



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Vodní režim půdního profilu zavlažovaného  
a nezavlažovaného vinohradu**

**Water regime of the soil profile in irrigated  
and non-irrigated vineyards**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2022**

**Bc. Simona HŘEBCOVÁ**

**Studijní program:** Stavební inženýrství

**Studijní obor:** Inženýrství životního prostředí

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Martin Šanda, Ph.D.

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hřebcová	Jméno: Simona	Osobní číslo: 468367
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vodní režim půdního profilu zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu	
Název diplomové práce anglicky: Water regime of the soil profile in irrigated and non-irrigated vineyards	
Pokyny pro vypracování: Na základě shromážděných hydrofyzikálních charakteristik půd, datových řad srážek a teplot vzduchu, režimu závlahy, měření půdní vlhkosti a zjištěných koncentrací stabilních izotopů kyslíku a vodíku ve srážkách, závlaze a půdní vodě z vinohradu proveďte modelové posouzení vodního režimu zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu v lokalitě Sedlec u Mikulova pro vegetační období let 2020 a 2021 pomocí matematického modelu S1D proudění vody a transportu látek v nenasyceném půdním profilu.	
Seznam doporučené literatury: Vogel, T., Dohnal, M., Dušek, J., 2004. AquaTerra. Bench scale modeling approaches. Contract No.: 505428 (GOCE). Sub-Priority 1.1.6.3: Global Change and Ecosystems. EUROPEAN COMMISSION's Specific Programme: "Integrating and Strengthening the European Research Area". Sharp, Z. 2017. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Upper Saddle River, N. J.: Pearson/Prentice Hall. 344 s., chapter 2	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Martin Šanda, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 22.2.2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 15.5.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vodní režim půdního profilu zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu“ vypracovala samostatně a veškeré použité informační zdroje jsem uvedla v seznamu použité literatury podle zásad metodického pokynu č. 1/2009 ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze 22. 5. 2022

Simona Hřebcová



## PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří zejména vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Šandovi, Ph. D. za odborné vedení práce, trpělivost, ochotu a čas, který mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji pracovníkům Vinařství Ludwig s.r.o., zemědělskému družstvu Sedlec za finanční podporu výzkumu a pomoc se sběrem vzorků vody a firmě Habánské sklepy a Mendelově univerzitě, Zahradnické fakultě za poskytnutá hydrometeorologická data ze stanice Sedlec. Na závěr bych ráda poděkovala své rodině, přátelům a snoubenci Quinnovi, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.



## ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá jednorozměrným vertikálním modelovým posouzením vodního režimu vinohradů na jižní Moravě, konkrétně v lokalitě Sedlec u Mikulova. Modelové posouzení bylo provedeno pro vinohrad bez přidané závlahy, tj. nezavlažovaný vinohrad a vinohrad s přidanou kapkovou závlahou, tj. zavlažovaný vinohrad. K modelovému posouzení byl využit matematický model S1D.

Matematický model S1D pro proudění vody a transport látek v nenasyceném půdním profilu byl na základě poskytnutých a měřených dat zpracován pro vegetační období let 2020 a 2021. Proudění vody je v modelu simulováno pomocí Richardsovy rovnice, transport rozpuštěných látek probíhá dle advekčně-disperzní rovnice. Modelace proudění vody a transportu rozpuštěných látek v půdním profilu proběhla v rozmezí 0-200 cm s rozdělením půdního profilu do čtyř vrstev. Model uvažuje s evaporací srážkové vody a transpirací révy vinné během vegetačního období.

K pochopení vodního režimu v dané lokalitě bylo využito měření stabilních izotopů kyslíku a vodíku, které se vyskytují přímo uvnitř molekuly vody. Jedná se zde o vodu srážkovou, závlahovou, mobilní půdní, celkovou půdní a vodu podzemní ze sledované lokality. Výsledný kalibrovaný model je optimem mezi prouděním vody a transportem látek. Výstupem modelu bylo porovnání průběhu objemové půdní vlhkosti zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu s půdními čidly. Dále byl proveden průběh obsahu  $\delta^{18}\text{O}$  během vegetačních období let 2020 a 2021 a rozdělení průběhu evaporace a transpirace a jejich izotopové složení. Evaporace v této studii vykazuje dynamičtější průběh změn  $\delta^{18}\text{O}$  půdní vody, což je způsobeno lepší dostupností srážkové vody u povrchu a kratším vodním koloběhem při návratu do atmosféry. Také byla zjištěna větší dynamika  $\delta^{18}\text{O}$  nezavlažovaného vinohradu oproti zavlažovanému vinohradu. Dynamičtější průběh nezavlažovaného vinohradu je způsoben rozdělením kořenů, kde nebyly uvažovány velmi hluboké kořeny, které se u nezavlažovaného vinohradu vyskytují, ale není znám jejich dosah ani funkčnost.

Modelový nástroj S1D také neuvažuje v současné verzi s frakcionací stabilních izotopů ve vodní molekule, ke které dochází během vypadlé srážky a závlahy před její infiltrací do půdního profilu. Výsledky této práce naznačují vhodnost s tímto jevem při simulaci obdobných procesů uvažovat.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Réva vinná, Jižní Morava, půdní profil, objemová vlhkost, stabilní izotopy kyslíku, podzemní voda, matematické modelování.



## ANNOTATION

This thesis deals with a one-dimensional vertical model assessment of the water regime of vineyards in South Moravia, specifically in the locality of Sedlec u Mikulova. The model assessment was carried out for a vineyard without added irrigation, i.e. a non-irrigated vineyard, and a vineyard with added drip irrigation, i.e. an irrigated vineyard. The mathematical model S1D was used for the model assessment.

Based on the provided and measured data, the S1D mathematical model for water flow and solute transport in the unsaturated soil profile was developed for the growing seasons 2020 and 2021. Water flow is simulated in the model using the Richards equation, while solute transport follows the advection-dispersion equation. The modelling of water flow and solute transport in the soil profile was carried out in the range of 0-200 cm, dividing the soil profile into four layers. The model considers evaporation of rainwater and transpiration of vines during the growing season.

Measurements of stable isotopes of oxygen and hydrogen, which are present directly inside the water molecule, were used to understand the water regime at the site. This includes precipitation, irrigation water, mobile soil water, total soil water and groundwater from the study site. The resulting calibrated model is an optimum between water flow and solute transport. The output of the model was a comparison of the volumetric soil moisture progression of the irrigated and non-irrigated vineyard with soil sensors. In addition, the  $\delta^{18}\text{O}$  content during the 2020 and 2021 growing seasons and the distribution of evaporation and transpiration patterns and their isotopic composition were also performed. Evaporation in this study shows a more dynamic pattern of soil water  $\delta^{18}\text{O}$  changes, which is due to the better availability of precipitation water near the surface and a shorter water cycle on return to the atmosphere. Also, the  $\delta^{18}\text{O}$  dynamics of the non-irrigated vineyard was found to be higher than that of the irrigated vineyard. The more dynamic course of the non-irrigated vineyard can be attributed to its root distribution — very deep roots, while present in the non-irrigated vineyard, were not considered because their extent and functionality is not known.

Also, the current version of the S1D modeling tool does not consider the fractionation of stable isotopes in the water molecule, which occurs during rainfall dropout and irrigation prior to its infiltration into the soil profile. The results of this work call for the consideration of this phenomenon when simulating similar processes.

## KEYWORDS

Viticulture, Southern Moravia, soil profile, volumetric moisture, stable isotopes of oxygen, groundwater, mathematical modelling.



## Obsah

<b>1. Úvod do problematiky .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Moravské vinohrady Sedlec u Mikulova .....</b>	<b>10</b>
2.1. Obecné informace .....	10
2.3. Pěstování révy vinné v České republice .....	11
2.4. Geologické a geomorfologické poměry.....	12
2.5. Zkoumaná lokalita vinogradů.....	12
2.5.1. Lokalita „VN“: Vinograd nezavlažovaný.....	15
2.5.2. Lokalita „VZ“: Vinograd zavlažovaný.....	15
<b>3. Izotopy.....</b>	<b>16</b>
3.1. Definice izotopů.....	16
3.2. Dělení izotopů a jejich využití.....	17
3.3. Přepočítání absolutní koncentrace na relativní stupnici.....	18
3.4. Izotopy vodíku a kyslíku.....	19
3.5. Využití a měření izotopů.....	19
3.5.1. Izotopová frakcionace a míchání vod.....	19
3.6. Měření izotopů.....	19
<b>4. Základní izotopově hydrologické charakteristiky povrchových vod v regionu .....</b>	<b>21</b>
4.1.1. Řeky.....	21
4.1.2. Vodní plochy.....	23
4.1.3. Podzemní voda.....	23
<b>5. Odběry půdních vzorků.....</b>	<b>23</b>
5.1. Porušené a neporušené půdní vzorky.....	23
5.2. Odběry půdních vzorků v roce 2020 .....	24
5.3. Odběry půdních vzorků v roce 2021 .....	27
5.4. Odběry půdních vzorků v roce 2022 .....	27
<b>6. Odběry vzorků vody .....</b>	<b>28</b>
6.1. Odběry vzorků mobilní půdní vody .....	28
6.2. Odběry vzorků z dešťových srážek, doplňkové závlahy a řek.....	30
<b>7. Materiálové a hydrofyzikální charakteristiky půd .....</b>	<b>33</b>
7.1. Čára zrnitosti .....	33
7.2. Retenční čára půdní vlhkosti .....	34
7.3. Nasycená hydraulická vodivost .....	36
7.4. Stanovení okamžité objemové vlhkosti.....	37
<b>8. Matematický model proudění v půdním prostředí.....</b>	<b>39</b>
8.1. Popis modelu S1D.....	39
8.1.1. Řídící rovnice – Richardsova rovnice.....	39
8.1.2. Propad vody .....	40
8.1.3. Řídící rovnice – Advekčně-disperzní rovnice.....	41
8.2. Vstupy do modelu .....	42
8.2.1. Časové údaje .....	42



8.2.2. Rozdělení půdního profilu .....	42
8.2.3. Parametry retenční křivky půdní vlhkosti .....	43
8.2.4. Srážky .....	45
8.2.5. Závlaha u zavlažovaného vinohradu .....	47
8.2.6. Sběr dat z čidel a meteorologické stanice .....	48
8.2.7. Evapotranspirace.....	49
8.2.8. Izotopová koncentrace pro transportní model .....	53
8.2.9. Počáteční a okrajové podmínky .....	53
8.3. Výstupy z modelů .....	54
8.3.1. Objemová vlhkost v půdním profilu VN a VZ v roce 2021 .....	54
8.3.2. Objemová vlhkost v půdním profilu VZ a VN v roce 2020 .....	57
8.3.3. Kumulativní množství vody procházející půdním profilem VZ a VN v roce 2021.....	60
8.3.4. Kumulativní množství vody procházející půdním profilem VZ a VN v roce 2020.....	61
8.3.5. Časový vývoj v obsahu $\delta^{18}\text{O}$ ve vegetačním období 2020 a 2021 .....	62
8.3.6. Časový vývoj v obsahu $\delta^{18}\text{O}$ dle hloubky v roce 2020 a 2021 .....	67
8.4. Průběh evaporace a transpirace a jejich izotopového složení během vegetačních sezón 2020 a 2021.....	70
<b>9. Závěr.....</b>	<b>75</b>
<b>10. Seznam použité literatury .....</b>	<b>77</b>
<b>11. Seznam tabulek .....</b>	<b>79</b>
<b>12. Seznam obrázků.....</b>	<b>79</b>





## 1. Úvod do problematiky

Cílem diplomové práce je modelové posouzení vodního režimu zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu v lokalitě Sedlec u Mikulova pro vegetační období let 2020 a 2021 pomocí matematického modelu S1D proudění vody a transportu látek v nenasyceném půdním profilu.

Data byla zpracována na základě shromážděných hydrofyzikálních charakteristik půd, datových řad srážek a teplot vzduchu, režimu závlahy, měření půdní vlhkosti a zjištěných koncentrací stabilních izotopů kyslíku a vodíku ve srážkách, závlaze a půdní vodě odebrané z vinohradu. Odběry vzorků půdních profilů byly provedeny pro oba vinohrady v hloubce 30, 60 a 90 cm. U zavlažovaného vinohradu proběhl odběr včetně hloubky ve 200 cm. Měření koncentrací stabilních izotopů kyslíku a vodíku bylo provedeno pomocí laserové spektrometrie.

Impulzem k posouzení vodního režimu dané lokality byl původně soukromý výzkum, který vznikl na základě soudního sporu mezi vinařem a státem ohledně regionální pravosti vína. Tento výzkum se zaměřil na určení vodního režimu půdního profilu v dané oblasti a jeho vliv na autenticitu vinných hroznů, resp. vína. Kvalita a bezpečnost vína je prověřována správním úřadem Státní zemědělské a potravinářské inspekce (SZPI), která je zřízena zákonem č. 146/2002 Sb. a spadá pod Ministerstvo zemědělství. SZPI kontroluje dodržování evropského národního potravinového práva. Jednou z používaných metod pro kontrolu a potlačení podvodů v odvětví vína je izotopový rozbor. Pro ověření pravosti údajů o původu se provádí izotopová analýza na poměr izotopů kyslíku  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ve vinné vodě a D/H1 a D/H2, tj. množství těžšího vodíku v alkoholu. Taktéž je stanovován poměr  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  pro ověření přirozených a dodaných cukrů, nebo i jako důkaz dostatku či nedostatku vody pro rostlinu během vegetační sezóny. Izotopový rozbor vína nebo vinařských výrobků je třeba provádět podle referenčních analytických metod stanovených v článku 31 nařízení (ES) č. 479/2008.

Česká republika musí dle přílohy XVII. nařízení komise (ES) č. 555/2008 každoročně odebrat 20 vzorků pro databanku analytických hodnot. V této databance jsou uložena data získaná z izotopového rozboru částic ethanolu a vody ve vinařských výrobcích. Databanka slouží ke sjednocení vyhodnocování výsledků rozborů získaných v úředních laboratořích členských států. Data se získávají referenčními metodami použitými v souladu s požadavky Mezinárodní organizace pro révu a víno (OIV).

Diplomová práce se zabývá zejména izotopy kyslíku a vodíku, které se vyskytují přímo uvnitř molekuly vody, a pomáhají s pochopením vodního režimu vinohradů v Sedleci u Mikulova.

## 2. Moravské vinohrady Sedlec u Mikulova

### 2.1. Obecné informace

Obec Sedlec u Mikulova je vinařskou obcí, která spadá pod obec s rozšířenou působností Mikulov, okres Břeclav v Jihomoravském kraji. Je položena v nadmořské výšce 187 m n. m. a rozkládá se na 20,78 km<sup>2</sup>. Celkový počet obyvatel žijící v Sedleci k roku 2021 je 861. Obec pravděpodobně existovala od poloviny 11. století, ale první písemná zmínka pochází až z roku 1305, kdy český král Václav III. písemným dokumentem postupuje Sedlec Ortlibu Hendíkovi.

Poloha Sedlece je příhodná pro pěstování révy vinné z hlediska nadmořské výšky i půdního složení. Ze severu je území také vhodně chráněno před větrem masivem Pavlovských vrchů. Historickou tradici pěstování révy vinné v Sedleci odráží i znak obce, který obsahuje obrácenou stříbrnou radlici obklopenou dvěma stříbrnými ratolestmi révy vinné se zlatými hrozny (Obec Sedlec u Mikulova, 2022).

Z jihovýchodu obce Sedlec, na území obce Sedlec a obce Hlohovec, se nachází největší rybník v Jihomoravském kraji Nesyt. Ten je využíván zejména k chovu ryb. Nesyt je součástí národní přírodní rezervace Lednické rybníky, která je soustavou pěti rybníků v Lednicko-valtickém areálu. V této oblasti je také vyhlášena ptačí oblast, která je jednou z nejrozsáhlejších ptačích rezervací v České republice (Lednické rybníky, 2021).



Obrázek 1 Zájmová lokalita (Mapy.cz, 2022)

## 2.3. Pěstování révy vinné v České republice

Réva vinná je náchylná na větrná místa, množství slunečního záření, dostatek vody a orientaci pozemku. Se zvyšující se nadmořskou výškou hrozí vyšší nebezpečí poškození hroznů mrazem a ubývá množství slunečního záření, které ovlivňuje výsledný obsah cukru v bobulích (Pavloušek, 2003).

Česká republika se rozděluje na dvě základní vinařské oblasti – vinařská oblast Morava a vinařská oblast Čechy. Vinařská oblast je geograficky definované území, na kterém je povoleno pěstování révy vinné. Pěstitelské oblasti jsou stanoveny zákonem č. 321/2004 Sb. o vinohradnictví a vinařství.

Vinařská oblast Morava leží okolo 49. rovnoběžky a zahrnuje přibližně 96 % vinic v České republice. Tato oblast se dále dělí dle prováděcí vyhlášky č. 254/2010 Sb. na čtyři podoblasti – Znojemská, Velkopavlovická, Mikulovská a Slovácká. Vinařské podoblasti tvoří vinařské obce, na jejichž území jsou stanoveny viniční tratě. Vinařské podoblasti, obce a tratě stanovuje Ministerstvo zemědělství. Zkoumané území v této práci spadá do vinařské oblasti Morava, podoblast Mikulovská (Situační a výhledová zpráva, 2021).



Obrázek 2 Vinařské oblasti a podoblasti v České republice (Situační a výhledová zpráva, 2021)



## 2.4. Geologické a geomorfologické poměry

V rámci geologické stavby širšího okolí přísluší území Sedlece u Mikulova ke geologické jednotce Západních Karpat a patří do oblasti tzv. Vídeňské pánve. Karpaty jsou výsledkem alpínského vrásnění a tvoří rozsáhlé pohoří zasahující země střední a východní Evropy. Vzhledem k velikosti zasaženého území se Karpaty dělí na několik provincií, a dále na několik subprovincií dle tektonické a geologické stavby. Zkoumané území patří do provincie Západních Karpat, subprovincie Jihomoravské Karpaty a je obklopeno tzv. Mikulovskou vrchovinou. Tato vrchovina, ale i Jihomoravské Karpaty, jsou tvořeny zejména flyšovými jílovci a pískovci (flyš je geologické označení pro různě tlusté sedimentované vrstvy). Pod Mikulovskou vrchovinu spadá přírodní dominanta Jižní Moravy nazývaná Pavlovské vrchy. Pavlovské vrchy jsou tvořeny vápencovým pohořím a ze západu chrání zkoumanou lokalitu vinohradů před větrem (Geologie, 2022). Díky této geomorfologii se v okolí Sedleckých vinohradů vyskytují zejména vápnité a nevápnité jíly, lithotamniové vápence s polohami písku, místy štěrky, pískovce a slepence (Česká geologická služba, 2018).

Mikulovská podoblast se rozkládá na 4 961 ha osázených vinic (k 31. 12. 2021, (Pěstování révy vinné v České republice v roce 2021, c2009-2022)) na úbočí vápencových skal, kde jsou rozšířeny zejména vápenité jíly, písky a návěje spraší. Z hlubokých sprašových půd čerpá réva vinná širší škálu živin pro tvorbu aromatických látek, výraznou kořenitost a originální minerální projevy. V rámci Mikulovské oblasti se ze 79 % plocha vinic využívá pro pěstování moštovné bílé odrůdy, a to zejména odrůdy Ryzlink vlašský a Veltínské zelené (Vinařské regiony v ČR, 2022).

## 2.5. Zkoumaná lokalita vinohradů

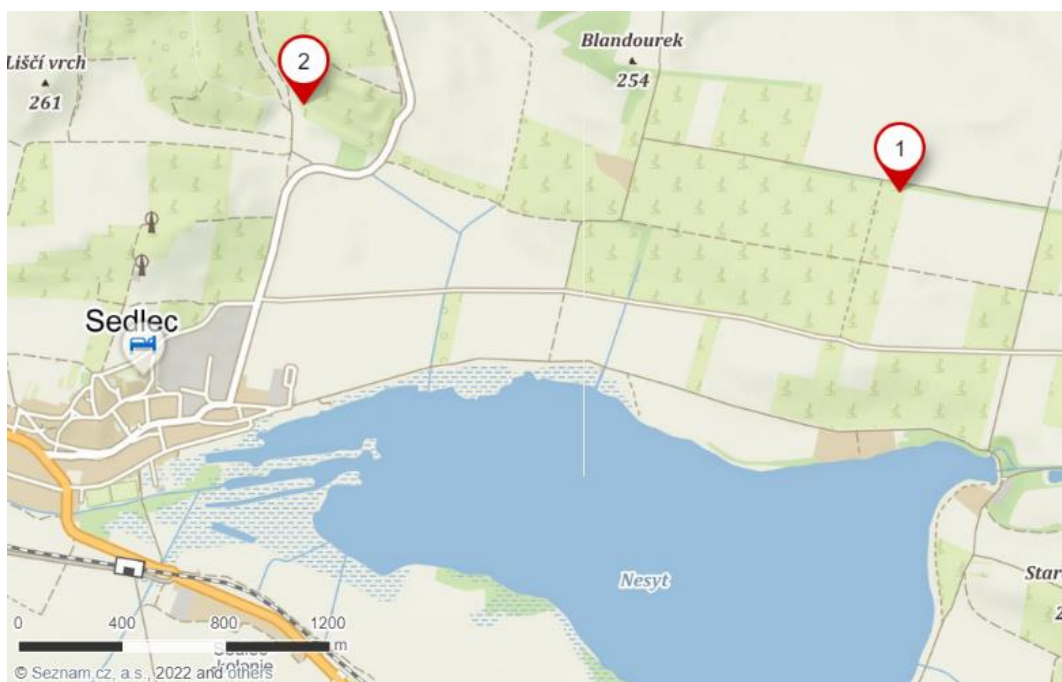
Modelové posouzení vodního režimu bylo zaměřeno na dvě blízké lokality v Sedleci u Mikulova, které spadají pod zemědělské družstvo ZD Sedlec. Rozdíl ve vinohradech spočívá v přidané závlaze u vinohradu nacházejícího se severovýchodně od obce Sedlec, v této práci nazvaný vinohrad zavlažovaný. Zavlažovaný vinohrad má přidanou kapkovou závlahu, která ovlivňuje vodní režim daného vinohradu, a tím mění i izotopové složení vodíku a kyslíku půdní vody.

Vzdálenost obou vinohradů je okolo 2 kilometrů, a proto lze využít stejná meteorologická data. Mimo závlahy si jsou obě lokality velmi podobné i půdním složením. Půdní typ obou lokalit lze určit z obrázku č. 5 jako černozemě (VÚMOP, 2022). Pro určení půdního druhu a dalších charakteristik půdy byly v obou lokalitách v různých hloubkách odebrány půdní vzorky.

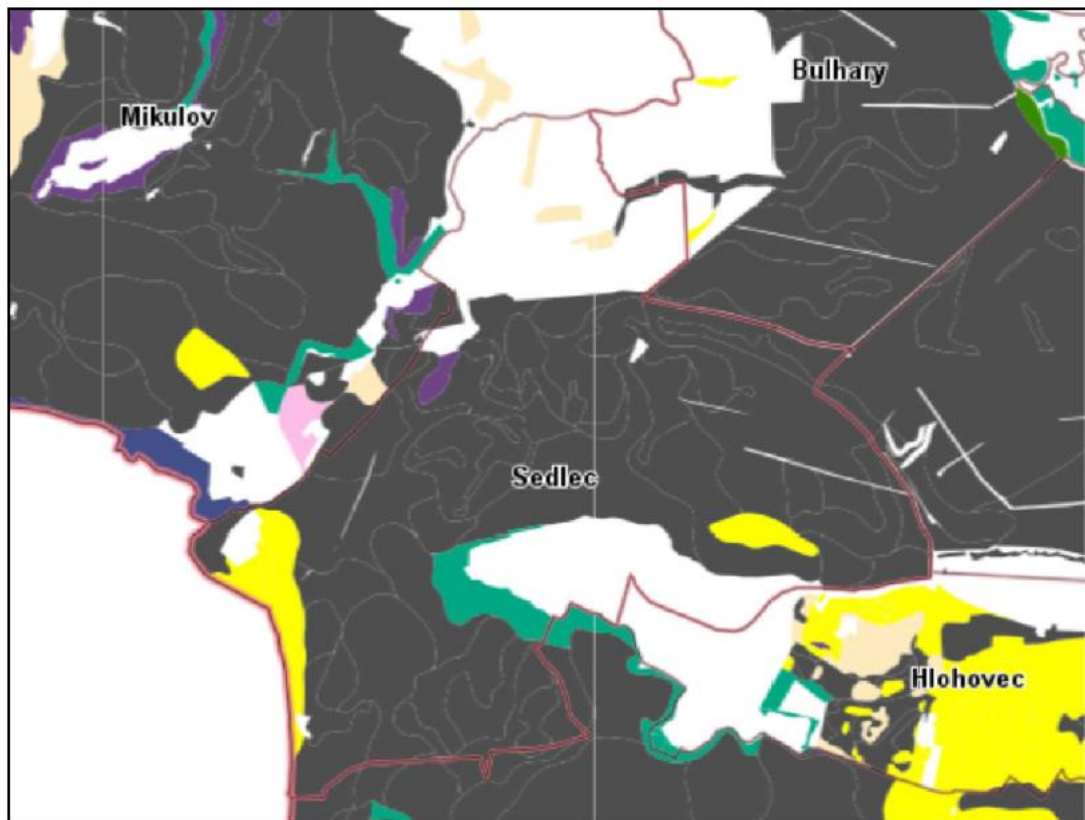




Obrázek 3 Pohled na vinice v Sedleci u Mikulova, březen 2022



Obrázek 4 Číslo 1 zavlažovaný vinohrad, číslo 2 nezavlažovaný vinohrad  
(Mapy.cz, 2022)



0 km 1 km 2 km 3 km 4 km 5 km



Obrázek 5 Půdní typy (VÚMOP, 2022)

### 2.5.1. Lokalita „VN“: Vinohrad nezavlažovaný

Lokalita nezavlažovaného vinohradu se nachází severně od obce Sedlec u Mikulova (obr. 4, číslo 1). Pro pěstování révy vinné je na tomto vinohradu nejvíce zastoupena odrůda Ryzlink Vlašský (51 %). Ratolesti révy vinné mají rozpon mezi sebou okolo jednoho metru a mezi danými řádky okolo tří metrů.

Na obr. 6 je vidět vertikální řez nezavlažovaného a zavlažovaného vinohradu půdou od povrchu do dvou metrů. Zajímavostí je, že v hloubce 300 a 400 cm pod terénem se u VN nachází opětovně tmavá půda. Pravděpodobně jde o geologicky naplavenou formu koluvizemní černozemě ze strmého svahu do roviny, která se v tomto místě láme. U černozemí také často dochází k usazování ve sprašových sériích. V takovém případě je materiál donesen větrem v mocných vrstvách, následně je pokryt rostlinným krytem a díky těmto organickým zbytkům ztmavne. V další fázi dojde k opětovnému navátí, v našem případě vápencové vrstvy. Tento postup se může několikrát opakovat. Tímto bychom mohli odůvodnit výskyt tmavé půdy ve 3-4 metrech (možná i více) pod terénem, která je stejná jako u VZ.

### 2.5.2. Lokalita „VZ“: Vinohrad zavlažovaný

Lokalita zavlažovaného vinohradu se nachází severovýchodně od obce Sedlec u Mikulova (obr. 4, číslo 2). Pro pěstování révy vinné je nejvíce zastoupena odrůda Pálavy.

Z obr. 6 je patrné velmi podobné složení v celém půdním profilu. Odlišně začíná být složení v hloubce 200 cm, kde půdní vrstva začíná být výrazně mazlavější, a nejspíše dochází k rozpadu podkladní horniny, tj. vápenců. Zde potenciálně může docházet ke zpomalení proudění vody v nepropustnější půdní vrstvě.





