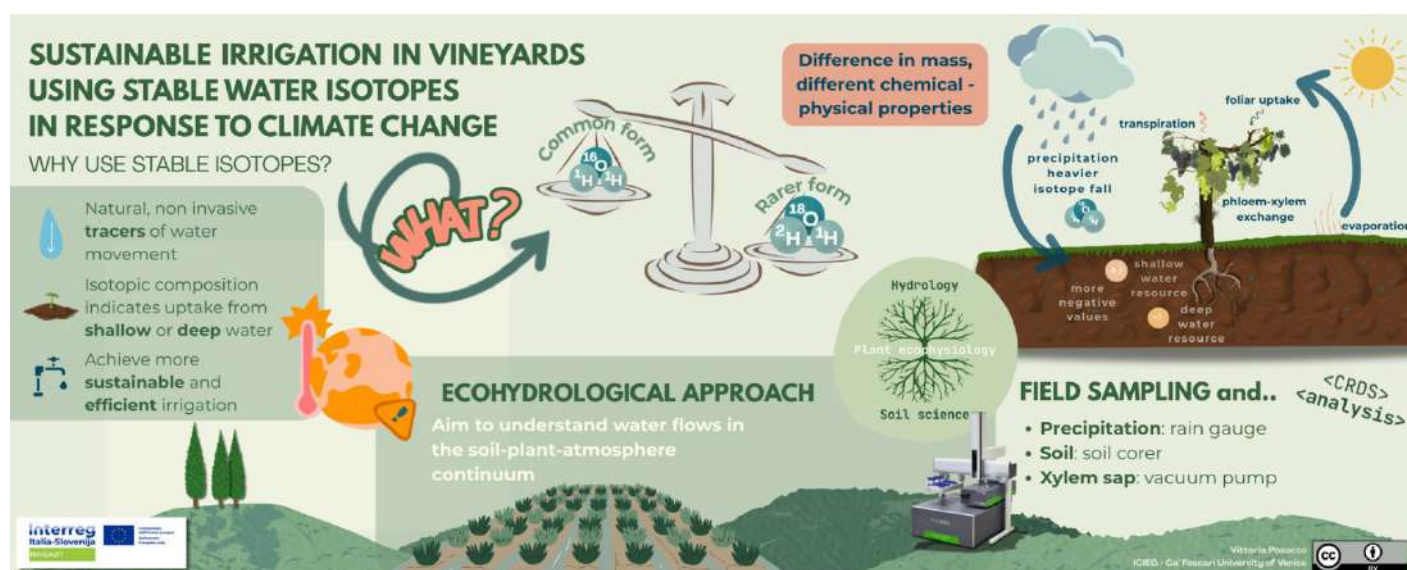


IRRIGAVIT - Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera

IRRIGAVIT - Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu

D 3.1.1 Report delle dinamiche dell'acqua nei vigneti transfrontalieri

D 3.1.1 Poročilo o vodni dinamiki v čezmejnih vinogradih



Numero progetto/ Projektna številka	ITA-SI0100043
Acronimo/ Akronim	IRRIGAVIT
Titolo Progetto/ Projektni naslov	Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera / Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu
Budget totale/ celotni znesek	€ 617.325,98
Di cui Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR)/ od tega Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR)	€ 493.860,78
Durata/ Trajanje	01/10/2023 – 31/12/2025
WP e attività/ DP in dejavnost	WP 3.1
Titolo Deliverable/ Naslov Dosežka	D 3.1.1 Report delle dinamiche dell'acqua nei vigneti transfrontalieri
WP leader / DP vodja	Poročilo o vodni dinamiki v čezmejnih vinogradih
Autore/ Autor	UNIVE Barbara Stenni, Vittoria Posocco, Mauro Masiol, Mirco Peschiutta, Giuliano Drossi
Giorno di consegna/ Dan izdaje	09/12/2025
Status/ Status	Versione Finale/ Končna verzija
Partner/Partnerji:	
LP/ VP - giver: Università degli studi di Udine -Di4A (UNIUD)	
Partner 2- giver: Università Ca' Foscari di Venezia (UNIVE)	
Partner 3- giver: Kmetijski Inštitut Slovenije (KIS)	
Partner 4- giver: Geodetski Inštitut Slovenije (GIS)	
Partner 5 - taker: Consorzio Tutela Vini Friuli Colli Orientali e Ramandolo (CON)	
Partner 6 - taker: RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica (RRA)	

Uvod

Vinogradništvo na čezmejnem območju med Italijo in Slovenijo se vse pogosteje sooča s posledicami podnebnih sprememb. Ponavljajoče se suše, dolgotrajen sušni stres in ekstremni vremenski pojavi ogrožajo količino in kakovost grozdja ter trajnost celotnega kmetijskega sektorja. Projekt **IRRIGAVIT – Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu**, ki se je začel 1. oktobra 2023 in je sofinanciran v okviru programa Interreg VI-A Italija–Slovenija 2021–2027, ima cilj izboljšati učinkovitost rabe vode v vinogradih ter povečati odpornost vinarskega sektorja z uvajanjem dobrih kmetijskih praks in naprednih tehnoloških orodij. IRRIGAVIT nadgrajuje rezultate predhodnega projekta **“ACQUAVITIS - Inovativne rešitve za učinkovito rabo vode v čezmejnem vinogradništvu”**, ki je uvedel ekosistemski pristop k nujnemu namakanju in upravljanju tal v treh pilotnih območjih (**Vipavska dolina, Kras in Spodnja Furlanija**), z uporabo zelenih tehnologij, daljinskega zaznavanja, sistemov za podporo odločanju o namakanju (DSS) ter praks upravljanja tal za optimizacijo vodne bilance v vinogradih. IRRIGAVIT razširja razvite protokole in prakse s pomočjo strokovne podpore na nova ključna območja – **Furlanski Vzhodni griči (Colli Orientali) in Brda** – z namenom prenosa inovacij do vinogradnikov in javnih ključnih odločevalcev. Projekt združuje šest partnerjev:

- **Univerza v Vidmu – Oddelek za agroživilstvo, okolje in živali (Di4A), nosilec projekta**
- **Univerza Ca' Foscari v Benetkah**
- **Kmetijski inštitut Slovenije (KIS)**
- **Geodetski inštitut Slovenije (GIS)**
- **RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica**
- **Konzorcij za zaščito vin Furlanije – Colli Orientali in Ramandolo**

In enajst pridruženih partnerjev:

- ARPA FVG - Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente del Friuli Venezia Giulia
- Regione autonoma Friuli Venezia Giulia
- Veneto Agricoltura
- Consorzio Tutela Prosecco doc, Area tecnicoambientale
- ERSA-Agenzia regionale per lo Sviluppo Rurale del Friuli Venezia Giulia
- Univerza v Novi Gorici
- Konzorcij Brda
- Regionalna razvojna agencija za Podravje – Maribor
- Università degli Studi di Padova
- Kohezijska regija Vzhodna Slovenija
- Center za podporo podjetjem pri razvijanju zelenih tehnologij d.o.o.

Projekt ima dva ključna cilja: **validacija in prilagoditev tehničnih strategij za optimizirano upravljanje z vodo ter oblikovanje novih skupnih smernic** za njihovo vključitev v vinarske pravilnike in kmetijske politike obeh držav ter promovirati nove smernice tudi na širša območja. Projekt se bo zaključil 31. decembra 2025 s podpisom **skupnega dogovora** partnerjev in oblikovalcev politik za sprejetje **novih smernic IRRIGAVIT** med zaključnima konferencama v Italiji 26. novembra 2025 in v Sloveniji 27. novembra 2025.

Integracija namakalnega modela z dinamiko absorpcije vode v vinogradu - DP3

V zadnjih desetletjih so **podnebne spremembe** povzročile znatno povečanje ekstremnih vremenskih dogodkov: vročinskih valov, dolgotrajnih suš, intenzivnih in nerednih padavin (IPCC, 2023). Ti pogoji imajo vse večji vpliv na vinogradništvo, saj ogrožajo tako količino kot kakovost pridelkov in s tem tudi trajnost celotnega vinarskega sektorja (Fraga et al., 2012). Postaja zato vse bolj nujno načrtovati in uresničevati trajnostne prilagoditvene ukrepe, ki so učinkoviti tako na kratki kot na dolgi rok (Fraga, 2019). Za spopadanje s temi izzivi je bil razvit projekt **IRRIGAVIT**, katerega cilj je spodbujati učinkovito in trajnostno upravljanje vodnih virov v vinogradih z uporabo naprednih tehnoloških orodij in inovativnih znanstvenih metod. IRRIGAVIT predstavlja naravno nadaljevanje prejšnjega projekta **ACQUAVITIS**, ki je nudil dragoceno eksperimentalno fazo za uporabo ekohidroloških tehnik v čezmejnem vinogradništvu. Pilotna območja, določena na območju med Italijo in Slovenijo, so omogočila preučevanje načinov polnjenja in izkoriščanja vodnih virov v treh različnih pedoklimatskih okoljih, ki so posebej ranljiva tako z vidika podnebja kot geomorfologije:

