

Hessisches Landesamt
für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

HESSEN



10 Jahre Forschung im Geisenheimer VineyardFACE

Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen
auf Reben, Weinqualität und das Ökosystem Weinberg



Klimafolgenforschung in Hessen – Schwerpunktthema



FACHZENTRUM
KLIMAWANDEL
UND ANPASSUNG

Impressum

Klimafolgenforschung in Hessen – Schwerpunktthema

Redaktion: Marion Hemfler, HLNUG

Erarbeitung der Broschüre: Hochschule Geisenheim University
Von-Lade-Str.1, D-65366 Geisenheim

Layout: Nadine Senkpiel

Herausgeber, © und Vertrieb: Hessisches Landesamt für Naturschutz,
Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 6939-111

E-Mail: vertrieb@hlnug.hessen.de

www.hlnug.de

Stand: November 2024

Bildnachweis: Umschlagvorderseite: Luftbildaufnahme der Geisenheimer VineyardFACE Anlage
© Winfried Schönbach

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.



Prof. Dr. Thomas Schmid
Präsident des
Hessischen Landesamtes
für Naturschutz, Umwelt
und Geologie

Der menschengemachte Klimawandel beeinflusst unser Leben bereits jetzt auf drastische Weise: Extremereignisse wie Hitzewellen, Dürren und Starkregen werden immer häufiger – und dies macht nicht nur uns Menschen zu schaffen, sondern auch der Natur. Ökosysteme stehen unter Druck, verändern sich und passen sich an. Auch für uns Menschen ist Anpassung das Gebot der Stunde, denn mit der Natur verändern sich unsere Lebensgrundlagen, und dies hat gravierende Auswirkungen nicht zuletzt auf unsere Ernährungssicherheit.

Die steigenden Konzentrationen des Treibhausgases Kohlendioxid haben auch Folgen für den Weinbau, der in Hessen ein traditionsreiches Kulturgut darstellt: Wie entwickelt sich der Wein der Zukunft? Wie wirkt sich das veränderte Klima auf die Qualität aus? Wird sich die Aktivität von Schädlingen verändern? Um Antworten auf diese und viele weitere Fragen zu finden, erforscht die Hochschule Geisenheim University seit zehn Jahren mit Unterstützung des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), wie sich erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Luft auf die Reben auswirken. Bei diesen sogenannten FACE-Experimenten (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) werden die klimatischen Bedingungen der Zukunft simuliert, indem die Luft über den Reben in zwei Meter Höhe mit Kohlendioxid angereichert und verweht wird, und es wird untersucht, welche Folgen das hat. Die vorliegende Broschüre gibt einen Einblick in die vielfältigen Ergebnisse der vergangenen Jahre.

Vorwort



Prof. Dr. Annette Reineke
Vizepräsidentin
Hochschule Geisenheim
University

Der Weinbau ist nicht nur ein wichtiger Wirtschaftszweig, sondern prägt seit Jahrhunderten auch unsere Kultur und Landschaft. Weinberge formen das Landschaftsbild vieler Regionen und tragen wesentlich zur Identität derselben bei. Zugleich stellt der Klimawandel den Weinbau vor neue, gravierende Herausforderungen. Steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster, extremere Wetterereignisse und höhere atmosphärische CO₂-Konzentrationen beeinflussen sowohl Reben, die mit ihnen ober- und unterirdisch vergesellschafteten Organismen als auch Trauben und damit die Weinqualität in vielerlei Hinsicht. Im Jahr 2014 wurde an der Hochschule Geisenheim eine weltweit einmalige FACE-Anlage (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) für Reben in Betrieb genommen, mit der es möglich wird, die Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration auf das Weinberg-Ökosystem und die Weinqualität zu erfassen. Diese Anlage wird mit freundlicher Unterstützung des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) betrieben und stellt eine wichtige Infrastruktur für die Forschungsprogrammatik unserer Hochschule dar. Mit dieser Broschüre wollen wir einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse der letzten zehn Jahre zu den Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration auf den Weinbau geben und damit auch mögliche Optionen aufzeigen, wie sich Winzerinnen und Winzer an die zu erwartenden veränderten Bedingungen anpassen können. Lassen Sie uns gemeinsam über die Zukunft des Weinbaus in einer sich wandelnden Welt nachdenken.

Die rasch voranschreitenden Klimaänderungen werden deutlich spürbarer. So spiegelt sich der globale Klimawandel in Hitzewellen, Dürreperioden, Starkregen- und Hagelereignissen sowie Überschwemmungen wider und hat in den letzten Jahren zu katastrophalen und drastischen Ertragsausfällen und Qualitätseinbußen geführt. Eine der Hauptursachen des globalen Klimawandels liegt im drastischen Anstieg der Konzentrationen von sog. Treibhausgasen in der Atmosphäre. Hierzu zählen Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), aber auch rein anthropogene Gase wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Die meisten Treibhausgase haben indirekte Effekte auf Ökosysteme, da sie in einer Atmosphäre die Wärmestrahlung zurückhalten und so die Temperatur der Erdoberfläche erhöhen. Pflanzen und andere Organismen sind zudem direkt einer zunehmend erhöhten Konzentration des Treibhausgases CO_2 ausgesetzt, was sich wiederum auf physiologische Prozesse, morphologische Eigenschaften oder andere biologische Merkmale auswirken kann.