Obrázek 6 Půdní profil nezavlažovaného vinohradu „VN“ (vlevo), zavlažovaného vinohradu „VZ“ (vpravo)

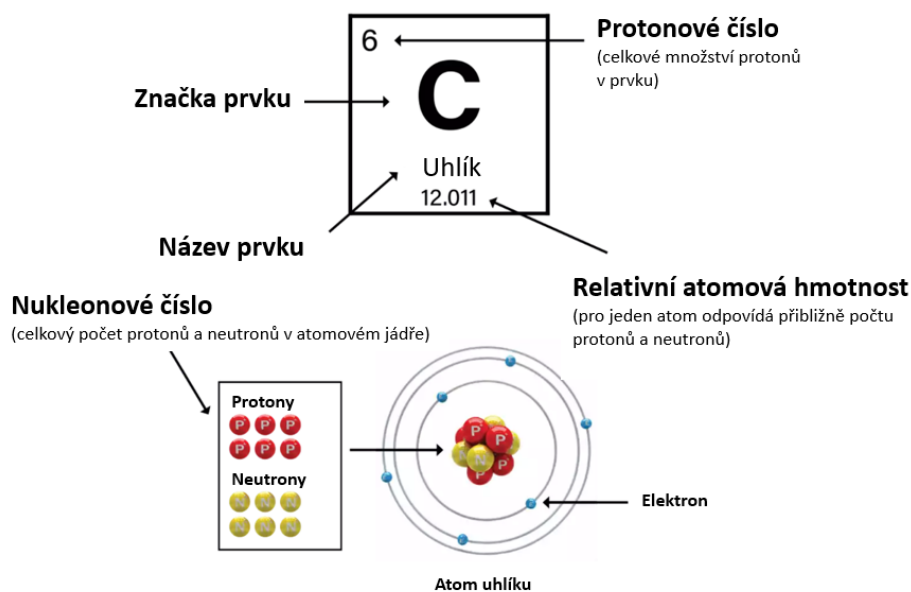
### 3. Izotopy

#### 3.1. Definice izotopů

Atom se skládá z protonů, neutronů a elektronů. Protony a neutrony tvoří atomové jádro a elektrony tvoří atomový obal. Protony jsou kladně nabitě částice, elektrony záporně nabitě částice a neutrony jsou bez náboje. Označení izotop se používá pro atom se stejným počtem protonů (neboli protonovým číslem), ale rozdílným počtem neutronů. Jednotlivé chemické prvky se v periodické tabulce řadí dle vzestupné hodnoty protonového čísla. Jelikož izotopy mají stejné protonové číslo, v periodické tabulce se nachází pod stejným značením (zde se liší jejich atomová hmotnost). Z tohoto vychází i jejich název „izotopy“ z řeckého isos = stejné a topos = místo. Anglický název isotope byl prvně použit v roce 1913 anglickým vědcem Frederickem Soddy, který získal v roce 1921 Nobelovu cenu v chemii za výzkum původu izotopů (Sharp, 2017; Patterns of Nuclear Stability, 2021).



Izotopy mají velice podobné chemické vlastnosti, ale rozdílné fyzikální vlastnosti. Hmotnost protonu je téměř stejná jako hmotnost neutronu a hmotnost elektronu je oproti neutronu a protonu zanedbatelná. Tím, že izotop je definován rozdílným počtem neutronů, mají izotopy jednoho chemického prvku rozdílnou hmotnost. Na základě tohoto rozdílu pochází i označení lehký a těžký izotop (např.  $^1\text{H}$  známý pod názvem lehký vodík a  $^2\text{H}$  nazývaný těžký vodík). Tato fyzikální vlastnost hraje zásadní roli například při kinetické frakcionaci (obohacení jednoho izotopu vzhledem k jinému), což je důležité například při sledování a porozumění hydrologických, geochemických a biologických procesů (Sharp, 2017).



Obrázek 7 Rozbor atomu uhlíku (International Year of the Periodic Table, 2019)

### 3.2. Dělení izotopů a jejich využití

Izotopy dělíme do dvou hlavních skupin na stabilní izotopy a radioaktivní izotopy. Většina prvků v periodické tabulce má dva nebo více přirozeně se vyskytujících izotopů (stabilních nebo radioaktivních).

Stabilita izotopů je dána poločasem přeměny, což je doba potřebná k rozpadu poloviny atomových jader. Stabilní izotopy se samovolně nepřeměňují (jejich jádra jsou stabilní). Izotopy jsou považovány za radioaktivní, pokud jejich jádro je nestabilní a prvek se samovolně rozpadá na jiný prvek (nebo izotop daného prvku) a při tom emituje záření formou alfa, beta nebo gama částic. Alfa záření je tvořeno dvěma protony a dvěma neutrony, které tvoří jádra helia 4 ( $^4\text{He}$ ). Alfa rozpad těžkých prvků je hlavním zdrojem  $^4\text{He}$  na Zemi. Beta záření je proud elektronů nebo pozitronů. Gama záření je druh elektromagnetického vlnění, které doprovází alfa a beta záření, a je ze všech záření nejpronikavější. Poločas přeměn pro různé radioaktivní látky mohou nabývat značně rozdílných hodnot. Například izotop  $^3\text{H}$  nazývané tritium je složeno z jednoho protonu



a dvou neutronů a jeho poločas rozpadu je 12,3 roku. Tritium se rozpadá skrz beta záření za vzniku helia (Patterns of Nuclear Stability, 2021; Sharp, 2017).

Stabilitu izotopů lze také odhadnout na základě počtu protonů a neutronů, které se nacházejí v jádře atomu. Pouze dva stabilní izotopy  $^1\text{H}$  a  $^3\text{He}$  mají poměr neutronů k protonům méně než 1. U stabilních izotopů mají atomy s nízkou atomovou hmotností poměr neutronů k protonům 1:1. S přibývajícím atomovou hmotností roste u stabilních izotopů i poměr neutronů k protonům až k 1,5:1. Bez ohledu na počet neutronů, od protonového čísla větší než 82 jsou všechny prvky nestabilní, tj. radioaktivní (Patterns of Nuclear Stability, 2021).

Stabilní izotopy mají mnohostranné využití. Izotop kyslíku a vodíku se využívá například právě k autenticitě vína, ke sledování původu, historie, zdrojů a odběrů vody. Dalším příkladem je izotopový poměr stroncia, který se používá ve vinařství k určení regionalit vína. Izotopový poměr stroncia se jako stopový prvek dostává do vína skrze geologické podloží, přičemž réva vinná není schopna změnit jeho izotopový poměr. Díky tomu se stává izotopový poměr stroncia nefalšovaným znakem terroir (jedinečné a nezaměnitelné místo původu) (Gabel, 2019).

### 3.3. Přepočítání absolutní koncentrace na relativní stupnici

Množství izotopů se měří a popisuje pomocí jejich zastoupení – vzájemného poměru. Tento poměr není jednoznačně dán, ale ve většině případů se doporučuje používat poměr ve tvaru „těžký/lehký“ izotopový poměr.

Raději než absolutní poměr (tj. poměr méně zastoupeného izotopu, zpravidla těžšího, k četnosti více zastoupeného izotopu, s označením R), se při měření izotopů využívá poměr relativní. Měření relativního poměru oproti absolutnímu lze dosáhnout přímo spektrometrem a dojde k lepší přesnosti a jednodušší porovnatelnosti. Tento relativní poměr se označuje jako izotopová hodnota delta ( $\delta$ ) a jedná se o relativní odchylku izotopového poměru vůči izotopovému poměru standardu. Tato referenční hodnota standardu vychází z rovnice č. 1.

$$\delta = \left( \frac{R_x - R_{std}}{R_{std}} \right) \cdot 1000 \text{ [‰]} \quad (1)$$

$\delta$  Vážená koncentrace izotopu

$R_x$  R značí poměr mezi těžším a lehčím izotopem, x označuje daný prvek

$R_{std}$  SMOW standard daný Mezinárodní atomovou agenturou (IAEA) ve Vídni



### 3.4. Izotopy vodíku a kyslíku

Pro analýzy v této práci jsou důležité izotopy vodíku a izotopy kyslíku, které jsou přímo uvnitř molekuly vody. U vodíku najdeme dvě formy stabilního izotopu, u kyslíku tři stabilní izotopy. Pro vodík existují stabilní izotopy:  $^1\text{H}$  protium,  $^2\text{H}$  deuterium a nestabilní forma  $^3\text{H}$  tritium. Tyto izotopy jsou také označovány jako lehký, těžký a velmi těžký vodík. U kyslíku se jedná o stabilní izotopy  $^{16}\text{O}$  s 8 protony a 8 neutrony,  $^{17}\text{O}$  s 8 protony a 9 neutrony, a  $^{18}\text{O}$  s 8 protony a 10 neutrony. V přírodě vodu tvoří z 99,996 % tři kombinace izotopů a to:  $^1\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$  (99,78 % všech molekul vody, označováno také jako „běžná voda“),  $^1\text{H}^{18}\text{O}^1\text{H}$  (0,2 % všech molekul vody) a  $^2\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$  (0,015 %) (Mook et al., 2001).

Za standard pro vodík a kyslík byla ustanovena tzv. standardní střední oceánská voda (Standard Mean Ocean Water, SMOW) daní Mezinárodní agenturou (IAEA) ve Vídni.

### 3.5. Využití a měření izotopů

#### 3.5.1. Izotopová frakcionace a míchání vod

K měřitelným rozdílům dochází z důvodu izotopového míchání a izotopové frakcionace. Při izotopovém míchání dochází ke sloučení různých zdrojů vody, a to ovlivní výsledný poměr izotopů. U izotopové frakcionace se mění samotné složení izotopů. K tomu dochází buď fázovou přeměnou vody (frakcionace rovnovážná) nebo pohybem vody, při kterém se uplatňuje odlišná hmotnost molekul a lehčí izotopy jsou tak rozptylovány rychleji (frakcionace kinetická) (Kofroňová, 2021).

K procesům izotopové frakcionace přirozeně dochází například v hydrologickém cyklu během evaporace. U rostliny během příjmu vody kořenovým systémem k frakcionaci nedochází a rostlina má stejný obsah izotopů jako zdrojová voda. K rovnovážné frakcionaci dojde až při výparu, kdy těžší izotopy spíše zůstávají ve vodě (v rostlině) a lehčí se snadněji vypařují. Samotný výpar závisí na půdní vlhkosti, teplotě vzduchu, větru a mnoho dalších faktorech.

### 3.6. Měření izotopů

Ke zkoumání izotopů a jejich aplikaci ve vědě přispěl koncem 40. let minulého století vynález hmotnostního spektrometru (IRMS). Díky němu šlo určit relativní zastoupení každého izotopu. V hmotnostním spektrometru dochází k ionizaci atomů a molekul pomocí vysokoenergetického elektronového paprsku, kdy dojde k vychýlení iontů při průchodu magnetickým polem v závislosti na jejich poměru hmotnosti k náboji. Použití hmotnostního spektrometru je nákladné a náročné na obsluhu (Flowers et al., 2015).

Méně nákladnou a jednodušší na obsluhu se stala laserová spektrometrie, která se stala komerčně dostupnou přibližně po roce 2007. K měření stabilních izotopů kyslíku



a vodíku v této diplomové práci byl použit laserový spektroskop LGR LWIA2, který je dostupný na ČVUT v Praze, Fakultě stavební, Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství. Přístroj LGR měří absorpci (úbytek intenzity záření) laserového paprsku pomocí detektoru. Laserový paprsek prochází opakovaným odrazem na zrcadlech s vysokou odrazivostí, které ohraničují komoru se vzorkem v plynném stavu blízko absolutního vakua. Tímto způsobem se vytváří délka cca 1500 km (za 5 mikrosekund), kdy má paprsek dostatečnou příležitost interagovat s molekulami vzorku, což vede k jasnému oddělení pohlčeného laserového paprsku různých molekul vody (absorbovaná spektra jednotlivými izotopology vody – tj. kombinacemi izotopů v molekule vody). Spektroskop využívá pro výpočet molekulární koncentrace vlnovou délku okolo 1390 nm (IAEA, 2009). Přístroj je schopen bezobslužně analyzovat najednou až 50 vzorků během 24 hodin. Poměry izotopů  $^2\text{H}/^1\text{H}$  a  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  jsou stanovovány současně ve stejném vzorku vody s průměrnou směrodatnou odchylkou  $\delta^2\text{H} = \pm 0,6$  a  $\delta^{18}\text{O} = \pm 0,1$  (‰ V-SMOW) srovnatelné s výstupy hmotnostní spektrometrie (Šanda, 2010).

K samotnému měření je potřeba mít připravenou sadu standardů vody o známé izotopové koncentraci vodíku a kyslíku. Standardy o známé hodnotě slouží k opakované kalibraci přístroje během měření.

Vzorky ze srážek, říční vody, závlahy a mobilní půdní vody se napipetují do vialek (objem vzorku je 1 ml) a utěsní víčky s teflonovým septem pro zabránění výparu. Takto připravené vzorky jsou připraveny k měření laserovým spektroskopem.

K analýze vodíku a kyslíku z porušených půdních vzorků je potřeba oddělit pevnou fázi od kapalné. Část celkové půdní vody je v půdě pevně vázaná kapilárními silami, a k její extrakci existuje více způsobů. V této studii bylo využito smíchání vzorků s destilovanou vodou o známém množství a se známou izotopovou koncentrací. Množství dodané vody v poměru k vodě obsažené v půdním vzorku bylo v poměru 4:1 až 5:1 v závislosti na okamžité půdní vlhkosti každého vzorku. Cílem smíchání s dodatečnou vodou je změna konzistence vzorku k následně lepší extrakci vody. Po smíchání s dodanou vodou byl vzorek utěsněn těsnicí fólií a míchán po dobu 2 dnů pro propojení přidané a vázané vody. Po promíchání bylo přibližně 100 g vodní suspenze přeneseno do kyvet a 10-15 minut odstředováno. Při této proceduře se oddělila pevná a kapalná fáze. Z kapalná fáze bylo odpipetováno 5 ml do malých kyvet a k dočištění byl vzorek znovu odstředěn malou centrifugou na vyšší stupeň otáček. Poslední fází přípravy vzorku bylo přefiltrování přes filtr s otvory 0,45  $\mu\text{m}$  pro zachycení zbývajících pevných částic. Výsledný vzorek vody po filtraci byl použit pro měření laserovým spektroskopem. Z důvodu smíchání vzorku s dodatečnou vodou se zvýšila průměrná směrodatná odchylka přístroje o poměr dodané vody k celkové půdní vodě, tj. zhruba 5x na a  $\delta^{18}\text{O} = \pm 0,5$  (‰ V-SMOW). Pro statistické vyhodnocení byl z každého porušeného půdního vzorku tento proces získání vody a následného měření

proveden třikrát, v případě jednorázových vzorků z hloubek 300 a 400 cm bylo procesováno šest opakování.



Obrázek 8 Laserový spektroskop LGR LWIA2

## 4. Základní izotopově hydrologické charakteristiky povrchových vod v regionu

### 4.1.1. Řeky

Páteřním tokem jižní Moravy je řeka Dyje. Délka toku činí 235,4 km a je nejdelším přítokem do řeky Moravy. Na toku Moravské Dyje se nachází Vranovská přehrada a soustava vodních nádrží Nové Mlýny. Soustava vodních nádrží Nové Mlýny má vliv na změnu izotopové koncentrace vodíku a kyslíku. Svoji nízkou hladinou a zpomalením vody dochází v důsledku výparu k izotopové frakcionaci (zvýšení izotopové koncentrace těžkých izotopů kyslíku a vodíku). Průměrná hodnota izotopové koncentrace měřená v místě Dyje-Bulhary (odběr po průtoku soustavou nádrží Nové Mlýny)  $\delta^{18}\text{O}$  v roce 2020 byla  $-7,7\text{‰}$ . Tato hodnota se mírně mění v závislosti na ročním období (přibližně v rozmezí  $-8,7\text{‰}$  v zimním období a  $-7,4\text{‰}$  v období letním).

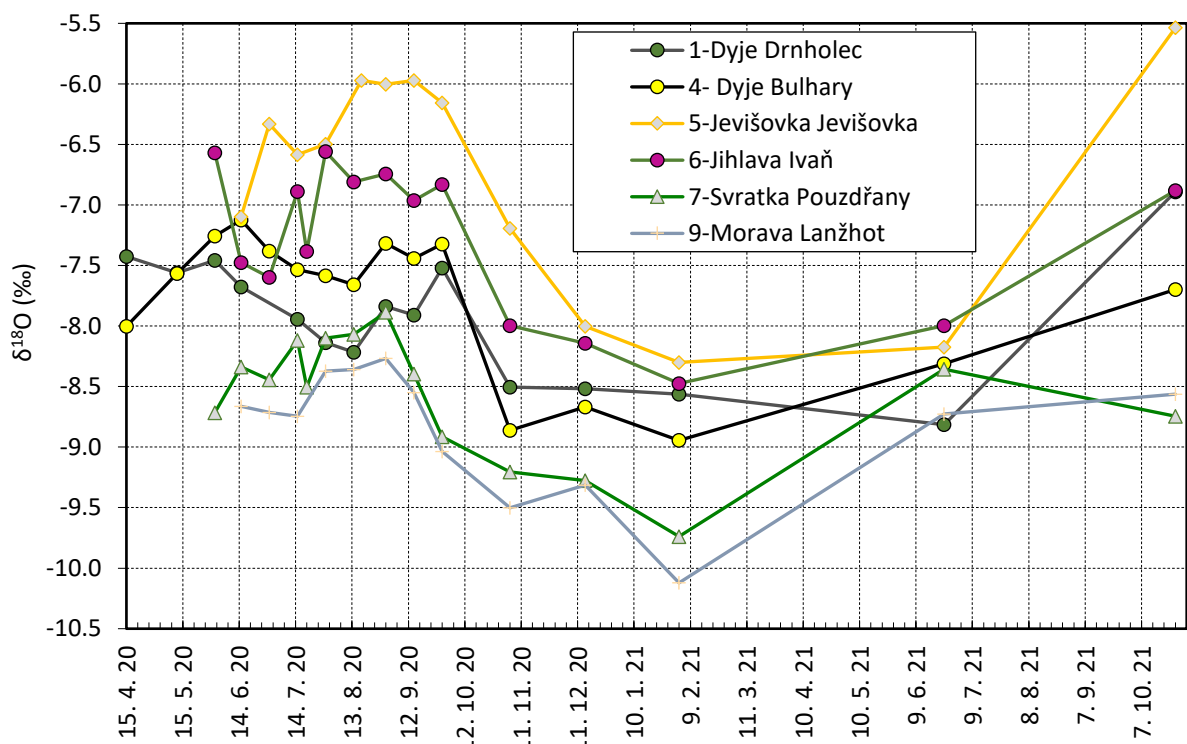
Regionálním tokem jižní Moravy s délkou 83 km je řeka Jevišovka. Protéká severně nad řekou Dyje, do které se posléze jako levostranný přítok vlévá. Vzhledem k tomu, že pramení a protéká v teplém klimatu se její průměrná izotopová koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  pohybuje okolo  $-6,6\text{‰}$  v období roku 2020. V zimním období stejného roku se koncentrace snížila k hodnotě  $-7,8\text{‰}$ . Jevišovka slouží místním obyvatelům pro závlahu. Závlahová voda

o jiném izotopovém složení než jsou srážky může ovlivnit následné izotopové složení zemědělského produktu (hrozny, ovoce, zelenina).

Do soustavy nádrží Nové Mlýny (respektive řeky Dyje) se vlévá řeka Svratka o délce 173,9 km. Ta přitéká ze severozápadu z chladnějších poloh Vysočiny, a proto je její průměrná izotopová koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  oproti ostatním zmíněným řekám izotopově lehčí.

Spolu se Svratkou se v regionu jižní Moravy také vyskytuje izotopově lehčí řeka Morava. Řeka Morava je v Čechách třetí největší řekou a pramení v Pardubickém kraji pod vrcholem Králického Sněžníku. Její izotopová koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  je také ovlivněna přítokem řeky Bečvy, která odvádí vodu z jižní části Moravskoslezských Beskyd.

Z jižnější části Vysočiny přitéká řeka Jihlava, která se těsně před soustavou Novomlýnských nádrží vlévá do řeky Svratky. Na toku Jihlavy jsou vybudovány dvě vodní nádrže: Dalešice a Mohelno. Obě vodní nádrže tvoří zásobárnu chladicí vody pro jadernou elektrárnu Dukovany. V důsledku využití zásobárny jako chladicí vody dochází k intenzivnímu výparu, což má za následek ztěžknutí izotopového obsahu  $\delta^{18}\text{O}$ . Po řece Jevišovce se jedná o druhou izotopově nejtěžší řeku v regionu. Pro závlahu vinogradů v Sedleci u Mikulova se využívá voda profilu Dyje-Bulhary.



Obrázek 9 Průběh  $\delta^{18}\text{O}$  řek v regionu jižní Moravy





### 4.1.2. Vodní plochy

Nejvýznamnější vodní plochou jižní Moravy je vodní dílo Nové Mlýny. Toto vodní dílo se nachází na řece Dyji, která přitéká do horní nádrže u obce Drnholec. Vodní dílo Nové mlýny je soustava tří vodních nádrží (Mušovská, Věstonická, Novomlýnská), která se nachází na rozhraní okresů Břeclav a Brno-venkov a byla vybudována v 70. a 80. letech 20. století. Přestože se jedná o největší vodní plochu Moravy, nádrže jsou poměrně mělké s hloubkou okolo 2 metrů (Wikipedie, 2022). Tato nízká hloubka a pomalý pohyb vody nádržemi přispívá ke zvýšené evaporaci a změně izotopového obsahu  $\delta^{18}\text{O}$ . Data z měření před vstupem do nádrže (v místě u obce Drnholec) a z odtoku Dyje z nádrže (v místě u obce Bulhary) potvrzují trend izotopového těžknutí  $\delta^{18}\text{O}$ . Izotopovou koncentraci kyslíku 18, ale také významně ovlivňuje přítok Svatky a Jihlavy do společného ústí v prostřední nádrži.

### 4.1.3. Podzemní voda

Podzemní voda byla odebrána z vodárensky využívané, tj. čerpané studny ZD Sedlec. Hodnota izotopové koncentrace v podzemní vodě  $\delta^{18}\text{O} = -9,2 \text{ ‰}$ . Tato hodnota je prakticky konstantní pro vegetační sezónu 2020 a 2021 a je mírně izotopově lehčí než vážený průměr izotopu kyslíku ve srážkách pro stanici Vídeň za poslední dekádu (IAEA, c1998-2022). Nižší hodnota může být způsobena ze dvou důvodů. Za prvé se jižní Morava nachází severněji než Vídeň, tj. teplotně se jedná o mírně chladnější oblast, a tím pádem izotopově lehčí srážky. Za druhé se větší množství srážek dostane do půdního profilu v období zimním, tj. období vegetačního klidu bez transpirace rostlin a se sníženým výparem z důvodu nižších teplot prostředí.

## 5. Odběry půdních vzorků

### 5.1. Porušené a neporušené půdní vzorky

Neporušené půdní vzorky jsou důležité pro určení základních charakteristik půd jako je například pórovitost, objemová vlhkost a objemová hmotnost. Odběr na obou lokalitách VZ a VN proběhl v hloubkách 30, 60, 90 cm pod terénem pomocí obdoby Kopeckého válečku (zde se jednalo o váleček z mosazi o objemu  $130 \text{ cm}^3$ ). Z každé dané hloubky byly v daném místě provedeny 2 odběry, na VZ i 200 cm – odběry z odkryté jámy. Dále byl z každého místa proveden jeden odběr neporušeného vzorku pomocí nerezového válečku o objemu  $250 \text{ cm}^3$ . Odebrané neporušené vzorky byly ihned po odebrání zabezpečeny víčkem a obmotány těsnicí fólií ke zmírnění vysoušení. Vzorky byly následně v laboratoři zváženy a využity pro stanovení retenční čáry půdní vlhkosti a nasycenou hydraulickou vodivost. Vzorky z roku 2022 byly použity na stanovení okamžité objemové vlhkosti.

Odběr porušených půdních vzorků není tak časově náročný a nevyžaduje takovou přesnost jako vzorky neporušené. Vzorky byly odebrány pomocí lopatky a půdního vrtáku ve 30, 60, 90, včetně hloubky 200 cm pod terénem, na VN i 300 a 400 cm. Porušené půdní vzorky se využívají i pro určení například měrné hmotnosti nebo čáry zrnitosti. V této studii se porušené vzorky odebírají především z důvodu extrakce půdní vody a následně změření jejího izotopového složení kyslíku 18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) a deuteria ( $^2\text{H}$ ). V tomto případě jsou odebírány do zavařovacích lahví, zabezpečeny víkem a parafilmovou páskou a v laboratoři zamrazeny.



Obrázek 10 Porušené vzorky



Obrázek 11 Neporušené vzorky

## 5.2. Odběry půdních vzorků v roce 2020

K odběru prvních půdních vzorků v obou zkoumaných lokalitách došlo v roce 2020 a to konkrétně ve dnech 13. 05., 21. 07. a 08. 09. 2020. Všechny vzorky byly odebrány v rámci každého vinohradu z jednoho pěstebního řádku mezi keři révy vinné. Rozpon mezi keři je 1 metr a mezi řádky 3 metry. Odběr byl proveden porušenými vzorky do zavařovacích sklenic, a to v hloubkách 30, 60, 90, 200 cm. Dne 08. 09. 2020 došlo na VN k odběru porušených vzorků i z hloubky 300 cm. Odebrané vzorky byly použity na měření izotopů kyslíku 18 a deuteria v půdní vodě.



Dne 13. 05. 2020 byl také proveden odběr neporušených půdních vzorků ze dvou vyhloubených jam, které se nacházely na okraji pěstebních ploch v těsné blízkosti studovaných pěstebních řádků révy vinné. Tento odběr není přímo v souladu s pěstebním řádkem révy vinné (jedná se však o místo vzdálené pouhé tři pěstební řádky od dalších odběrů půd a měření půdní vlhkosti), a proto výsledné charakteristiky odebraných vzorků mohou být mírně odlišné. Vzorky byly odebrány ve dvou velikostech 130 cm<sup>3</sup> a 250 cm<sup>3</sup>. Menší vzorky byly odebrány v obou lokalitách VZ a VN z hloubky 30, 60, 90 cm a u VZ včetně hloubky ve 200 cm. Tyto vzorky sloužily především ke stanovení retenčních čar půdní vlhkosti. Větší neporušené vzorky z hloubky 30, 60, 90 cm u VZ i VN byli použity pro měření nasycené hydraulické vodivosti.



Obrázek 12 Porušené vzorky k analýze  $\delta^{18}\text{O}$



Obrázek 13 Odběr neporušených půdních vzorků



Obrázek 14 Rozpon mezi pěstebními řádky a jednotlivými keři



### 5.3. Odběry půdních vzorků v roce 2021

V další sezóně proběhl odběr půdních vzorků ve dnech 18. 5., 19.7. a 10. 9. 2021. Vzorky byly odebrány ze stejných pěstebních řádků jako v roce 2020, přičemž místa odběru jsou od sebe přibližně o jeden metr posunuta. Jednalo se o porušené vzorky do zavařovacích sklenic z hloubek 30, 60, 90, 200 cm pro VN i VZ. U VZ byly odebrány vzorky včetně hloubky 300 cm pod terénem a v termínu 18. 5. 2021 i v hloubce 400 cm. Vzorky byly použity na měření izotopů kyslíku 18 a deuteria v půdní vodě.

### 5.4. Odběry půdních vzorků v roce 2022

Poslední odběr půdních vzorků proběhl mimo vegetační období dne 2. 3. 2022. Odběr porušených vzorků byl proveden do zavařovacích sklenic v hloubce 30, 60, 90, 200 cm pro lokalitu VN i VZ. Neporušené vzorky o objemu 130 cm<sup>3</sup> byly odebrány v hloubce 30 cm na obou lokalitách. Tyto neporušené vzorky byly odebrány ve třech provedeních tj. 6 válečků. Z těch byla následně stanovena okamžitá půdní vlhkost pro kalibraci vlhkostních čidel a sloužily také k ověření pórovitosti půdy.



