



Die Kohlenstoff-Isotopendiskriminierung ($\delta^{13}\text{C}$) in Traubensaft als eine einfache Methode zur Überwachung des Wasserzustands der Reben unter Produktionsbedingungen

Cornelis van Leeuwen¹, Benjamin Bois², Luca Brillante³, Agnès Destrac-Irvine¹, Mark Gowdy¹, Damian Martin⁴, Marc Plantevin^{1,5}, Laure de Rességuier¹, Luis G. Santesteban⁶, Vivian Zufferey⁷

¹ EGFV, Univ. Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, Villenave d'Ornon, France
² Biogéosciences UMR 6282 CNRS uB, Univ. Bourgogne, 6 Boulevard Gabriel, Dijon, France
³ Department of viticulture and Enology, California State University Fresno, 2360 E Barstow Ave, Fresno, CA, 93740, USA
⁴ The New Zealand Institute for Plant and Food Research Limited, Blenheim 7021, New Zealand
⁵ Château La Tour Carnet, 33112 Saint-Laurent-Médoc, France
⁶ Department of Agronomy, Biotechnology and Food Science, Public University of Navarra (UPNA), Campus Arrosadia, Pamplona, Spain
⁷ Agroscope, Centre de recherches de Pully, CH-1009, Suisse

Um die Auswirkungen von Umweltfaktoren und Bewirtschaftungspraktiken auf trocken bewirtschaftete und bewässerte Weinberge zu verstehen, ist eine Beurteilung des Wasserstatus der Reben notwendig. Unter den pflanzenbasierten Indikatoren ist die Kohlenstoff-Isotopendiskriminierung ($\delta^{13}\text{C}$) einfach anzuwenden, zuverlässig und kostengünstig. Die Bewertung des Wasserzustands der Reben während der Reifezeit der Beeren erfolgt rückwirkend und ermöglicht eine Analyse der Bewirtschaftungspraktiken während der vorangegangenen Saison. Dies hilft den Wasserzustand eines Weinberges besser zu verstehen und ihn präziser zu bewirtschaften. Mögliche Anwendungen und Grenzen dieser Methode werden in diesem Artikel diskutiert.

Die Beurteilung des Wasserzustands der Reben

Der Wasserzustand der Reben ist ein entscheidender Parameter im Weinbau und beeinflusst sowohl den Ertrag als auch die Beerenzusammensetzung. Der Wasserzustand der Reben wird wiederum von der Bodenwasserverfügbarkeit (abhängig von der Wasserspeicherkapazität des Bodens), klimatischen Parametern (Niederschlag und Evapotranspiration), dem Erziehungssystem (Blattfläche pro Hektar), dem Genotyp (Wurzelstock und Rebsorte) und den Bewirtschaftungspraktiken (Bodenbewirtschaftung und Bewässerung) bestimmt.

Es existieren eine Reihe verschiedener Methoden zur Bewertung des Wasserzustands der Reben, die in folgende Gruppen eingeteilt werden können: (1) bodenbasierte Messungen, (2) Wasserhaushaltsmodellierungen, und (3) pflanzenbasierte Methoden. Die Genauigkeit von bodenbasierten Methoden und von Modellierungsansätzen wird im Wesentlichen durch Annahmen zur Wasserspeicherkapazität des Bodens (soil water holding capacity, SWHC) in der Wurzelzone der Rebe bestimmt. Dieser Parameter kann unter Feldbedingungen meist nicht genau beurteilt werden, da er stark von der Wurzeltiefe und der Wurzelfunktion abhängt. Pflanzenbasierte Indikatoren integrieren jedoch naturgemäß die SWHC in der Wurzelzone und liefern so zuverlässigere Ergebnisse. Unter den pflanzenbasierten Messungen wird das Wasserpotenzial häufig unter Verwendung einer Druckkammer bestimmt. Die Kohlenstoff-Isotopendiskriminierung ($\delta^{13}\text{C}$) findet im Traubensaft statt und ist ein weiterer pflanzenbasierter Indikator mit großem Potenzial zur Bestimmung des Wasserdefizits der Reben. Obwohl die ersten Artikel schon vor mehr als 20 Jahren veröffentlicht wurden¹, ist die Verwendung dieser Methode auf Weingütern bislang wenig verbreitet.

Das Prinzip der Kohlenstoff-Isotopendiskriminierung

Isotope eines Elements haben die gleiche Anzahl an Protonen und Elektronen, aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen und haben daher eine unterschiedliche Atommasse. Unter den drei existierenden Kohlenstoffisotopen, sind nur ^{12}C und ^{13}C unter natürlichen Bedingungen stabil, was sie für Untersuchungen sogenannter *isotopendiskriminierender* Prozesse interessant macht. ^{12}C ist mit einem Verhältnis von etwa 99:1 im Vergleich zu ^{13}C die vorherrschende Kohlenstoffisotopenform in der Natur.

