationsperiode hat gezeigt, dass die Bedingungen für den Quinoa-Anbau in der Schweiz in zwanzig Jahren zunehmend günstiger werden (Heinz, 2021). Gegenwärtig erschweren instabile Erträge aufgrund variabler ungünstiger Witterungsbedingungen die Entwicklung in der Schweiz. IP-SUISSE verfügt seit 2014 über ein Netzwerk von Landwirten, die die Anbaubedingungen für Quinoa in der Schweiz mit in Frankreich, den Niederlanden und Dänemark gezüchteten Sorten testen (IP-SUISSE, 2023a). Auch bei Agroscope werden derzeit Sortenprüfungen durchgeführt (Levy Häner et al., 2019). Die wichtigste Anpassung dieser Sorten ist, dass sie nicht mehr tageslängenempfindlich sind. Weitere Zuchtziele sind Einheitlichkeit, frühe Reife, ein nicht verzweigter Blütenstand,

kurze Standzeit, hoher Ertrag, Qualitätsaspekte und die industrielle Nutzung der Samen und ihrer Bestandteile (Jacobsen, 2017). Quinoa-Sorten sind je nach Saponingehalt in der Samenschale entweder vom bitteren oder vom süßen Typ. Saponine verleihen einen bitteren Geschmack und sind für den menschlichen Verbrauch unerwünscht. Sie müssen bei der Verarbeitung durch Entschälen (Polieren) und Waschen entfernt werden. Eine der ertragreichsten europäischen Sorten, Titicaca, hat einen relativ hohen Saponingehalt, während die niederländischen Sorten und die einzige französische Sorte (Jessie) süß sind. Es wurde auch auf die Kompaktheit des Blütenstandes geachtet: Offene Blütenstände trocknen nach Regen und Morgentau schneller ab und verringern das Risiko von Pilzinfektionen (Jacobsen, 2017).



Abbildung 7-13 Die Pseudogetreidearten Quinoa (links) und Amaranth (rechts) in einem Sortenversuch bei Agroscope Changins (Nyon, Waadt).

Quinoa hat den Anspruch, auch auf marginalen Böden zu wachsen und abiotische Stressfaktoren wie Trockenheit und Salzgehalt zu tolerieren. Die Mechanismen für die Trockentoleranz unterscheiden sich nicht von denen, die in 7.5 beschrieben sind, und bestehen hauptsächlich aus sehr konservativen Reaktionen auf Bodenwasserdefizite (Jacobsen, 2017). Diese sichern zwar eine Ernte, aber nicht unbedingt eine sehr ertragreiche. Agronomische Versuche in der Schweiz haben einen Stickstoffdüngbedarf von 80-100 kg ha<sup>-1</sup> und bis zu 150 kg ha<sup>-1</sup> für die französische Sorte ergeben. Ein Stickstoffmangel verringert die Samenfüllung und beeinträchtigt den Ertrag (biofarm genossenschaft, 2023b). Das Saatbeet muss für das kleine Saatgut fein strukturiert und feucht sein. Die Unkrautbekämpfung ist sehr wichtig und gilt als sehr zeitaufwändig. Eine frühere Aussaat, sobald die Bodentemperaturen über 0 °C liegen (Ende März-Ende April im Flachland), ist vorzuziehen, um den Sämlingen einen Vorsprung vor Unkraut zu verschaffen und den Erntetermin vorzuverlegen. Ein warmes und trockenes Frühjahr ist ideal, während während der Blütezeit im Juni-Juli Wasser benötigt wird (IP-SUISSE, 2023a). Eine verzögerte Aussaat kann auch den Temperaturstress während der Blüte (ab 30 °C) erhöhen, was sich auf den Ertrag auswirkt. Eine kalte Wachstumsperiode kann die Reife verzögern, aber ansonsten kann die Ernte von Ende Juli bis September stattfinden. Trockene und warme Bedingungen sind dann ideal, um Qualitätseinbußen zu vermeiden (biofarm genossenschaft, 2023b).

Amaranth (*Amarantus hypochondriacus* L., *A. cruentus* L., *A. caudatus* L.) ist wie Quinoa ein aus Süd- und Mittelamerika stammendes Pseudogetreide und eine Proteinquelle, die reich an essenziellen Aminosäuren ist (Abbildung 7-13). Ihre potenzielle Trockentoleranz ergibt sich aus der Tatsache, dass es sich um eine Art mit C4-Stoffwechsel handelt, d. h. eine effektivere Photosynthese unter niedrigeren Kohlendioxidbedingungen, die in der Pflanze aufgrund einer Trockenstressreaktion (Schließen der Stomata) auftreten. Die Aussaatbedingungen sind ähnlich wie bei Quinoa, mit dem Unterschied, dass Amaranth später gesät wird, um kalte Temperaturen in der frühen Wachstumsphase (Ende April bis Anfang Juni) zu vermeiden. Amaranth scheint im Moment weniger krankheitsanfällig zu sein als Quinoa. Die Ernte erfolgt ab September und erfordert aufgrund der kleinen Körner

trockene Bedingungen. Die Sortierung der Körner kann wegen der ebenso kleinen Samen einiger Unkräuter langwierig sein. Saubere Felder und ein hoher Schnitt aufrechtstehender Pflanzen verringern diese zusätzlichen Kosten. Im Prinzip braucht Amaranth nicht viel Dünger, und Stickstoff kann sogar ein übermässiges Wachstum verursachen, das zu Lagerbildung und einer Verzögerung der Reife führt (biofarm genossenschaft, 2023a). Derzeit sind die Erträge von Quinoa und Amaranth variabel und liegen je nach Sorte, Standort und Jahr zwischen 10 und 25 dt ha<sup>-1</sup> bzw. 8 und 45 dt ha<sup>-1</sup> (IP-SUISSE, 2023a; Levy Häner et al., 2019). Ausserdem wurden keine Qualitätsprüfungen und -normen eingeführt. Die erste Erwähnung von Quinoa in der Agrarstatistik erfolgte 2019 mit einer Fläche von 66 ha, die seitdem kleiner geworden ist (Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6 Ackerland, Erträge und Verwendbare Produktion (Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb) von alternativen Kulturen mit potenzieller Trockentoleranz. Quelle: Agristat (2023a)

	2000	2010	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Ackerland (ha)</b>							
<i>Weizen</i>							
Hirse	nv	34	233	311	240	213	nv
Quinoa	nv	nv	nv	66	26	41	nv
<i>Ölsaaten</i>							
Lein	6	147	174	157	116	204	208
<i>Hülsenfrüchte</i>							
Linsen	nv	nv	100	130	135	186	nv
<b>Erträge (dt ha<sup>-1</sup>)<sup>1,2</sup></b>							
<i>Weizen</i>							
Hirse	nv	28,8	40,1	47,2	33,4	32,2	30,7
<b>Verwendbare Produktion (t)<sup>1,3</sup></b>							
<i>Ölsaaten</i>							
Lein	nv	360	340	335	287	395	480

<sup>1</sup> die Zahlen für das Jahr 2022 sind provisorisch und werden später durch definitive, in der Regel genauere Werte ersetzt; <sup>2</sup> Verwendbare Produktion geteilt durch Anbaufläche; <sup>3</sup> Bruttoproduktion minus Verluste auf dem Feld und auf dem Betrieb. nv, nicht vorhanden.

Die Rispenhirse (*Panicum miliaceum* L.) ist eine weitere C4-Art mit interessanten ernährungsphysiologischen und agronomischen Eigenschaften, die derzeit hauptsächlich im ökologischen Landbau angebaut wird (Agroscope, 2023d). Dies hat mit dem geringen Nährstoffbedarf und der Abwesenheit von Krankheiten und Schädlingen zu tun, und auch mit dem hohen Preis, der erzielt werden kann. Hirse ist zudem trockenheitstolerant und wärmeliebend und hat eine kurze Vegetationszeit von ca. 100 Tagen. Die Aussaat erfolgt ab Ende April/Anfang Mai (Bodentemperatur mindestens 12 °C), kann aber auch gut noch im Juni erfolgen und geerntet wird je nach Saattermin ab Mitte August (Humphrys, 2005; Ventura et al., 2022). Hirse ist im frühen Stadium konkurrenzschwach gegenüber Begleitarten, so dass eine angemessene Unkrautbekämpfung erforderlich ist, um ein schnelles Wachstum zu fördern (Aebi et al., 2014). Im Jahr 2021 wurde Hirse auf 213 ha angebaut, und der Durchschnittsertrag schwankte in den letzten fünf Jahren zwischen 31 und 47 dt ha<sup>-1</sup> (Tabelle 7-6). Zwischen 2018 und 2020 wurden bei Agroscope wieder neue Sorten aus den USA, der Ukraine und Russland getestet, von denen einige interessante Eigenschaften für die verarbeitende Industrie aufweisen (Agroscope, 2023d; Schmid et al., 2023).

Hartweizen (*Triticum durum* Desf.) wird traditionell in heissen und trockenen Regionen Nordafrikas und Südeuropas (Spanien, Italien, Griechenland), der Türkei, Amerikas und Russlands angebaut. In Frankreich wird Hartweizen wegen der warmen und trockenen Sommermonate hauptsächlich im Süden angebaut. Hartweizen für den Schweizer Markt wird aus Kanada, den USA, Österreich, der Slowakei und Frankreich importiert, aber die Qualität des europäischen Weizens gilt als minderwertig und weniger stabil (Le Temps, 2020; Swisssmill, 2023). Prognosen zur Klimaeignung gehen davon aus, dass sich die Anbauggebiete für Hartweizen in Europa in allen Emissionsszenarien bereits bis 2031-2060 nach Norden bis nach Mittel- und Nordfrankreich, Südengland und Norddeutschland verschieben werden (Ceglar et al., 2021). Auch in der Schweiz, und hier vor allem in den Ebenen des Mittellandes vom Genfer See bis zur Nordschweiz, wird die Klimaeignung für den Hartweizenanbau bereits bis 2040-2070

zunehmen (Heinz, 2021). Hartweizen ist aber nicht unbedingt trockenheitsresistenter als Brotweizen. Bei einer ähnlichen Verringerung des verfügbaren Wassers (etwa 40 %) erleidet Hartweizen eine grössere Ertragsminderung (38 % gegenüber 20 %) (Daryanto et al., 2017). Hartweizen wächst am besten auf tiefgründigen Böden oder Böden mit ausreichender Wasserspeicherkapazität, andernfalls wird eine Bewässerung empfohlen (Arvalis, 2023). Warmes und trockenes Wetter, vor allem am Ende der Saison, ist erforderlich, um die Entwicklung von dunklen Flecken auf den Körnern zu minimieren, die die Qualität und den wirtschaftlichen Wert mindern. Dasselbe geschieht, wenn die Körner nicht die erforderliche Härte oder Glasigkeit entwickeln, was mit dem Proteingehalt und der Stickstoffdüngung in der Spätsaison zusammenhängt (Samson & Desclaux, 2016). Hartweizen ist auch anfälliger für Krankheiten als Brotweizen, aber es gibt Potenzial für Verbesserungen durch Züchtung, da diese weniger fortgeschritten ist als bei Brotweizen. Es gibt sowohl Winter- als auch Sommerhartweizensorten, die etwa die gleiche Vegetationszeit wie Brotweizen haben. Hartweizen braucht gute Standortbedingungen mit geringer Unkrautkonkurrenz, da die Bestockung ein schlechtes Frühwachstum nicht ausgleichen kann. Im Jahr 2022 wurde in der Schweiz auf 650 ha Hartweizen angebaut, das sind fast 19 % weniger als im Jahr 2021 (swiss granum, 2022), was jedoch mit der Entmutigung aufgrund der nassen Bedingungen im Jahr 2021 zusammenhängen könnte. IP-SUISSE lässt 2024 vier Sorten (Limbodur, Elsadur, Sambadur, Winterstern) zu, die von den derzeit gelisteten Landwirten angebaut werden sollen, um die Anbaufläche stabil zu halten. Die Sorte Winterstern wird wegen ihrer geringeren Krankheitsanfälligkeit und ihrer guten Erträge empfohlen. Für die Sorten Elsadur und Sambadur werden Erträge von 40 bis 50 dt ha<sup>-1</sup> erwartet (IP-SUISSE, 2023b). Proconseil (Waadt) hat im Jahr 2022 an zwei verschiedenen Standorten Feldversuche gestartet, die 2023 wiederholt und erweitert wurden (Proconseil, 2023).

### 7.10.2 Mais

Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench, *Sorghum* × *drummondii* (Steud.) Millsp. & Chas, und Hybriden) ist trockenheitstoleranter als Mais, was sich auf globaler Basis durch eine geringere Ertragsminderung bei einer grösseren Verringerung des verfügbaren Wassers zeigt (Daryanto et al., 2017). Der Unterschied in den Mechanismen der Dürretoleranz zwischen den beiden C4-Arten wurde mit der Wurzelentwicklung und der osmotischen Anpassung in Verbindung gebracht. Sorghum entwickelt unter starkem Trockenstress (15-25 % pflanzenverfügbares Bodenwasser) eine um 27 % grössere Spross-Trockenbiomasse als Mais, das Wurzeltrockengewicht in den oberen 1 m des Bodens beträgt 6,1 t ha<sup>-1</sup> für Sorghum und 4,4 t ha<sup>-1</sup> für Mais, und Sorghum hat einen höheren Anteil an Wurzeln im Unterboden (Schittenhelm & Schroetter, 2014). Wenn Sorghum auf tiefgründigen Böden mit grosser Wasserspeicherkapazität angebaut wird, kann mehr Wasser im Unterboden aufgenommen werden. Ausserdem wurde in Sorghumwurzeln im Vergleich zu Mais eine höhere Prolinakkumulation beobachtet, die eine verbesserte Wasseraufnahmekapazität bietet (Ali et al., 2023). Es gibt eine grosse genetische Variation bei der Dürreempfindlichkeit von Sorghum, wobei trockenheitstolerante Sorten eine engere Kontrolle über die stomatare Leitfähigkeit mit einer schnellen Verringerung bei Trockenstress und einer schnelleren Erholung aufweisen. Diese Sorten profitieren auch von einem höheren Wurzel-Spross-Verhältnis mit einer Zunahme der Wurzellänge (und einer höheren Wurzelbiomasse) unter Trockenheit sowie einer schnelleren Zunahme und einem höheren Gehalt an Osmolyten in Wurzeln und Spross (Goche et al., 2020). Ein weiterer Vorteil von Sorghum ist das derzeitige geringe Auftreten von Schädlingen und Krankheiten in Europa. Sorghum ist zum Beispiel kein Wirt für den Westlichen Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera*) und nur wenig empfindlich für den Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*). Sorghum kann daher in infizierten Gebieten Mais ersetzen oder passt in Fruchtfolgen mit Mais und vielen anderen Kulturen (Berenji & Dahlberg, 2004; Hiltbrunner et al., 2012). Bei den in den Industrieländern angebauten Sorten handelt es sich um ertragreiche Hybriden, die hauptsächlich für die Futtermittelproduktion angebaut werden (Hiltbrunner et al., 2012). In der Schweiz werden derzeit Sorten- und Anbautechnikversuche durchgeführt, um die Eignung für die Schweizer Produktionsbedingungen zu untersuchen. Der Schwerpunkt lag zuerst bei Körnersorghum (2009-2011, französische Hybriden) mit angemessenen Erträgen von 50 bis 95 dt ha<sup>-1</sup> und seit 2017 bei Sorten für die Ganzpflanzennutzung (Agroscope, 2023d). Schweizer Körnersorghum erreicht die gleichen physikalisch-chemischen Eigenschaften wie importiertes Sorghum und kann daher in gleicher Weise in Futtermitteln eingesetzt werden (Hiltbrunner et al., 2012). Insgesamt ist das Nährstoffprofil schlechter als das von Mais mit einer geringeren Verdaulichkeit und einem niedrigeren Gehalt an Trockenmasse und Stärke (Fasching C., 2014). Da dies auch von den Anbaubedingungen wie Trockenheit und Hitzestress (Abreha et al., 2022; Impa et al., 2019), die in der Schweiz voraussichtlich milder ausfallen werden, sowie von der späten Reife beeinflusst werden kann, sind weitere Untersuchungen für die Schweizer Produktionsbedingungen und Sorten erforderlich (Revue UFA, 2023). In

Frankreich wird Sorghum (v.a. zur Körnernutzung angebaut), wie in vielen industriellen Anbaugebieten, bewässert, und auch Feldversuche in der Schweiz haben gezeigt, dass das maximale Ertragspotenzial nur erreicht werden kann, wenn ausreichend Nährstoffe und Wasser zur Verfügung stehen. Dennoch ist die Anpassung und Ertragsstabilität von Sorghum unter demselben Umweltstress effektiver als die von Mais (Berenji & Dahlberg, 2004; Hiltbrunner et al., 2012). Ausserdem hat die Interaktion mit Züchtern gezeigt, dass die Selektion auf Trockentoleranz eine Priorität in der aktuellen Sorghumzucht in Europa ist (siehe 7.9.2).

Die Aussaat kann Ende April/Anfang Mai erfolgen, wenn die Bodentemperatur mindestens 12-15 °C erreicht. Die Blüte und der frühe Samenansatz erfolgen Ende Juni und Juli, so dass die Ernte im Oktober erfolgen kann. Das frühe Wachstum ist langsam (auch wegen der kalten Temperaturen), daher muss das Unkraut rigoros bekämpft werden. Es gibt sowohl früh als auch spät reifende Sorten. Wie bereits in Kapitel 5 angedeutet, wurde eine erste Version von thermischen Eignungskarten für Körner- und Silage-Sorghum entwickelt, die auf einem durchschnittlichen Temperatursummenbedarf bis zur Reife von 1150 °C ( $\pm 100$  °C) für Silage-Sorghum und 1350 °C ( $\pm 50$  °C) für Körner-Sorghum basieren (Anhang 11.1, Ergänzende Abbildung 11.1-3; Bütikofer et al. (2023)). Wie von Bütikofer et al. (Bütikofer et al., 2023) angegeben, können die Eignungskarten verbessert werden, indem ein flexibles Aussaatdatum, eine minimale Bodentemperatur, eine maximale Temperaturgrenze (30 °C), Niederschläge und Bodenmerkmale berücksichtigt werden. Aus agronomischer Sicht könnte es interessant sein, dass die Schädigung des Saatbettes durch Krähen und die Schädigung der Körner und dem Sorghum nachfolgenden Kulturen durch Wildschweine im Vergleich zu Mais aufgrund der geringen Grösse der Samen und der Entwicklung der Samen in Rispen statt in Kolben seltener ist (Agroscope, 2023d).

Im Jahr 2021 wurden in der Schweiz 299 ha Sorghum angebaut, verglichen mit 62'891 ha für Körner- und Silomais. Weitere 122 Tonnen (2021) und 83 Tonnen (2022) Sorghum wurden importiert, im Vergleich zu 158'252 Tonnen (2021) und 251'163 Tonnen (2022) Mais (Agristat, 2023c). In Europa wurde im Jahr 2020 auf 323'578 ha Sorghum angebaut, mit einer Produktion von 1'312'471 Tonnen, die sich im Vergleich zu 2010 fast verdoppelt hat. Frankreich ist der wichtigste Produzent (und Exporteur) mit 527'070 Tonnen (115'100 ha) im Jahr 2020, was ebenfalls fast einer Verdoppelung der Produktion im Jahr 2010 entspricht. Italien ist der zweitwichtigste Produzent in Europa (2020: 373'810 Tonnen, 52'910 ha) (FAOSTAT, 2023). In Frankreich werden die Körner als Futtermittel für Geflügel und Schweine verwendet, während das Futter-Sorghum als Weide- oder Silofutter verwendet wird, von dem die Hälfte direkt im Betrieb verbraucht wird. Ausserdem gibt es einen Nischenmarkt für den menschlichen Verbrauch. Die Produktion in Frankreich ist jedoch in den letzten Jahren nicht stabil gewesen, was vermutlich auf die begrenzte Verwendung von Sorghum in der Tierfutterproduktion und das mangelnde Bewusstsein für die gesundheitlichen Vorteile von Sorghumkörnern beim menschlichen Verbrauch zurückzuführen ist (Action agricole Picarde, 2023).

Die Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) ist eine aus Nordamerika stammende, mehrjährige, blühende Pflanze, die als trockenheitstolerant gilt. Sie wird für Bioenergiezwecke und als Futterpflanze angebaut. In Deutschland wurde sie 2020 auf 3'500 ha angebaut, in Frankreich stieg die Anbaufläche 2021 auf 3'000 ha (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2023; Triple Performance, 2023). Silphie kann bis zu 15 Jahre lang kultiviert werden und erbringt agrarökologische Leistungen (Blumen, Bodenfruchtbarkeit und Erosionsschutz). Die Pflanze widersteht übermässigem Regen, Überschwemmungen, Frost und Trockenheit (über die Auswirkungen von abiotischen Stressfaktoren auf die Biomasseproduktion wird jedoch nicht berichtet). In Nordamerika gilt sie aufgrund ihrer Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit als invasive Art. Auch für Europa wird eine strenge Kontrolle und ein Anbau ausserhalb wertvoller (feuchter) Ökosysteme empfohlen (Ende et al., 2021). Die Silphie produziert also auch unter Trockenheitsbedingungen Biomasse, ihr idealer Standort ist jedoch feucht, aber nicht zu nass (Ende et al., 2021). Der Stickstoffbedarf liegt bei 140 kg ha<sup>-1</sup> für einen durchschnittlichen Ertrag von 500 dt ha<sup>-1</sup> Frischmasse bei einem Trockenmassegehalt von 28 % (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2023). Im ersten Jahr bleiben die Silphien niedrig und können mit Silomais untergesät werden, während sie ab dem zweiten Jahr als Monokultur hoch (2-3 m) wachsen. Beim Schneiden entwickeln sich weitere Triebe. Die Biomasseproduktion ist angeblich auf 15 Jahre begrenzt, was sich jedoch in der Praxis noch nicht bestätigt hat (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2023; Triple Performance, 2023). In Frankreich betragen die Startkosten für den Anbau von Silphie EUR 1'600 bis 2'000 ha<sup>-1</sup> für Saatgut, Düngung, Jäten und Aussaat. In der Schweiz hat ein Landwirt im Jura CHF 2'000 ha<sup>-1</sup> angegeben (rts.ch, 2023). Silphie kann als Silage oder Grünfutter in bis zu 30 % der Ration verwendet werden, um die Verdaulichkeit zu erhalten. Ihre Qualität als Futtermittel muss weiter untersucht werden (Triple Performance, 2023).

Prométerre (Waadt) testet den Silphieanbau bereits seit zwei Jahren im Rahmen des RISC-Projekts (Réflexion-Innovation-Soutien-Climat) (Prométerre, 2023).

### 7.10.3 Ölsaaten

Der Anbau von Leinsamen oder Öllein (*Linum usitatissimum* L.) (Abbildung 7-14) hat seit seiner Aufnahme in die Liste der besonderen Kulturen, die über die Direktzahlungen Beiträge erhalten (Tabelle 7-6), im Jahr 2004 eine deutliche Produktionssteigerung erfahren (Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2023a). In erster Linie ging es dabei um die Anreicherung von Tierfutter mit mehrfach ungesättigten Fettsäuren, doch heute wird auch der Nährwert des Öls und der Samen als solche für den menschlichen Verbrauch geschätzt. Im Jahr 2022 wurden in der Schweiz 6'750 Tonnen Leinsamen importiert, verglichen mit einer inländischen Produktion von 480 Tonnen, wahrscheinlich hauptsächlich im Bereich der biologischen Landwirtschaft (Tabelle 7-6) (Agristat, 2023c). Seit den 1990er Jahren wurde in der Schweiz eine Vielzahl von agronomischen Feldversuchen durchgeführt, um die Eignung verschiedener Sorten für die Produktionsbedingungen, die Verbesserung der Ertragsstabilität und die Erntemöglichkeiten zu ermitteln (Hiltbrunner et al., 2009; Luginbühl et al., 2015; Pellet & Vullioud, 2004). Es können sowohl Winter- als auch Sommersorten angebaut werden, aber im Hinblick auf die Trockenstresstoleranz sind die Wintertypen (mit entsprechender Winterhärte) die bessere Wahl (Luginbühl et al., 2015; Pellet & Vullioud, 2004). Sie werden zwischen dem 15. September und Anfang Oktober gesät und Ende Juli/Anfang August geerntet. Das trockenheitsempfindliche Blühstadium tritt im Mai ein. Dadurch können sommerliche Trockenheit und hohe Temperaturen vermieden werden. Es wird jedoch empfohlen, Leinsamen in tiefgründigen Böden mit gutem Wasserrückhaltevermögen und einer guten Saatbettvorbereitung anzubauen, um das Wurzelwachstum in der Tiefe (bis zu 1,5 m) zu fördern (Pellet & Vullioud, 2004). Die Frühjahrssorten blühen einen Monat später und werden von Mitte August bis Anfang September geerntet. Ausserdem werden bei Wintersorten höhere Erträge und Ölgehalte erzielt (Hiltbrunner et al., 2009; Luginbühl et al., 2015). Leinsamen ist als Kulturpflanze mit geringem Nährstoffbedarf bekannt, und die Stickstoffdüngung muss gut überlegt sein, um übermässiges Wachstum und Lagerbildung zu vermeiden. Zinkmangel kann insbesondere auf kalkhaltigen oder leichten Böden oder unter nassen und kalten Bedingungen auftreten und die Blüte beeinträchtigen. Wegen möglicher Krankheiten wird empfohlen, eine Fruchtfolge von sechs bis sieben Jahren einzuhalten (Pellet & Vullioud, 2004).



Abbildung 7-14 Leinsamen, der früh am Morgen blüht (links) und am Abend seine Blütenblätter abwirft (rechts), auf einem Feld in Château-d'Oex (Waadt).

### 7.10.4 Eiweisspflanzen

In einer globalen Übersicht über die Trockenheitsempfindlichkeit von Hülsenfrüchten zeigte die Kichererbse (*Cicer arietinum* L.) eine grössere Ertragsminderung im Vergleich zur Erbse (40 % gegenüber 20 %) bei ähnlicher Verringerung des verfügbaren Wassers; bei anderen Hülsenfrüchten und vergleichbarer Verringerung des

verfügbaren Wassers war die Bedeutung der Ertragsminderung wie folgt: Bohne (60 %) > Kichererbse (40 %) > Ackerbohne (34 %) > Sojabohne (27 %) > Linse (*Lens culinaris* Medik. subsp. *culinaris*) (20 %, aber eine grosse Bandbreite von 2-40 %). Linsen schienen empfindlicher als Erbsen zu sein, denn es wurde eine ähnliche (aber sehr variable) Ertragsminderung wie bei Erbsen festgestellt, allerdings bei einer viel geringeren Verringerung des verfügbaren Wassers (Daryanto et al., 2017). Insgesamt sind Eiweisserbse, Kichererbse und Linse Hülsenfrüchte, die gut an halbtrockene Bedingungen angepasst zu sein scheinen (Gan et al., 2015). Für die Produktion unter Schweizer Bedingungen hängt die Empfindlichkeit der verschiedenen Hülsenfrüchte gegenüber Trockenheits- und Hitzestress vom Zeitpunkt der Blüte und der Samenfüllung im Jahr ab. Dies wiederum hängt vom optimalen Zeitpunkt für die Aussaat und der potenziellen Frühreife der Sorten ab. Bei Erbsen erfolgen Blüte und Samenfüllung im Mai-Juni und können daher der sommerlichen Trockenheit und Hitze entgehen. Bei Sojabohnen hingegen besteht ein höheres Risiko für Ertragseinbussen, da die Blüte und die Samenfüllung im Juli/August stattfinden.

Kichererbsen und Linsen gelten als trockentolerante alternative Eiweisspflanzen, die für den menschlichen Verbrauch geeignet sind und in der Schweiz ein Anbaupotenzial haben (Agroscope, 2023a). Die erste Erwähnung von Linsen in der Agrarstatistik der Schweiz erfolgte 2018 mit 100 ha. Im Jahr 2021 hat sich diese Fläche auf 186 ha erhöht, was ihren aktuellen Status als Nischenkultur bestätigt (Tabelle 7-6). Im Falle der Kichererbse könnte die Klimaerwärmung zu immer besseren Anbaubedingungen führen (Heinz, 2021). Sie wächst am besten bei Tagestemperaturen zwischen 21 und 29 °C und Nachttemperaturen zwischen 18 und 21 °C sowie 150-250 mm Niederschlag während der Vegetationsperiode. Ertragsminderungen aufgrund von Hitzestress während der Blüte und Hülsenentwicklung treten erst bei Temperaturen über 37 °C auf. Die Kichererbse braucht also warmes und trockenes Wetter und gut durchlässige Böden, die nicht zu nass oder staunass sind. Ausserdem wächst die Kichererbse wie viele andere Hülsenfrüchte indeterminiert, d.h. es werden kontinuierlich neue vegetative und reproduktive Pflanzenteile gebildet, bis eine maximale Anzahl von Schoten produziert wurde oder die Wachstumsbedingungen nicht mehr günstig sind. Sowohl die Blütezeit als auch die Reifezeit verlängern sich durch das gleichzeitige Auftreten bereits reifer und noch unreifer Schoten an der gesamten Pflanze. Der Beginn der Blüte ist tageslängen- und sortenabhängig, aber bei Kichererbsen erfordert das Ende der Blüte einen abiotischen Stress wie Trockenheit oder Hitze, damit die Pflanzen ihr Wachstum und ihre weitere Entwicklung beenden. Wenn es in dieser Phase regnet, nehmen die Pflanzen ihr Wachstum und ihre Blüte wieder auf, was die Ernte erschwert. In den USA werden Trockenmittel eingesetzt, um die Entwicklung zu stoppen und den Erntezeitpunkt zu bestimmen (McVay et al., 2017). Sowohl die Temperatur als auch die Anforderungen am Ende der Saison deuten darauf hin, dass der Kichererbsenanbau in der Schweiz auch heute noch riskant sein kann. Dennoch haben kleine Feldversuche zur Prüfung der agronomischen Anforderungen gezeigt, dass es zwischen den Sorten Unterschiede im Anbaupotenzial gibt (Agroscope, 2023a). In den USA gilt Kichererbse als sehr pflegeintensive Kultur, die aufgrund ihrer Krankheitsanfälligkeit (einschliesslich Anthraknose wie bei allen Hülsenfrüchten und Erbsenschädlingen in der Schweiz; Agroscope (2023a)) und des Risikos einer schlechten Samenqualität aufgrund von Ausbleichung, ungleichmässiger Farbe oder Ernteschäden, insbesondere wenn die Samen für den menschlichen Verbrauch bestimmt ist, eine ständige Feldüberwachung erfordert. Die Wahl des richtigen Erntezeitpunkts ist wichtig, um grüne Samen zu vermeiden, die den Wert mindern (McVay et al., 2017). Kichererbse ist auch ein schlechter Konkurrent für Unkräuter während der gesamten Vegetationsperiode, da sie langsam wächst (jedoch abhängig von Sorte und Bodenwassergehalt; Hosseini et al. (2009)), eine offene Kronenstruktur hat und oft eine geringe Pflanzenhöhe aufweist.

Aus denselben Gründen haben Linsen auch Schwierigkeiten, mit Unkräutern zu konkurrieren, und im ökologischen Landbau wird der Mischanbau mit anderen Kulturen zur Unkrautbekämpfung vorgeschlagen. Ein Projekt von Agroscope und das Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) zur Untersuchung von Linsen-Gerste- und Linsen-Erbsen-Gemengen ist im Gange (Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, 2023b). Eine weitere agronomische Schwierigkeit ist der geringe Wuchs und die mangelnde Standfestigkeit, die dazu führt, dass die Ernte in Bodennähe erfolgen muss. Die Standfestigkeit kann durch eine geringere Aussaatdichte verbessert werden, da sich dann die Strahlungsabsorption, die Verzweigung und die Stängellänge (kürzer) positiv entwickeln. Heutzutage können durch Sortieren nach der Ernte Steine und anderes unerwünschtes Material entfernt werden, aber das muss erst eingeführt werden.

