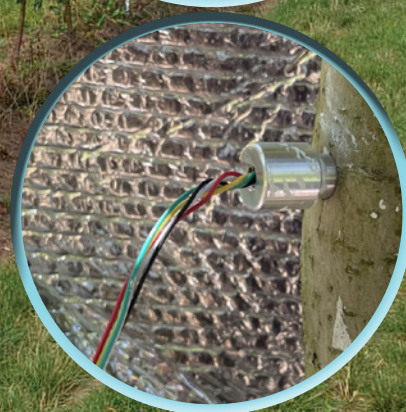


Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech

Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards



Martin Mészáros a kol.

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY, s.r.o.

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

VÝZKUMNÝ ÚSTAV ROSTLINNÉ VÝROBY, v. v. i.

AMET

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s. r. o.

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

VÝZKUMNÝ ÚSTAV ROSTLINNÉ VÝROBY, v. v. i.

AMET

Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech

Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards



Martin Mészáros a kol.

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

2023

Autorský kolektiv / Author collective:

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s. r. o.

Ing. Martin Mészáros, Ph.D., Ing. Klára Scháňková, Ing. Jan Náměstek, Ph.D.

Univerzita Hradec Králové

RNDr. Lenka Plavcová, Ph.D.

Český hydrometeorologický ústav

Ing. Rostislav Fiala, Ph.D.

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i.

Ing. Pavel Svoboda, Ing. Jan Haberle, CSc.

AMET

RNDr. Tomáš Litschmann, Ph.D.

Název / Title:

Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech / *Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards*

Vydavatel / Publisher:

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s. r. o.

Holovousy 129, 508 01 Holovousy

Vydáno v roce 2023

Kontakt na vedoucího autorského kolektivu / Contact to the head of the author's collective:

martin.mesaros@vsuo.cz

Autoři fotografií a obrázkových schémat / Authors of photos and image schemes:

Ing. Martin Mészáros, Ph.D., RNDr. Tomáš Litschmann, Ph.D., Ing. Klára Scháňková,

RNDr. Lenka Plavcová, Ph.D., Ing. Pavel Svoboda, Ing. Luděk Laňar, Ph.D., Ing. Rostislav

Fiala, Ph.D.

Odborný oponent/ Peer Reviewer:

doc. Dr. Ing. Petr Salaš, Mendelova Univerzita v Brně

Oponent ze státní správy / Peer Reviewer from the state administration:

Ing. Dušan Nesrsta, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno

Certifikovaná metodika vznikla za finanční podpory Národní agentury pro zemědělský výzkum, jako jeden z výstupů řešení projektu QK1910165 s názvem „Moderní postupy v závlahovém režimu ovocných dřevin v podmínkách vodního deficitu“. Při zpracování metodiky byla rovněž využita infrastruktura projektu RO1523.

The certified methodology was financially supported by the National Agency for Agricultural Research, as one of the outputs of the project QK1910165 entitled “Modern procedures in the irrigation regime of fruit trees in conditions of water deficit”. The publication was also supported by project RO1523.

© VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s. r. o.

ISBN 978-80-87030-88-2 (online; pdf)

<https://doi.org/10.60615/VNNA-HQ23>



OBSAH

Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech

1	Úvod.....	8
2	Cíle metodiky.....	8
3	Vlastní popis metodiky.....	9
3.1	Stanovení potřeby závlahy.....	9
3.1.1	Metoda řízení závlahy pomocí půdní vlhkosti.....	9
3.1.1.1	<i>Principy metody</i>	9
3.1.1.2	<i>Typy půdních snímačů a technické vybavení</i>	10
3.1.1.3	<i>Instalace půdních snímačů</i>	13
3.1.1.4	<i>Provoz, interpretace měření a řízení závlahy</i>	17
3.1.2	Metoda stanovení potřeby závlahy na základně vláhové bilance pozemku.....	23
3.1.2.1	<i>Principy metody</i>	23
3.1.2.2	<i>Metody přímého měření evapotranspirace</i>	23
3.1.2.3	<i>Stanovení evapotranspirace pomocí výpočtu</i>	24
3.1.2.3.1	<i>Metody výpočtu evapotranspirace</i>	25
3.1.2.3.2	<i>Vstupní data pro výpočet evapotranspirace</i>	27
3.1.2.4	<i>Metody modelování evapotranspirace</i>	31
3.1.2.5	<i>Interpretace výsledků a řízení závlah</i>	34
3.1.3	Metoda stanovení vláhové potřeby založená na fyziologické reakci rostlin.....	34
3.1.3.1	<i>Principy metody</i>	34
3.1.3.2	<i>Typy měřičů, způsoby instalace, provoz a technické vybavení</i>	35
3.1.3.3	<i>Interpretace měření a řízení závlahy</i>	40
3.1.4	Metody dálkového průzkumu Země.....	42
3.1.4.1	<i>Principy metod DPZ</i>	42
3.1.4.2	<i>Porovnání metod DPZ</i>	46
3.1.4.3	<i>Provozní využití metod DPZ pro stanovení potřeby závlahy</i>	46
3.2	Stanovení závlahové dávky.....	47
3.2.1	Kořenová soustava ovocných dřevin.....	48

3.2.1.1	Určení rozsahu kořenů v provozních podmínkách.....	52
3.2.1.2	Stanovení délky a hustoty kořenů.....	53
3.2.1.3	Průsak vody, vyplavení minerálních živin.....	54
3.2.2	Vliv závlahového detailu na stanovení vhodné závlahové dávky.....	54
3.3	Strategie zavlažování v ovocných sadech.....	56
3.3.1	Řízená deficitní závlaha.....	56
3.3.1.1	Principy závlahové strategie ŘDZ.....	56
3.3.1.2	Provozní podmínky ŘDZ.....	59
3.3.1.3	Technické a technologické vybavení ŘDZ.....	66
3.3.2	Závlaha parciální části kořenového systému.....	66
3.3.2.1	Principy závlahové strategie PZ.....	66
3.3.2.2	Provozní podmínky PZ.....	67
3.3.2.3	Technické a technologické vybavení PZ.....	68
4	Srovnání novosti postupů.....	68
5	Popis uplatnění metodiky.....	69
6	Ekonomické aspekty.....	69

CONTENT

Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards

1	Introduction	72
2	Objectives of the methodology	72
3	Description of the methodology	73
3.1	Determination of the need for irrigation	73
3.1.1	Method for determining irrigation need based on soil moisture	73
3.1.1.1	<i>Principles of the method</i>	73
3.1.1.2	<i>Types of soil sensors and technical equipment</i>	74
3.1.1.3	<i>Installation of soil sensors</i>	77
3.1.1.4	<i>Operation, measurement interpretation, and irrigation control</i>	81
3.1.2	Method for determining irrigation requirements based on the moisture balance of the land	87
3.1.2.1	<i>Principles of the method</i>	87
3.1.2.2	<i>Methods for direct measurement of evapotranspiration</i>	87
3.1.2.3	<i>Determination of evapotranspiration by calculation</i>	88
3.1.2.3.1	<i>Methods for evapotranspiration calculation</i>	89
3.1.2.3.2	<i>Input Data for evapotranspiration calculation</i>	91
3.1.2.4	<i>Methods for Evapotranspiration Modeling</i>	95
3.1.2.5	<i>Interpretation of results and irrigation management</i>	96
3.1.3	Method for determining irrigation need based on plant physiological response	97
3.1.3.1	<i>Principles of the method</i>	97
3.1.3.2	<i>Types of meters, installation methods, operation, and technical equipment</i>	98
3.1.3.3	<i>Interpretation of Irrigation Measurements and Control</i>	102
3.1.4	Methods of remote sensing of the Earth	104
3.1.4.1	<i>Principles of RSE methods</i>	105
3.1.4.2	<i>Comparison of RSE methods</i>	108
3.1.4.3	<i>Operational use of RSE methods to determine irrigation needs</i>	109
3.2	Determination of the irrigation rate	109

3.2.1	Root systems of fruit trees	110
3.2.1.1	<i>Determination of root extent under field conditions</i>	114
3.2.1.2	<i>Determining root length and density</i>	115
3.2.1.3	<i>Water percolation, mineral nutrient leaching</i>	116
3.2.2	Effect of irrigation system details on the determination of the appropriate irrigation rate.....	116
3.3	Irrigation strategy in orchards.....	118
3.3.1	Regulated deficit irrigation	118
3.3.1.1	<i>Principles of the RDI irrigation strategy</i>	118
3.3.1.2	<i>RDI operating conditions</i>	121
3.3.1.3	<i>Technical and technological equipment of the RDI</i>	128
3.3.2	Partial root zone drying.....	128
3.3.2.1	<i>Principles of the PRD Irrigation Strategy</i>	128
3.3.2.2	<i>PRD operating conditions</i>	129
3.3.2.3	<i>Technical and technological equipment of the PRD</i>	130
4	Determination of novelty of the practices	130
5	Description of the methodology application	131
6	Economic aspects.....	131
7	Seznam použité literatury / References	132
8	Seznam publikací, které předcházely metodice / List of publications that preceded this methodology	135

Anotace

Stanovení potřeby závlahy pro jádrové a peckové ovoce mírného pásma je hlavním tématem předkládané metodiky. Podrobně je zde uveden popis principů jednotlivých metod stanovení potřeby závlahy, včetně možností jejich automatizace, provozních výhod i limitů pro použití v praxi. Dále jsou zde popsány principy a pravidla pro využití standardní i alternativních (deficitních) závlahových strategií umožňujících precizaci managementu závlah v ovocných sadech. Tato metodika je určena pro pěstitele, jejich poradce a poradenské firmy zaměřené na závlahové systémy ovocných dřevin, kteří budou schopni na základě získaných informací do určité míry samostatně hodnotit potřebu pro doplňkovou závlahu a automatizovat management závlah v ovocných výsadbách. Poznatky uvedené v publikaci pocházejí z výsledků dosažených v rámci řešení projektu QK1910165 a z literární rešerše dostupných zdrojů.

1 ÚVOD

Voda představuje jeden z klíčových zdrojů pro udržitelnou rostlinnou produkci. Podobně jako ve světě, i v České republice jsou v současnosti vodní zdroje využívány pro účely závlahy pěstovaných plodin v některých regionech málo dostupné a v důsledku probíhající klimatické změny se může tento stav dále zhoršovat. Pěstovat zemědělské plodiny je možné v některých oblastech i bez použití závlahy, ale v silné konkurenci evropského trhu taková produkce nemusí obstát. Obzvláště v suchých letech, které s největší pravděpodobností budou stále častější. Nerovnoměrné rozložení srážek v průběhu roku nutnost využití závlah ještě prohlubuje.

Množství vody využívané pro závlahu zemědělských plodin celosvětově představuje až dvě třetiny celkové spotřeby sladké vody. Její efektivní využití se proto stává klíčovým pro udržitelnou produkci potravin, ale také kvůli zachování dostatečného množství pitné vody pro rostoucí lidskou populaci. Aby bylo zajištěno efektivní hospodaření se závlahovou vodou, je třeba znát a mít možnost naplnit požadavky pěstovaných plodin. Ta se odvíjí od biologických potřeb pěstovaných druhů a bilance vody na pozemku, která představuje rozdíl mezi evapotranspirací rostlin, tedy jejich ztrátou vody výparem a vodou doplněnou srážkami nebo závlahou. Tu je nutné doplňovat tak, aby se rostliny nedostaly do stresu suchem, ale také netrpěly jejím nadbytkem.

S pomocí nejnovějších technologií lze v dnešní době relativně spolehlivě stanovit potřebu závlahy i její optimální dávku a provozovat tak efektivně závlahové systémy. Využitím různých vztahů a měření lze závlahovou potřebu modelovat a výsledky využít v praxi pro řízení zavlažování zemědělských plodin. Tím je dosažena vyšší efektivita využití závlahové vody na jednotku sklizně. Efektivní závlahou lze pak dosáhnout minimálních negativních dopadů na pěstované plodiny ale i životní prostředí. Metody, které je možné využít v ovocnářství pro stanovení potřeby závlahy, její optimální dávky, ale i možnosti využití alternativních závlahových strategií, jsou popsány v předkládané publikaci.

2 CÍLE METODIKY

Cílem uvedené metodiky je obeznámit pěstitele ovoce s různými metodami stanovení potřeby závlahy v ovocných sadech včetně podrobného popisu jejich principů, postupů při stanovování termínů a dávek vody včetně zhodnocení výhod a rizik jednotlivých metod. Metodika je zaměřena také na popis technologického vybavení a možností automatizace závlah ovocných dřevin, jejich kalibrace a údržby. Publikace má dále seznámit uživatele s principy a postupy zaměřenými na zvýšení efektivity využití závlahové vody pomocí alternativních strategií deficitní závlahy. Cílem metodiky je zároveň přispět k zachování výnosů kvalitního ovoce za současného hospodárného využití dostupných zdrojů vody. Informace shrnuté v této metodice vychází ze současných zahraničních i domácích výsledků výzkumu, ale i dlouholetých zkušeností z praxe.

3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

V metodice je uveden popis různých metod stanovení potřeby závlahy, stanovení samotné závlahové dávky i moderních závlahových strategií. Metody stanovení potřeby závlahy zahrnují jejich principy, nutné přístrojové a technické vybavení, provoz včetně popisu nejdůležitějších výhod a rizik spojených s jejich využitím v praxi, interpretaci výsledků a možnosti automatizace provozu závlah v sadech ovocných dřevin. V publikaci je dále uveden postup při stanovování vhodné dávky závlahy pro konkrétní druhy ovocných dřevin a možnosti využití alternativních závlahových strategií.