- klasično kraško okolje (Ceroglie in Komen),
- Flišni podlagi (Budhini in Potok–Stronc),
- nižinska območja (Precenico) in rahlo dvignjeni med dolinski predeli (Capriva),

pri čemer je bilo jasno razvidno, da sta razpoložljivost vode in strategije izrabe s strani vinske trte tesno povezani z geološkimi in hidrogeološkimi značilnostmi posameznega območja. Pridobljene izkušnje so omogočile testiranje različnih pristopov vzorčenja, oceno tehničnih in logističnih omejitev ter poglobitev razumevanja glavnih dejavnikov spremenljivosti v različnih pedoklimatskih kontekstih. Iz teh spoznanj je projekt **IRRIGAVIT** sprejel bolj usmerjen pristop, pri katerem so bile dejavnosti osredotočene na eno samo poskusno lokacijo: vinograd v kraju **Corno di Rosazzo, na tleh, nastalih iz fliša**, za katere so značilne jasno opredeljene mikroklimatske in upravljalvske razmere. Ta izbira je omogočila izpopolnitev strategije vzorčenja, pridobitev bolj zanesljivih podatkov in izboljšanje interpretativne sposobnosti. Primerjava med obema izkušnjama – tako z metodološkega vidika kot z vidika rezultatov – je omogočila oblikovanje temeljev za razvoj ponovljivega operativnega modela, ki lahko podpira vinogradnike pri prilagajanju podnebnim spremembam in pri ciljnem upravljanju namakanja v izrednih razmerah.

V okviru projekta je ekipa **Univerze Ca' Foscari iz Benetk** – odgovorna za **delovni sklop 3** – uporabila inovativen ekohidrološki pristop z nizkim okoljskim vplivom, ki uporablja stabilne izotope kisika in vodika kot naravne sledilce za rekonstrukcijo poti vode v kontinuumu tla–rastlina–atmosfera (Scandellari in Penna, 2018). Z ekohidrološkimi študijami (pedologija, hidrologija in rastlinska ekofiziologija) je mogoče:

- ugotoviti, na katerih globinah tal trte tekom sezone absorbirajo vodo;
- razlikovati med nedavnimi padavinami in vodo, shranjeno v globljih plasteh tal;
- analizirati sezonsko dinamiko vodnih virov v tleh;
- integrirati izotopske, podnebne in agronomske podatke za razvoj učinkovitejših namakalnih strategij.

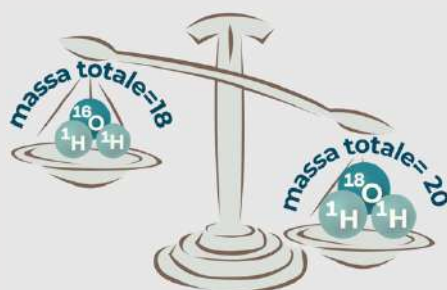
Te informacije omogočajo natančnejše prilagajanje namakanja, zmanjšanje vodnih izgub in povečanje odpornosti vinogradov na podnebni stres, kar prispeva k bolj trajnostnemu in prilagodljivemu vinogradništvu (Fraga et al., 2019).

Stabilni izotopi vode v ekohidroloških študijah

Voda je sestavljena iz mešanice molekul, ki vsebujejo različne stabilne izotope vodika in kisika (npr. ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^1H ali proti ter ^2H ali deuterij). Izotopi (iz grščine *iso topos* »enako mesto«) so atomi z enakim atomskim številom, vendar različno masno številko, saj vsebujejo različno število nevtronov.

Razlika v masi med težjimi in lažjimi izotopi povzroča različno kemijsko-fizikalno obnašanje med procesi spremembe faze. Zlasti med

Voda je sestavljena iz zmesi **izotopolognih molekul**, torej molekul, ki so zgrajene iz različnih stabilnih izotopov vodika in kisika (npr. ^{16}O , ^{18}O ; ^1H in ^2H). Izotopske vrednosti se izražajo v delta enotah (δ), ki predstavljajo odmik razmerja med redkejšim (težjim) in pogostejšim (lažjim) izotopom v vzorcu glede na referenčni standard (Craig, 1961)



Unità Delta

$$\delta = \frac{(R_{\text{campione}} - R_{\text{standard}})}{R_{\text{standard}}} \text{‰}$$

Za vodo je mednarodni standard Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW), ki ga je razvila Mednarodna agencija za atomsko energijo (IAEA) iz vodnih vzorcev, odvzetih v morjih in oceanih na različnih globinah (Gonfiantini, 1978)

izhlapevanjem molekule z lažjimi izotopi (^1H , ^{16}O) prehajajo v plinasto fazo prednostno, medtem ko med **kondenzacijo** molekule s težjimi izotopi (^2H , ^{18}O) lažje prehajajo v tekočo fazo (Sharp, 2017).

Ti mehanizmi, imenovani **izotopsko frakcioniranje**, povzročajo sezonsko in prostorsko variabilnost v izotopski sestavi padavin. Na splošno:

- **pozimi**, na višjih nadmorskih višinah ali z večanjem oddaljenosti od morja opazujemo bolj negativne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ (**osiromašene padavine** s težjimi izotopi);
- **poleti** ali v bližini obalnih območij pa so vrednosti manj negativne (**padavine** razmeroma **obogatene** s težjimi izotopi).

Iz tega sledi, da je vsak padavinski dogodek **edinstven** in označen s svojo **izotopsko podpisno sestavo**, ki **se sčasoma ohrani v talnem profilu**.

Podrobneje lahko tla obravnavamo kot stratificiran sistem, podvržen različnim časom vodne obnove. **Površinski sloji** so bolj izpostavljeni izhlapevanju, zato kažejo hitro izotopsko spremenljivost zaradi izhlapevanja in nedavnih padavin. Nasprotno pa globlji sloji zadržujejo vodo dlje časa, kar spodbuja postopno mešanje nedavnih in preteklih padavin ter ohranjanje izotopske sestave, bližje letnemu tehtanemu povprečju, pri čemer imajo v zmernih širinah največji pomen spomladanske in jesenske padavine (ki prispevajo največje akumulacije).

Če predpostavimo, da voda, ki jo trta absorbira (v ksilemskem soku), ne doživi izotopskega frakcioniranja, je z integriranim spremljanjem **padavin, talne vode in ksilemske vode** mogoče določiti **globino koreninskega vpijanja** ter ugotoviti **izvor vode prisotne v talnem profilu** (Penna et al., 2020; Scandellari et al., 2024).

Pilotno območje Corno di Rosazzo

Študija je bila osredotočena na terasiran vinograd sorte rumena rebula **kmetijskega podjetja Specogna** v Corno di Rosazzo (UD, Italija), ki spada v vinorodno območje **Konzorcija za zaščito vin Friuli Colli Orientali e Ramandolo** (46,02°N, 13,43°E; 140 m n. v.; sl. 1).

V vinogradu, ki je bil postavljen leta 2014, rase *Vitis vinifera* cv. rumena rebula, cepljena na podlagi

Kober 5BB. Vinograd je voden v obliki vzgoje **gobelet**, značilni za mediteranska območja (Deloire et al., 2001, 2022).

Podnebje je submediteransko, s približno 1400 mm letnih padavin, razporejenih bimodalno, z maksimumi jeseni in spomladi ter z izrazitimi nihanji med suhimi in deževnimi sezonami (ARPA FVG, 2023 a,b; 2024).

Tla izvirajo iz preperevanja **fliša** (laporji in peščenjaki), imajo visoko drenažno sposobnost in dosegajo globino med 1 in 2 metri. Gre za peščeno meljasta tla (Shepardova klasifikacija) oziroma *silty loam* (USDA klasifikacija) z izrazito prisotnostjo prodnatih delcev (med 21 % in 60 %), sestavljenih predvsem iz peščenjakovih in deloma apnenčastih klastov.

Vzorčevalne dejavnosti

V okviru projekta je bila izvedena vzorčevalna kampanja, ki se je začela januarja 2024 in zaključila februarja 2025 (Preg. 1), ter omogočila pridobitev ključnih izotopskih podatkov za razumevanje vodnih tokov v vinogradu. Vzorčenja so bila izvedena s podporo zunanje službe **Univerze v Trstu**, ki je podrobno opravila naslednje naloge: (i) vzorčenje tal in ksilemske vode; (ii) teksturne in mineralogške analize; (iii) analize vsebnosti vode in vodnega potenciala tal; (iv) geološko, geomorfološko in hidrogeološko opredelitev območja.



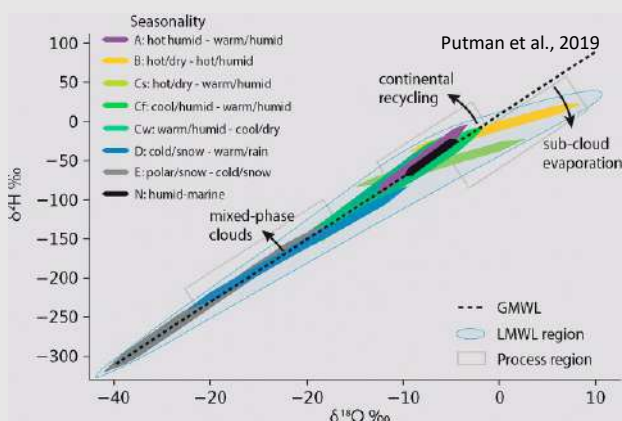
Slika 1. Z rdečo so označena raziskovalna območja projekta Acquavitis, z modro pa pilotni raziskovalni vinograd projekta Irrigavit v Corno di Rosazzo (UD).