Der Weinbau in Deutschland steht vor den Herausforderungen des Klimawandels und einer nachhaltigeren Bewirtschaftung. An der Hochschule Geisenheim wurde 2012 eine FACE-Anlage (free air carbon dioxide enrichment) für Reben errichtet, die seit 2014 in Betrieb ist. Diese weltweit einzigartige Anlage ermöglicht es, die CO_2 -Konzentration in einem Teil des Weinbergs zu erhöhen und so die Auswirkungen auf die Reben, den Ertrag und die Weinqualität zu untersuchen. In dieser Broschüre werden die Ergebnisse der ersten zehn Jahre Forschung zusammengefasst.

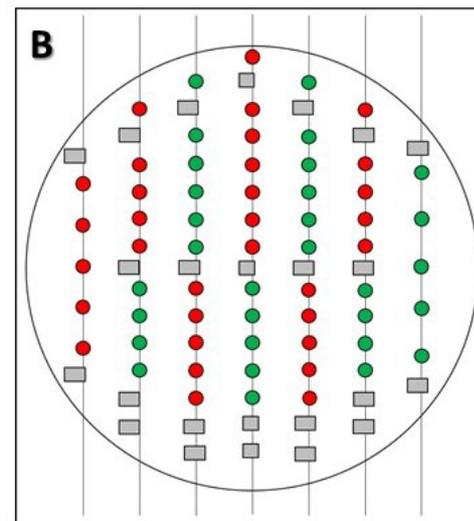
Langzeitversuche sind gerade bei Reben von größter Bedeutung, denn Reben durchlaufen nicht nur innerhalb einer Vegetationsperiode, sondern auch während der Standzeit eines Weinbergs verschiedenste Entwicklungsstadien. Das VineyardFACE ermöglicht es, diese Anpassungen über die Zeit zu verfolgen und einzuschätzen.

Kurzbeschreibung der FACE-Anlage

Der Freilandversuch „VineyardFACE“ (dt. WeinbergFACE) befindet sich an der Hochschule Geisenheim (49° 59' N, 7° 57' E) liegt in der Weinbauregion Rheingau. Riesling (Klon 198-30 Gm), veredelt auf die Unterlage SO4, und Cabernet Sauvignon (Klon 170), gepfropft auf die Unterlage 161-49 Couderc wurden 2012 in einer Nord-Süd Zeilenorientierung gepflanzt. Die Reben, mit einem Standraum von 1,6 m² pro Rebe, werden nach den Richtlinien

des integrierten Pflanzenschutzes in einer Spalier-erziehung bewirtschaftet. Der Boden, ein sandiger Lehm, ist durch die Nähe zum Rhein tiefgründig und widerstandsfähig gegen Wassermangelstress.

Im VineyardFACE werden Reben einer erhöhten CO₂-Konzentration (eCO₂, +20%) gegenüber einer Kontrolle (Umgebung, aCO₂, ca. 400 ppm im Jahr 2014 und ca. 420 ppm im Jahr 2023) aus-



- **cv. Riesling** □ Pole
- **cv. Cabernet Sauvignon**

Abb. 1: Luftbild der sechs Ringe der VineyardFACE Anlage (A) (© Winfried Schönbach) und schematische Darstellung eines Ringaufbaus (B) mit Rebzeilen, die abwechselnd mit beiden Rebsorten bestockt sind (grün: Riesling, rot: Cabernet Sauvignon); graue Kästen kennzeichnen Pfosten (Pole) für die Rebzeilen.

gesetzt. Hierzu wurde ein Ringsystem mit 12 m Durchmesser entwickelt, in dem CO_2 freigesetzt wird, während in den Kontrollringen die normale CO_2 -Konzentration der Umgebung vorliegt. Es existieren drei CO_2 -Anreicherungsringe (eCO_2) und drei Kontrollringe (aCO_2), die bis auf die CO_2 -Freisetzung gleichartig aufgebaut sind. In jedem Ring sind beide Rebsorten gepflanzt, sodass unter Ausschluss von Randeffekten jeweils ca. 25 Reben der beiden Rebsorten für Messungen zur Verfügung stehen (Abb. 1A und 1B). Jeder Ring besteht aus 36 „Türmen“, in deren Turmkopf sich ein Ventilator befindet, der in Abhängigkeit der Wind-



Abb. 2: Austrieb in der Geisenheimer VineyardFACE Anlage
© Manfred Stoll

richtung einen nach unten gerichteten Luftstrom erzeugt. Für die Dosierung der CO_2 -Freisetzung werden die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit herangezogen. Entsprechend der Orientierung und der Größe dieser beiden Vektoren erfolgt dann jeweils auf der windzugewandten Luv-Seite die Freisetzung des Gases. In der Mitte eines jeden FACE-Rings wird die CO_2 -Konzentration in einer Höhe von 1,5 m aufgezeichnet. Seit 2014 wurden die eCO_2 -Ringe von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang an 365 Tagen im Jahr begast, sofern die Windgeschwindigkeit größer als 0,1 m/s war oder die Lufttemperatur nicht unter 5 °C lag.



Abb. 3: Sommer in der Geisenheimer VineyardFACE Anlage
© Manfred Stoll

Einfluss erhöhter CO₂-Konzentration auf die Physiologie, Entwicklung und Inhaltsstoffe der Rebsorten Riesling und Cabernet Sauvignon

Reben zählen zu den Pflanzen des C3-Photosynthese-Typs und nehmen CO₂ über Spaltöffnungen (Stomata) auf, wobei sie Wasser und Sauerstoff abgeben. Bei Hitze und Trockenheit schließen sich die Stomata, um den Wasserverlust zu reduzieren. Die Zunahme an CO₂ kann zu einer höheren Effizienz der Photosynthese führen und den Wasserverbrauch durch früheren Schluss der Stomata mindern. Es ist jedoch unklar, ob dies unter Freilandbedingungen auch zu höheren (gesunden) Traubenerträgen führen kann.