3.1 Stanovení potřeby závlahy

Závlaha představuje účinný nástroj pro zajištění dostatečného přísunu vody ovocným dřevinám. Pro její optimální provoz je nezbytné především stanovit podmínky, za kterých je potřeba provést závlahu. V dnešní době existuje řada přímých i nepřímých metod pro stanovení potřeby závlahy založených na měření podmínek prostředí (půda a atmosféra) a fyziologických potřeb samotných pěstovaných plodin.

3.1.1 Metoda řízení závlahy pomocí půdní vlhkosti

Půda obecně představuje prostředí pro ukotvení ovocných dřevin a vzhledem ke svým sorpčním vlastnostem figuruje jako klíčový zdroj minerálních živin a vody. Půda je schopná vodu poutat pomocí svých fyzikálních a chemických vlastností. Tyto vlastnosti ovlivňují celkovou kapacitu půdy pro zadržování vody i její následnou dostupnost pro živé organizmy, resp. pěstované ovocné kultury.

Řízení kapkové závlahy na základě přímo měřené půdní vlhkosti patří při správném dodržení podmínek mezi poměrně spolehlivé metody, umožňující dávkovat vodu rostlinám podle jejich potřeb a rovněž i v závislosti na tom, kolik jí jsou schopny svými kořeny přijmout a transpirovat zpět do atmosféry.

Mezi výhody použití snímačů půdní vlhkosti pro řízení závlah patří možnost kontinuálního měření, průběžné monitorování činnosti závlahového systému, identifikace převlažení anebo nedostatečné vlhkosti půdního prostředí, možnost nastavení parametrů pro řízení závlahy, efektivní a relativně přesné zavlažování, a také určité přizpůsobení závlahové dávky povětrnostním podmínkám. I navzdory finanční náročnosti lze tuto metodu vnímat jako relativně cenově dostupnou.

Mezi nevýhody lze zařadit náročnost instalace systému čidel, interpretaci naměřených výsledků a fakt, že se jedná o bodové měření, které nemusí nutně poskytovat informaci o vlhkosti ve všech částech prokořeněné půdy.

3.1.1.1 Principy metody

Vzhledem k uvedeným vlastnostem představuje vlhkost půdy měřitelnou veličinu a v praxi rozlišujeme dvě základní charakteristiky měřitelné přístrojovou technikou: sací tlak a vlhkost půdy.

Sací tlak (nebo také vodní potenciál půdy) – vyjadřuje sílu, jakou je voda poutána v půdě a kterou musí rostliny překonávat při jejím získávání. Se snižujícím se množstvím vody v půdě je voda poutána více a tudíž sací tlak vzrůstá až dosáhne hodnot, kterou rostliny nejsou schopny překonat a dochází k jejich vadnutí.

Rozměr sacího tlaku se udává v pascálech (Pa) a jejich násobcích. V dostupné literatuře se však můžeme setkávat i s jednotkami mimo soustavu SI, a to centibar (cb) nebo hodnota pF. V rámci přepočtu jednotek platí, že 1 kPa = přibližně 1 cb. Hodnota pF představuje dekadický logaritmus tzv. sací výšky vodního sloupce (hst) vyjádřeného v metrech nebo centimetrech, pro niž platí:

$$pF = \log_{10} hst \text{ (cm)}$$

Logaritmičké vyjadřování sacích tlakových výšek se používá pro jejich značné řádové rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami.

Půdní vlhkost – udává množství vody v půdě a lze ji vyjádřit dvěma způsoby – objemovou vlhkostí anebo hmotnostní vlhkostí půdy.

Objemová vlhkost (θ) představuje poměr objemu vody k celkovému objemu půdy. Vyjádření půdní vlhkosti v objemových procentech je z hlediska závlahařské praxe vhodnější, neboť udává, jakou část daného objemu půdy zabírá její vodní složka.

Hmotnostní vlhkost (w) je dána poměrem hmotnosti vody k hmotnosti pevné fáze půdy. Při vyjádření v hmotnostních procentech je udáno, jakým poměrem hmotnosti se podílí voda na celkové hmotnosti půdního vzorku. V provozních podmínkách je možné w z odebraných vzorků jednoduše a rychle stanovit i bez speciálního vybavení. Při přepočtu na objemovou vlhkost půdy je důležité znát objemovou hmotnost půdy (ρ_d) v hodnoceném sadu po vysušení. Přepočet je pak následující:

$$\theta \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}) = w \text{ (g} \cdot \text{g}^{-1}) \times \rho_d \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})$$

Výsledek lze následně vyjádřit v objemových % vynásobením 100.

Vztah mezi sacím tlakem a půdní vlhkostí vyjadřují retenční čáry vlhkosti (pF křivky), u nichž je na svislé ose vyneseno sací tlak a na vodorovné půdní vlhkost. Pro každou půdu má tato křivka specifický charakter.

3.1.1.2 Typy půdních snímačů a technické vybavení

Snímače sacího tlaku

Tenzometry

Tenzometr je zařízení, kterým lze měřit sací tlak půdy (Obrázek 1). V minulosti představovaly v podstatě jediný způsob, jak nedestruktivně zjišťovat sací tlak v půdě. Základem tenzometru je porézní keramické tělísko, v jeho spodní části pevně spojené s plastovou trubkou stejného průměru patřičné délky, aby bylo možno tenzometr zasunout do hloubky, v níž chceme sací tlak měřit. Z tohoto důvodu se vyrábějí tenzometry o různé délce. V horní

rozšířené části tenzometru, která po umístění v terénu vyčnívá nad povrch, se nachází snímač podtlaku, buď analogový pro manuální odečítání, anebo elektronický, který lze připojit k monitorovací anebo řídicí jednotce. Svrchní rozšířená část, opatřená zátkou, slouží k naplnění tenzometru deaerovanou (odvzdušněnou) destilovanou vodou.



Obrázek 1. Tenzometr od firmy IRROMETER, vlevo s manuálním tlakoměrem, vpravo s elektronickým, umožňujícím připojení k monitorovací anebo řídicí jednotce

Měření sacího tlaku poskytuje v porovnání s měřením půdní vlhkosti bližší informaci o dostupnosti půdní vláhy pro rostliny. Avšak odezva přístrojů na změnu vlhkosti bývá pomalejší. Mezi hlavní nevýhody tenzometrů patří také nutnost občasného doplňování vody, kalibrace a potřeba vyjmutí přístroje z půdy před příchodem mrazů.

Sádrové bločky a WATERMARK

K nepřímému měření sacího tlaku se používají snímače založené na měření elektrického odporu mezi dvěma elektrodami zalitými v porézním materiálu vhodných chemických vlastností. V minulosti, ale ještě i někdy v současnosti, to byla sádra, a takto vyráběné snímače jsou známy pod označením „sádrové bločky“ (gypsum block, Obrázek 2). Mezi jejich nedostatky patří zejména značná závislost na teplotě okolního prostředí, krátká životnost, nestálost parametrů a v neposlední řadě i malý objem měřené půdy. To je problematické zejména v případě kapkové závlahy, kde jsou značné rozdíly v půdních vlhkostech i na krátkých vzdálenostech, klade velké nároky na jejich správnou instalaci a zajištění neměnné pozice vzhledem k dopadu kapek závlahové vody. Sádrové bločky jsou náchylné na postupné rozpouštění a tím ztrátu kontaktu s půdou. Tento jev je nejvýznamnější v zasolených a kyselých půdách.

Vylepšenou verzí sádrových bločků je již více než 40 let vyráběný, a i v našich sadech používaný, snímač WATERMARK, vyznačující se delší životností a větší stálostí parametrů, měřící ovšem opět v omezeném objemu půdy. Soustředné elektrody jsou obklopeny porézním křemenným materiálem, zapouzdřeným v syntetické hydrofilní membráně a perforovaném kovovém obalu.

K odečítání údajů z uvedených snímačů je zapotřebí speciálních indikátorů, převádějících údaj o odporu mezi kovovými elektrodami uvnitř snímačů na údaj o sacím tlaku. Rovněž je možno tyto snímače připojit k monitorovacím anebo řídicím jednotkám a na dálku sledovat průběh sacích tlaků a popřípadě řídit závlahu.

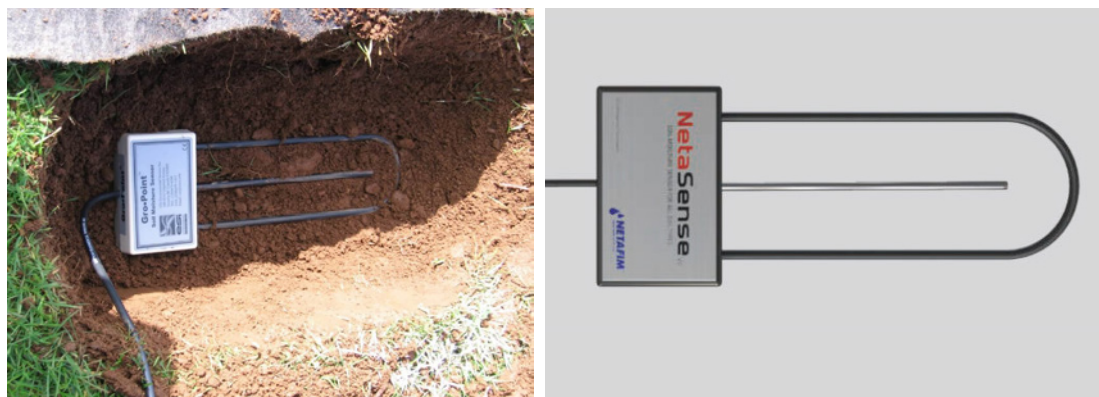
Mezi přednosti výše uvedených snímačů je nutno zařadit jejich nízkou pořizovací cenu a poměrně snadnou instalaci.



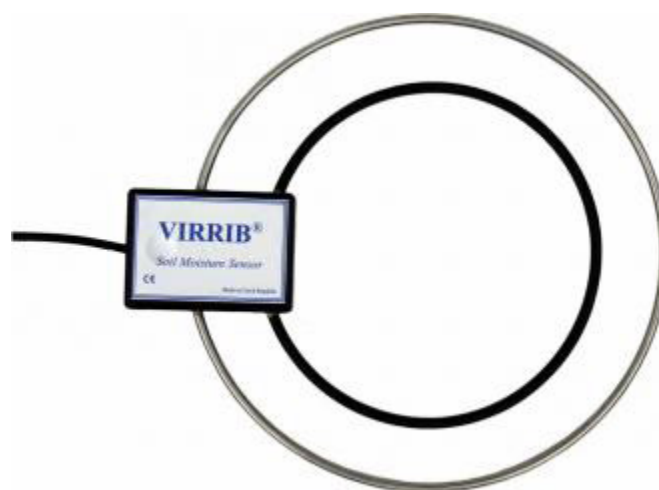
Obrázek 2. Sádrové bločky (vlevo) a snímač WATERMARK (vpravo)

Snímače objemové půdní vlhkosti

Podobně jako v jiných oborech, i měření půdní vlhkosti prošlo celou řadou etap od ručního gravimetrického měření, které se jako základní srovnávací měření používá i dnes, přes neutronové sondy až po kapacitní snímače a snímače založené na šíření elektromagnetických vln v půdním prostředí, složeném z pevné, kapalné a plynné části. Pro praktické použití dosáhly největšího rozšíření poslední dvě metody. Na obrázcích 3 a 4 jsou znázorněny snímače Netasense a Virrib měřící objemovou půdní vlhkost na základě šíření elektromagnetických vln v půdě. Skládají se ze dvou elektrod a elektroniky zalité epoxidovou pryskyřicí a mohou mít podlouhlý nebo kruhový tvar a různou velikost.



Obrázek 3. Snímače objemové půdní vlhkosti GroPoint a NetaSense (výrobce AMET, Velké Bílovice)



Obrázek 4. Snímač půdní objemové vlhkosti VIRRIE (výrobce AMET, Velké Bílovice)

3.1.1.3 Instalace půdních snímačů

Pro instalaci snímačů do výsadeb ovocných dřevin existuje několik zásad, kterými je třeba se řídit. První z nich zohledňuje jejich umístění v rámci sadu, kdy snímače zásadně neumisťujeme do krajních řad a ve vybrané řadě je umístíme dále od kraje. Pro zajištění správné činnosti snímačů vlhkosti a možnosti jejich autonomního řízení závlahy je zapotřebí snímače správně nainstalovat v místě pod kapkovou závlahou a provádět pravidelnou údržbu. Nesprávná instalace půdních snímačů může vést k nepřesným výsledkům měření a tím i nesprávnému dávkování závlahy. Všeobecně se doporučuje instalovat 3 snímače přibližně do hloubek 10–30, 40–60 a 70–90 cm, přičemž:

- ▶ svrchní snímač slouží k řízení závlahy
- ▶ prostřední snímač monitoruje provlžení profilu do větší hloubky
- ▶ spodní snímač monitoruje průsaky mimo kořenovou zónu

Instalace tenzometrů

Instalace tenzometrů je poměrně jednoduchá a nedochází při ní k většímu narušení půdního profilu. Železná trubka o průměru o něco větším, než je průměr tenzometru se zarazí do příslušné hloubky, v níž se má nalézat spodní konec tenzometru. Nikdy neděláme otvor hlubší, aby pod tenzometrem nevznikl prázdný prostor. Před vytažením trubky se na povrch půdy kolem ní nalije menší množství vody, aby nedošlo k uvolnění sypkých částic půdy do takto vytvořeného otvoru. Po vytažení trubky se do otvoru prostřednictvím nálevky nalije hustší směs vody a místní zeminy, aby bylo zajištěno dokonalejší spojení keramického tělíska ve spodní části tenzometru s okolní zeminou. Nakonec se až na dno do takto upraveného otvoru zasune tenzometr. Důležité je zajištění dokonalého kontaktu keramického tělíska s okolní zeminou, jinak nebude snímač poskytovat spolehlivé údaje.