V projektu je bilo zbranih več kot **340 vzorcev**:

- **talnih profilov**, odvzeti na različnih globinah za preučevanje variabilnosti izotopskih vrednosti in razumevanje razpoložljivosti vode (vsebnost vode in vodni potencial tal);
- **vzorcev ksilemske soka**, izločeni iz mladik vinske trte za analizo vode, ki jo rastlina dejansko uporablja;
- **mesečnih padavin** in posameznih padavinskih dogodkov, zbranih za izgradnjo lokalne meteorske vodne črte (*Local Meteoric Water Line* -LMWL), potrebne za primerjavo vode, ki jo trta absorbira, z vodo, ki dejansko pade v obliki padavin.

Global Meteoric Water Line (GMWL) in Local Meteoric Water Line (LMWL)

Craig je leta 1961, na podlagi analiz padavin in površinskih vod iz različnih delov sveta, opazil, da so izotopske vrednosti kisika in vodika močno korelirane ter ležijo na regresijski premici, danes znani kot **Global Meteoric Water Line (GMWL)**:



Ta globalna referenčna premica ni fiksna, saj se njen naklon in presečišče spreminjata glede na lokalne podnebne procese. Naklon (~8) odraža izotopsko frakcioniranje, ki poteka med faznimi prehodi vode (izhlapevanje in kondenzacija):

- v sušnih pogojih, z nizko relativno zračno vlago ali izrazitim izhlapevanjem, se naklon običajno zmanjša;
- v vlažnejših okoljih ostaja blizu "klasičnih" vrednosti.

Za regionalne ali lokalne študije se uporablja **Local Meteoric Water Line (LMWL)**, izračunana iz padavin, zbranih neposredno na izbranem območju. LMWL upošteva podnebne značilnosti posamezne regije in tako nudi natančnejši referenčni okvir kot GMWL.

Izračun te premice je ključen za interpretacijo izotopskih podatkov zbranih na določenem območju, saj omogoča primerjavo izotopskih podpisov padavin s tistimi v tleh in v ksilemskem soku vinske trte.

Metodologija

- **Tla:** 29. januarja 2024 je bil opravljen preliminarni izhod na teren za testiranje metodologije ekstrakcije vode iz tal. Za odvzem je bil uporabljen mehanski vrtni vzorčevalnik, ki je omogočil vzorčenje talnih jeder do največje globine 2 m.



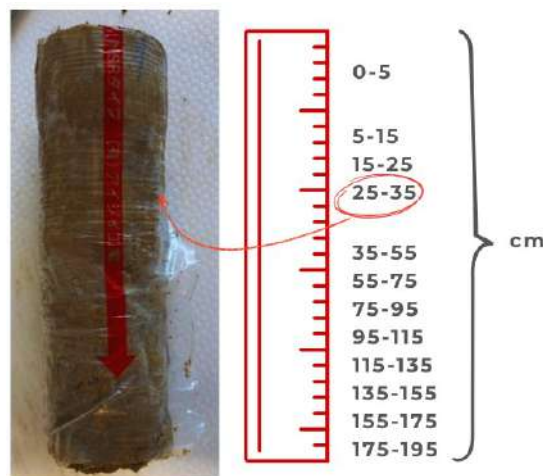
Slika 2. Vzorčenje tal na preučevanem področju

Ob vsakem vzorčevalnem dnevu so bila odvzeta **tri jedra**, ki so bila nato na terenu razdeljena na segmente različne dolžine (sl. 3), da bi dosegli boljšo vertikalno ločljivost v površinskih slojih:

- o segment 5 cm od 0 do -5 cm,
- o segmenti po 10 cm od -5 do -35 cm,
- o segmenti po 20 cm od -35 cm do dna jedra.

Frekvenca vzorčenja, katere posamezni dnevi so prikazani v tabeli, je bila dvotedenska, od druge polovice aprila do konca avgusta 2024.

Odvzeti vzorci so bili shranjeni v vrečkah Ziploc®, med transportom vzdrževani pri nizki temperaturi, nato pa v laboratoriju hranjeni v hladilniku pri 4 °C do **ekstrakcije vode** (sl. 4).



Slika 3. Segment talnega jedra (25-35 cm)



Slika 4. Ekstrakcija vode iz tal s kriogeno vakuumsko destilacijo (West et al., 2006). (a) Vzorec tal, po tem ko je bil zdrobljen, se hitro zamrzne pri -196 °C z potopom v tekoči dušik (N_2) in razplini s pomočjo vakuumске črpalke. (b) Nato se segreje v vodni kopeli do 100 °C: vsebovana voda izhlapi in (c) nastala para se zbere s kondenzacijo (zamrzovanjem) v cevi, potopljeni v tekoči dušik. Tako pridobljena voda se nato hrani pri nizkih temperaturah do nadaljnje analize.

Datum	Mesečne padavine	Posamezni padavinski dogodki	Tla	Ksilemska voda
29/01/24	Instalacija dežemera		Poskus vzorčenja	
29/02/24	X			
02/04/24	X			
22/04/24		Instalacija dežemera	X	
23/04/24		X		
30/04/24	X			
03/05/24		X		
06/05/24			X	
08/05/24		X		
18/05/24		X		
20/05/24			X	Poskus vzorčenja
22/05/24		X		
24/05/24		X		
31/05/24		X		
02/06/24	X			
04/06/24		X		
11/06/24		X		
13/06/24		X		
17/06/24			X	X
25/06/24		X		
01/07/24	X	X		
05/07/24			X	X
15/07/24		X	X	X
19/07/24		X		
28/07/24		X		
29/07/24	X		X	X
01/08/24		X		
05/08/24		X		
12/08/24	X		X	X
19/08/24	X	X		
26/08/24			X	X
06/09/24		X		
09/09/24		X		
12/09/24		X		
30/09/24	X			
06/10/24		X		
11/10/24		X		
31/10/24	X			
01/12/24	X			
31/12/24	X			
04/02/25	X			
Št. skupnih vzorcev	12	23	254	55

Tabela 1. Dnevi vzorčenja (X). Z zeleno (sivo) je označen datum začetka (konca) vzorčenja. Ob koncu kampanje je bilo zbranih skupaj 35 vzorcev padavin, 254 talnih frakcij in 55 vzorcev ksilemskega soka.

- Ksilemski sok:** ksilemski sok je bila vzorčen vsakih štirinajst dni, od konca junija do konca avgusta 2024. Za vsako točko talnega vzorčenja so bili pri treh bližnjih trtah odvzeti enoletni poganjki, brez grozdov, dolgi približno 1 m, s čimer so bili pridobljeni trije vzorci trt za vsako odvzeto jedro (devet vzorcev na vsak vzorčevalni dan). Po hitri odstranitvi listov, skorje in floema na dnu poganjka (da se prepreči kontaminacija) je bila ksilemska voda iz žilnih snopov ekstrahirana na terenu z vakuumsko črpalko in zbrana v 2-mL epruvete Eppendorf®. Pridobljeni vzorci so bili med transportom vzdrževani pri nizki temperaturi in shranjeni v zamrzovalniku pri -18 °C do analize.



Slika 5. Ekstrakcija ksilemskega soka s pomočjo vakuumske črpalke po protokolu, ki so ga predlagali Ewers in sodelavci (n.d.).

- Padavine:** vzorci deževnice so bili zbrani z uporabo 10-litrskega dežemera, opremljenega s sistemom proti izhlapevanju (IAEA, 2014). Pogostost vzorčenja je bila mesečna in je zajela padavine celotnega leta (februar 2024 – januar 2025), z namenom določiti LMWL lokacije.



Poleg tega so bili med rastno sezono (pomlad–pozno poletje) zbrani tudi vzorci posameznih padavinskih dogodkov z uporabo 3-litrskega dežemera Palmex® (sl. 6).

Del zbrane vode je bil prelit v HDPE posodice Kartell® prostornine 25 ali 50 mL, ki so bile shranjene v hladilniku pri 4 °C do analize.

Slika 6. Dežemer Palmex®

Analize in rezultati: kaj smo odkrili?