Seit 2014 wird die Reaktion der Rebe auf erhöhte CO₂-Konzentrationen im Hinblick auf die Physiologie (Photosynthese, Transpiration auf Blattebene), die Biomasse (Traubenertrag, grüne Biomasse beim Laubwand-Management, Schnittholzertrag), qualitätsgebende Beereninhaltsstoffe und die phänologische Entwicklung bis hin zum Alterungspotential der fertig ausgebauten Weine untersucht.

In der **Initialisierungsphase** (2014–2017) zeigten Riesling-Reben **unter erhöhtem CO₂ (eCO₂) eine signifikant erhöhte Wüchsigkeit**, gemessen als Stammquerschnittsfläche. Beide Rebsorten reagierten mit **erhöhter Nettoassimilation** (Differenz der tagsüber gebildeten und der über Nacht veratmeten Assimilate) auf eCO₂ (WOHLFAHRT et al. 2018). In den Anfangsjahren konnte **für beide Rebsorten signifikant mehr Biomasse** (sowohl der Haupt- wie auch der Seitentriebe) **festgestellt werden**. Beide

Rebsorten zeigten eine **signifikant erhöhte stomatare Leitfähigkeit und Transpiration** und verbrauchten mehr Wasser (WOHLFAHRT et al. 2018). 2015 und 2016 hatte die **erhöhte CO₂-Konzentration** bei beiden Rebsorten einen Einfluss auf die Nettoassimilation im gesamten Jahresverlauf sowie auf die Morphologie des Blattquerschnittes.

Kohlendioxid wirkt sich bei C3-Pflanzen meist positiv auf das Wachstum aus, solange andere Faktoren (Nährstoffe, Wasserversorgung) nicht limitiert sind. So führte die **erhöhte CO₂-Konzentration** in den Anfangsjahren 2014 bis 2016 zu einem **erhöhten Traubengewicht bei beiden Rebsorten** (WOHLFAHRT et al. 2018). Der 20%ige CO₂-Anstieg hatte nur **minimale Änderungen in der Beerenzusammensetzung** bei beiden Rebsorten zur Folge. Der Zuckergehalt wurde nicht von der CO₂-Konzentration beeinflusst. Höheres Beerengewicht, höhere Äpfelsäure oder niedrigere Weinsäure konnten nur zu einigen Terminen in den Jahren 2015 und 2016 unter eCO₂ nachgewiesen werden. **Veränderungen der Trauben- und Beerenparameter blieben ohne einen negativen Einfluss auf die Fruchtqualität** (WOHLFAHRT et al. 2020). Im ersten Jahr der CO₂-Begasung 2014 zeigten sich keine Änderungen in der Zusammensetzung der Farbstoffe (Anthocyane). **Im Folgejahr (2015) war der Anthocyanengehalt unter erhöhter CO₂-Konzentration geringer**. Dies könnte zusätzlich durch die hohen Temperaturen des Jahres 2015 verstärkt worden sein (WOHLFAHRT et al. 2021).

Auch in der **Etablierungsphase** von 2019–2021, die Reben waren im achten bis zehnten Standjahr, waren die Gesamtanthocyane in der Beerenhaut von Cabernet Sauvignon unter eCO₂ in der trockenen und heißen Saison in 2020 tendenziell reduziert (KAHN et al. 2022).

Unter **eCO₂-Bedingungen** zeigte **Cabernet Sauvignon eine Tendenz zu größerem Beerenvolumen**, insbesondere bei „25% Veraison“ (Beeren zeigen ersten Farbumschlag), als Beerenvolumen und Beerengewicht signifikant höher waren. Die **Zuckerkonzentration** (Glucose, Fructose) wurde stärker vom Jahrgangs-, als vom CO₂-Effekt beeinflusst. Bei „75% Veraison“ war ein signifikanter Unterschied in der Fruktosekonzentration feststellbar. Die **Gesamt-säure** wurde von der CO₂-Konzentration nicht beeinflusst (KAHN et al. 2022; WOHLFAHRT et al. 2020).

Im Vergleich zu den Anfangsjahren gab es **keine signifikanten Steigerungen der stomatären Leitfähigkeit oder Transpiration**, aber die **Netto-assimilation** war 2019 und 2020 im Vergleich zur Kontrolle um 17% bzw. um 31% **gesteigert** (KAHN et al. 2022).

In den ersten Jahren waren die Unterschiede in der Reaktion der Jungreben auf erhöhte CO₂-Konzentration bei vielen physiologischen Prozessen deutlich stärker ausgeprägt. Nach einer vollständigen Etablierung der Reben schwächte sich die Reaktion der Reben bei manchen Parametern, insbesondere bei moderaten Stressbedingungen, ab. Nichtsdestotrotz werden gerade die klimarisikobedingten und zukünftig häufiger zu erwartenden Extremsituationen zu starken Unterschieden in der Assimilation und damit der Leistungsfähigkeit und Inhaltsstoffausprägung der Reben führen.

Überblick: Langzeitdatenreihen zu ausgewählten weinbaulichen Parametern

Aufgrund der jährlichen klimatischen Schwankungen können weinbauliche Parameter variieren, daher sind Langzeit-Datenreihen erforderlich, um verlässliche Rückschlüsse zu ziehen. Nachfolgend werden zentrale Ergebnisse des laufenden VineyardFACE-Experiments über diesen Zeitraum betrachtet.