Při instalaci snímačů WATERMARK a podobných se postupuje obdobně, pouze místo tenzometru se do otvoru zasune válcové tělo snímače připevněné na konci plastové trubky přibližně stejného průměru. Na jejím spodním konci se provede kratší zářez, jímž se protáhne vodič snímače tak, aby při jejím zasouvání do otvoru procházel po vnější straně plastové trubky. Po zasunutí trubky i s upevněným snímačem do dané hloubky na dno otvoru se jejím vnitřkem prostrčí dřevěná anebo kovová tyčka a přidrží se jí snímač na dně otvoru a trubka se opatrně vytáhne. Do otvoru nad snímačem se opět pomocí nálevky nalije směs vody a zeminy a pomocí tyčky se pomalu pěchuje, až jej vyplní po povrch okolního terénu.

Instalace snímačů půdní vlhkosti

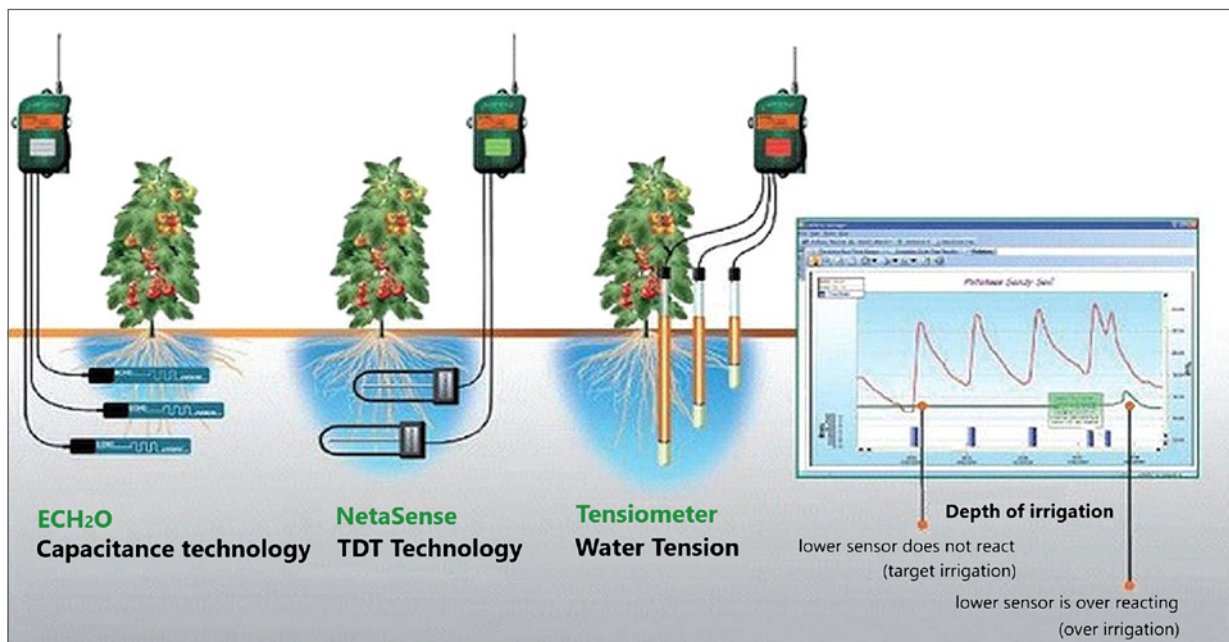
Snímače půdní vlhkosti mají větší rozměry než tenzometry a proto kromě toho, že jsou schopny většinou monitorovat půdní vlhkost ve větším objemu půdy, vyžadují i trochu odlišný způsob instalace. Buď je možno vykopat nejprve jámu vhodných rozměrů vedle místa, kde mají být snímače umístěny, a ty pak postupně zasouvat do neporušeného půdního profilu (Obrázek 5 vpravo dole). Zde je nutno obzvláště pečlivě zajistit, aby měřicí části byly celé obaleny okolní zeminou a nevznikaly vzduchové kapsy. Tento postup není vhodný u skeletovitých půd. Vykopaná jáma se musí zahrnout postupně upěchovávanou zeminou, aby nesloužila jako drenáž a neovlivňovala tak výsledky měření.

Druhý způsob jejich instalace spočívá v tom, že se snímače umísťují do předem vyhloubené jámy příslušné hloubky o takovém průměru, aby je do ní bylo možno bez problémů vložit. Vyhloubená zemina se dává na jednu hromadu, aby následně při zasypávání snímačů bylo možno zachovat sled jednotlivých horizontů. Jáma se nedělá zbytečně velká, aby narušení okolního půdního profilu bylo co nejmenší. Některé snímače, např. VIRRIB, je možno instalovat buď svisle anebo vodorovně. Při vodorovné instalaci (Obrázek 5) je měřena půdní vlhkost pouze v tenké, několikacentimetrové, vrstvě v dané hloubce, při svislém umístění je měřena průměrná půdní vlhkost v tloušťce odpovídající výšce snímače. Jeho nakláněním lze libovolně podle potřeby měnit tloušťku takto monitorované vrstvy od nejtenčí, odpovídající vodorovnému umístění, až po maximální při svislém umístění. Do vyhloubené jámy se snímače umísťují postupně, přirhne se k nim cca 5 cm silná vrstva vykopané zeminy a utuží se, takto se postupuje až k povrchu. Je důležité se vyvarovat vzniku vzduchových kapes. Při správné instalaci je veškerá vykopaná zemina vrácena zpět do původního prostoru. V případě skeletovitých půd se snímače zasypávají pouze jemnozemí, kameny a větší kusy šterku se odstraňují.

Snímače je v půdě nutno umístit do prostoru v těsné blízkosti kapkovačů. Na obrázku 6 je ukázka doporučeného umístění firmou Netafim, vlevo je umístění kapacitních snímačů ECH₂O, uprostřed snímačů NetaSense a vpravo tenzometrů s elektronickým snímáním podtlaku. Snímače se však neumísťují přímo pod strom tak, jak je vyobrazeno, ale v jeho bezprostřední blízkosti, rovněž s ohledem na pozici kapkovače. Doporučuje se vzdálenost do 10 cm od jeho svislého průmětu na povrch. S ohledem na tuto podmínku je nutno rovněž zabezpečit, aby kapky dopadaly opravdu do prostoru monitorovaného snímači. V praxi může docházet k tomu, že voda stéká po kapkovací hadici a odkapává ve větší anebo menší vzdálenosti od kapkovače. Tomu je nutno zabránit, u hadic ležících na zemi umístěním vhodné zářky po obou stranách kapkovače, u hadic umístěných ve výšce na drátěnce se osvědčilo prohnutí hadice nad snímači vhodnou rozpěrkou (Obrázek 7). Jelikož se kapkovací hadice vlivem teplotních změn smršťuje a roztahuje, je nutno tuto rozpěrku pevně fixovat na drátěnce i na kapkovací hadici, aby nedošlo k jejímu vypadnutí. Podmínkou je také, že kapkovač v blízkosti snímačů musí být funkční a dávat nominální průtok. Jeho průtok se dá ověřit umístěním nádoby pod kapkovač, z níž se po určité době činnosti závlahy voda přelije do odměrného válce. Získané množství dodané vody lze pak přepočítat na hodinovou vydatnost kapkovače. Tato hodnota je někdy uvedena na kapkovacím potrubí.



Obrázek 5. Postupná instalace tří snímačů půdní vlhkosti Netasense do vykopané jámy nad sebou a dvou snímačů do boční stěny výkopu (vpravo dole)



Obrázek 6. Umístění snímačů půdní vlhkosti v navlaženém objemu (podle firmy Netafim)



Obrázek 7. Detail zajištění prohnutí kapkové hadice nad umístěním snímačů vlhkosti půdy

3.1.1.4 Provoz, interpretace měření a řízení závlahy

Po správném výběru a instalaci vhodného snímače, popřípadě i více snímačů, lze přistoupit k využití získaných údajů pro řízení závlahy. Údaje lze odečítat buď ručně, zde je však nutná frekvence odečtu alespoň dvakrát týdně během závlahové sezóny, popřípadě lze použít vhodný datalogger s dálkovým přenosem, nejlépe na sběrný datový server umožňující vizualizaci dat přes webové rozhraní. Další z možností je použití autonomní závlahové automatiky měřící v pravidelných intervalech množství vody v půdě a podle potřeby spouštějící závlahu.

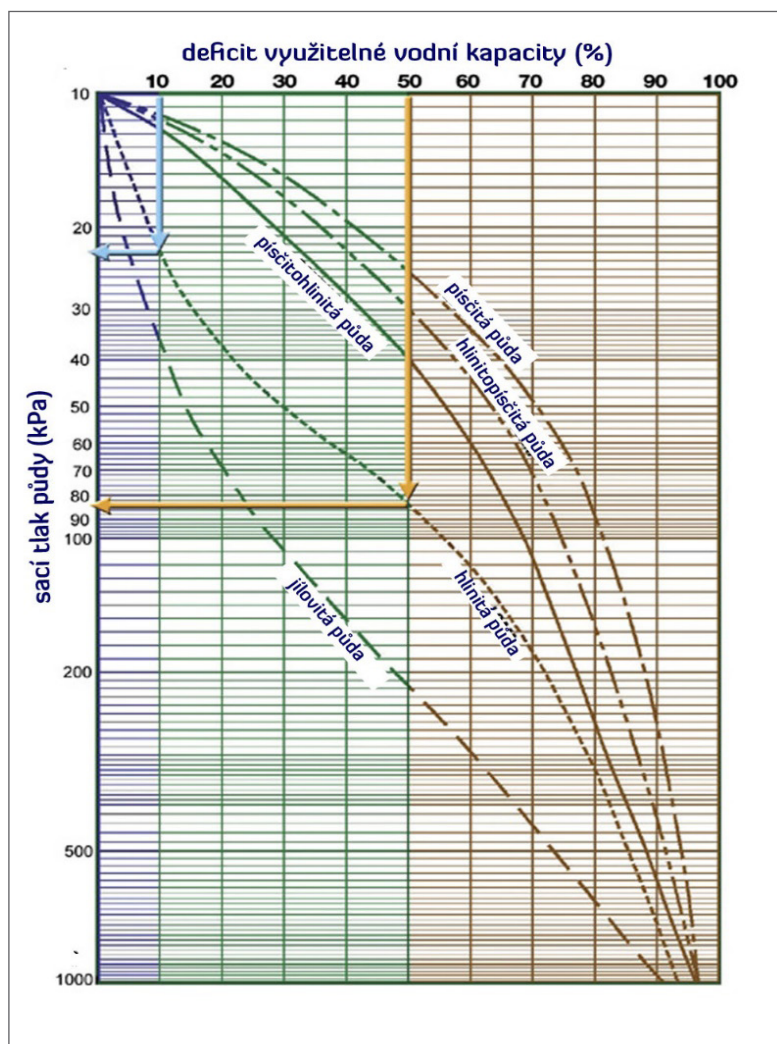
Pro správnou interpretaci je naměřené výsledky vždy potřeba vztáhnout k rozsahu vody dostupné rostlinám v půdě. K tomuto účelu je potřebné stanovit příslušné hydrolimity půdy, z kterých jsou nejdůležitější polní vodní kapacita (PVK) a bod vadnutí (BV), případně retenční vodní kapacita. Zatímco retenční vodní kapacita představuje dočasné uložení vody v kapilárních i nekapilárních pórech půdy, polní vodní kapacita představuje maximální množství vody, které je půda schopna dlouhodoběji zadržet. Bod vadnutí představuje vlhkost půdy, při které již rostliny nejsou schopny dále přijímat vodu přes kořeny a dochází k jejich trvalému vadnutí. Rozdíl mezi bodem vadnutí a polní vodní kapacitou vyjadřuje množství vody, které jsou schopny rostliny z půdy efektivně odčerpávat svými kořeny, tzv. využitelnou vodní kapacitu (VVK).

Interpretace výsledků měření sacího tlaku

Podle doporučení firmy IRROMETER, výrobce snímačů WATERMARK a tenzometrů, při rozhodování o provedení závlahy je možno vycházet z těchto údajů sacích tlaků:

- ▶ **0–10 kPa** – nasycená půda,
- ▶ **10–30 kPa** – půda je dostatečně vlhká (s výjimkou štěrkovitých půd, které již začínají vysychat),
- ▶ **30–60 kPa** – obvyklý rozsah pro provádění závlahy u většiny půd,
- ▶ **60–100 kPa** – obvyklý rozsah pro provádění závlahy v těžkých půdách,
- ▶ **100–200 kPa** – půda je příliš suchá.