Obrázek 15 vlevo a vpravo odběr vzorků dne 2. 3. 2022

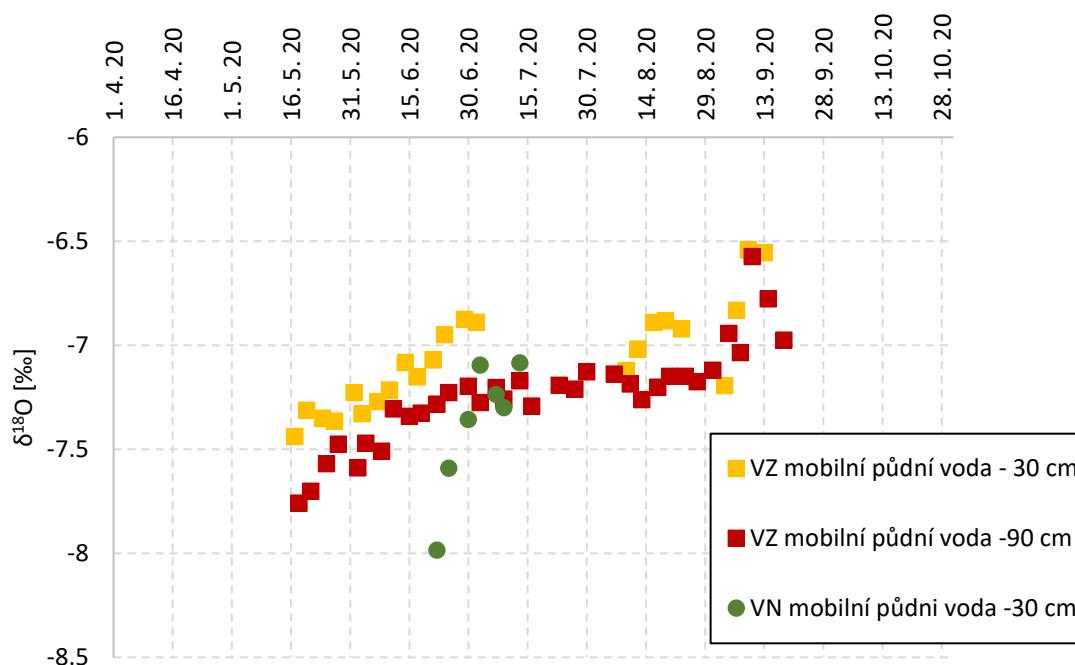
## 6. Odběry vzorků vody

### 6.1. Odběry vzorků mobilní půdní vody

Pro analýzu izotopů  $\delta^{18}\text{O}$  byly v sezóně 2020 a 2021 v lokalitě zavlažovaného i nezavlažovaného vinohradu odebírány vzorky mobilní půdní vody. Odběr byl prováděn pomocí kapilárního odsávání z hloubek 30 cm a 90 cm. Vzhledem ke způsobu odběru pomocí podtlaku není možné provést odběr na příliš suché půdě (tj. v hodnotě tlaku menším než -650 cm vodního sloupce vůči tlaku atmosférickému). Provedené odběry v sezóně 2020, respektive 2021, a jejich izotopové koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  zobrazuje obr. 16, resp. obr. 17.

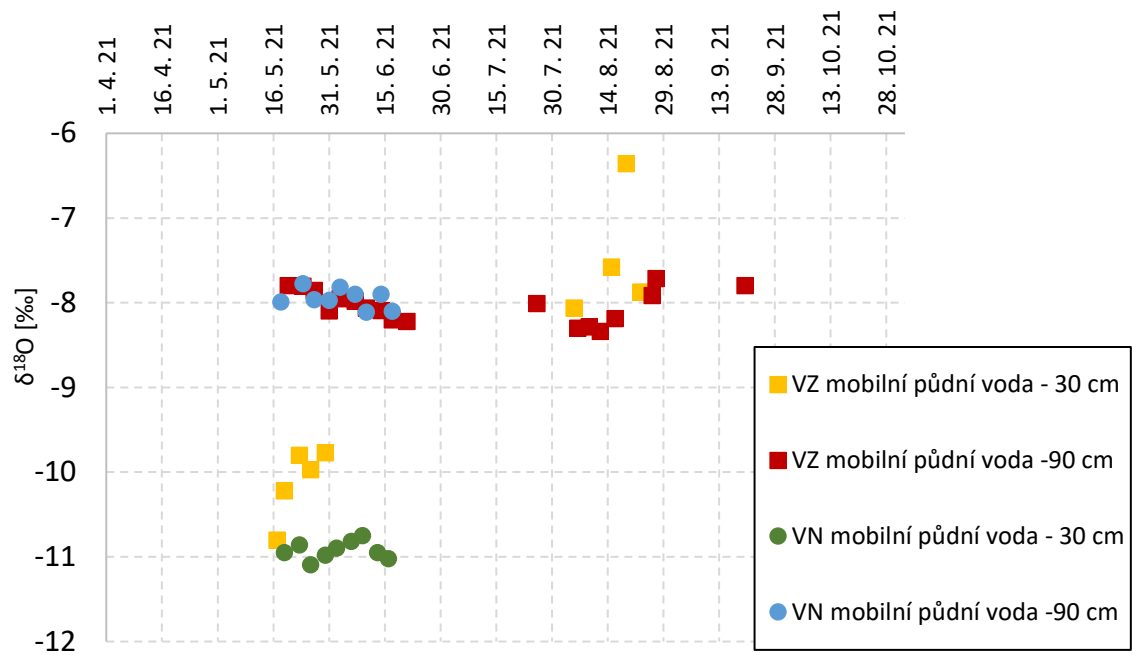
V sezóně 2020 byl možný odběr mobilní půdní vody u nezavlažovaného vinohradu pouze v období od 22. 6. 2020 do 13. 7. 2020, kdy půda měla dostatečnou vlhkost ze srážek. U zavlažovaného vinohradu byl v roce 2020 odběr možný téměř během celé sezóny, vyjma období v červenci 2020 ve 30 cm, kde dochází k rychlejšímu vysychání vlivem výparu bez přítomnosti závlahy.

V sezóně 2021 byl odběr vzorků mobilní půdní vody u zavlažovaného vinohradu z důvodu způsobu odběru více přerušovaný. U nezavlažovaného vinohradu proběh odběr vzorků v období od 18. 5. 2021 do 17. 6. 2021. Od druhé poloviny června už nebylo odběr na nezavlažovaném vinohradu možné provést z důvodu nízké vlhkosti půdy.

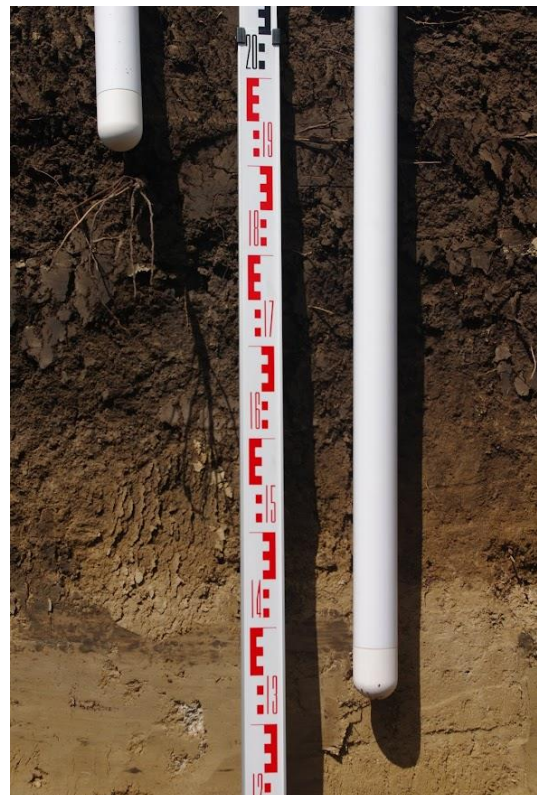


Obrázek 16 Vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  z odebraných vzorků mobilní půdní vody v sezóně 2020 pro nezavlažovaný (VN) a zavlažovaný (VZ) vinohrad





Obrázek 17 Vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  z odebraných vzorků mobilní půdní vody v sezóně 2021 pro nezavlažovaný (VN) a zavlažovaný (VZ) vinohrad



Obrázek 18 Odběrné zařízení mobilní půdní vody (vpravo) a pohled na instalaci odběrného zařízení půdní vody (vlevo)

## 6.2. Odběry vzorků z dešťových srážek, doplňkové závlahy a řek

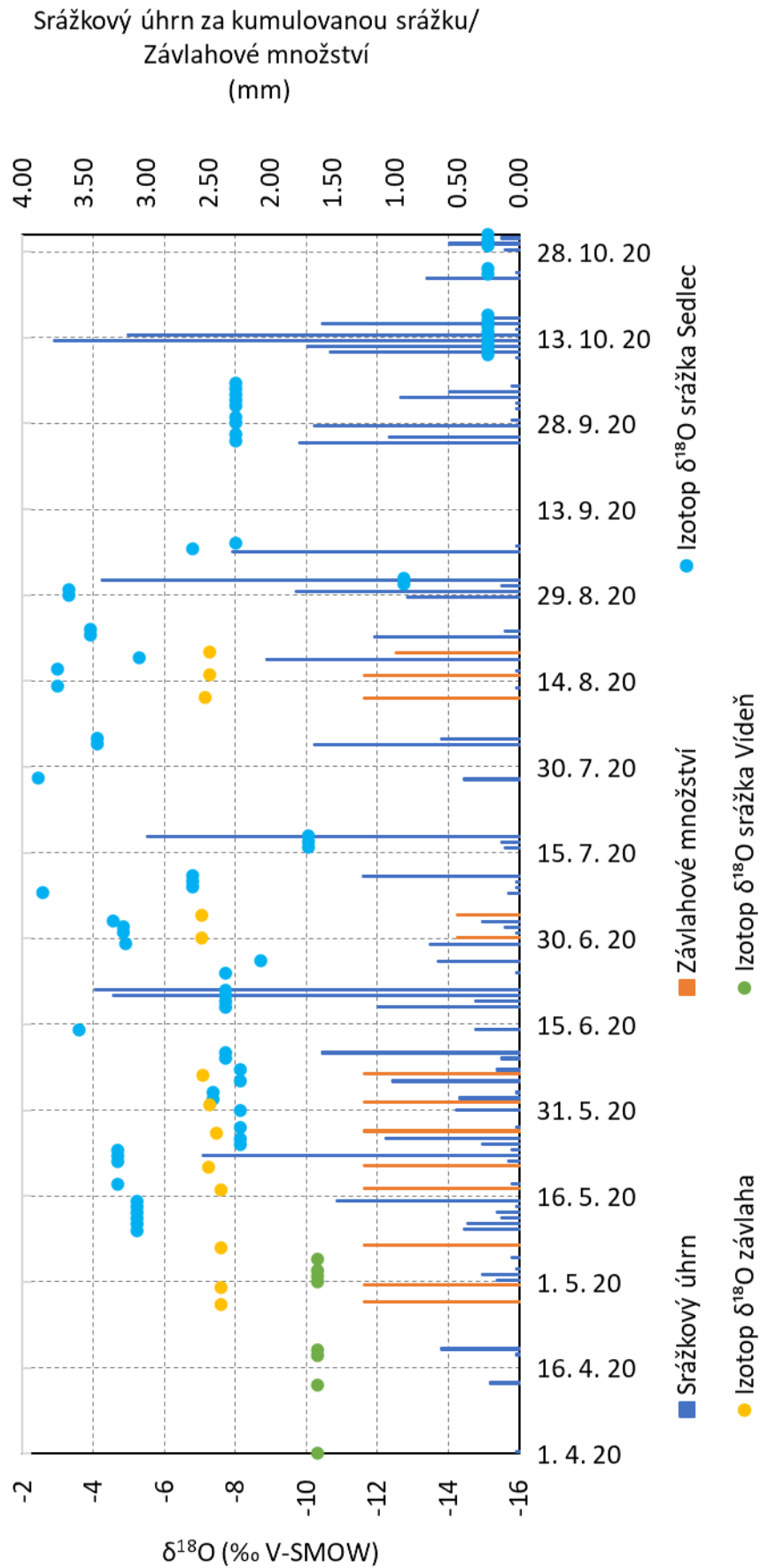
V blízkosti zavlažovaného vinohradu bylo instalováno záchytné zařízení na sběr dešťových srážek v roce 2020 a 2021. Po srážkové epizodě bylo zachycené množství spadlé vody odebráno a použito pro analýzu izotopů  $\delta^{18}\text{O}$ . V roce 2020 byl první odběr srážkové vody proveden 18. 5. Pro účely matematického modelování od začátku dubna bylo nutné použít hodnoty izotopové koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  z jiného území. Byla použita hodnota váženého průměru izotopové koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  za posledních 6 měsíců (tj. listopad 2019 až březen 2020) ze stanice Vídeň (IAEA, c1998-2022). V roce 2021 byl první odběr proveden 25. 3. 21, a proto pro modelované časové období v tomto roce nebylo třeba použít údaje z jiné lokality.

U zavlažovaného vinohradu došlo k závlaze v roce 2020 i 2021. V období závlahy byl proto několikrát proveden odběr vzorků ze zdroje závlahy pro analýzu izotopů  $\delta^{18}\text{O}$ .

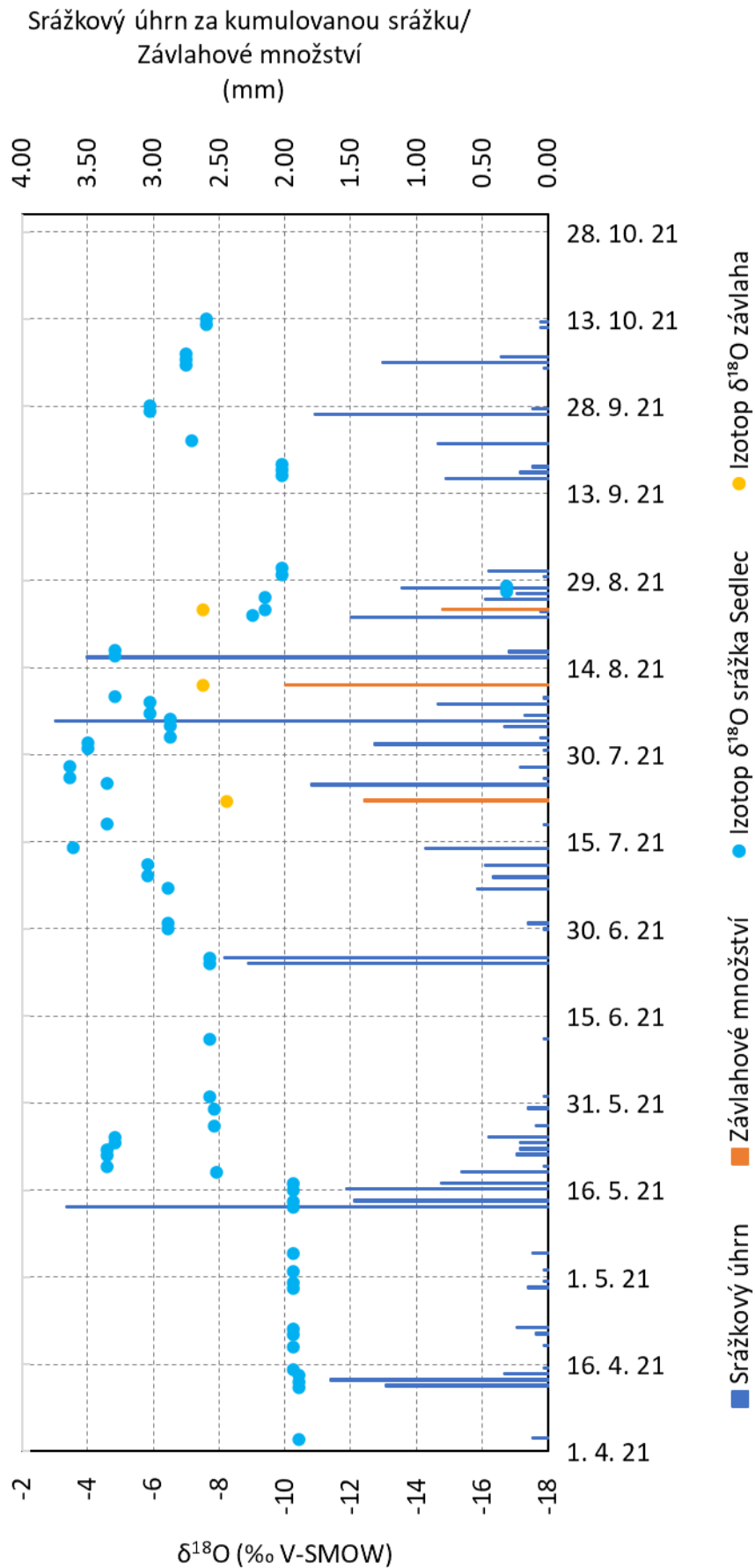
Odběr vzorků vody ze srážek, závlahy i řek byl proveden pracovníky ZD Sedlec do vialek o objemu 10 ml. Pro zamezení výparu a uchování stejné koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  byly vzorky bezprostředně po odběru zmrazeny.



Obrázek 19 Sběr srážkové vody k analýze izotopů



Obrázek 20 Průběh  $\delta^{18}\text{O}$  ve srážkách a závlahách na vinohradu ZD Sedlec v roce 2020. Srážkové úhrny (AMET.cz, 2022).



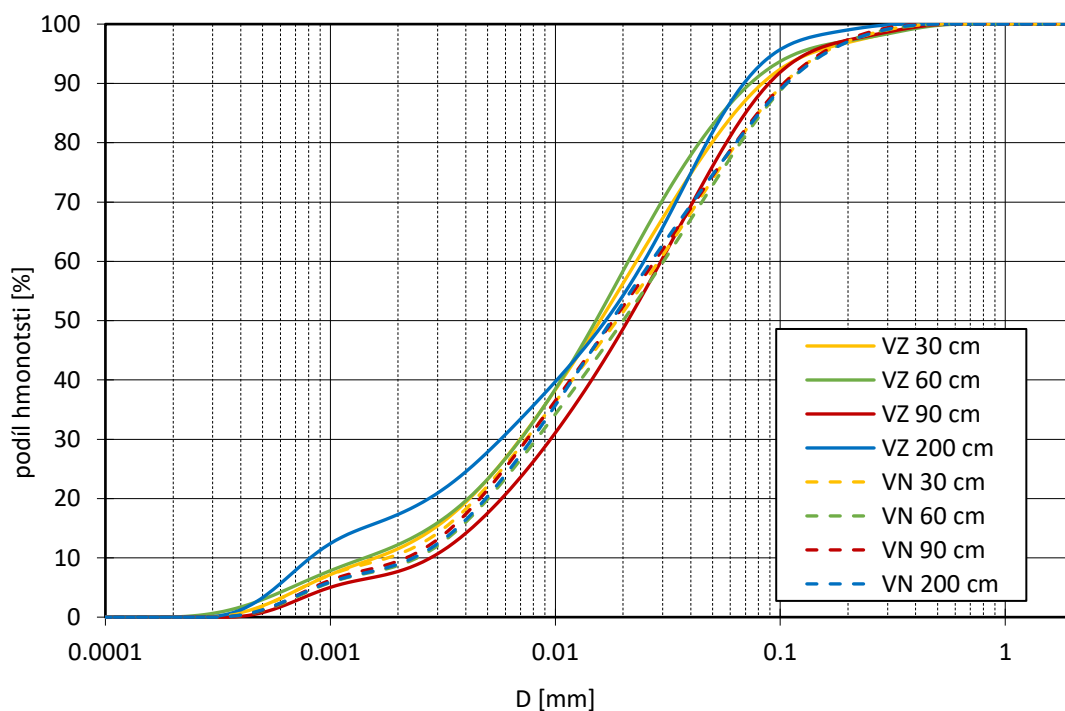
Obrázek 21 Průběh  $\delta^{18}\text{O}$  ve srážkách a závlaze na vinohradu ZD Sedlec v roce 2021. Srážkové úhrny (AMET.cz, 2022).



## 7. Materiálové a hydrofyzikální charakteristiky půd

### 7.1. Čára zrnitosti

Čára zrnitosti je součtová čára znázorňující hmotnostní zastoupení (v %) dle velikosti zrn. Určuje hmotnostní podíl vzorku půdy menší, než je příslušná velikost zrna  $D$  (mm). Zrnitostní rozbor vzorků byl proveden pomocí laserové granulometrie, jejíž hlavní výhodou při měření velikosti částic je opakovatelnost, rychlost a přesnost měření. Metoda laserové granulometrie spočívá v prozařování vzorku laserovým paprskem a následné detekci rozptýleného světla. Různě velké částice ohýbají světlo (laserový paprsek) pod různým úhlem, přičemž s klesající velikostí se úhel zvětšuje a intenzita rozptýleného světla klesá (McCave, 1986). Pro obě lokality byly následně z výsledků vytvořeny čáry zrnitosti (obr. 22). Je viditelná stejná zrnitost po celém půdním profilu pro nezavlažovaný vinohrad a velmi podobná zrnitost pro vinohrad zavlažovaný. Půdní druh je určen na základě zrnitostní charakteristiky půdy a ovlivňuje fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy. Zavlažovaný i nezavlažovaný vinohrad jsou klasifikovány dle USDA (US Department of Agriculture – Americké ministerstvo zemědělství) jako prachovitá hlína.



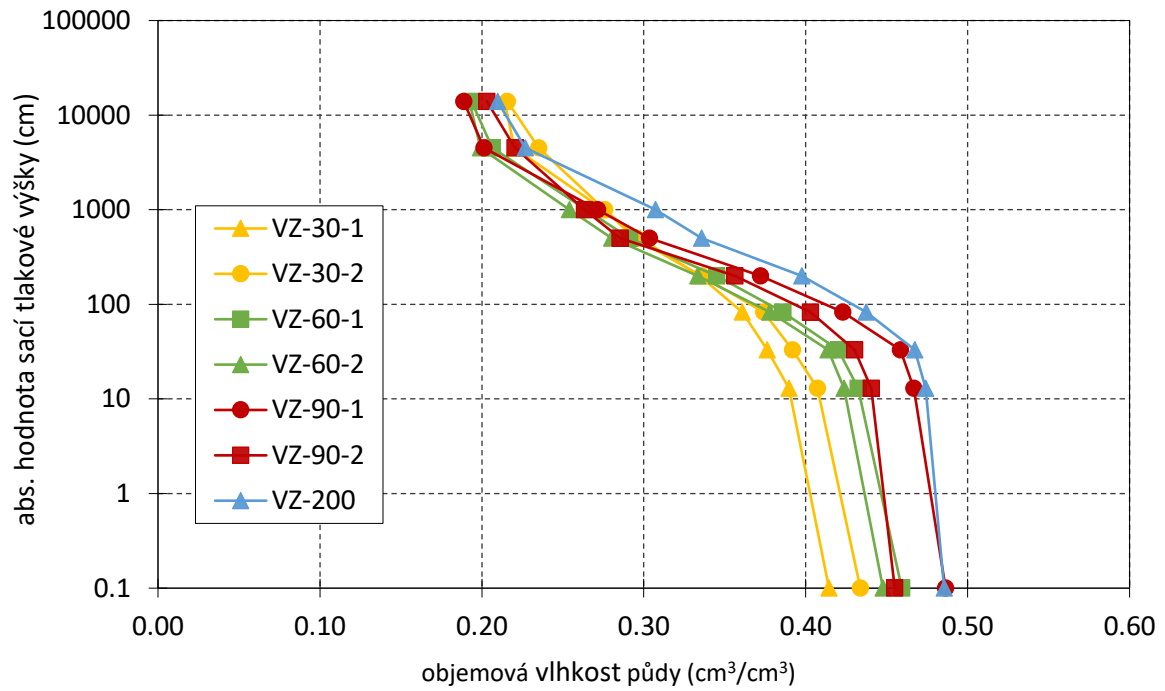
Obrázek 22 Čára zrnitosti zavlažovaného (VZ) a nezavlažovaného (VN) vinohradu ze dne 8. 9. 2020

## 7.2. Retenční čára půdní vlhkosti

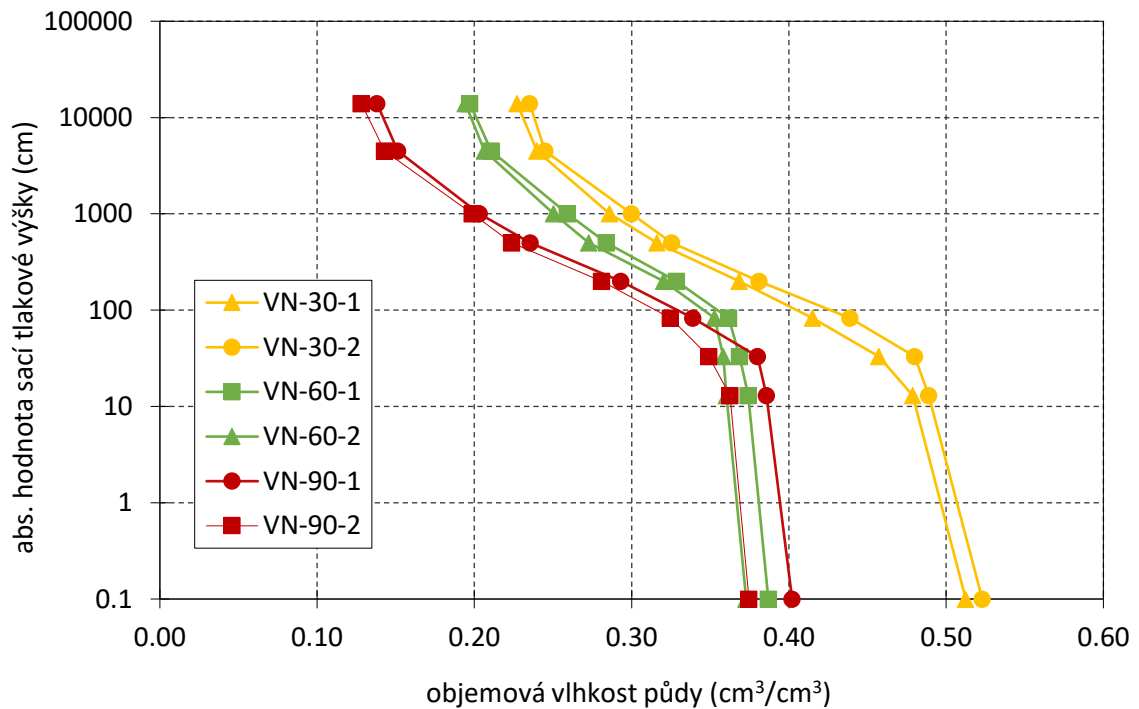
Retenční čára půdní vlhkosti je sada rovnovážných stavů pro kapilární tlakovou výšku a objemovou vlhkost půdy. Její průběh ovlivňuje řada faktorů, jako jsou zrnitostní a mineralogické složení, obsah humusu, struktura a objemová hmotnost suché zeminy. Diplomová práce využívá výsledků měření drenážní větve retenční čáry na vzorcích „VZ“ a „VN“ z hloubek 30, 60, 90 cm, u „VZ“ včetně hloubky ve 200 cm. Pro laboratorní stanovení vlhkostních retenčních čar půdní vlhkosti se použil pískový tank a přetlakový přístroj. Retenčních čar můžeme využít k přepočtu tlakové výšky měřené např. pomocí tenzometru na vlhkost půdy. Při hodnotě absolutní tlakové výšky blízké 0 cm je půda plně nasycena vodou.



Obrázek 23 Přetlakový aparát



Obrázek 25 Výsledky měření drenážní větve retenční čáry pro zavlažovaný vinohrad



Obrázek 24 Výsledky měření drenážní větve retenční čáry pro nezavlažovaný vinohrad

### 7.3. Nasyčená hydraulická vodivost

Nasyčená hydraulická vodivost ( $K_s$ ) popisuje proudění vody nasyceným půdním prostředím. Znalost této hydrofyzikální charakteristiky je důležitá z pohledu rychlosti infiltrace srážek, závlahy, ale i odtoku vody. Se zvyšující se hodnotou nasycené hydraulické vodivosti se zvyšuje schopnost půdy vést vodu. Hodnota nasycené hydraulické vodivosti na zavlažovaném i nezavlažovaném vinohradu byla měřena pomocí přístroje KSAT od firmy METER s proměnlivou výškou hladiny. U nezavlažovaného vinohradu se pohybují hodnoty hydraulické vodivosti v rozmezí 1-5 cm/den. U zavlažovaného vinohradu jsou hodnoty velmi podobné jako u nezavlažovaného vinohradu, vyjma 1. vrstvy v 0-30 cm, kde byla naměřena téměř trojnásobná hydraulická vodivost. Jedním z důvodů vyšší hodnoty může být způsobu zpracování půdy, kde mohlo dojít u zavlažovaného vinohradu k většímu nakypření horní vrstvy (Haruna et al., 2018).