Bei Linsen muss die Bodentemperatur bei der Aussaat über 6 °C liegen, um die Keimung zu fördern. Die Aussaat erfolgt in der Schweiz zwischen März und Mai. Bei einer frühen Aussaat beginnt die Blüte frühestens Ende Mai und die Reife ist für Ende Juni oder Später zu erwarten. Dies bedeutet wie bei der Erbse, dass die Sommertrockenheit möglicherweise vermieden werden kann. Andererseits brauchen Linsen Sonnenlicht und neigen eher zu übermässigem vegetativen Wachstum, verzögerter Blüte, geringer Hülsenzahl, hohem Krankheitsdruck und Lagerbildung, wenn sie über längere Zeiträume bei bewölktem Wetter angebaut werden (Summerfield et al., 1985; Terres Inovia, 2020b). Eine hohe Lichtintensität und eine geringe Bewölkung (Beschattung) bringen den höchsten Ertrag (Yuan et al., 2017). Ausserdem bedeutet die indeterminierte Wuchsform von Linsen, dass nicht alle Hülsen zur gleichen Zeit reif werden, was die Bestimmung eines geeigneten Erntezeitpunkts erschwert (Agroscope, 2023a). Bei der grünen Puy-Linse aus der Region Rhône-Alpes in Frankreich (lentille verte du Puy) ist ein Trockenstress, der zu einem frühen Absterben führt, für die Erzielung der angestrebten Qualität dieser Linse günstig (La Lentille Verte du Puy, 2023).

Die agronomischen Herausforderungen, der Krankheitsdruck und die Auswirkungen auf die Fruchtfolge, die reduzierte symbiotische Stickstofffixierung bei Trockenheit sowie die Temperatur- und Lichtanforderungen machen den Anbau von trockenheitstoleranten Kichererbsen und Linsen unter den heutigen Klimabedingungen in der Schweiz zu einer Herausforderung und führen oft zu einem variablen Ertrag.

### 7.10.5 Hackfrüchte

Die Süsskartoffel (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) ist eine tropische Kulturpflanze mit hohem Nährwert, deren Markt in Europa seit etwa zehn Jahren wächst. In Europa werden etwa 100'000 Tonnen produziert, davon 90 % in Spanien und Portugal mit zusätzlicher Bewässerung (Fresh Plaza, 2023). Die Süsskartoffel wird als leicht trocken tolerant bezeichnet, aber es ist nicht klar, was dies unter Schweizer Anbaubedingungen bedeutet. Ein Vergleich der weltweiten Produktion hat gezeigt, dass die Süsskartoffel bei einer vergleichbaren Verringerung des verfügbaren Wassers grössere Ertragseinbussen hat als die Kartoffel (Daryanto et al., 2017). Die Süsskartoffel benötigt warme Wachstumsbedingungen mit einer mittleren Temperatur von mindestens 21 °C. Sie verträgt keine Temperaturen unter 10 °C, so dass die Aussaat ab Mitte Mai erfolgt. Das frühe Wachstum kann aufgrund der niedrigen Temperaturen noch langsam sein, und die Pflanze ist in den frühen Stadien kein guter Konkurrent für Unkraut. Die Knollenbildung erfolgt in den Sommermonaten für eine Ernte im Herbst (ab Ende September). Die Süsskartoffeln werden derzeit von Hand geerntet, da sie leicht beschädigt werden und einen Sonnenbrand erleiden können, wenn sie länger als 90 Minuten der Sonne ausgesetzt sind. Ausserdem müssen die Knollen vor der Lagerung eine Reifezeit durchlaufen, um die Schale zu härten. Derzeit wird die Süsskartoffel in der Schweiz von einigen wenigen Landwirten im Berner Seeland, in Genf und im Thurgau angebaut (Batati GmbH, 2023), möglicherweise auch von anderen.

## 7.11 Fazit

### Eine quantitative Bewertung der Auswirkungen von Trockenheit und Hitzestress auf die Ernteerträge und -qualität fehlt

Derzeit werden die Auswirkungen von Trockenheit oder Hitzestress auf das Erntegut und dessen Qualität im Schweizer Ackerbau nicht direkt, quantitativ und systematisch erfasst oder bestimmt. Die Klärung dieser Frage gibt Auskunft über die aktuellen wirtschaftlichen Verluste und gibt Hinweise auf das, was in Zukunft zu erwarten ist. Damit werden die nötigen Anreize geschaffen, um die Widerstandsfähigkeit durch Sortenwahl, tolerante Sorten, Anbauauswahl und möglicherweise in erster Linie durch Bewässerung zu verbessern.

Neben experimentellen Ansätzen unter kontrollierten oder halbkontrollierten Bedingungen kann die Bewertung durch die Integration von Umweltdaten und durch die Ausweitung und Vertiefung von **Data Mining** in bestehenden Datensätzen realisiert und verbessert werden. Bestehende nationale Sortenversuche, die sich über mehrere Jahre und an vielen Standorten in der Schweiz erstrecken und eine grosse Anzahl von Sorten betreffen, **können durch eingehende Analysen der Auswirkungen von Umweltfaktoren auf Ertrag und Qualität** sowie der Wechselwirkungen zwischen Genotyp, Umwelt und Bewirtschaftung weiter genutzt und aufgewertet werden. Der Reichtum der Sortenversuche kann potenziell durch landesweite landwirtschaftliche Produktionsdaten auf regionaler, einzelbetrieblicher oder lokaler Ebene erweitert werden.

### Die Züchter bieten derzeit keine trockenoleranten Sorten für die Sortenprüfung in der Schweiz an

Die Züchter betrachten die Schweiz nach wie vor als regenreiches Gebiet, und die derzeitige Auffassung ist, dass Sorten angeboten werden sollten, die unter verschiedenen Anbau- und Wetterbedingungen ertragsstabil sind. Darüber hinaus konzentrieren sich die **nationalen Sortenprüfungskriterien** auf Ertrag, Qualität und Krankheitsresistenz und beinhalten keine Trockentoleranz. Daher gibt es für die Züchter keine Anreize, trockenheitstolerante Sorten anzubieten. Eine Änderung der Prüfkriterien der nationalen Sortenversuche könnte diese Situation ändern. Die Entscheidung darüber wird in den nächsten zwei Jahren fallen, da der Aktionsplan der kürzlich veröffentlichten Klimastrategie für Landwirtschaft und Ernährung 2050, die vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), dem Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) erarbeitet wurde, eine Massnahme im Sinne einer Überarbeitung der Kriterien und Methoden zur Prüfung der Toleranz gegenüber extremen Umweltbedingungen enthält. **Die neuen Kriterien und Methoden werden bis 2025 festgelegt**, und anschliessend werden die entsprechenden Rechtsvorschriften angepasst. Die Auswirkungen der Änderungen werden voraussichtlich ab 2035 in der Praxis zu sehen sein. Es muss sichergestellt werden, dass Trockenheitstoleranz und möglicherweise auch Hitzetoleranz Teil der künftigen Prüfkriterien werden.

### Entwicklung und Konsolidierung von Methoden zur Bewertung der Trockentoleranz

Methoden zur Bewertung von Trockenstress und Toleranzmerkmalen sind teilweise entwickelt worden (das Wissen ist vorhanden), müssen aber noch gründlicher unter Feldbedingungen getestet werden. Ausserdem sind die klassischen Methoden arbeits- und zeitaufwändig und eignen sich nicht unbedingt für die grossen Anbauflächen, die für Sortenversuche genutzt werden. Die jüngsten Fortschritte in der Fernerkundung müssen im Hinblick auf die Sortenprüfung weiter ausgebaut werden. Dies erfordert die Erhebung einer grossen Menge von Ground-Truth-Daten, die bereits in den nationalen Sortenversuchen, aber auch an Feldstandorten von Universitäten und anderen Forschungsinstituten begonnen werden kann.

Ein erster Schritt in diesem Sinne wäre es, bereits jetzt in die Anpassung der Sortenprüfungsversuche zu investieren. Weitere Kriterien und Anforderungen für die Anpassung und Verbesserung der nationalen Sortenprüfung sind:

- Phänologie: umfangreichere Aufzeichnungen über den Zeitpunkt der Wachstumsstadien und die Unterschiede zwischen den Sorten; Berechnung der Temperatursummen für die Wachstumsstadien der einzelnen Sorten;

- Phänotypisierung: Entwicklung von Kriterien zur Feststellung, ob die Sorten unter Trockenstress leiden und dies ermöglichen, zwischen trockenheits- und hitzeempfindlichen und -toleranten Sorten zu unterscheiden; Sammlung von Ground-Truth-Daten über Trockenstress bei verschiedenen Sorten;
- Oberirdische Umgebungsbedingungen: Ausdehnung der Umgebungsmessungen für eine bessere räumliche und zeitliche Auflösung oder eine höhere Genauigkeit der Wetterdaten durch lokale Wetterstationen oder zumindest Vor-Ort-Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit;
- unterirdische Umwelt: Einbeziehung der Wasserverfügbarkeit des Bodens durch Messungen von Merkmalen wie Gründigkeit, Wasserhaltevermögen und Bodenwassergehalt mit hoher zeitlicher und standortangepasster räumlicher Auflösung;
- Biotische Stresseinflüsse: Verbesserung der Datenerhebung über das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten und/oder deren Verwertung und Integration in Datenanalysen.

Ziel der Umweltmessungen ist es, das Auftreten und den Schweregrad von Trockenheit oder Hitzestress besser zu bestimmen. Dies wird die Erklärungskraft von Umweltfaktoren in Ertragsvorhersagemodellen und die Bewertung der Auswirkungen der Umwelt auf den Ertrag oder die Qualität verbessern. Vollständigere und präzisere Angaben zur Phänologie, insbesondere zu kritischen Entwicklungsstadien, können eine Analyse des Auftretens von Dürre- oder Hitzestress in diesen Stadien auf der Grundlage der Umweltbedingungen und ihrer Beziehung zu Ertrags- und Qualitätsparametern ermöglichen. Dies wiederum hilft bei der Differenzierung von Sorten hinsichtlich ihrer abiotischen Stresstoleranz. Darüber hinaus wird die Bewertung des potenziellen Nutzens der Bewässerung verbessert, und es können geeignete Bewässerungspläne einschliesslich des Zeitpunkts und der Menge der Bewässerung erstellt werden.

Eine alternative Strategie zur Beurteilung von Trockenheitseffekten, zur Differenzierung von Sorten und zur Verbesserung ihrer Selektion für den Schweizer Ackerbau besteht darin, Sorten in trockeneren und wärmeren Umgebungen anzubauen, die den Schweizer Bedingungen der Zukunft entsprechen. Andererseits verfolgen die Züchter diesen Ansatz bereits und nehmen umgekehrt auch Sorten, die an diese trockeneren und wärmeren Umgebungen angepasst sind, in die Züchtungsprogramme für die heutigen und zukünftigen Schweizer Anbaubedingungen auf (zumindest für die Getreidezüchtung in der Schweiz).

### Die Sortenwahl kann an die Produktionsbedingungen angepasst werden

Nationale Sortenversuche finden im ganzen Mittelland und über mehrere Jahre hinweg statt, um die unterschiedlichen Anbaubedingungen zu berücksichtigen, die auftreten können. Während die bisher für die Schweizer Landwirtschaft vorgeschlagenen Sorten darauf abzielten, in der ganzen Schweiz und über mehrere Jahre hinweg stabile Erträge zu erzielen, erfordert die Variabilität der Witterungsbedingungen zwischen und innerhalb von Vegetationsperioden und zwischen landwirtschaftlichen Regionen regionale (Umwelt-) **Sorten-optimierungsstrategien**. Nationale Sortenversuchsdaten können verwendet werden, um statistische Ertragsvorhersagemodelle für einzelne Sorten zu entwickeln, die über mehrere Jahre einer Kombination regionaler Umweltbedingungen ausgesetzt waren. Wie bereits erwähnt, kann der Reichtum der Sortenversuche durch landesweite landwirtschaftliche Produktionsdaten erweitert werden. Die Ernteerträge und möglicherweise auch die Qualität können von einer regional angepassten Sortenwahl profitieren, **nicht nur um die Erträge zu verbessern**, sondern auch **um sie unter extremen Bedingungen weiter zu stabilisieren**.

Wie in Kapitel 5 angedeutet, können zusätzlich zu den Temperatursummen zur Bestimmung geeigneter Regionen für den Anbau von Ackerkulturen beeinflussende Umweltdaten oder agroklimatische Faktoren (im positiven wie im negativen Sinne) aus den Daten der Sortenversuche ermittelt werden, insbesondere wenn die oben beschriebenen zusätzlichen Kriterien und Anforderungen in die Datenerhebung einbezogen werden. Für die wichtigsten Ackerkulturen in der Schweiz kann ein dynamisches Instrument ins Auge gefasst werden, das auf der Grundlage eines gewählten Aussaatdatums eine Schätzung des Reifedatums einer Sorte und einen Hinweis auf den Zeitpunkt ihrer kritischen Wachstumsstadien in der Saison liefert. Letzteres könnte bei der Bewässerungsplanung, der Vorhersage des Schädlings- und Krankheitsdrucks und dem Auftreten von extremen Wetterereignissen wie Spätfrost, Trockenheit und Hitzestress, Starkregen, Hagel und Gewitter helfen. Dasselbe Instrument könnte zur

Überarbeitung von Fruchtfolgeplänen und zur Entwicklung von Risikomanagementstrategien verwendet werden, indem untersucht wird, welche Sorten im Hinblick auf abiotische Stresstoleranz, Lagerungsempfindlichkeit sowie Schädlings- und Krankheitsresistenz kombiniert werden können, oder zur Diversifizierung angesichts des zunehmend unvorhersehbaren Auftretens von extremen Wetterereignissen. Idealerweise würde das Instrument ein Modul mit standortspezifischen Bodenmerkmalen und einem damit verbundenen Trockenheitsrisikofaktor enthalten, der auf den akkumulierten Niederschlägen sowie der Wasserhaltekapazität und der Bodengründigkeit beruht.

## **Ackerkulturen - Bewässerung, Sorten, Agronomie**

Insgesamt und insbesondere für andere Ackerkulturen als Kartoffeln muss die Forschung über die **Auswirkungen der Bewässerung auf Ertrag und Qualität**, die Anwendung der Bewässerung in kritischen Wachstumsstadien und die Bewässerungsmengen zur Erreichung einer optimalen Wasserproduktivität noch in Angriff genommen werden. Dies ist als Vorbereitung auf möglicherweise schlechtere Anbaubedingungen in der Zukunft und als Instrument zur erneuten Prüfung der Bewässerungswürdigkeit von Ackerkulturen erforderlich. (Dies wurde bereits in Kapitel 6 angedeutet). Die Bewässerung kann sich positiv oder negativ auf die Qualität auswirken. Neben der Ertragsverbesserung ist es z.B. wichtig zu wissen, wie sich das Verhältnis zwischen Stärke- und Proteingehalt in den Körnern als Reaktion auf die Bewässerung in den Stadien der Kornfüllung entwickelt, insbesondere bei den Top-Sorten von Brotweizen, wie der Zuckergehalt von Rüben durch die Bewässerung beeinflusst wird und wie sich die Verdaulichkeit von Silage verändert.

Ein Ansatz könnten gezielte Bewässerungsexperimente sein, die die Messung von Entwicklungs-, Wachstums-, physiologischen und Leistungsmerkmalen unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus oder unter halbkontrollierten Bedingungen im Feld unter Verwendung von Regenschutzvorrichtungen umfassen. Diese Art von Versuchen kann gleichzeitig die Entwicklung oder Verbesserung von Phänotypisierungsmethoden zur Erkennung von Trockenstress und Toleranzmechanismen sowie die Differenzierung von Sorten im Feld ermöglichen. Daten in diesem Sinne können auch zur Kalibrierung von Modellen zur Erkennung von Trockenstress und zum Training von Klassifizierungsalgorithmen durch maschinelles Lernen beitragen (siehe Kapitel 6). Ausserdem wirkt sich die Trockenheit auf die Stickstoffaufnahme im Boden und die symbiotische Stickstofffixierung in Hülsenfrüchten aus. Dies muss im Rahmen der Optimierung der Stickstoffausbringung, der Produktion und Qualität von Hülsenfrüchten und möglicherweise auch der Bewässerungsstrategien weiter untersucht werden.

Das Potenzial einer Vielzahl **alternativer Kulturpflanzen für die Anpassung an die Trockenheit** wurde erkannt, aber die Einführung in die reguläre landwirtschaftliche Produktion ist nach wie vor schwierig, und die Erträge sind bei weitem nicht stabil, insbesondere bei alternativen Getreidesorten und Hülsenfrüchten. Bei den meisten dieser Kulturpflanzen besteht ein genetisches Potenzial für weitere Sortenverbesserungen im Hinblick auf Dürretoleranz, agronomische Leistung und Eignung. Weitere Schritte und kontinuierliches Engagement sind bei **der Sortenprüfung, der Wechselwirkung zwischen Genotyp, Umwelt und Bewirtschaftung und der Qualitätsverbesserung** (oder zumindest der Prüfung) auf der Produktionsseite erforderlich. Auch die Verarbeitung, die Vermarktung und die Verbraucherseite sollten nicht vernachlässigt werden, wurden hier aber nicht thematisiert.

### *Getreide*

Es wird davon ausgegangen, dass Trockenheit und möglicherweise auch Hitzestress bereits Auswirkungen auf Ertrag und Qualität haben. Die erwähnten Studien über die Auswirkungen von Trockenheit und Hitzestress einerseits und Bewässerung andererseits auf Ertrag und Qualität gelten für Getreide und insbesondere für Brotweizen. Die kritischen Wachstumsphasen für Getreide sind bekannt und verstanden.

### *Mais*

Die oben erwähnten Bemerkungen für Getreide gelten auch für Mais (im Prinzip auch ein Getreide). Mais wird jedoch bewässert, insbesondere im westlichen Mittelland, aber es ist nicht klar, wie die Bewässerungsentscheidungen getroffen werden. Es könnte sein, dass das Rollen der Blätter für die Landwirte ein Hinweis auf Trockenstress ist. Obwohl diese kritischen Wachstumsstadien auch für Mais gelten, sind sie für die Getreideproduktion besonders wichtig. Starker Trockenstress in vegetativen Stadien, die nicht als kritisch angesehen werden, kann bereits die Biomasseakkumulation beeinträchtigen und die Silageproduktion verringern. Vor allem in diesen Fällen scheint

Sorghum eine vielversprechende Alternative zu Mais zu sein. Weitere Sorten-, Agrar- und Qualitätsprüfungen können dazu beitragen, seinen Status zu festigen und ihn in die reguläre landwirtschaftliche Produktion aufzunehmen. Dazu bedarf es auch der Unterstützung durch die Futtermittelindustrie und des Informationsaustauschs mit und zwischen Landwirten.

#### *Ölsaaten*

Raps und Sonnenblumen gelten als nicht trockenheitsanfällig, da sie der Trockenheit entgehen bzw. sie tolerieren. Sojabohnen (sowohl Ölsaaten als auch Eiweisspflanzen) sind trockenheitsempfindlich, und ihre kritischen Wachstumsstadien, Blüte und Samenfüllung, treten in den Sommermonaten auf. Es werden sowohl Bewässerungsstrategien als auch tolerante Sorten benötigt. Gegenwärtig ist Sojabohnen eine eher kleine Kulturpflanze und im Vergleich zu importierten Sojabohnen teuer, wird aber als wichtig für die Eiweissproduktion im Inland angesehen. Es ist daher nicht klar, ob Sojabohnen bewässerungsfähig werden können.

#### *Eiweisspflanzen*

Eiweisserbsen können aufgrund der kritischen Phasen vor dem Sommer Trockenstress entgehen und gelten im Allgemeinen zusammen mit Kichererbsen und Linsen als trockenheitstoleranter als andere Hülsenfrüchte. Dennoch ist die Ertragsinstabilität bei Hülsenfrüchten ein grosses Problem und wahrscheinlich einer der Gründe, die einer weiteren Ausweitung der Produktion im Wege stehen, trotz der Ökosystemleistungen, die diese Pflanzen erbringen, und des zunehmenden Interesses für den menschlichen Verbrauch. Das oft unbestimmte Wachstumsverhalten von Hülsenfrüchten könnte mit der beobachteten Ertragsinstabilität zusammenhängen, obwohl dies unter kurzfristigen Trockenheitsbedingungen auch von Vorteil sein kann. Ein weiterer Faktor könnte die Anfälligkeit von Hülsenfrüchten für wichtige Krankheiten sein. Weitere Studien zur Wechselwirkung zwischen Genotyp, Umwelt und Management sind auch bei Hülsenfrüchten erforderlich.

#### *Kartoffeln*

Kartoffeln werden bewässert, und wie bereits erwähnt, sind Verbesserungen der Wasserproduktivität und der Bewässerungseffizienz noch möglich. Bei der Wurzel- und Sprossarchitektur und den physiologischen Merkmalen, die mit der Trockenheitsempfindlichkeit zusammenhängen, bestehen recht grosse Sortenunterschiede. Dies deutet auf ein Potenzial für die Selektion auf Trockenheitstoleranz hin. Neben Trockenheit sind Kartoffeln auch von Hitzestress in den Dämmen betroffen, der nicht unbedingt durch Bewässerung behoben werden kann. Die Züchter befassen sich auch mit Hitzestress, aber es sind weitere Forschungsarbeiten zu agronomischen Praktiken erforderlich, die die Bodentemperatur senken und vielleicht gleichzeitig die Pflanzen vor Schädlingsbefall schützen.

#### *Zuckerrüben*

In der Zuckerrübenzüchtung liegt der Schwerpunkt eindeutig auf der Krankheitsresistenz. Zuckerrüben zeigen auf dem Feld durchaus Symptome von Trockenstress. Die Fähigkeit, nach schwerem Trockenstress Blätter nachwachsen zu lassen, ist nicht unbedingt ein Trockentoleranzmechanismus, der sich positiv auf Ertrag und Zuckergehalt auswirkt. Bei Zuckerrüben ist es daher wichtig, Versuche und/oder Feldversuche zu den Auswirkungen von Trockenstress auf Ertrag und Zuckergehalt einzurichten und/oder Analysen von Daten aus Sortenversuchen oder von Landwirten durchzuführen. Die Notwendigkeit von Bewässerungsversuchen, wie sie für Ackerkulturen im Allgemeinen beschrieben wurde, gilt natürlich auch für Zuckerrüben.

### **Schädlings- und Krankheitsdruck unter dem Klimawandel**

Der Schwerpunkt liegt hier auf Trockenheit, d. h. Bodenwasserdefizit und/oder hoher Verdunstungsbedarf, sowie auf Hitze, da beide Stressfaktoren häufig gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig beeinflussen. Die vielfältigen und unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Ausbreitung und den Befall mit biotischen Stressfaktoren, einschliesslich Schadinsekten und den von ihnen übertragenen bakteriellen und viralen Krankheitserregern sowie Pilzkrankheiten, wurden hier nicht berücksichtigt. Es ist jedoch klar, dass der Befall mit Schadinsekten aufgrund milder Wintertemperaturen und längerer Wachstumsperioden zunehmen wird. Ausserdem sind bereits neue Schädlinge und Krankheiten in die Schweiz eingetroffen und werden aufgrund der Klimaerwärmung auch weiterhin eintreffen. Die Wechselwirkung mit Trockenstress könnte von Bedeutung sein, da geschwächte Pflanzen möglicherweise stärker befallen werden, während trockene Bedingungen zu einem geringeren Pilzbefall führen

(wobei der positive Effekt durch Bewässerung möglicherweise wieder aufgehoben wird). Diese Wechselwirkung sollte für Ackerkulturen weiter untersucht werden, um das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten und die damit verbundenen Schäden vorhersagen zu können. Wie bereits oben angedeutet, sollten die Notationen zum Schädlings- und Krankheitsbefall in der Datenanalyse besser verwertet werden.

## 7.12 Literaturverzeichnis

- Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T., Ng'uni, D., & Geleta, M. (2022). Sorghum in dryland: Morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, 255(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- Action agricole Picarde. (2023). Le sorgho, une plante d'avenir. <https://www.action-agricole-picarde.com/le-sorgho-une-plante-davenir>
- Aebi, R., Knapp, S., & Hiltbrunner, J. (2014). Mechanische Regulierung der Begleitflora bei Rispenhirse. *Agrarforschung Schweiz*, 5(4), 158–161. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/alternative-kulturpflanzen/rispenhirse.html>
- Agristat. (2023a). 2022. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Kapitel 2 Pflanzenbau (S. 28). Schweizer Bauernverband. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft>
- Agristat. (2023b). 2022. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Kapitel 4 Versorgungsbilanzen (S. 23). Schweizer Bauernverband. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft>
- Agristat. (2023c). 2022. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Kapitel 6 Aussenhandel (S. 20). Schweizer Bauernverband. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft>
- Agroscope. (2023a). Alternative Kulturen. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/alternative-kulturpflanzen.html>
- Agroscope. (2023b). Listen der empfohlenen Sorten. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/aktuell/dossiers/sortenlisten.html>
- Agroscope. (2023c). Ölpflanzen und Eiweisskulturen. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/oelpflanzen.html>
- Agroscope. (2023d). Rispenhirse (*Panicum miliaceum* L.). <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/alternative-kulturpflanzen/rispenhirse.html>
- Aksouh-Harradj, N. M., Campbell, L. C., & Mailer, R. J. (2006). Canola response to high and moderately high temperature stresses during seed maturation. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 967–980. <https://doi.org/10.4141/P05-130>
- Alghamdi, S. S., Al-Shameri, A. M., Migdadi, H. M., Ammar, M. H., El-Harty, E. H., Khan, M. A., & Farooq, M. (2015). Physiological and molecular characterization of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes for adaptation to drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(6), 401–409. <https://doi.org/10.1111/jac.12110>
- Ali, A. E. E., Husselmann, L. H., Tabb, D. L., & Ludidi, N. (2023). Comparative proteomics analysis between maize and sorghum uncovers important proteins and metabolic pathways mediating drought tolerance. *Life*, 13(1), 170. <https://doi.org/10.3390/life13010170>
- Aliche, E. B., Oortwijn, M., Theeuwen, T. P. J. M., Bachem, C. W. B., Visser, R. G. F., & Van Der Linden, C. G. (2018). Drought response in field grown potatoes and the interactions between canopy growth and yield. *Agricultural Water Management*, 206, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.013>
- Amede, T., Kittlitz, E. V., & Schubert, S. (1999). Differential drought responses of faba bean (*Vicia faba* L.) inbred lines. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 183(1), 35–45. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.1999.00310.x>

- Andrianasolo, F. N., Champolivier, L., Maury, P., & Debaeke, P. (2017). Analysis of source and sink dynamics involved in oil and protein accumulation in sunflower achenes using a bi-linear model. *Field Crops Research*, 201, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.020>
- Arncken, C., Klais, M., Wendling, M., & Messner, M. (2020). Cultivation of white lupin (4; Legumes Translated Practice Note, S. 1–4). Research Institute of Organic Agriculture FiBL. <https://www.legumestranslated.eu/>
- Arvalis. (2014). Céréales à paille—Le triticale, une culture appréciée des éleveurs. [Le triticale, une culture rustique pas sensible aux maladies du pied | ARVALIS](https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-les-chiffres-cles-de-la-production-en-france)
- Arvalis. (2023). Blé dur: Les chiffres clés de la production en France. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-les-chiffres-cles-de-la-production-en-france>
- Badjona, A., Bradshaw, R., Millman, C., Howarth, M., & Dubey, B. (2023). Faba bean processing: thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties. *Molecules*, 28(14), 5431. <https://doi.org/10.3390/molecules28145431>
- Bainard, L. D., Navarro-Borrell, A., Hamel, C., Braun, K., Hanson, K., & Gan, Y. (2017). Increasing the frequency of pulses in crop rotations reduces soil fungal diversity and increases the proportion of fungal pathotrophs in a semiarid agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.020>
- Barot, S., Allard, V., Cantarel, A., Enjalbert, J., Gauffreteau, A., Goldringer, I., Lata, J.-C., Le Roux, X., Niboyet, A., & Porcher, E. (2017). Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0418-x>
- Batati GmbH. (2023). Schweizer Süsskartoffel. <https://batati.ch/>
- Baux, A., Pignon, P., & Luginbühl, C. (2018). Liste der empfohlenen Eiweisserbsensorten für die Ernte 2018. *Agrarforschung Schweiz*, 9(2), 1–2. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/2018/02/liste-der-empfohlenen-eiweisserbsensorten-fuer-die-ernte-2018/>
- Baux, A., Wegmüller, J., & Holzkämper, A. (2015). Exploring climatic impact on oilseed rape yield in Switzerland. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 123. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.209>
- Berenji, J., & Dahlberg, J. (2004). Perspectives of sorghum in Europe. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190(5), 332–338. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00102.x>
- Berger, J., Palta, J., & Vadez, V. (2016). Review: An integrated framework for crop adaptation to dry environments: Responses to transient and terminal drought. *Plant Science*, 253, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.09.007>
- biofarm genossenschaft. (2023a). Fiche technique pour la culture d'amarante à grains en agriculture biologique. <https://biofarm.ch/fr/mwdownloads/download/link/id/54>
- biofarm genossenschaft. (2023b). Fiche technique pour la culture de quinoa en agriculture biologique. <https://biofarm.ch/fr/mwdownloads/download/link/id/53>
- Bloch, D., Hoffmann, C. M., & Marlander, B. (2006). Solute accumulation as a cause for quality losses in sugar beet submitted to continuous and temporary drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(1), 17–24. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2006.00185.x>
- Blum, A. (2016). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, Cell & Environment*, 40(1), 4–10. <https://doi.org/10.1111/pce.12800>
- Borg, J., Kiær, L. P., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S., & Enjalbert, J. (2018). Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research*, 221, 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>
- Bossy Céréales. (2022). Fribourg inaugure une usine pionnière dans les protéines végétales. [https://bossycereales.ch/2022/05/11/fribourg-inaugure-une-usine-pionniere-dans-les-protéines-vegetales/#pll\\_switcher](https://bossycereales.ch/2022/05/11/fribourg-inaugure-une-usine-pionniere-dans-les-protéines-vegetales/#pll_switcher)