Ertragsdaten (Abb. 4) zeigen eine **Steigerung der Gesamtmenge an entnommener Biomasse** (Trauben und Schnittholz) **bei beiden Rebsorten unter erhöhtem CO₂**. Der **Gesamttraubenertrag war unter eCO₂ im Mittel und für beide Rebsorten höher als in der Kontrolle**. Bei **Rieslingtrauben** nahm unter erhöhtem CO₂ der **Botrytis-Befall** (Grauschimmel oder Edelschimmel, *Botrytis cinerea*) zu. Dadurch verschwindet der Ertragszuwachs unter eCO₂ fast vollständig, da die verwertbare Traubenmenge durch den Pilzbefall reduziert wird. Eine Ursache könnte in der Beerengröße der kompakten Rieslingtraube liegen, wodurch sich die Beeren gegenseitig abquetschen und zuckerhaltiger Saft aus dem Beereninnern austritt, welcher Pathogenen wie *Botrytis cinerea* ein gutes Nährmedium bietet. Hier wird in Zukunft die Züchtungsforschung für eine verbesserte Traubenarchitektur und lockerbeerige Klone wichtig.

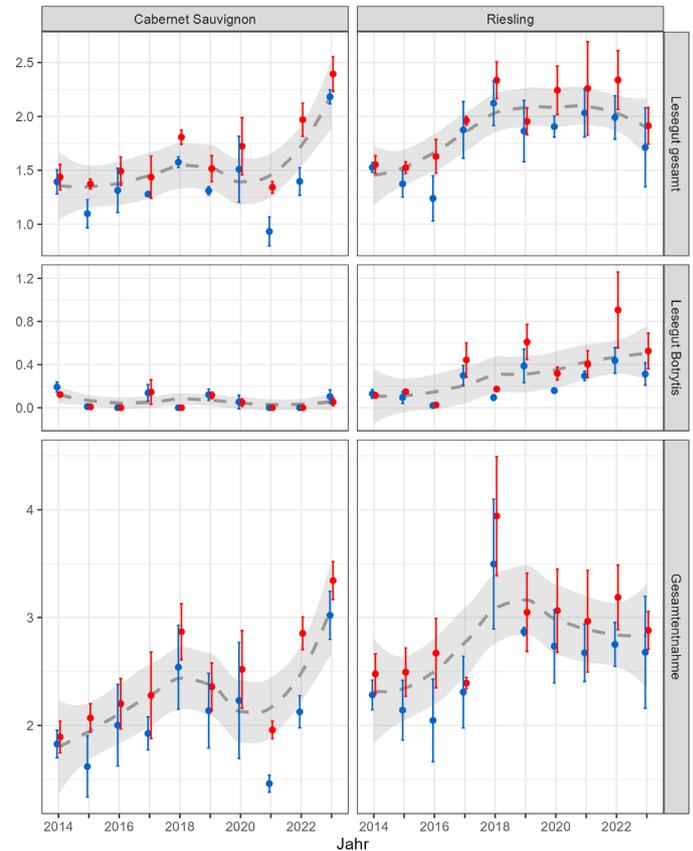


Abb. 4: Dem VineyardFACE-Weinberg im Jahresgang zwischen 2014 und 2023 entnommene Biomasse in kg/m² der Rebsorten Cabernet Sauvignon (links) und Riesling (rechts). Dargestellt ist der Ertrag an Lesegut gesamt, der Anteil an mit *Botrytis cinerea* befallenem Lesegut und die Gesamtentnahmemenge an Biomasse (Trauben und Schnittholz). Mittelwerte ± Standardabweichung (n=3 pro CO₂-Level); rot kennzeichnet Werte aus FACE-Ringen mit erhöhter (eCO₂), blau aus ambienter CO₂-Konzentration (aCO₂).

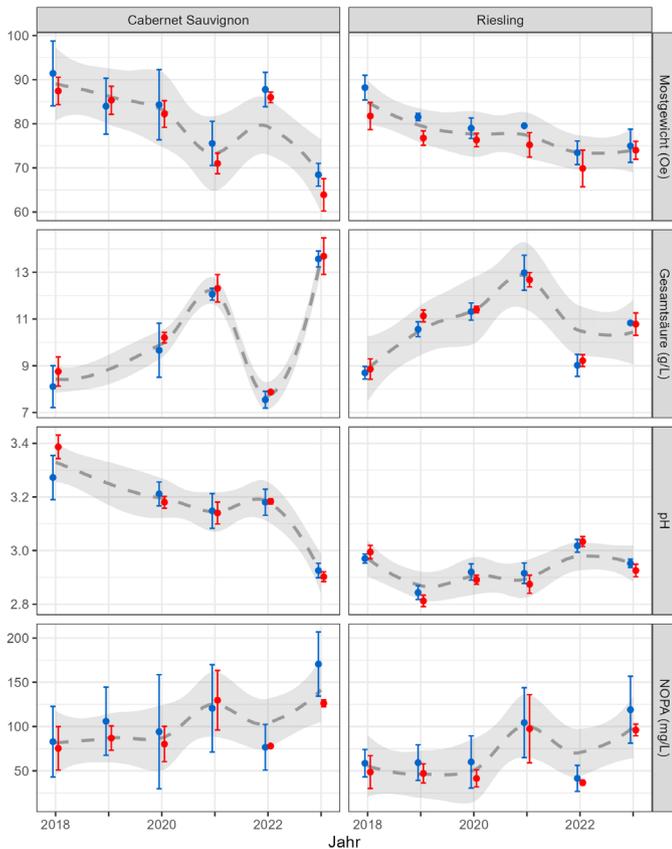


Abb. 5: Reifedaten zur Charakterisierung der Mostqualität von Cabernet Sauvignon (links) und Riesling (rechts) der Jahrgänge 2018 bis 2023 aus dem VineyardFACE (Mostgewicht in Grad Oechsle, Gesamtsäuregehalt in g/l, pH-Wert und NOPA-Wert in mg/l); Mittelwerte \pm Standardabweichung ($n=3$ pro CO_2 -Behandlung); rot kennzeichnet Werte aus FACE-Ringen mit erhöhter (eCO_2), blau aus ambienter (aCO_2) CO_2 -Konzentration.