CO_2 -Moleküle, die ^{12}C -Isotope enthalten, werden aufgrund ihrer höheren Reaktivität mit den Enzymen der Photosynthese, und einer besseren Diffusion durch die Stomata und das Mesophyll, bevorzugt. Deshalb ist das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in den produzierten Zuckern im Vergleich zum atmosphärischen CO_2 niedriger.

TABELLE 1. Gezeigt sind Wasserpotenziale und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in Bezug auf Wasserdefizitschwellen der Reben. Die Grenzwerte für das Wasserpotenzial beziehen sich auf die niedrigsten Werte, die während der Reifungszeit der Trauben gemessen wurden.

	$\delta^{13}\text{C}$ in Traubensaft (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ in Wein oder Sprossknospen (‰)	Mittags-Stammwasserpotenzial (MPa)	Frühmorgentliches Blattwasserpotenzial (MPa)
Kein Wasserdefizit	< -26	< -27,7	> -0,6	> -0,2
Leichtes Wasserdefizit	-25 bis -26	-26,7 bis -27,7	-0,6 bis -0,9	-0,2 bis -0,3
Moderates Wasserdefizit	-24 bis -25	-25,7 bis -26,7	-0,9 bis -1,1	-0,3 bis -0,5
Moderates bis starkes Wasserdefizit	-23 bis -24	-24,7 bis -25,7	-1,1 bis -1,4	-0,5 bis -0,8
Starkes Wasserdefizit	> -23	> -24,7	< -1,4	< -0,8

Unter Wassermangel schließen die Pflanzen die Spaltöffnungen ihrer Blätter, wodurch die Diffusion von CO_2 in den Interzellularräumen der Gewebe blockiert wird, was zu einer Veränderung des $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnisses führt. Das heißt, es kommt zu einem relativen Anstieg der Konzentration von $^{13}\text{CO}_2$ im Vergleich zu $^{12}\text{CO}_2$ im Interzellularraum und damit auch in den produzierten Zuckern. Während der Reifung reichern sich diese Zucker im Beersaft an. Das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis im Saft ist ein guter Indikator für das Ausmaß des Wasserdefizites der Reben der vorangegangenen Saison².

Das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Verhältnis kann mit Isotopen-Massenspektrometrie mit großer Präzision gemessen werden. Die Ergebnisse werden dann mit einem Standard mit einem bekannten $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis verglichen, und der $\delta^{13}\text{C}$ -Index kann somit ermittelt werden.

Wasserdefizit-Stressniveaus und deren Klassifizierung

Der im Zucker des Traubensaftes gemessene $\delta^{13}\text{C}$ liegt zwischen -28‰ bei Reben ohne Wasserdefizit und bis zu -20‰ bei Reben mit starkem Wasserstress. Die Klassifizierung der Wasserdefizitintensität in diesem Bereich unterscheidet sich in den verschiedenen Veröffentlichungen geringfügig. Unterschiedliche Schwellenwerte können teilweise dadurch erklärt werden, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zum einen von der Rebsorte beeinflusst werden³, und zum anderen tageszeitlichen Schwankungen des Mittags-Wasserpotenzials unterliegen, welches je nach Wachstumsbedingungen erheblich variieren kann. Die Schwellenwerte in Tabelle 1 wurden anhand von van Leeuwen *et al.*, 2009² und Santesteban *et al.*, 2015⁴ berechnet und gelten für Regionen mit gemäßigten klimatischen Bedingungen. Durch die Kombination von $\delta^{13}\text{C}$ - und Wasserpotenzialmessungen können ortsabhängig genauere standort- und sortenspezifische Grenzwerte festgelegt werden.

Alternativ kann auch ein relativer Vergleich durchgeführt werden: während der Traubenreife entspricht eine Variation von 1‰ in $\delta^{13}\text{C}$ einer Differenz von 0,2 MPa im Mittags-Stammwasserpotenzial⁵.



Die praktische Umsetzung der Wasserzustandsbewertung von Reben mit $\delta^{13}\text{C}$

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Messungen werden drei Wochen nach der Mitte der Veraison und bei der Ernte an Traubensaftproben vorgenommen. Die Proben werden in einem Labor analysiert, welches mit einem Isotopen-Massenspektrometer ausgestattet ist. Einige Laboratorien nutzen Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIRS) für die Bestimmung des $\delta^{13}\text{C}$, obwohl diese Methode aufgrund ihrer Ungenauigkeit nicht empfohlen wird. Eine aktuelle Einschränkung für die Durchführung der $\delta^{13}\text{C}$ -Messung ist eine geringe – aber stetig wachsende – Anzahl an Laboratorien, die diese Form der Analyse anbieten. Das Verfahren benötigt nur eine geringe Menge an Saft (+/- 5 μl) und kann aus Proben gewonnen werden, die zur regelmäßigen Reifekontrolle am Ende der Saison entnommen werden. Diese Proben müssen jedoch für die untersuchten Reben oder Parzellen repräsentativ sein.