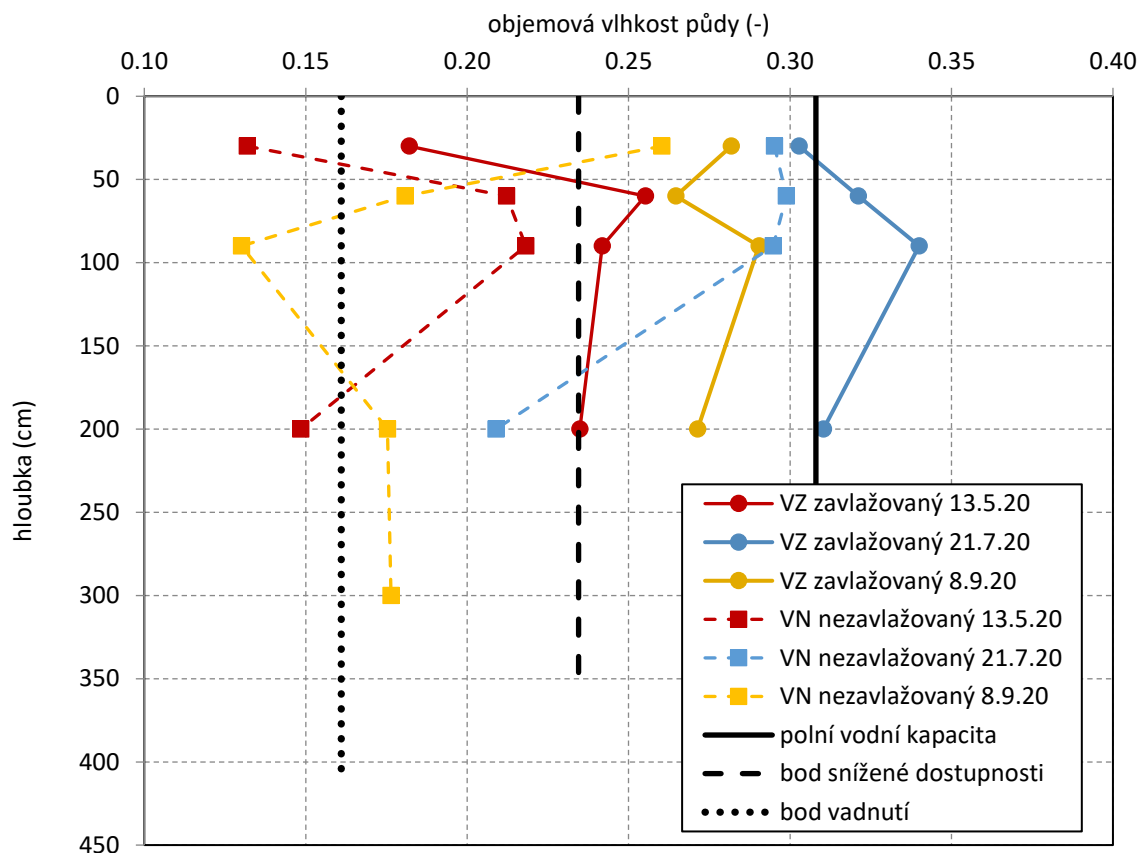
Obrázek 26 Přístroj KSAT použitý pro měření hydraulické nasycené vodivosti

*Tabulka 1 Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ) použité pro modelování u nezavlažovaného (VN) a zavlažovaného (VZ) vinohradu*

Hloubka vrstvy [cm]	$K_s$ pro VN [cm/den]	$K_s$ pro VZ [cm/den]
0-30	23	5
30-60	1	5
60-90	5	3
90-200	1	1

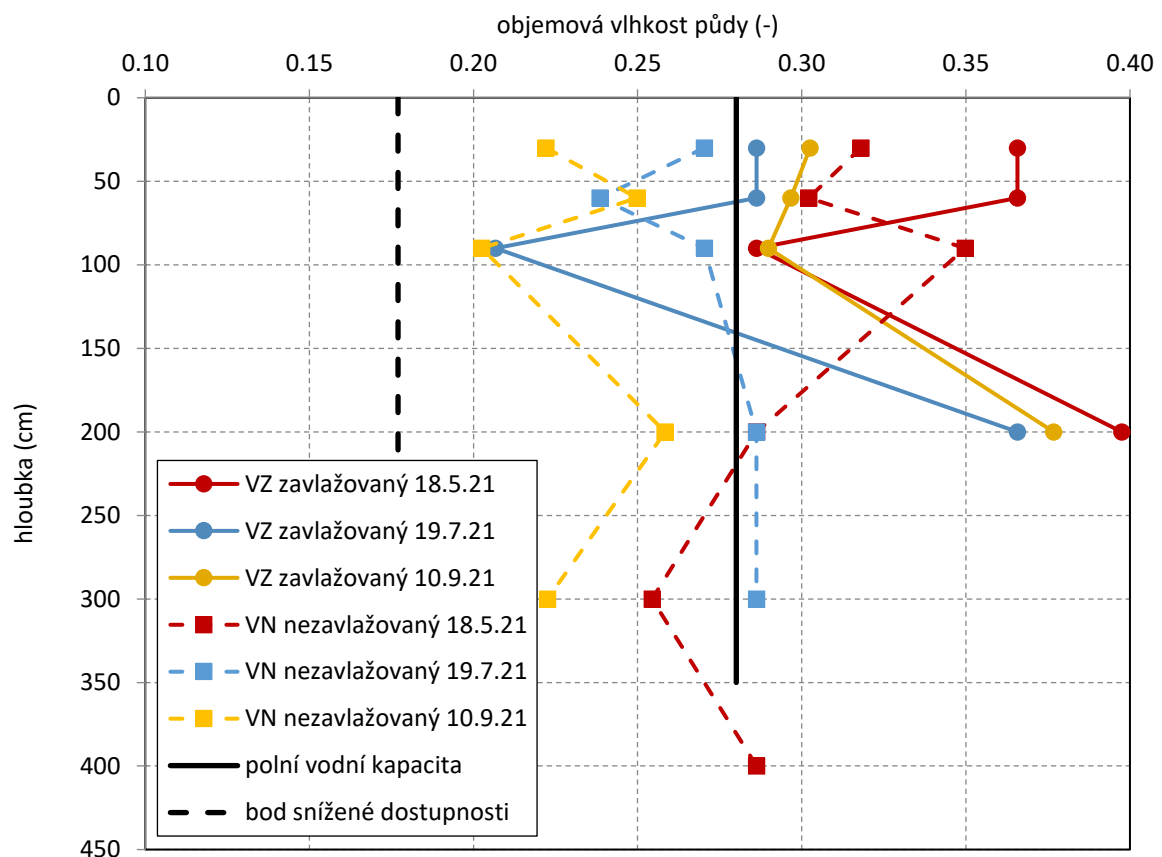
#### 7.4. Stanovení okamžité objemové vlhkosti

Okamžitá objemová vlhkost vyjadřuje objemové množství vody k objemu půdy v daném okamžiku. Objemová hmotnost se v případě vrтанých, tj. objemově porušených vzorků stanoví výpočtem z hmotnostní vlhkosti a objemové hmotnosti, stanovené na neporušených vzorcích. Výslednou objemovou hmotnost z odebraných porušených vzorků ukazuje obrázek č. 27 a obrázek č. 28.



*Obrázek 27 Objemová vlhkost půdy v sezoně 2020 dle hloubky u nezavlažovaného a zavlažovaného vinohradu*

Pro vymezení vodních režimů půdy se nejčastěji používá polní vodní kapacita a bod vadnutí. Polní vodní kapacita představuje maximální možné množství vody, které je půda schopna zadržet kapilárními silami. Bod vadnutí odpovídá půdní vlhkosti, při které jsou rostliny trvale nedostatečně zásobeny vodou a začínají vadnout (rostliny nejsou schopny překonat kapilární síly, kterými je půdní voda vázána).



Obrázek 28 Objemová vlhkost půdy v sezoně 2021 dle hloubky u nezavlažovaného a zavlažovaného vinohradu



## 8. Matematický model proudění v půdním prostředí

### 8.1. Popis modelu S1D

Pro zpracování matematického modelu proudění vody a transportu rozpuštěných látek v půdním prostředí byl použit numerický simulační model S1D, vyvinutý na ČVUT v Praze, Fakultě stavební, Katedře hydrauliky a hydrologie (Vogel, 2004). Tento model lze použít pro modelování velké škály různých hydrofyzikálních procesů v měřítku od velikosti reprezentativního elementárního objemu ( $1 \text{ cm}^3 - 10 \text{ dm}^3$ ) k velikosti půdního profilu ( $1 \text{ m} - 10 \text{ m}$ ).

S1D model je výsledkem dlouhodobého vývoje, a proto má mnoho společných funkcí s modely jako SWMI a HYDRUS 5.0. Oproti zmíněným modelům nabízí funkci duálního režimu, který simuluje tok a transport látek v půdním prostředí s preferenčními cestami. Model je taktéž upraven na zadávání izotopových koncentrací v delta notaci (tj. záporná čísla).

Matematický model S1D je určen pro modelování jednorozměrného proudění vody s transportem jednoho druhu rozpuštěné látky v různě nasycených heterogenních porézních vrstvách. Proudění vody je simulováno pomocí Richardsovy rovnice. Pomocí advekčně-disperzní rovnice se následně modeluje transport rozpuštěných látek v půdní vodě. V modelu je řada okrajových podmínek a model také zohledňuje příjem vody kořeny jako funkci stresu z vody.

#### 8.1.1. Řídící rovnice – Richardsova rovnice

Při popisu proudění vody půdním prostředím dochází k neustálenému proudění, tj. rychlost proudění kapaliny je závislá na čase a místě. V půdním prostředí je vlhkost půdy velmi proměnlivá v závislosti na čase, a proto se v modelu využívá proudění vody v nenasyčené zóně, tj. pouze část všech pórů je vyplněna vodou.

Pro popis neustáleného nenasyčeného proudění se používá tzv. Richardsova rovnice proudění, která vznikne sloučením rovnice kontinuity a Darcy-Buckinghamovy rovnice (Marshall, et. al, 1996).

Při řešení matematického modelování proudění vody v S1D modelu jsou dány tři základní předpoklady:

- Laminární (nebo téměř laminární) proudění v porézním prostředí
- Jedná se o jednorozměrné, nedeformovatelné a nehybné porézní prostředí s různou vlhkostí
- Přítomnost a pohyb půdního vzduchu neovlivňuje proudění vody





Při splnění těchto předpokladů je následně řešena Richardsova rovnice v jednorozměrném tvaru.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right) - S \quad (2)$$

- $\theta$  objemová vlhkost (-),  
 $t$  čas (den),  
 $x$  prostorová souřadnice (cm),  
 $h$  tlaková výška (cm),  
 $K$  nenasycená hydraulická vodivost (cm/den),  
 $\cos \alpha$  úhel mezi směrem proudění a svislou osou (u vertikálního proudění  $\cos \alpha = 1$ )  
 $S$  sink term (zdroj nebo propad vody) (den<sup>-1</sup>)

### 8.1.2. Propad vody

Sink term neboli propadový člen  $S$ , označuje reprezentativní objem odebrané vody za jednotku času z jednotkového objemu půdy kořenovým systémem. Feddes et al. (1978) definuje  $S$  dle rovnice 3.

$$S(h) = a(h)S_p \quad (3)$$

- $S(h)$  popisuje transpiraci a odběr vody kořenovou zónou  
 $a(h)$  vláhový stres definovaný bezrozměrnou funkcí tlakové výšky  $h$  ( $0 \leq a \leq 1$ )  
 $S_p$  potenciální intenzita transpirace a odběru vody z kořenové zóny (cm<sup>-1</sup>)

Když se  $a(h) = 1$ , potenciální intenzita transpirace  $S_p$  odpovídá reálné transpiraci. Jestliže je potenciální intenzita odběru vody v kořenové zóně  $S_p$  rozložena rovnoměrně, pak dle Feddes et al. platí rovnice číslo 3.

$$S_p = \frac{1}{L_x} T_p \quad (4)$$

- $T_p$  potenciální intenzita transpirace (cm/den)  
 $L_x$  hloubka kořenové zóny (cm)

Rovnice č. 3 může být obecně vyjádřena dle Vogela (1987) také ve tvaru:

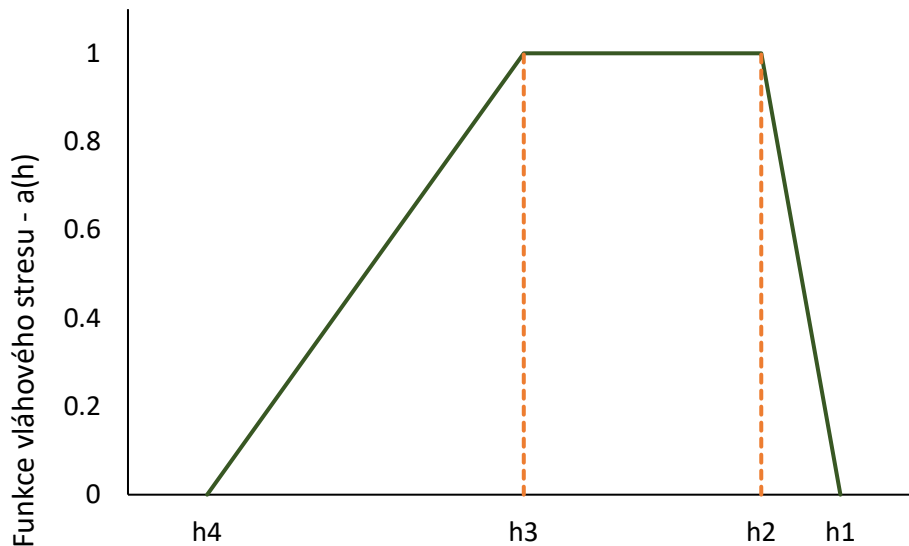
$$S_p = b(x)T_p \quad (5)$$



b(x) rozložení odběru vody kořenovou zónou ( $\text{cm}^{-1}$ )

Při použití obecného vyjádření dle Vogela (1978) je uvažováno s nerovnoměrným rozložením potenciálního odběru vody kořenovou zónou.

Model nabízí dvě možná řešení pro funkci vláhového stresu, a to dle Feddesse et al. (1978) nebo dle van Genuchten (1987). Pro účely diplomové práce byla zvolena funkce vláhového stresu dle Feddesse et al. (1978). Tato funkce je definována pěti body, které určují povahu transpirace rostlinou. Existuje zde interval tlakové výšky mezi body  $h_2$  a  $h_3$ , v němž má rostlina ideální podmínky pro transpiraci. Bod  $h_4$  označuje bod vadnutí, při kterém jsou rostliny vystaveny dlouhodobému nedostatku vody a dochází k nevratnému vadnutí. Interval mezi body  $h_1$  a  $h_2$  vyjadřuje sníženou transpiraci v důsledku nedostatku vzduchu v kořenové zóně.



Obrázek 29 Funkce vláhového stresu dle Feddesse (1978)

### 8.1.3. Řídící rovnice – Advekčně-disperzní rovnice

Pohyb izotopů v molekule vody lze popsat pomocí advekčně disperzní rovnice. V případě rovnovážné sorpce, která je dána faktorem  $R_1$ , lze popsat transport rozpuštěných látek v půdní vodě následujícími rovnicemi:

$$\frac{\partial R_1 \theta c}{\partial t} + \frac{\partial qc}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = -\lambda_w \theta c - \lambda_s \rho K_1 c + \gamma_w \theta - \rho \alpha (K_2 c - s_2) + S c_s \quad (6)$$

$$\frac{\partial s_2}{\partial t} = -\lambda_s s_2 + \alpha (K_2 c - s_2) \quad (7)$$



$$R_1 = 1 + \frac{\rho}{\theta} K_1 \quad (8)$$

c	koncentrace rozpuštěných látek
D	koeficient hydrodynamické disperze
q	Darcyovský průtok
$\lambda_w, \lambda_s$	koeficienty rozpadu
$\gamma_w$	produkční konstanta nultého řádu pro kapalinu
S	propadový člen
$c_s$	odebrané množství rozpuštěných látek kořenovou zónou
s	adsorbovaná koncentrace
$\rho$	objemová hmotnost půdy
$K_1$	empirický koeficient Freundlichovy izotermy

Když se exponent  $\eta$  nerovná 1, Freundlichovy izotermy, a tedy i samotné transportní rovnice, se stávají nelineárními.

## 8.2. Vstupy do modelu

### 8.2.1. Časové údaje

Modelové posouzení vodního režimu zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu bylo provedeno pro vegetační období let 2020 a 2021. Rok je z pohledu vývoje rostlin rozdělen na období vegetačního klidu a vegetační období. Vegetační období je definováno jako doba s příznivými podmínkami pro růst rostlin. Tato doba se liší na základě pěstované plodiny a lokality, která je pro pěstování zvolena.

Vegetační období je dle ČSN 750434 vymezeno pro vinice – stolní odrůdy od 1. 4. až do 31. 8., pro vinice – moštové odrůdy od 1. 4. do 30. 9. V této studii bylo použito vegetační období od 1. 4. 2020, respektive 1. 4. 2021, do 31. 10. 2020, respektive 31. 10. 2021.

V modelu je použit časový krok jednoho dne. Zápis jednotlivých dnů je proveden dle pořadí dne v roce dle Juliánského kalendáře. Počáteční časový krok simulace byl zvolen 0,01 dne, minimální časový krok 0,00001 dne a maximální časový krok 1 den.

### 8.2.2. Rozdělení půdního profilu

Modelace proudění vody v půdním profilu proběhla v rozmezí 0-200 cm. Půdní profil byl v lokalitách zavlažovaného i nezavlažovaného vinohradu rozdělen na půdní vrstvy. Rozdělení vrstev bylo zvoleno dle hloubek odebraných vzorků, tj. 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm a 90-200 cm. Každé půdní vrstvě byly následně přiděleny dané parametry.



Při simulaci proudění vody půdním profilem byla modelovaná oblast rozdělena po vertikále do 216 uzlů. Hustota uzlů byla zvolena po 1 cm. Výjimku tvořily první dva centimetry u povrchu a dna, kde byla hustota uzlů zvolena podrobněji po 0,2 cm.

### 8.2.3. Parametry retenční křivky půdní vlhkosti

Pro řešení Richardsovy rovnice, kterou model využívá k řešení, je nutné znát parametry retenční křivky. Ta je proložena dle van Genuchtena (1980) na základě laboratorně získaných bodů. Jedná se o úlohu nelineární regrese. Analytická vyjádření křivky dle van Genuchtena je derivovatelné v celém oboru hodnot. Výsledné hodnoty z tohoto měření zobrazuje tab. 2. a proloženou retenční křivku obr. 30.

$$\theta_e(h) = \frac{1}{(1 + (-ah)^n)^m} \quad \text{pro } h < 0 \quad (9)$$

$$\theta_e(h) = 1 \quad \text{pro } h \geq 0 \quad (10)$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (11)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

$\theta_e$	efektivní vlhkost (-)
$\theta_r$	reziduální vlhkost
$\theta_s$	nasycená vlhkost
$\alpha, m$ a $n$	parametry, kde $n > 1$

*Tabulka 2 Fitované parametry retenčních křivek*

Hloubka (cm)	VZ				VN		
	30	60	90	200	30	60	90
$\theta_r$	0,032	0,050	0,149	0,014	0,192	0,165	0,010
$\theta_s$	0,417	0,448	0,465	0,484	0,584	0,374	0,332
$\alpha$	0,027	0,021	0,011	0,010	0,027	0,006	0,016
n	1,141	1,212	1,421	1,204	1,247	1,460	1,310

*Tabulka 3 Parametry retenční křivky pro model „VZ“ 2021 a 2020*

X [cm]	$\theta_r$ [-]	$\theta_s$ [-]	$\alpha$ [-]	n [-]	$\theta_s'$ [-]
0–30	0,032	0,417	0,027	1,141	0,418
30–60	0,050	0,448	0,021	1,212	0,449
60–90	0,014	0,465	0,011	1,221	0,466
90–200	0,014	0,484	0,010	1,204	0,485

*Tabulka 4 Parametry retenční křivky pro model „VN“ 2021 a 2020*

X [cm]	$\theta_r$ [-]	$\theta_s$ [-]	$\alpha$ [-]	n [-]	$\theta_s'$ [-]
0–30	0,153 (0,102)	0,410	0,027	1,247	0,411
30–60	0,165	0,380	0,006	1,460	0,381
60–90	0,160	0,410	0,016	1,310	0,411
90–200	0,160 (0,140)	0,380	0,016	1,304	0,381

X hloubka [cm],

$\theta_r$  reziduální vlhkost [-],

$\theta_s$  nasycená vlhkost [-],

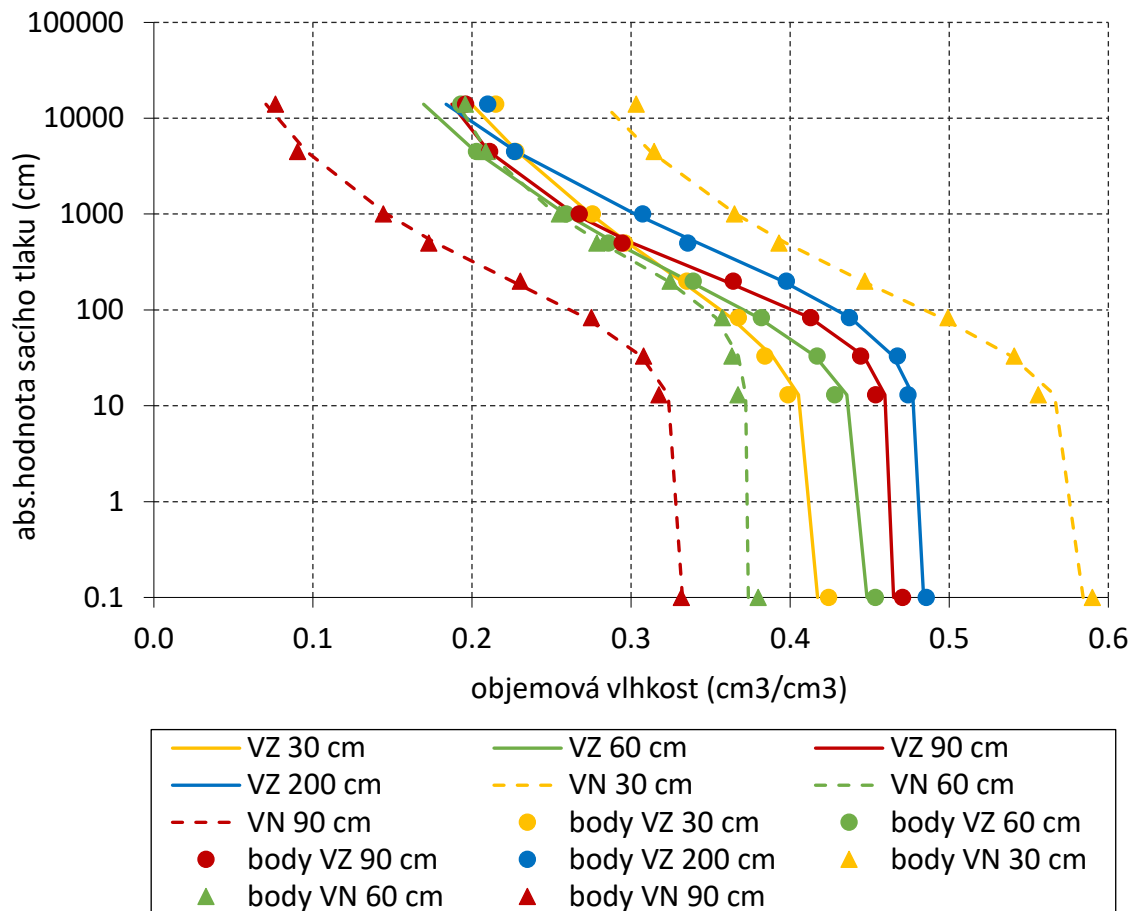
$\alpha$  optimalizační parametr [ $\text{cm}^{-1}$ ],

n optimalizační parametr [-], n musí být větší než 1,

$K_s$  hydraulická vodivost [cm/den],

$\theta_s'$  fiktivní nasycená vlhkost [-], větší nebo rovna  $\theta_s$ .

(pro model v roce 2020 pro  $\theta_r$  platí u 1. a 4. vrstvy hodnoty v závorce)



Obrázek 30 Retenční křivka proložena dle van Genuchtena (1980)

#### 8.2.4. Srážky

Meteorologické údaje k této studii byly převzaty ze stránky AMET – sdružení Litschmann & Suchý. V této studii byla použita data z meteorologické stanice s názvem Sedlec u Mikulova, která je umístěna přibližně 1 km od zavlažovaného vinohradu a 1,5 km od nezavlažovaného vinohradu. Meteorologická stanice měří teplotu vzduchu, přízemní teplotu, teplotu půdy v 10 cm, srážky, vlhkost vzduchu a vlhkost půdy v 35 cm v 15. minutových intervalech. Převzatá data srážkových úhrnů byla následně zpracována pro jednodenní časový krok.

$$S_d = \sum \frac{S_m}{10} \quad (13)$$

$S_d$  srážkový úhrn (cm/den)

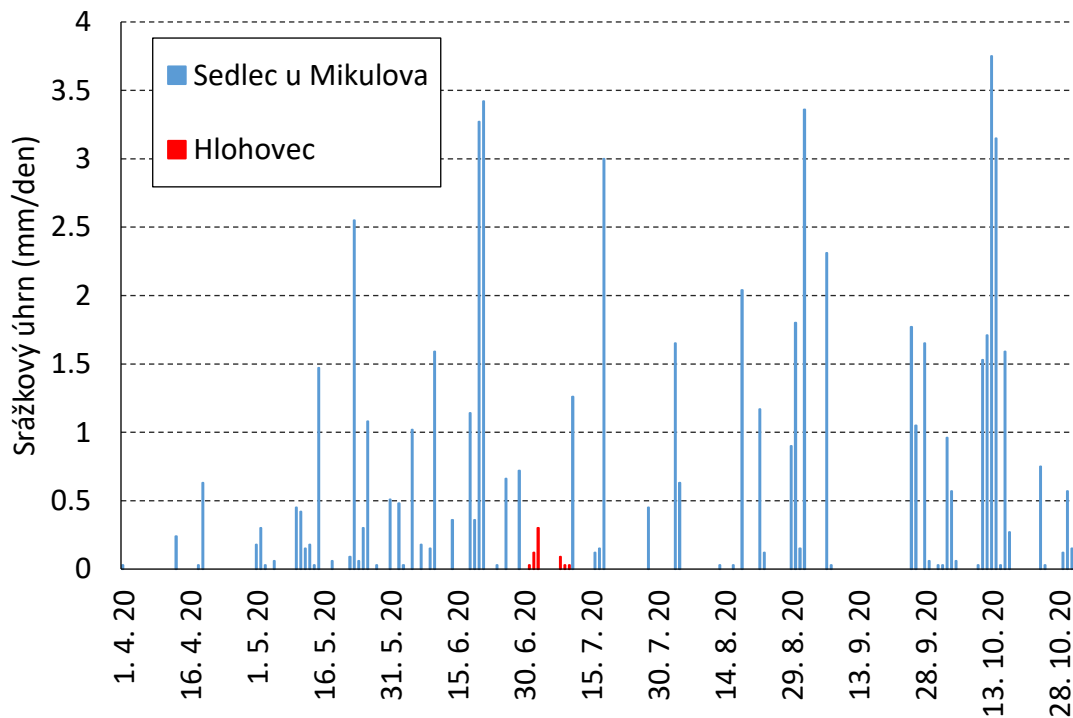
$S_m$  srážkový úhrn (mm/15 min)



V období od 1. 7. 2020 do 10. 7. 2020 byl v datech ze stanice Sedlec u Mikulova výpadek. V tomto období byla použita data nahrazena blízkou stanicí ze stránky AMET.cz s názvem Hlohovec.



Obrázek 31 Meteostanice Sedlec u Mikulova (vlevo) a Hlohovec (vpravo), (AMET,2022)



Obrázek 32 Srážkový úhrn 2020 (AMET, 2022)



### 8.2.5. Závlaha u zavlažovaného vinohradu

Dle agronoma ZD Sedlec Ing. Z. Zvonka bylo celkem v roce 2020 na závlahy v zájmové lokalitě zavlažovaného vinohradu použito 50000 m<sup>3</sup> vody v termínech 27. 4. 20-11. 6. 20; 30. 7. 20-4. 8. 20; 11. 8. 20-19. 8. 20. Celková výměra zde zavlažované vinice činí 34.58 ha, tzn., že na 1 ha vinice bylo na závlahu použito 1445.9 m<sup>3</sup> vody, což při počtu 4200 ks keřů révy vinné na 1 ha znamená 344.3 l vody na 1 keř. Přidaná závlaha se v modelu zadává pomocí přidaných srážek. Množství srážek je vyjádřeno v jednotkách cm, proto celkové přidané množství v roce 2020 bylo zaokrouhleně 14,5 cm. Rozdělení tohoto množství ukazuje tabulka č. 5.

$$cm = \frac{10l}{m^2} = \frac{m^3}{100ha}$$

Ve vinicích ve stejné oblasti bylo v roce 2021 v termínu od 21.07.2021 do 18.08.2021 aplikováno celkem 14590 m<sup>3</sup> závlahové vody, což činí 421.9 m<sup>3</sup> na 1 ha, což při počtu 4200 ks keřů révy vinné na 1 ha znamená 100.4 l na 1 keř. Při přepočtu na modelované množství bylo v roce 2021 přidáno 4,2 cm závlahové vody rozdělené dle tabulky č. 6.