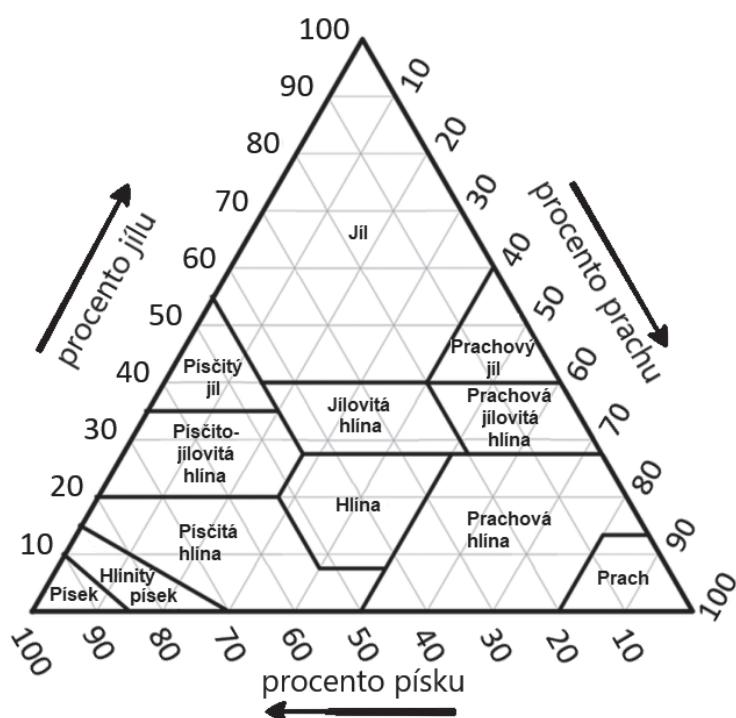
Na obrázku 8 jsou uvedeny retenční čáry pro vybrané druhy půd, udávající závislost mezi deficitem VVK a sacím tlakem. Všeobecně se předpokládá, že rostliny netrpí stresem suchem v případě, že tento deficit nepřekročí hodnotu 50%. Na obrázku 8 je žlutě vyznačeno stanovení hodnoty sacího tlaku pro hodnotu 50% využitelné vodní kapacity, které u hlinité půdy odpovídá sacího tlaku cca 85 kPa. V závislosti na fenologickém vývoji se doporučuje zavlažovat při nižších hodnotách, nejnáročnější na vodu jsou ovocné stromy v období růstu plodů, kdy se doporučuje udržovat deficit využitelné vodní kapacity v hodnotách 30 až 40%, tedy udržovat vlhkost půdy na hladině 60–70% využitelné vodní kapacity.



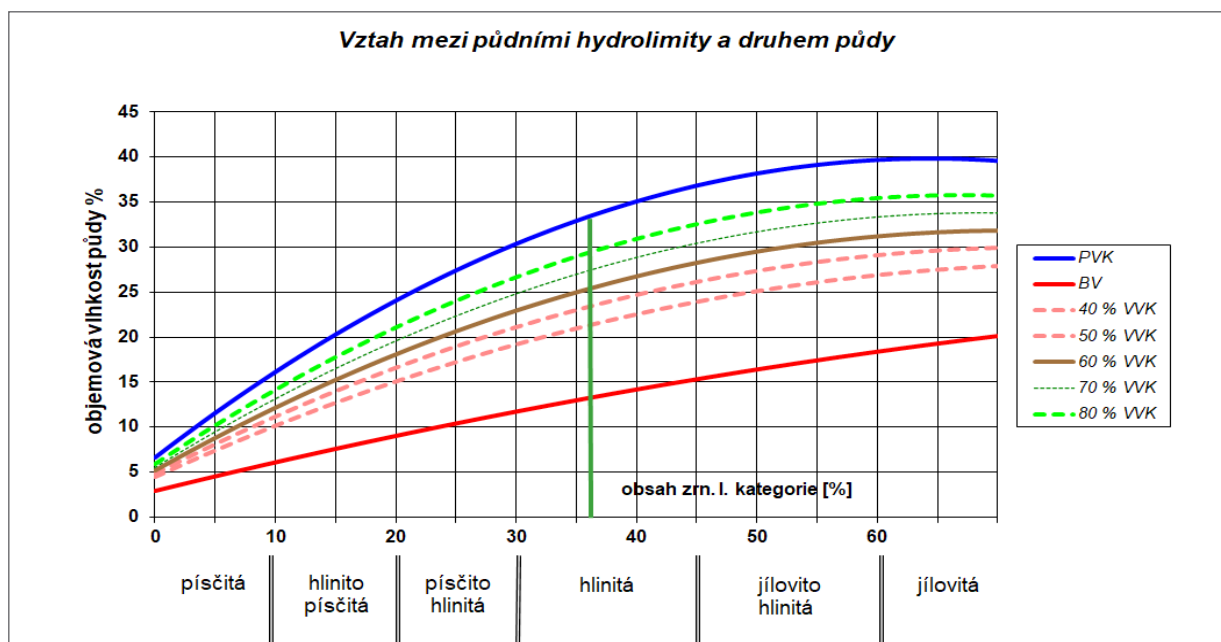
Obrázek 8. Závislost mezi deficitem využitelné vodní kapacity a sacím tlakem pro různé druhy půdy (podle podkladů firmy IRRIMETER)

Interpretace výsledků měření objemové půdní vlhkosti

Při řízení závlahy ovocných stromů na základě měřených údajů půdní vlhkosti je zapotřebí nejprve stanovit množství vody v půdě dostupné pro pěstované plodiny. PVK, ale i další půdní hydrolimity, lze stanovit laboratorně zrnitostní analýzou neporušených vzorků půdy, nebo pomocí nainstalovaného snímače půdní vlhkosti. V případě použití zrnitostní analýzy je nutno nejprve stanovit procentuální zastoupení kategorií (Obrázek 9) jílnatých částic ($< 0,01$ mm), obsahu jílu ($< 0,001$ mm) a písku ($> 0,05$) a následně stanovit půdní hydrolimity podle publikovaných pedotransferových funkcí (Obrázek 10). Jejich výpočet je popsán českou státní normou ČSN 75 0434. Většina našich zemědělsky využívaných půd (60 % z půdního fondu) patří mezi střední půdy (písčito-hlinité a hlinité), menší podíl mají lehké hlinito-písčité půdy (25 % z půdního fondu) a těžké půdy. Střední půdy, které mají obsah I. kategorie (jílnaté částice, $< 0,01$ mm) v rozmezí od 20 do 45 %, PVK okolo 24–37 obj. %, vykazují VVK 15–22 obj. %. Například do hloubky 1 m to představuje při plném nasycení vodou (na úroveň PVK) 150–220 mm, tj. 150–220 litrů vody na m^2 .



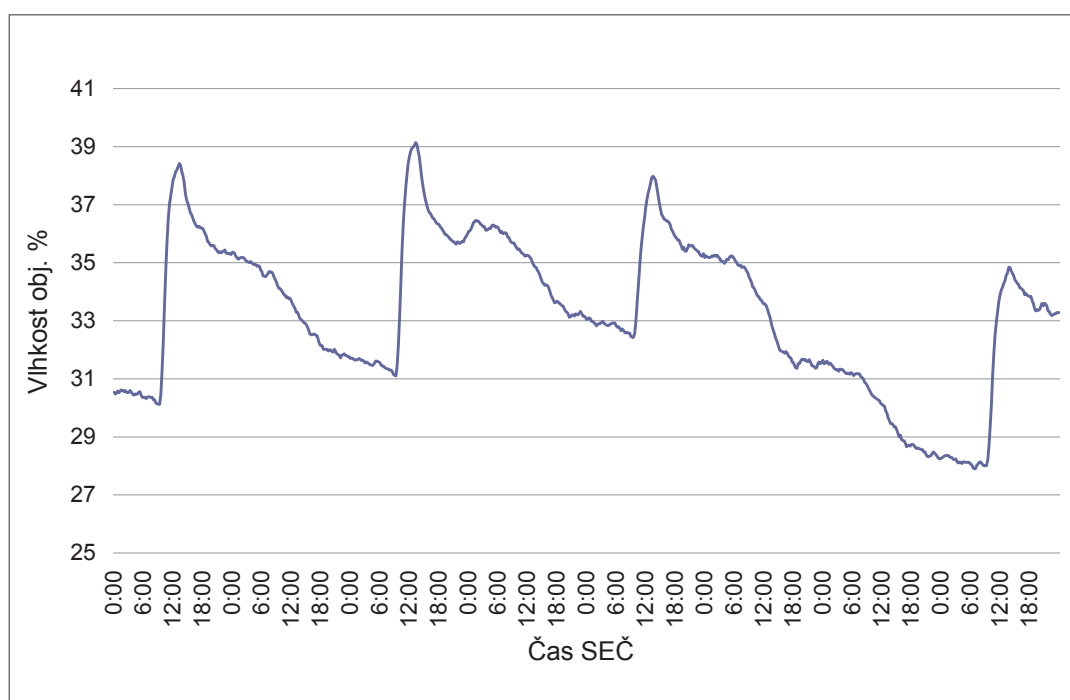
Obrázek 9. Trojúhelník zobrazující vztah mezi procentem půdních zrnitostních frakcí u jednotlivých půdních druhů. (Adaptováno s USDA-NRCS)



Obrázek 10. Vztah mezi půdními hydrolimity a druhem půdy

Použití snímače ke stanovení polní vodní kapacity umožňuje kompenzovat potřebu kalibrace většiny snímačů pro danou konkrétní půdu. Reálná absolutní hodnota polní vodní kapacity je totiž méně důležitá než hodnota tohoto limitu identifikovaná na snímači. Důležitá je

spíše přesnost měření snímače, zejména jeho schopnost poskytnout stejný údaj při stejném obsahu vody v půdě. Praktický postup při orientačním stanovení polní vodní kapacity půdy prostřednictvím půdních vlhkostních čidel probíhá tak, že se hodnotí průběh křivky naměřené půdní vlhkosti. Po vydatnějších srážkách s úhrnem alespoň 20–30 mm anebo závlaze dochází k rychlému nárůstu vlhkosti půdy, což je způsobeno zaplněním kapilárních a nekapilárních pórů. Pokud je podloží propustné, z nekapilárních pórů voda postupně odtéká a přibližně po jednom dni dojde k poklesu vlhkosti půdy na hodnotu odpovídající polní vodní kapacitě. Na grafu se změna projeví křivkou znázorňující zmírnění prudkého poklesu půdní vlhkosti zachycené retencí a její ustálení v nočních hodinách (Obrázek 11). Změřená vlhkost půdy v bodě ustálení pak odpovídá polní vodní kapacitě.



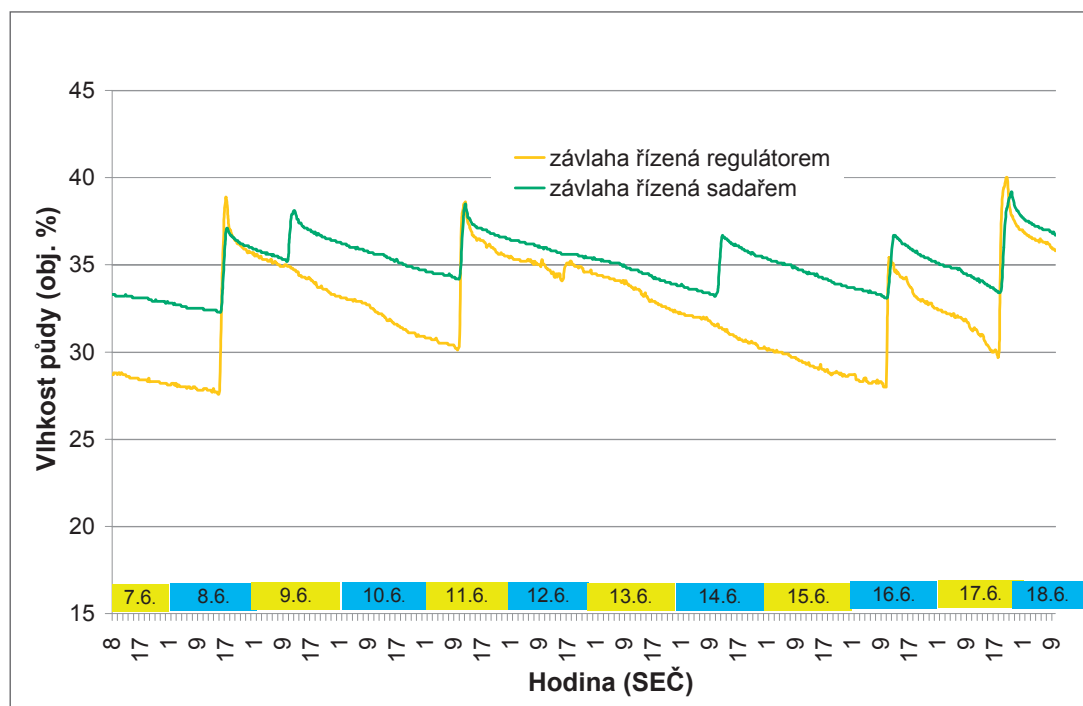
Obrázek 11. Ukázka průběhu půdních vlhkostí v meruňkách pod kapkovou závlahou ve dnech 30. 5. až 6. 6. 2022

Po odtoku vody z nekapilárních pórů pak v průběhu dne půdní vlhkost znovu intenzivně klesá v důsledku odčerpávání vody z kapilárních pórů kořeny rostlin za současného odpařování evaporací. Křivka obsahu vody v půdě postupně klesá v rozsahu VVK. Toto rozmezí se podle dostupnosti vody pro rostlinu dále dělí na volně dostupnou vodu a obtížněji dostupnou vodu. Hranici mezi těmito dvěma stavy se nazývá bod snížené dostupnosti a všeobecně se za něj považuje hodnota kolem poloviny využitelné vodní kapacity. V rozmezí volně dostupné vody rostliny dokážou získávat vláhu z půdy neomezeně. Toto čerpání se na křivce v grafu půdní vlhkosti projevuje stejnoměrným poklesem, tzv. „denními schůdky“ a umožňuje určitou toleranci při volbě optimální hodnoty pro provedení závlahy (Obrázek 12). V oblasti snížené dostupnosti dochází k nedostatečnému příjmu vody z půdy a následně jsou rostliny stresovány suchem. Důvodem snížení dostupnosti vody je postupné přerušování kapilárního toku vody ke kořenům a rostliny jsou dále nuceny vodu aktivně vyhledávat

prostřednictvím intenzivního růstu kořenového vlášení. Snížená dostupnost vody se projevuje na grafu snižováním intenzity čerpání vody a tedy poklesem úbytku půdní vlhkosti (Obrázek 13).