- Bouthier, A., Deswarte, J.-C., & Deumier, J.-M. (2012). Irrigation des céréales. Blé tendre, blé dur, orge de printemps. Arvalis-Institut du végétal.
- Brabant, C., Fossati, D., & Kleijer, G. (2006). Die Sommerweizenzüchtung in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 13(6), 240–247. [Die Sommerweizenzüchtung in der Schweiz - Agrarforschung Schweiz](#)
- Bramley, H., Turner, N. C., Turner, D. W., & Tyerman, S. D. (2009). Roles of morphology, anatomy, and aquaporins in determining contrasting hydraulic behavior of roots. *Plant Physiology*, 150(1), 348–364. <https://doi.org/10.1104/pp.108.134098>
- Brown, K. F., Messemer, A. B., Dunham, R. J., & Biscoe, P. V. (1987). Effect of drought on growth and water use of sugar beet. *The Journal of Agricultural Science*, 109(3), 421–435. <https://doi.org/10.1017/S0021859600081636>
- Bruckner, P. L., & Froberg, R. C. (1987). Rate and duration of grain fill in spring wheat. *Crop Science*, 27(3), 451–455. <https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700030005x>
- Bueckert, R. A., Wagenhoffer, S., Hnatowich, G., & Warkentin, T. D. (2015). Effect of heat and precipitation on pea yield and reproductive performance in the field. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(4), 629–639. <https://doi.org/10.4141/cjps-2014-342>
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2023). SwissBOUNDARIES3D. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/boundaries3d.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2022). Pflanzensorten und Saatgut. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzliche-produktion/saat--und-pflanzgut.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2023a). Einzelkulturbeiträge. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen/einzelkulturbeitraege.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2023b). Klimastrategie. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/umwelt/klima0.html>
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2023). Trockenheitsindikatoren. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel/hitze-trockenheit-kaelte-und-schnee/klima-indikatoren/trockenheitsindikatoren.html>
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023a). Arealstatistik. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.html>
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023b). Beschäftigte, Landwirtschaftliche Betriebe, Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) und Nutztiere auf Klassifizierungsebene 1 nach Kanton. [https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000\\_101](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000_101)
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023c). Landwirtschaftliche Betriebe und Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) auf Klassifizierungsebene 3 nach Kanton. [https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000\\_106](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/px-x-0702000000_106)
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023d). Statistischer Atlas der Schweiz. 07—Land-, Forstwirtschaft / Landwirtschaft / Getreide / 2022. Getreideflächen 2022. [https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/17369\\_5886\\_5872\\_4801/26907.html](https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/17369_5886_5872_4801/26907.html)
- Bundesamt für Statistik BFS. (2023e). Statistischer Atlas der Schweiz. 07—Land-, Forstwirtschaft / Landwirtschaft / Hackfrüchte / 2022. Anbaufläche der Hackfrüchte, 2022. [https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/17370\\_5888\\_5872\\_4801/26908.html](https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/17370_5888_5872_4801/26908.html)
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. (2023). Die Durchwachsene Silphie – eine Alternative zu Silomais? <https://www.praxis-agrar.de/betrieb/erneuerbare-energien/durchwachsene-silphie>
- Bütikofer, N., Vonlanthen, T., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2023). Thermische Eignungskarten für Sorghum in der Schweiz. <https://doi.org/10.34776/AFS14-24>
- Butts-Wilmsmeyer, C. J., Seebauer, J. R., Singleton, L., & Below, F. E. (2019). Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize. *Agronomy*, 9(1), 16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010016>

- Cai, K., Chen, X., Han, Z., Wu, X., Zhang, S., Li, Q., Nazir, M. M., Zhang, G., & Zeng, F. (2020). Screening of worldwide barley collection for drought tolerance: The assessment of various physiological measures as the selection criteria. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1159. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01159>
- Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Calanca, P., & Hölzkamper, A. (2010). Agrarmeteorologische Bedingungen im Schweizer Mittelland von 1864 bis 2050. *Agrarforschung Schweiz*, 1(9), 320–325. [Agrarmeteorologische Bedingungen im Schweizer Mittelland von 1864 bis 2050 - Agrarforschung Schweiz](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005)
- Ceglar, A., Toreti, A., Zampieri, M., & Royo, C. (2021). Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d68>
- Charles, R., Bovet, V., Bouttet, D., Poivet, K., Casta, P., & Bengochea, A. (2008). Welche Körnerleguminosen für die Schweiz? *Agrarforschung Schweiz*, 15(7), 320–325. [Welche Körnerleguminosen für die Schweiz? - Agrarforschung Schweiz](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005)
- Chen, J., Engbersen, N., Stefan, L., Schmid, B., Sun, H., & Schöb, C. (2021). Diversity increases yield but reduces harvest index in crop mixtures. *Nature Plants*, 7(7), 893–898. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00948-4>
- Chmielewski, F.-M., & Köhn, W. (1999). Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96(1–3), 49–58. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00047-7)
- Christopher, J. T., Manschadi, A. M., Hammer, G. L., & Borrell, A. K. (2008). Developmental and physiological traits associated with high yield and stay-green phenotype in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59(4), 354. <https://doi.org/10.1071/AR07193>
- Clémence, S., Dapčević Hadnađev, T., Gellynck, X., Haas, R., Mastilović, J., Meixner, O., Pich-Ibauer, M., Plzáková, L., Pojić, M., Šarić, B., Schouteten, J., Škrobot, D., Van Parys, E., Zagata, L., & Zorn, A. (2022). Value chains for new food products. CROPDIVA – D5.1 (S. 95). [https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/actualite/newsroom/2023/02-13\\_cropdiva.html](https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/actualite/newsroom/2023/02-13_cropdiva.html)
- Creissen, H. E., Jorgensen, T. H., & Brown, J. K. M. (2016). Increased yield stability of field-grown winter barley (*Hordeum vulgare* L.) varietal mixtures through ecological processes. *Crop Protection*, 85, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.001>
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>
- Debaeke, P., Casadebaig, P., Flenet, F., & Langlade, N. (2017). Sunflower crop and climate change: Vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *OCL*, 24(1), D102. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
- Debaeke, P., Casadebaig, P., & Langlade, N. B. (2021). New challenges for sunflower ideotyping in changing environments and more ecological cropping systems. *OCL*, 28, 29. <https://doi.org/10.1051/ocl/2021016>
- Denmead, O. T., & Shaw, R. H. (1960). The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agronomy Journal*, 52(5), 272–274. <https://doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200050010x>
- Dias, A. S., & Lidon, F. C. (2009). Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(2), 137–147. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00347.x>
- Dierauer, H., & Klais, M. (2023). Sortenliste Futterbau und übrige Ackerkulturen (ohne Getreide und Kartoffeln) für die Ernte 2023. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. <https://www.fibl.org/de/shop/1237-ackerkulturen>

- Dupuis, B., Cadby, J., Goy, G., Tallant, M., Derron, J., Schwaerzel, R., & Steinger, T. (2017). Control of potato virus Y (PVY) in seed potatoes by oil spraying, straw mulching and intercropping. *Plant Pathology*, 66(6), 960–969. <https://doi.org/10.1111/ppa.12698>
- Dwyer, L. M., Stewart, D. W., & Balchin, D. (1988). Rooting characteristics of corn, soybeans and barley as a function of available water and soil physical characteristics. *Canadian Journal of Soil Science*, 68(1), 121–132. <https://doi.org/10.4141/cjss88-011>
- Eisenring, S., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz. *Agroscope Science*, 107, 1–55. <https://doi.org/10.34776/AS107G>
- Ende, L. M., Knöllinger, K., Keil, M., Fiedler, A. J., & Lauerer, M. (2021). Possibly invasive new bioenergy crop *Silphium perfoliatum*: growth and reproduction are promoted in moist soil. *Agriculture*, 11(1), 24. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010024>
- Engbersen, N., Brooker, R. W., Stefan, L., Studer, B., & Schöb, C. (2021). Temporal differentiation of resource capture and biomass accumulation as a driver of yield increase in intercropping. *Frontiers in Plant Science*, 12, 668803. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.668803>
- Fan, J., McConkey, B., Wang, H., & Janzen, H. (2016). Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>
- Fang, Y., Du, Y., Wang, J., Wu, A., Qiao, S., Xu, B., Zhang, S., Siddique, K. H. M., & Chen, Y. (2017). Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of winter wheat. *Frontiers in Plant Science*, 8, 672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00672>
- FAOSTAT. (2023). Sorghum. Undata. <http://data.un.org/Data.aspx?d=FAO&f=itemCode%3A83>
- Fasching C. (Hrsg.). (2014). Futterwert von Sorghum-Hirse und deren Verwendung in der Milchproduktion. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein. [https://raumberg-gumpenstein.at/downloads/Tagungen/Viehwirtschaftstagung/Viehwirtschaftstagung%202014/1v\\_2014\\_fasching.pdf](https://raumberg-gumpenstein.at/downloads/Tagungen/Viehwirtschaftstagung/Viehwirtschaftstagung%202014/1v_2014_fasching.pdf)
- Fedlex. (2021). Verordnung des WBF über Vermehrungsmaterial von Ackerpflanzen-, Futterpflanzen- und Gemüsearten vom 7. Dezember 1998 (Stand am 1. Januar 2021). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1999/121/de>
- Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447–461. <https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. (2022). Züchtung der Weissen Lupine auf Resistenz & Qualität für innovative Schweizer Lebensmittel aus einer nachhaltigen, regionalen Produktion. <https://www.fibl.org/fr/sujets/project-base-donnees/projet-item/project/2056>
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. (2023a). Pflanzenzüchtung. <https://www.fibl.org/de/standorte/schweiz/departemente/nutzpflanzenwissenschaften/pflanzenzuechtung>
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. (2023b). PROMISE - Nachhaltige Proteinversorgung mit Mischkulturen in der Schweiz – Erbse und Linse im Fokus. <https://www.fibl.org/de/themen/projekt Datenbank/projektitem/project/1743>
- Fresh Plaza. (2023, August 30). We're producing 20,000 tons of sweet potatoes this year. <https://www.freshplaza.com/north-america/article/9555097/we-re-producing-20-000-tons-of-sweet-potatoes-this-year/>
- Friedli, C. N., Abiven, S., Fossati, D., & Hund, A. (2019). Modern wheat semi-dwarfs root deep on demand: Response of rooting depth to drought in a set of Swiss era wheats covering 100 years of breeding. *Euphytica*, 215(4), 85. <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2404-7>
- Gan, Y., Hamel, C., O'Donovan, J. T., Cutforth, H., Zentner, R. P., Campbell, C. A., Niu, Y., & Poppy, L. (2015). Diversifying crop rotations with pulses enhances system productivity. *Scientific Reports*, 5(1), 14625. <https://doi.org/10.1038/srep14625>

- Gan, Y., Liu, L., Cutforth, H., Wang, X., & Ford, G. (2011). Vertical distribution profiles and temporal growth patterns of roots in selected oilseeds, pulses and spring wheat. *Crop and Pasture Science*, 62(6), 457. <https://doi.org/10.1071/CP10406>
- Gass, T., Fossati, A., Soldati, A., & Stamp, P. (1994). Le soja face aux conditions climatiques suisses. *Revue suisse d'agriculture*, 26, 171–178.
- Gass, T., Schori, A., Fossati, A., Soldati, A., & Stamp, P. (1996). Cold tolerance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) during the reproductive phase. *European Journal of Agronomy*, 5(1–2), 71–88. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(96\)02011-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02011-4)
- Goche, T., Shargie, N. G., Cummins, I., Brown, A. P., Chivasa, S., & Ngara, R. (2020). Comparative physiological and root proteome analyses of two sorghum varieties responding to water limitation. *Scientific Reports*, 10(1), 11835. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68735-3>
- Gonzalez, J. A., Konishi, Y., Bruno, M., Valoy, M., & Prado, F. E. (2012). Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(6), 1222–1229. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4686>
- Gooding, M. J., Ellis, R. H., Shewry, P. R., & Schofield, J. D. (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 37(3), 295–309. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501>
- Gooding, M. J., & Shewry, P. R. (2022). *Wheat: Environment, Food and Health* (1. Aufl.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119652601>
- Guilioni, L., Wéry, J., & Lecoeur, J. (2003). High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology*, 30(11), 1151. <https://doi.org/10.1071/FP03105>
- Halford, N. G., Curtis, T. Y., Chen, Z., & Huang, J. (2015). Effects of abiotic stress and crop management on cereal grain composition: Implications for food quality and safety. *Journal of Experimental Botany*, 66(5), 1145–1156. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru473>
- Hancock, R. D., Morris, W. L., Ducreux, L. J. M., Morris, J. A., Usman, M., Verrall, S. R., Fuller, J., Simpson, C. G., Zhang, R., Hedley, P. E., & Taylor, M. A. (2014). Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant to moderately elevated temperature: Systems biology of heat stress in potato. *Plant, Cell & Environment*, 37(2), 439–450. <https://doi.org/10.1111/pce.12168>
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., & Jensen, E. S. (2001). Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea–barley intercropping. *Field Crops Research*, 70(2), 101–109. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00126-5)
- Haverkort, A. J., Van De Waart, M., & Bodlaender, K. B. A. (1990). The effect of early drought stress on numbers of tubers and stolons of potato in controlled and field conditions. *Potato Research*, 33(1), 89–96. <https://doi.org/10.1007/BF02358133>
- Heinz, M. (2021). Prospects of cultivating alternative crops in a changing climate in Switzerland [Master's thesis, University of Bern]. <https://occrdata.unibe.ch/students/theses/msc/352.pdf>
- Hendriks, P. W., Kirkegaard, J. A., Lilley, J. M., Gregory, P. J., & Rebetzke, G. J. (2016). A tillering inhibition gene influences root–shoot carbon partitioning and pattern of water use to improve wheat productivity in rainfed environments. *Journal of Experimental Botany*, 67(1), 327–340. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv457>
- Herrera, J. M., Häner, L. L., Holzkämper, A., & Pellet, D. (2018). Evaluation of ridge regression for country-wide prediction of genotype-specific grain yields of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.263>

- Herrera, J. M., Levy Häner, L., Mascher, F., Hiltbrunner, J., Fossati, D., Brabant, C., Charles, R., & Pellet, D. (2020). Lessons from 20 years of studies of wheat genotypes in multiple environments and under contrasting production systems. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1745. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01745>
- Hill, D., Nelson, D., Hammond, J., & Bell, L. (2021). Morphophysiology of potato (*Solanum tuberosum*) in response to drought stress: paving the way forward. *Frontiers in Plant Science*, 11, 597554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597554>
- Hiltbrunner, J., Buchmann, U., Vogelgsang, S., Gutzwiller, A., & Ramseier, H. (2012). Körnersorghum – eine in der Schweiz noch unbekannt, interessante Ackerkultur. *Agrarforschung Schweiz*, 3(11–12), 524–531. [Körnersorghum – eine in der Schweiz noch unbekannt, interessante Ackerkultur - Agrarforschung Schweiz](https://doi.org/10.3182/201211120524)
- Hiltbrunner, J., Calanca, P., Huber, T., Pignon, P., Girard, M., & Morel, I. (2023). Liste der empfohlenen Maissorten für die Ernte 2023. *Agroscope Transfer*, 471, 1–6. [Sortenlisten \(admin.ch\)](https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/admin.ch)
- Hiltbrunner, J., Hebeisen, T., Hunziker, H. R., & Herzog, C. (2009). Eignung von neuen Sommerölleinsorten für den Ökolandbau im Schweizer Mittelland. *Werte – Wege – Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel*, Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 11.–13. Februar 2009, 219–220. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/alternative-kulturpflanzen/oellein.html>
- Hoffmann, C. M., Huijbregts, T., Van Swaaij, N., & Jansen, R. (2009). Impact of different environments in Europe on yield and quality of sugar beet genotypes. *European Journal of Agronomy*, 30(1), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.004>
- Hoffmann, C. M., & Kluge-Severin, S. (2011). Growth analysis of autumn and spring sown sugar beet. *European Journal of Agronomy*, 34(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.09.001>
- Holzkämper, A. (2020). Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agricultural Water Management*, 237, 106202. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106202>
- Holzkämper, A., Calanca, P., & Fuhrer, J. (2013). Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.004>
- Holzkämper, A., Calanca, P., Honti, M., & Fuhrer, J. (2015). Projecting climate change impacts on grain maize based on three different crop model approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.263>
- Holzkämper, A., Cochand, F., Rössler, O., Brunner, P., & Hunkeler, D. (2020). AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. *Agroscope*. <https://doi.org/10.34776/NCCS21AA>
- Hosseini, N. M., Palta, J. A., Berger, J. D., & Siddique, K. H. M. (2009). Sowing soil water content effects on chickpea (*Cicer arietinum* L.): Seedling emergence and early growth interaction with genotype and seed size. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1732–1736. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.010>
- Hsiao, T. C., Steduto, P., & Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25(3), 209–231. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0063-2>
- Hu, M., & Wiatrak, P. (2012). Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: review. *Agronomy Journal*, 104(3), 785–790. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0382>
- Humphrys, C. (2005). Anbau von Rispenhirse in der Schweiz: Unkrautbekämpfung und Perspektiven einer alten Kulturpflanze. *Unkrautbekämpfung – Neue Technologien, reduzierter Herbizideinsatz und Alternativen*. FAL-Tagung vom Freitag, 14. Januar 2005, Reckenholz. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/pflanzenbau/ackerbau/kulturarten/alternative-kulturpflanzen/rispenhirse.html>

- Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., & Nawaz, A. (2018). Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 201, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.028>
- Impa, S. M., Perumal, R., Bean, S. R., John Sunoj, V. S., & Jagadish, S. V. K. (2019). Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. *Journal of Cereal Science*, 86, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.013>
- IP-SUISSE. (2023a). Quinoa. <https://www.ipsuisse.ch/tag/quinoa/>
- IP-SUISSE. (2023b). Recommandation de production cereales et oléagineux semis 2023 récolte 2024. <https://www.ipsuisse.ch/fr/tag/ble/>
- Jacobsen, S.-E. (2017). The scope for adaptation of quinoa in Northern Latitudes of Europe. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6), 603–613. <https://doi.org/10.1111/jac.12228>
- Jacott, C. N., & Boden, S. A. (2020). Feeling the heat: Developmental and molecular responses of wheat and barley to high ambient temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 71(19), 5740–5751. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa326>
- James, A. T., Lawn, R. J., & Cooper, M. (2008). Genotypic variation for drought stress response traits in soybean. II. Inter-relations between epidermal conductance, osmotic potential, relative water content, and plant survival. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59(7), 670. <https://doi.org/10.1071/AR07160>
- Jammer, A., Albacete, A., Schulz, B., Koch, W., Weltmeier, F., Van Der Graaff, E., Pfeifhofer, H. W., & Roitsch, T. G. (2020). Early-stage sugar beet taproot development is characterized by three distinct physiological phases. *Plant Direct*, 4(7), e00221. <https://doi.org/10.1002/pld3.221>
- Jensen, C. R., Mogensen, V. O., Mortensen, G., Fieldsend, J. K., Milford, G. F. J., Andersen, M. N., & Thage, J. H. (1996). Seed glucosinolate, oil and protein contents of field-grown rape (*Brassica napus* L.) affected by soil drying and evaporative demand. *Field Crops Research*, 47(2–3), 93–105. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00026-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00026-3)
- Kant, S., Thoday-Kennedy, E., Joshi, S., Vakani, J., Hughes, J., Maphosa, L., Sadler, A., Menidis, M., Slater, A., & Spangenberg, G. (2017). Automated rainout shelter's design for well-defined water stress field phenotyping of crop plants. *Crop Science*, 57(1), 327–331. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.08.0677>
- Kenter, C., Hoffmann, C. M., & Märlander, B. (2006). Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*, 24(1), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.05.001>
- Kim, Y.-U., & Lee, B.-W. (2019). Differential mechanisms of potato yield loss induced by high day and night temperatures during tuber initiation and bulking: Photosynthesis and tuber growth. *Frontiers in Plant Science*, 10, 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00300>
- King, J., Gay, A., Silvester-Bradley, R., Binham, I., Foulkes, J., Gregory, P., & Robinson, D. (2003). Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: Towards an economic optimum. *Annals of Botany*, 91(3), 383–390. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg033>
- Klaiss, M. (2021). Intercropping of grain pea with cereals (Legumes Translated Practice Note 17, S. 1–4). Institute of Organic Agriculture FiBL. <https://www.legumestranslated.eu/>
- Knox, J. W., Weatherhead, E. K., & Bradley, R. I. (1997). Mapping the total volumetric irrigation water requirements in England and Wales. *Agricultural Water Management*, 33(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01285-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01285-1)
- Kompetenzzentrum Bewässerung. (2023). Kompetenzzentrum Bewässerung KoBe. <http://www.kompetenzzentrum-bewaesserung.at/>
- Kong, X., Li, L., Peng, P., Zhang, K., Hu, Z., Wang, X., & Zhao, G. (2023). Wheat cultivar mixtures increase grain yield under varied climate conditions. *Basic and Applied Ecology*, 69, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2023.03.007>

- Kopp, E. B., Niklaus, P. A., & Wuest, S. E. (2023). Ecological principles to guide the development of crop variety mixtures. *Journal of Plant Ecology*, 16(6), rtad017. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtad017>
- Kottmann, L., Wilde, P., & Schittenhelm, S. (2016). How do timing, duration, and intensity of drought stress affect the agronomic performance of winter rye? *European Journal of Agronomy*, 75, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.010>
- Krishnan, H. B., Kim, W.-S., Oehrle, N. W., Smith, J. R., & Gillman, J. D. (2020). Effect of heat stress on seed protein composition and ultrastructure of protein storage vacuoles in the cotyledonary parenchyma cells of soybean genotypes that are either tolerant or sensitive to elevated temperatures. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), 4775. <https://doi.org/10.3390/ijms21134775>
- Kronenberg, L., Yates, S., Boer, M. P., Kirchgessner, N., Walter, A., & Hund, A. (2021). Temperature response of wheat affects final height and the timing of stem elongation under field conditions. *Journal of Experimental Botany*, 72(2), 700–717. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa471>
- Kunz, K., Hu, Y., Boincean, B., Postolatii, A., & Schmidhalter, U. (2023). Evaluating the impact of a 2.5–3°C increase in temperature on drought-stressed German wheat cultivars under natural stress conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 332, 109378. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109378>
- Kutschera, L., Lichtenegger, E., & Sobotik, M. (2018). *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues* (2. Auflage). DLG-Verlag.
- La Lentille Verte du Puy. (2023). Guide de culture. [https://extranet-haute-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/121\\_Extra-Haute-Loire\\_img/Cultures/Lentilles/guide\\_culture\\_2013\\_2.pdf](https://extranet-haute-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/121_Extra-Haute-Loire_img/Cultures/Lentilles/guide_culture_2013_2.pdf)
- Lahlou, O., & Ledent, J.-F. (2005). Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress. *European Journal of Agronomy*, 22(2), 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.02.004>
- Lama, S., Leiva, F., Vallenback, P., Chawade, A., & Kuktaite, R. (2023). Impacts of heat, drought, and combined heat–drought stress on yield, phenotypic traits, and gluten protein traits: Capturing stability of spring wheat in excessive environments. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1179701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1179701>
- Lama, S., Vallenback, P., Hall, S. A., Kuzmenkova, M., & Kuktaite, R. (2022). Prolonged heat and drought versus cool climate on the Swedish spring wheat breeding lines: Impact on the gluten protein quality and grain microstructure. *Food and Energy Security*, 11(2). <https://doi.org/10.1002/fes3.376>
- Le Temps. (2020, Juli 16). Le blé dur des Suisses vient de la Saskatchewan—Le Temps. <https://www.letemps.ch/economie/ble-dur-suisses-vient-saskatchewan>
- Leipner, J., Fracheboud, Y., & Stamp, P. (1999). Effect of growing season on the photosynthetic apparatus and leaf antioxidative defenses in two maize genotypes of different chilling tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 42(2), 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00026-X)
- Lejeune, P., & Bernier, G. (1996). Effect of environment on the early steps of ear initiation in maize (*Zea mays* L.). *Plant, Cell & Environment*, 19(2), 217–224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00243.x>
- Levy Häner, L., Schaad, N., Michaud, L., & Herrera, J. M. (2019). Quinoa und Amaranth, neue Arten für die Schweizer Landwirtschaft? Besuch vom Labor Spiez BABS, 16. August 2019, Changins. [https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/economie-technique/sciences-du-travail/publications/jcr\\_content/par/externalcontent.bitexternalcontent.exturl.html/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BILmNoL2RILUNIL0FqYXgvUH/VibGlrYXRpb24\\_ZWluemVscHVibGlrYXRpb25JZD00NTI1OCZw/YXJlbnR\\_Vcmw9JTJGZnltQ0gIMkZBamF4JTJGUHVibGlrYXRpb25zbGlzdGUIM-kZJbmRleE1pdGFyYmVpdGVyJTNGYWdyb3Njb3BI/SWQIM0QxNzIzJTl2cGFnZSUsRDM=.html](https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/economie-technique/sciences-du-travail/publications/jcr_content/par/externalcontent.bitexternalcontent.exturl.html/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BILmNoL2RILUNIL0FqYXgvUH/VibGlrYXRpb24_ZWluemVscHVibGlrYXRpb25JZD00NTI1OCZw/YXJlbnR_Vcmw9JTJGZnltQ0gIMkZBamF4JTJGUHVibGlrYXRpb25zbGlzdGUIM-kZJbmRleE1pdGFyYmVpdGVyJTNGYWdyb3Njb3BI/SWQIM0QxNzIzJTl2cGFnZSUsRDM=.html)
- Levy, Y. Y., & Dean, C. (1998). The transition to flowering. *The Plant Cell*, 10(12), 1973–1989. <https://doi.org/10.1105/tpc.10.12.1973>

- Li, X., Ingvordsen, C. H., Weiss, M., Rebetzke, G. J., Condon, A. G., James, R. A., & Richards, R. A. (2019). Deeper roots associated with cooler canopies, higher normalized difference vegetation index, and greater yield in three wheat populations grown on stored soil water. *Journal of Experimental Botany*, 70(18), 4963–4974. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz232>
- Limagrain UK Ltd. (2022, September 12). Maize variety choice will become more important. <https://lgseeds.co.uk/maize-variety-choice-will-become-more-important-2/>
- Linder, Z. (2021). Climate change impacts on irrigation water resource available from rivers in Switzerland [Master's thesis, University of Bern]. <https://occrdata.unibe.ch/students/theses/msc/461.pdf>
- Liu, M., Zhou, Y., Sun, J., Mao, F., Yao, Q., Li, B., Wang, Y., Gao, Y., Dong, X., Liao, S., Wang, P., & Huang, S. (2023). From the floret to the canopy: High temperature tolerance during flowering. *Plant Communications*, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100629>
- Luginbühl, C., Herzog, C., Stettler, P., & Hiltbrunner, J. (2015). Ansätze zur Optimierung des Ölleinbaus in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 6(7–8), 304–311.
- Maury, P., Andrianasolo, F. N., Alric, F., Berger, M., Beugnet, G., Chambert, C., Champolivier, L., Doumenc, A., Estragnat, A., Gras, A., Jeanson, P., Jouffret, P., Labalette, F., Thomas, R., Justes, E., & Debaeke, P. (2015). Le semis très précoce: Une stratégie agronomique pour améliorer les performances du soja en France ? *OCL*, 22(5), D503. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015028>
- Mayer, L. I., Savin, R., & Maddonni, G. A. (2016). Heat stress during grain filling modifies kernel protein composition in field-grown maize. *Crop Science*, 56(4), 1890–1903. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0537>
- McVay, K. A., Jha, P., & Crutcher, F. (2017). Chickpea production. Montana State University Extension. MontGuide. <https://aes.colostate.edu/swcrc/wp-content/uploads/sites/92/2019/03/MSU-Extension-Chickpea-Production.pdf>
- Miedema, P. (1982). The effects of low temperature on *Zea mays*. In *Advances in Agronomy* (Bd. 35, S. 93–128). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60322-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60322-3)
- Morgan, J., & Condon, A. (1986). Water use, grain yield, and osmoregulation in wheat. *Functional Plant Biology*, 13(4), 523. <https://doi.org/10.1071/PP9860523>
- Mundt, C. C. (2002). Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 40(1), 381–410. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.011402.113723>
- Nasir, M. W., & Toth, Z. (2022). Effect of drought stress on potato production: A review. *Agronomy*, 12(3), 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>
- National Centre for Climate Services NCCS (Hrsg.). (2018). CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/ch2018-webatlas.html>
- NeSmith, D. S., & Ritchie, J. T. (1992). Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*, 28(3), 251–256. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90044-A](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90044-A)
- Oury, V., Tardieu, F., & Turc, O. (2016). Ovary apical abortion under water deficit is caused by changes in sequential development of ovaries and in silk growth rate in maize. *Plant Physiology*, 171(2), 986–996. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00268>
- Parent, B., & Tardieu, F. (2012). Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytologist*, 194(3), 760–774. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04086.x>
- Passioura, J. B. (1983). Roots and drought resistance. In *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology* (Bd. 12, S. 265–280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42214-9.50025-9>

- Pellet, D., Gindrat, D., Frei, P., & Hebeisen, T. (2002). L'hivernage du colza d'automne. *Revue Suisse Agriculture*, 34, 205–210.
- Pellet, D., & Vullioud, P. (2004). Lin d'hiver ou de printemps: Une culture à découvrir. *Revue Suisse Agriculture*, 36(3), 109–116.
- Peter, M. (2023). Züchterfolge für die Zukunft des Zuckers. *Revue UFA*, 7–8, 10–13.
- Poggi, G. M., Aloisi, I., Corneti, S., Esposito, E., Naldi, M., Fiori, J., Piana, S., & Ventura, F. (2022). Climate change effects on bread wheat phenology and grain quality: A case study in the north of Italy. *Frontiers in Plant Science*, 13, 936991. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936991>
- Porter, J. R., & Gawith, M. (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *European Journal of Agronomy*, 10(1), 23–36. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1)
- Porter, J. R., & Semenov, M. A. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2021–2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
- Proconseil. (2023). Essai variétal blé dur 2022. [https://www.prometerre.ch/s3/site/1671014520\\_22rap00pessaibldur2022.pdf](https://www.prometerre.ch/s3/site/1671014520_22rap00pessaibldur2022.pdf)
- Proctor, J., Rigden, A., Chan, D., & Huybers, P. (2022). More accurate specification of water supply shows its importance for global crop production. *Nature Food*, 3(9), 753–763. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00592-x>
- Prométerre. (2023). RISC. Réflexion – Innovation – Soutien – Climat. Adaptation de l'exploitation agricole aux risques climatiques (2022-2029). <https://www.prometerre.ch/prestations/projets-et-acquisitions-de-references/risc>
- Renault, D., & Wallender, W. W. (2000). Nutritional water productivity and diets. *Agricultural Water Management*, 45(3), 275–296. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00107-9)
- Revue UFA. (2023). 3 questions à Tiziana Vonlanthen. <https://www.ufarevue.ch/fre/production-vegetale/3-questions-a-tiziana-vonlanthen>
- Reynolds, M. P., Pellegrineschi, A., & Skovmand, B. (2005). Sink-limitation to yield and biomass: A summary of some investigations in spring wheat. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 39–49. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.03100.x>
- Riedesel, L., Möller, M., Horney, P., Golla, B., Piepho, H.-P., Kautz, T., & Feike, T. (2023). Timing and intensity of heat and drought stress determine wheat yield losses in Germany. *PLOS ONE*, 18(7), e0288202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288202>
- Rogger, J., Hund, A., Fossati, D., & Holzkämper, A. (2021). Can Swiss wheat varieties escape future heat stress? *European Journal of Agronomy*, 131, 126394. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126394>
- rts.ch. (2023, August 8). Résistante à la sécheresse, la silphie pourrait remplacer le maïs trop gourmand en eau. <https://www.rts.ch/info/suisse/14225251-resistante-a-la-secheresse-la-silphie-pourrait-remplacer-le-mais-trop-gourmand-en-eau.html>
- Samson, M. F., & Desclaux, D. (2016). Amélioration de la valeur technologique et commerciale du blé dur: Vers une réduction des taux de moucheture et de mitadin. 1–4. <https://www1.montpellier.inrae.fr/PSDR/doc/lr1-20/LR13-result.pdf>
- Schittenhelm, S., Kraft, M., & Wittich, K.-P. (2014). Performance of winter cereals grown on field-stored soil moisture only. *European Journal of Agronomy*, 52, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.010>
- Schittenhelm, S., & Schroetter, S. (2014). Comparison of drought tolerance of maize, sweet sorghum and sorghum-sudangrass hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(1), 46–53. <https://doi.org/10.1111/jac.12039>
- Schittenhelm, S., Sourell, H., & Löpmeier, F.-J. (2006). Drought resistance of potato cultivars with contrasting canopy architecture. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.05.004>