Tabulka 5 Rozdělení množství přidané závlahy v roce 2020

Rok 2020	Množství závlahy (cm)
27.04.2020	1.25
30.04.2020	1.25
07.05.2020	1.25
17.05.2020	1.25
21.05.2020	1.25
27.05.2020	1.25
01.06.2020	1.25
06.06.2020	1.25
30.06.2020	0.5
04.07.2020	0.5
11.08.2020	1.25
15.08.2020	1.25
19.08.2020	1
<b>Celkem za rok 2020</b>	<b>14.5</b>

Tabulka 6 Rozdělení množství přidané závlahy v roce 2020

Rok 2021	Množství závlahy (cm)
22.07.2021	1.4
11.08.2021	2
24.08.2021	0.8
<b>Celkem za rok 2021</b>	<b>4.2</b>

### 8.2.6. Sběr dat z čidel a meteorologické stanice

V lokalitě zavlažovaného i nezavlažovaného vinohradu byly v roce 2021 instalována čidla TMS-4. Tyto čidla kontinuálně měří na lokalitě VN a VZ půdní vlhkost v hloubce 30 cm a 90 cm. Jednotka je zasunuta do země a horní část (čtecí sonda) zůstává nad povrchem.

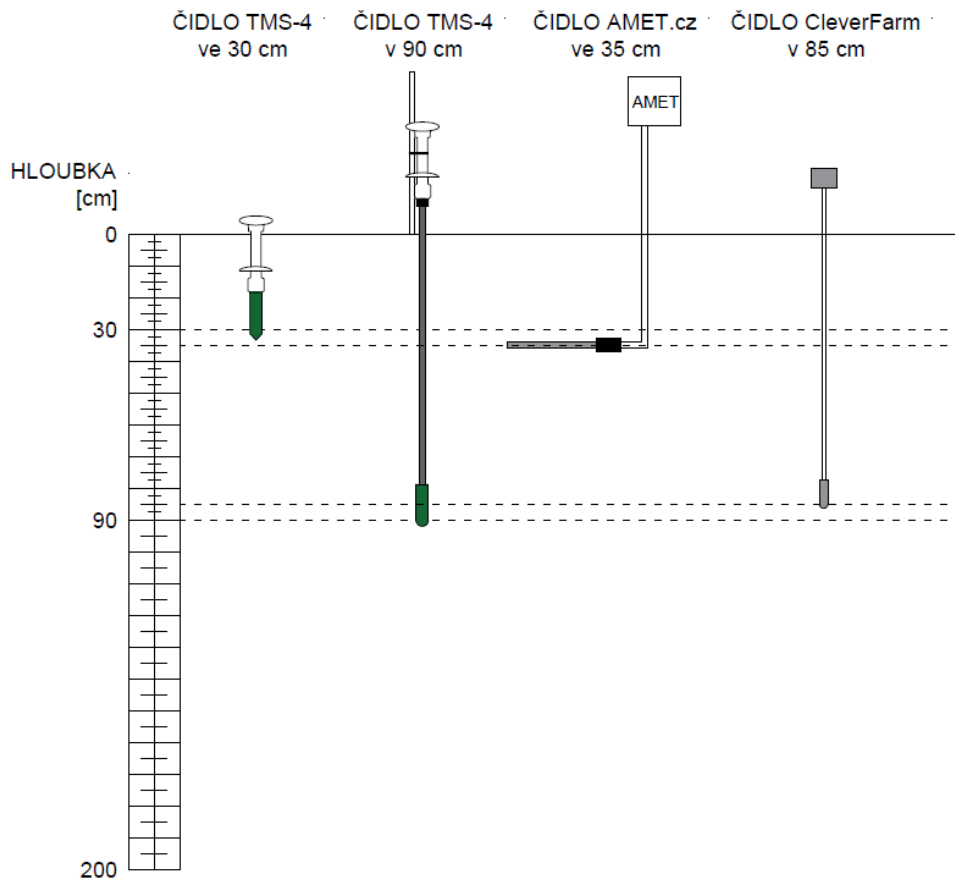
V lokalitě blízko zavlažovaného vinohradu se nachází čidlo půdní vlhkosti VIRRIB v systému meteostanic AMET.cz (sdružení Litschmann & Suchý), které má data pro rok 2020. V lokalitě tohoto čidla oproti VZ nedochází k dodatečné závlaze. Čidlo snímá objemovou půdní vlhkost v hloubce 35 cm. V blízkosti zavlažovaného vinohradu se nachází také čidlo sacího tlaku od firmy CleverFarm, které snímá vlhkostní potenciál v hloubce 85 cm, a jehož hodnoty byly podkladem pro studii modelu v roce 2020.



Obrázek 33 Meteo stanice AMET.cz



Obrázek 34 TMS-4 čidla u zavlažovaného vinohradu



Obrázek 35 Schéma čidel půdní vlhkosti/  
vlhkostního potenciálu

### 8.2.7. Evapotranspirace

Pro posouzení hydrologické bilance je důležité zahrnout evapotranspiraci. Evapotranspirace je pojem zahrnující evaporaci (výpar vody z půdy) a transpiraci (výpar vody povrchem rostlin). Její měření je vzhledem k vzájemné interakci mezi půdou, rostlinou a atmosférou velmi obtížné. Pro výpočtovou stabilitu modelu byla v této studii evaporace z povrchu nahrazena transpirací těsně pod povrchem, kromě autentické transpirace v kořenové zóně, která je také v modelu uvažována.

Rozdíl mezi zavlažovanou a nezavlažovanou révou vinnou se projevuje v hloubce kořenového systému. Bez dodatečné závlahy si réva vytvoří mělké kořeny, kterými přijímá vodu z aktuálních srážek, a kořeny hluboké, které využívá během suššího vegetačního období. V případě využití kapkové závlahy nemá réva důvod tvořit hluboké kořeny a odebírá vodu pouze kořeny mělkými (Šanda, 2021).

U nezavlažovaného vinohradu „VN“ lze pozorovat mělké kořeny do hloubky cca 40 cm a hluboké kořeny dosahující 170 cm, kde nekončí. V případě modelu nebyly hluboké kořeny uvažovány, jelikož přesahují modelovaný rozsah, pro který neexistují hydrofyzikální

charakteristiky ani znalost kořenového systému. Rozložení mělkých kořenů u nezavlažovaného vinohradu bylo navrženo dle tab.7. Mezi uvedenými hloubkami je hodnota  $\beta$  lineárně interpolována.

U zavlažovaného vinohradu pozorujeme kořeny révy vinné až do hloubky okolo 70 cm. Hluboké kořeny se v tomto případě nevyskytují. Hustota rozložení v kořenové zóně zobrazuje tab. 8.

*Tabulka 7 Rozložení kořenového systému u nezavlažovaného vinohradu „VN“*

X [cm]	$\beta$ [-]
0	0.0
-1	1.0
-15	1.0
-20	0.9
-30	0.7
-35	0.3
-40	0.1
-60	0.0

*Tabulka 8 Rozložení kořenového systému u zavlažovaného vinohradu „VZ“*

X [cm]	$\beta$ [-]
0	0
-1	1
-30	1
-60	0.5
-70	-0.2
-75	0

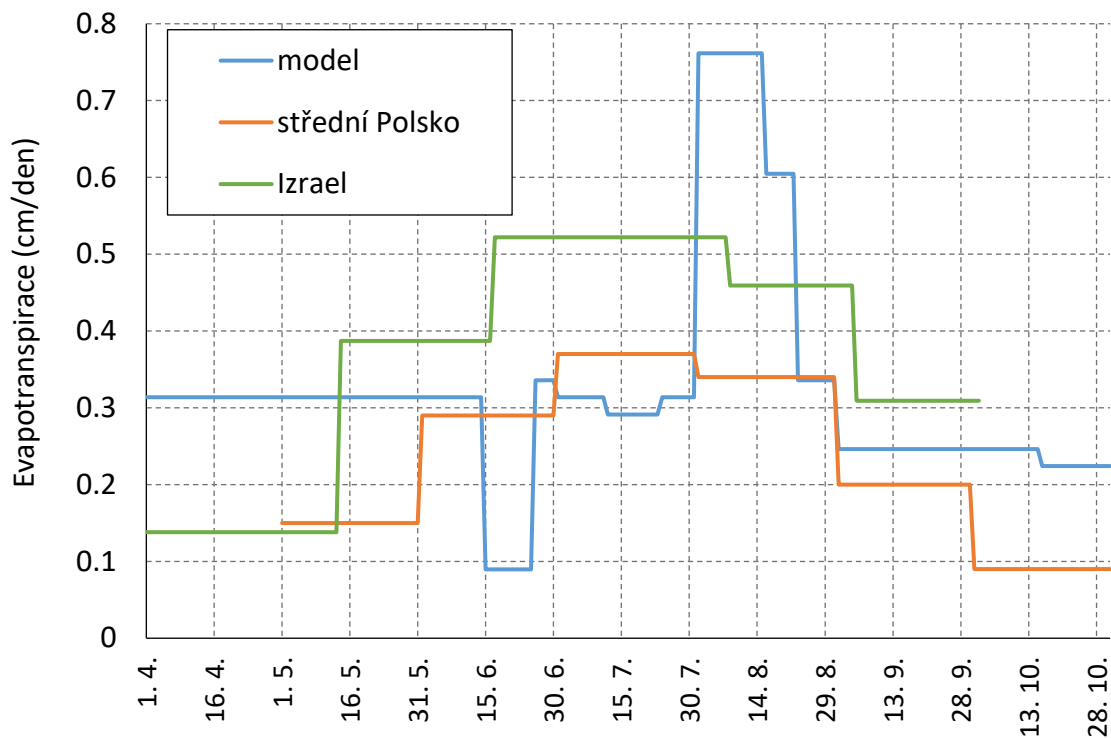
- X Hloubka v půdním profilu,  
 $\beta$  Funkce distribuce příjmu vody kořeny.

V rámci této studie byl celkový výpar v S1D modelu simulován pomocí kořenové transpirace. Hodnoty kořenové transpirace byly v prvním kroku modelování převzaty dle Jagosz et al. (2021), kteří se zabývají potřebou vody révy vinné ve středním Polsku. Jagosz et al. (2021) využívají data z let 1981–2020, kde evapotranspiraci řeší pomocí

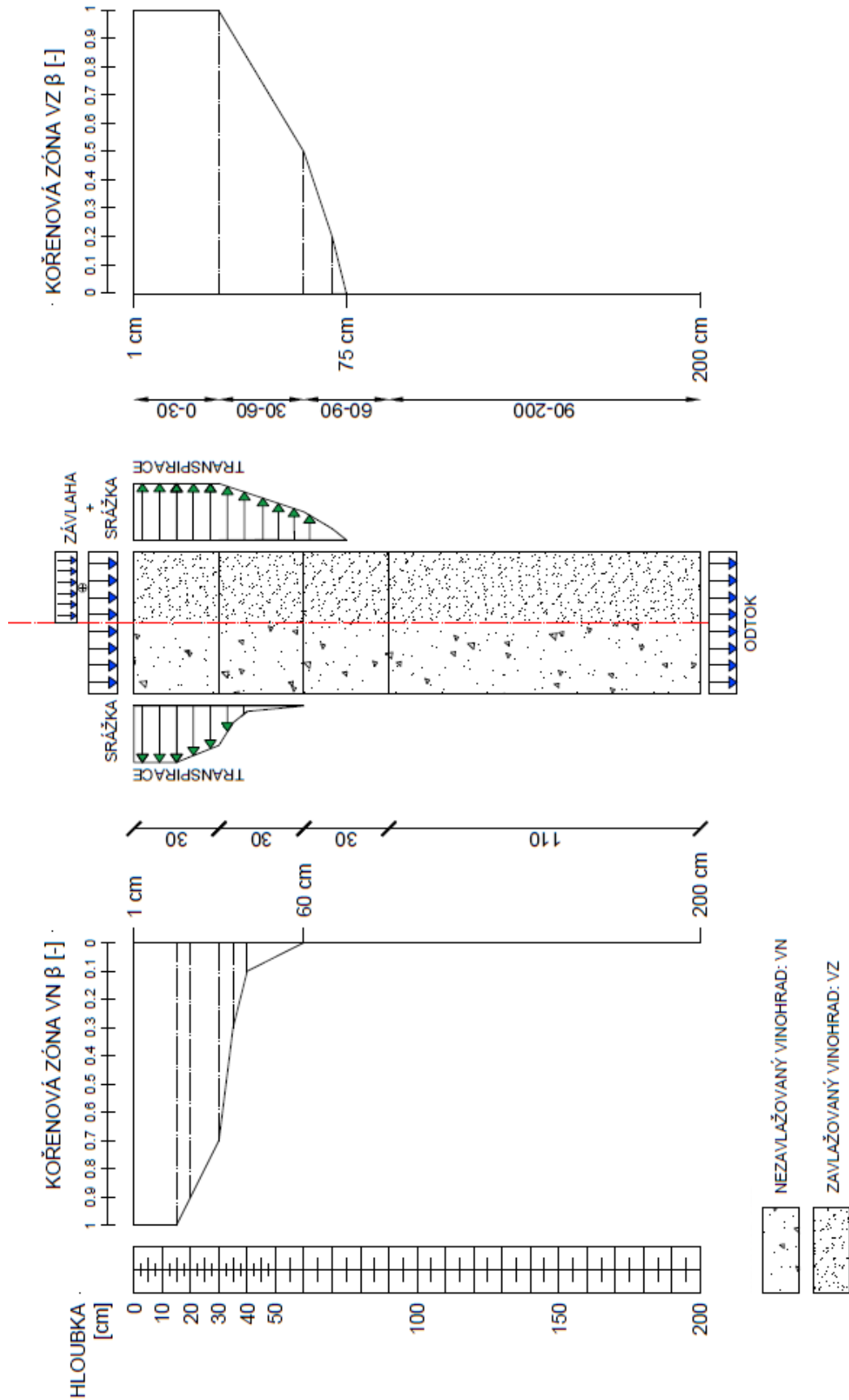


Blaney-Criddlovi rovnice, kterou následně upravili na základě podmínek polského prostředí. Evapotranspirace je dána průměrnou hodnotou za měsíc od května do října. Ohana-Levi et al. (2020) rozdělují evapotranspiraci do pěti fenologických fází révy vinné (od dubna do srpna). Hodnoty evapotranspirace vycházejí z průměru pěti sezón mezi roky 2013-2017 v semiaridní oblasti Izraele.

Modelované hodnoty evapotranspirace, resp. kořenové transpirace, byly uzpůsobeny na základě kalibrace k vlhkostnímu čidlu v roce 2021.



Obrázek 36 Průměrné denní hodnoty evapotranspirace



Obrázek 37 Schéma půdních profilů

### 8.2.8. Izotopová koncentrace pro transportní model

V průběhu sezóny 2020 a 2021 byla měřena izotopová koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  ve srážkách a závlaze. Naměřené hodnoty izotopové koncentrace  $\delta^{18}\text{O}$  byly přiřazeny všem srážkám, které proběhly před odběrem po poslední srážce. Tab. 9 prezentuje v modelu kalibrované transportní parametry. Parametr difuzního koeficientu vody, který se uplatňuje při výpočtu koeficientu hydrodynamické disperze (viz advekčně disperzní rovnice), byl převzat dle Singleton et al. (2004). Hodnota disperzivity se liší v závislosti na měřítku pozorování. Disperzivita je lineárně úměrná vzdálenosti (Arya et al., 1988; Gelhar et al., 1992), čím delší je vzdálenost, tím větší jsou výsledné hodnoty disperzivit.

Tabulka 9 Parametry pro transportní model

Hloubka (cm)	Difuzní koeficient vody ( $\text{cm}^2/\text{den}$ )	Disperzivita VN (cm)	Disperzivita VZ (cm)
0-30	2.0736	30	30
30-60	2.0736	60	60
60-90	2.0736	90	80
90-200	2.0736	90	80

### 8.2.9. Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční podmínka stanovuje hodnoty v celém řešeném prostoru v počátečním čase simulace, tj.  $t = 0$ . V případě této studie je za počáteční čas považováno datum 1. 4. 2020, respektive 1. 4. 2021.

Počáteční podmínky izotopové koncentrace byly dány dle tab. 11. Povrchové hodnoty v roce 2020 byly zvoleny na základě tříměsíčního srážkového průměru  $\delta^{18}\text{O}$  ze stanice Vídeň (IAEA, c1998-2022). V roce 2021 byly povrchové hodnoty zvoleny na základě měřené  $\delta^{18}\text{O}$  ze srážek v Sedleci u Mikulova. Počáteční podmínka u hlubších vrstev byla v roce 2020 a 2021 kalibrována na základě hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  ze srážky a hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  z odebraných vzorků.

Počáteční podmínky tlakových výšek  $h$  udává tabulka 10.

Tabulka 10 Počáteční podmínky tlakové výšky  $h$

Hloubka (cm)	h (cm) 2020		h (cm) 2021	
	VN	VZ	VN	VZ
0	-15000	-1000	-250	-250
-60	-	-	-	-150
-200	-15000	-1000	-550	-750

Tabulka 11 Počáteční podmínky izotopové koncentrace

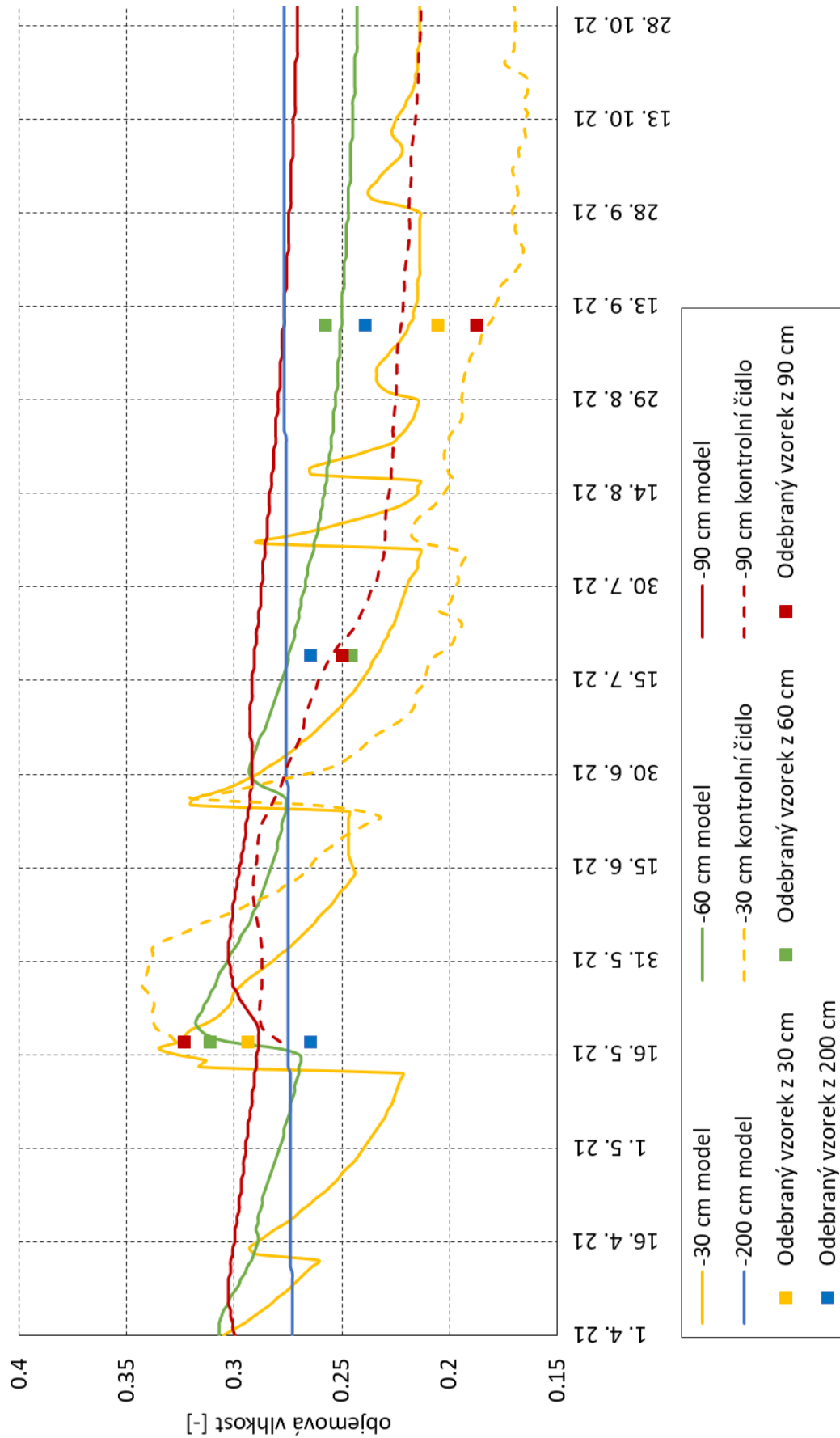
Hloubka (cm)	$\delta^{18}\text{O}$ 2020		$\delta^{18}\text{O}$ 2021	
	VN	VZ	VN	VZ
0	-8.16	-8.16	-10.41	-10.41
-30	-7.24	-8.16	-9.78	-10.22
-60	-6.45	-6.5	-8.7	-8.7
-90	-6.33	-6.5	-7.31	-7.8
-200	-8.5	-6.5	-7.98	-6.5

### 8.3. Výstupy z modelů

#### 8.3.1. Objemová vlhkost v půdním profilu VN a VZ v roce 2021

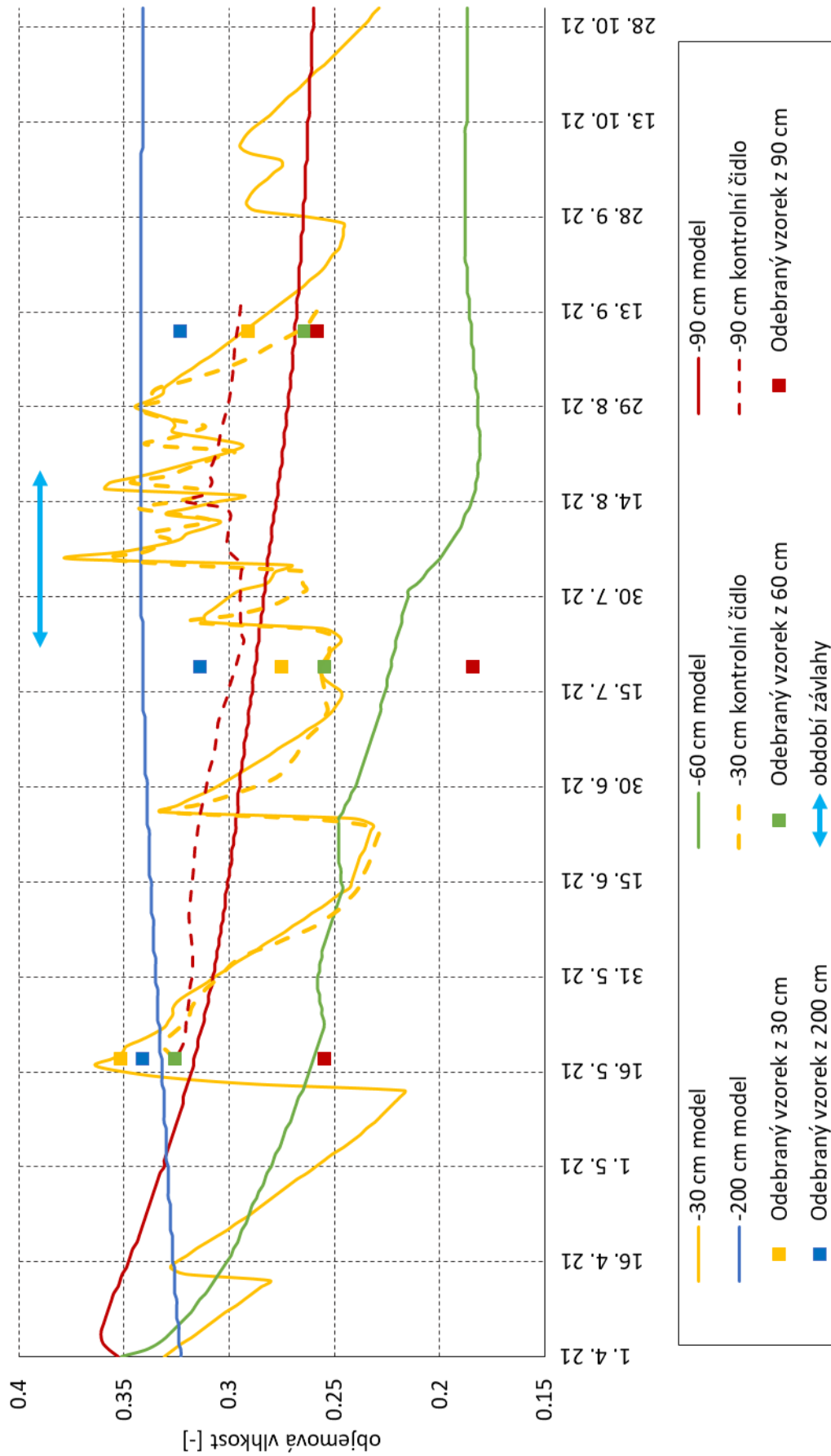
V roce 2021 byla objemová vlhkost v půdním profilu u zavlažovaného a nezavlažovaného vinohradu v modelu kalibrována dle čidel TMS-4. Jako kontrolní body a ověření měření čidel byly použity objemové vlhkosti z měřených vzorků ve dnech 18. 5. 2021, 19. 7. 2021, 10. 9. 2021. Kalibrace modelu probíhala na základě porovnání objemové vlhkosti z modelu se skutečným průběhem dle čidel a objemovými vlhkostmi ze vzorků. Na základě rozdílu byla následně upravena hodnota evapotranspirace, případně mírně poupraveny hydraulické charakteristiky.

U nezavlažovaného vinohradu je ve 30 cm dobře vystihnuta první polovina sezóny. Od července lze pozorovat u čidla ve 30 cm a 90 cm nižší vlhkost, přičemž čidlo nezaznamenalo srpnové a zářijové deště. Tyto modelové nereprezentované deště mohou být způsobeny odtržením čidla od půdy, kdy čidlo při netěsném kontaktu hodnoty podhodnocuje (Wild et al, 2019). Zachycení objemové vlhkosti v 60 cm, ke kterým nemáme průběžné údaje o objemové vlhkosti, se dle tří odebraných vzorků povedlo velmi dobře. Celkově se odchylky mezi modelem a měřenými vzorky pohybují v rozmezí jednotek procent. Případné nepřesnosti mohou být způsobeny odběry porušených vzorků z dalších nových míst pěstebního řádku, jelikož nelze opakovat odběr na stejném místě.