Příklad:

Jestliže půdním rozbořem nebo měřením půdní vlhkosti zjistíme, že polní vodní kapacita dané půdy se pohybuje v rozmezí 33–34 obj. %, z grafu na obrázku 10 odečteme hodnotu bodu vadnutí, přibližně 13 obj. %. V tomto případě činí VVK přibližně 21 obj. % a z toho volně dostupná voda přibližně 40–50 %, tedy v našem případě přibližně 9 obj. %. Z uváděného příkladu tudíž vyplývá, že v rozsahu vlhkostí půdy od přibližně od 25 do 34 obj. % (odpovídající hranici přibližně 55 % využitelné vodní kapacity), jsou rostliny schopny přijímat vodu bez omezení a netrpět suchem. Na modelovém příkladu na obrázku 11 byla hranice pro spuštění závlahy nastavena na 30 obj. %, po většinu sledovaného období se půdní vlhkost v závlaze řízené regulátorem pohybovala v doporučeném rozmezí od polní vodní kapacity po bod snížené dostupnosti, pouze po provedené závlaze došlo na určitou dobu k převlažení.



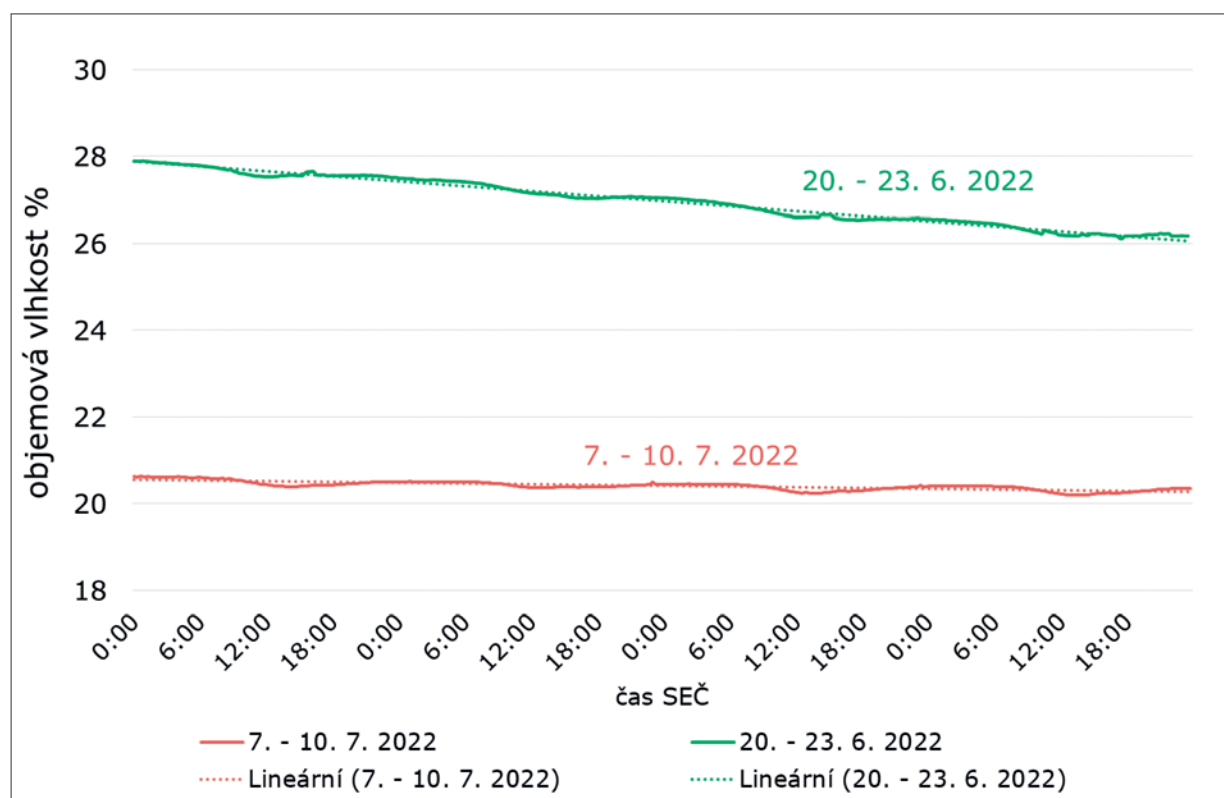
Obrázek 12. Průběh půdních vlhkostí ve vrstvě 5–30 cm – stanovení polní vodní kapacity a dalších hydrolimitů

O tom, že nebylo dosaženo bodu snížené dostupnosti, svědčí i stejnoměrný setrvalý pokles půdní vlhkosti v období beze srážek mezi dvěma závlahami, na obrázku 12 je to období od 11. do 16. 6. 2022.

Z fyziologického ani z praktického hlediska není vhodné udržovat půdní vlhkost blízko hodnotám polní vodní kapacity. Nedochází totiž k dostatečnému provzdušnění půdy a kořeny v těchto podmínkách trvale neprosperují. Navíc v případě vydatnějších srážek je již

půda nasycena a přebytečná voda odtéká bez užítku. Na druhou stranu není vhodné spouštět závlahu až při dosažení bodu snížené dostupnosti vody v půdě. Při odchylce v přesnosti stanovení, nebo vyšší evapotranspirační potřebě již v půdě není rezerva vody pro pokrytí potřeb rostlin a tyto mohou trpět suchem.

Závlahu je možno ovládat ručně, nebo pomocí závlahové automatiky vyhodnocující naměřené údaje půdní vlhkosti. Ruční ovládání je vhodné pouze do malých sadů s několika závlahovými sekcemi, kdy sadař po zjištění hodnot půdní vlhkosti rozhodne o provedení závlahy. Zavlažování pomocí automatiky umožňuje výrazné usnadnění řízení těchto procesů. V jednodušším provedení je ventil ovládán pouze na základě nastavené hranice půdní vlhkosti v zavlaženém objemu půdy pod kapkovačem. Složitější systémy umožňují sledování i dalších parametrů, např. tlaku a průtoku vody nebo meteorologických parametrů, které převádějí do řídicího počítače otevírajícího ventily. Řízení kapkové závlahy nejen sadů na základě naměřených půdních vlhkostí je ve světě poměrně rozšířené a umožňuje adekvátně reagovat na jednotlivé parametry ovlivňující bilanci zásob vody v půdě, ať se jedná o množství efektivních srážek, odběr vody kořeny rostlin za rozdílných povětrnostních situací či množství dodané závlahové vody. Za stoupajících cen elektrické energie a častějšího výskytu suchých period s nedostatkem vody pro závlahu může správně řízená závlaha vést k výrazným úsporám bez ovlivnění výnosů. Systém tak překonává klasické systémy automatizovaného řízení závlahy pouze prostřednictvím časovače.



Obrázek 13. Průběh půdní vlhkosti ve výsadbě jabloní bez závlahy při dostatečné vlhkosti půdy (zelená křivka) a při vlhkosti pod bodem její snížené dostupnosti (hnědá křivka)

3.1.2 Metoda stanovení potřeby závlahy na základně vláhové bilance pozemku

Vedle půdy je nedílnou součástí pohybu vody v prostředí rostlin i atmosféra. Voda se do atmosféry dostává prostřednictvím výparu z povrchu neživých materiálů (evaporace) nebo odpařováním vody z živých soustav rostlin či živočichů (transpirace). Nachází se zde především v plynném skupenství, může však kondenzovat a vracet se na zemský povrch ve formě dešťových či sněhových srážek. Na základě těchto a dalších veličin lze empiricky stanovit pohyb vody v prostředí, její objem i celkovou bilanci.

3.1.2.1 Principy metody

Stanovení potřeby závlahy na základě vláhové bilance pozemku vychází z bilancování jejich příjmových a ztrátových složek. Metoda je založena na zjednodušeném předpokladu, že přenos vody probíhá půdním profilem jen ve vertikálním směru a vztah lze definovat rovnicí:

$$V_f - V_i = P - I - O - E \pm Q$$

kde:

- V_f ... obsah vody v půdě na konci časového intervalu,
- V_i ... obsah vody v půdě na začátku časového intervalu,
- P ... srážkový úhrn za časový interval na jednotku plochy povrchu půdy,
- I ... intercepce srážek na povrchu rostlin,
- O ... povrchový a podpovrchový odtok,
- E ... úhrn evapotranspirace za časový interval z jednotkové plochy povrchu půdy,
- Q ... objem vody, který přechází přes dolní hranici bilancovaného objemu půdy.

Za předpokladu, že intercepce, povrchový a podpovrchový odtok a přenos vody přes dolní hranici bilancovaného objemu půdy se blíží nule, lze rovnici bilance vody v profilu zjednodušit:

$$V_f - V_i = P - E$$

Z uvedeného zjednodušení vyplývá, že změna obsahu vody v půdě vychází z bilance srážek (případně již dodaných závlah) na straně příjmové a evapotranspirace na straně ztrátové. Pokud úhrn evapotranspirace převyšuje úhrn srážek a obsah vody v půdním profilu klesá pod optimální mez, je nutno dodat potřebné množství vody závlahou.

3.1.2.2 Metody přímého měření evapotranspirace

Nejjednodušší metodou měření výparu je měření výparu z vodní hladiny. Principem je denní odečet hladiny vody v nádobě a bilancování ztráty vody výparem se srážkami. K danému účelu se používají zpravidla kovové nádoby světlé barvy (kovově stříbrné, bílé, ...) umístěné pod zemským povrchem či nad ním.

Zřejmě nejrozšířenější formou měření výparu z vodní hladiny je použití výparoměru „Class A evaporation pan“ (volně přeloženo jako „Výparoměr třídy A“, Obrázek 14). Jde o kovový válec průměru 120,7 cm a výšky 25,4 cm umístěný 15 cm nad zemským povrchem. V mnoha státech se používá tato metoda jako standard, přičemž za pomoci empiricky zjištěných koeficientů se výpar z vodní hladiny přepočítává na potenciální evapotranspiraci porostu – převážně travního porostu anebo zemědělských plodin.



Obrázek 14. Výparoměr třídy A

Na staniční síti ČHMÚ se od roku 1968 používal manuální výparoměr GGI 3000. Šlo o válec průměru 30,9 cm a výšce 60 cm, který byl umístěn v zemi s hladinou při povrchu země. Tento přístroj byl v rámci automatizace postupně nahrazován automatickým výparoměrem EWM500 o stejné výparné ploše 3 000 cm².

Pro přímé měření evapotranspirace porostu se používá lyzimetr (gravitační monolitický lyzimetr). Jedná se o vzorek půdního profilu s testovaným porostem (např. travním porostem), který je umístěn ve vážené komoře ve tvaru kovového válce opatřené přístrojovou technikou pro záznam půdní vlhkosti. Kromě vlhkosti půdy a hmotnosti vzorku se dále měří přitékající voda ve formě srážek nebo závlahy a odtékající voda z komory prostřednictvím průsaku profilem. Toto zařízení je využíváno převážně ve výzkumných institucích, a to zejména vzhledem k vyšší pořizovací ceně a vysokým nárokům na údržbu a obsluhu, kontrolu a vyhodnocení měřených dat.

3.1.2.3 Stanovení evapotranspirace pomocí výpočtu

Existuje mnoho výpočetních metod pro stanovení evapotranspirace. Do výpočtu vstupuje zpravidla teplota, případně radiace a další prvky, které ovlivňují výpar vody z povrchu (vody, půdy, vegetace,...) a aktivitu vegetace včetně její transpirace. Jednoduché vzorce (empirické) vyžadují minimum vstupních údajů, kombinované metody jsou přesnější, ale také náročnější na množství vstupních dat a tím i přístrojovou techniku.

Metody výpočtu vypařování je možné dle Nováka (1995) rozdělit na:

- a) mikrometeorologické metody výpočtu (metoda turbulentní difuze, metoda energetické bilance, kombinovaná metoda a metoda pulzací), které jsou založené na analýze rozdělení meteorologických prvků v přízemní atmosféře,
- b) empirické rovnice, které se využívají zejména tehdy, pokud nejsou k dispozici data pro použití jiných metod,
- c) metody vodní bilance, které jsou založené na sestavení bilance obsahu vody ve specifikovaném objemu půdy,
- d) metody výpočtu vypařování založené na řešení rovnic přenosu vody v kořenové vrstvě půdy,
- e) metoda založená na řešení rovnic přenosu vody a tepla v porostu,
- f) určení transpirace měřením intenzity proudění roztoku v xylému rostlin, kdy tato metoda umožňuje určit transpiraci individuální rostliny.

Z méně náročných metod lze uvést metodu Papadakisovu, Budyka a Zubenokové a nebo Thornthwaitovu, sofistikovanou a velmi rozšířenou metodou je kombinovaná Penmanova rovnice a její modifikace (Penman-Monteith) a další.