Für Weinbaubetriebe ist nicht nur die geerntete Traubenmenge von Bedeutung, sondern vielmehr eine entsprechende **Qualität** der Trauben. Wichtige Parameter hierfür sind das Mostgewicht, der Gesamtsäuregehalt und das Säurespektrum. Die Klimaerwärmung und die phänologische Verfrühung begünstigen den Säureabbau, Erhöhung des pH-Wertes und geringere NOPA-Werte, die den hefeverfügbaren Stickstoff angeben. Abbildung 5 zeigt

Daten zur Charakterisierung der Mostqualität von 2018 bis 2023 und lässt erkennen, dass die **Veränderungen durch eCO_2 nur sehr gering** sind: Beim **Riesling besteht eine leichte Tendenz zur Abnahme des Mostgewichts durch eCO_2** ,



Abb. 6: Traubenernte in der Geisenheimer VineyardFACE-Anlage © Susanne Tittmann

wobei die Jahresschwankungen des Mostgewichts deutlich größer als der Effekt des erhöhten CO_2 sind. Bei den weiteren Mostqualitäts-Parametern Gesamtsäure, pH-Wert und NOPA-Wert waren bisher bei beiden Rebsorten keine deutlichen Unterschiede durch erhöhtes CO_2 zu verzeichnen.