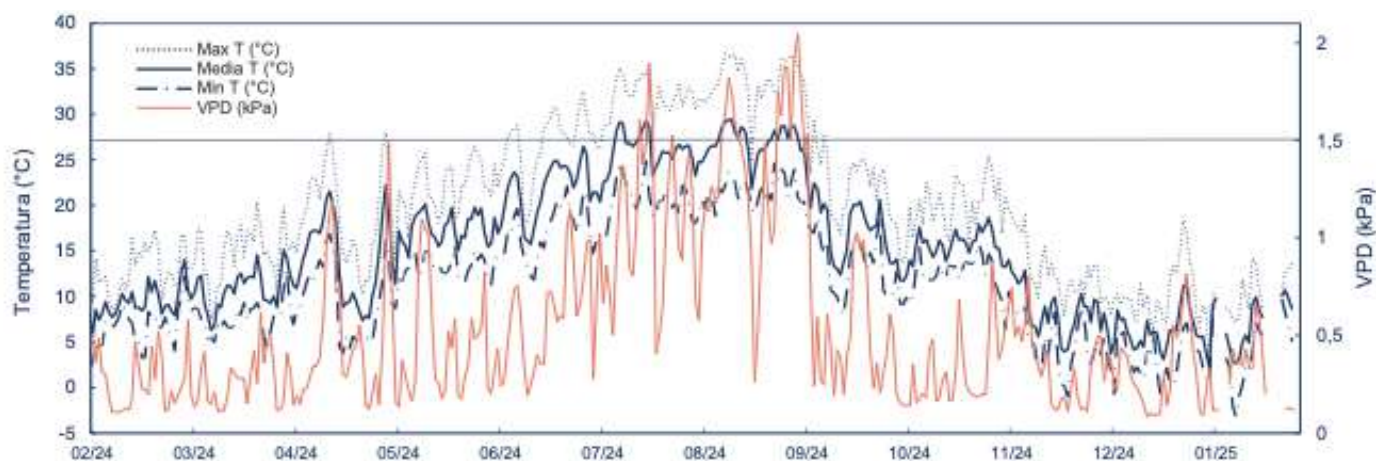
Podnebne razmere med obdobjem preučevanja

Med kampanjo so bili poleg zgoraj opisanih vzorčenj so bili spremljani tudi **meteorološki podatki**, kot so temperatura (°C), relativna vlažnost (%) in sončno sevanje (%). Izračunan je bil VPD (Vapour Pressure Deficit, kPa), ključen kazalnik atmosferskega evaporacijskega povpraševanja in vodnega stresa rastlin, ter količina mesečnih padavin (mm).

Povzetek...

- Leto 2024 je bilo zahtevno: pogoste spomladanske padavine (42 deževnih dni, skupaj 406 mm) so negativno vplivale na cvetenje; vroče in sušno poletje je zmanjšalo pridelek; med trgatvijo pa so močne padavine (111 mm dne 12. 09. 2024) dodatno otežile trganje grozdja.
- Kljub prisotnosti globokih korenin (najdenih do 1,5 m globine) je trta večinoma črpala vodo iz površinskega sloja tal (0–35 cm), ki je ohranil dovolj vlage tudi v najtoplejših mesecih.
- To je verjetno povezano z agronomskimi praksami (npr. mulčenje in uporaba organskih ostankov), ki izboljšujejo zadrževalno sposobnost vode v zgornjem sloju tal, ter z izbiro sistema rezanja in vzgoje trte.
- Globlja voda pa odraža predvsem zimske in spomladanske padavine ter predstavlja strateško rezervo v primeru dolgotrajne suše.

V opazovanem obdobju je bila povprečna temperatura zraka **15,34 °C**, z absolutnim maksimumom 36,63 °C (11. 08. 24) in minimumom **3,09 °C** (05. 01. 25). Med **zimskimi in spomladanskimi meseci** so bile temperature nižje od 20 °C, spremljale pa so jih nizke vrednosti VPD (<0,5 kPa), kar potrjuje zmanjšano evaporacijsko povpraševanje atmosfere.



Slika 7: Temperatura (najvišja, povprečna in najnižja, °C) ter parni tlačni primanjkljaj (kPa) na poskusnem mestu.

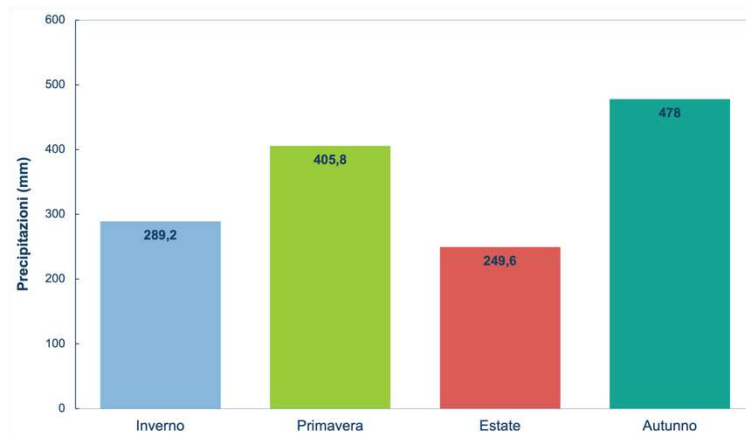
Z začetkom **poletja** je bil opažen **izrazit porast** temperatur, z dnevnimi srednjimi vrednostmi nad 25 °C in s 14 dnevi, ko so najvišje temperature presegle 35 °C, kar jasno kaže na prisotnost ekstremnih vročinskih razmer. Te razmere dodatno potrjuje potek **primanjkljaja parnega tlaka (VPD)**: v 19 dneh med sredino julija in začetkom septembra so vrednosti presegle prag **1,50 kPa**, kar ustreza **zmernemu do izrazitemu vodnemu stresu** trte, pri čemer je bil najvišji zabeležen vrh **2,04 kPa** dne 1. septembra

2024. V **jesenskem in zimskem obdobju** je znižanje temperatur ponovno povzročilo nizke vrednosti VPD, kar je atmosfersko evaporacijsko povpraševanje vrnilo na minimalne ravni (slika 7).

Sezonski potek padavin

V obdobju februar 2024–januar 2025 je skupna letna količina izmerjenih padavin znašala 1422 mm, kar potrjuje povprečne padavinske vrednosti za to območje (1400 mm na leto). Tudi razporeditev padavin je sledila značilnemu **bimodalnemu vzorcu** regije, z dvema glavnima deževnima sezonama:

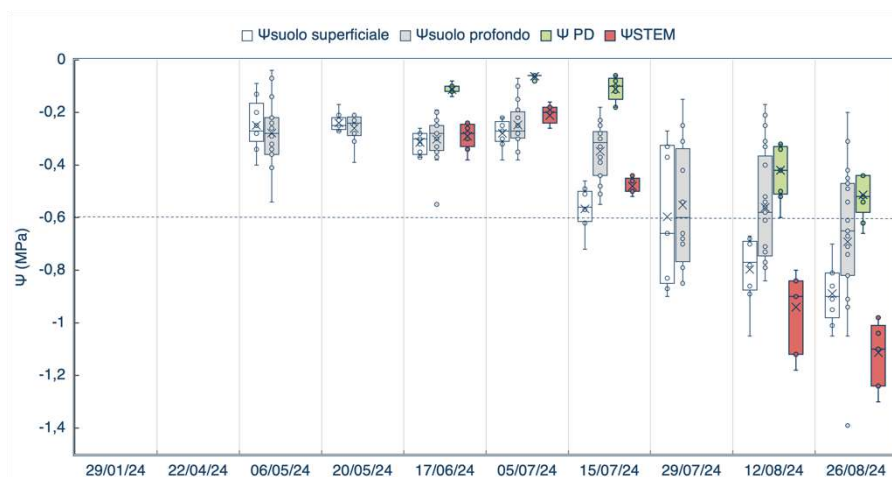
- **jesenski maksimum s 478 mm**, ki predstavlja najbolj namočeno obdobje;
- **spomladanski maksimum s 406 mm**.



Slika 8. Sezonski potek padavin (mm)

Poletje je bilo razmeroma suho, s skupno 250 mm padavin, medtem ko so zimske padavine dosegle vmesne vrednosti in prispevale k zasičenju tal. Na splošno sezonska razporeditev potrjuje ključno vlogo spomladanskih in poletnih padavin pri zagotavljanju zadostne vodne oskrbe, potrebne za trajnost vinograda (slika 8).

Vodni potencial tal in trte



Slika 9. Talni potencial (površinski in globoki; MPa) ter vodni potencial listov pred zoro (Ψ_{PD}) in stebila opoldne (Ψ_{STEM}). Prekinjena črta: huda vodna obremenitev.

Izrazita sezonskost je opazna tudi pri vrednostih **vodnega potenciala tal (Ψ_{tla})**, ki predstavlja kazalnik vlažnosti tal in razpoložljivosti vode za rastline. V **spomladansko-poletnem obdobju** je bil potencial, tako v zgornjih kot v globljih plasteh, visok in stabilen (povprečje $\Psi_{tla} = -0,27$ MPa). To odraža dobro razpoložljivost vode v tleh, izhajajočo iz obilnih spomladanskih padavin, kar dodatno potrjujejo tudi

podatki o **gravimetrični vsebnosti** vode v tleh. Kasneje, z naraščanjem temperatur, zaporedjem vročih dni in ponavljajočimi se epizodami **VPD > 1,5 kPa**, je Ψ_{tla} začel postopoma upadati, pri čemer je bil upad najizrazitejši v površinskih plasteh, ki so bolj občutljive na izhlapevanje. Do konca avgusta je tako dosegel minimalno vrednost $-0,89$ MPa, medtem ko je v globljih plasteh ostala večja razpoložljivost vode.