- Schmid, T., Loschi, M., Hiltbrunner, J., & Müller, N. (2023). Assessment of the suitability of millet for the production of pasta. *Applied Food Research*, 3(1), 100247. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100247>
- Schöb, C., Engbersen, N., López-Angulo, J., Schmutz, A., & Stefan, L. (2023). Crop diversity experiment: Towards a mechanistic understanding of the benefits of species diversity in annual crop systems. *Journal of Plant Ecology*, 16(6), rtad016. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtad016>
- Schori, A., Charles, R., & Peter, D. (2003). Sojabohne: Züchtung, Agronomie und Produktion in der Schweiz. *Agrarforschung*, 10(4), 1–8. [Sojabohne: Züchtung, Agronomie und Produktion in der Schweiz. \(agroscope.ch\)](https://www.agroscope.ch)
- Schwärzel, R., Torche, J.-M., de Werra, P., & Dupuis, B. (2022). Schweizer Sortenliste für Kartoffeln 2023. *Agroscope Transfer*, 453, 1–8. [Schweizer Sortenliste für Kartoffeln 2023. \(agroscope.ch\)](https://www.agroscope.ch)
- Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau SFZ. (2022). Tätigkeitsbericht 2022 (S. 20). [https://www.zuckerruebe.ch/fileadmin/pdf/2023/Taetigkeitsbericht\\_2022.pdf](https://www.zuckerruebe.ch/fileadmin/pdf/2023/Taetigkeitsbericht_2022.pdf)
- semae. Ressources pédagogiques de la filière semences. (2023). La culture du maïs. <https://www.semae-pedagogie.org/sujet/mais-culture-semis-suivi-recolte/>
- Semenov, M. A., & Shewry, P. R. (2011). Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Scientific Reports*, 1(1), 66. <https://doi.org/10.1038/srep00066>
- SFZ CBS. (2023). Information der Schweizerischen Fachstelle für Zuckerrübenbau. *Der Rübenpflanzer*, 1, 1–4.
- Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2023). Wheat yield is not causally related to the duration of the growing season. *European Journal of Agronomy*, 148, 126885. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126885>
- Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Kocira, A. (2023). Responses of soybean to selected abiotic stresses— photoperiod, temperature and water. *Agriculture*, 13(1), 146. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010146>
- Stefan, L., Hartmann, M., Engbersen, N., Six, J., & Schöb, C. (2021). Positive effects of crop diversity on productivity driven by changes in soil microbial composition. *Frontiers in Microbiology*, 12, 660749. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.660749>
- Strachan, S. D. (2016). Corn grain yield in relation to stress during ear development. *DuPont Pioneer Agronomy Sciences, Crop Insights*, 26(9), 1–5. [Corn Grain Yield in Relation to Stress During Ear Development \(pioneer.com\)](https://www.pioneer.com)
- Strebel, S., Levy Häner, L., Watroba, M., Girard, M., Courvoisier, N., Jaunin, V., Grandgirard, R., Graf, B., Streit, M., & Weisflog, T. (2023). Liste der empfohlenen Getreidesorten für die Ernte 2024. *Agroscope Transfer*, 494, 1–8. [Liste der empfohlenen Getreidesorten für die Ernte 2024. \(agroscope.ch\)](https://www.agroscope.ch)
- Summerfield, R. J., Roberts, E. H., Erskine, W., & Ellis, R. H. (1985). Effects of temperature and photoperiod on flowering in lentils (*Lens culinaris* Medic.). *Annals of Botany*, 56(5), 659–671. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087055>
- swiss granum. (2022). Ernteprognose Getreide, Ölsaaten und Eiweisspflanzen Ende Mai 2022. <https://www.swissgranum.ch/09.06.2022>
- Swissmill. (2023). Hartweizen. Swissmill – die Schweizer Getreidemühle. <https://www.swissmill.ch/hartweizen>
- swissem. (2023). Weizensaatgut-Verkauf per 30.04.2023 nach Sorten und Klassen. <https://www.swissem.ch/fr/statistiken/>
- Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: Just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany*, 63(1), 25–31. <https://doi.org/10.1093/jxb/err269>
- Tardieu, F., Simonneau, T., & Muller, B. (2018). The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach. *Annual Review of Plant Biology*, 69(1), 733–759. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040218>
- Terre-net. (2019). Le lupin, « une culture à fort potentiel ». <https://www.terre-net.fr/terres-inovia/article/145028/le-lupin-une-culture-de-diversification-a-fort-potentiel>

- Terres Inovia. (2020a). Irriguer pour régulariser le rendement et la teneur en protéines à un niveau élevé. <https://www.terresinovia.fr/-/irriguer-le-soja-pour-regulariser-le-rendement-et-la-teneur-en-proteines-a-un-niveau-eleve>
- Terres Inovia. (2020b). Tout savoir sur l'implantation de la lentille. [Tout savoir sur l'implantation de la lentille - Terres Inovia](#)
- Tesfamariam, E. H., Annandale, J. G., & Steyn, J. M. (2010). Water stress effects on winter canola growth and yield. *Agronomy Journal*, 102(2), 658–666. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0043>
- Thaler, S., Pohankova, E., Eitzinger, J., Hlavinka, P., Orság, M., Lukas, V., Brtnický, M., Růžek, P., Šimečková, J., Ghisi, T., Bohuslav, J., Klem, K., & Trnka, M. (2023). Determining factors affecting the soil water content and yield of selected crops in a field experiment with a rainout shelter and a control plot in the Czech Republic. *Agriculture*, 13(7), 1315. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071315>
- Triple Performance. (2023). Silphie. <https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Silphie>
- Turc, O., & Tardieu, F. (2018). Drought affects abortion of reproductive organs by exacerbating developmentally driven processes via expansive growth and hydraulics. *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3245–3254. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery078>
- Van Loon, C. D. (1981). The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *American Potato Journal*, 58(1), 51–69. <https://doi.org/10.1007/BF02855380>
- Varga, B., Vida, G., Varga-László, E., Bencze, S., & Veisz, O. (2015). Effect of simulating drought in various phenophases on the water use efficiency of winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/jac.12087>
- Ventura, F., Poggi, G. M., Vignudelli, M., Bosi, S., Negri, L., Fakaros, A., & Dinelli, G. (2022). An assessment of proso millet as an alternative summer cereal crop in the Mediterranean basin. *Agronomy*, 12(3), 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030609>
- Verein Kulinarisches Erbe der Schweiz. (2019). Ackerbohne. <https://www.patrimoineculinaire.ch/Produkt/Ackerbohne/472>
- Vonlanthen, T., Fuchs, Z., Tallant, M., & Baux, A. (2022). Liste der empfohlenen Sojasorten für die Ernte 2023. *Agroscope Transfer*, 467, 1. [Liste der empfohlenen Sojasorten für die Ernte 2023. \(agroscope.ch\)](#)
- Wheeler, T. R., Batts, G. R., Ellis, R. H., Hadley, P., & Morison, J. I. L. (1996). Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops in response to CO<sub>2</sub> and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 127(1), 37–48. <https://doi.org/10.1017/S0021859600077352>
- Wheeler, T. R., Hong, T. D., Ellis, R. H., Batts, G. R., Morison, J. I. L., & Hadley, P. (1996). The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO<sub>2</sub>. *Journal of Experimental Botany*, 47(5), 623–630. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.5.623>
- Wiegand, C. L., & Cuellar, J. A. (1981). Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Science*, 21(1), 95. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X001100010027x>
- Wilhelm, E. P., Mullen, R. E., Keeling, P. L., & Singletary, G. W. (1999). Heat stress during grain filling in maize: effects on kernel growth and metabolism. *Crop Science*, 39(6), 1733–1741. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961733x>
- Wu, W., Ma, B., & Whalen, J. K. (2018). Enhancing rapeseed tolerance to heat and drought stresses in a changing climate: Perspectives for stress adaptation from root system architecture. In *Advances in Agronomy* (Bd. 151, S. 87–157). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.05.002>
- Wuest, S. E., Peter, R., & Niklaus, P. A. (2021). Ecological and evolutionary approaches to improving crop variety mixtures. *Nature Ecology & Evolution*, 5(8), 1068–1077. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01497-x>
- Xiao, D., Zhang, Y., Bai, H., & Tang, J. (2021). Trends and climate response in the phenology of crops in Northeast China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 811621. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.811621>

- Xu, Y. (2016). Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants. *Theoretical and Applied Genetics*, 129(4), 653–673. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2691-5>
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q., & Liu, L. (2001). Water deficit–induced senescence and its relationship to the remobilization of pre-stored carbon in wheat during grain filling. *Agronomy Journal*, 93(1), 196–206. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.931196x>
- Yuan, H. Y., Saha, S., Vandenberg, A., & Bett, K. E. (2017). Flowering and growth responses of cultivated lentil and wild *Lens* germplasm toward the differences in red to far-red ratio and photosynthetically active radiation. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00386>
- Zheng, X., Yu, Z., Shi, Y., & Liang, P. (2022). Differences in water consumption of wheat varieties are affected by root morphology characteristics and post-anthesis root senescence. *Frontiers in Plant Science*, 12, 814658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.814658>

## 8 Pflanzenzüchtung auf Trockenheitsresistenz

Boulos Chalhoub

Pflanzenzüchtung, Ackerpflanzenzüchtung und Genressourcen, Agroscope, Nyon

### 8.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die genetischen Grundlagen und die aktuellen Züchtungsstrategien für Trockenheitsresistenz beschrieben. Trockenheitsresistenz ist ein quantitatives Merkmal mit einer komplexen genetischen Kontrolle. Die genetische Analyse und die Identifizierung von Genen mit signifikanter Auswirkung auf die Trockenheitsresistenz in verschiedenen Kulturpflanzen unter Verwendung verschiedener genetischer und genomischer Ansätze sowie die Integration der Phänomik haben sich als vielversprechend erwiesen, um Kulturpflanzen für diesen wichtigen abiotischen Stress zu verbessern. Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten Züchtungstechnologien wie marker assisted selection, genomic selection, genetic engineering und gene editing zeigen mehr und mehr, dass zuverlässige Züchtungsstrategien für die Trockenresistenz von Nutzpflanzen angesichts des Klimawandels möglich sind.

### 8.2 Einleitung

Pflanzen haben eine Vielzahl von Mechanismen und Strategien entwickelt, um mit Trockenstress umzugehen (ausführliche Beschreibungen finden sich im 7.5). Hier liegt der Schwerpunkt auf der Beschreibung der genetischen Grundlagen und der aktuellen Züchtungsstrategien für Trockenheitsresistenz, einem quantitativen Merkmal mit komplexer genetischer Kontrolle. In den letzten Jahren wurden wichtige Fortschritte erzielt und zahlreiche Gene, die an der Trockenresistenz beteiligt sind, in verschiedenen Kulturpflanzen identifiziert.

Bei der Entwicklung von trockenheitsresistenten Pflanzensorten konzentriert sich die Selektion in der Regel auf die Auswahl von Sorten, die unter trockenen Bedingungen hohe Erträge liefern. Bei Weizen und Mais beispielsweise basiert die Selektion auf Trockenheitstoleranz auf der Bewertung des Phänotyps und der physiologischen Reaktion der Pflanzen auf Trockenstress (Sallam et al., 2019). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Selektion auf der Grundlage von Pflanzenreaktionen auf Trockenstress durch eine geringe Heritabilität, genetische Interaktionen, Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Genotyp sowie polygene Effekte beeinträchtigt wird (Mohammadi, 2018).

In diesem Zusammenhang erfordern künftige spezifische Züchtungsprogramme mit Schwerpunkt auf Trockenheitsresistenz die Kombination von klassischer Züchtung mit Genomik, Statistik, Versuchsplanung, Phänomik und Strategien zum Management der genetischen Vielfalt. Die Kombination dieser Ansätze kann neue Möglichkeiten für die genetische Entschlüsselung der Trockenheitsresistenz und ihre effiziente Nutzung in der Pflanzenzüchtung bieten. Kandidatengene für Trockenheitsresistenz werden heute mit Hilfe genomischer Technologien wie quantitative trait loci (QTLs), genome-wide association study (GWAS)-Kartierung sowie genombasierter Instrumente wie Microarray- und Transkriptomanalysen identifiziert (Daszkowska-Golec et al., 2018; Ghorbani et al., 2019; Hassani-Pak et al., 2021). Die effiziente Nutzung solcher Kandidatengene in der Züchtung auf Trockenresistenz wird heute durch eine Kombination von Technologien und Methoden erreicht, wobei die vielversprechendsten in der genomic selection (GS), der marker-assisted selection (MAS), der genetic engineering (GVO) und der gene editing (GE) bestehen.

### 8.3 Entdeckung von Genen für Trockenheitsresistenz

Eine wichtige Möglichkeit zur Entdeckung günstiger Gene und Allele für Trockenresistenz **in der vorhandenen natürlichen Diversität** besteht in der Bewertung umfangreicher Keimplasmasammlungen auf Unterschiede in der Reaktion auf Trockenstress (Lopes et al., 2015). Es hat sich gezeigt, dass **wilde Verwandte und Landsorten** aufgrund ihrer lokalen Anpassungen eine wertvolle Quelle für dürreresistente und widerstandsfähige Sorten darstellen (Castañeda-Álvarez et al., 2016; Villa et al., 2005; Vincent et al., 2019). Bei Mais und Weizen beispielsweise wurden Landrassen aus trockenen Lebensräumen erfolgreich für die Züchtung in wasserarmen

Umgebungen eingesetzt (Xu et al., 2009). Günstige Gene und Allele für die Trockenheitsresistenz werden dann durch verschiedene genetische und genomische Ansätze wie die QTLs-Kartierung und GWAS identifiziert.

### **QTL mapping**

Ein "klassischer" genetischer Ansatz ist die Kartierung von QTLs unter Verwendung von Populationen, die aus Kreuzungen zwischen trockenheitsempfindlichen und trockenheitsresistenten Eltern stammen. Solche Segregantenpopulationen werden in der Regel feinphänotypisch auf Trockenheitstoleranz untersucht und quantitative Loci für Trockenheitstoleranz werden mit Hilfe molekularer Marker kartiert.

### **GWAS**

Ein weiterer Ansatz zur Identifizierung von Regionen, die die phänotypische Variation der Trockenheitstoleranz bei Nutzpflanzen erklären, ist GWAS, bei dem es möglich ist, einen spezifischen single-nucleotide polymorphism (SNP) mit einer phänotypischen Variation für Trockenheit in Verbindung zu bringen (Alqudah et al., 2020). Bei der GWAS werden phänotypische und genomische Informationen kombiniert, um statistische Assoziationen zu ermitteln, die die phänotypischen Variationen des Zielmerkmals erklären sollen. Dieser Ansatz nutzt alle verfügbaren allelischen Variationen und die Möglichkeit, Marker-Eigenschafts-Assoziationen zu identifizieren. Populationen für GWAS sind nicht zwingend segregant, sondern stammen wie bei der QTL mapping aus Kreuzungen. Sie können aus Landrassen in Genbanken, Kernsammlungen und Zuchtpopulationen bestehen, was die Analyse aller historischen Rekombinationsereignisse in der verwendeten Population ermöglicht.

Für Trockenstress wurde die GWAS verwendet, um SNPs zu identifizieren, die mit Hochtemperaturtoleranz und deren Auswirkungen auf den Ertrag bei Nutzpflanzen wie Weizen (Qaseem et al., 2018), Baumwolle (Hou et al., 2018), Reis (Kadam et al., 2018) und Mais (Yuan et al., 2019) zusammenhängen.

### **Andere genomische Ansätze zur Identifizierung von Genen, die an der Reaktion auf Trockenheit beteiligt sind**

Genomanalysen wie die vergleichende Transkriptomanalyse und die Genomsequenzierung mit hohem Durchsatz in Verbindung mit präziser Physiologie und Phänomik haben die Identifizierung von Genen, Transkriptionsfaktoren, MicroRNAs, Hormonen und Proteinen ermöglicht, die an der Reaktion auf Trockenstress beteiligt sind (Khan et al., 2016). Dazu gehören beispielsweise Loci, die mit dem Abscisinsäure (ABA)-Signalweg (Fan et al., 2015), der Blattseneszenz (Wehner et al., 2015) und anderen trockenheitsbedingten Merkmalen (Khan et al., 2016) zusammenhängen.

## **8.4 Züchtung auf Trockenheitstoleranz mit genombasierten Werkzeugen wie marker-assisted selection und genomic selection**

Günstige Allele und Gene, die durch QTL mapping oder GWAS-Ansätze (wie oben beschrieben) für die Trockenheitstoleranz identifiziert werden konnten, können nun mit genombasierten Werkzeugen wie der genomic selection (GS) und MAS effizient in Zuchtprogrammen eingesetzt werden (Technow et al., 2015).

### **Marker-assisted selection**

QTLs und Gene, die mit Trockenheitstoleranz assoziiert sind, können mit MAS in Zuchtpopulationen und ausgewählte Genotypen eingebracht werden. Bei Reis wurden Allele von QTLs, die mit Trockenstress zusammenhängen, in verschiedene genetische Hintergründe übertragen und ihre Auswirkungen charakterisiert, was den Erfolg von MAS bestätigt (Shamsudin et al., 2016). Bei Weizen und Gerste wurden QTLs, die mit Trockenheit zusammenhängen, identifiziert und von wilden Verwandten übertragen (Merchuk-Ovnat et al., 2016).

### **Genomic selection**

GS kann als eine Form von MAS betrachtet werden, weist aber neue Merkmale zur Identifizierung vielversprechender Materialien auf (Mohammadi, 2018).

In einer ersten Phase werden hier Genotypisierung mit hohem Durchsatz und präzise Phänotypisierung kombiniert, um zunächst Genom-Vorhersagemodelle für Trockenheitstoleranz zu entwickeln (Mohammadi, 2018). Nach ihrer Entwicklung können die GS-Vorhersagemodelle in einer zweiten Phase für die Auswahl von Genotypen ohne

phänotypische Bewertung verwendet werden. Die Implementierung von GS hat gezeigt, dass die Vorhersagegenauigkeit von den Zuchtpopulationstypen, der Grösse der Trainingspopulation, der Komplexität des Merkmals und der Anzahl der verwendeten Marker beeinflusst wird. GS-Strategien in der Züchtung von Mais und Gerste haben die Selektionszeit im Vergleich zur phänotypischen Selektion um fast die Hälfte pro Zyklus reduziert (X. Wang et al., 2018).

Es gibt eine Vielzahl von Technologien für die Genotypisierung mit hohem Durchsatz, die bekanntesten sind next-generation sequencing, genotyping-by-sequencing, microarrays und andere (Gurgul et al., 2019; Ray & Satya, 2014).

## 8.5 Gentechnisch veränderte, trockenheitsresistente Pflanzensorten

Es werden Strategien vorgeschlagen, um gentechnisch veränderte Pflanzen, d. h. gentechnisch veränderte Organismen (GVO), zu entwickeln, die gegen Trockenheit resistent sind, indem verschiedene Gene manipuliert werden, die nachweislich an der Reaktion auf Trockenheit in verschiedenen Nutz- und Kulturpflanzen wie Mais, Weizen, Reis, Roggen, Gerste, Sojabohnen und Tomaten beteiligt sind (Joshi et al., 2016; Mohammadi, 2018; Villa et al., 2005; L. Zhang et al., 2012). Die Gentechnik hat die Entwicklung trockenheitstoleranter Sorten bei Nutzpflanzen wie Mais und Weizen ermöglicht (Blum, 2014; Sallam et al., 2019). Bei Reis wurden ein asymmetrisches Wurzelwachstum und eine Vergrößerung des Wurzelwachstumswinkels nach der Einführung des Gens DEEPER ROOTING 1 (DRO1) beobachtet, das ein QTL ist, der den Wurzelwachstumswinkel steuert; die daraus resultierende Linie vermied das Auftreten von Trockenheit, indem sie die tiefe Verwurzelung steigerte und eine hohe Ertragsleistung unter Trockenheitsbedingungen beibehielt (Uga et al., 2013).

## 8.6 Gene editing für Trockenheitsresistenz

Derzeit ist es möglich, bei jeder Pflanzenart neue Allele in bekannten Genen künstlich zu erzeugen, und zwar mit Hilfe von GE-Methoden der zweiten Generation, wie dem (CRISPR)/CRISPR-assoziierten Nukleaseprotein (CRISPR/Cas)-System (für einen Überblick siehe Čermák et al. (2015); Ito et al. (2015); J.-F. Li et al. (2013)). Dieses System zur GE ist bekanntermassen relativ einfach zu implementieren, bietet Flexibilität bei der Gestaltung, ist kostengünstig und hocheffizient (Ma et al., 2015).

Gene editing wird inzwischen bei verschiedenen Pflanzenarten zur Verbesserung der Trockenheitsresistenz eingesetzt (Du et al., 2016; Feng et al., 2014; Sun et al., 2016). Das CRISPR/Cas9-System für Trockenstress wurde insbesondere für die Editierung der Gene ARGOS8 in Mais verwendet (Shi et al., 2017); SIMAPK3 und SINPR1 in der Tomate (R. Li et al., 2019; L. Wang et al., 2017); MIR169a und OST2 in Arabidopsis (Osakabe et al., 2016); und OsDERF1, OsPMS3, OsEPSPS, OsMSH1 und OsMYB5 in Reis (H. Zhang et al., 2014), neben anderen.

## 8.7 Fazit

In den meisten Züchtungsprogrammen für Nutzpflanzen erfolgte die Entwicklung trockenheitsresistenter Sorten bestenfalls indirekt, d. h. durch das Testen von Linien (in verschiedenen Generationen der Sortenzüchtung) auf unbeeinflusste Ertragswerte unter trockenen Bedingungen. Die genetische Analyse und die Identifizierung von Genen mit signifikanter Auswirkung auf die Trockenheitsresistenz bei verschiedenen Nutzpflanzen unter Verwendung verschiedener genetischer und genomischer Ansätze und die Integration mit der Phänomik haben sich als vielversprechend erwiesen, um Nutzpflanzen für diesen wichtigen abiotischen Stress zu verbessern. Züchtungstechnologien wie marker-assisted selection, genomic selection, genetic engineering und gene editing zeigen mehr und mehr die Machbarkeit zuverlässiger Züchtungsstrategien für die Trockenresistenz von Nutzpflanzen im Hinblick auf den Klimawandel. Wir schlagen hier den Einsatz solcher Instrumente und Technologien durch ein integriertes Programm zur Züchtung verschiedener Kulturpflanzen auf Trockenheitsresistenz unter den Schweizer Klimabedingungen vor.

## 8.8 Literaturverzeichnis

- Alqudah, A. M., Sallam, A., Stephen Baenziger, P., & Börner, A. (2020). GWAS: Fast-forwarding gene identification and characterization in temperate cereals: lessons from Barley – A review. *Journal of Advanced Research*, 22, 119–135. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.10.013>
- Blum, A. (2014). Genomics for drought resistance – getting down to earth. *Functional Plant Biology*, 41(11), 1191. <https://doi.org/10.1071/FP14018>
- Castañeda-Álvarez, N. P., Khoury, C. K., Achicanoy, H. A., Bernau, V., Dempewolf, H., Eastwood, R. J., Guarino, L., Harker, R. H., Jarvis, A., Maxted, N., Müller, J. V., Ramirez-Villegas, J., Sosa, C. C., Struik, P. C., Vincent, H., & Toll, J. (2016). Global conservation priorities for crop wild relatives. *Nature Plants*, 2(4), 16022. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.22>
- Čermák, T., Baltés, N. J., Čegan, R., Zhang, Y., & Voytas, D. F. (2015). High-frequency, precise modification of the tomato genome. *Genome Biology*, 16(1), 232. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0796-9>
- Daszkowska-Golec, A., Skubacz, A., Sitko, K., Słota, M., Kurowska, M., & Szarejko, I. (2018). Mutation in barley ERA1 (Enhanced Response to ABA1) gene confers better photosynthesis efficiency in response to drought as revealed by transcriptomic and physiological analysis. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.01.003>
- Du, H., Zeng, X., Zhao, M., Cui, X., Wang, Q., Yang, H., Cheng, H., & Yu, D. (2016). Efficient targeted mutagenesis in soybean by TALENs and CRISPR/Cas9. *Journal of Biotechnology*, 217, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.11.005>
- Fan, Y., Shabala, S., Ma, Y., Xu, R., & Zhou, M. (2015). Using QTL mapping to investigate the relationships between abiotic stress tolerance (drought and salinity) and agronomic and physiological traits. *BMC Genomics*, 16(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1243-8>
- Feng, Z., Mao, Y., Xu, N., Zhang, B., Wei, P., Yang, D.-L., Wang, Z., Zhang, Z., Zheng, R., Yang, L., Zeng, L., Liu, X., & Zhu, J.-K. (2014). Multigeneration analysis reveals the inheritance, specificity, and patterns of CRISPR/Cas-induced gene modifications in *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(12), 4632–4637. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400822111>
- Ghorbani, R., Alemzadeh, A., & Razi, H. (2019). Microarray analysis of transcriptional responses to salt and drought stress in *Arabidopsis thaliana*. *Heliyon*, 5(11), e02614. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02614>
- Gurgul, A., Miksza-Cybulska, A., Szmatoła, T., Jasielczuk, I., Piestrzyńska-Kajtoch, A., Fornal, A., Semik-Gurgul, E., & Bugno-Poniewierska, M. (2019). Genotyping-by-sequencing performance in selected livestock species. *Genomics*, 111(2), 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2018.02.002>
- Hassani-Pak, K., Singh, A., Brandizi, M., Hearnshaw, J., Parsons, J. D., Amberkar, S., Phillips, A. L., Doonan, J. H., & Rawlings, C. (2021). KnetMiner: A comprehensive approach for supporting evidence-based gene discovery and complex trait analysis across species. *Plant Biotechnology Journal*, 19(8), 1670–1678. <https://doi.org/10.1111/pbi.13583>
- Hou, S., Zhu, G., Li, Y., Li, W., Fu, J., Niu, E., Li, L., Zhang, D., & Guo, W. (2018). Genome-wide association studies reveal genetic variation and candidate genes of drought stress related traits in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 9, 1276. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01276>
- Ito, Y., Nishizawa-Yokoi, A., Endo, M., Mikami, M., & Toki, S. (2015). CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of the RIN locus that regulates tomato fruit ripening. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 467(1), 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.09.117>
- Joshi, R., Wani, S. H., Singh, B., Bohra, A., Dar, Z. A., Lone, A. A., Pareek, A., & Singla-Pareek, S. L. (2016). Transcription factors and plants response to drought stress: Current understanding and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01029>

- Kadam, N. N., Struik, P. C., Rebolledo, M. C., Yin, X., & Jagadish, S. V. K. (2018). Genome-wide association reveals novel genomic loci controlling rice grain yield and its component traits under water-deficit stress during the reproductive stage. *Journal of Experimental Botany*, 69(16), 4017–4032. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery186>
- Khan, A., Sovero, V., & Gemenet, D. (2016). Genome-assisted breeding for drought resistance. *Current Genomics*, 17(4), 330–342. <https://doi.org/10.2174/1389202917999160211101417>
- Li, J.-F., Norville, J. E., Aach, J., McCormack, M., Zhang, D., Bush, J., Church, G. M., & Sheen, J. (2013). Multiplex and homologous recombination-mediated genome editing in *Arabidopsis* and *Nicotiana benthamiana* using guide RNA and Cas9. *Nature Biotechnology*, 31(8), 688–691. <https://doi.org/10.1038/nbt.2654>
- Li, R., Liu, C., Zhao, R., Wang, L., Chen, L., Yu, W., Zhang, S., Sheng, J., & Shen, L. (2019). CRISPR/Cas9-Mediated SINPR1 mutagenesis reduces tomato plant drought tolerance. *BMC Plant Biology*, 19(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1627-4>
- Lopes, M. S., El-Basyoni, I., Baenziger, P. S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., Aktas, H., Ozer, E., Ozdemir, F., Manickavelu, A., Ban, T., & Vikram, P. (2015). Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *Journal of Experimental Botany*, 66(12), 3477–3486. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv122>
- Ma, X., Zhang, Q., Zhu, Q., Liu, W., Chen, Y., Qiu, R., Wang, B., Yang, Z., Li, H., Lin, Y., Xie, Y., Shen, R., Chen, S., Wang, Z., Chen, Y., Guo, J., Chen, L., Zhao, X., Dong, Z., & Liu, Y.-G. (2015). A robust CRISPR/Cas9 system for convenient, high-efficiency multiplex genome editing in monocot and dicot plants. *Molecular Plant*, 8(8), 1274–1284. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.04.007>
- Merchuk-Ovnat, L., Barak, V., Fahima, T., Ordon, F., Lidzbarsky, G. A., Krugman, T., & Saranga, Y. (2016). Ancestral QTL alleles from wild emmer wheat improve drought resistance and productivity in modern wheat cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00452>
- Mohammadi, R. (2018). Breeding for increased drought tolerance in wheat: A review. *Crop and Pasture Science*, 69(3), 223. <https://doi.org/10.1071/CP17387>
- Osakabe, Y., Watanabe, T., Sugano, S. S., Ueta, R., Ishihara, R., Shinozaki, K., & Osakabe, K. (2016). Optimization of CRISPR/Cas9 genome editing to modify abiotic stress responses in plants. *Scientific Reports*, 6(1), 26685. <https://doi.org/10.1038/srep26685>
- Qaseem, M. F., Qureshi, R., Muqaddasi, Q. H., Shaheen, H., Kousar, R., & Röder, M. S. (2018). Genome-wide association mapping in bread wheat subjected to independent and combined high temperature and drought stress. *PLOS ONE*, 13(6), e0199121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199121>
- Ray, S., & Satya, P. (2014). Next generation sequencing technologies for next generation plant breeding. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00367>
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F. A., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13), 3137. <https://doi.org/10.3390/ijms20133137>
- Shamsudin, N. A. A., Swamy, B. P. M., Ratnam, W., Sta. Cruz, Ma. T., Raman, A., & Kumar, A. (2016). Marker assisted pyramiding of drought yield QTLs into a popular Malaysian rice cultivar, MR219. *BMC Genetics*, 17(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0334-0>
- Shi, J., Gao, H., Wang, H., Lafitte, H. R., Archibald, R. L., Yang, M., Hakimi, S. M., Mo, H., & Habben, J. E. (2017). ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. *Plant Biotechnology Journal*, 15(2), 207–216. <https://doi.org/10.1111/pbi.12603>
- Sun, Y., Zhang, X., Wu, C., He, Y., Ma, Y., Hou, H., Guo, X., Du, W., Zhao, Y., & Xia, L. (2016). Engineering herbicide-resistant rice plants through CRISPR/Cas9-mediated homologous recombination of acetolactate synthase. *Molecular Plant*, 9(4), 628–631. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.01.001>

- Technow, F., Messina, C. D., Totir, L. R., & Cooper, M. (2015). Integrating crop growth models with whole genome prediction through approximate bayesian computation. *PLOS ONE*, 10(6), e0130855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130855>
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9), 1097–1102. <https://doi.org/10.1038/ng.2725>
- Villa, T. C. C., Maxted, N., Scholten, M., & Ford-Lloyd, B. (2005). Defining and identifying crop landraces. *Plant Genetic Resources*, 3(3), 373–384. <https://doi.org/10.1079/PGR200591>
- Vincent, H., Amri, A., Castañeda-Álvarez, N. P., Dempewolf, H., Dulloo, E., Guarino, L., Hole, D., Mba, C., Toledo, A., & Maxted, N. (2019). Modeling of crop wild relative species identifies areas globally for in situ conservation. *Communications Biology*, 2(1), 136. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0372-z>
- Wang, L., Chen, L., Li, R., Zhao, R., Yang, M., Sheng, J., & Shen, L. (2017). Reduced drought tolerance by CRISPR/Cas9-mediated SIMAPK3 mutagenesis in tomato plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(39), 8674–8682. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02745>
- Wang, X., Xu, Y., Hu, Z., & Xu, C. (2018). Genomic selection methods for crop improvement: Current status and prospects. *The Crop Journal*, 6(4), 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.03.001>
- Wehner, G. G., Balko, C. C., Enders, M. M., Humbeck, K. K., & Ordon, F. F. (2015). Identification of genomic regions involved in tolerance to drought stress and drought stress induced leaf senescence in juvenile barley. *BMC Plant Biology*, 15(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0524-3>
- Xu, Y., Skinner, D. J., Wu, H., Palacios-Rojas, N., Araus, J. L., Yan, J., Gao, S., Warburton, M. L., & Crouch, J. H. (2009). Advances in maize genomics and their value for enhancing genetic gains from breeding. *International Journal of Plant Genomics*, 2009, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2009/957602>
- Yuan, Y., Cairns, J. E., Babu, R., Gowda, M., Makumbi, D., Magorokosho, C., Zhang, A., Liu, Y., Wang, N., Hao, Z., San Vicente, F., Olsen, M. S., Prasanna, B. M., Lu, Y., & Zhang, X. (2019). Genome-wide association mapping and genomic prediction analyses reveal the genetic architecture of grain yield and flowering time under drought and heat stress conditions in maize. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1919. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01919>
- Zhang, H., Zhang, J., Wei, P., Zhang, B., Gou, F., Feng, Z., Mao, Y., Yang, L., Zhang, H., Xu, N., & Zhu, J.-K. (2014). The CRISPR/Cas9 system produces specific and homozygous targeted gene editing in rice in one generation. *Plant Biotechnology Journal*, 12(6), 797–807. <https://doi.org/10.1111/pbi.12200>
- Zhang, L., Zhao, G., Xia, C., Jia, J., Liu, X., & Kong, X. (2012). A wheat R2R3-MYB gene, TaMYB30-B, improves drought stress tolerance in transgenic Arabidopsis. *Journal of Experimental Botany*, 63(16), 5873–5885. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers237>

## 9 Agronomische Managementstrategien zur Verbesserung der Resilienz von Pflanzen gegenüber dem Klimawandel

Luca Bragazza

Produktionssysteme Pflanzen, Ackerbausysteme und Pflanzenernährung, Agroscope, Nyon

### 9.1 Zusammenfassung

Derzeit stehen verschiedene agronomische Praktiken zur Verfügung, um die Widerstandsfähigkeit von Anbausystemen gegenüber klimatischen Extremereignissen, insbesondere gegenüber Dürre und Hitzewellen, zu erhöhen. Die "reduzierte Bodenbearbeitung" wird in der Regel mit dem Hauptziel angewandt, die Menge an organischer Substanz im Boden zu erhöhen, was sich später positiv auf die Wasserhaltekapazität des Bodens auswirkt, indem die physikalische Struktur des Bodens verbessert wird. Die Zugabe von Holzhackschnitzeln als organische Ergänzung zu landwirtschaftlichen Böden zielt ebenfalls auf eine Erhöhung der organischen Substanz ab, jedoch im Vergleich zur reduzierten Bodenbearbeitung mit einer schnelleren Rate. Die "Diversifizierung der Fruchtfolge" durch die Aufnahme von trockenheitsresistenteren Pflanzen und Leguminosen verbessert nachweislich die Bodenfruchtbarkeit insgesamt und indirekt auch die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen, auch wenn die Mechanismen noch nicht vollständig bekannt sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Anwendung von "Biotstimulanzien" direkt auf der Ebene der Pflanzen wirkt, wobei die Funktionsmechanismen noch durch weitere Studien geklärt werden müssen. Schliesslich scheinen die "Agroforstsysteme", bei denen Sträucher/Bäume mit Kulturpflanzen verbunden werden, eine Reihe positiver Effekte auszulösen, die nicht nur eine Erhöhung des Kohlenstoffbestands im Boden, sondern auch eine Verbesserung des Mikroklimas umfassen.