Obrázek 38 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2021 vinohradu nezavlařovaného „VN“





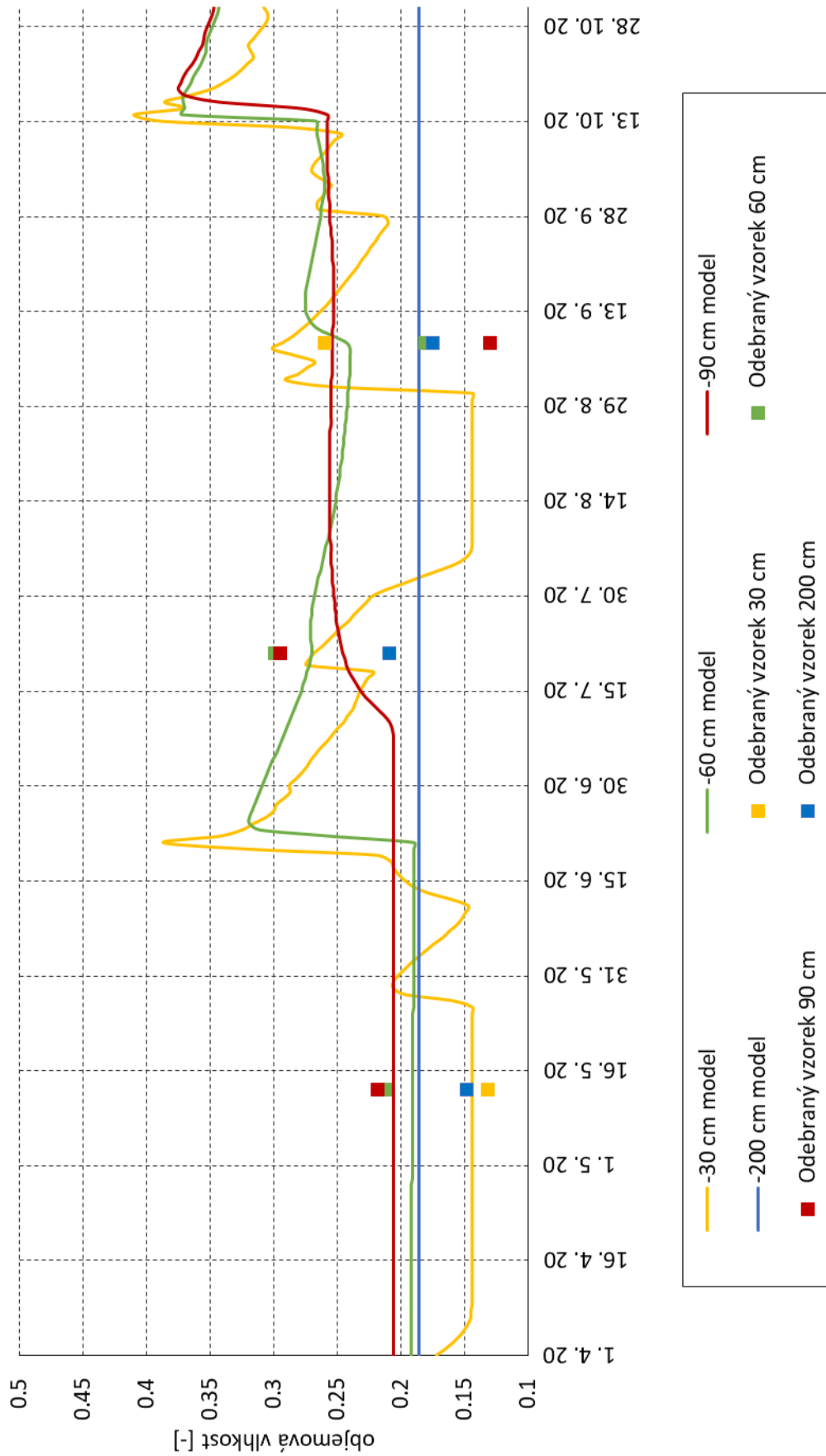
Obrázek 39 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2021 vinohradu zavlažovaného „VZ“



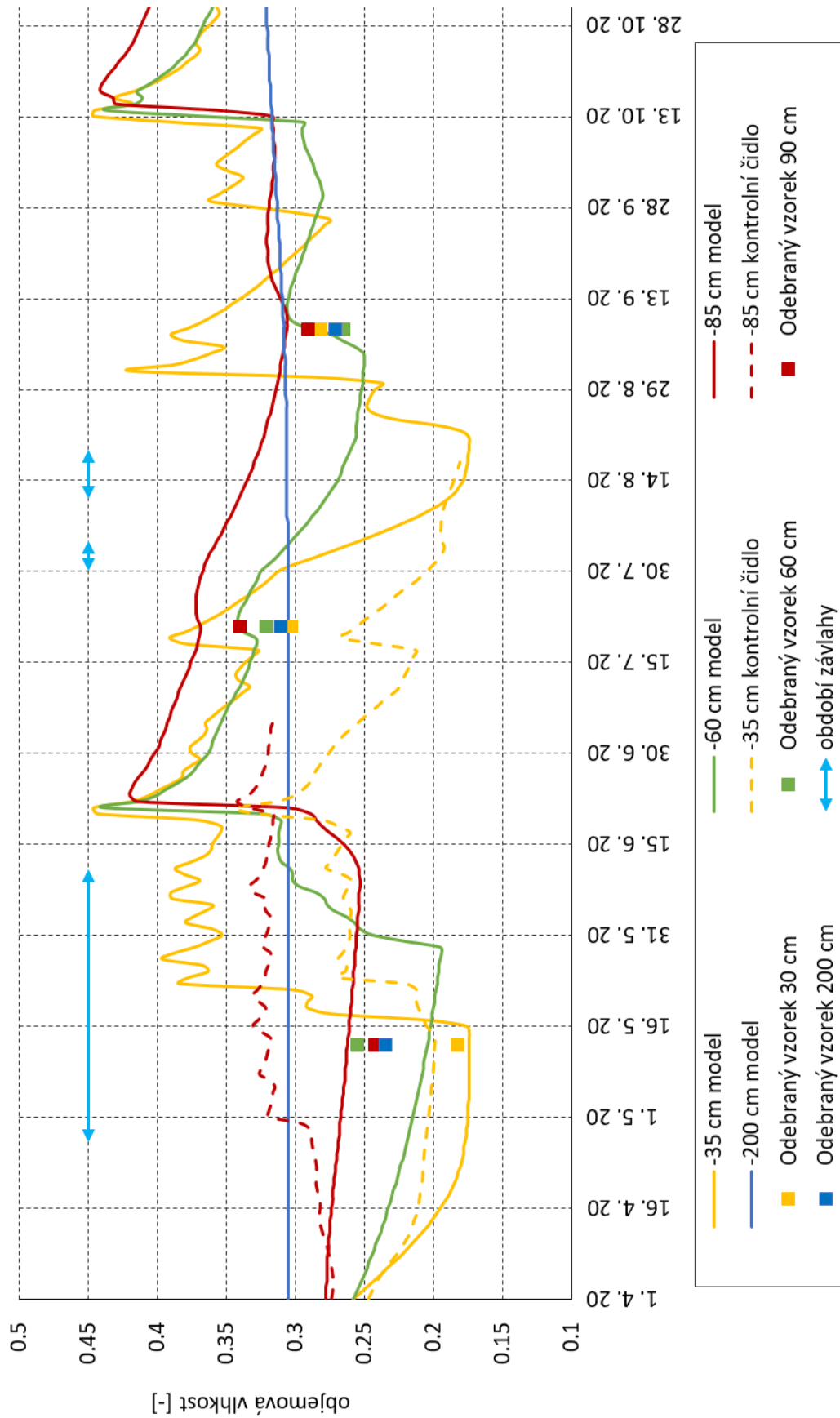
### 8.3.2. Objemová vlhkost v půdním profilu VZ a VN v roce 2020

V roce 2020 nebyla na lokalitě VN a VZ nainstalována čidla TMS-4, z tohoto důvodu nebylo možné model kalibrovat na měřenou objemovou vlhkost v dané lokalitě. V blízkosti zavlažovaného vinohradu se ale nachází čidlo půdní vlhkosti v systému meteostanic AMET.cz/VIRRIB, které bylo použito pro kontrolu správného trendu u zavlažovaného vinohradu. Důležitějším ukazatelem v roce 2020 proto byly provedené odběry ze dnů 13. 5. 2020, 21. 7. 2020, 8. 9. 2020. U nezavlažovaného vinohradu je dobře vystihnout trend ve 30 cm. V 90 cm a 200 cm je model méně dynamický a ke konci sezóny oproti měřeným vzorkům ukazuje vyšší vlhkost. To může být způsobeno heterogenitou půdního profilu a vlhkosti v něm v postupně vzdálenějších místech odběrů porušených vzorků od instalovaného čidla.

U zavlažovaného vinohradu byl trend vcelku dobře vystihnout vzhledem k odebraným vzorkům. Oproti porovnávaném čidlu je vidět nižší vlhkost v 85 cm, což může být způsobeno principiálně jiným čidlem, jinou kalibrací nebo i jinou heterogenitou půdy. Čidlo od AMET.cz se nachází u široké cesty, kde vane vítr. Půda může být sušší a rozpukaná, čímž mohou vzniknout trhliny a voda může snadno proudit do půdy. To by vystihovalo trend vlhčí půdy v 85 cm a sušší ve 35 cm v porovnání s modelem. Vyšší vlhkost ve 35 cm oproti čidlu je také dána přidanou kapkovou závlahou, kterou lokalita u čidla od AMET.cz nemá.



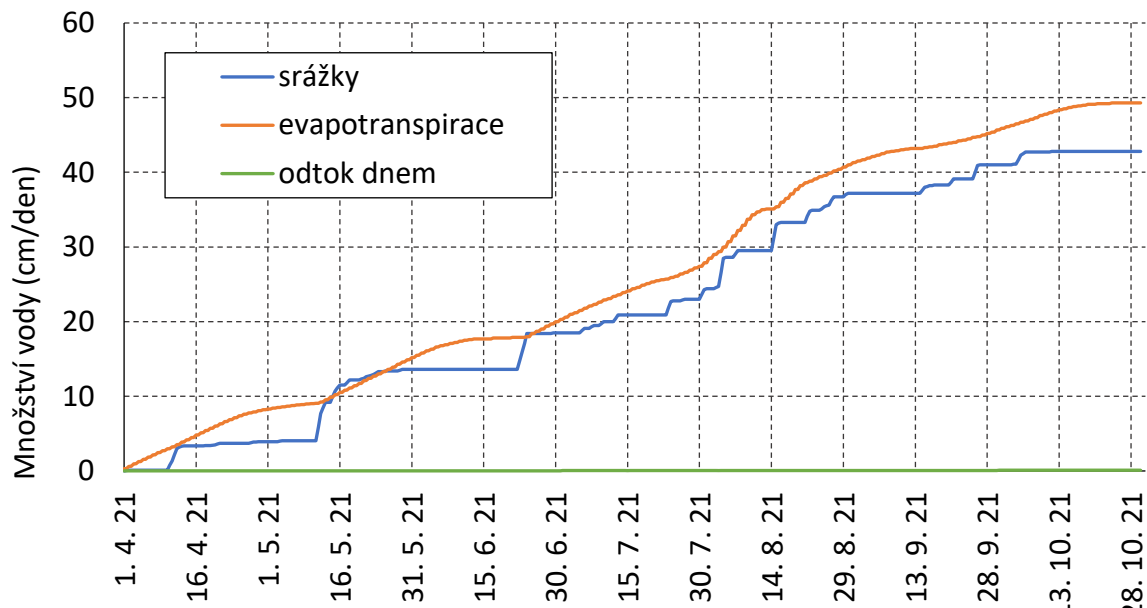
Obrázek 40 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2020 vinohradu nezavlažovaného „VN“



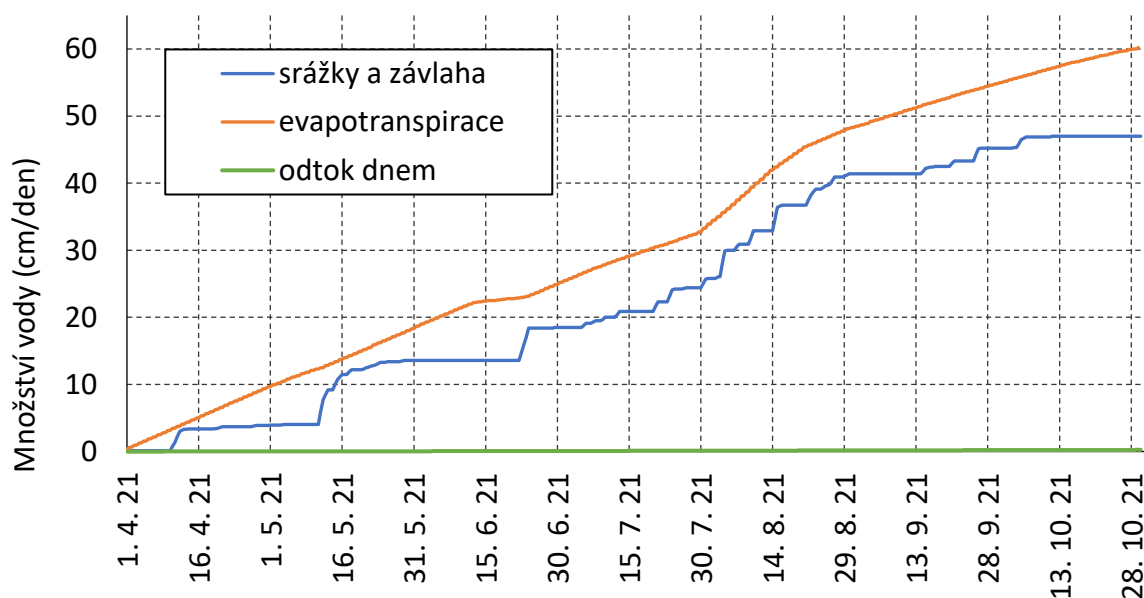
Obrázek 41 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2020 vinohradu zavlažovaného „VZ“

### 8.3.3. Kumulativní množství vody procházející půdním profilem VZ a VN v roce 2021

Hlavní roli při odběru vody z půdního profilu u VN i VZ hraje evapotranspirace. Odtok vody dnem profilu je v porovnání minimální. U celkové evapotranspirace je vyšší hodnota u VZ. Při porovnání celkového množství vody, která byla do půdního profilu přivedena u VZ, není významný rozdíl mezi zavlažovaným a nezavlažovaným vinohradem.



Obrázek 42 Kumulativní množství vody nezavlažovaného vinohradu v roce 2021

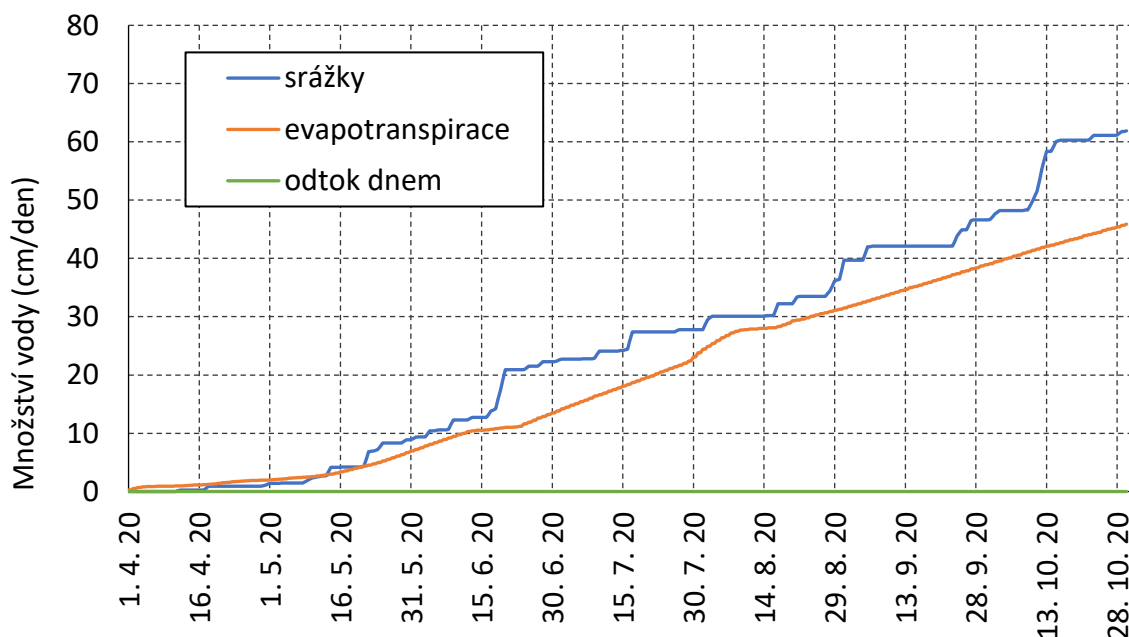


Obrázek 43 Kumulativní množství vody zavlažovaného vinohradu v roce 2021

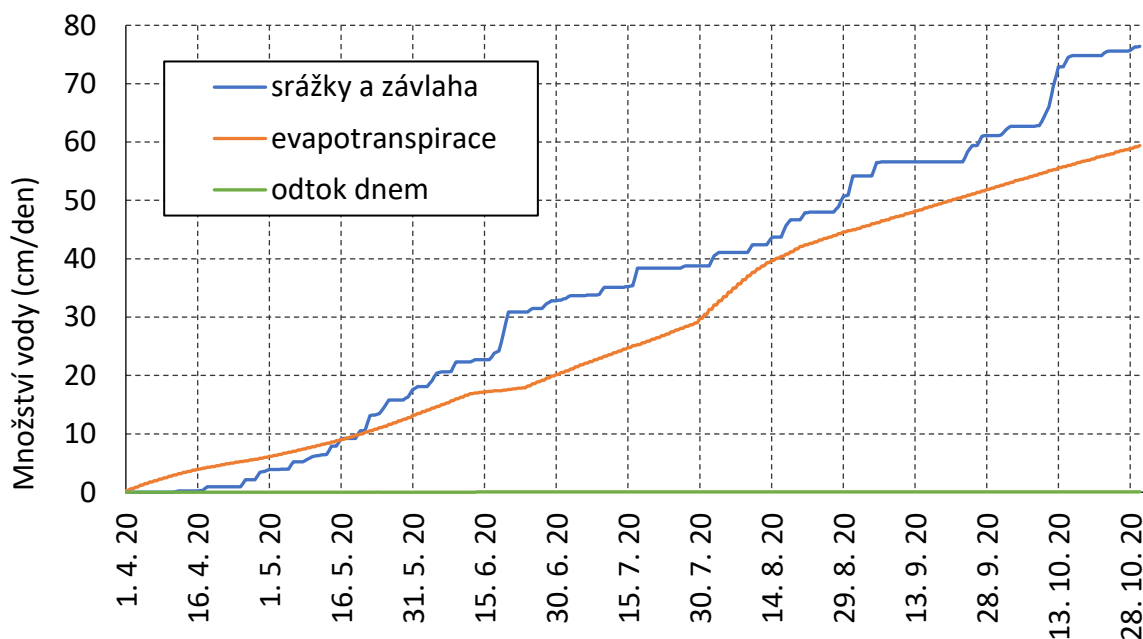


### 8.3.4. Kumulativní množství vody procházející půdním profilem VZ a VN v roce 2020

V roce 2020 je vidět podobný trend jako v roce 2021, kdy odtok vody dnem profilu nehraje významnou roli. V této sezóně je také viditelněji přivedeno do zavlažovaného vinohradu oproti nezavlažovanému více doplňkové vody. Evapotranspirace je u zavlažovaném vinohradu výraznější.



Obrázek 44 Kumulativní množství vody nezavlažovaného vinohradu v roce 2020



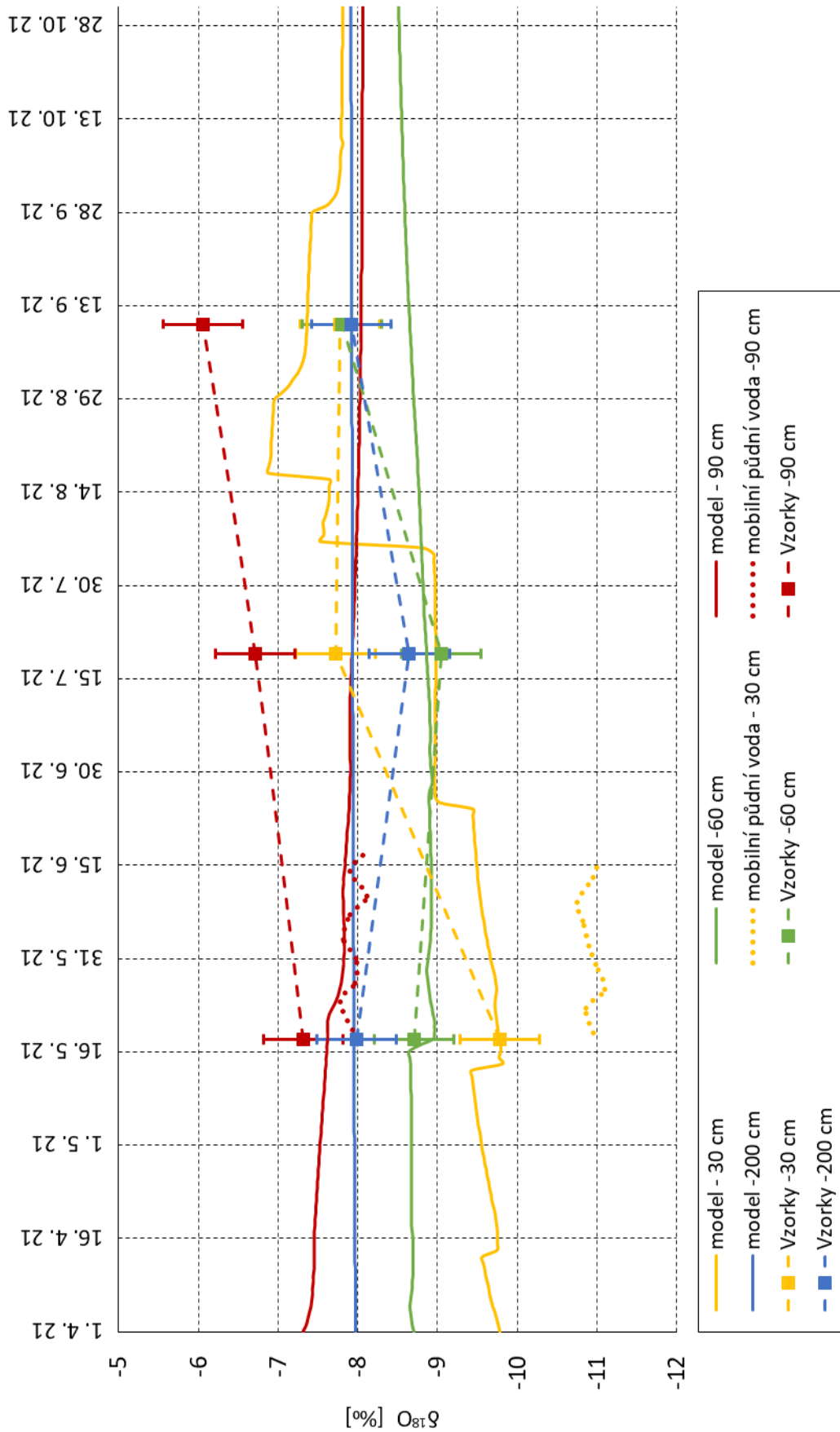
Obrázek 45 Kumulativní množství vody zavlažovaného vinohradu v roce 2020

### 8.3.5. Časový vývoj v obsahu $\delta^{18}\text{O}$ ve vegetačním období 2020 a 2021

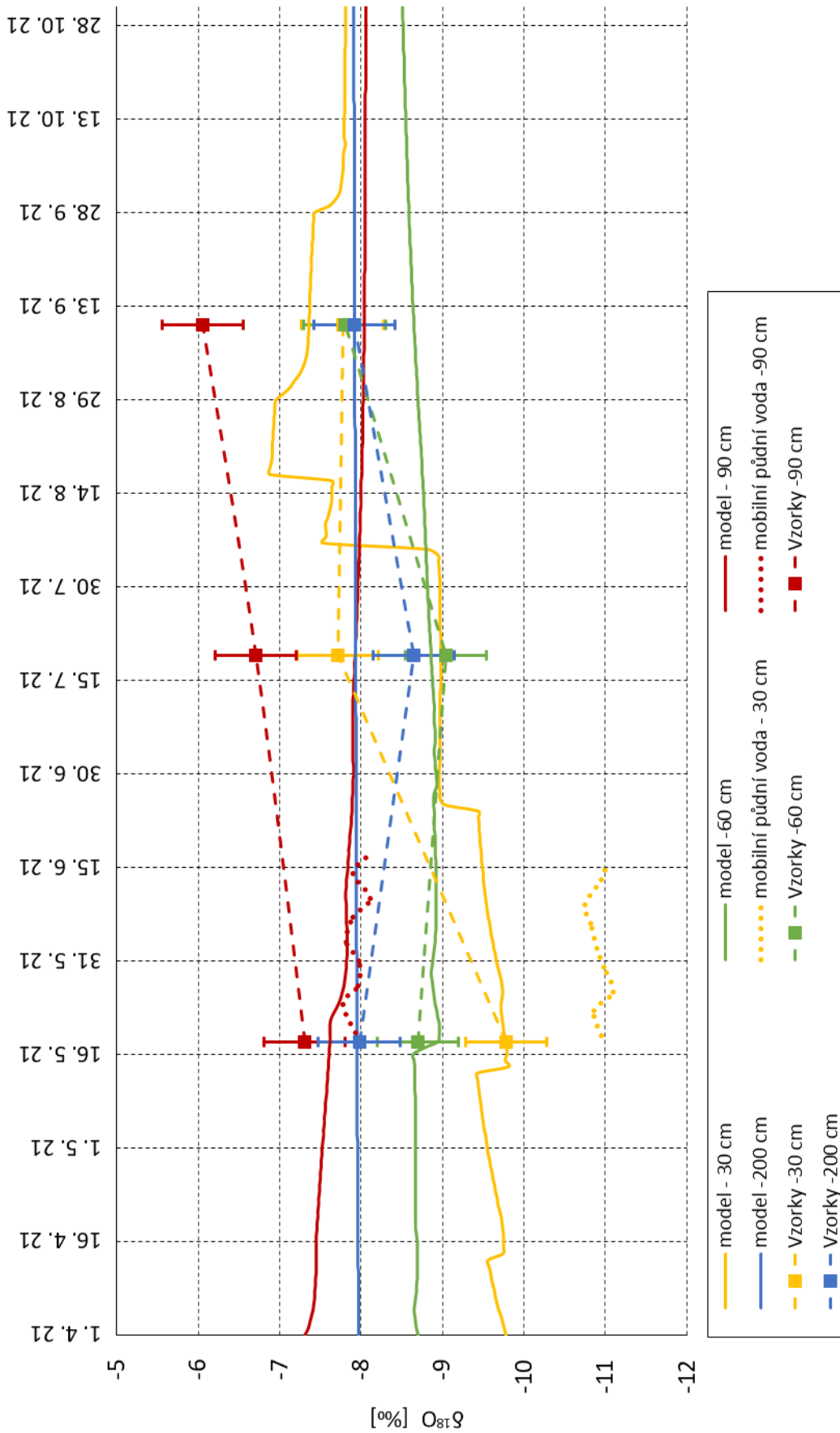
Vývoj obsahu  $\delta^{18}\text{O}$  v sezóně 2021 je zachycen na obrázku č. 46 a 47. Modelovaný průběh je porovnáván se třemi odběry během sezóny a s odběry mobilní půdní vody. Směrodatná odchylka extrahovaných vzorků celkové půdní vody je typicky 0,5 ‰. Maximální odklon simulace u zavlažovaného vinohradu oproti půdním vzorkům byl pozorován v hloubce 90 cm na začátku sezóny s hodnotou  $\delta^{18}\text{O}$  2,19 ‰, respektive 1,69 ‰ se zohledněním směrodatné odchylky měření  $\delta^{18}\text{O}$  u půdních vzorků. Nicméně při porovnání stejného bodu s mobilní půdní vodou je odchylka pouze 0,41 ‰. Takto rozdílné hodnoty můžeme vysvětlit rozdílným způsobem odběru i samotného izotopového měření. U půdních vzorků, na rozdíl od mobilní půdní vody, nebyly odběry provedeny přesně ve stejném místě a k jejich měření  $\delta^{18}\text{O}$  musela být voda ředěna (viz kapitola měření izotopů). Z tohoto důvodu je mobilní půdní voda méně zatížená chybou odběru, ale i chybou měření. V porovnání s mobilní půdní vodou je u zavlažovaného vinohradu trend ve 30 a 90 cm velmi dobře vystihnout. V hloubce 200 cm je simulace oproti realitě méně dynamická.

U nezavlažovaného vinohradu jsou k dispozici hodnoty mobilní půdní vody pouze na začátku sezóny, a proto ke srovnání byly použity zejména půdní vzorky. Zde lze pozorovat dobře vystihnoutý začátek sezóny s největšími rozdíly u konce sezóny, které se projeví zejména v hloubce 90 cm a 60 cm. Největší odklon je pozorován u hloubky 90 cm s hodnotou  $\delta^{18}\text{O}$  1,87 ‰, respektive 1,37 ‰ se zohledněním směrodatné odchylky. V tomto případě by bylo vhodné zahrnout do modelu izotopovou frakcionaci, která by pomohla s vystižením izotopově vyšších (těžších) hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  u konce sezóny a model by tak lépe odpovídal pozorování.