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur der Zucker wird in den Weinethanol übertragen, obwohl es durch die Fermentation zu einer Verschiebung von -1,7‰ kommt (Tabelle 1⁶). Daher kann die $\delta^{13}\text{C}$ -Analyse auch an Weinproben durchgeführt werden, um den Wasserzustand der Reben während der Beerenreife zu untersuchen^{7, 8}.

Anwendungen für die Überwachung des Wasserzustands mit der $\delta^{13}\text{C}$ -Methode

Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert gibt Aufschluss über den Wasserzustand der Reben während der Reifungszeit der Beeren. Diese Periode erstreckt sich in etwa von einer Woche vor der Mitte der Veraison bis drei Wochen danach, was auf der Nordhalbkugel meist dem Monat August entspricht, und auf der Südhalbkugel dem Monat Februar. Der Wasserzustand der Reben ist zu diesem Zeitpunkt extrem wichtig für den Ertrag und das Weinqualitätspotenzial.

Zur Bewertung von Bewässerungsstrategien am Ende der Saison kann der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert ein nützliches Instrument darstellen, da der Wasserzustand der Reben durch die Menge und den Zeitpunkt des zugeführten Wassers beeinflusst wird. Um die Qualität von Rotweinen zu verbessern, ist ein leichtes Wasserdefizit bei den Reben empfehlenswert, wobei die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte dann zwischen -24‰ und -25‰ liegen. Diese Information kann beim direkten Kauf von Trauben beim Produzenten wichtig sein, da sie einen Indikator zur Nachkontrolle des Bewässerungsmanagements darstellt. Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert kann auch zur bequemen Bewertung jeglicher Bewirtschaftungspraktiken (Gründüngung, Bodenbearbeitung, Blattenfernung usw.) und deren Auswirkungen auf den Wasserzustand der Reben verwendet werden.

Beim $\delta^{13}\text{C}$ -Wert handelt es sich um einen leicht zugänglichen Indikator, welcher einfach zu messen und kostengünstig ist. Er kann zudem zur Kartierung des Wasserzustands von Reben in einem Weinberg oder einem Weingut verwendet werden (Abbildung 1A²). Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert kann bei Terroirstudien eingesetzt werden, z. B. um den Wasserzustand der Reben in trocken bewirtschafteten Weinbergen zu evaluieren, die weitestgehend von der Wasserspeicherkapazität des Bodens (Abbildung 1B) und dem Klima abhängen - beides wichtige Terroirparameter^{2, 9}.

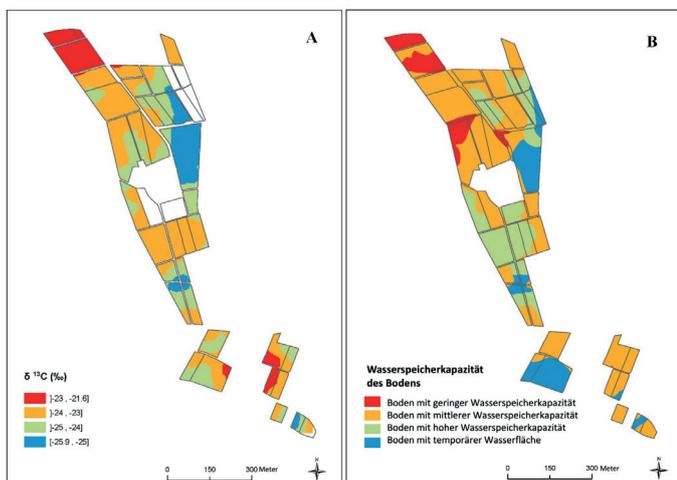


ABBILDUNG 1. A – Dargestellt ist der Wasserzustand der Reben, gemessen auf einem trocken bewirtschafteten Weingut in Saint-Émilion (Region Bordeaux, 2022). Auf den 23 Hektar wurden 172 Proben entnommen. B – Die Karte der Wasserspeicherkapazität des Bodens ist gezeigt, welche auf der Basis der Bodenkarte des Weingutes erstellt wurde.