### 9.2 Reduzierte Bodenbearbeitung und Schutz des Bodenwassers

Die reduzierte Bodenbearbeitung ist Teil der "konservierenden Landwirtschaft", die neben einer minimalen Bodenstörung auch eine diversifizierte Fruchtfolge, den Verbleib von Ernterückständen auf der Bodenoberfläche sowie ein integriertes Schädlings- und Nährstoffmanagement umfasst (Page et al., 2020). Die Praktiken der reduzierten Bodenbearbeitung können regional variieren und reichen von kleinen Landwirten, die ihre Pflanzen mit Handgeräten anbauen, bis hin zu gross angelegten mechanisierten Systemen (Giller et al., 2015). Als Beispiel für reduzierte Bodenbearbeitungsmethoden gibt es Direktsaat, minimal oder reduzierte Bodenbearbeitung, Streifenbearbeitung und Dammsaat (Lal, 2015). Eines der Hauptziele der reduzierten Bodenbearbeitung ist es die Menge an organischer Substanz im Boden zu erhalten und zu erhöhen und somit die chemische, physikalische und biologische Bodenfruchtbarkeit zu verbessern (Haddaway et al., 2017; Mehra et al., 2018; Page et al., 2020). Ohne auf die Debatte über die wirtschaftlichen Aspekte der reduzierten Bodenbearbeitung einzugehen (Pearsons et al., 2023; Pittelkow et al., 2015; Wittwer et al., 2021), wollen wir uns hier auf die potenziellen Vorteile der reduzierten Bodenbearbeitung für die Erhaltung des Bodenwassers für das Pflanzenwachstum im Rahmen des Systemansatzes der konservierenden Landwirtschaft konzentrieren.

Wenn eine reduzierte Bodenbearbeitung zu einem Anstieg des organischen Kohlenstoffs im Boden führt, wurde über eine Verbesserung der Stabilität der Bodenaggregate berichtet (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Y. Li et al., 2019; Weidhuner et al., 2021). Einen Beitrag zu dieser Verbesserung leisten auch die Zunahme von Pilzpopulationen und die Persistenz von Wurzel-Netzwerke bei reduzierter Bodenstörung (Y. Wang et al., 2010). Es wird erwartet, dass eine solche Verbesserung der Bodenstruktur letztlich die Wasserspeicherkapazität fördert (Cárceles Rodríguez et al., 2022; Page et al., 2020). Es sollte jedoch bedacht werden, dass in feuchteren und kühleren Klimazonen eine stärkere Rückhaltung der Bodenfeuchtigkeit im Rahmen der konservierenden Landwirtschaft auch zu Staunässe mit negativen Auswirkungen auf die Ernteerträge führen kann (Rusinamhodzi et al., 2011; Soane et al., 2012). Deswegen sind die Vorteile bei den Ernteerträgen in nicht bewässerten Systemen und/oder in semiariden Klimazonen deutlicher

zu erkennen. In diesen Fällen scheint die Anwendung konservativer Verfahren die Bodengesundheit zu verbessern und die Pflanzenproduktion im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung zu steigern.

### 9.3 Holzabfälle als organisches Ergänzungsmittel zur Verbesserung des Wasserhaltevermögens landwirtschaftlicher Böden

In der Kategorie "Holzabfälle", einschliesslich Holzhackschnitzel oder Ramialholzspäne, beziehen wir uns auf aus Holz gewonnenes Material, unterschiedlicher chemischer Qualität, das als organisches Ergänzungsmaterial für landwirtschaftliche Böden verwendet wird. Dies hat als Hauptziel die Menge an organischer Substanz, d.h., organischer Kohlenstoff im Boden, zu erhöhen. Die positiven Auswirkungen der organischen Bodensubstanz auf die Pflanzenproduktivität sind weithin anerkannt, wenn man die direkten und indirekten Auswirkungen auf die biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften berücksichtigt (Garratt et al., 2018; King et al., 2020; Lal, 2016). Aus der Perspektive der Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber klimatischen Extremen ist durch die Erhöhung des Anteils an organischer Substanz im Boden eine Steigerung der Wasserspeicherkapazität des Bodens zu erwarten (Ankenbauer & Loheide, 2017; Eden et al., 2017; Khaleel et al., 1981; Pavlů et al., 2021). Das heisst der Gesamtmenge an Wasser, die ein Boden zurückhalten kann, nachdem das überschüssige Wasser abgeflossen ist.

Verschiedene Studien haben bereits gezeigt, dass die Zugabe von Holzabfällen zu Feldfrüchten mit einer Zunahme der organischen Substanz im Boden (SOC) verbunden ist, die jedoch von der Bodenbeschaffenheit und der Stöchiometrie der Holzabfälle abhängt (Z. Li et al., 2018; Scotti et al., 2015). Kürzlich berichteten beispielsweise Pizzeghello et al. (Pizzeghello et al., 2021) über einen Anstieg des organischen Kohlenstoffs im Boden auf das 2,5-fache im Vergleich zu einem konventionellen Agrarökosystem nach der Zugabe einer einmaligen Dosis von 60 t ha<sup>-1</sup> eines Komposts auf Holzbasis über einen kurzen Zeitraum von drei Jahren. In ähnlicher Weise wiesen Fontana et al. (Fontana et al., 2023) nach, dass die Zugabe von 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> Holzhackschnitzeln, fünf Jahre nach der Einarbeitung in den Boden, zu einem Anstieg des SOC-Gehalts um ca. 10 % führte, hauptsächlich in der mineralisch gebundenen organischen Substanzfraktion mit höherer Stabilität. Der Anstieg des SOC-Gehalts nach der Beimischung von Holzhackschnitzeln verringerte die Schüttdichte und erhöhte die leicht verfügbare Wasserkapazität aufgrund einer grösseren strukturellen Porosität, was die Rolle der organischen Bodensubstanz bei der Verbesserung der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen bestätigt (Fontana et al., 2023).

Darüber hinaus können Holzabfallzusätze auch andere Vorteile bieten, wie eine Steigerung des Ernteertrags (z. B. Picchioni et al. (2016); M. W. Smith et al. (2000)) und der mikrobiellen Aktivität (Annabi et al., 2011; Lalande et al., 1998; Z. Li et al., 2018). Ein grosses Problem bei der Verwendung von Holzabfällen in der Landwirtschaft ist jedoch die mögliche Stickstoffimmobilisierung durch Mikroben während des Holzabbaus. In diesem Sinne stehen die Ergebnisse im Widerspruch zu einer erhöhten Stickstofffreisetzung oder umgekehrt zu einer erhöhten Stickstoffimmobilisierung (Averett et al., 2004; Fang et al., 2011; Holtz et al., 2004; N'dayegamiye & Angers, 1993; Pizzeghello et al., 2021; Tahboub et al., 2007). In einem Schweizer Versuch berichteten Fontana et al. (Fontana et al., 2023) über keine signifikanten Auswirkungen der Ramial-Holzspäne auf die Stickstoffkonzentration in der Pflanzenbiomasse oder auf die Nitrat- oder Ammoniumkonzentration im Boden. Dagegen deutete der signifikante Anstieg des Gesamtstickstoffs im Boden und der Stickstoffkonzentration in den feineren mineralischen Bodenfraktionen darauf, dass die Ramialholzspäne dem Boden während der Stickstoff Zersetzung Stickstoff zur Verfügung gestellt haben, die in der mineralischen assoziierten organischen Substanz stabilisiert wurde, d. h. in einer stabileren Form.

Obwohl die Auswirkung einer Erhöhung der organischen Bodensubstanz auf die Wasserrückhaltung stark von der Bodentextur abhängt (Bagnall et al., 2022; Lal, 2020; Minasny & McBratney, 2018), haben nur wenige Studien die direkte Auswirkung auf die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegen Wasserstress quantifiziert, selbst wenn eine Erhöhung der Wasserrückhaltung festgestellt wurde. Maynard & Hill (Maynard & Hill, 2000) berichteten beispielsweise, dass die Zugabe von Kompost (7,5 cm dicke Schicht) den pflanzenverfügbaren Wassergehalt um das 2,5-fache im Vergleich zu einem Sandboden erhöht und so einen Wasservorrat von 7 bis 14 Tagen liefert. Wogegen eine Simulation von Ankenbauer und Loheide (Ankenbauer & Loheide, 2017) zeigte, dass eine erhöhte Wasserspeicherung durch organische Bodensubstanz bis zu 35 zusätzliche wasserstressfreie Tage während des trockenen Sommers beiträgt.

Während immer mehr Studien die positiven Auswirkungen von Holzabfällen (einschliesslich Holzhackschnitzeln) auf die physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens unterstreichen (Lal, 2020), gibt es unseres Wissens für Ackerkulturen noch keine Quantifizierung des Grades der Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegenüber Wasserstress in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Bodensubstanz. Dies bedeutet, dass weitere Studien erforderlich sind, um die Rückkopplung zwischen der Ökophysiologie der Pflanzen, dem Wasserstress und der organischen Bodensubstanz zu entschlüsseln. Darüber hinaus sind unter dem Gesichtspunkt der Bewirtschaftung weitere Studien erforderlich, um die Auswirkungen der anfänglichen Stöchiometrie der Holzabfälle, der Mindestmenge an Holzabfällen (insbesondere im Verhältnis zur Bodentextur) und der Art der Ausbringung (als Mulch oder oberflächlich eingearbeitet) zu verstehen, um eine Zunahme der organischen Bodensubstanz zu bewirken, ohne die Produktivität der Kulturen zu beeinträchtigen.

## 9.4 Diversifizierung der Fruchtfolge (Deckfrüchte enthalten)

Die Diversifizierung von Fruchtfolgen ist weithin als ökologisch orientiertes Produktionssystem anerkannt (Beillouin et al., 2021; Dainese et al., 2021; Lin, 2011). In der Tat wird eine vielfältige Fruchtfolge im Allgemeinen mit einer Verbesserung der mikrobiellen Aktivität im Boden (Dos Santos Soares et al., 2019; Kiani et al., 2017; Zuber et al., 2018), einer Verringerung des Unkraut- und Schädlingsdrucks (Weisberger et al., 2019) sowie mit einer Steigerung des Ernteertrags und der Stabilität der Ernte verbunden (Renard et al., 2023; R. G. Smith et al., 2008; St. Luce et al., 2020). Dazu wurde die Diversifizierung der Anbaupflanzen als Anpassungsstrategie vorgeschlagen, um die Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaschwankungen zu erhöhen, indem die Bodengesundheit insgesamt verbessert wird (Bowles et al., 2020). Eine aktuelle Metaanalyse von Iheshiulo et al. (Iheshiulo et al., 2023) zeigte, dass die Vielfalt der Kulturen die Schüttdichte des Bodens verringert und die Aggregatstabilität, die Porosität und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zu weniger vielfältigen Produktionssystemen erhöht, wobei sich die Bodengesundheit nach der Aufnahme von Hülsenfrüchten in die Fruchtfolge weiter verbessert. Dieses Ergebnis stimmt überein mit der erhöhten Dürreresistenz und der höheren Pflanzenproduktion in einer stärker diversifizierten Fruchtfolge, wie von Degani et al. (Degani et al., 2019) und Gaudin et al. (Gaudin et al., 2015) berichtet, die von einer effizienteren Wassernutzung des gesamten Bodenprofils ausgehen. In ähnlicher Weise zeigten Renwick et al. (Renwick et al., 2021), dass die Diversifizierung von Mais-Sojabohnen-Fruchtfolgen mit kleinkörnigem Getreide und Deckfrüchten den Maisertrag bei Trockenheit im Vergleich zu einer vereinfachten Fruchtfolge um 56 % erhöhte. Auch wenn verschiedene Studien gezeigt haben, dass eine diversifizierte Fruchtfolge die Anpassung von Feldfrüchten an den Klimawandel verbessern kann, sind die zugrunde liegenden Mechanismen noch immer unklar. Einige Bodeneigenschaften, wie z. B. die organische Substanz des Bodens, von denen häufig angenommen wird, dass sie die Trockenheitsresistenz von Pflanzen erklären (siehe 9.3), verbesserten sich bei einer Diversifizierung der Fruchtfolge nicht gleichmässig (Renwick et al., 2021). Kürzlich haben Bowles et al. (Bowles et al., 2022) gezeigt, dass die Komplexität der langfristigen Fruchtfolge den mikrobiellen Stickstoffkreislauf beeinflusst und direkte Rückwirkungen auf die Pflanzenphysiologie hat. Genauer gesagt, fanden Bowles et al. (Bowles et al., 2022) in einem Gewächshausexperiment höhere Stickstoffgehalte in einer komplexeren Fruchtfolge, die es der Pflanze ermöglichte, die Wassernutzungseffizienz zu steigern. Dies erfolgte indem sie die photosynthetische Kapazität im Verhältnis zur stomatären Leitfähigkeit erhöhten, d. h. eine Veränderung der Pflanzenphysiologie, die unter Trockenheitsbedingungen die höheren Erträge in komplexeren Fruchtfolgen erklären kann (Bowles et al., 2020; Gaudin et al., 2015; Renwick et al., 2021). Allerdings sind weitere Feldstudien erforderlich, um die Mechanismen zu verstehen, die der Auswirkung der Fruchtfolge auf die Reaktion der Pflanzen auf Trockenstress zugrunde liegen, indem die Rückkopplung zwischen Pflanze, mikrobiellem Bodenstoffwechsel und Nährstoffkreislauf berücksichtigt wird.

Die Zugabe von Deckfrüchten innerhalb einer Fruchtfolge ist eine Möglichkeit, die Komplexität, d.h., Vielfalt, der Fruchtfolge zu erhöhen und gleichzeitig eine Reihe von Vorteilen auf Boden- und Pflanzenebene zu bieten (Blanco-Canqui et al., 2015; Fageria et al., 2005; Vukicevich et al., 2016). Zusätzlich, wurde der Einsatz von Deckfrüchten auch als Instrument zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen gegen extreme Klimaereignisse vorgeschlagen (Kaye & Quemada, 2017). Eine vor kürzlich durchgeführte Meta-Analyse von Wang et al. (J. Wang et al., 2021) zeigte, dass das Belassen von Deckfruchtrückständen auf der Bodenoberfläche die Wasserspeicherung im Boden dank der verringerten Evapotranspiration erhöhen kann, was zu einer Steigerung des Ertrags von Nutzpflanzen und der Wassernutzungseffizienz führt. In ähnlicher Weise berichteten Gabriel et al. (Gabriel et al.,

2019), Basche und DeLonge (A. Basche & DeLonge, 2017), Chalise et al. (Chalise et al., 2019) über eine positive Wirkung von Deckfrüchten bei der Erhöhung der Mikro- und Makroporosität des Bodens, was zu einer grösseren Wasserrückhaltung des Bodens bei Feldkapazität führt. Diese positiven Auswirkungen scheinen in erster Linie auf die damit verbundene Erhöhung des Bodenkohlenstoffs, die Bodenaggregation und die damit einhergehenden wasserspeichernden Mesoporen die durch Sprossen und Wurzeln der Deckfrüchte zurückzuführen zu sein, wie Basche et al. (A. D. Basche et al., 2016) vorschlagen. Die errechneten, dass als Deckfrüchte der Wasserrückhalt im Boden bei Feldkapazität (-33 kPa) um 10-11 % steigt, was zu einem Anstieg des pflanzenverfügbaren Wassers um 21-22 % führte. Es sind jedoch weitere Studien erforderlich, um den Resilienz-Effekt auf der Ebene der Pflanzen im Feld bei Trockenheit zu quantifizieren.

Eine signifikante Erhöhung der Dürre-resistenz ergibt sich aus einem adaptiven Management der Beendigung des Anbaus von Deckfrüchten (Zeitpunkt der Vernichtung), um der möglichen Konkurrenz um Wasser mit der Hauptkultur entgegenzuwirken, die einer der Hauptnachteile des Anbaus von Deckfrüchten ist (Nielsen et al., 2016; Unger & Vigil, 1998). In diesem Sinne sind weitere Studien erforderlich, um die Stöchiometrie der Einstreu von Deckfrüchten (d. h. das C/N-Verhältnis) mit der N-Verfügbarkeit für die nachfolgende Nutzpflanze in Beziehung zu setzen und so die Widerstandsfähigkeit gegen Trockenheit zu erhöhen (siehe oben, Bowles et al. (2022)).

## 9.5 Agroforst-Systeme

Im Streben nach nachhaltigen landwirtschaftlichen Systemen wird die Agroforstwirtschaft als viel-versprechende Form der agroökologischen Bewirtschaftung vorgeschlagen, die es nicht nur ermöglicht, die Ernteerträge zu sichern, sondern auch andere wichtige Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen bereitzustellen (Rolo et al., 2023; J. Smith et al., 2013; Wolz et al., 2018). Verschiedene Studien haben das Potenzial der Agroforstwirtschaft, insbesondere in gemässigten Klimazonen, aufgezeigt, den Bestand an organischem Kohlenstoff im Boden (Mayer et al., 2022), die Mikro- und Makro-Biodiversität (Beule & Karlovsky, 2021; Boinot et al., 2019) und die Effizienz der Nährstoffverwertung (Schmidt et al., 2021) zu erhöhen und gleichzeitig die Bodenerosion (Palma et al., 2007) und die Auswaschung von Düngemitteln und Schadstoffen (Pavlidis et al., 2020) zu verringern. Kürzlich veröffentlichten Veldkamp et al. (Veldkamp et al., 2023) eine Bewertung der Multifunktionalität von Alley-Cropping-Systemen in gemässigten Klimazonen, aus der hervorging, dass die Agroforstwirtschaft die Ökosystemfunktionen erheblich verbessert, ohne den Ertrag der Anbaufläche zu beeinträchtigen. In Anbetracht der Tatsache, dass die Agroforstwirtschaft ein diversifiziertes Produktionssystem darstellt, das auch die organische Substanz des Bodens fördert, stellt sich die Frage, ob die Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen gegenüber extremen klimatischen Ereignissen in dieser Art von Produktionssystem verbessert werden kann.

Es hat sich gezeigt, dass das Vorhandensein von Bäumen und/oder Sträuchern das (ober- und unterirdische) Mikroklima in Bezug auf Strahlungsfluss, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit verändert, was einen potenziellen Schutzeffekt für hitzeempfindliche Pflanzen hat (Arenas-Corraliza et al., 2018; Inurreta-Aguirre et al., 2018). Andere Studien haben die positiven Auswirkungen der Agroforstwirtschaft auf den Gehalt an organischer Substanz und die Struktur des Bodens (Cardinael et al., 2018; De Stefano & Jacobson, 2017; Shi et al., 2018) sowie auf den Bodenwasserhaushalt (Jacobs et al., 2022) bestätigt. Es muss jedoch erwähnt werden, dass auf Systemebene die potenziellen Unterschiede zwischen Standorten in der Nähe von Bäumen und zwischen Baumreihen kompensiert werden könnten. Dies könnte zu einem neutralen Effekt der Agroforstwirtschaft oder zu divergierenden Nettoeffekten in Bezug auf das Mikroklima und den Bodenwasserhaushalt führen, die durch Unterschiede im Klima, in den Jahren, in den Bodentypen und in der Kombination von Pflanzen und Baumarten erklärt werden könnten (Cardinael et al., 2018; Markwitz et al., 2020; Rolo & Moreno, 2019; Sauer et al., 2021; You et al., 2010).

Trotz der zahlreichen Studien, in denen die Mechanismen untersucht wurden, die die Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen in Agroforstsystemen erhöhen könnten, gibt es nur wenige experimentelle Belege. In sehr fruchtbare Jahre ohne klimatische Einschränkungen wurden die Ernteerträge durch die Konkurrenz mit Bäumen verringert, aber in Jahren mit trockenen Klimaereignissen hatte der Schutz durch Bäume einen positiven Effekt im Vergleich zu Freilandkulturen (Arenas-Corraliza et al., 2018; Gagné et al., 2022; Nasielski et al., 2015). Unter Berücksichtigung der Rolle, die der lokale Kontext für die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen in Agroforstsystemen spielt, sind weitere Studien erforderlich, um zu verstehen, wie die Agroforstwirtschaft nicht nur in Bezug auf die Artenzusammensetzung,

sondern auch in Bezug auf die Bodenbewirtschaftung umgesetzt werden kann. Dies würde zum Beispiel bedeuten, Holzhackschnitzel hinzuzufügen, um den organischen Kohlenstoff schnell zu erhöhen und zu stabilisieren und gleichzeitig eine vielfältigere Bodenbiologie in Verbindung mit einer Diversifizierung der Fruchtfolge zu fördern. Das Feedback zwischen Pedosphäre, Biosphäre und Atmosphäre in Agroforstsystemen erfordert weitere Aufmerksamkeit, wenn wir beispielsweise die Bio-Bewässerung, d. h. die Übertragung von hydraulisch angehobenem Wasser durch tief wurzelnde Pflanzen auf benachbarte flach wurzelnde Pflanzen durch Mykorrhizanetzwerke (Cheng et al., 2021; Singh et al., 2019) fördern oder eine übermäßige Konkurrenz um Licht und Nährstoffe zwischen Bäumen/Sträuchern und Pflanzen vermeiden wollen.

## 9.6 Biostimulanzien für Pflanzen

Biostimulanzien, manchmal auch als Bioeffektoren bezeichnet, sind eine vielfältige Gruppe von Substanzen, die meist der Rhizosphäre oder direkt der Pflanze zugeführt werden, um den Ertrag zu steigern oder die abiotische Stressresistenz zu erhöhen (Du Jardin, 2015; Van Oosten et al., 2017). Verschiedene natürliche Stoffe und chemische Derivate natürlicher oder synthetischer Verbindungen sowie wertvolle Mikroorganismen werden als Biostimulanzien eingestuft, wie Huminsäuren, Proteinhydrolysate, Algenextrakte, pflanzenwachstumsfördernde Rhizobakterien und Silizium (Rouphael & Colla, 2020). Die Mechanismen, durch die die verschiedenen pflanzlichen Biostimulanzien die Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen gegen abiotischen Stress erhöhen, sind unterschiedlich und nicht immer vollständig bekannt (Van Oosten et al., 2017). Zum Beispiel scheinen Huminsäureextrakte eine Rolle bei der Aktivierung antioxidativer Enzyme zu spielen, um toxische freie Sauerstoffradikale zu inaktivieren, die von Pflanzen unter Trocken- und Salzstress produziert werden (Da Silva et al., 2021; García et al., 2012). Ein ähnlicher Mechanismus wie bei Algenextrakten, die die Pflanze mit Mikronährstoffen versorgen sollen, die als Kofaktoren in den antioxidativen Enzymen wirken (Mamede et al., 2023; Pereyra et al., 2012; Rai et al., 2021).

Die Anwendung von pflanzenwachstumsfördernden (Rhizo)-Bakterien als Biostimulanzien stellt ein innovatives Instrument dar, um die Widerstandsfähigkeit von Kulturpflanzen gegenüber abiotischem Stress zu erhöhen (Da Silva et al., 2021). Das stützt sich auf das neu entstandene Paradigma, dass Pflanzen keine eigenständigen Einheiten in ihrer Umgebung sind, sondern stattdessen zahlreiche Mikrobiota beherbergen und mit ihnen zusammenarbeiten (De Vries et al., 2020; Lyu et al., 2020; Poudel et al., 2021; Vandenkoornhuysen et al., 2015). Durch eine funktionelle Optimierung dieser Verbindungen können wir die Rolle der Mikrobiota bei der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegenüber abiotischen Stressfaktoren stärken (Hamilton et al., 2016). So führte beispielsweise die Inokulation von Mais mit drei wachstumsfördernden Bakterienstämmen zu einer Erhöhung des relativen Wassergehalts der Blätter und damit zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit und einem besseren Wachstum der Pflanze unter Trockenheitsbedingungen (Gou et al., 2015).

Im Falle von Silizium wird dieses Element in der Landwirtschaft zunehmend berücksichtigt (De Tombeur et al., 2021), da man davon ausgeht, dass es als extrazelluläres Prophylaktikum gegen biotische und abiotische Stressfaktoren wirkt (Coskun et al., 2019; M. A. Malik et al., 2021). Verschiedene Studien haben berichtet, dass Silizium den Trockenstress bei verschiedenen Nutzpflanzen mildert. Dies indem es den Wasserstatus, die osmotische Anpassung, die photosynthetische Aktivität, das antioxidative Abwehrsystem und das Gleichgewicht der Nährstoffaufnahme verbessert und dadurch den Ernteertrag aufrechterhält (Desoky et al., 2020; Gong & Chen, 2012; Gou et al., 2015; Khan et al., 2020; Sattar et al., 2020; Verma et al., 2020). Neulich zeigten Johnson et al. (Johnson et al., 2022), dass die Zugabe von Silizium die Wassernutzungseffizienz von Weizen während einer simulierten Dürre verbessert, indem sie den Wasserverlust durch geringere oder besser regulierte Transpirationsverluste verringert. Ein solcher Resilienz-Effekt kann erklären, warum sich der Ertrag von Pflanzen mit Siliziumzusatz bei Trockenheit nicht von dem Ertrag von Pflanzen mit normaler Wasserversorgung ohne Siliziumzusatz unterschied, während der Kornertrag von Pflanzen mit Trockenheit ohne Silizium um ca. 18 % zurückging.

Obwohl verschiedene Studien die positiven Auswirkungen von Biostimulanzien auf die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegenüber abiotischem Stress, insbesondere Hitze und Trockenheit, gezeigt haben (A. Malik et al., 2020; Rai et al., 2021; Shah et al., 2021), sind weitere Forschungen erforderlich, um die Wirkungsmechanismen verschiedener Biostimulanzien, die effektivste Anwendungsdosis und -weise sowie die möglichen Auswirkungen der Wechselwirkungen Genotyp x Biostimulanzien zu verstehen. In diesem Sinne können Metabolomics-Studien dazu beitragen, die vielfältigen biochemischen und molekularen Prozesse zu identifizieren, die durch Biostimulanzien in

Nutzpflanzen ausgelöst werden, um das Wachstum zu verbessern und die Klimaresilienz zu erhöhen (Franzoni et al., 2022; Lephatsi et al., 2022; Nepali et al., 2020). Es gibt noch viele Fragen, die geklärt werden müssen, um die Komplexität der Beziehung zwischen Pflanzen, Biostimulanzien und abiotischem Stress ganzheitlich zu verstehen.

## 9.7 Fazit

Die oben beschriebenen agronomischen Praktiken, die verfügbar sind, um die Widerstandsfähigkeit von Anbausystemen gegenüber Trockenheit und Hitze zu erhöhen, sind in Abbildung 9-1 zusammengefasst.

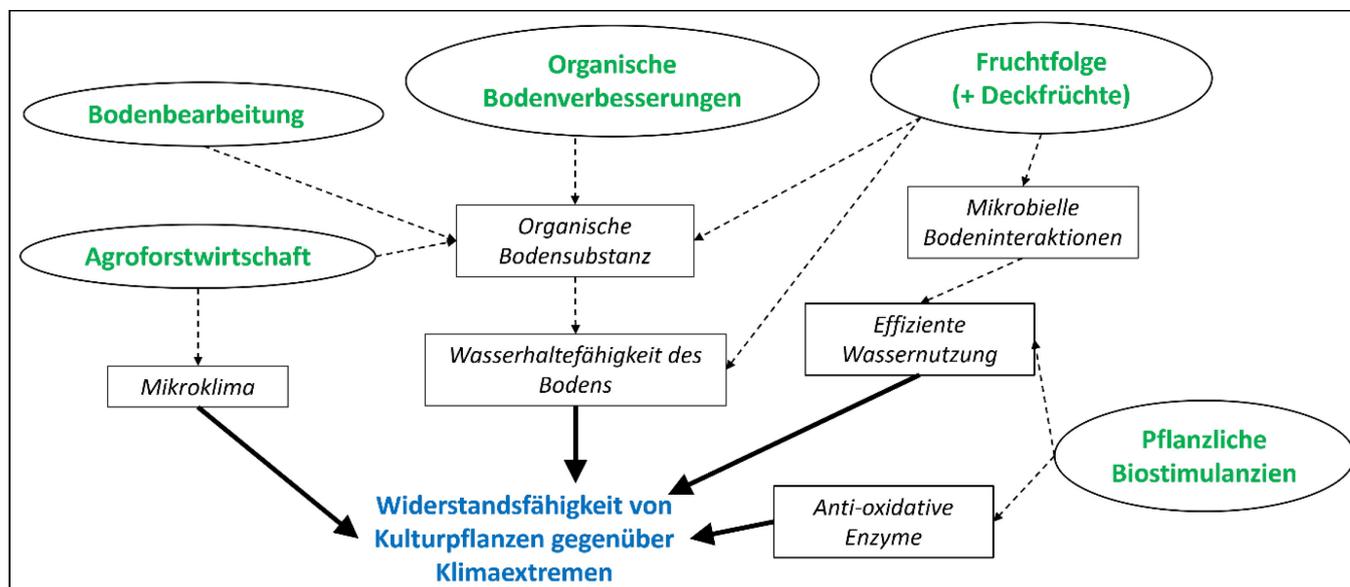


Abbildung 9-1 Agronomische Praktiken um die Widerstandsfähigkeit von Anbausystemen gegenüber klimatischen Extremereignissen, insbesondere gegenüber Dürre und Hitzewellen, zu erhöhen.