Tudi fiziološki odziv trte, ovrednoten prek listnih vodnih potencialov pred zoro (Ψ_{PD}) ter stebelnih vodnih potencialov opoldne (Ψ_{STEM}), je sledil isti dinamiki.

Sredi junija in v začetku julija so bile vrednosti blizu ničle, kar kaže na odsotnost **vodnega stresa**.

Vodni potencial listov

Ko govorimo o namakanju v sili, je ključno poznati hidrološko stanje trte, saj je njena valutacija bistvena za odločitev **ali in kdaj posredovati**. Med različnimi razpoložljivimi orodji je ena izmed najzanesljivejših metod **merjenje vodnega potenciala vinske trte**, pri čemer se spremljata:

- **Listni potencial pred zoro (Ψ_{PD})**: izmerjen približno dve uri pred sončnim vzhodom; odraža ravnotežje med rastlino in tlemi ter je pokazatelj razpoložljivosti vode.
- **Potencial stebela opoldne (Ψ_{STEM})**: izmerjen okoli poldneva; kaže sposobnost rastline, da se odzove na visoko evaporacijsko obremenitev v najtoplejšem delu dneva.

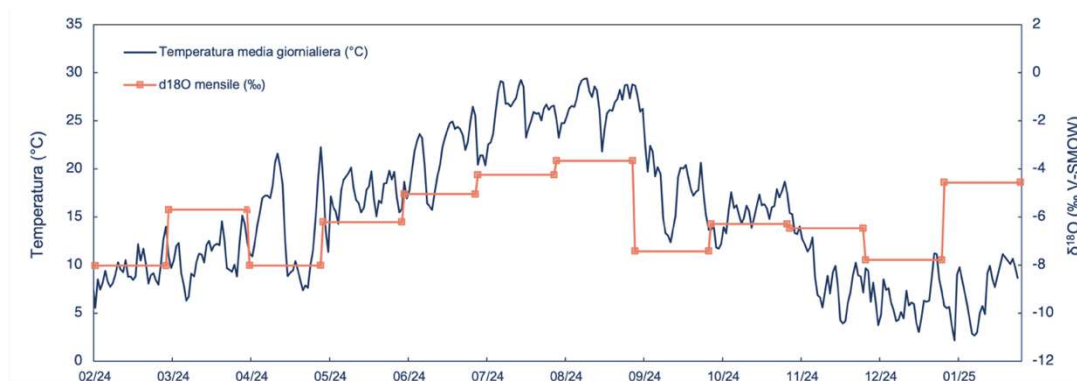
Med vodnim potencialom listov in stebela, vlažnostjo tal ter fiziološkim odzivom trte v različnih fenoloških fazah obstaja tesna povezanost. Poznavanje teh vrednosti je zato ključno za pravilno načrtovanje namakalnih ukrepov (Deloire et al., 2020).

V strokovni literaturi so bili predlagani **različni pragovi vodnega potenciala**; spodnja tabela povzema najuporabnejše smernice za hitro in učinkovito interpretacijo.

Ψ_{PD}	Vodni status trte (Ojeda 2008)	Ψ_{STEM}	Vodni status (Leeuwen et al., 2009)
$0 > \Psi > -0.2$ Mpa	Odsotnost vodnega stresa	$\Psi > -0.6$ Mpa	Odsotnost vodnega stresa
$-0.2 > \Psi > -0.4$ Mpa	Nizek do zmeren vodni stres	$-0.6 > \Psi > -0.9$ Mpa	Nizek do zmeren vodni stres
$-0.4 > \Psi > -0.6$ Mpa	Zmeren vodni stres	$-0.9 > \Psi > -1.1$	Zmeren vodni stres
$-0.6 > \Psi > -0.8$ Mpa	Močan vodni stres	$-1.1 > \Psi > -1.4$	Zmeren do močan vodni stres
$\Psi < -0.8$ Mpa	Zelo močan vodni stres	$\Psi < -1.4$ Mpa	Močan vodni stres

Od sredine julija dalje pa sta se zaradi postopnega zmanjševanja razpoložljive vode v tleh in ponavljajočih se visokih vrednosti VPD oba parametra začela vedno bolj zniževati, tako da sta konec avgusta dosegla vrednosti $\Psi_{PD} = -0,51$ MPa in $\Psi_{STEM} = -1,11$ MPa, kar nakazuje na **zmerne do hude razmere vodnega stresa** (slika 9). Poudariti pa velja, da popolna odsotnost vodnega stresa pri trti, zlasti v specifičnih fenoloških fazah, ni vedno zaželena, saj lahko vodi do poslabšanja nekaterih kakovostnih značilnosti vina. Na primer, vrednosti Ψ_{PD} med 0 in $-0,2$ MPa v obdobju barvanja in dozorevanja jagod povzročijo pretirano bujno rast. Ta sicer zagotavlja visoke pridelke v smislu količine, vendar bistveno zmanjša vsebnost kakovostnih sestavin v jagodah, kot so polifenoli in sladkorji, ki neposredno vplivajo na organoleptične lastnosti vina.

Stabilni izotopi vode: padavine, prst in ksilemski sok



Slika 10. Dnevni potek temperature (°C) in izotopske sestave padavin ($\delta^{18}\text{O}$, ‰).

Izotopska analiza padavin je pokazala **jasno izraženo sezonsko variabilnost**; kot prikazuje graf (slika 10), se sezonskost opazi ne le v izotopskih vrednostih (oranžna črta), temveč tudi v klimatskih parametrih (modra črta). V najhladnejših mesecih so vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ bolj negativne, okrog $-8,0\text{‰}$, kar je skladno z značilnostmi naših geografskih širin, kjer so **zimske padavine** bolj »zrevščene« z vidika težjih izotopov. Nasprotno pa v **poletnih mesecih**, zaznamovanih z višjimi temperaturami, vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ postanejo manj negativne, kar kaže na bolj »**obogatene**« padavine; najvišja izmerjena vrednost $\delta^{18}\text{O}$ je bila $-3,67\text{‰}$.



POUDAREK: izotopske analize v laboratoriju

Voda, vsebovana v vzorcih **padavin**, **tal** in **ksilemskega soka**, je bila analizirana za določitev razmerij **stabilnih izotopov kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$)**.

Analize so bile izvedene v laboratorijih Univerze Ca' Foscari Benetke z **visokoločljivostnimi instrumenti** (laserski spektroskop Picarro L2130-i, povezan z enotama *Vaporization* in *Induction Module* A0213).



Princip delovanja

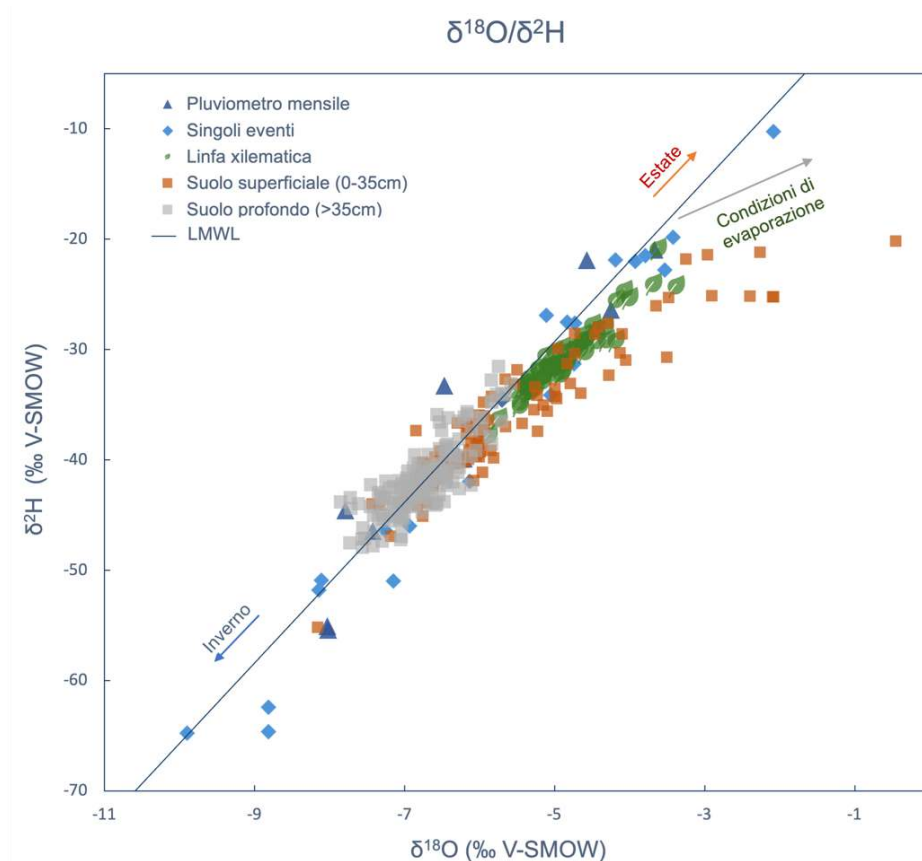
- Vzorci se segrejejo, da se voda pretvori v paro.
- Para vstopi v optično votlino, kjer laserski žarek večkrat »odboji« med visoko odbojno zrcali. Fotodetektor meri čas dušenja laserskega signala, ki se spreminja glede na absorpcijo molekul v pari. Ta meritev omogoča določanje vsebnosti stabilnih izotopov ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) v različnih razmerjih med izotopološkimi molekulami vode.
- Rezultati so izraženi v **delta notaciji (δ)** glede na standard V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), z analitično natančnostjo približno $\pm 0,1\text{‰}$ za $\delta^{18}\text{O}$ in $\pm 0,3\text{‰}$ za $\delta^2\text{H}$.
- Za zagotavljanje natančnosti in zanesljivosti je vsaka meritev kalibrirana z notranjimi in Za zagotavljanje natančnosti in zanesljivosti je vsaka meritev kalibrirana z notranjimi in mednarodnimi standardi IAEA (*International Atomic Energy Agency*).