3.1.2.3.1 Metody výpočtu evapotranspirace

Papadakisova metoda

$$ETP = 5,625(e_{mx} - e_{mn})$$

kde:

- ETP ... potenciální evapotranspirace [mm.měsíc⁻¹],
- e_{mx} ... napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru maximálních denních teplot vzduchu ve výšce 2 m nad zemí [hPa],
- e_{mn} ... napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru minimálních denních teplot vzduchu ve výšce 2 m, od něhož byly odečteny 2 °C [hPa].

Metoda Budyka a Zubenokové

$$ETP = \rho \times D \times (q_s - q)$$

kde:

- ETP ... potenciální evapotranspirace [mm],
- D ... součinitel rychlosti turbulentního přenosu mezi úrovní vypařujícího povrchu a úrovní měření v meteorologické budce [m.s⁻¹] (v létě $D \sim 0,003 \text{ ms}^{-1}$),
- ρ ... hustota vzduchu [kg.m⁻³],
- q_s ... měrná vlhkost vzduchu nasyceného vodní párou při teplotě vypařujícího povrchu [kg.kg⁻¹],
- q ... měrná vlhkost vzduchu ve výšce 2 m, tj. na úrovni meteorologické budky [kg.kg⁻¹].

Thornthwaitova metoda pracující pouze s teplotou vzduchu vypočte potenciální evapotranspiraci pouze pro měsíce s kladnými teplotami

$$ETP = 1,6 \left(\frac{10 \times T_m}{I} \right)^a$$

kde:

ETP ... potenciální evapotranspirace [cm.měsíc⁻¹],

T_m ... průměrná měsíční teplota [°C],

I ... teplotní index [°C],

$$I = \sum \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,51}$$

T_i – dlouhodobá průměrná teplota vzduchu v i-tém měsíci v roce,

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 + (77,11 \times 10^{-6})I^2 + (17,921 \times 10^{-3})I + 0,49239$$

Mintz a Walker (1993) linearizovali původní Thornthwaitovu rovnici do vztahu, kterým je možné počítat evapotranspiraci pro jednotlivé dny:

$$ETP = 0,17 \left(\frac{n_{max}}{12} \right) T$$

kde:

ETP ... potenciální evapotranspirace [mm.den⁻¹],

n_{max} ... astronomicky možná délka slunečního svitu [hod],

T ... průměrná denní teplota vzduchu [°C].

Existují i další jednoduché empirické metody, např. rovnice Turcova, Linacreova a Ivanovova. Výsledkem těchto výpočtů je vždy potenciální evapotranspirace.

Kombinovaná metoda stanovení potenciální evapotranspirace

Tato metoda byla poprvé vyjádřena Penmanem (1948) a je založena na simultánním řešení soustavy rovnic popisujících ustálený tok tepla a vodní páry nad vypařujícím povrchem (metoda turbulentní difúze) spolu s rovnicí energetické bilance na úrovni vypařujícího povrchu.

Evolucí Penmanovy metody vznikla metodika výpočtu vláhové potřeby plodin, která byla publikována autori Allen a kol. v roce 1998 jako svazek metodických návodů Organizace spojených národů pro výživu a zemědělství k závlahám a odvodnění č. 56 (FAO Irrigation and drainage paper 56: Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements). Metodika je v oboru známá pod zkráceným označením „FAO 56“.

Základ tvoří výpočet tzv. referenční evapotranspirace ET₀. Jedná se o evapotranspiraci travního porostu, který je definován jako krátce střížený, plně zapojený porost výšky 12 cm, dobře zásobený vodou, s konstantním albedem 0,23 a povrchovým odporem porostu 70 s.m⁻¹.

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273,16} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)}$$

kde:

- ET₀ ... referenční evapotranspirace hypotetického povrchu [mm.den⁻¹],
- Δ ... derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [kPa.°C⁻¹],
- R_n ... radiační bilance na povrch plodiny [MJ.m⁻².den⁻¹],
- G ... tok tepla v půdě [MJ.m⁻².den⁻¹],
- γ ... psychrometrická konstanta [kPa.°C⁻¹],
- T ... průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem [°C],
- u² ... průměrná denní rychlost větru ve 2 m nad povrchem [m.s⁻¹],
- e_s ... tlak nasycené vodní páry při teplotě vzduchu měřené ve standardní výšce 2 m [kPa],
- e_a ... aktuální tlak vodní páry vypočítaný podle teploty a vlhkosti vzduchu ve 2 m [kPa].

Z meteorologických prvků je k výpočtu referenční evapotranspirace potřeba teplota vzduchu, vlhkost vzduchu nebo tlak vodní páry, rychlost větru a sluneční radiace, případně délka slunečního svitu, z níž lze teoretickou radiaci vypočítat.

Pro výpočet evapotranspirace jiného porostu je referenční evapotranspirace ET₀ v rámci dané metodiky přepočtena tzv. plodinovým koeficientem (crop coefficient) K_c na potenciální evapotranspiraci daného porostu:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Tento koeficient je pro různé plodiny jiný a navíc se mění v čase v závislosti na vývoji vegetace v průběhu sezóny. Dalším přepočtem lze získat tzv. aktuální evapotranspiraci, a to pomocí koeficientu stresu suchem (K_s) stanoveného na základě znalostí půdní vlhkosti, resp. na základě aktuální dostupnosti vody pro danou plodinu. Zde již do výpočtu vstupují informace o srážkách a případných závlahách, informace charakterizující schopnosti půdy pojmout vodu a informace o schopnosti plodiny vodu z půdy čerpat. Kompletně je metoda popsána ve zmíněné příručce FAO 56.

3.1.2.3.2 Vstupní data pro výpočet evapotranspirace

Evapotranspiraci pěstovaných plodin v ovocných sadech lze vypočítat empiricky s pomocí měření vybraných charakteristik. Data mohou pocházet z vlastních nebo externích zdrojů.

Data potřebná k výpočtu potenciální a aktuální evapotranspirace, případně modelové vlhkosti půdy či závlahové dávky je možno rozdělit do následujících skupin:

- ▶ informace o geografii lokality,
- ▶ informace o půdě,
- ▶ informace o vegetaci,
- ▶ meteorologická data.

Informace o geografii lokality

Základní geografickou informací charakterizující polohu výpočetního bodu (např. stanice, pozemku) je zeměpisná šířka, délka a nadmořská výška. Zeměpisná šířka se v některých modelech používá pro výpočty související se slunečním zářením. Jedná se o denní údaje svítání a soumraku užívané ke stanovení teoretické doby trvání slunečního svitu podle ročního období (resp. dne v roce). Geografické údaje je možno určit pomocí mapových portálů, ke kterým patří například nejznámější www.mapy.cz nebo maps.google.com. Některé modely navíc pracují i s informacemi o sklonitosti svahu a jeho expozici.

Informace o půdě

Informace o půdě jsou potřebné pro výpočet aktuální evapotranspirace a půdní vlhkosti. Modely pracují buď se zrnitostí půdy (udávající půdní druh) nebo s hydrologickými parametry – tzv. hydrolimity. V některých modelech je zrnitost půdy přepočtena na hydrolimity soustavou empirických funkcí (rovníc). Důležitým parametrem je hydrolimit využitelná vodní kapacita. Některé modely bilancují vstup vláhy do půdy (srážky, závlaha, ...) a evapotranspiraci na výdeje straně a touto bilancí stanovují aktuální zásobu vody v půdě, například v rozsahu využitelné vodní kapacity. Podle dostupné vláhy v půdním profilu (stupně nasycení půdního profilu) pak v modelech dochází k redukci potenciální evapotranspirace na evapotranspiraci aktuální. Pomocí údajů o půdních hydrolimitech lze aktuální nasycení půdy přepočítat na hodnoty půdní vlhkosti.

Údaje o hydrolimitech půdy lze zjistit pomocí aplikace „NearriCZ: Databáze pro odhad polní vodní kapacity a bodu vadnutí v zemědělských půdách ČR pro účely řízení závlah“ (Miháliková a kol., 2019). Dalším zdrojem informací o půdách je například geoportál SOWAC GIS Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v. v. i. (<https://geoportal.vumop.cz>) a také geoportál s databází BPEJ Státního pozemkového úřadu ČR (<https://geoportal.spucr.cz>).

Informace o vegetaci

Informace o vegetaci, které jsou používány v modelech na výpočet evapotranspirace, popisují časovou změnu v parametrech porostu ovlivňující přenos vody v systému půda – rostlina – atmosféra. Jde například o objem kořenové zóny, resp. hloubku zóny aktivního prokořenění, výšku porostu a listovou plochu. Mezi další údaje o porostech patří například vybrané fenologické fáze, které mají vliv na vývoj a vodní potřeby vegetace. Jedná se například o začátek rašení, počátek olistění, opad listů, případně sklizeň plodů. Zadané údaje bývají přepočteny na tzv. aerodynamický a povrchový odpor porostu. Zjednodušeně řečeno aerodynamický odpor v modelech ovlivňuje proudění vzduchu a tím odnos vypařené vody z povrchu rostlin, povrchový odpor reprezentuje průchod vody rostlinou a průduchy z těla rostliny (listů) do atmosféry. Tyto parametry jsou počítány podprogramy a rovnicemi v rámci jednotlivých modelů. Aerodynamický odpor vstupuje do interakce s rychlostí větru, povrchový odpor porostu vstupuje mimo jiné do interakce s ozářením (radiací) slunečním svitem, teplotou a vlhkostí vzduchu. Povrchový odpor bývá v modelech také ovlivňován dostupnou vláhou v půdě či jinými (stresovými) faktory majícími vliv na uzavírání průduchů. Metodika FAO 56 udává velké množství informací o široké škále pěstovaných plodin, které je možno využít při výpočtu evapotranspirace, a to jak potřebné údaje, tak i postupy jejich

stanovení. Taxonomickou klasifikaci jednotlivých rostlinných druhů lze nalézt na příklad v Atlase fenologických poměrů Česka, který obsahuje jak stručný popis rostlin, tak i charakteristiku fenologických projevů.

Meteorologická data

Mezi meteorologická data používaná v komplexnějších modelech patří zejména průměrná, minimální a maximální teplota vzduchu, průměrná vlhkost vzduchu, globální radiace či délka slunečního svitu, průměrná rychlost větru a úhrn srážek. Většina modelů pracuje v denním kroku, tzn. jedná se o denní hodnoty. Vlhkost vzduchu vstupuje v modelech nejčastěji ve formě tlaku vodní páry, který lze vypočítat na základě vlhkosti a teploty. Často nejsou rovněž dostupné přímé informace o sluneční radiaci. Tu lze pro potřeby modelů vypočítat z doby trvání slunečního svitu. Informace o srážkovém úhrnu nejsou většinou potřeba při výpočtu potenciální evapotranspirace. Do výpočtu vstupují až při výpočtu aktuální evapotranspirace a modelování půdní vlhkosti (zásoby vody v půdě).

V některých modelech se uvažuje s ročním během od počátku roku (1. 1.), přičemž musí být na začátku běhu (roku) zadána též počínající (iniciální) půdní vlhkost v hodnotách, se kterými pracuje daný model. V některých modelech se pro zjednodušení bere v úvahu plné nasycení profilu vodou. Stejně tak je potřeba zadat počáteční podmínky v případě spuštění modelu v průběhu vegetační sezóny. Některé modely je možno používat v kontinuálním běhu, tzn. několik let po sobě. V daném případě musí být ošetřeny podmínky v zimním období.



Obrázek 15. Účelová meteostanice pro automatický sběr dat

Vlastní měření meteorologických dat

Vlastní zaznamenávání meteorologických údajů lze provést formou pořízení a provozu účelové meteorologické stanice (Obrázek 15). Problematika měření i návrh stanice je podrobně popsána v metodice „Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin a kultur“ autorského kolektivu Středová a kol. (2016). Pokud se má měření meteorologických veličin provádět standardizovaným způsobem, popis metod a vlastností přístrojové techniky a dalších podrobností předkládá metodika Světové meteorologické organizace (WMO) č. 8: Guide to „Instruments and Methods of Observation“, která je volně dostupná na webu WMO (2021).

Vlastní měření je náročné na pořízení stanice, její údržbu a kontrolu dat. V případě potřeby automatizace procesu výpočtu evapotranspirace či dalších parametrů je nutno provozovat také vlastní datový server (nebo např. mikropočítač) připojený k meteostanici, případně využívat placenou službu externí firmy. Nicméně v dnešní době je tento způsob běžně využíván a umožňuje pružnější manipulaci s daty a jednodušší automatizaci procesů.

Externí zdroje meteorologických dat

Státem garantované měření a poskytování meteorologických dat v rámci České republiky provádí Český hydrometeorologický ústav. Aktuální i historická data lze nalézt na internetových stránkách www.chmi.cz. V době vzniku této publikace ještě nejsou všechna data volně dostupná, nicméně data popsána pro potřeby výpočtu evapotranspirace jsou jako historická data (stáří 1 roku a dále) volně ke stažení v denním kroku. Aktuální data jsou zveřejněna online na stránkách ústavu ve formě tabulek. Potřebná data v jiném než zveřejněném rozsahu lze pořídit na oddělení meteorologie a klimatologie na každé pobočce ČHMÚ. K dispozici jsou data o srážkách z cca 800 stanic, ostatní popsané veličiny měří bezmála 200 stanic, přičemž počet stanic s měřením srážek, teploty a vlhkosti vzduchu je cca 250 (stav k roku 2022). Data pro neměřené lokality lze orientačně vypočítat prostorovou statistikou (interpolací). ČHMÚ provozuje na vybraných stanicích i měření vlhkosti půdy a na profesionálních stanicích také výpar z vodní hladiny.