Einige der oben beschriebenen Praktiken werden in der Schweizer Landwirtschaft bereits angewandt (z. B. die reduzierte Bodenbearbeitung), während wir uns bei anderen Praktiken noch in einer Testphase befinden, die jedoch vielversprechende Ergebnisse zeigt. Jede der oben beschriebenen Praktiken ist mit unterschiedlichen Kosten und unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden bei der Anwendung verbunden (Tabelle 9-1), doch können weitere Studien dazu beitragen, die optimalen Bedingungen für ihre Einführung besser zu klären.

Tabelle 9-1 Beurteilung der Machbarkeit der vorgeschlagenen agronomischen Strategien anhand der zu erwartenden Kosten, des technischen Schwierigkeitsgrads bei der Einführung der Strategie und der Zeit, die erforderlich ist, um positive Auswirkungen auf die Klimaresilienz zu beobachten. Ausserdem wird auf laufende Forschungsversuche zum Thema bei Agroscope hingewiesen (v). Ein Fragezeichen (?) weist darauf hin, dass weitere Informationen durch Forschung erforderlich sind

Agronomische Praxis	Kosten	Schwierigkeit der Übernahme	Zeitliche Distanz zur Beobachtung der Auswirkungen	Laufendes Forschungsprojekt bei Agroscope
Reduzierte Bodenbearbeitung	+ <sup>a</sup>	0	++ <sup>b</sup>	v
Ramialholzspäne	+	+ <sup>c</sup>	+	v (seit 2015)
Diversifizierung der Fruchtfolge	0	0	?	v
Agroforst-Systeme	+	0 (+)	?	v (seit 2023)
Biostimulanzien für Pflanzen	+ (++) <sup>d</sup>	0	0	v (seit 2022)

<sup>a</sup> Hauptsächlich aufgrund der Anschaffung neuer Maschinen und der Verringerung des Ertrags in den ersten Jahren. <sup>b</sup> Stark abhängig von den lokalen klimatischen und bodenkundlichen Bedingungen. <sup>c</sup> Vor allem wegen der Verfügbarkeit von Ramialholzspäne. <sup>d</sup> Je nach dem verwendeten Produkt.

Es ist wichtig zu betonen, dass unter den realistischsten Zukunftsszenarien jede der oben genannten agronomischen Praktiken, wenn sie allein angewandt wird, nicht ausreicht, um die Widerstandsfähigkeit landwirtschaftlicher Systeme zu erhöhen, so dass die Kombination verschiedener Praktiken in Betracht gezogen werden sollte, um potenzielle Synergieeffekte auszulösen, insbesondere wenn sie mit der Auswahl trockenheitsresistenterer Kultursorten kombiniert wird.

## 9.8 Literaturverzeichnis

- Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA: Soil organic matter affects plant water use. *Hydrological Processes*, 31(4), 891–901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., & Houot, S. (2011). Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.005>
- Arenas-Corraliza, M. G., López-Díaz, M. L., & Moreno, G. (2018). Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 264, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.024>
- Averett, J. M., Klips, R. A., Nave, L. E., Frey, S. D., & Curtis, P. S. (2004). Effects of soil carbon amendment on nitrogen availability and plant growth in an experimental tallgrass prairie restoration. *Restoration Ecology*, 12(4), 568–574. <https://doi.org/10.1111/j.1061-2971.2004.00284.x>
- Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Cope, M., Bean, G. M., Cappellazzi, S., Greub, K., Liptzin, D., Norris, C. L., Rieke, E., Tracy, P., Aberle, E., Ashworth, A., Bañuelos Tavarez, O., Bary, A., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D., Brennan, J., Briones Reyes, D., ... Honeycutt, C. W. (2022). Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water. *Soil Science Society of America Journal*, 86(3), 612–629. <https://doi.org/10.1002/saj2.20395>
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S. V., Jaynes, D. B., Sauer, T. J., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>
- Basche, A., & DeLonge, M. (2017). The impact of continuous living cover on soil hydrologic properties: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1179–1190. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0077>
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697–4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Beule, L., & Karlovsky, P. (2021). Tree rows in temperate agroforestry croplands alter the composition of soil bacterial communities. *PLOS ONE*, 16(2), e0246919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246919>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), 2449–2474. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
- Boinot, S., Fried, G., Storkey, J., Metcalfe, H., Barkaoui, K., Lauri, P.-É., & Mézière, D. (2019). Alley cropping agroforestry systems: Reservoirs for weeds or refugia for plant diversity? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 284, 106584. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106584>
- Bowles, T. M., Jilling, A., Morán-Rivera, K., Schneckner, J., & Grandy, A. S. (2022). Crop rotational complexity affects plant-soil nitrogen cycling during water deficit. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108552. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108552>
- Bowles, T. M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M. A., Culman, S. W., Deen, W., Drury, C. F., Garcia Y Garcia, A., Gaudin, A. C. M., Harkcom, W. S., Lehman, R. M., Osborne, S. L., Robertson, G. P., Salerno, J., Schmer, M. R., Strock, J., & Grandy, A. S. (2020). Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America. *One Earth*, 2(3), 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>

- Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V. H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I. F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Tavira, S. (2022). Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review. *Soil Systems*, 6(4), 87. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087>
- Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T., & Chenu, C. (2018). High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system – combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15(1), 297–317. <https://doi.org/10.5194/bg-15-297-2018>
- Chalise, K. S., Singh, S., Wegner, B. R., Kumar, S., Pérez-Gutiérrez, J. D., Osborne, S. L., Nleya, T., Guzman, J., & Rohila, J. S. (2019). Cover crops and returning residue impact on soil organic carbon, bulk density, penetration resistance, water retention, infiltration, and soybean yield. *Agronomy Journal*, 111(1), 99–108. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0213>
- Cheng, S., Zou, Y.-N., Kuča, K., Hashem, A., Abd\_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2021). elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Frontiers in Microbiology*, 12, 809473. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.809473>
- Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O., Ma, J. F., Kronzucker, H. J., & Bélanger, R. R. (2019). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, 221(1), 67–85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
- Da Silva, M. S. R. D. A., Dos Santos, B. D. M. S., Da Silva, C. S. R. D. A., Da Silva, C. S. R. D. A., Antunes, L. F. D. S., Dos Santos, R. M., Santos, C. H. B., & Rigobelo, E. C. (2021). Humic substances in combination with plant growth-promoting bacteria as an alternative for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 12, 719653. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.719653>
- Dainese, R., Lima Lopes, B. de C. F., Tedeschi, G., Lamarque, L. J., Delzon, S., Fourcaud, T., & Tarantino, A. (2021). Cross-validation on saplings of high-capacity tensiometer and thermocouple psychrometer for continuous monitoring of xylem water potential. *Journal of Experimental Botany*, erab412. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab412>
- De Stefano, A., & Jacobson, M. G. (2017). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: A meta-analysis. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
- De Tombeur, F., Roux, P., & Cornelis, J.-T. (2021). Silicon dynamics through the lens of soil-plant-animal interactions: Perspectives for agricultural practices. *Plant and Soil*, 467(1–2), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05076-8>
- De Vries, F. T., Griffiths, R. I., Knight, C. G., Nicolitch, O., & Williams, A. (2020). Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, 368(6488), 270–274. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>
- Degani, E., Leigh, S. G., Barber, H. M., Jones, H. E., Lukac, M., Sutton, P., & Potts, S. G. (2019). Crop rotations in a climate change scenario: Short-term effects of crop diversity on resilience and ecosystem service provision under drought. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106625. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106625>
- Desoky, E.-S. M., Mansour, E., Yasin, M. A. T., El-Sobky, E.-S. E. A., & Rady, M. M. (2020). Improvement of drought tolerance in five different cultivars of *Vicia faba* with foliar application of ascorbic acid or silicon. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(2), e0802. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-16122>
- Dos Santos Soares, D., Ramos, M. L. G., Marchão, R. L., Maciel, G. A., De Oliveira, A. D., Malaquias, J. V., & De Carvalho, A. M. (2019). How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. *Soil and Tillage Research*, 194, 104316. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104316>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

- Eden, M., Gerke, H. H., & Houot, S. (2017). Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2), 11. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0419-9>
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Bailey, B. A. (2005). Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(19–20), 2733–2757. <https://doi.org/10.1080/00103620500303939>
- Fang, S., Xie, B., Liu, D., & Liu, J. (2011). Effects of mulching materials on nitrogen mineralization, nitrogen availability and poplar growth on degraded agricultural soil. *New Forests*, 41(2), 147–162. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9217-9>
- Fontana, M., Johannes, A., Zaccone, C., Weisskopf, P., Guillaume, T., Bragazza, L., Elfouki, S., Charles, R., & Sinaj, S. (2023). Improving crop nutrition, soil carbon storage and soil physical fertility using ramial wood chips. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103143. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103143>
- Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., & Espen, L. (2022). Biostimulants on Crops: Their Impact under Abiotic Stress Conditions. *Horticulturae*, 8(3), 189. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189>
- Gabriel, J. L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., & Vanclooster, M. (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agricultural Water Management*, 222, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.034>
- Gagné, G., Lorenzetti, F., Cogliastro, A., & Rivest, D. (2022). soybean performance under moisture limitation in a temperate tree-based intercropping system. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4089133>
- García, A. C., Santos, L. A., Izquierdo, F. G., Sperandio, M. V. L., Castro, R. N., & Berbara, R. L. L. (2012). Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress. *Ecological Engineering*, 47, 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.011>
- Garratt, M. P. D., Bommarco, R., Kleijn, D., Martin, E., Mortimer, S. R., Redlich, S., Senapathi, D., Steffan-Dewenter, I., Świtek, S., Takács, V., Van Gils, S., Van Der Putten, W. H., & Potts, S. G. (2018). Enhancing soil organic matter as a route to the ecological intensification of European arable systems. *Ecosystems*, 21(7), 1404–1415. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0228-2>
- Gaudin, A. C. M., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., & Deen, W. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *PLOS ONE*, 10(2), e0113261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>
- Giller, K. E., Andersson, J. A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., & Vanlauwe, B. (2015). Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>
- Gong, H., & Chen, K. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(4), 1589–1594. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0954-6>
- Gou, W., Tian, L., Ruan, Z., Zheng, P., Chen, F., Zhang, L., Cui, Z., Zheng, P., Zheng, L., Gao, M., Shi, W., Zhang, L., Liu, J., & Hu, J. (2015). Accumulation of choline and glycinebetaine and drought stress tolerance induced in maize (*Zea mays*) by three plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) strains. *Pakistan Journal of Botany*, 47(2), 581–586.
- Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., Jørgensen, H. B., & Isberg, P.-E. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
- Hamilton, C. E., Bever, J. D., Labbé, J., Yang, X., & Yin, H. (2016). Mitigating climate change through managing constructed-microbial communities in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 304–308. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.006>

- Holtz, B. A., McKenry, M. V., & Caesar-TonThat, T. C. (2004). Wood chipping almond brush and its effect on the almond rhizosphere, soil aggregation and soil nutrients. *Acta Horticulturae*, 638, 127–137.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.638.15>
- Iheshiulo, E. M.-A., Larney, F. J., Hernandez-Ramirez, G., St. Luce, M., Liu, K., & Chau, H. W. (2023). Do diversified crop rotations influence soil physical health? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 233, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105781>
- Inurreta-Aguirre, H. D., Lauri, P.-É., Dupraz, C., & Gosme, M. (2018). Yield components and phenology of durum wheat in a Mediterranean alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, 92(4), 961–974.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-018-0201-2>
- Jacobs, S. R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Schwartz, C., Breuer, L., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2022). Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109065.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
- Johnson, S. N., Chen, Z.-H., Rowe, R. C., & Tissue, D. T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1030620.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>
- Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Khaleel, R., Reddy, K. R., & Overcash, M. R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: A review. *Journal of Environmental Quality*, 10(2), 133–141.  
<https://doi.org/10.2134/jeq1981.00472425001000020002x>
- Khan, A., Khan, A. L., Imran, M., Asaf, S., Kim, Y.-H., Bilal, S., Numan, M., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I.-J. (2020). Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. *BMC Plant Biology*, 20(1), 248.  
<https://doi.org/10.1186/s12870-020-02456-7>
- Kiani, M., Hernandez-Ramirez, G., Quideau, S., Smith, E., Janzen, H., Larney, F. J., & Puurveen, D. (2017). Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: Crop rotations and nutrient regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 123–135.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.018>
- King, A. E., Ali, G. A., Gillespie, A. W., & Wagner-Riddle, C. (2020). Soil organic matter as catalyst of crop resource capture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 50. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00050>
- Lal, R. (2015). Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(3), 55A-62A. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.3.55A>
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222.  
<https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265–3277.  
<https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lalande, R., Furlan, V., Angers, D. A., & Lemieux, G. (1998). Soil improvement following addition of chipped wood from twigs. *American Journal of Alternative Agriculture*, 13(3), 132–137.  
<https://doi.org/10.1017/S0889189300007815>
- Lephatsi, M., Nephali, L., Meyer, V., Piater, L. A., Buthelezi, N., Dubery, I. A., Opperman, H., Brand, M., Huyser, J., & Tugizimana, F. (2022). Molecular mechanisms associated with microbial biostimulant-mediated growth enhancement, priming and drought stress tolerance in maize plants. *Scientific Reports*, 12(1), 10450.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-14570-7>

- Li, Y., Li, Z., Cui, S., Jagadamma, S., & Zhang, Q. (2019). Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 194, 104292. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.009>
- Li, Z., Schneider, R. L., Morreale, S. J., Xie, Y., Li, C., & Li, J. (2018). Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China. *Geoderma*, 310, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.009>
- Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183–193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>
- Lyu, D., Backer, R., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2020). Phytomicrobiome coordination signals hold potential for climate change-resilient agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 634. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00634>
- Malik, A., Mor, V. S., Tokas, J., Punia, H., Malik, S., Malik, K., Sangwan, S., Tomar, S., Singh, P., Singh, N., Himangini, Vikram, Nidhi, Singh, G., Vikram, Kumar, V., Sandhya, & Karwasra, A. (2020). Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: A global perspective facing climate change. *Agronomy*, 11(1), 14. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010014>
- Malik, M. A., Wani, A. H., Mir, S. H., Rehman, I. U., Tahir, I., Ahmad, P., & Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.021>
- Mamede, M., Cotas, J., Bahcevandziev, K., & Pereira, L. (2023). Seaweed polysaccharides in agriculture: A next step towards sustainability. *Applied Sciences*, 13(11), 6594. <https://doi.org/10.3390/app13116594>
- Markwitz, C., Knohl, A., & Siebicke, L. (2020). Evapotranspiration over agroforestry sites in Germany. *Biogeosciences*, 17(20), 5183–5208. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5183-2020>
- Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A., & Kögel-Knabner, I. (2022). Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>
- Maynard, A. A., & Hill, D. E. (2000). Cumulative effect of leaf compost on yield and size distribution in onions. *Compost Science & Utilization*, 8(1), 12–18. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701744>
- Mehra, P., Baker, J., Sojka, R. E., Bolan, N., Desbiolles, J., Kirkham, M. B., Ross, C., & Gupta, R. (2018). A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics. In *Advances in Agronomy* (Bd. 150, S. 185–230). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.03.002>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39–47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Nasielski, J., Furze, J. R., Tan, J., Bargaz, A., Thevathasan, N. V., & Isaac, M. E. (2015). Agroforestry promotes soybean yield stability and N<sub>2</sub>-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1541–1549. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0330-1>
- N'dayegamiye, A., & Angers, D. A. (1993). Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications. *Canadian Journal of Soil Science*, 73(1), 115–122. <https://doi.org/10.4141/cjss93-011>
- Nephali, L., Piater, L. A., Dubery, I. A., Patterson, V., Huyser, J., Burgess, K., & Tugizimana, F. (2020). Biostimulants for plant growth and mitigation of abiotic stresses: A metabolomics perspective. *Metabolites*, 10(12), 505. <https://doi.org/10.3390/metabo10120505>
- Nielsen, D. C., Vigil, M. F., Lyon, D. J., Higgins, R. K., Hergert, G. W., & Holman, J. D. (2016). Cover crops can affect subsequent wheat yield in the Central Great Plains. *Crops & Soils*, 49(3), 51–53. <https://doi.org/10.2134/cs2016.49.0315>

- Page, K. L., Dang, Y. P., & Dalal, R. C. (2020). The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 31. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>
- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Bunce, R. G. H., Burgess, P. J., De Filippi, R., Keesman, K. J., Van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., & Herzog, F. (2007). Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3–4), 320–334. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- Pavlidis, G., Karasali, H., & Tsihrintzis, V. A. (2020). Pesticide and fertilizer pollution reduction in two alley cropping agroforestry cultivating systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(5), 241. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04590-2>
- Pavlů, L., Kodešová, R., Fér, M., Nikodem, A., Němec, F., & Prokeš, R. (2021). The impact of various mulch types on soil properties controlling water regime of the Haplic Fluvisol. *Soil and Tillage Research*, 205, 104748. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104748>
- Pearsons, K. A., Chase, C., Omondi, E. C., Zinati, G., Smith, A., & Rui, Y. (2023). Reducing tillage does not affect the long-term profitability of organic or conventional field crop systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1004256. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1004256>
- Pereyra, M. A., García, P., Colabelli, M. N., Barassi, C. A., & Creus, C. M. (2012). A better water status in wheat seedlings induced by *Azospirillum* under osmotic stress is related to morphological changes in xylem vessels of the coleoptile. *Applied Soil Ecology*, 53, 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.007>
- Picchioni, G. A., Martinez, S. A., Mexal, J. G., & VanLeeuwen, D. M. (2016). Vegetative growth and leaf nutrient status of 'Carpino' chrysanthemum on a pecan wood-amended commercial substrate. *HortScience*, 51(2), 177–185. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.2.177>
- Pittelkow, C. M., Liang, X., Linquist, B. A., Van Groenigen, K. J., Lee, J., Lundy, M. E., Van Gestel, N., Six, J., Venterea, R. T., & Van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365–368. <https://doi.org/10.1038/nature13809>
- Pizzeghello, D., Bellin, L., Nardi, S., Francioso, O., Squartini, A., & Concheri, G. (2021). Wood-based compost affects soil fertility and the content of available forms of nutrients in vineyard and field-scale agroecosystems. *Agronomy*, 11(3), 518. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030518>
- Poudel, M., Mendes, R., Costa, L. A. S., Bueno, C. G., Meng, Y., Folimonova, S. Y., Garrett, K. A., & Martins, S. J. (2021). The role of plant-associated bacteria, fungi, and viruses in drought stress mitigation. *Frontiers in Microbiology*, 12, 743512. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.743512>
- Rai, N., Rai, S. P., & Sarma, B. K. (2021). Prospects for abiotic stress tolerance in crops utilizing phyto- and bio-stimulants. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 754853. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.754853>
- Renard, D., Mahaut, L., & Noack, F. (2023). Crop diversity buffers the impact of droughts and high temperatures on food production. *Environmental Research Letters*, 18(4), 045002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc2d6>
- Renwick, L. L. R., Deen, W., Silva, L., Gilbert, M. E., Maxwell, T., Bowles, T. M., & Gaudin, A. C. M. (2021). Long-term crop rotation diversification enhances maize drought resistance through soil organic matter. *Environmental Research Letters*, 16(8), 084067. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1468>
- Rolo, V., & Moreno, G. (2019). Shrub encroachment and climate change increase the exposure to drought of Mediterranean wood-pastures. *Science of The Total Environment*, 660, 550–558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.029>
- Rolo, V., Rivest, D., Maillard, É., & Moreno, G. (2023). Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil-based perspective. *Soil Use and Management*, 39(3), 1006–1032. <https://doi.org/10.1111/sum.12932>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>

- Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Van Wijk, M. T., Rufino, M. C., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2011). A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), 657–673. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0040-2>
- Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Butt, M., Irfan, M., Rizwan, M. S., Ali, H., & Cheema, M. A. (2020). Interactive effect of biochar and silicon on improving morpho-physiological and biochemical attributes of maize by reducing drought hazards. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1819–1826. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00253-7>
- Sauer, T. J., Dold, C., Ashworth, A. J., Nieman, C. C., Hernandez-Ramirez, G., Philipp, D., Gennadiev, A. N., & Chendev, Y. G. (2021). Agroforestry practices for soil conservation and resilient agriculture. In R. P. Udawatta & S. Jose (Hrsg.), *Agroforestry and Ecosystem Services* (S. 19–48). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4_2)
- Schmidt, M., Corre, M. D., Kim, B., Morley, J., Göbel, L., Sharma, A. S. I., Setriuc, S., & Veldkamp, E. (2021). Nutrient saturation of crop monocultures and agroforestry indicated by nutrient response efficiency. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(1), 69–82. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10113-6>
- Scotti, R., D'Ascoli, R., Gonzalez Caceres, M., Bonanomi, G., Sultana, S., Cozzolino, L., Scelza, R., Zoina, A., & Rao, M. A. (2015). Combined use of compost and wood scraps to increase carbon stock and improve soil quality in intensive farming systems: Large C:N ratio amendment to improve soil quality. *European Journal of Soil Science*, 66(3), 463–475. <https://doi.org/10.1111/ejss.12248>
- Shah, A., Nazari, M., Antar, M., Msimbira, L. A., Naamala, J., Lyu, D., Rabileh, M., Zajonc, J., & Smith, D. L. (2021). PGPR in agriculture: A sustainable approach to increasing climate change resilience. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 667546. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667546>
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation & Development*, 29(11), 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>
- Singh, D., Mathimaran, N., Boller, T., & Kahmen, A. (2019). Bioirrigation: A common mycorrhizal network facilitates the water transfer from deep-rooted pigeon pea to shallow-rooted finger millet under drought. *Plant and Soil*, 440(1–2), 277–292. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04082-1>
- Smith, J., Pearce, B. D., & Wolfe, M. S. (2013). Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28(1), 80–92. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000585>
- Smith, M. W., Carroll, B. L., & Cheary, B. S. (2000). Mulch improves pecan tree growth during orchard establishment. *HortScience*, 35(2), 192–195. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.2.192>
- Smith, R. G., Gross, K. L., & Robertson, G. P. (2008). Effects of crop diversity on agroecosystem function: Crop yield response. *Ecosystems*, 11(3), 355–366. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9124-5>
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- St. Luce, M., Lemke, R., Gan, Y., McConkey, B., May, W., Campbell, C., Zentner, R., Wang, H., Kroebel, R., Fernandez, M., & Brandt, K. (2020). Diversifying cropping systems enhances productivity, stability, and nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal*, 112(3), 1517–1536. <https://doi.org/10.1002/agj2.20162>
- Tahboub, M. B., Lindemann, W. C., & Murray, L. (2007). Nutrient availability in soil amended with pecan wood chips. *HortScience*, 42(2), 339–343. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.2.339>
- Unger, P. W., & Vigil, M. F. (1998). Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation*, 53(3), 200–207.

- Van Oosten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., & Maggio, A. (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0089-5>
- Vandenkoornhuysse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., & Dufresne, A. (2015). The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206(4), 1196–1206. <https://doi.org/10.1111/nph.13312>
- Veldkamp, E., Schmidt, M., Markwitz, C., Beule, L., Beuschel, R., Biertümpfel, A., Bischel, X., Duan, X., Gerjets, R., Göbel, L., Graß, R., Guerra, V., Heinlein, F., Komainda, M., Langhof, M., Luo, J., Potthoff, M., Van Ramshorst, J. G. V., Rudolf, C., ... Corre, M. D. (2023). Multifunctionality of temperate alley-cropping agroforestry outperforms open cropland and grassland. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>
- Verma, K. K., Anas, M., Chen, Z., Rajput, V. D., Malviya, M. K., Verma, C. L., Singh, R. K., Singh, P., Song, X.-P., & Li, Y.-R. (2020). Silicon supply improves leaf gas exchange, antioxidant defense system and growth in *Saccharum officinarum* responsive to water limitation. *Plants*, 9(8), 1032. <https://doi.org/10.3390/plants9081032>
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Úrbez-Torres, J. R., & Hart, M. (2016). Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0385-7>
- Wang, J., Zhang, S., Sainju, U. M., Ghimire, R., & Zhao, F. (2021). A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 256, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107085>
- Wang, Y., Xu, J., Shen, J., Luo, Y., Scheu, S., & Ke, X. (2010). Tillage, residue burning and crop rotation alter soil fungal community and water-stable aggregation in arable fields. *Soil and Tillage Research*, 107(2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.008>
- Weidhuner, A., Hanauer, A., Krausz, R., Crittenden, S. J., Gage, K., & Sadeghpour, A. (2021). Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. *Soil and Tillage Research*, 208, 104878. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104878>
- Weisberger, D., Nichols, V., & Liebman, M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(7), e0219847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219847>
- Wittwer, R. A., Bender, S. F., Hartman, K., Hydbom, S., Lima, R. A. A., Loaiza, V., Nemecek, T., Oehl, F., Olsson, P. A., Petchey, O., Prechsl, U. E., Schlaeppli, K., Scholten, T., Seitz, S., Six, J., & Van Der Heijden, M. G. A. (2021). Organic and conservation agriculture promote ecosystem multifunctionality. *Science Advances*, 7(34), eabg6995. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg6995>
- Wolz, K. J., Lovell, S. T., Branham, B. E., Eddy, W. C., Keeley, K., Revord, R. S., Wander, M. M., Yang, W. H., & DeLucia, E. H. (2018). Frontiers in alley cropping: Transformative solutions for temperate agriculture. *Global Change Biology*, 24(3), 883–894. <https://doi.org/10.1111/gcb.13986>
- You, W., Zeng, D., Liu, M., Yun, L., Ye, Y., & Zhang, Y. (2010). Spatial and temporal variations of soil moisture in three types of agroforestry boundaries in the Loess Plateau, China. *Journal of Forestry Research*, 21(4), 415–422. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0091-2>
- Zuber, S., Behnke, G., Nafziger, E., & Villamil, M. (2018). Carbon and nitrogen content of soil organic matter and microbial biomass under long-term crop rotation and tillage in Illinois, USA. *Agriculture*, 8(3), 37. <https://doi.org/10.3390/agriculture8030037>

## 10 Verdankung

Christoph Carlen

Produktionssysteme Pflanzen, Agroscope, Nyon-Contthey

Dieser Projektbericht entstand im Auftrag von Schweizer Hagel, fenaco und des Schweizer Bauernverbands und bringt Informationen anhand von Studien der wissenschaftlichen Literatur, Projektberichten, Datenanalysen und aus der Interaktion mit Experten auf ihren Gebieten.

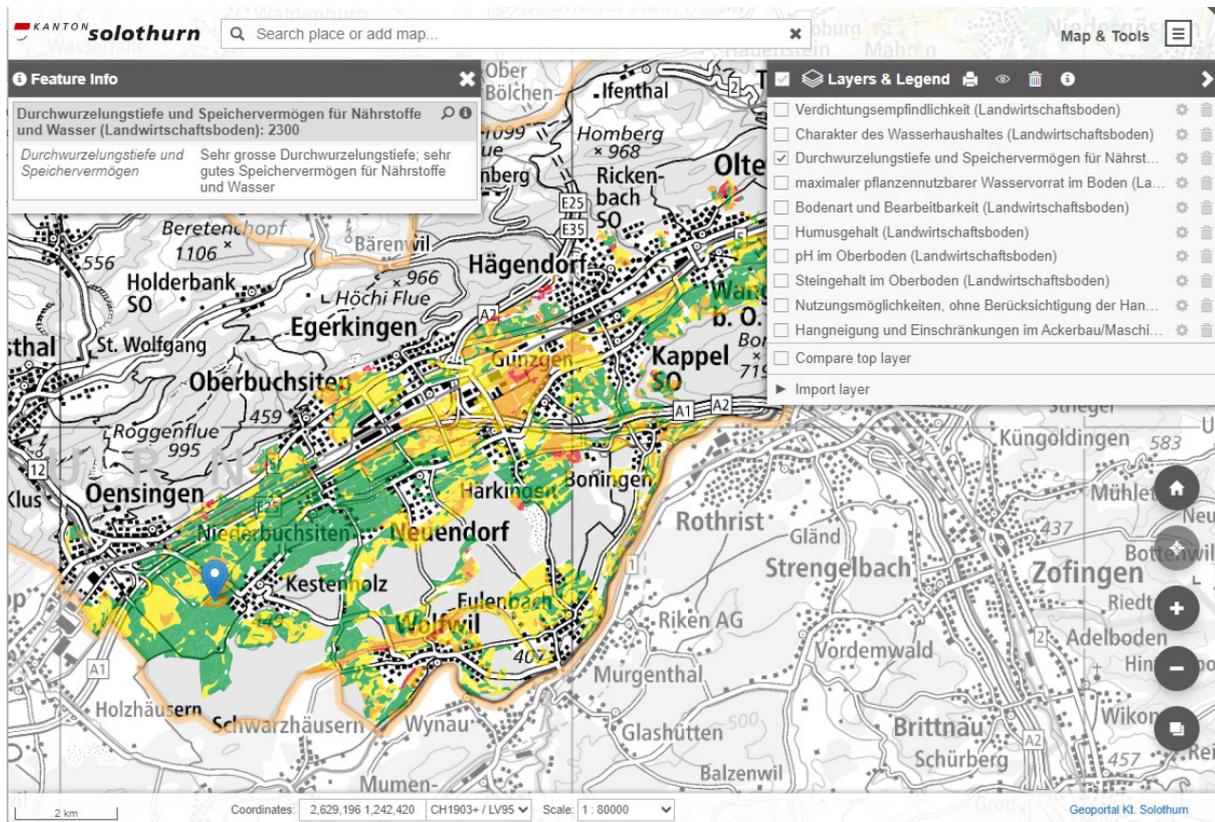
Nathalie Wuyts gebührt einen grossen Dank für die effiziente Projektleitung und für ihren unermüdlichen Einsatz für die Erstellung dieses Berichtes.

Weiter möchte ich mich bei meinen Agroscope-Kolleginnen und Kollegen für ihre Arbeit als Autoren der verschiedenen Kapitel und für ihre wichtigen Beiträge bedanken (in alphabetischer Reihenfolge): Alice Baux, Luca Bragazza, Pierluigi Calanca, Boulos Chalhoub, Brice Dupuis, Juan M. Herrera, Jürg Hiltbrunner, Lilia Levy Häner, Didier Pellet, Thomas Toschini, Nathalie Wuyts.