Analiza vzorcev

- **Padavine in talna voda:** analizirane z **laserskim spektroskopom Picarro L2130-i**, povezanim z **vaporizatorjem** in oskrbovanim s plinom *Zero Air* kot nosilcem. Vsak vzorec je bil podvržen **8 zaporednim injekcijam**, da se čim bolj zmanjša učinek spomina instrumenta.
- **Ksilemski sok:** analiza je zahtevnejša, saj lahko vsebuje organske spojine, ki vplivajo na meritev. Zato je bil uporabljen **indukcijski modul** (Picarro A0213), priključen na isti spektroskop. Sistem **prečisti** vodno paro s pomočjo dveh kartuš – ene z aktivnim ogljem in ene oksidativne – ki odstranjujeta hlapne spojine. Analize se izvajajo ročno, z injiciranjem približno $4,6\text{ }\mu\text{L}$ soka na filter; vsak vzorec je izmerjen **najmanj trikrat**, pri čemer se prva meritev zavrže zaradi morebitnih preostalih učinkov.

Sezonski potek poudarja pomembnost spremljanja izotopskih značilnosti padavin, saj predstavljajo "spomin" na podnebne razmere, ki se nato prenesejo v talni profil in posledično v vodo, ki jo trta absorbira.

Izotopski podatki (padavine, tla in ksilemski sokovi; slika 11) so prikazani na grafu $\delta^{18}\text{O}$ proti $\delta^2\text{H}$, pri čemer je bila kot referenca uporabljena **lokalna meteorna vodna črta (LMWL: $\delta^2\text{H} = 7,29 \cdot \delta^{18}\text{O} + 7,15$; $R^2 = 0,91$)**, zgrajena na podlagi mesečnih padavin, vzorčenih v obdobju enega leta.



Slika 11. Izotopski podatki (‰), pridobljeni med kampanjo 2024–2025

Iz grafa je razvidno, da posamezni padavinski dogodki izkazujejo večjo izotopsko variabilnost, medtem ko so mesečne vrednosti bolj homogene porazdeljene, saj predstavljajo uteženo povprečje padavin za zadevno obdobje.

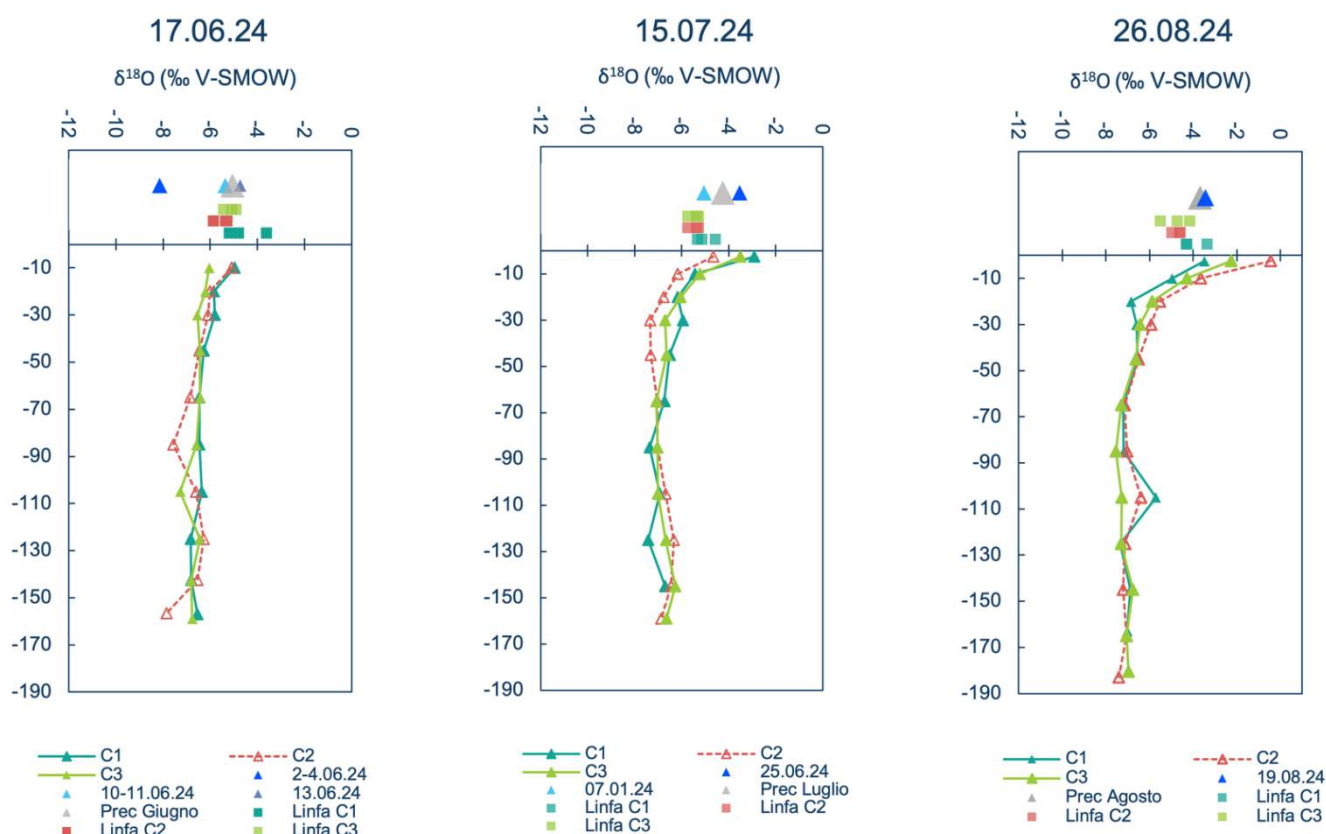
Da bi določili, na kateri globini poteka največja koreninska aktivnost pri črpanju vode, so bili vzorci talne vode razdeljeni v **dve skupini**:

- **Površinska tla (0–35 cm);**
- **Globlja tla (>35 cm).**

Iz grafa jasno izstopata **dve ločeni skupini**: vzorci iz **površinskega sloja** ležijo na ali pod lokalno meteorno vodno črto (LMWL), kar kaže na izotopsko obogatitev zaradi evaporacijskih procesov. Nasprotno pa so vzorci **globljih tal** (povprečje $\delta^{18}\text{O} = -6,74\text{‰}$) poravnani z LMWL ali rahlo nad njo, kar kaže na odsotnost izhlapevalnega frakcioniranja ter odraža povprečni izotopski signal padavin, ki infiltrirajo na večje globine; njihova letna utežena povprečna vrednost je $\delta^{18}\text{O} = -6,27\text{‰}$.

Primerjava izotopskih vrednosti **ksilemskih sokov** z vrednostmi vode v tleh pokaže, da se sokovi izjemno dobro ujemajo s površinskim talnim slojem. To pomeni, da čeprav se korenine vinske trte lahko raztezajo tudi do globine približno 1,5 m, **se večina absorpcije vode dejansko odvija v površinskem sloju tal.**

Če povežemo to ugotovitev z grafom vertikalnih talnih profilov (slika 12), postane dinamika še izrazitejša. V treh izbranih trenutkih sezone (17. junij, 15. julij in 26. avgust 2024) jasno vidimo dva ločena skupka: **površinski sloj**, izotopsko obogaten in časovno zelo spremenljiv, občutljiv na izhlapevanje in na posamezne padavinske dogodke, ter **globlji sloj**, bistveno stabilnejši in izotopsko skladen z uteženim povprečjem letnih padavin.



Slika 12. Spremembe izotopske sestave kisika vzdolž talnih profilov (vrtnice C1, C2 in C3), ksilemske linfe ter padavin (‰).

Ksilemski sok se dosledno umešča v bližino vrednosti površinskega sloja, kar kaže, da kljub globokemu koreninskemu sistemu absorpcija vode v času vegetacije poteka predvsem v prvih **5-20 cm** tal – tudi v obdobjih, ko so temperature visoke.

Iz teh opazovanj izhaja, da trta v tem vinogradu pretežno črpa vodo iz površinskega sloja, čeprav je ta najbolj izpostavljen evaporacijskemu stresu. To spoznanje ima neposredne posledice za **upravljanje z izrednim namakanjem**: specifični posegi, tudi z minimalnimi količinami vode, usmerjeni v prvih nekaj centimetrov tal, bi lahko bili zelo učinkoviti pri zmanjševanju vodnega stresa trte, kadar bi to bilo potrebno.