Wasserzustandskarten sind von großem Nutzen bei der genauen Auswahl des Pflanzenmaterials und der Bewirtschaftungsstrategien. Dementsprechend sollten in trockenen Bereichen der Rebanlagen trockenheitsresistente Rebuterlagen verwendet werden, um starken Wasserstress zu vermeiden. In feuchten Bereichen kann die Weinqualität durch eine übermäßige Wasserverfügbarkeit beeinträchtigt werden. Dies kann durch den Anbau von konkurrierenden Pflanzen, wie Gründünger, verbessert werden.

Innerhalb von Parzellen kann die Kartierung des Wasserzustands der Reben mit $\delta^{13}\text{C}$ ein Hilfsmittel im Präzisionsweinbau sein und z. B. die räumliche Variabilität von Traubenphenolen erklären⁵. Messungen des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes im Wein (siehe spezifische Interpretationsschwellenwerte, Tabelle 1) können Rückschlüsse auf den Wasserzustand der Reben geben, die zur Weinproduktion verwendet wurden, und z. B. die Verbindung zu qualitätsbezogenen Parametern, wie Aromen, erklären⁷.

Die Wasserzustandsüberwachung mit $\delta^{13}\text{C}$ und ihre Grenzen

Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert kann erst am Ende der Saison ermittelt werden, und stellt somit kein geeignetes Werkzeug für das tägliche Bewässerungsmanagement dar. Dafür werden Messungen mithilfe von Druckkammern bevorzugt. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass der $\delta^{13}\text{C}$ nur ein Indikator für das Wasserdefizit der Reben während der Zuckeranreicherung der Beeren ist. Er liefert daher keine Daten für die Zeiträume davor und danach. Zudem gibt es sortenspezifische Unterschiede in der globalen Wassernutzungseffizienz der Reben, die bei der Bewertung des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes berücksichtigt werden müssen³. Derzeit werden $\delta^{13}\text{C}$ -Analysen nur von wenigen kommerziellen Laboren angeboten. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich dies mit steigender Nachfrage ändert.

Fazit

Um zu verstehen, wie sich Umweltfaktoren und Bewirtschaftungspraktiken auf den Ertrag und das Weinqualitätspotenzial auswirken, ist es wichtig, den Wasserzustand der Reben zu kennen. $\delta^{13}\text{C}$ -Messungen an Traubenmost oder Wein sind einfach durchzuführen und kostengünstig. Sie können als Indikator für den Wasserzustand der Reben während der Reifezeit der Beeren sowohl in trocken bewirtschafteten als auch in bewässerten Weinbergen genutzt werden. ■

1 Gaudillère, J. P., van Leeuwen, C., & Ollat, N. (2002). Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany*, 53(369), 757-763. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.369.757>

2 van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J. P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes?. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 43(3), 121-134. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

3 Plantevin, M., Gowdy, M., Destrac-Irvine, A., Marguerit, E., Gambetta, G., & van Leeuwen, C. (2022). Using $\delta^{13}\text{C}$ and hydroscales for discriminating cultivar specific drought responses. *OENO One*, 56(2), 239-250. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434>

4 Santesteban, L. G., Miranda, C., Barbarin, I., & Royo, J. B. (2015). Application of the measurement of the natural abundance of stable isotopes in viticulture: a review. *Australian journal of grape and wine research*, 21(2), 157-167. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12124>

5 Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurlural, S. K. (2020). Carbon isotope discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) of grape musts is a reliable tool for zoning and the physiological ground-truthing of sensor maps in precision viticulture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 561477. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.561477>

6 Gowdy, M., Julliard, S., Frouin, M., Poitou, X., Destrac Irvine, A., & van Leeuwen, C. (2022). Carbon isotope discrimination as an indicator of vine water status is comparable in grape must, wine, and distilled wine spirits. *Frontiers in Food Science and Technology*, 10. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.936745>

7 Picard, M., Van Leeuwen, C., Guyon, F., Gaillard, L., De Revel, G., & Marchand, S. (2017). Vine water deficit impacts aging bouquet in fine red Bordeaux wine. *Frontiers in chemistry*, 5, 56. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00056>

8 Martin, D., Grab, F., Grose, C., Stuart, L., Scofield, C., McLachlan, A., & Rutan, T. (2020). Vintage by vine interactions most strongly influence Pinot noir grape composition in New Zealand. *OENO One*, 54(4), 881-902. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.4021>

9 Zufferey, V., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Blackford, M., Bourdin, G., Gindro, K., Spangenberg, J., Rösti, J., Viret, O., Carlen, C. & Spring, J. L. (2020). The influence of vine water regime on the leaf gas exchange, berry composition and wine quality of Arvine grapes in Switzerland. *OENO One*, 54(3), 553-568. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.3.3106>