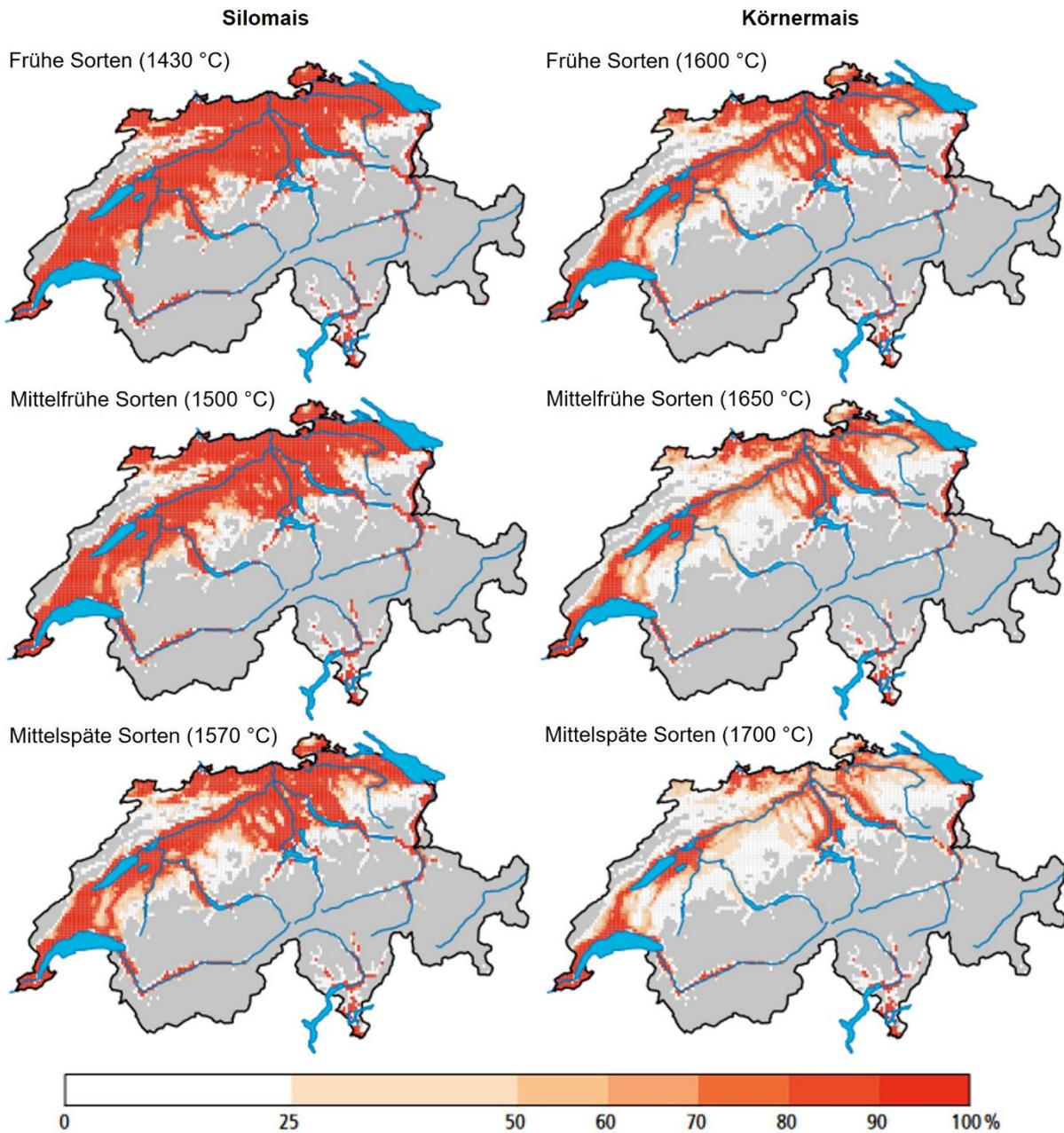
Ebenfalls einen grossen Dank an unsere Kolleginnen und Kollegen die sich die Zeit genommen haben, ihre berufliche Erfahrung und ihr technisches Wissen zu teilen, um diesen Bericht zu ergänzen (in alphabetischer Reihenfolge): Dr. Helge Aasen (Agroscope Reckenholz), Jan Béguin (Bundesamt für Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung und Strukturverbesserungen, Bern), Claude-Alain Bétrix (Agroscope Changins), Stéphane Capillon (Bundesamt für Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung und Strukturverbesserungen, Bern), Basile Cornamusaz (Agroscope Changins, Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau, Moudon), Dr. Hans Feyen (Schweizer Hagel, Zürich), Dr. Dario Fossati (Agroscope Changins), Dr. Lucie Greiner (Kompetenzzentrum Boden, Zollikofen), Dr. Annelie Holzkämper (Agroscope Reckenholz), Dr. Fabia Hüsler (Bundesamt für Umwelt, Bern), Dr. Vincent Humphrey (MeteoSchweiz, Zürich), Dr. Magdalena Knabl (EAWAG, Dübendorf), Prof. Eberhard Morgenroth (EAWAG, Dübendorf), Reynald Pasche (SANE, Nyon), Dr. Madlaina Peter (Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau, Aarberg), Carrol Plummer (Vivent SA, Gland), Ruedi Schwärzel (Agroscope Changins), Dr. Laura Stefan (Agroscope Changins).

# 11 Anhang

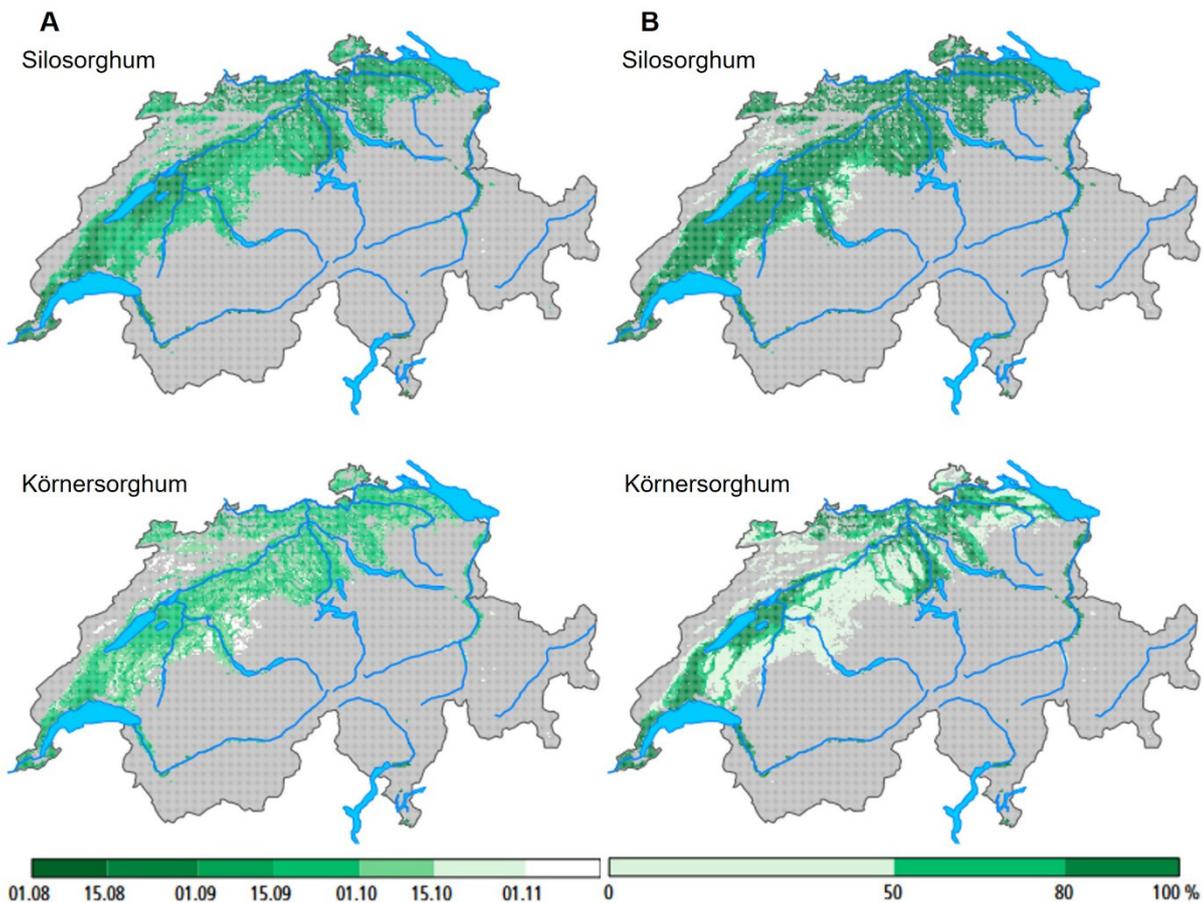
## 11.1 Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 5



Ergänzende Abbildung 11.1 1 Beispiel einer qualitativen Bodenkartierung für den Kanton Solothurn: Quelle: Geoportal Kanton Solothurn (2023).

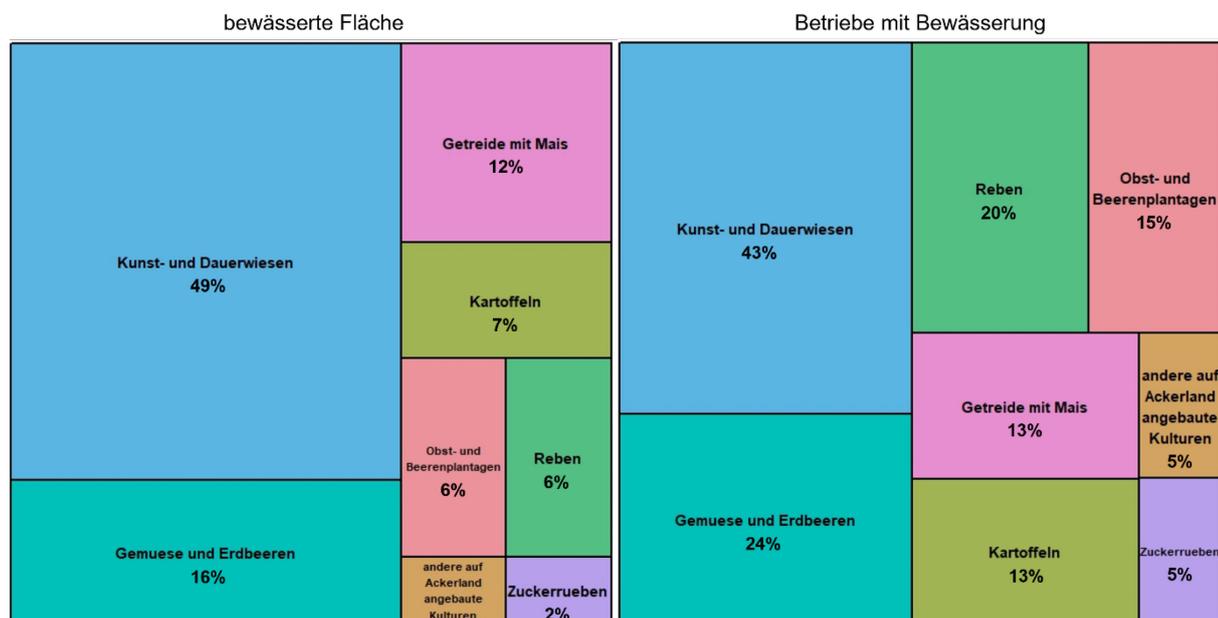


Ergänzende Abbildung 11.1 2 Anteil Jahre der Referenzperiode 2000-2019 (in Prozent), in welcher die Wärmesummen (1. Mai bis 15. Oktober) früh (oben), mittelfrüh (Mitte) bzw. mittelspät (unten) abreifender Maissorten im Zeitraum 2000-2019 erreicht wurden (links: Silomais, rechts: Körnermais). Grau eingefärbt sind Gebiete ausserhalb des heutigen Ackerlands. Quelle: Buzzi et al. (2021).

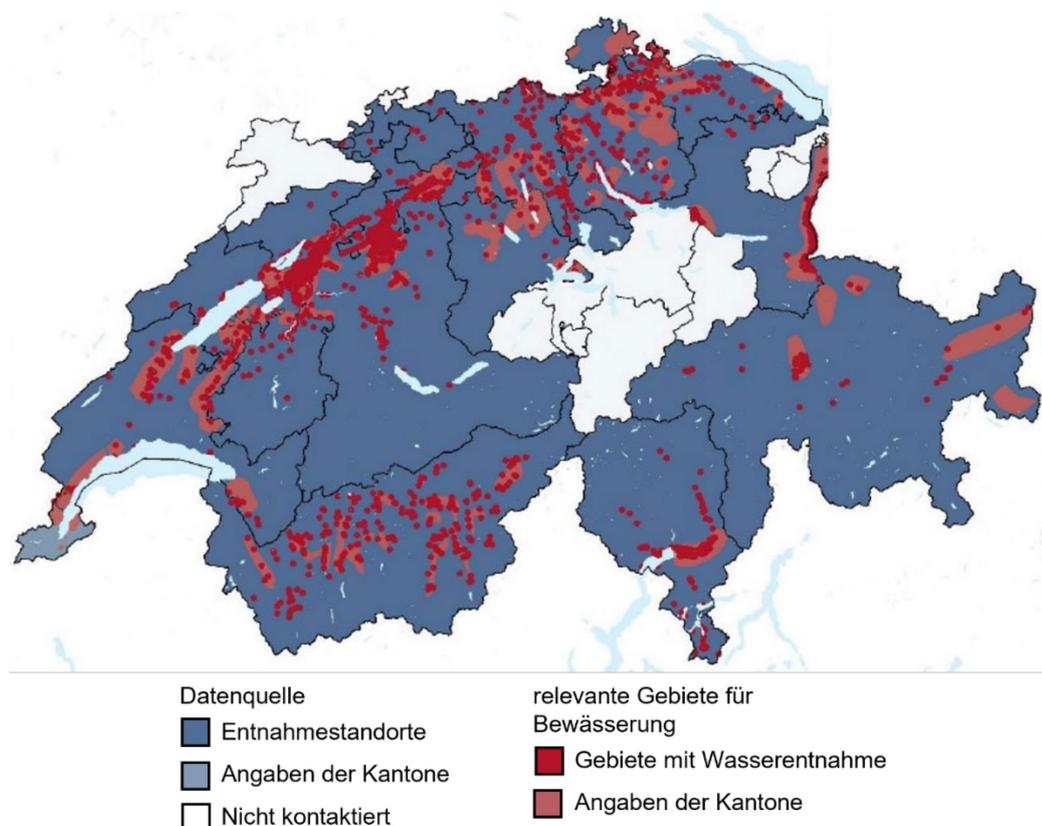


Ergänzende Abbildung 11.1-3 Thermische Eignung von Schweizer Landwirtschaftsflächen für den Anbau von Silo- und Körnersorghum. (A) Karte des mittleren Reifedatums von Silosorghum (oben) und Körnersorghum (unten). Weiss eingefärbt sind Gebiete, in denen Sorghum, gemäss Berechnungen für des heutige Klima, die Reife erst nach dem 31. Oktober oder gar nicht erreichen würde. (B) Wahrscheinlichkeit, dass Silosorghum (oben) und Körnersorghum (unten) die für die Reife nötigen Temperatursummen bis spätestens am 31. Oktober erreichen. Grau eingefärbt sind Gebiete ausserhalb des heutigen Ackerlands. Quelle: Bütikofer et al. (2023).

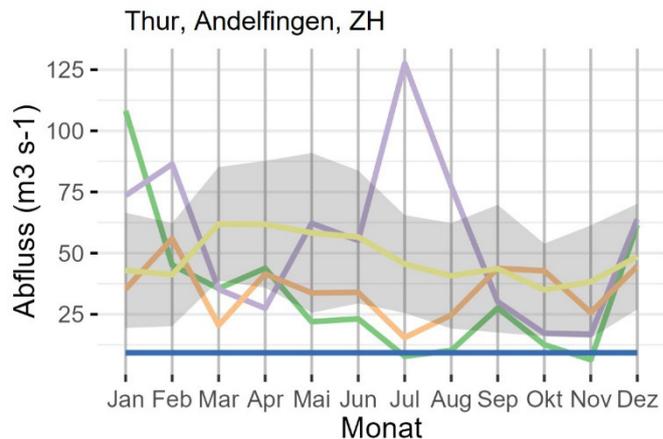
## 11.2 Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 6



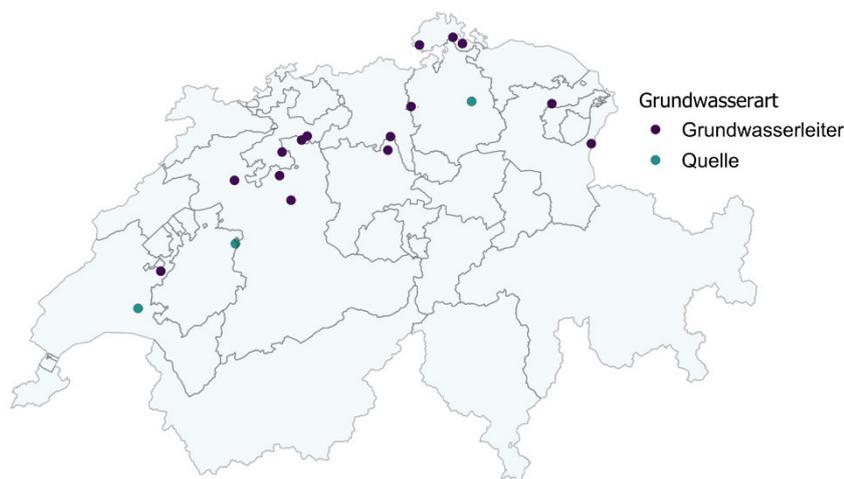
Ergänzende Abbildung 11.2-1 Prozentualer Anteil der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche pro Kulturart (links) und der Anteil der Betriebe, die diese Kulturarten bewässern (rechts), in der Schweiz im Jahr 2020. Die Daten sind das Ergebnis einer Umfrage des Bundesamts für Statistik im Jahr 2020 (Bundesamt für Statistik BFS, 2022).



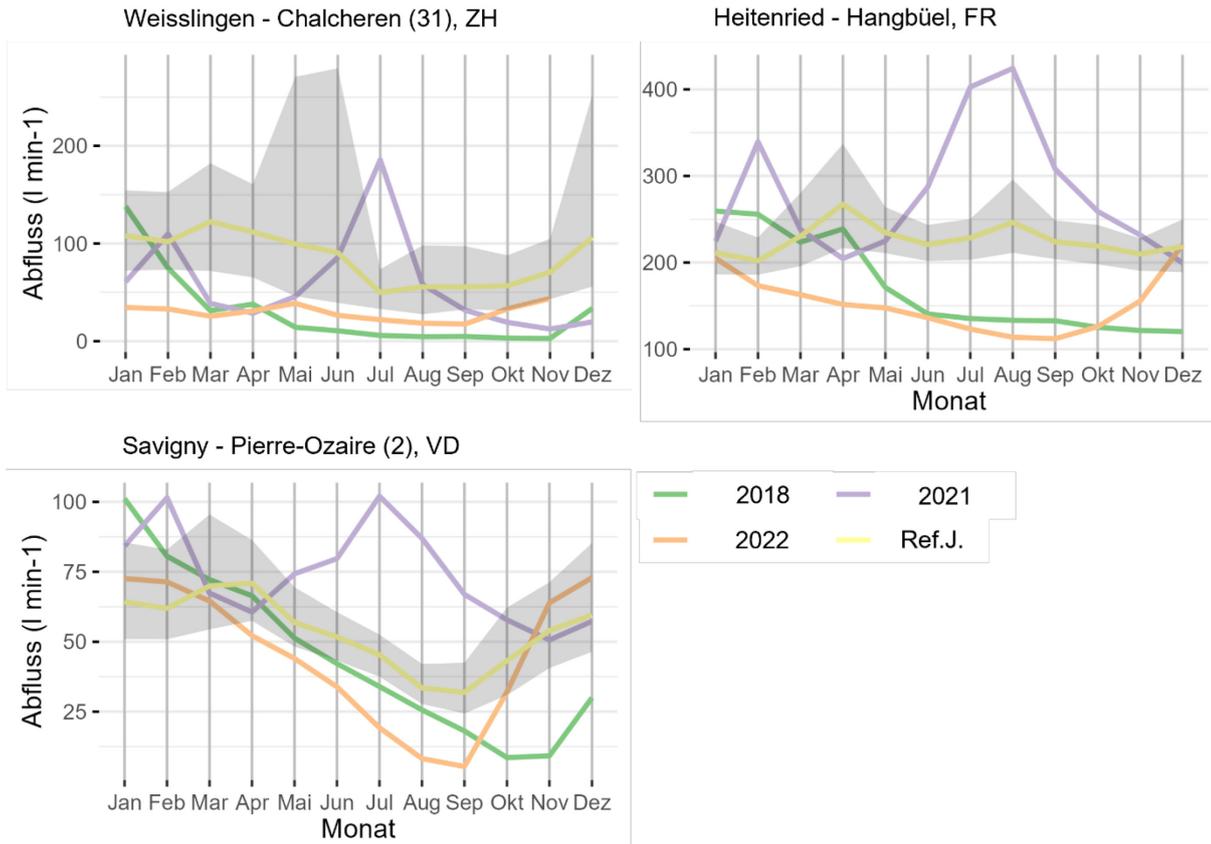
Ergänzende Abbildung 11.2-2 Wichtige Regionen für die Bewässerung in der Schweiz. Die Informationen basieren auf den Angaben der kantonalen Behörden zur Bewässerung in der Landwirtschaft (hellrot) und den Standorten der Wasserentnahmestellen für die Bewässerung aus Grundwasser oder Oberflächengewässern (dunkelrot). Quelle: HAFL et al. (Hrsg.) (2023).



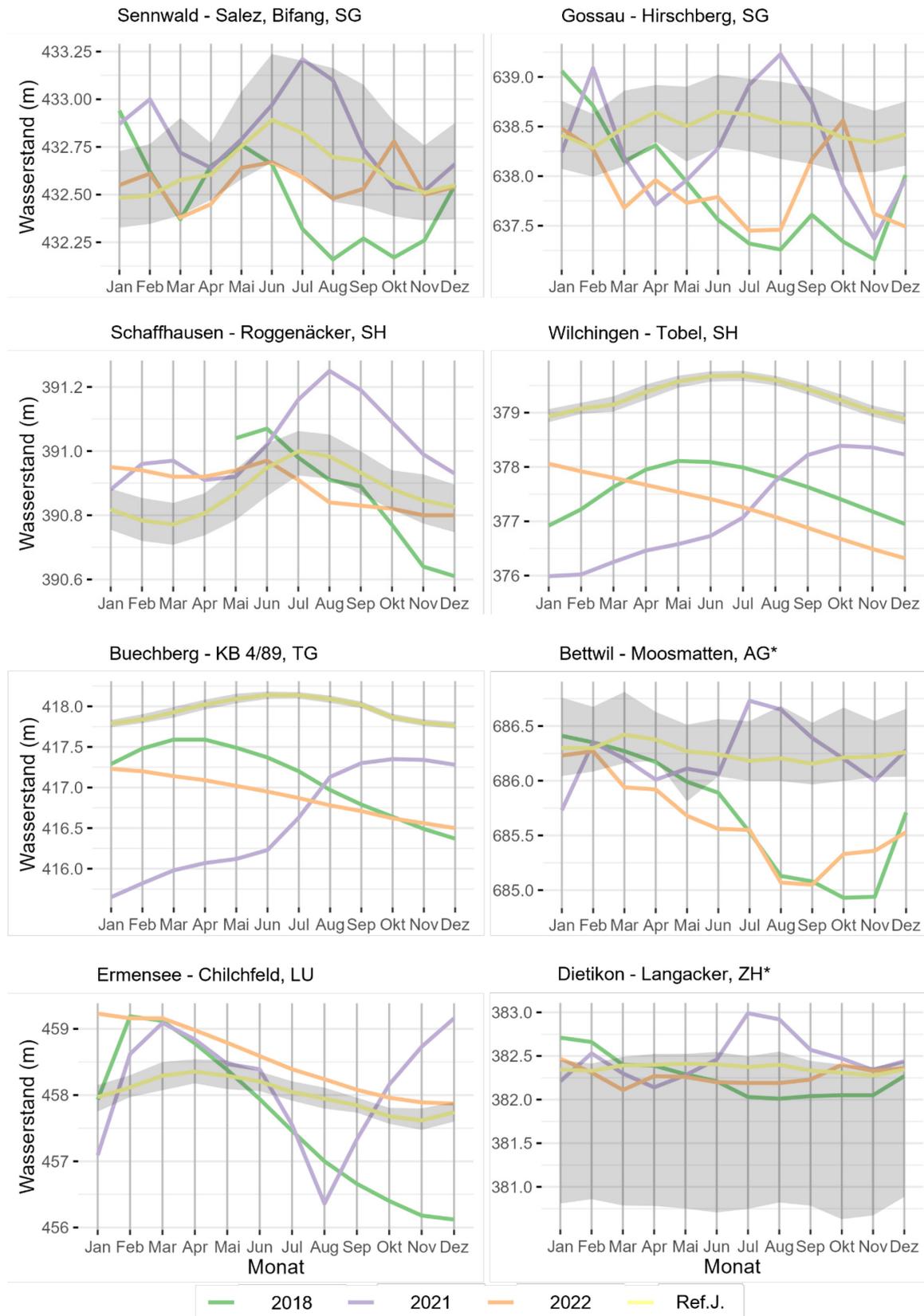
Ergänzende Abbildung 11.2-3 Monatlicher Abfluss der Thur, wie er von der Messstation im Schweizer Mittelland ermittelt wurde. Die Abflüsse sind als Mittelwerte für eine Referenzperiode (1981-2010), die beiden bekannten "Dürrejahre" 2018 und 2022 sowie das "nasse" Jahr 2021 dargestellt. Die graue Fläche um den mittleren Abfluss der Referenzperiode (gelbe Linie) zeigt die maximalen und minimalen Abflüsse im Monatsmittel über den Referenzzeitraum. Die blaue Linie in den Grafiken stellt den Q347-Wert dar, der an dieser Messstation über die Jahre 1904-2018 ermittelt wurde. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie (2023); Kanton Aargau, Fachbereich Hydrometrie (2023).



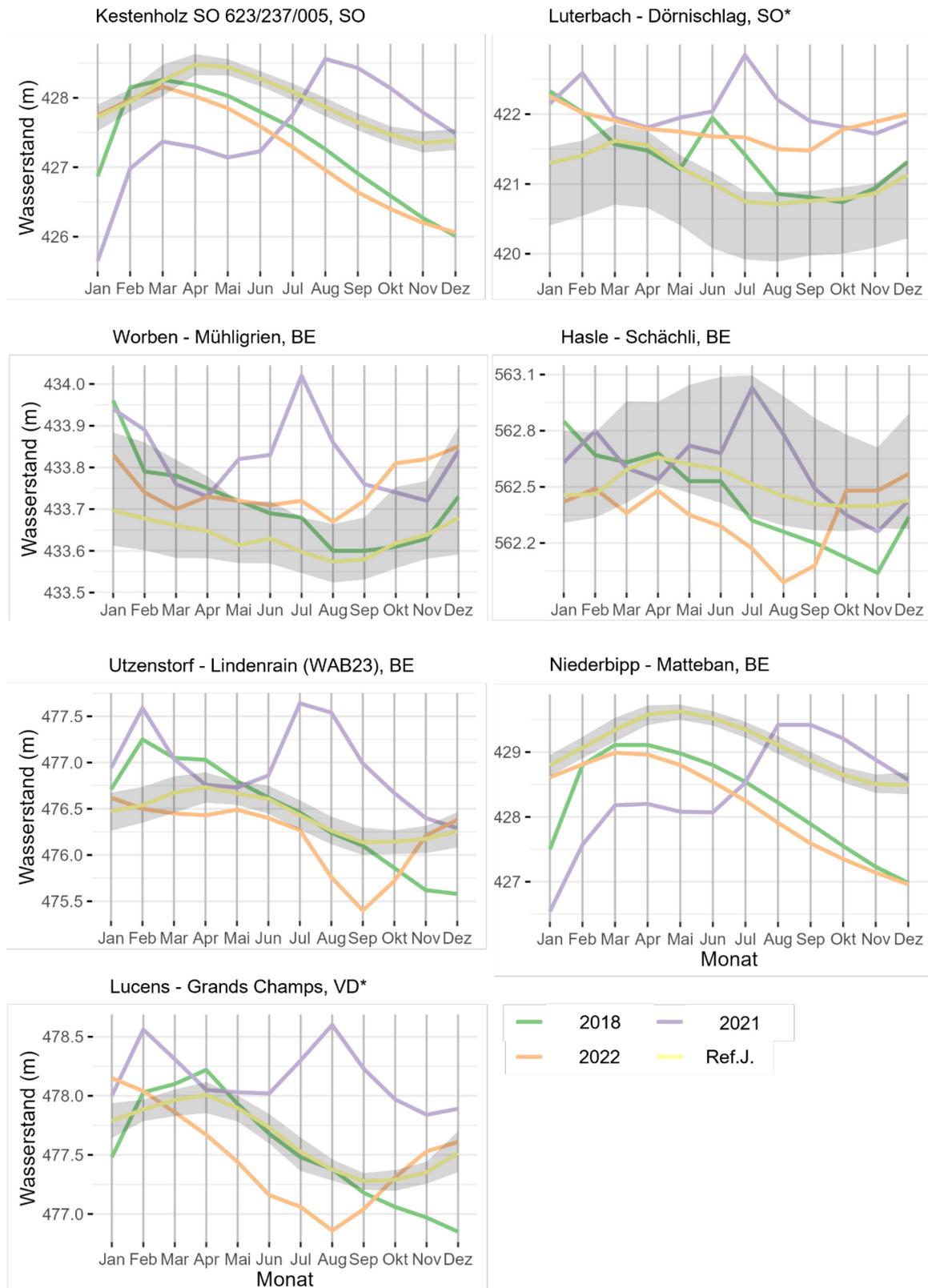
Ergänzende Abbildung 11.2-4 Standorte von 18 NAQUA - Modul QUANT Grundwassermessstellen im Schweizer Mittelland, darunter 15 Grundwasserspiegel und drei Quellen, für welche monatliche Durchschnittswasserstände und Abflüsse berechnet wurden. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU & Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA (2023). Quelle der Geodaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2023).



Ergänzende Abbildung 11.2-5 Monatlicher Abfluss an drei Grundwasser-Quellmessstellen im Schweizer Mittelland. Dargestellt sind die Abflüsse als Mittelwerte für die jeweiligen Referenzperioden (ZH: 2001-2010; FR: 2003-2010; VD: 1983-2010), die beiden bekannten "Dürrejahre" 2018 und 2022 sowie das "nasse" Jahr 2021. Die graue Fläche um den mittleren Abfluss der Referenzperiode (gelbe Linie) zeigt den maximalen und minimalen Abfluss im Monatsdurchschnitt der Referenzperiode. ZH, Zürich; FR, Freiburg; VD, Waadt. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU & Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA (2023).