Kljub temu pa visoka **sposobnost prilagajanja** tega vinograda, ki med vegetacijsko sezono ni bil namakan, čeprav so bili vremenski pogoji zahtevni, kaže, da se je trta **učinkovito prilagodila** stresnim razmeram. K tej odpornosti prispevajo tudi odločitve pri upravljanju: izbrani sistem rasti in rezanja in agronomske prakse so izboljšali zadrževanje vode v tleh ter povečali njihovo rodovitnost. **Ozelenitev** in

še posebej **zeleno gnojenje** vplivata na dva ključna dejavnika: po eni strani zmanjšujeta intenzivnost **površinskega odtoka** – ki vodi v izgubo sedimentov in hranil – po drugi pa povečujeta **vsebnost organske snovi in talne favne**, zaradi česar vinograd postane **živ in sinergičen ekosistem**, ki lahko podpira trto tudi v stresnih razmerah.

Pomembno pa je poudariti, da se navedene ugotovitve nanašajo izključno na obravnavani vinograd. Vsak vinograd ima namreč svoje specifične klimatske, geomorfološke in pedološke značilnosti ter lastne sisteme gojenja in upravljanja. Temu se pridružuje še velika medletna variabilnost, zaradi katere je vsaka sezona drugačna od prejšnje.

Zato uporaba stabilnih izotopov kot sledilcev vedno zahteva temeljito predhodno analizo konteksta. Kljub temu pa **osnovni metodološki pristop ostaja nespremenjen, saj temelji na integriranem vzorčenju tal, ksilemskega soka in padavin**.

Poleg tega je mogoče eksperimentalni načrt, glede na lokalne **posebnosti**, prilagoditi okoljskim in agronomskim značilnostim, na primer z: (i) izbiro načina vzorčenja glede na teksturo tal in globino, (ii) zvišanjem frekvenca vzorčenj, (iii) vključitvijo dodatnih matričnih vzorcev, kot sta namakalna voda – kadar se izredno namakanje uporablja – in podtalnice za oceno morebitnih interakcij med površinskimi in podzemnimi vodnimi viri. Dodatno metodološko poglobitev predstavlja izkop raziskovalnih jarkov, ki omogočajo neposreden vpogled v globino in prostorsko razporeditev koreninskega sistema ter nudijo dopolnilne informacije, koristne za interpretacijo izotopskih in hidrogeoloških podatkov.

Od projekta ACQUAVITIS do IRRIGAVIT: metodološki izboljšave

Izkušnje, pridobljene v okviru projekta ACQUAVITIS, so predstavljale pomembno izhodišče; dejansko so bile prava eksperimentalna "vadnica", ki je omogočila izpopolnitev in nadgradnjo metodoloških pristopov, kasneje uporabljenih v projektu IRRIGAVIT. Zlasti so bili dosežene naslednje izboljšave:

- **Povečana frekvenca vzorčenja tal**, večje število odvzetih vzorcev ter višja vertikalna ločljivost. Ta izboljšava se je izkazala za ključno, saj so rezultati projekta IRRIGAVIT pokazali, da trte večino vode črpajo iz površinskih talnih slojev.
- **Večja natančnost pri izboru trtnih poganjkov**: v projektu IRRIGAVIT so bile za vsak točkovni talni karotažni profil vzorčene tri različne trte, kar je zagotovilo boljšo reprezentativnost vinograda.
- **Optimizacija metode ekstrakcije ksilemskega soka**, ki je zmanjšala možnost izhlapevanja in tako izboljšala zanesljivost izotopskih podatkov.
- **Izboljšano spremljanje padavin**, zahvaljujoč zbiranju posameznih padavinskih dogodkov poleg mesečnih vzorcev. To je omogočilo natančnejše prepoznavanje morebitnih izotopskih anomalij v padavinah.
- **Metodološka nadgradnja**: uvedba metode vakuumске kriogene destilacije (CVD) za ekstrakcijo vode iz tal je zagotovila bolj zanesljive rezultate v primerjavi z indukcijskim modulom (IM), uporabljenim v prejšnjem projektu. CVD je povečala učinkovitost ekstrakcije in reprezentativnost

pridobljene vodne frakcije. Že v projektu ACQUAVITIS je bil izveden preliminarni test te tehnike, ki je bil nato v IRRIGAVIT dodatno izpopolnjen, doseganje učinkovitosti ekstrakcije nad 98 %.

- **Večja moč na terenu:** prisotnost dobro usklajene in strokovno močne ekipe je omogočila izboljšanje tako količine kot kakovosti pridobljenih podatkov.

Zaključki

Projekt **ACQUAVITIS** je predstavljal ključen korak pri razumevanju mehanizmov kroženja in uporabe vode v vinogradih, zlasti v pedološko in geološko kompleksnih okoljih **čezmejnega območja**. Zbrani podatki so pokazali, da je razpoložljivost vode za trto močno odvisna od sezonskosti padavin ter od specifičnih lastnosti tal in podlage: spomladanske in pozno jesenske padavine imajo temeljno vlogo pri obnavljanju globokih vodnih zalog, medtem ko poletne padavine navlažijo predvsem površinske talne sloje, ki jih rastline hitro izkoristijo.

Pomemben rezultat je bila tudi potrditev izrazite heterogenosti med preučevanimi vinogradi: v aluvialnih tleh, kot je Precenicco, je voda enakomerneje razporejena v prvem metru tal, medtem ko je v okoljih iz fliša ali v kraških kontekstih razpoložljivost vode močno odvisna od debeline in granulometrije tal ter od stopnje razpokanosti oziroma zakraselega značaja podlage (Peschiutta et al., 2024a,b). Ta spoznanja so omogočila prepoznavanje vrednosti multidisciplinarnega pristopa, ki združuje izotopske, geološke in ekofiziološke podatke za oblikovanje lokalno prilagojenih hidrogeoloških modelov ter za natančnejše ocenjevanje vodnih potreb trt.

Na teh temeljih je bil zasnovan projekt **IRRIGAVIT**, ki je nadgradil predhodne izkušnje s poudarkom na enem **eksperimentalnem območju** (Corno di Rosazzo), prav tako v terasiranem gričevnatem okolju na podlagi fliša, podobnem mestu Potok-Stronc iz projekta ACQUAVITIS, a z minimalno vsebnostjo skeleta. Z bolj ciljno usmerjenim eksperimentalnim načrtom – pogostejšim vzorčenjem z boljšo vertikalno ločljivostjo, robustnejšimi laboratorijskimi metodami in neprekinjenim spremljanjem klimatskih razmer – je bilo mogoče še bolj poglobiti razumevanje hidroloških procesov v vinogradu.

Primerjava podatkov ACQUAVITIS in IRRIGAVIT je pokazala, da kljub temu, da trte lahko razvijejo globok koreninski sistem, absorpcija vode poteka predvsem v najbolj plitkih talnih slojih (v prvih 30 cm), ki so podvrženi hitrim procesom ponovnega polnjenja in izhlapevanja. Ta vidik, že nakazan v podatkih ACQUAVITIS, je bil v IRRIGAVIT potrjen z večjo trdnostjo zahvaljujoč bolj zanesljivim metodam.

Na kratko, prehod iz projekta ACQUAVITIS na projekt IRRIGAVIT je omogočil, da se je raziskovalna in eksperimentalna faza preoblikovala v bolj zanesljiv in ponovljiv **operativni model**, sposoben **podpirati** namakanje vinogradov v vse bolj kompleksnih podnebnih razmerah.

Smernice za upravljanje vodnih virov v vinogradništvu z uporabo izotopske metode

1. Spremljanje in poznavanje sistema vinograd-tla-podnebje

- Spremljanje meteoroloških podatkov z namestitvijo vremenske postaje na izbranem mestu (temperatura, relativna zračna vlaga, sončno obsevanje, padavine) ter izračun VPD (vapour pressure deficit), kazalnika vodnega stresa.
- Geološko, geomorfološko in hidrogeološko ovrednotenje območja ter mineralogijske in teksturne analize tal.
- Redno ocenjevanje vodne vsebnosti tal, talnega vodnega potenciala in vodnega potenciala trte, ki delujejo kot neposredni kazalniki vodnega statusa rastline.

2. Eksperimentalni načrt vzorčenja

Uporaba stabilnih izotopov zahteva integrirano spremljanje različnih okoljskih matric (padavine, tla, ksilemska linfa), od katerih vsaka sledi specifičnim protokolom. Priporoča se:

- **Padavine:** Namestitev mesečnega dežemera za najmanj 1 leto; namestitev dežemera za zbiranje posameznih padavinskih dogodkov; obe napravi morata biti opremljeni s proti-evaporacijskim sistemom.
- **Tla:** vzorčenje talnih jedrih dolžine vsaj 1 m, razdeljenih v segmente različnih dolžin; metoda ekstrakcije je odvisna od teksture tal; priporočena so vsaj 3 talna jedra, z mesečno frekvenco vzorčenja, ki se med vegetacijo poveča na dvakrat mesečno.
- **Ksilemska linfa:** vzorce se pridobi iz enoletnih poganjkov, in sicer vsaj 3 poganjki na posamezno mesto talnega vzorčenja; Vzorčenje mora potekati vzporedno z vzorčenjem tal.
- **Dodatne matrice:** namakalna voda (kadar se uporablja); voda iz vodnjakov ali podzemne vode.