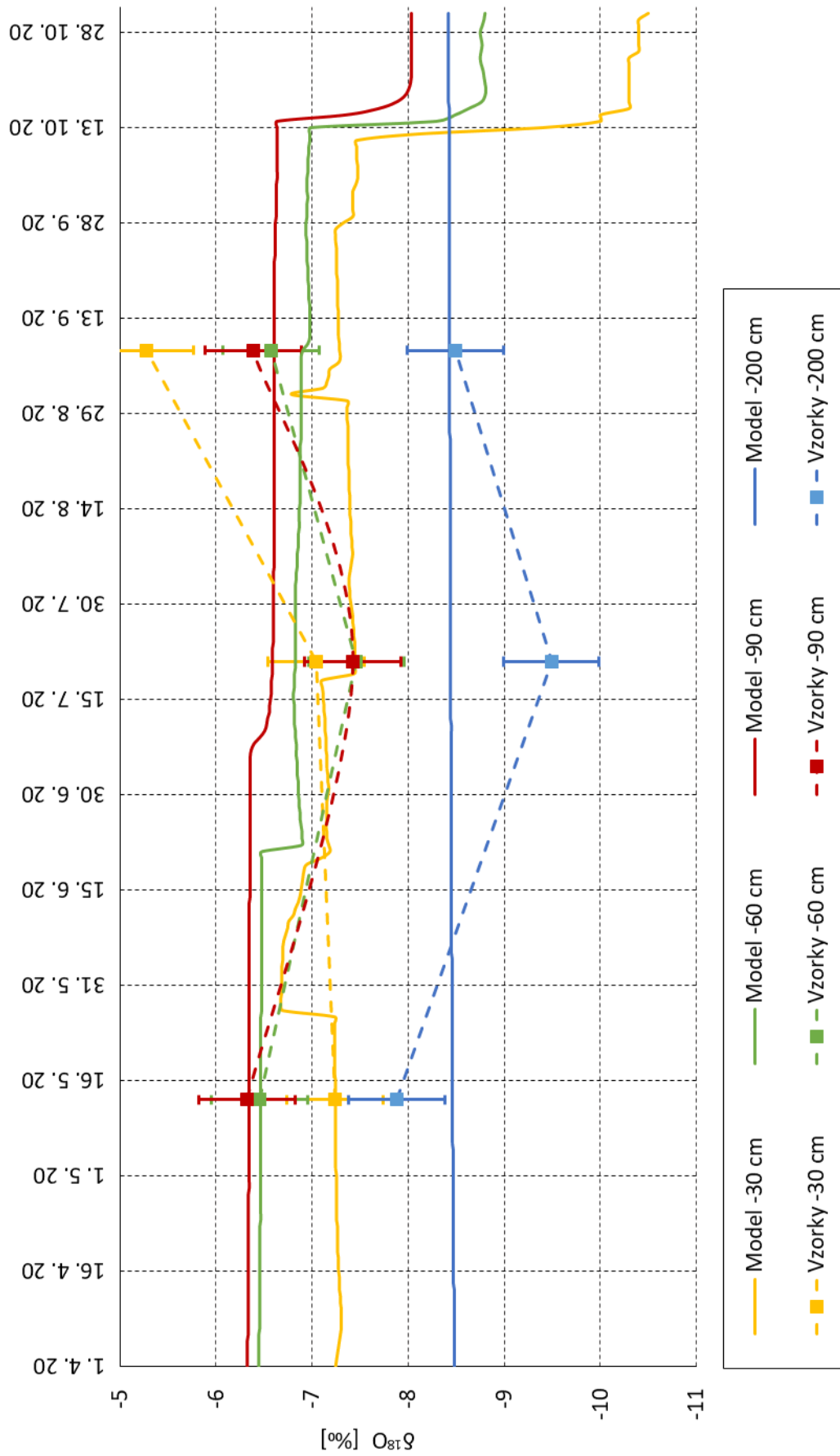
V roce 2020 je možné pozorovat podobný trend odklonu u konce sezóny mezi hodnotami  $\delta^{18}\text{O}$  půdní vody z odebraných vzorků a modelované situace zejména ve vrstvě 30 cm. Pro tento rok 2020 by bylo taktéž vhodné do modelu zahrnout izotopovou frakcionaci.



Obrázek 46 Vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  v roce 2021 nezavlažovaného vinohradu VN

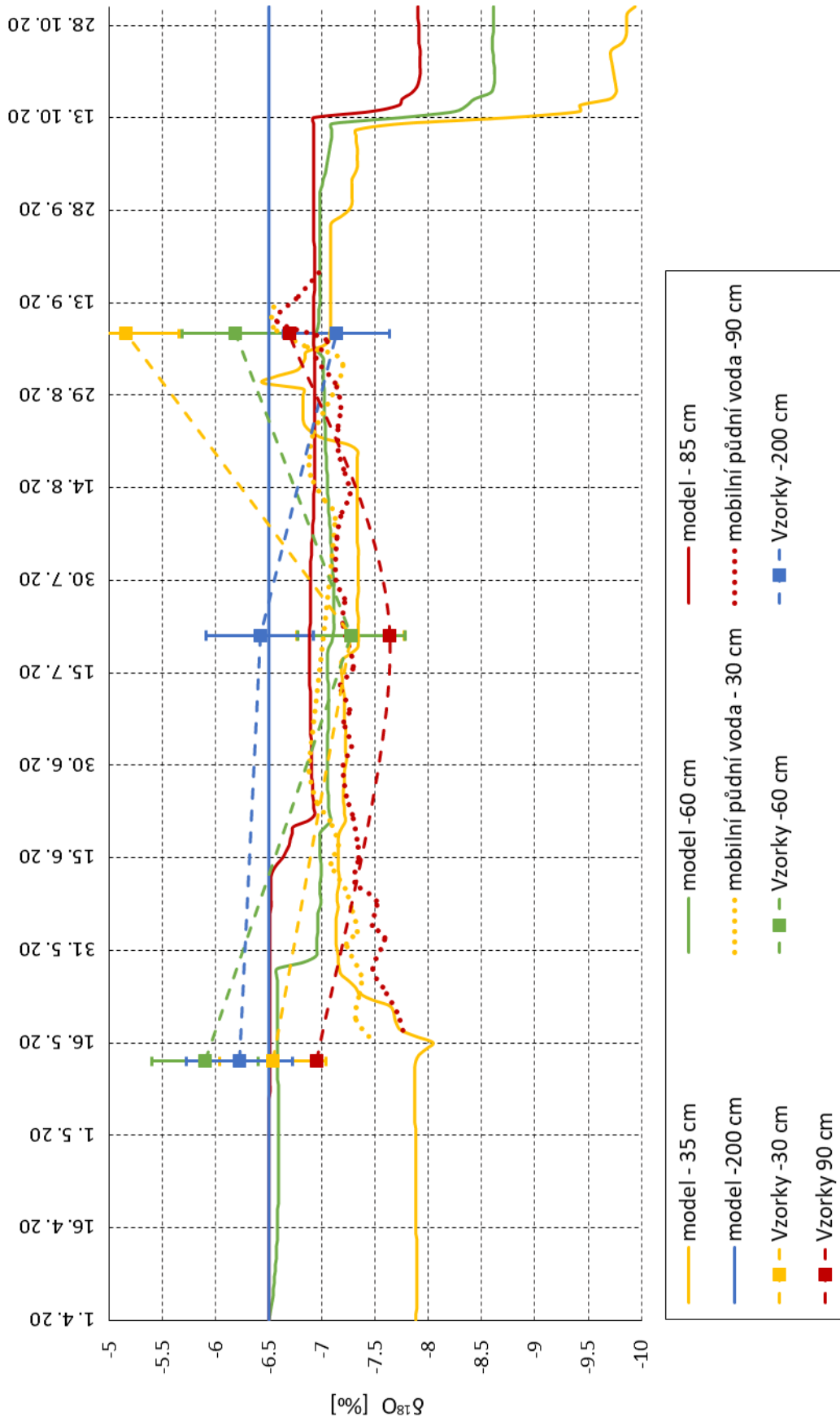


Obrázek 47 Vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  v roce 2021 zavlažovaného vinohradu VZ



Obrázek 48 Vývoj  $\delta^{18}O$  v roce 2020 nezavlažovaného vinohradu VN

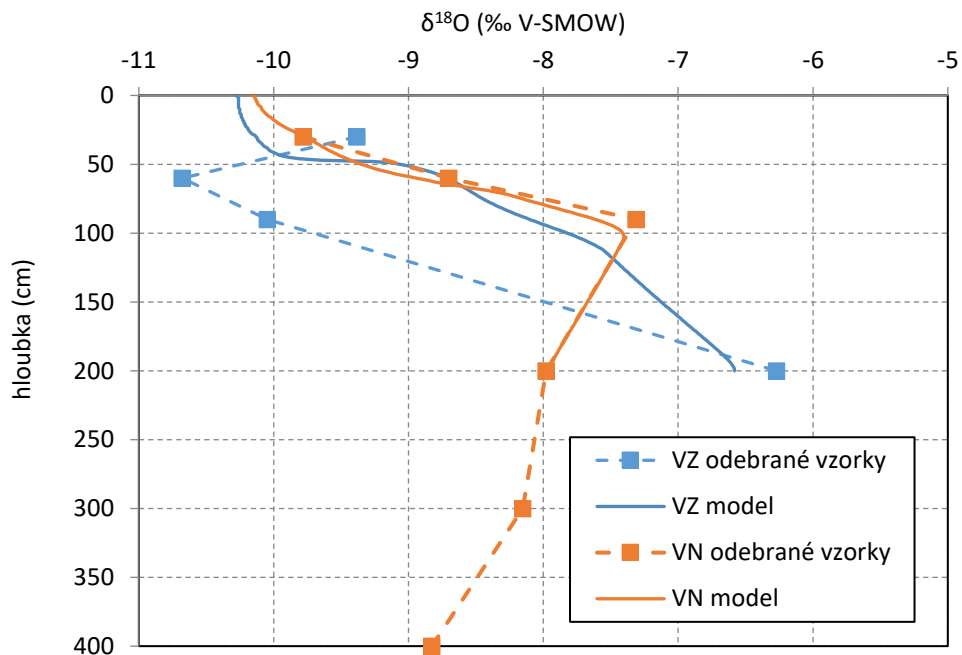




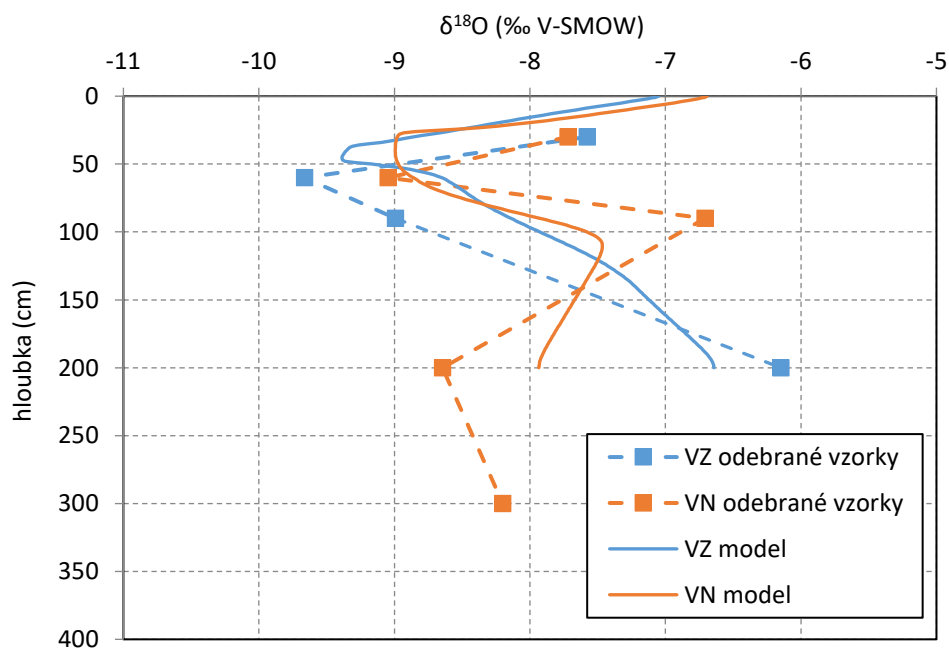
Obrázek 49 Vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  v roce 2020 zavlažovaného vinohradu VZ

### 8.3.6. Časový vývoj v obsahu $\delta^{18}\text{O}$ dle hloubky v roce 2020 a 2021

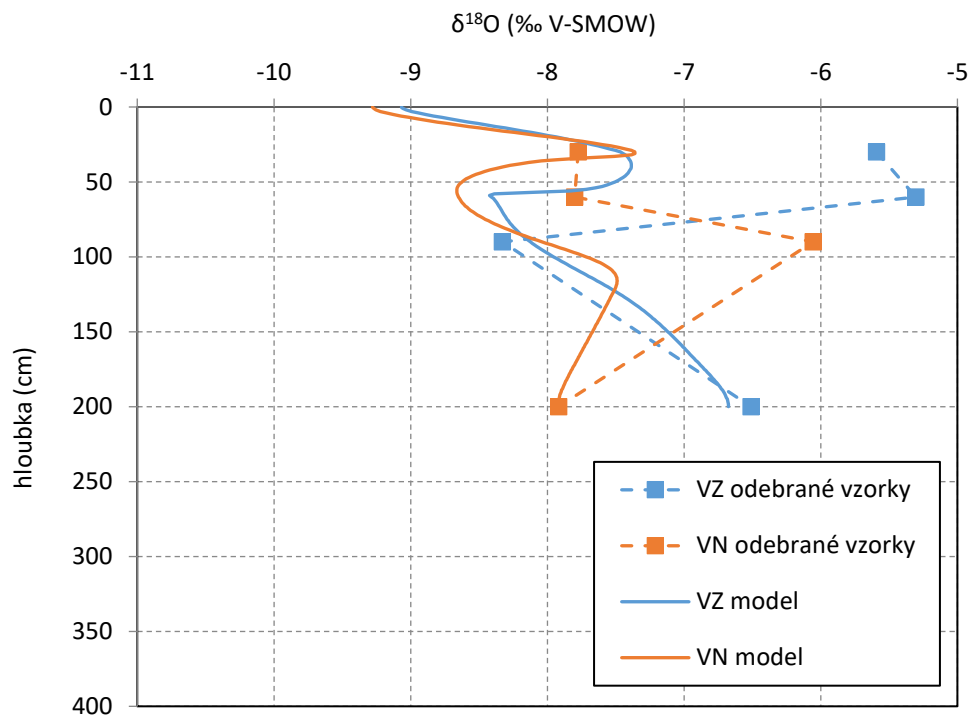
Na obr. 50-55 je zobrazen vertikální průběh půdním profilem  $\delta^{18}\text{O}$  z modelu v porovnání s lineárním propojením měřených hodnot z porušených půdních vzorků. Obr. 50-52 zobrazuje tři odběry během sezóny v roce 2021 (začátek, průběh, konec). Obr. 53-55 zobrazuje tři odběry během sezóny v roce 2020 (začátek, průběh, konec).



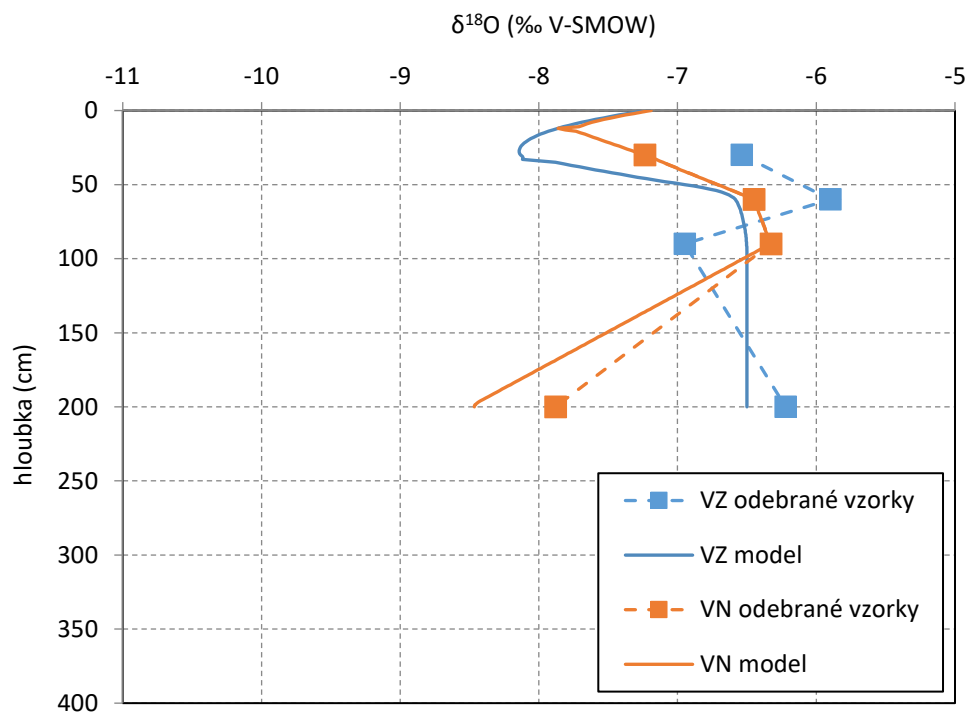
Obrázek 50 Rozdělení izotopů kyslíku k 18. 5. 2021



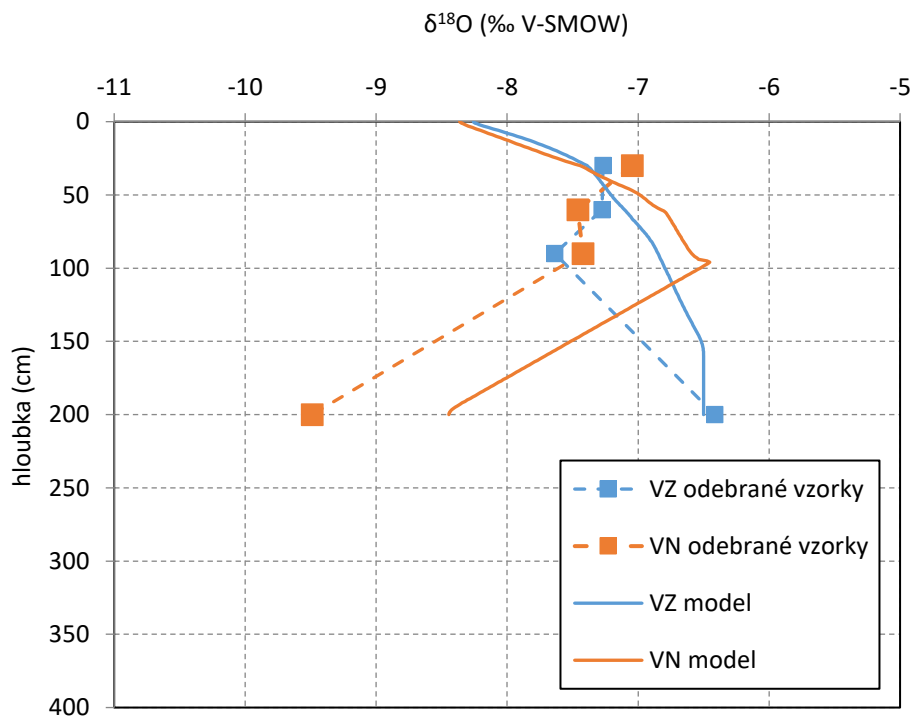
Obrázek 51 Rozdělení izotopu kyslíků k 19. 7. 2021



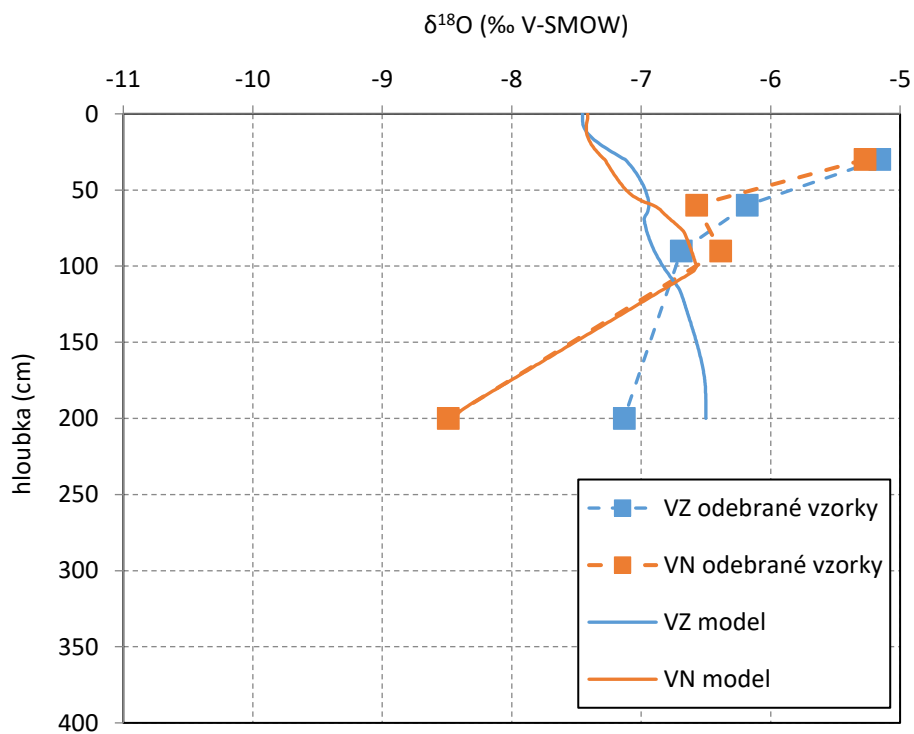
Obrázek 52 Rozdělení izotopů kyslíku k 10. 9. 2021



Obrázek 53 Rozdělení izotopů kyslíku k 13. 5. 2020



Obrázek 54 Rozdělení izotopů kyslíku k 21. 7. 2020



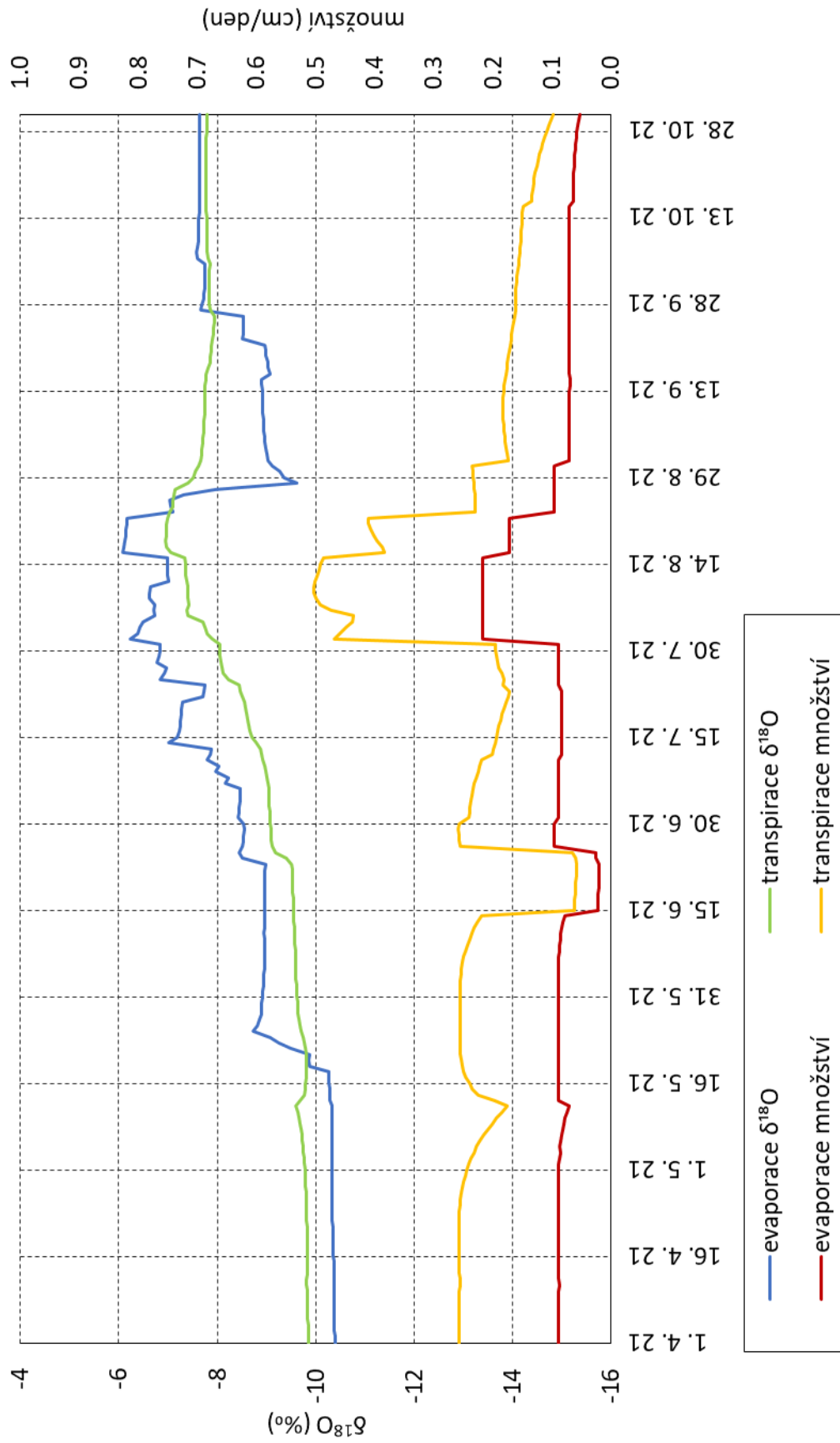
Obrázek 55 Rozdělení izotopů kyslíku k 8. 9. 2020

#### 8.4. Průběh evaporace a transpirace a jejich izotopového složení během vegetačních sezón 2020 a 2021

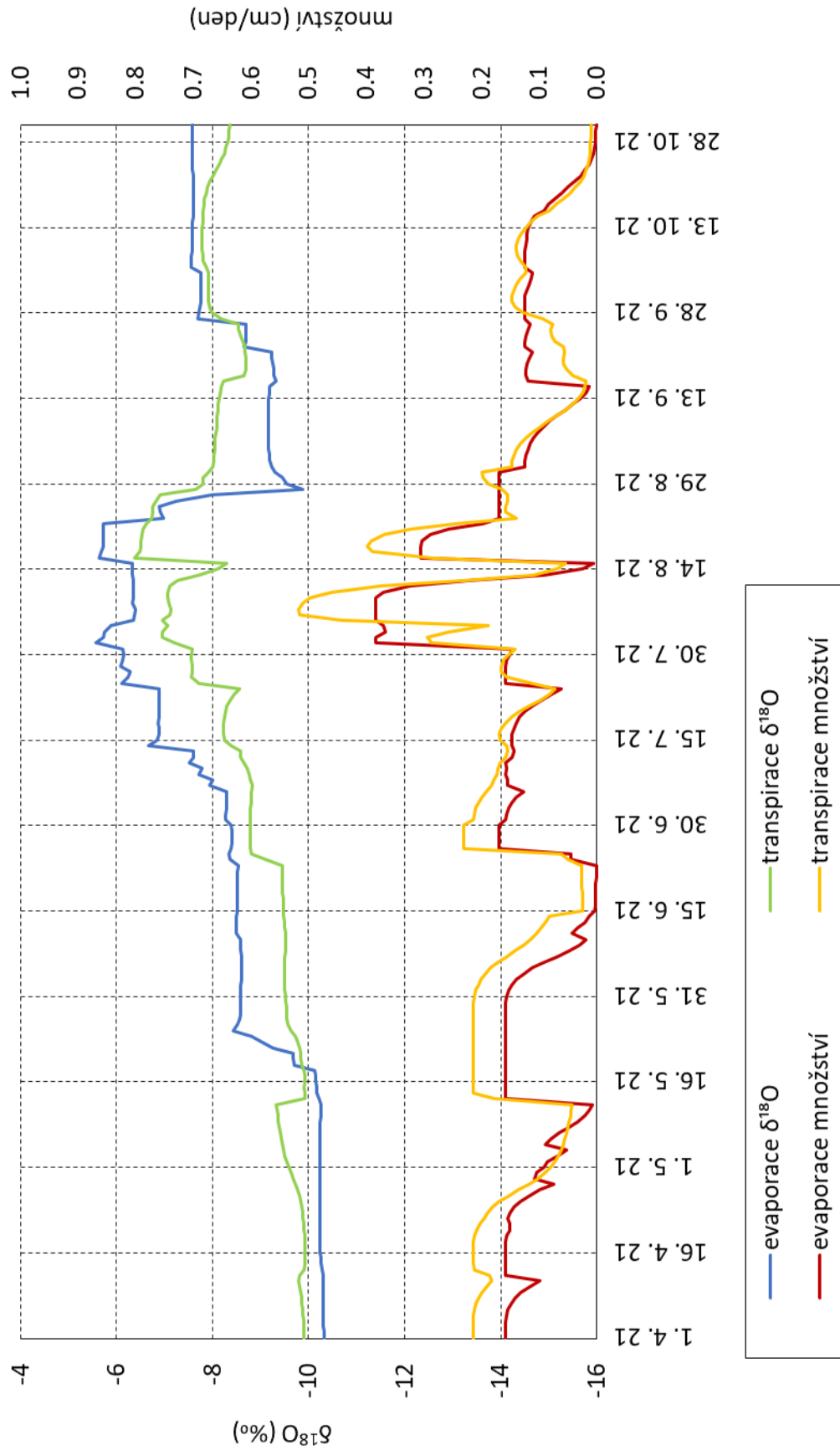
Klíčovým výstupem modelu byl průběh evaporace a transpirace během vegetačních období a jejich izotopové složení. Jako evaporace je zde uvažován povrchový výpar od povrchu do hloubky 10 cm. Od 10 cm níže je uvažována transpirace s rozdělením kořenů uvedeným v kapitole 8.2.7 Evapotranspirace.