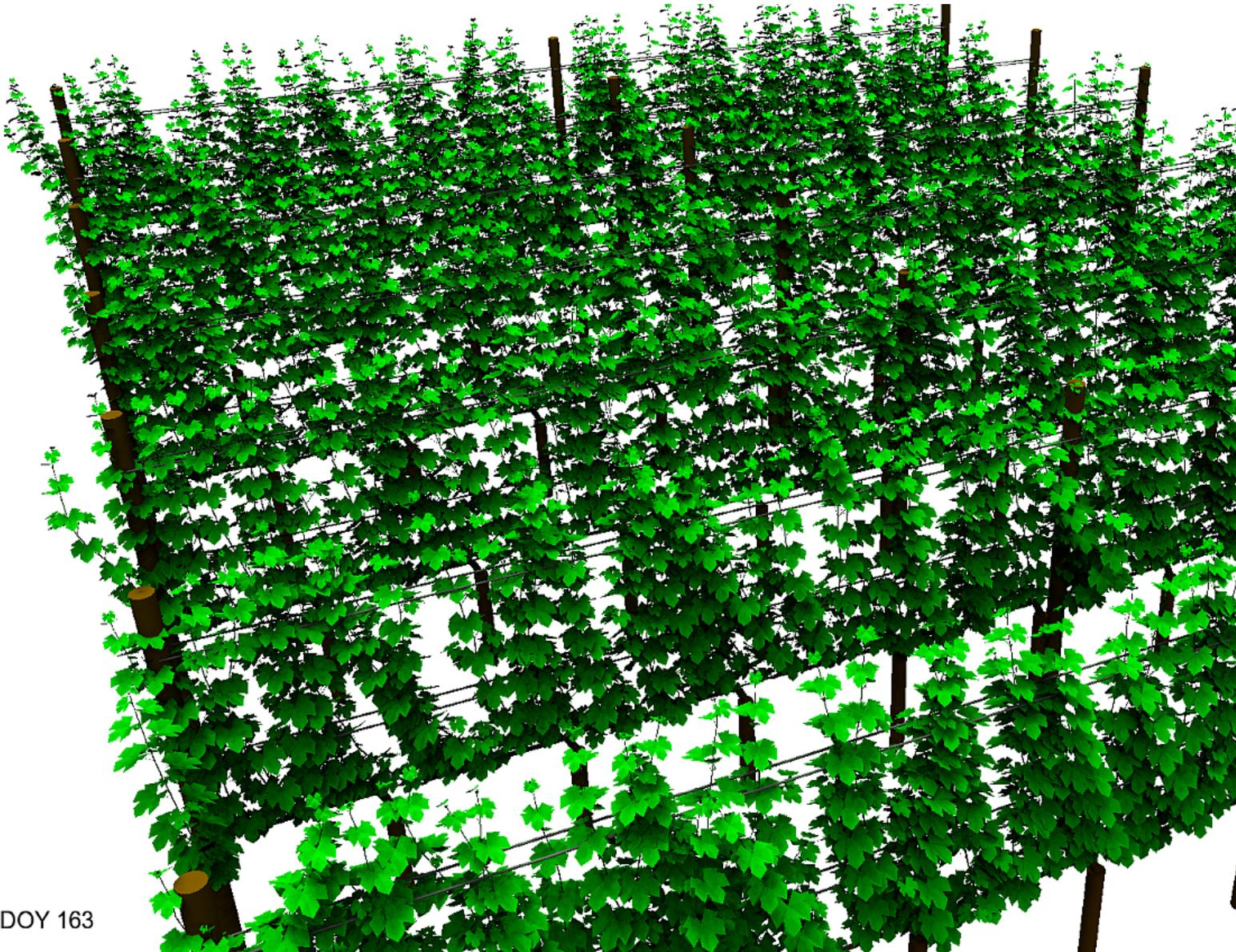
Virtueller Riesling-Weinberg

Mit Hilfe von Modellierung und Simulation sollen künftig ergänzende Experimente auch *in silico*, also am Rechner, durchgeführt werden können, um Feldexperimente im VineyardFACE zu unterstützen. Daher wurde am Institut für Modellierung und Systemanalyse auf Basis von Digitalisierungsdaten aus dem VineyardFACE (Abb. 7) ein Modell für einen **Virtuellen Riesling-Weinberg** entwickelt (SCHMIDT et al. 2019). Das Modell soll maßgeblich dabei helfen, geeignete Maßnahmen aufzudecken, welche den negativen Auswirkungen des Klimawandels entgegenwirken können. So ist es möglich, das dynamische Wachstum von Riesling-Reben temperaturabhängig zu simulieren. Unter Verwendung historischer Wetterdaten konnte so z. B. die zwischen 1990 und 2010 im Rheingau beobachtete zeitliche **Vorverlagerung des Austriebs** in den Modellvorhersagen widergespiegelt werden (SCHMIDT et al. 2022). Des Weiteren wurde systematisch mit Hilfe von *in silico*-Experimenten untersucht, wie sich das Entblättern in unterschiedlichen Zonen auf die Lichtabsorption der Laubwand auswirkt (BAHR et al. 2021a). Die **Entfernung von Blättern in der Traubenzone** führte zu einem größeren **Verlust an absorbiertem Licht** als eine Entblätterung oberhalb der Traubenzone. In Bezug auf den Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Rebenwachstum und Entwicklung konnte im Virtuellen Weinberg *in silico* gezeigt werden, dass die **natürliche Variabilität** u. a. bei Austrieb und

Wachstum die **Erkennung möglicher CO₂-Effekte erschwert**, aber auch, dass die **natürliche Variabilität des Triebwachstums in den Vorhersagen realistisch** wiedergegeben werden kann (SCHMIDT et al. 2022). Schließlich können *in silico* Experimente zu einem besseren Verständnis beitragen, wie sich der Klimawandel z. B. auf Sonnenbrand an Trauben auswirken kann (BAHR et al. 2021b) und so möglicherweise neue Ideen zur Verringerung des Sonnenbrandrisikos bei Reben unter zukünftigen Umweltbedingungen liefern.

Das entwickelte Modell eines virtuellen Riesling-Weinberges wird genutzt, um experimentelle Forschungsarbeiten im VineyardFACE maßgeblich zu unterstützen und soll helfen, ein besseres Systemverständnis zu entwickeln. Das temperatursensitive Modell simuliert eine realistische natürliche Variabilität des Triebwachstums und bildet die beobachtete zeitliche Vorverlagerung des Austriebs im Rheingau ab, inklusive der Unterschiede zwischen den Jahren. Zudem ermöglicht es die Untersuchung der Effekte auf die Lichtverteilung durch Entblätterung in der Traubenzone, aber auch durch andere Reihenausrichtungen. Dies ist z. B. für die Simulation von Effekten auf das Sonnenbrandrisiko von Weintrauben entscheidend.

Abb. 7: Grafische Darstellung eines virtuellen Weinbergs. Sie basiert auf dem Modell Virtueller Riesling mit Temperaturdaten aus dem Jahr 2018 (DOY 163 = 12.Juni). © Christopher Bahr



DOY 163

Erhöhte CO₂-Konzentration und Rebe-Schaderreger-Interaktionen

Die Interaktionen von Pflanzen und Insekten beruhen immer auch auf der Expression bestimmter Gene, die die Abwehrreaktionen der Pflanze, aber auch Anpassungen der Insekten an die Wirtspflanze beeinflussen können. Am Institut für Phytomedizin erfolgte daher eine molekulare Analyse von Reben nach Befall (Fraß) durch Larven des Bekreuzten Traubenwicklers *Lobesia botrana*, welche eine **gesteigerte Genexpression der befallenen Reben unter eCO₂ im Vergleich zur aCO₂-Konzentration** zeigte (REINEKE and SELIM 2019). Dies betraf auch eine Auswahl von Genen, die als pflanzliche Abwehrgene bekannt sind. Inwieweit dies unter zukünftigen CO₂-Konzentrationen eine verstärkte Abwehr der Reben gegen Traubenwicklerbefall mit sich bringt, erfordert weitere Studien. Auch auf Seiten des Insekts wurden während der Entwicklung von Larven des Bekreuzten Traubenwicklers auf Reben beider CO₂-Konzentrationen zu zwei verschiedenen Entwicklungszeitpunkten (Fraß an den Blüten und Fraß an reifenden Beeren) Veränderungen im Expressionsmuster einzelner Gene erfasst. Hierbei zeigte sich, dass es nur eine **geringe Beeinflussung des Genexpressionsmusters und der Wachstumsrate der Larven durch die erhöhte CO₂-Konzentration gab**, dafür aber einen sehr viel stärkeren Effekt durch die Futterquelle.