Na internetových stránkách různých organizací, měst či firem lze najít další meteorologická data, avšak tyto produkty mohou mít rozdílný přístup k měření dat. Jednak z hlediska použité přístrojové techniky a jejího umístění, tak i z hlediska kontroly dat.

Velké množství meteorologických dat, včetně aktuálních, lze nalézt na stránkách společnosti AMET (www.amet.cz/meteodupont.htm). Data jsou k dispozici nejčastěji v 10 nebo 15 minutovém kroku. Vedle klimatických dat jsou zde i data o vlhkosti půdy.

Přístup k datům z celého světa je možný přes portál Climate Data Store provozovaný v rámci programu Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Je zde možno získat jak naměřená data, tak výsledky modelů klimatických scénářů do budoucnosti.

V případě potřeby provedení výpočtu modelů pro blízkou budoucnost je nutno získat data předpovědi počasí. Informace o předpovědi počasí poskytují národní meteorologické služby, případně ostatní organizace provozující předpovědní modely, anebo společnosti poskytující přehled dat jiných subjektů (neprovozují vlastní modely). Předpovědi počasí jsou k dispozici na nespočtu webových stránek, příkladem lze uvést národní meteorologickou službu –

Český hydrometeorologický ústav – www.chmi.cz a další portály: www.agropocasi.cz, www.windy.com, www.yr.no, charts.ecmwf.int, www.meteopress.cz, www.medard-online.cz a další.

Kromě nezastupitelné pozice člověka meteorologa, jsou předpovědi počasí dnes z velké části výstupem meteorologických modelů. Meteorologické modely počítají z počátečního stavu atmosféry v daném čase předpovědní hodnoty jednotlivých prvků, které v souhrnu popisují předpovídaný budoucí stav atmosféry. Časovou integrací rovnic popisujících dynamiku, termodynamiku a energetiku atmosféry počítají především složky proudění. Dále jsou pak pomocí různých složitých parametrizací nepřímo dopočítávány další prvky jako např. množství a intenzita srážek a oblačnost. Z hlediska rozsahu území uvažovaného v modelech existují modely lokální a globální.

Globální předpovědní modely simulují chování atmosféry na celé Zemi. Jsou výpočetně velmi náročné. Nejznámější jsou americký model GFS, model ISF Evropského centra pro střednědobou předpověď ve Velké Británii (ECMWF) nebo model ARPA GE Meteo France.

Lokální modely počítají předpověď počasí pro omezené území, případně vychází z výsledků globálního modelu a tyto výsledky zpřesňují. V Česku je nejpoužívanějším lokálním modelem ALADIN, který na území České republiky provozuje Český hydrometeorologický ústav. Vlastní lokální model provozují téměř všechny národní meteorologické služby v Evropě a existuje i několik modelů soukromých společností a výzkumných center. Příkladem takového modelu je model Medard provozovaný Akademií věd ČR.

3.1.2.4 Metody modelování evapotranspirace

V současné době existuje mnoho počítačových programů – modelů, jejichž výsledkem je evapotranspirace (referenční, potenciální či aktuální), případně modelová zásoba vody v půdě (nasyčení půdního profilu vodou) anebo i doporučené množství závlah. Z hlediska principu výpočtu evapotranspirace modely převážně pracují s různě modifikovanou Penmanovou rovnicí, ve které se používají různé koeficienty či dílčí algoritmy pro výpočet těchto koeficientů.

Kromě přepisu uvedených rovnic v tabulkovém procesoru (např. MS Excel) je volně dostupnou jednoduchou formou výpočtu evapotranspirace například balíček „EcoHydroTools“ nebo „Evapotranspiration“ v rámci volně dostupného programovacího jazyka R (www.r-project.org).

Mezi modely či aplikace (programy), které obsahují rovnice na výpočet evapotranspirace, pomocné koeficienty a další metody patří například AVISO, SoilClim, Kalkulačka vláhové potřeby, ZAPROG 1 a IRRIPROG, AquaCrop a ETo calculator (bližší informace jsou uvedeny dále).

Model AVISO

Model je provozován na odd. meteorologie a klimatologie ČHMÚ Brno a byl popsán v rámci disertační práce jeho provozovatele. Model částečně vychází z britského modelu MORECS (Hough a Jones, 1997), principem používá metodu výpočtu evapotranspirace Penman-Monteith a metoda výpočtu je s metodou FAO 56 obdobná. Některé algoritmy a koeficienty jsou převzaty z modelu MORECS a některé jsou upraveny pro použití v podmínkách ČR.

Model je používán pro výpočet agrometeorologických charakteristik standardních povrchů (voda, holá půda, travní porost), zemědělských plodin a testuje se v rámci výzkumu a vývoje také pro lesní porosty a ovocné sady. Do výpočtu vstupují parametry modelového povrchu/porostu a dále sada meteorologických prvků z databáze ČHMÚ. Jedná se o průměrnou denní teplotu vzduchu, průměrný denní tlak nasycení vodní páry (nebo průměrnou vlhkost vzduchu), průměrnou denní rychlost větru, dobu trvání slunečního svitu a denní úhrn srážek. Některé z výstupů modelu jsou k dispozici na webových stránkách ČHMÚ v rámci služby Monitoring sucha ČR. Model není volně dostupný, nicméně jeho výstupy jsou součástí výstupů ČHMÚ a vybrané výstupy tvoří odborné publikace vč. výzkumné činnosti.

Model SoilClim

Tento model vyvinul široký vědecký tým včetně odborníků na danou problematiku z USA. Program lze nalézt i ke stažení na stránce www.snowmaus.wz.cz

Základem modelu je metodika FAO 56, dílčí algoritmy či metody byly upraveny v rámci výzkumných aktivit tvůrců modelu. Z hlediska meteorologických prvků vstupuje do modelu SoilClim maximální a minimální denní teplota vzduchu, průměrná denní vlhkost vzduchu, globální solární radiace, průměrná rychlost větru a úhrn srážek.

Ústav výzkumu globální změny Akademie věd České republiky (CzechGlobe), Mendelova univerzita v Brně a Státní pozemkový úřad provozují webový portál Intersucho.cz, který prezentuje mimo jiné výsledky modelu SoilClim.

Součástí velmi komplexního systému (prezentovaného na webovém portálu intersucho.cz) je, kromě modelových výsledků, také například informace ze sítě expertních zpravodajů z oblasti zemědělství, lesnictví, ovocnářství, vinařství, školkařství a příbuzných oborů, poskytující pravidelná týdenní hlášení posuzující aktuální stav sucha a jeho dopadů. Dále jsou v tomto systému využívány satelitní snímky z programu dálkového průzkumu Země.

Kalkulačka vláhové potřeby

Jedná se o produkt dostupný na webové stránce vlaha.vumop.cz, který provozuje Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i. Oproti modelům (výpočtovým programům) je tento produkt nástrojem pro zobrazení dlouhodobých hodnot vláhové potřeby pro konkrétní půdní blok LPIS. Pro půdní bloky byly vypočteny dlouhodobé hodnoty vláhové potřeby jednotlivých plodin za období 1981–2010 a 2009–2018 z databáze ČHMÚ a uživatel systému tak nemusí žádná data zadávat. Stačí vybrat půdní blok, plodinu a hodnocené období. Na grafu se zobrazí průměrná dlouhodobá vláhová potřeba, kterou si lze porovnat například s průběhem počasí v daném roce nebo porovnat modelové hodnoty pro různé typy plodiny na daném půdním bloku.

Výchozím podkladem pro vývoj kalkulačky vláhové potřeby byla norma ČSN 75 0434 (Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu, 2017) a metodika FAO 56.

ZAPROG 1 a IRRIPROG

Jedná se o výpočetní programy vyvinuté ve Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půdy, v. v. i. Na základě zadaných vstupních hodnot vypočtou kromě evapotranspirace (metodou FAO 56) také velikost závlahové dávky pro zadanou plodinu. Mezi vstupní údaje potřebné k výpočtu patří průměrná teplota a vlhkost vzduchu, globální radiace, průměrná rychlost větru, úhrn srážek a dále půdní charakteristiky: půdní hydrolimity a vodní potenciál, obsah půdní vlhkosti, dále údaje o pozemku jako je výměra, sklon, nadmořská výška, zeměpisné souřadnice, a údaje o plodině včetně agrotechnických termínů setí/sázení, sklizeň, hloubka navlažení a další.

Jedná se o program založený na bilanci obsahu vody v půdě. Program umožňuje uživatelům závlahy pomocí vlastní výpočetní techniky stanovit potřebu doplňkové závlahy pro pěstované plodiny na jejich pozemku ve vegetačním období. Program je možné využívat pro řízení závlah plodin postřikem nebo mikrozávlahou na pozemcích o jakémkoliv výměře.

AquaCrop a ETo calculator

Jedná se o volně stažitelné výpočetní programy publikované pod záštitou Organizace spojených národů pro výživu a zemědělství (FAO). ETo calculator slouží pro stanovení referenční evapotranspirace dle metodiky FAO 56. Program AquaCrop je model růstu plodin který simuluje odezvu výnosu na dodávku vody. Používá relativně malý počet vstupních parametrů a většinou intuitivních proměnných, které vyžadují jednoduché metody pro jejich určení. Výpočetní postupy jsou založeny na základních a často složitých biofyzikálních procesech, aby byla zaručena přesná simulace odezvy plodiny v systému rostlina–půda. Jedná se o velmi obsáhlý program s kvalitně zpracovanou dokumentací. Stažení programů a podrobné informace lze nalézt na webových stránkách: <https://www.fao.org/aquacrop> a <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en>

Komerční programy pro závlahy ovocných dřevin

Existuje řada sofistikovaných programů dedikovaných přímo pro stanovení potřeby pro závlahy ovocných dřevin. Tyto programy zpracovávají data pro výpočet evapotranspirace v denním sledu a umožňují variabilní nastavení režimů pro zavlažování podle zvolené strategie. Jejich provedení bývá uživatelsky přístupné umožňující grafickou vizualizaci výsledků prostřednictvím webového rozhraní včetně sugestivního hodnocení stavu vodní bilance pěstovaných plodin. V řadě případů jsou tyto programy dostupné pro on-line kontrolu stavu porostů a umožňují i ovládání prvků závlahových systémů přímo z mobilního zařízení. Tyto programy jsou však zpravidla poskytovány pouze komerčně a to formou softwaru nebo služby, např:

<https://www.itk.fr/en/research-and-development-projects/vintel-orchards/>

<https://www.swansystems.com/industries/horticulture/>

V rámci využití dálkového průzkumu Země (DPZ) jsou některé rovnice výpočtu evapotranspirace a modely aplikovány do následného zpracování (post processing) snímků Země.

Mezi takové produkty a projekty patří například:

MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD 16) – University of Montana – <http://www.nts.gov/project/modis/mod16.php>

Crop productivity and evapotranspiration indicators from 2000 to present derived from satellite observations – Copernicus Climate Change Service – <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agroproductivity-indicators>

Sentinels for Evapotranspiration (Sen-ET) – European space agency (ESA) – <https://www.esa-sen4et.org>

3.1.2.5 Interpretace výsledků a řízení závlah

Popsané metody – rovnice i modely – poskytují buď informaci o evapotranspiraci porostu nebo přímo modelovou zásobu půdní vláhly (~ vlhkost půdy) anebo vláhovou bilanci, tedy kvantifikaci přebytku či deficitu srážek vůči evapotranspiraci. Většina modelů poskytuje výsledky v jednotkách, které jsou ekvivalentem srážek – tzn. mm vodního sloupce. Pro některé aplikace je nutno dané hodnoty přepočítat například na $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ či jiné veličiny používané v závlahářské praxi. Potřeba pro spuštění závlahy nastává, když součet vláhového deficitu zjištěného za uplynulé období dosáhne objemu stanovené optimální dávky. Důležitým faktorem je kvantifikace optimální vlhkosti či objemu půdní vláhly (vlhkost v obj. %, či v procentech využitelné vodní kapacity), kterou je potřeba pomocí závlah udržovat. Vzhledem k povaze vstupních a výstupních procesů systému umožňují plnou automatizaci závlahy. Tedy když je naplněná potřeba, dojde k automatizovanému spuštění otevřením ventilu a proběhne závlaha v nastavené dávce.

3.1.3 Metoda stanovení vláhové potřeby založená na fyziologické reakci rostlin

Pro stanovení potřeby závlah je možné využít metodu založenou na hodnocení fyziologické reakce rostliny. Z tohoto pohledu lze rostliny vnímat jako „biosensory“, které integrují vliv dostupnosti půdní vláhly, výparného potenciálu atmosféry a vlastností rostliny samotné. Rostliny reagují na stres suchem velkým množstvím fyziologických odpovědí, jejichž studiem se zabývá obor fyziologie rostlin.

3.1.3.1 Principy metody

Teoretickou výhodou metod založených na fyziologické reakci rostliny oproti metodám založeným na půdní vlhkosti či vodní bilanci pozemku, je jejich přímé zaměření na stav plodiny, nikoliv na stav prostředí, v němž se plodiny nachází. Metody založené na fyziologické reakci rostliny tak umožňují např. lépe odhalit prostorovou heterogenitu v potřebě závlah, nebo pomáhají lépe vztáhnout potřebu závlahy k fenologickému vývoji či stáří plodiny. Dalším důležitým použitím fyziologických metod je precizní nastavení deficitní závlahy, která má přínos jak v úspoře vody, tak ve zlepšení kvantitativních a kvalitativních výnosových parametrů. Nevýhodou těchto metod je nutnost disponovat specializovaným a často

dosti drahým přístrojovým vybavením. Další limitací spojenou s využitím především konvenčních neautomatizovaných metod stanovení vodního stavu rostliny je i jejich složitost a s ní související potřeba provádět měření a vyhodnocení výsledků kvalifikovaným pracovníkem. Druhou možností, je pak využití automatických kontinuálně snímajících senzorů vybraných fyziologických procesů rostliny, u kterých společně s automatizovaným nastavením závlahového systému tato potřeba odpadá.