Z obr. 56 až obr. 59 je viditelný dynamičtější průběh  $\delta^{18}\text{O}$  půdní vody během evaporace oproti transpiraci, což je způsobeno lepší dostupností srážkové vody u povrchu a kratším vodním koloběhem při návratu vody do atmosféry. Při porovnání dynamiky mezi zavlažovaným a nezavlažovaným vinohradem, nezavlažovaný rychleji reaguje a je schopný intenzivnější změny. Jeho obsah je z letních těžkých dešťů v hodnotách  $\delta^{18}\text{O}$  také mírně těžší, reakce na lehčí deště je obdobně rychlá ve smyslu nižších hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  než pro vinohrad zavlažovaný. Tato dynamika nezavlažovaného vinohradu a jeho izotopového složení je především ovlivněna uvažováním pouze mělkých kořenů (do 40 cm) než je tomu v případě zavlažovaného vinohradu (70 cm), což vyplývá i z obr. 56 a 58, kde je viditelněji během celé sezóny roku 2020 i 2021 větší množství transpirace (cm/den). Při simulaci proudění vody a transportu izotopů v nezavlažovaném půdním profilu nebyly uvažovány velmi hluboké kořeny, které v případě nedostatečných srážek a vyšších teplot vzduchu vedoucí k nižší půdní vlhkosti čerpají zásoby z hlubší půdní a podzemní vody, jejíž hodnota izotopové koncentrace se pohybuje směrem k  $\delta^{18}\text{O} = -9,2 \text{ ‰}$  (hodnota pro místní podzemní vodu). Tento odběr hlubokými kořeny ve vegetační sezóně není zanedbatelný, zvláště v suchém období v rozmezí snížené dostupnosti a bodem vadnutí, a mění celkový izotopový výsledek vydaný transpirací směrem k izotopově lehčí směsi vody (v případě, že mělké kořeny odebírají vodu těžší, než je hlubší půdní a podzemní voda, jinak je tomu právě naopak). Pro simulaci proudění vody a transportu izotopů v oblasti velmi hlubokých kořenů nejsou dostupné fyzikální ani hydraulické charakteristiky. Neznáme ani jejich dosah a funkčnost, proto nebylo možné je do této práce zahrnout. Zjištění potřebných parametrů by vyžadovalo rozsáhlý a finančně náročný výzkum.

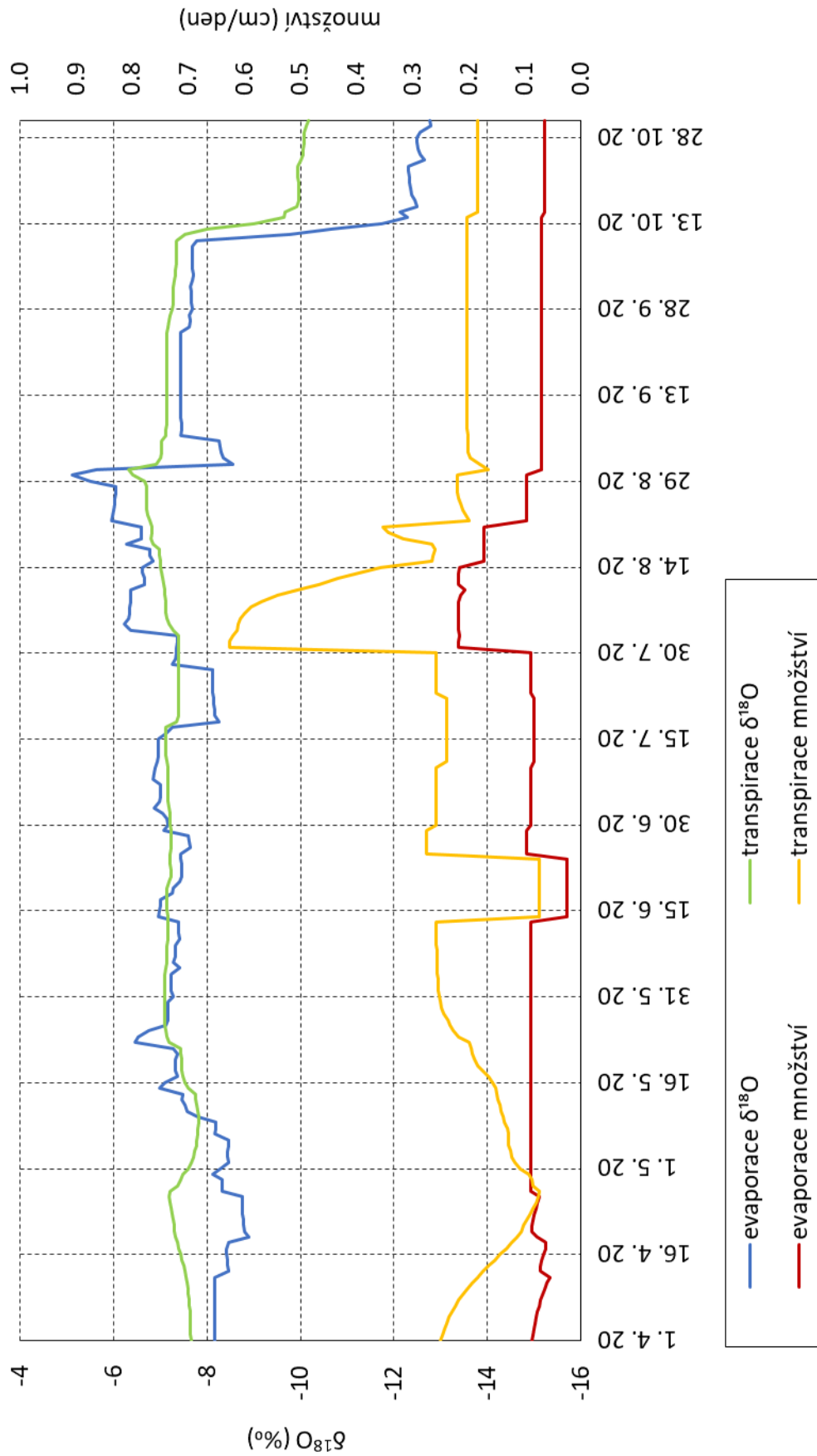




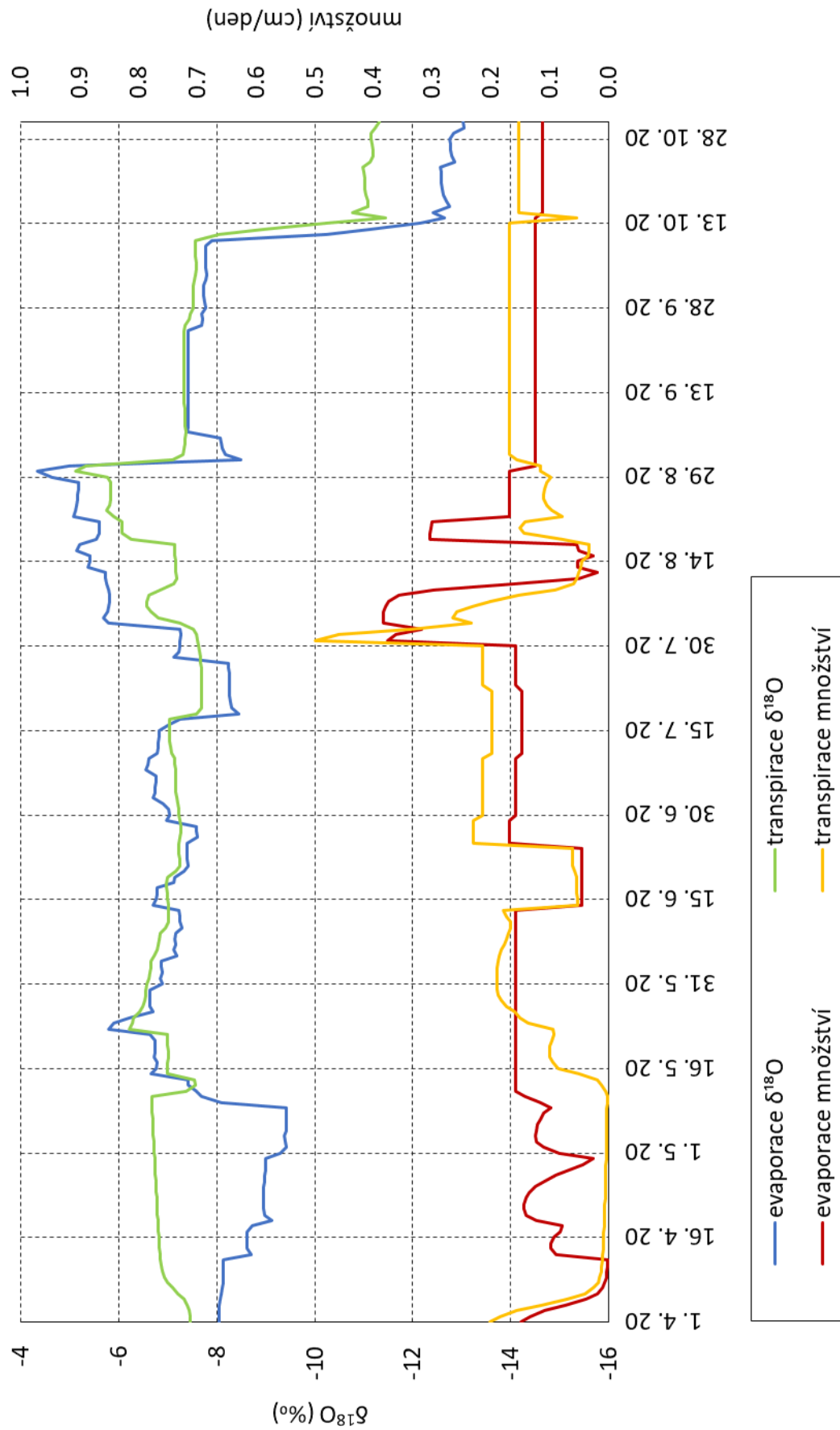
Obrázek 56 Rozdělení evaporace a transpirace VZ 2021



Obrázek 57 Rozdělení evaporace a transpirace VN 2021



Obrázek 58 Rozdělení evaporace a transpirace VZ 2020



Obrázek 59 Rozdělení evaporace a transpirace VN 2020



## 9. Závěr

Na základě měření hydrofyzikálních charakteristik půd pro studované půdní profily, dle odebraných vzorků vody (ze srážek, řek, závlahy) a půdních vzorků (zavlažovaného vinohradu „VZ“ a nezavlažovaného vinohradu „VN“, tj. mobilní nebo celkové půdní vody) byl vytvořen numerický simulační model S1D pro dvě, po sobě jdoucí, vegetační sezóny 2020 a 2021. Modelace proudění vody a transportu rozpuštěných látek v půdním profilu proběhla v rozmezí 0-200 cm s rozdělením půdního profilu do čtyř vrstev. Model uvažuje s evaporací srážkové vody a transpirací révy vinné během vegetačního období. Pro výpočtovou stabilitu modelu byla v této studii evaporace z povrchu simulována pomocí transpirací těsně pod povrchem (do hloubky 10 cm). Transpirace révy vinné v kořenové zóně je v modelu taktéž uvažována. Vzhledem k většímu množství poskytnutých a měřených dat pro vegetační období v roce 2021 byla tato práce podrobněji zaměřena na toto vegetační období.

Během vegetačního období dochází k významné změně v množství vody v půdním profilu a pozorovatelné změně izotopového obsahu  $\delta^{18}\text{O}$ , zejména v horních vrstvách půdního profilu. Zavlažovaný vinohrad má v obou sezónách, rok 2020 a 2021, oproti nezavlažovanému vinohradu vyšší objemovou vlhkost. S vyšší vlhkostí se pojí exponenciálně vyšší hydraulická vodivost, a lze tak u zavlažovaného vinohradu pozorovat dynamičtější průběh proudění vody, a tudíž i transport izotopů do větších hloubek. U vinohradu nezavlažovaného je vlhkost často blízko bodu snížené dostupnosti, nebo dokonce v rozmezí snížené dostupnosti a bodu vadnutí. V takové situaci půdní voda prakticky v půdním profilu stagnuje, resp. převládají procesy difuze nad prouděním.

Trend vzestupu i poklesu vývoje  $\delta^{18}\text{O}$  v sezóně 2021 je simulací dobře vystihnout u zavlažovaného i nezavlažovaného vinohradu v hloubce 30 cm. V této svrchní vrstvě je v důsledku srážek a u VZ závlahy změna izotopového obsahu velmi dynamická. Se zvyšující hloubkou simulace odpovídá vývoj  $\delta^{18}\text{O}$  měřeným vzorkům převážně na začátku sezóny. S koncem sezóny se měřené a modelované hodnoty rozcházejí. K tomuto odklonu mezi měřenými hodnotami a modelem dochází i v roce 2020, zejména pro vrstvu 30 cm a 60 cm. Z tohoto důvodu by bylo vhodné v další fázi do modelu začlenit izotopovou frakcionaci, který by pomohla s přiblížením modelované simulace provedenému pozorování, tj. nejspíše i reálné situaci. U dna simulovaného modelu, tj. v hloubce 200 cm, je simulace vývoje obsahu  $\delta^{18}\text{O}$  v roce 2021 i 2020 oproti měřeným hodnotám méně dynamická. Pro rychlejší reakce by bylo třeba změnit hydraulické vlastnosti dané vrstvy, což zpětně ovlivní průběh části proudění. Na základě získaných izotopových výstupů byly mírně upravovány vstupní hodnoty evapotranspirace a hydraulických charakteristik. S následnou úpravou k vylepšení průběhu obsahu izotopů došlo i ke změně modelovaného průběhu objemové vlhkosti. Výsledný kalibrovaný model je optimem mezi částí proudění vody (výstupy formou vlhkosti) a transportem látek (výstupy formou izotopového obsahu  $\delta^{18}\text{O}$ ).





Výstupem modelu bylo také rozdělení evaporace a transpirace a jejich izotopové složení. Z těchto dat vyplývá výraznější dynamika průběhu  $\delta^{18}\text{O}$  u evaporace a dynamičtější průběh vývoje obsahu  $\delta^{18}\text{O}$  u nezavlažovaného vinohradu. Větší dynamika u nezavlažovaného vinohradu je způsobena mělčími kořeny, které rychleji reagují a mají lepší přístup k infiltrované dešťové vodě (v modelu nebyly uvažovány velmi hluboké kořeny, které se u nezavlažovaného vinohradu vyskytují a ovlivnily by výsledný průběh vývoje obsahu  $\delta^{18}\text{O}$ ).

U srážky a závlahy dochází před její infiltrací k frakcionaci stabilních izotopů ve vodní molekule. V současné verzi modelový nástroj S1D nenabízí možnost zahnutí této izotopové frakcionace do nabízené simulace proudění vody a transportu látek. Výsledky této práce naznačují vhodnost s tímto jevem při simulaci obdobných procesů uvažovat.



## 10. Seznam použité literatury

- AMET.CZ, 2022. Graf dat sondy Sedlec u Mikulova. In: *AMET.cz* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://a.la-a.la/chart/cl.php?probe=11359170>
- ARYA, A., T. HEWETT, R. LARSON a L. LAKE, 1988. Dispersion and Reservoir Heterogeneity. In: *Scribd* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/408719475/Arya-et-al-1988>
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA, 2018. *Geologická mapa 1:50 000* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: [https://mapy.geology.cz/arcgis/rest/services/Geologie/geologicka\\_mapa50/MapServer](https://mapy.geology.cz/arcgis/rest/services/Geologie/geologicka_mapa50/MapServer)
- FEDES, R. A., P. J. KOWALIK a H. ZARADNY, 1978. Simulation of field water use and crop yield. In: *Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://edepot.wur.nl/172222>
- FLOWERS, P., W. ROBINSON, R. LANGLEY a K. THEOPOLD, 2015. 2-3-atomic-structure-and-symbolism. *Chemistry* [online]. Houston, Texas [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/chemistry/pages/2-3-atomic-structure-and-symbolism>
- GABEL, B., 2019. Wine origin authentication linked to terroir – wine fingerprint. *BIO Web Conferences* [online]. 42(15) [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.1051/bioconf/20191502033
- GELHAR, L., C. WELTY a K. REHFELDT, 1992. A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifer. *WATER RESOURCES RESEARCH* [online]. 28(7), 1955-1974 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.1029/92WR00607
- Geologie, 2022. In: *Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky: Správa CHKO Pálava* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://palava.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/geologie/>
- HARUNA, S., S. ANDERSON, N. NKONGOLO a S. ZAIBON, 2018. Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. *Soil Science Society of China* [online]. 28, 430-442 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P. Dostupné z: doi:10.1016/S1002-0160(17)60387-4
- IAEA, 2009. Laser Spectroscopic Analysis of Liquid Water Samples for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes: Performance Testing and Procedures for Installing and Operating the LGR DT-100 Liquid Water Stable Isotope Analyzer. *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY* [online]. [cit. 2022-05-13]. ISSN 1018–5518. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-35\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-35_web.pdf)
- Lednické rybníky, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lednick%C3%A9\\_rybn%C3%ADky](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lednick%C3%A9_rybn%C3%ADky)
- Mapy.cz, 2022. In: *Seznam.cz* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zakladni?vlastni-body&x=16.7283737&y=48.7875714&z=14&ut=VZ&ut=VN&uc=9mfCGxRcEVbMohFT&ud=48%C2%B047%2716.122%22N%2C%2016%C2%B044%2716.578%22E&ud=48%C2%B047%2727.147%22N%2C%2016%C2%B042%2722.802%22E>



MCCAIVE, I. N., R. J. BRYANT, H. F. COOK a C. A. COUGHANOWR, 1986. *Journal of Sedimentary Petrology: Evaluation of a Laser-Diffraction-Size Analyzer for Use with Natural Sediments* [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://archives.datapages.com/data/sepm/journals/v55-58/data/056/056004/0561.htm>

*Obec Sedlec u Mikulova: Oficiální stránky obce Sedlec u Mikulova* [online], 2022. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.sedlecumikulova.cz/>

Patterns of Nuclear Stability, 2021. In: *Chemistry LibreTExs* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://chem.libretexts.org/@go/page/21806>

PAVLOUŠEK, P., 2003. Začínáme s pěstováním révy vinné II.: Vinohradnictví. In: *Svět vína* [online]. ACTIVEMEDIA [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <http://www.svetvina.cz/clanek.php?id=231>

Pěstování révy vinné v České republice v roce 2021: Výběr statistik o vinicích, c2009-2022. In: *Ministerstvo zemědělství* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/web/ukzuz/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/ukzuz-2012-2014/x2022\\_pestovani-revy-vinne-v-CR-2021.html](https://eagri.cz/public/web/ukzuz/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/ukzuz-2012-2014/x2022_pestovani-revy-vinne-v-CR-2021.html)

Radioactive isotope, 2020. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/radioactive-isotope>

SHARP, Z., 2017. *Principles of Stable Isotope Geochemistry* [online]. 2nd Edition. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.25844/h9q1-0p82>

SINGLETON, M., E. SONNENTHAL, M. CONRAD, D. DEPAOLO a G. GEE, 2004. Multiphase Reactive Transport Modeling of Seasonal Infiltration Events and Stable Isotope Fractionation in Unsaturated Zone Pore Water and Vapor at the Hanford Site. *Vadose Zone Journal* [online]. (3), 775-785 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.2113/3.3.775.

*Situační a výhledová zpráva: Réva vinná a víno* [online], 2021. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky [cit. 2022-05-19]. ISSN 1211-7692. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/web/file/694201/SVZ\\_2021\\_web.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/694201/SVZ_2021_web.pdf)

ŠANDA, M., 2021. *Vliv hydrologické a klimatické situace na izotopové složení vína (v regionu jižní Moravy) - 2. díl* [online]. Vinohradnictví. [cit. 2022-05-09].

VAN GENUCHTEN, M., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. In: *Soil Science Society of America Journal* [online]. 44. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Vinařské regiony v ČR, 2022. In: *Národní vinařské centrum, o.p.s.* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.vinarskecentrum.cz/o-vine/vinarske-regiony-v-cr>

VOGEL, T., M. DOHNAL a J. DUŠEK, 2004. *AquaTerra. Bench scale modeling approaches: Contract No.: 505428 (GOCE)*. Sub-Priority 1.1.6.3: Global Change and Ecosystems. EUROPEAN COMMISSION's Specific Programme: "Integrating and Strengthening the European Research Area".

VÚMOP: Půda v mapách, 2022. In: *Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.* [online]. [cit. 2022-05-22].

## 11. Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ) použité pro modelování u nezavlažovaného (VN) a zavlažovaného (VZ) vinohradu	37
Tabulka 2 Fitované parametry retenčních křivek	44
Tabulka 3 Parametry retenční křivky pro model „VZ“ 2021 a 2020	44
Tabulka 4 Parametry retenční křivky pro model „VN“ 2021 a 2020	44
Tabulka 5 Rozdělení množství přidané závlahy v roce 2020	47
Tabulka 6 Rozdělení množství přidané závlahy v roce 2020	48
Tabulka 7 Rozložení kořenového systému u nezavlažovaného vinohradu „VN“	50
Tabulka 8 Rozložení kořenového systému u zavlažovaného vinohradu „VZ“	50
Tabulka 9 Parametry pro transportní model	53
Tabulka 10 Počáteční podmínky tlakové výšky h	53
Tabulka 11 Počáteční podmínky izotopové koncentrace	54

## 12. Seznam obrázků

Obrázek 1 Zájmová lokalita (Mapy.cz, 2022)	10
Obrázek 2 Vinařské oblasti a podoblasti v České republice (Situační a výhledová zpráva, 2021)	11
Obrázek 3 Pohled na vinice v Sedleci u Mikulova, březen 2022	13
Obrázek 4 Číslo 1 zavlažovaný vinohrad, číslo 2 nezavlažovaný vinohrad (Mapy.cz, 2022)	13
Obrázek 5 Půdní typy (VÚMOP, 2022)	14
Obrázek 6 Půdní profil nezavlažovaného vinohradu „VN“ (vlevo), zavlažovaného vinohradu „VZ“ (vpravo)	16
Obrázek 7 Rozbor atomu uhlíku (International Year of the Periodic Table, 2019)	17
Obrázek 8 Laserový spektroskop LGR LWIA2	21
Obrázek 9 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ řek v regionu jižní Moravy	22
Obrázek 10 Porušené vzorky	24
Obrázek 11 Neporušené vzorky	24
Obrázek 12 Porušené vzorky k analýze $\delta^{18}\text{O}$	25
Obrázek 13 Odběr neporušených půdních vzorků	26
Obrázek 14 Rozpon mezi pěstebními řádky a jednotlivými keři	26
Obrázek 15 vlevo a vpravo odběr vzorků dne 2. 3. 2022	27
Obrázek 16 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ z odebraných vzorků mobilní půdní vody v sezóně 2020 pro nezavlažovaný (VN) a zavlažovaný (VZ) vinohrad	28
Obrázek 17 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ z odebraných vzorků mobilní půdní vody v sezóně 2021 pro nezavlažovaný (VN) a zavlažovaný (VZ) vinohrad	29
Obrázek 18 Odběrné zařízení mobilní půdní vody (vpravo) a pohled na instalaci odběrného zařízení půdní vody (vlevo)	29
Obrázek 19 Sběr srážkové vody k analýze izotopů	30
Obrázek 20 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkách a závlaze na vinohradu ZD Sedlec v roce 2020. Srážkové úhrny (AMET.cz, 2022).	31
Obrázek 21 Průběh $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkách a závlaze na vinohradu ZD Sedlec v roce 2021. Srážkové úhrny (AMET.cz, 2022).	32
Obrázek 22 Čára zrnitosti zavlažovaného (VZ) a nezavlažovaného (VN) vinohradu ze dne 8. 9. 2020	33
Obrázek 23 Přetlakový aparát	34
Obrázek 24 Výsledky měření drenážní větve retenční čáry pro nezavlažovaný vinohrad	35
Obrázek 25 Výsledky měření drenážní větve retenční čáry pro zavlažovaný vinohrad	35



Obrázek 26 Přístroj KSAT použitý pro měření hydraulické nasycené vodivosti	36
Obrázek 27 Objemová vlhkost půdy v sezoně 2020 dle hloubky u nezavlažovaného a zavlažovaného vinohradu	37
Obrázek 28 Objemová vlhkost půdy v sezoně 2021 dle hloubky u nezavlažovaného a zavlažovaného vinohradu	38
Obrázek 29 Funkce vláhového stresu dle Feddese (1978)	41
Obrázek 30 Retenční křivka proložena dle van Genuchtena (1980)	45
Obrázek 31 Meteostanice Sedlec u Mikulova (vlevo) a Hlohovec (vpravo), (AMET,2022)	46
Obrázek 32 Srážkový úhrn 2020 (AMET, 2022)	46
Obrázek 33 Meteo stanice AMET.cz	48
Obrázek 34 TMS-4 čidla u zavlažovaného vinohradu	48
Obrázek 35 Schéma čidel půdní vlhkosti/ vlhkostního potenciálu	49
Obrázek 36 Průměrné denní hodnoty evapotranspirace	51
Obrázek 37 Schéma půdních profilů	52
Obrázek 38 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2021 vinohradu nezavlažovaného „VN“	55
Obrázek 39 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2021 vinohradu zavlažovaného „VZ“	56
Obrázek 40 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2020 vinohradu nezavlažovaného „VN“	58
Obrázek 41 Vývoj objemové vlhkosti v půdním profilu v roce 2020 vinohradu zavlažovaného „VZ“	59
Obrázek 42 Kumulativní množství vody nezavlažovaného vinohradu v roce 2021	60
Obrázek 43 Kumulativní množství vody zavlažovaného vinohradu v roce 2021	60
Obrázek 44 Kumulativní množství vody nezavlažovaného vinohradu v roce 2020	61
Obrázek 45 Kumulativní množství vody zavlažovaného vinohradu v roce 2020	61
Obrázek 46 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ v roce 2021 nezavlažovaného vinohradu VN	63
Obrázek 47 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ v roce 2021 zavlažovaného vinohradu VZ	64
Obrázek 48 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ v roce 2020 nezavlažovaného vinohradu VN	65
Obrázek 49 Vývoj $\delta^{18}\text{O}$ v roce 2020 zavlažovaného vinohradu VZ	66
Obrázek 50 Rozdělení izotopů kyslíku k 18. 5. 2021	67
Obrázek 51 Rozdělení izotopů kyslíků k 19. 7. 2021	67
Obrázek 52 Rozdělení izotopů kyslíku k 10. 9. 2021	68
Obrázek 53 Rozdělení izotopů kyslíku k 13. 5. 2020	68
Obrázek 54 Rozdělení izotopů kyslíku k 21. 7. 2020	69
Obrázek 55 Rozdělení izotopů kyslíku k 8. 9. 2020	69
Obrázek 56 Rozdělení evaporace a transpirace VZ 2021	71
Obrázek 57 Rozdělení evaporace a transpirace VN 2021	72
Obrázek 58 Rozdělení evaporace a transpirace VZ 2020	73
Obrázek 59 Rozdělení evaporace a transpirace VN 2020	74