3. Ekosistemski pristop in dolgoročna vizija

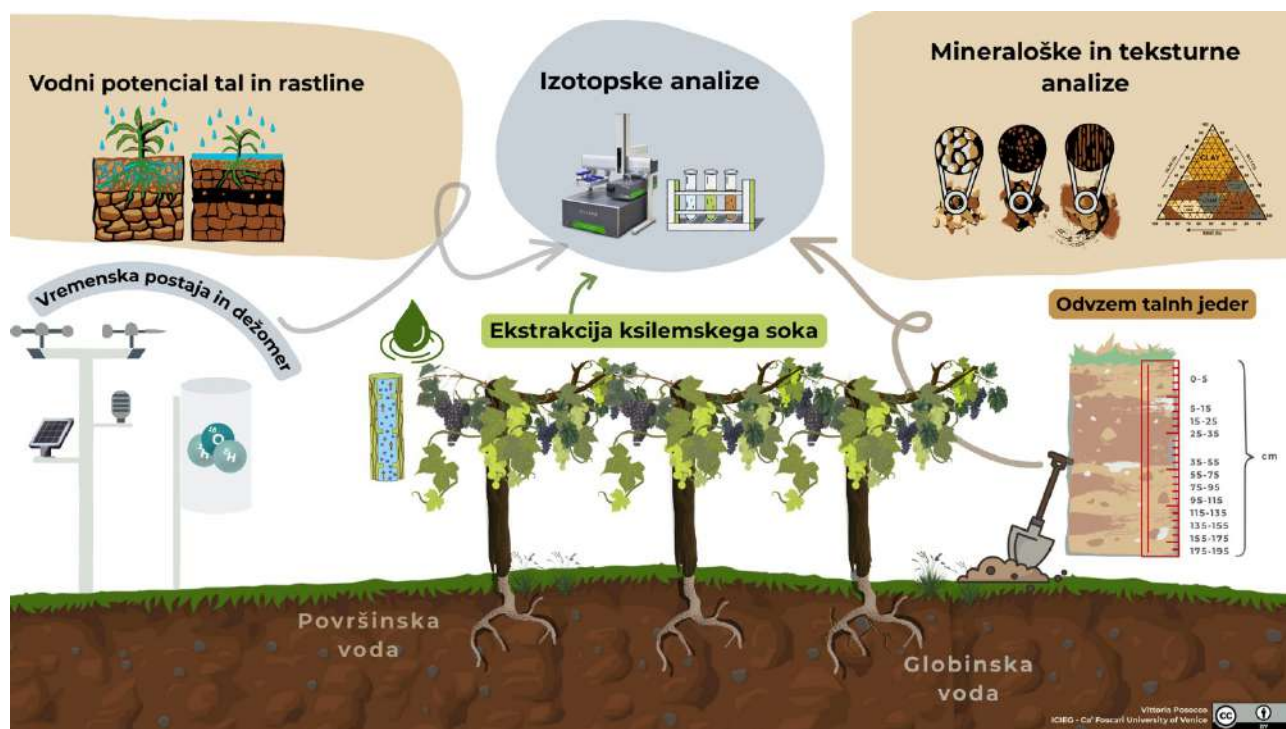
- Integracija podnebnih, pedoloških, fizioloških in izotopskih podatkov za prepoznavanje kritičnih obdobj ter resničnih vodnih virov, ki jih trta izkorišča.
- Povezovanje upravljanja vodnih virov s kmetijskimi praksami za ohranjanje tal in krepitev biotske raznovrstnosti.
- Upoštevanje medletne variabilnosti – vsako leto potekajo procesi drugače, vendar izotopska metoda omogoča ponovljivo interpretacijo.
- Spodbujanje čezmejnega sodelovanja in izmenjave dobrih praks.

4. Zakaj je to pomembno za vinogradnike

- Stabilni izotopi omogočajo natančno sliko vodnih tokov, kar presega interpretativne možnosti zgolj meteoroloških podatkov.
- Gre za neinvazivno, okolju prijazno metodo, ki ne škoduje vinogradu.
- Omogoča določitev globine in izvora vode, ki jo trta dejansko uporablja — ključni podatki za odločanje o namakanju v izrednih razmerah, zmanjšanje izgub in povečanje odpornosti vinograda.
- Znanje podpira izbiro ustreznih agronomskih praks (npr. zatravitev, zeleni podor, organsko mulčenje), ki povečujejo učinkovitost rabe vode in rodovitnost tal.

5. Omejitve

- Stabilni izotopi ne določajo neposredno, kdaj izvajati namakanje v sili, temveč razkrivajo časovni in prostorski izvor vode.
- Metoda zahteva ciljno usmerjen in dolgoročen eksperimentalni načrt (vsaj eno leto).
- Rezultati so mesto-specifični; vsak vinograd zahteva prilagoditve glede na tla in upravljanje.
- Potreben je kvalificiran strokovnjak, ki pravilno izvede vzorčenje, konservacijo, analize in interpretacijo podatkov.
- Višji stroški v primerjavi s standardnimi metodami monitoringa.



Bibliografija

ARPA FVG - s.o.c. OSMER e GRN Osservatorio Meteorologico Regionale e Gestione Rischi Naturali c/o Protezione civile FVG. E-mail: meteo@arpa.fvg.it. (2023a). Il clima del Friuli-Venezia Giulia.

ARPA FVG - s.o.c. OSMER e GRN Osservatorio Meteorologico Regionale e Gestione Rischi Naturali c/o Protezione civile FVG. E-mail: meteo@arpa.fvg.it. (2023b). Le precipitazioni in Friuli-Venezia Giulia - Schede climatiche.

ARPA FVG - s.o.c. OSMER e GRN Osservatorio Meteorologico Regionale e Gestione Rischi Naturali c/o Protezione civile FVG. E-mail: meteo@arpa.fvg.it. (2024). Meteo FVG report. Riepilogo anno 2024 n.13/2024.

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

Deloire A., Carbonneau A., Ernesty D., (2001). Quelques éléments historiques de l'évolution des architectures de vigne (deuxième partie): Diversité des systèmes de conduites de la vigne au XIXème siècle en France. *Progr. Agric. Vitic.*, 118 (8), 177-186.

Deloire, A., Pellegrino, A., & Rogiers, S. (2020). A few words on grapevine leaf water potential: Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, vine and wine*.

Deloire, A., Rogiers, S., & Trujillo, P. B. (2022). What could be the architectural forms of future vines adapted to climate change: a new challenge! Let's discuss the Gobelet (Bush Vine): Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, vine and wine*.

Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94-110.

Fraga, H. (2019). Viticulture and Winemaking under Climate Change. *Agronomy*, 9(12), 783. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120783>

Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271(5645), 534-536.

IAEA. (2014). *IAEA/GNIP precipitation sampling guide* (Version 2.02, September 2014). International Atomic Energy Agency. Contact: gnip@iaea.org.

IPCC (2023): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Ojeda, H. (2008). Qualitative precision irrigation in the vineyard. Infowine n.5 (www.infowine.com).

Penna, D., Geris, J., Hopp, L., & Scandellari, F. (2020). Water sources for root water uptake: Using stable isotopes of hydrogen and oxygen as a research tool in agricultural and agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291, 106790.

Peschiutta, M., Tomasella, M., Dreossi, G., Masiol, M., Stenni, B., Zini, L., ... & Lisjak, K. (2024a). Ecohydrological investigation of a karstic vineyard in Ceroglie (Italy). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 15927).

Peschiutta, M., Tomasella, M., Dreossi, G., Masiol, M., Stenni, B., Zini, L., ... & Lisjak, K. (2024b). Ecohydrological investigation of an alluvial plain vineyard in Precenico (Italy). In *WATSON Final Action Online Conference*. University of Zurich (UZH), Department of Geography.

Putman, A. L., Fiorella, R. P., Bowen, G. J., & Cai, Z. (2019). A global perspective on local meteoric water lines: Meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resources Research*, 55(8), 6896-6910.

Scandellari, F., & Penna, D. (2017). Gli isotopi stabili nell'acqua fra suolo, pianta e atmosfera/Stable isotopes in the water within soil vegetation and atmosphere. *Italus Hortus*, 24, 51-67.

Scandellari, F., Attou, T., Barbeta, A., Bernhard, F., D'Amato, C., Dimitrova-Petrova, K., ... & Sprenger, M. (2024). Using stable isotopes to inform water resource management in forested and agricultural ecosystems. *Journal of environmental management*, 365, 121381.

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? *Oeno One*, 43(3), 121-134.

West, A. G., Patrickson, S. J., & Ehleringer, J. R. (2006). Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry*, 20(8), 1317-1321.

Spletne reference / Sitografija:

<https://prometheusprotocols.net/function/water-relations/hydraulic-conductance-and-conductivity/xylem-sap-analysis-how-to-extract-and-analyse-xylem-sap-vacuum-extraction/>