Bekreuzter und Einbindiger Traubenwickler werden derzeit im Weinbau sehr erfolgreich anhand der sog. „Verwirrmethode“ kontrolliert. Hierbei

werden künstlich hergestellte Duftstoffe der weiblichen Tiere (Sexualpheromone) großflächig im Weinberg ausgebracht, so dass die Männchen die Weibchen zur Paarung nicht mehr finden können und keine Eiablage stattfindet. Diesbezüglich wurde in mehrjährigen Käfigversuchen im VineyardFACE untersucht, ob die Wahrnehmung der Pheromone durch die Männchen und deren Verhalten unter erhöhten CO₂-Konzentrationen verändert ist. Es zeigte sich, dass **erhöhte CO₂-Konzentrationen keinen negativen Einfluss auf die Effektivität des Verwirrverfahrens haben**, und dass dieses Verfahren damit auch zukünftig eine biologische und nachhaltige Bekämpfungsstrategie gegen beide Traubenwicklerarten darstellen kann (BECKER et al. 2023).

In einer weiteren Studie wurde der indirekte, pflanzenvermittelte Einfluss von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Parasitierung von Traubenwickler-Eiern durch die Schlupfwespe *Trichogramma cacoeciae* untersucht. Diese Schlupfwespenart wird sehr häufig zur biologischen Schädlingskontrolle eingesetzt. Sie ist einerseits kommerziell erwerbbar, kommt andererseits aber auch natürlich in Weinbergen vor. Hatten die Traubenwickler in ihrem Larvalstadium Gescheine (Blütenstände) von Riesling-Reben gefressen, die unter erhöhter CO₂-Konzentration kultiviert worden waren, so wurden die durch die Weibchen gelegten Eier signifikant erfolgreicher

durch die Schlupfwespe parasitiert als Eier der Vergleichsgruppe (aktuelle CO₂-Konzentration) (BECKER et al. 2022). Bei Larven, die sich von Geseheinen von Cabernet Sauvignon ernährt hatten, konnte keine signifikante Parasitierungspräferenz bezüglich der CO₂-Konzentration festgestellt werden. Diese Ergebnisse liefern damit **keinen Anlass, eine verringerte Effizienz der biologischen Schädlingskontrolle von Traubenwicklern durch *T. cacoeciae* unter zukünftigen CO₂-Konzentrationen** zu befürchten.

Rebenshmierläuse (*Planococcus ficus*) gelten in vielen Weinbauländern als wichtige Schaderreger, da sie Reben direkt durch ihre Saugtätigkeit und indirekt durch die Übertragung von Rebvirosen (von Viren verursachten Krankheiten) schädigen können. Unter den Bedingungen im Geisenheimer VineyardFACE konnte **kein Effekt einer erhöhten CO₂-Konzentration auf diverse Entwicklungsparameter** (Körpergröße, Entwicklungsrate, Fertilität etc.) der Läuse festgestellt werden. Parallele Versuche in einer Gewächshauskammer mit ungefähr doppelt so hoher CO₂-Konzentration (800 ppm) beeinflussten diese Parameter dagegen in unterschiedlichem Ausmaß. **Der Parasitierungserfolg des wichtigsten Schmierlaus-Parasitoiden, *Leptomastix dactylopii*, wurde durch keine der untersuchten CO₂-Konzentrationen** (380 ppm, 450 ppm, 800 ppm) **beeinträchtigt** (SCHULZE-SYLVESTER and REINEKE 2019). Auf Basis

dieser Ergebnisse kann nicht davon ausgegangen werden, dass es unter zukünftigen CO₂-Konzentrationen zu Massenvermehrungen der Rebenshmierlaus oder zu verminderter biologischer Schädlingskontrolle durch diese Parasitoidenart kommen wird.

Reben zeigten unter erhöhter CO₂-Konzentration und Traubenwicklerbefall eine gesteigerte Expression einzelner Gene, die u. a. auch in pflanzlichen Abwehrreaktionen involviert sind. Zugleich konnte auf Seiten der Traubenwickler festgestellt werden, dass es nur eine geringe Beeinflussung des Genexpressionsmusters und der Wachstumsrate der Larven durch die erhöhte CO₂-Konzentration gab. Eine erhöhte CO₂-Konzentration hatte zudem keinen negativen Einfluss auf die Effektivität des Verwirrverfahrens, so dass dieses Verfahren auch zukünftig eine biologische und nachhaltige Bekämpfungsstrategie gegen beide Traubenwicklerarten darstellen wird. Außerdem konnte unter den Bedingungen des Geisenheimer VineyardFACE kein Effekt einer erhöhten CO₂-Konzentration auf diverse Entwicklungsparameter von Schmierläusen nachgewiesen werden, und der Parasitierungserfolg des wichtigsten Schmierlausparasitoiden wurde nicht durch unterschiedliche CO₂-Konzentrationen beeinträchtigt.



Abb. 8: Käfigversuche mit Traubenwicklern in der Geisenheimer VineyardFACE-Anlage © Mirjam Hauck

Einfluss erhöhter CO₂-Konzentration auf Mikroorganismen in Weinbergsböden

Veränderte klimatische Verhältnisse beeinflussen auch Bodenprozesse und Bodenorganismen, vor allem durch verstärkten Kohlenstoff-Eintrag durch Feinwurzeln und Wurzelexsudate als Effekt einer verstärkten Nettoassimilation. Dies bestätigten Messungen im VineyardFACE, die zeigten, dass sich die **Diversität der aktiven Bodenbakterien durch die erhöhte CO₂-Konzentration signifikant veränderte** (ROSADO-PORTO et al. 2023). Die **mikrobielle Bodenrespiration** war vor allem in den begrüneten Rebzeilen **unter eCO₂ signifikant erhöht**. Eine Quantifizierung der bakteriellen 16S rRNA zeigte einen **Rückgang der bakteriellen Abundanz durch eCO₂**, was sich durch eine Verände-