Ergänzende Abbildung 11.2-6, Teil 1



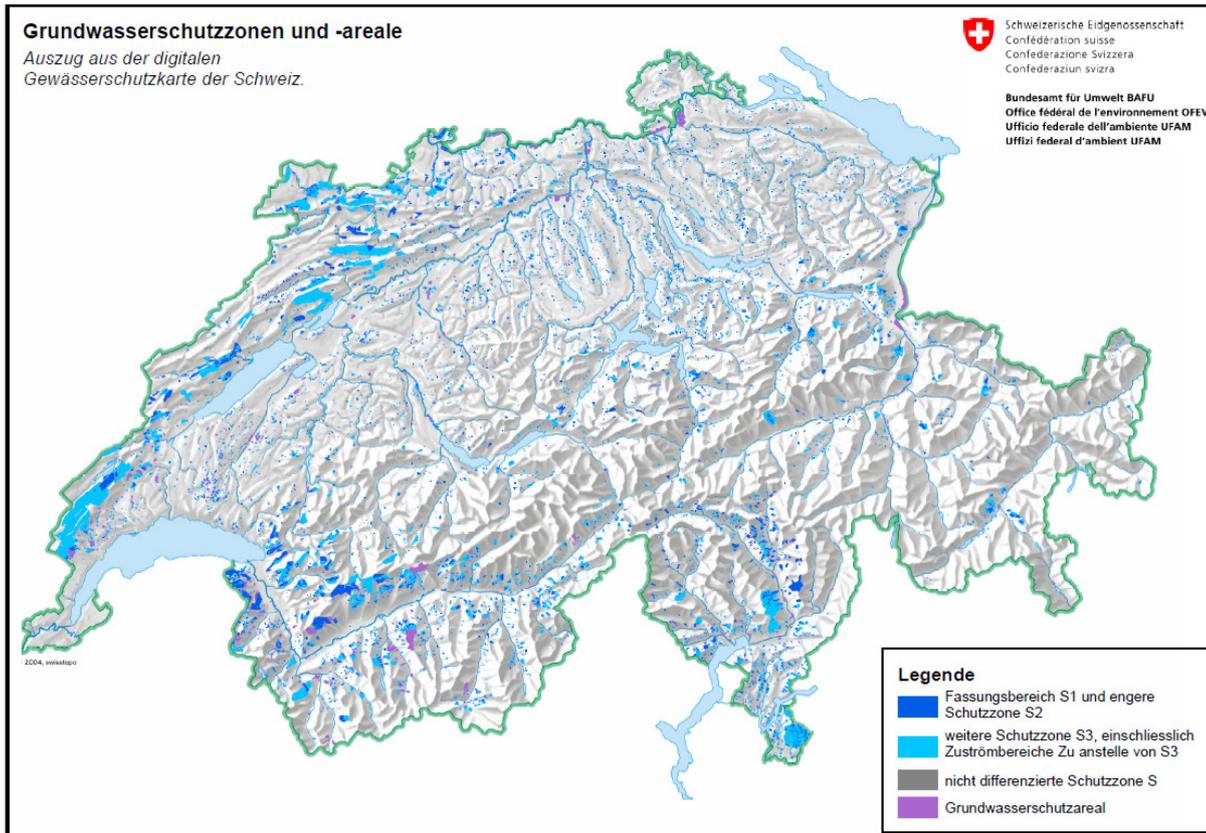
Ergänzende Abbildung 11.2-6, Teil 2

Ergänzende Abbildung 11.2-6, Teil 3

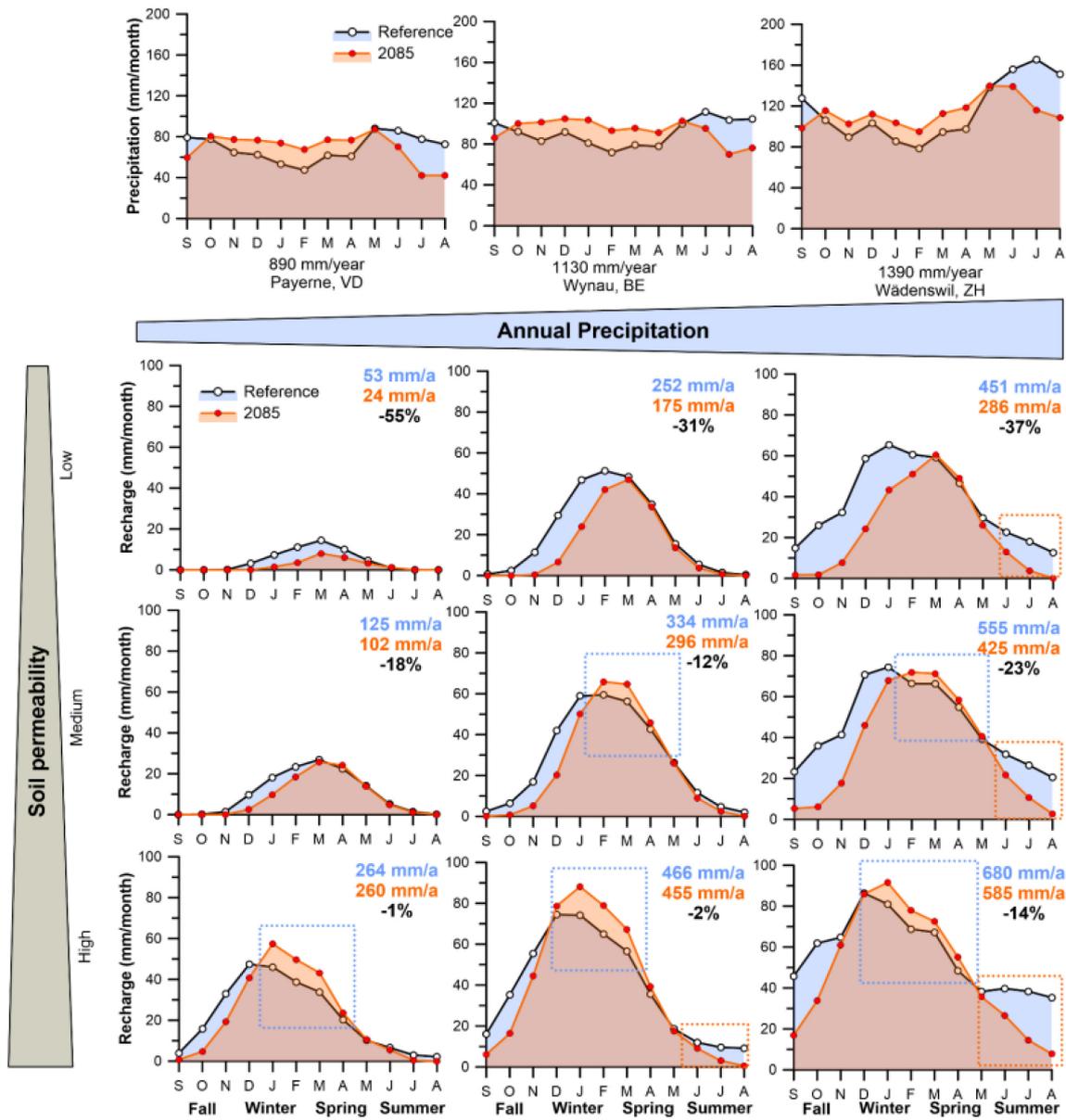
Messstellennummer	Bezeichnung	Kanton	Referenzjahre
6523	Sennwald - Salez, Bifang	SG St. Gallen	1981-2010
6707	Gossau - Hirschberg	SG St. Gallen	1984-2010
6571	Schaffhausen - Roggenäcker	SH Schaffhausen	1987-2010
6537	Wilchingen - Tobel	SH Schaffhausen	1981-2010
6739	Buechberg - KB 4/89	TG Thurgau	1993-2010
6580*	Bettwil - Moosmatten	AG Aargau	2000-2010
6542	Ermensee - Chilchfeld	LU Luzern	1989-2010
6559*	Dietikon - Langacker	ZH Zürich	1999-2010
6535	Kestenholz SO 623/237/005	SO Solothurn	1987-2010
6557*	Luterbach - Dörnischlag	SO Solothurn	1999-2010
6772	Worben - Mühligrien	BE Bern	1981-2010
6709	Hasle - Schächli	BE Bern	1981-2010
6718	Utzenstorf - Lindenrain, WAB23	BE Bern	1981-2010
6713	Niederbipp - Matteban	BE Bern	1981-2010
6575*	Lucens - Grands Champs	VD Waadt	1981-2010

\* Der durchschnittliche monatliche Wasserstand entspricht den täglichen Höchstwasserständen und nicht den täglichen Durchschnittswasserständen, da sich an der Messstation ein Pumpbrunnen befindet.

Ergänzende Abbildung 11.2-6 Monatliche Wasserstände an 15 Grundwassermessstellen im Schweizer Mittelland. Dargestellt sind die Wasserstände als Mittelwerte für die jeweiligen Referenzperioden, die beiden bekannten "Dürrejahre" 2018 und 2022 sowie das "nasse" Jahr 2021. Die graue Fläche um den mittleren Wasserstand der Referenzperiode (gelbe Linie) zeigt den maximalen und minimalen Wasserstand im Monatsmittel über die Referenzperiode. Die Stationsnummer, der Name, der Standortkanton und die verfügbaren Daten für die Referenzjahre sind in der Tabelle angegeben. Datenquelle: Bundesamt für Umwelt BAFU & Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA (2023).



Ergänzende Abbildung 11.2-7 Grundwasserschutzzonen und -gebiete in der Schweiz (Karte von 2015). Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU (2023b). Die Bewässerung (mit sauberem Oberflächen- oder Grundwasser) ist an Trinkwasserentnahmestellen und in der näheren Umgebung (Grundwasserschutzzonen S1 und S2) nicht erlaubt, wobei für die S2-Zonen von den zuständigen Behörden Ausnahmen gewährt werden können (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2004).



Ergänzende Abbildung 11.2-8 Simulierte Veränderungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen an drei Standorten im Schweizer Mittelland mit ähnlicher Jahrestemperatur, aber unterschiedlichen Niederschlägen und drei Böden mit unterschiedlicher Durchlässigkeit (hoch, mittel, niedrig). Das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5, rot) ist für die ferne Zukunft (2070-2099) dargestellt und mit der Referenzperiode (1981-2010, blau) verglichen. Quelle: Hunkeler et al. (2021).

Vos questions

349  
620  
752  
165  
Historique  
des données

📍 Me géolocaliser

🔍 Rechercher

Accueil > Voir la carte > Métropole

Métropole

Outre-Mer

Carte des arrêtés des eaux superficielles au 21/08/2023 publiés avant le 20/08/2023



Sur quel territoire porte votre recherche ? Hérault ↻

Carte des arrêtés des eaux superficielles au 21/08/2023 (arrêtés publiés le 20/08/2023 minuit)

[Qu'est-ce qu'une zone d'alerte ?](#)

Ce département est couvert par la(les) zone(s) d'alerte suivante(s) :

**Zones d'alerte eaux superficielles**

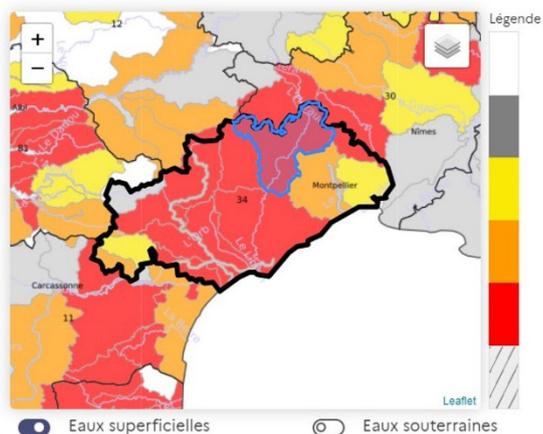
- 📍 Axe Lez soutenu, de sa source à son embouchure Vigilance
- 📍 Axe Orb soutenu à l'aval du barrage des Monts d'O... Alerte renforcée
- 📍 Bassin versant de l'Agout Vigilance
- 📍 **Bassin versant de l'Hérault amont de la confluenc...** **Crise**

Arrêt des prélèvements non prioritaires y compris des prélèvements à des fins agricoles. Seuls les prélèvements permettant d'assurer l'exercice des usages prioritaires sont autorisés (santé, sécurité civile, eau potable, salubrité). Consultez l'arrêté préfectoral pour accéder au détail des mesures.

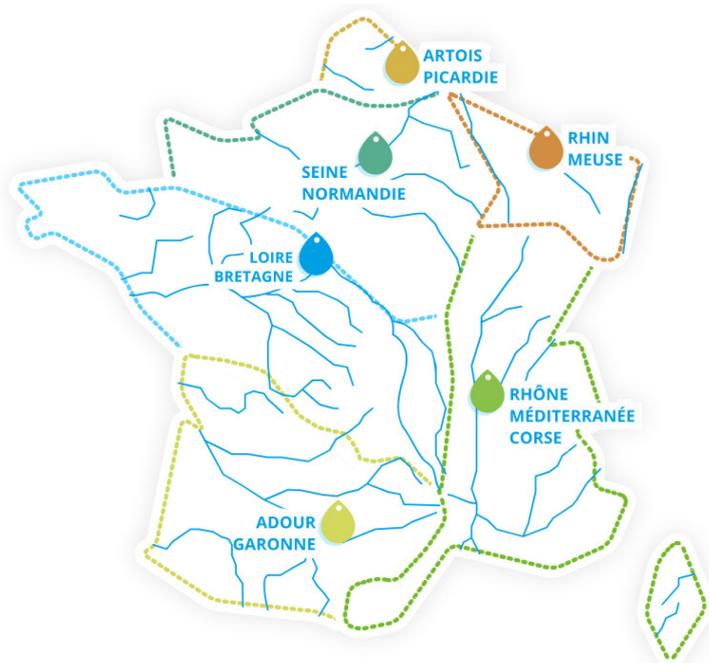
Arrêté : DDTM34-2023-08-14157 Abroge l'arrêté DDTM34-2023-07-14130  
 Début : 17 août 2023  
 Fin : 30 novembre 2023

Accéder à l'arrêté préfectoral

- 📍 Bassin versant de l'Orb de la Source jusqu'à l'am... Crise
- 📍 Bassin versant de l'Orb à l'aval de la confluence... Crise



Ergänzende Abbildung 11.2-9 Auszug aus der französischen Dürre-Information-Website PROPLUVIA (PROPLUVIA) vom 21.08.2023 (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2023). (Oben) Eine interaktive Karte zeigt die in allen Départements Frankreichs geltenden Beschränkungen für Oberflächenwasser und Grundwasser. (Unten) Detailliertere Informationen über die Beschränkungen und die zugehörigen Präfekturdekrete können pro Département (hier Département 34 - Hérault) und Wasserwarngebiet abgerufen werden.



Ergänzende Abbildung 11.2-10 Sechs Wasserbehörden auf der Grundlage von sieben Flusseinzugsgebieten auf dem französischen Kontinentalgebiet (Les agences de l'eau, 2023).

Ergänzende Tabelle 11.2-1 Bestehende und neue Bewässerungsgenossenschaften im westlichen Mittelland (Freiburg und Waadt), wo sich die Entnahme von Bewässerungswasser von Flüssen auf Seen oder Grundwasserspiegel verlagert hat. Die wichtigsten bewässerten Kulturen sind Gemüse, Kartoffeln, Tabak und Mais

Genossenschaft oder Projekt	Anfangs-jahr	Kanton - Kommune	Bewässerte Fläche (ha)	Wasserquelle	Natürliches Gebiet
Société d'arrosage Duc-Liniger-Messer	2005	Freiburg - Forel, Rueyres-les-Prés, Morens	260 (792)	Neuenburger See	Petite-Glâne
Bewässerungsgenossenschaft Ried-Moos	ub	Freiburg- Ried, Kerzers	330	Grundwasser	Bibera, Grand-Canal
Bewässerungsgenossenschaft Gempenach	ub	Freiburg-Gempenach	70	Grundwasser	Biberen
Bewässerungsgenossenschaft Galmiz	ub	Freiburg-Galmiz	140	Broye Kanal	Galmiz canal
Société coopérative de pompage au lac à Portalban	2014	Freiburg, Waadt- Delley-Portalban, Missy, St-Aubin, Vallon, Vully-les-Lacs, Gletterens, Grandcour	1740	Neuenburger See	Petite-Glâne
Arrobroye	(2026)	Freiburg, Waadt- Estavayer, Cugy, Granges-Marnand, Grandcour, Payerne, Corcelles	4000	Neuenburger See	Broye

ub, unbekannt.

Ergänzende Tabelle 11.2-2 Politische Mechanismen auf EU- und nationaler Ebene, die Investitionen in und die Instandhaltung von Bewässerungssystemen in Frankreich beeinflussen, und ihre Auswirkungen auf die Grundwasserentnahme. Quelle: Rouillard (2020)

Wichtiger politischer Mechanismus	Auswirkungen auf die Entwicklung der Bewässerung	Auswirkungen auf die Grundwasserentnahme
1945-1992		
EU-Markt- und Preisinterventionen (GAP-Garantiefonds)	Minimale Produktpreise und stabile Einkommen bieten günstige Voraussetzungen für private Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur	+
Nationale und europäische Strukturfonds für die Modernisierung von landwirtschaftlichen Betrieben	Subventionen für gezielte Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur	++
1992-2003		
Gekoppelte Direktzahlungen und Bewässerungsprämie	Direkte Einkommensbeihilfen stärken die Investitionskapazitäten auf Betriebsebene (z. B. für den Aufbau neuer Bewässerungsinfrastruktur) und den Cashflow zur Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur	++
Entwicklungspläne für den ländlichen Raum: Investitionen	Subventionen für gezielte Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur	+
Entwicklungspläne für den ländlichen Raum: Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen	Kompensation von Einkommensverlusten und zusätzlichen Kosten für die Einführung von weniger wasserintensiven Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmethoden	-
2003-2020		
Entkoppelte Direktzahlungen	Direkte Einkommensstützung erhält die Investitionskapazität und den Cashflow aufrecht, fördert aber nicht direkt die Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion	0
Ökologisierung	Zahlungen zur Belohnung von Anbaudiversifizierung, Dauergrünland und ökologischen Schwerpunktfeldern tragen dazu bei, den Anreiz zum Anbau wasserintensiver Kulturen zu verringern	-
Entwicklungspläne für den ländlichen Raum: Investitionen	Subventionen für gezielte Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur (zusätzliche Umweltauflagen und Finanzierung von Ausgleichsreservoirs)	+/-
Entwicklungspläne für den ländlichen Raum: Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen	Kompensation von Einkommensverlusten und zusätzlichen Kosten für die Einführung von weniger wasserintensiven Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmethoden	-

Ergänzende Tabelle 11.2-3 Schätzung und Vergleich der Lebensdauer, Obsoleszenz und Abschreibung von Tropf- und Rollomat-Bewässerungssystemen. Angepasst aus Lacroix et al. (2015)

Typ der Ausrüstung	Tropfbewässerung				Rollomat
	Unterirdisch	Oberirdisch			
		Mehrweg		Einweg	
	Flachtröpfer	Zylindrische Tröpfer	Flachtröpfer	Band	
Obsoleszenz (Jahre)	15	15	3	2	15
Lebensdauer (Stunden)	3'000	3'000	600	400	15'000
Technische Abschreibung (Jahre)	8	8	2	1	9

Ergänzende Tabelle 11.2-4 Schätzung und Vergleich der Kosten für eine 30 ha große Mais-Anbaufläche von Tropf- und Rollomat-Bewässerungssystemen. Angepasst aus Lacroix et al. (2015)

Typ der Ausrüstung		Tropfbewässerung				Rollomat	
		Unterirdisch	Oberirdisch				
			Mehrweg		Einweg		
		Flachtropfer	Zylindrische Tropfer	Flachtropfer	Band		
Investition	€	103'500	108'000	47'000	42'500	53'500	
	€ ha <sup>-1</sup>	3'450	3'600	1'567	1'417	1'783	
Jährliche Festkosten*	€ ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup>	518	563	570	643	240	
Betriebskosten	c€ m <sup>-3</sup>	2,5	2,5	2,5	2,5	4,4	
	€ ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup>	50	50	50	50	87	
Lohnkosten	während der Saison	€ ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup>	23	23	23	23	78
	Auf- und Ablegen	€ ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup>	68**	162	213	145	-
Jährliche Gesamtkosten	€ ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup>	659	798	856	861	405	

\* mit technischer Abschreibung der Ausrüstung. \*\*Jährliche Zuweisung der Kosten für das Auf- und Ablegen der Ausrüstung.

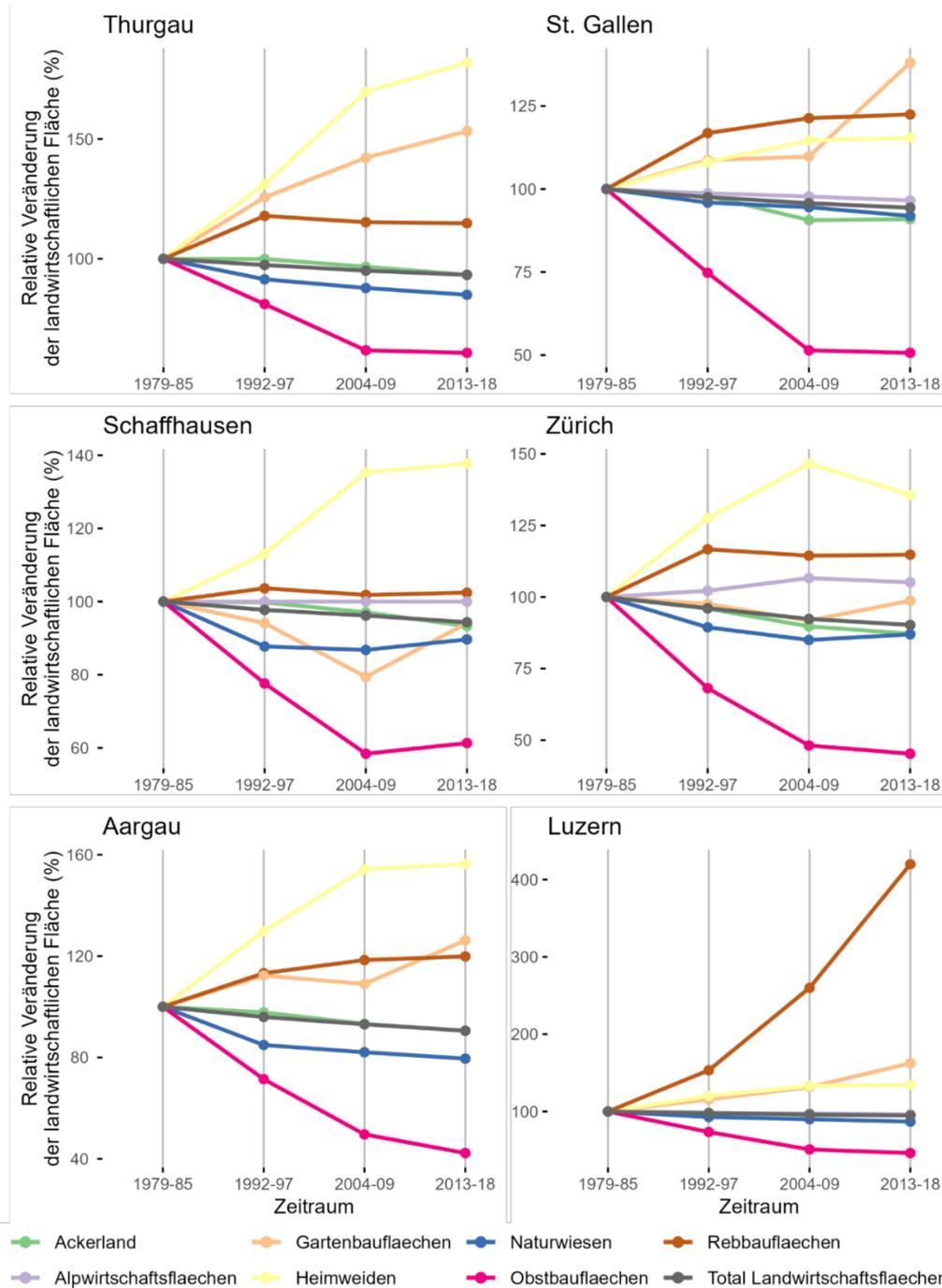
Ergänzende Tabelle 11.2-5 Potenzial der satellitengestützten Fernerkundung zur Erkennung von Bewässerungs-  
informationen aus dem Weltraum in Abhängigkeit von der Reichweite der Anwendung. Quelle: Massari et al. (2021)

Ebene	Bewässerungskartierung	Bewässerungsmenge	Bewässerungszeiten
Produkte auf lokaler/feldbezogener Ebene zur Unterstützung von Wasserwirtschaft und Landwirtschaft (ca. <100 m)	Mit SAR <sup>1</sup> und thermischen Daten (bis zu 30 m mit Landsat und S2 <sup>2</sup> -S3 <sup>3</sup> , 10-100 m mit SAR S1-Daten).	Bis zu 10-100 m mit SAR-Daten und 30 m mit optischen und Nahinfrarot-Sensoren. Die Genauigkeit ist durch die zeitliche Auflösung der Sensoren und das Rauschen begrenzt.	Mit SAR, thermischen und optischen Daten je nach Standort. Begrenzt auf eine zeitliche Auflösung von mehr als einem Tag.
Produkte auf nationaler/regionaler Ebene zur Unterstützung der Wasserwirtschaft (500 m-1 km)	Mit SAR- (z. B. S1) und Thermaldaten (z. B. MODIS, S2-S3) und deren Kombination. Geeignet für relativ große landwirtschaftliche Flächen.	Mit SAR- (z. B. S1) und Thermaldaten (z. B. MODIS, Landsat, S2, S3) und deren Kombination. Die Genauigkeit hängt von der Revisionszeit der Satelliten und dem Rauschen ab. Wolkenbedeckung kann ein Problem darstellen.	Täglich mit thermischen Daten (z. B. MODIS). Wöchentlich und unter der Woche mit SAR je nach Standort und anderen sichtbaren und Nahinfrarot-Beobachtungen wie S2 und S3 je nach Wolkenbedeckung.
Produkte auf regionaler /globaler Ebene (>10 km)	Mit aktiven und passiven großräumigen Mikrowellenbeobachtungen, die sich auf große und intensiv bewässerte Gebiete beschränken, die viel größer sind als die räumliche Auflösung des Produkts (große und intensiv bewässerte Gebiete in Indien, USA, China, Brasilien). Mit jedem optischen Nahinfrarotsensor.	Mit aktiven und passiven großräumigen Mikrowellenbeobachtungen, die auf große und intensiv bewässerte Gebiete beschränkt sind, die viel größer sind als die räumliche Auflösung des Produkts. Rauschen kann ein Problem sein. Mit allen sichtbaren und Nahinfrarot-Sensoren. Gravimetrische Messungen (GRACE).	Bei großräumigen Mikrowellenbeobachtungen möglicherweise täglich, wenn das Signal im Verhältnis zum Rauschen ausreichend stark ist, und bei thermischen Daten

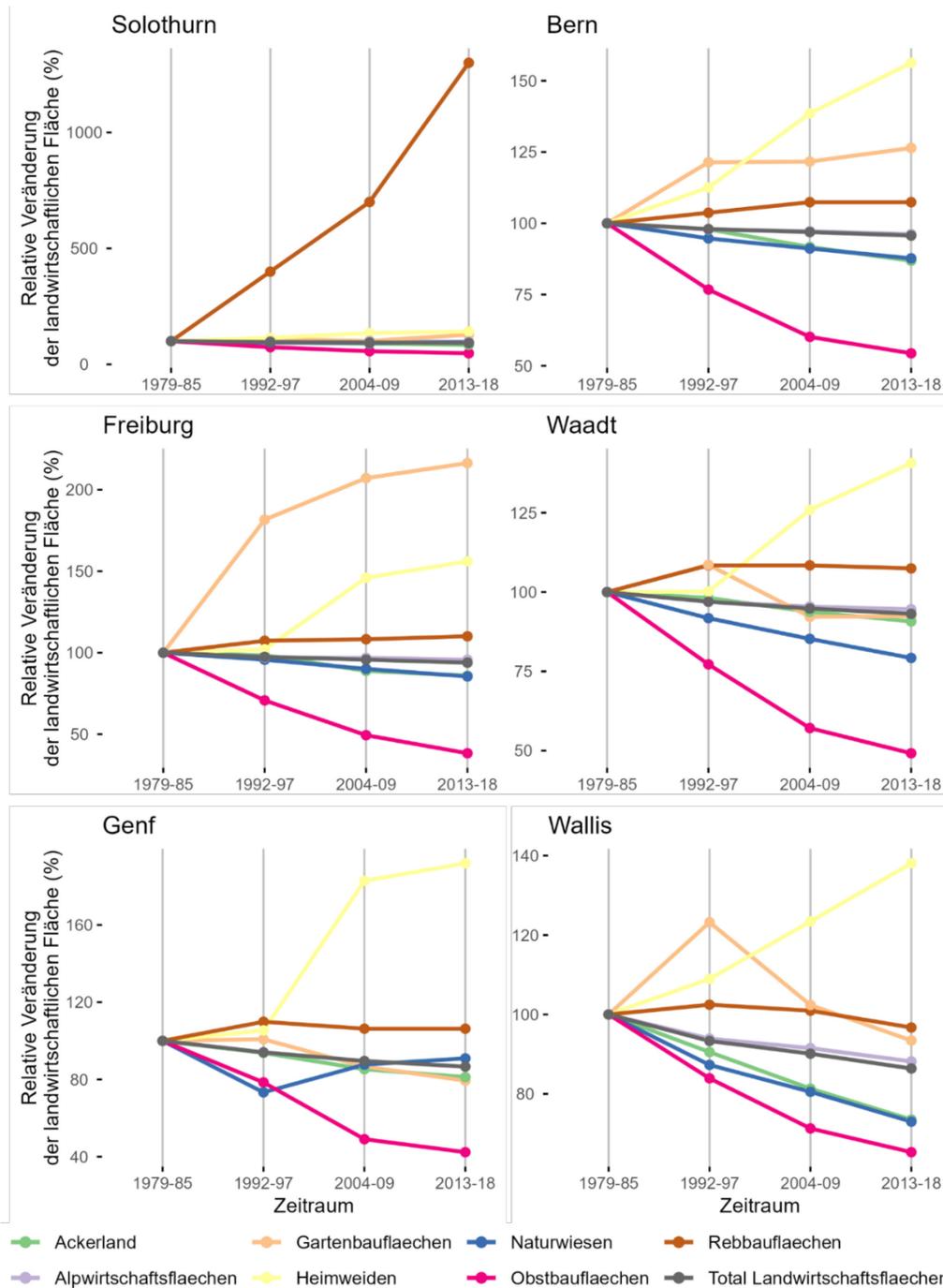
<sup>1</sup>Synthetic Aperture Radar; <sup>2</sup>Sentinel-2; <sup>3</sup>Sentinel-3.

Die Informationen in der Tabelle enthalten nicht die Datenprodukte der kommerziellen Satellitenkonstellation Planet, die eine hohe zeitliche (täglich) und räumliche Auflösung (3 m) bieten und die sich als wirksam für die Erkennung von Bewässerungsereignissen in den USA erwiesen haben (Dhungel et al., 2023; Planet Labs PBC, 2023).

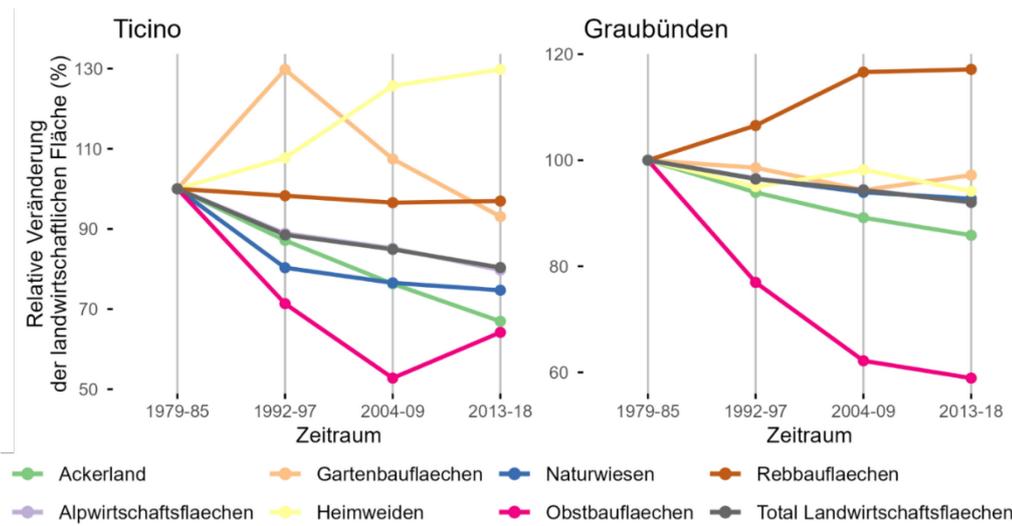
### 11.3 Ergänzende Abbildungen und Tabellen - Kapitel 7



Ergänzende Abbildung 11.3 1 Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzflächen im Vergleich zu 1978-1985 in den Kantonen des östlichen Mittellandes. Angepasst aus Bundesamt für Statistik BFS (2023a).



Ergänzende Abbildung 11.3-2 Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Vergleich zu 1978-1985 in den Kantonen des westlichen Mittellandes und der Südschweiz. Angepasst aus Bundesamt für Statistik BFS (2023a).



Ergänzende Abbildung 11.3-3 Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzflächen im Vergleich zu 1978-1985 in den Kantonen der Südschweiz. Angepasst von Bundesamt für Statistik BFS (2023a).