rung des mikrobiellen Bodenmikrobioms hin zu mehr Pilzwachstum erklärt (ROSADO-PORTO et al. 2023). Auch die **Expression einiger Gene des bakteriellen Bodenmikrobioms, wie des *nifH* Gens veränderte sich durch eCO₂**. Dieses Gen kodiert N₂-Fixierungsenzyme und war in den begrüneten Rebzeilen signifikant reduziert, was im Kontrast zu den Ergebnissen der meisten Studien unter eCO₂ steht. Die Expression von *NirK*, das in die NO₂-Reduktion (z. B. in der Lachgasbildung durch Denitrifikation) involviert ist, war unter eCO₂ in beiden Bodenbewirtschaftungsweisen (begrünt und offen) signifikant reduziert (ROSADO-PORTO et al. 2023).

Veröffentlichungen aus der Geisenheimer VineyardFACE Anlage

BAHR, C., SCHMIDT, D., FRIEDEL, M., KAHLEN, K. (2021a): Leaf removal effects on light absorption in virtual Riesling canopies (*Vitis vinifera*). in silico Plants, 3(2). <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab027>



BAHR, C., SCHMIDT, D., KAHLEN, K. (2021b): Missing links in predicting berry sunburn in future vineyards. Frontiers in Plant Sciences. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.715906>



BECKER, C., HERRMANN, K., REINEKE, A. (2022): Biological control in a changing climate: plant-mediated impact of elevated CO₂ concentration on *Lobesia botrana* eggs and egg parasitism by *Trichogramma cacoeciae*. Journal of Pest Science. <https://dx.doi.org/10.1007/s10340-022-01545-w>



BECKER, C., RUMMEL, A., GALLINGER, J., GROSS, J., REINEKE, A. (2023): Mating still disrupted: Future elevated CO₂ concentrations are likely to not interfere with *Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella* mating disruption in vineyards in the near future. OENO One 57:245-252. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7276>



GALLINGER, J., RID-MONETA, M., BECKER, C., REINEKE, A., & GROSS, J. (2023). Altered volatile emission of pear trees under elevated atmospheric CO₂ levels has no relevance to pear psyllid host choice. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25260-w>



KAHN, C., TITTMANN, S., HILBERT, G., RENAUD, C., GOMÈS, E., STOLL, M. (2022): VineyardFACE: Investigation of a moderate (+20 %) increase of ambient CO₂ concentration on berry ripening dynamics and fruit composition of Cabernet-Sauvignon: Published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. OENO One 56:193-204. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5440>



REINEKE, A., SELIM, M. (2019): Elevated atmospheric CO₂ concentrations alter grapevine (*Vitis vinifera*) systemic transcriptional response to European grapevine moth (*Lobesia botrana*) herbivory. Scientific Reports 9:2995. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39979-5>



ROSADO-PORTO, D., RATERING, S., WOHLFAHRT, Y., SCHNEIDER, B., GLATT, A., SCHNELL, S. (2023): Elevated atmospheric CO₂ concentrations caused a shift of the metabolically active microbiome in vineyard soil. BMC Microbiology 23:46. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02781-5>



SCHMIDT, D., BAHR, C., FRIEDEL, M., KAHLEN, K. (2019): Modelling approach for predicting the impact of changing temperature conditions on grapevine canopy architectures. Agronomy, 9(8), 426. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080426>



SCHMIDT, D., KAHLEN, K., BAHR, C., FRIEDEL, M. (2022): Towards a stochastic model to simulate grapevine architecture: A case study on digitized Riesling vines considering effects of elevated CO₂. *Plants-Basel*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/plants11060801>



SCHULZE-SYLVESTER, M., REINEKE, A. (2019): Elevated CO₂ levels impact fitness traits of vine mealybug *Planococcus ficus* Signoret, but not its parasitoid *Leptomastix dactylopii* Howard. *Agronomy* 9:326. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060326>



WOHLFAHRT, Y., COLLINS, C. AND M. STOLL (2019). Grapevine bud fertility under conditions of elevated carbon dioxide, *OenoOne*. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2420>



WOHLFAHRT, Y., KRÜGER, K., PAPSDORF, D., TITTMANN, S. AND STOLL, M. (2022): Grapevine leaf physiology and morphological characteristics to elevated CO₂ in the VineyardFACE (Free air Carbon dioxide Enrichment) experiment. *Frontiers in Plant Sciences* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085878>



WOHLFAHRT, Y., PATZ, C.-D., SCHMIDT, D., RAUHUT, D., HONERMEIER, B., STOLL, M. (2021): Responses on must and wine composition of *Vitis vinifera* L. cvs. Riesling and Cabernet Sauvignon under a Free Air CO₂ Enrichment (FACE). *Foods* 10. <https://doi.org/10.3390/foods10010145>



WOHLFAHRT, Y., SMITH, JP., TITTMANN, S., HONERMEIER, B., STOLL, M. (2018): Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE). *European Journal of Agronomy* 101:149-162. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2420>



WOHLFAHRT, Y., TITTMANN, S., SCHMIDT, D., RAUHUT, D., HONERMEIER, B., STOLL, M. (2020): The effect of elevated CO₂ on berry development and bunch structure of *Vitis vinifera* L. cvs. Riesling and Cabernet Sauvignon. *Applied Sciences* 10. <https://doi.org/10.3390/app10072486>





Hessisches Landesamt für
Naturschutz, Umwelt und Geologie
Für eine lebenswerte Zukunft