Vodní stav rostlin lze v praxi hodnotit následujícími metodami:

Vodní potenciál rostlin – představuje základní veličinu, která popisuje vodní stav rostliny. Jedná se o vyjádření chemické energie vody v systému. Konvenčně se vyjadřuje v jednotkách tlaku a udává tenzi vodního sloupce v cévách vodivých pletiv.

Průduchová vodivost – průduchy jsou miniaturní otvůrky na listech rostlin, jimiž dochází k výparu vody z listů a jimiž zároveň do rostlin proudí oxid uhličitý z okolního vzduchu, který je nezbytným substrátem pro fotosyntézu. Průduchy jsou velmi citlivé na vodní deficit a na nedostatek vody reagují zavíráním. Snížení průduchové vodivosti listu proto může být velmi dobrý indikátor stresu suchem, a tedy závlahové potřeby plodiny.

Změna obvodu kmene – další metodou, která přináší informace o vodním stavu rostlin a působení stresu suchem, je měření změn v obvodu kmene automatickými dendrometry. Tato měření zaznamenávají nejen postupný růst kmene do šířky na základě přirůstání dřevných svazků, ale i pravidelné rozpínání kmene během noci a jeho smršťování během dne, které nastává v důsledku ztráty vody transpirací. Velikost amplitudy této denní oscilace, tedy zmenšení denních přírůstků, či dokonce zastavení růstu, je považována za vhodný indikátor stresu suchem a závlahové potřeby.

Měření transpiračního toku – transpirační tok a jeho intenzitu lze měřit termálními metodami. Principem této skupiny metod je měření přenosu tepla, který se děje spolu s pohybem vody transpiračním proudem v dřevních svazcích. Rychlost toku a jeho změny opět poskytují podklad pro stanovení potřeby závlahy pěstovaných plodin.

3.1.3.2 Typy měřičů, způsoby instalace, provoz a technické vybavení

Měření vodního potenciálu

Nejpřímější metodou pro stanovení vodního stavu rostliny je měření vodního potenciálu jejích orgánů. Tato metoda má ve fyziologii rostlin dlouhou tradici a je technicky poměrně jednoduchá. Měření vodního potenciálu lze provádět v občasném (diskrétním) nebo nepřetržitém (kontinuálním) režimu. Při diskrétním režimu se měření provádí na odříznutých částech rostlin (nejčastěji listech) Scholanderovou tlakovou komorou (Obrázek 16). Tento přístroj sestává z ocelové nádoby opatřené víkem s gumovým těsněním, která je připojena k manometru. Do nádoby se uzavře měřený vzorek tak, aby řezná plocha řapíku vyčnívala z víka ven a vzorek byl ve víku řádně utěsněn. V nádobě se poté začne zvyšovat tlak připouštěním stlačeného dusíku nebo vzduchu z připojené tlakové lahve. Tlak v komoře je postupně zvyšován až do okamžiku, kdy se řezná plocha řapíku začne zvlhčovat vodou vytlačenou z pozorovaného vzorku. Obsluha Scholanderovy komory pečlivě pozoruje řeznou plochu řapíku a zaznamená hodnotu tlaku, při které dojde k ovlhčení řezné plochy. Při

pozorování drobných řapíků (např. u meruněk) je vhodné použít k pozorování lupu. Tlak, při kterém dojde k ovlhčení řezné plochy řapíku, nazýváme balanční tlak a odpovídá absolutní hodnotě vodního potenciálu vzorku. Vodní potenciál listu pak uvádíme jako záporné číslo, jelikož odpovídá sacímu tlaku, který rostlina potřebuje vynaložit na příjem a transport vody ve dřevních svazcích. (Obrázek 17).

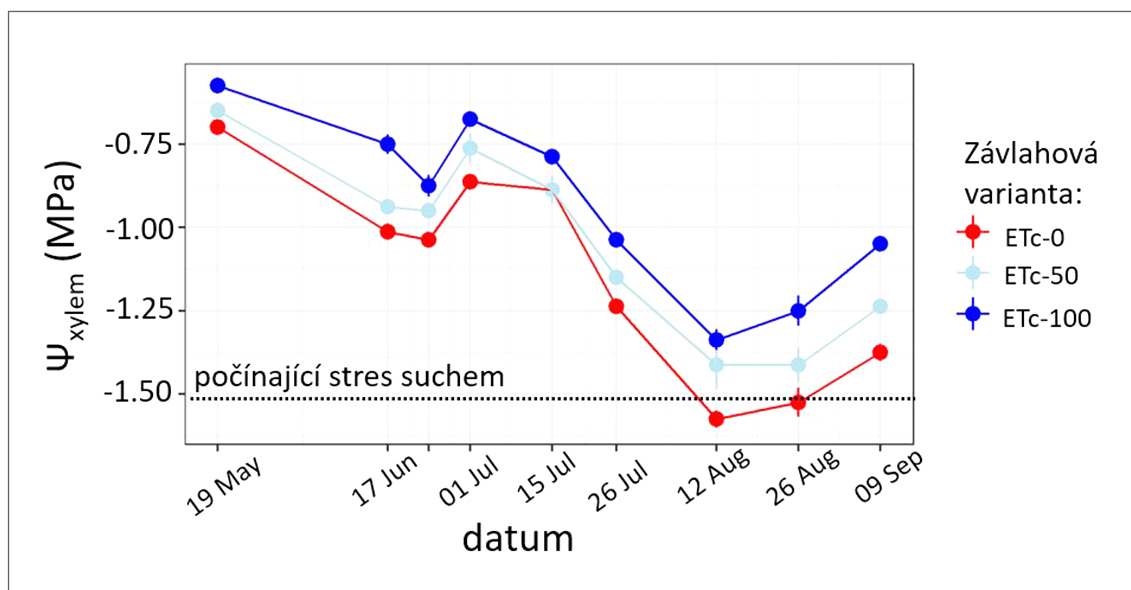
Měření vodního potenciálu lze provádět v několika modifikacích. Vodní potenciál lze měřit přímo na transpirujících listech. Takové měření je silně ovlivněno aktuální evaporací z listu a je citlivé např. na změny ozáření. Robustnějším parametrem, který se proto pro hodnocení závlahové potřeby doporučuje, je vodní potenciál dřevních svazků (xylému). Toto měření se provádí na listech, které byly po dobu alespoň 1 hodiny uzavřeny v sáčku opatřeném nepropustnou aluminiovou fólií. U takto zabalených listů, které tím pádem netranspirují, dojde k vyrovnání vodního potenciálu s xylémem. Měření vodního potenciálu listů nebo xylému by se měla provádět v době kolem poledne, kdy bývají naměřené hodnoty nejnižší (tj. nejvíce záporné). Často se též provádějí měření vodního potenciálu na listech odebraných před rozedněním. V tomto případě se předpokládá, že stromy v noci netranspirují, a dojde tak k vyrovnání vodního potenciálu mezi rostlinou a půdou. Vodní potenciál měřený před rozedněním lze tedy považovat za indikátor vodního potenciálu půdy v dosahu kořenového systému plodiny.

Takto prováděná měření vodního potenciálu umožňují kvalifikovaný odhad hraničních hodnot stresu suchem u různých druhů a v různých podmínkách prostředí. Nevýhodou je nutnost provádět tato měření manuálně v diskrétních intervalech, což znemožňuje napojení na automatické systémy řízení závlah.

Jako slibnou alternativou těchto měření se jeví nově vyvinuté kontinuálně měřící senzory typu mikrotenzometrů Florapulse pro měření vodního potenciálu (<https://www.florapulse.com/>). Měřiče se instalují na kmen stromu ze dvou stran a umožňují kontinuální snímání porostů a transfer dat na webové rozhraní, které umožňuje vyhodnocení stavu ovocných dřevin v sadech i řízení závlahy.



Obrázek 16. Scholanderova tlaková komora pro měření vodního potenciálu. Vpravo dole je list fixovaný ve víku tlakové nádoby.



Obrázek 17. Porovnání vodního potenciálu xylému (Ψ_{xylem}) u třech závlahových variant v růstové sezóně 2022. U nezavlažované varianty (ETc-0) hodnota vodního potenciálu klesla během sezóny pod -1.5 MPa, což je hranice považovaná za počátek významného stresu suchem.

Měření průduchové vodivosti a listové výměny plynů

Měření průduchové vodivosti lze provádět porometry nebo přístroji na bázi infračerveného analyzátoru plynů (Obrázek 18). Vzhledem k poměrně složité a velmi drahé přístrojové technice nacházejí tyto metody uplatnění prozatím jen ve výzkumu, nicméně ve fyziologii rostlin jsou rutinně používány. Měření probíhají na intaktních (tj. neutřzených) listech, které jsou uzavřeny do měřicí komory. List je ponechán v komoře několik minut, aby se adaptoval na nové podmínky prostředí. Sofistikovanější přístroje mají širokou škálu parametrů, které je možné ve vzorkové komoře kontrolovat (např. ozáření, vlhkost vzduchu, teplotu listu). Průduchová vodivost, rychlost transpirace a rychlost fotosyntézy je pak vypočtena z naměřených změn v koncentracích vodní páry a oxidu uhličitého v měřicí komoře. Měření listové výměny plynů jsou velmi citlivá na měnící se podmínky prostředí, proto se doporučuje provádět měření za slunečného počasí a v době kolem poledne. Ideální je před započítáním rozsáhlejšího sezónního měření proměřit také denní chody průduchové vodivosti, případně odezvu na různé hodnoty ozáření. Tato doporučení ovšem znamenají značné omezení počtu rostlin, které je možné v daný den nebo sezónu změřit tak, aby bylo možné výsledky vzájemně porovnávat. Z našich zkušeností je možné v polních podmínkách změřit v jeden den maximálně 30 rostlin.



Obrázek 18. Měření průduchové vodivosti, fotosyntézy a transpirace infračerveným analyzátozem plynů (LI-6800)

Měření změn v obvodu kmene automatickým dendrometrem

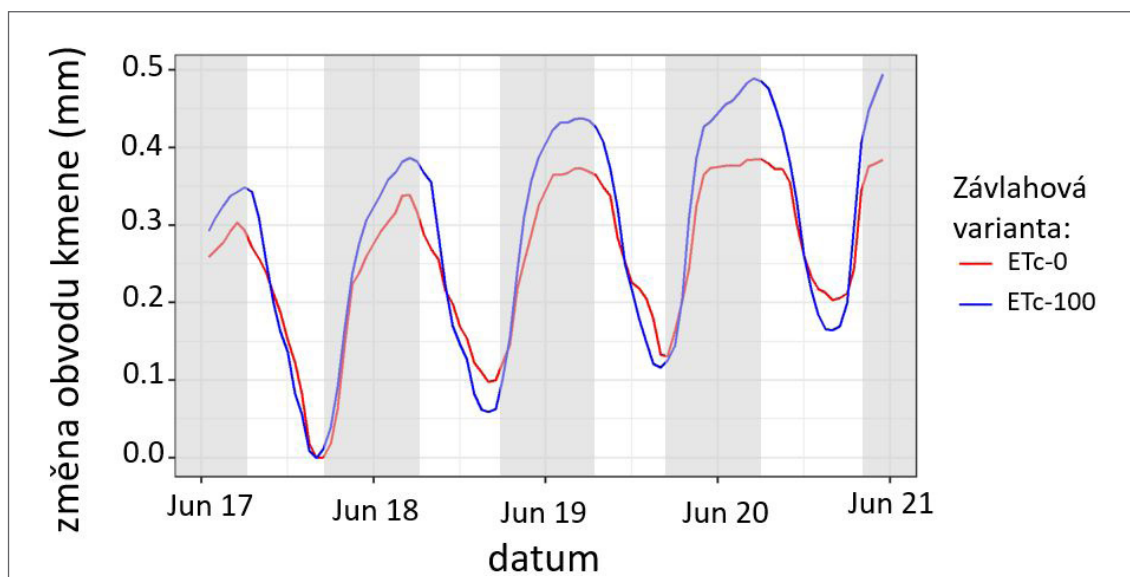
Dendrometry jsou citlivé senzory (Obrázek 19), které dokážou zaznamenat změny v obvodu nebo průměru kmene s rozlišením až $1\mu\text{m}$ v časovém intervalu 5 min. Tyto senzory se fixují na kmen stromu za pomoci ocelového pásku nebo se zavrtávají šroubem do kmene. Data jsou měřena kontinuálně a poskytují tak průběžnou informaci o změnách růstu kmene v průběhu vegetační sezóny.

Dendrometrická měření změn obvodu kmene (Obrázek 20) poskytují dobrou možnost automatizace závlah a v jižních státech Evropy (např. Španělsko, Francie) byly již vyvinuty komerční systémy jejího řízení pomocí této metody. Nicméně i v případě této metody platí, že správné provedení měření ani vyhodnocení a interpretace dat nejsou jednoduchou záležitostí. Při instalaci čidel je třeba brát v úvahu teplotní senzitivitu měření. Ačkoliv jsou čidla vyráběna z materiálu s malou teplotní roztažností, v sadu se dendrometry doporučuje instalovat tak, aby na ně co nejméně svítilo přímé slunce. Je také třeba dbát na to, aby ocelový pásek, jímž se dendrometry na kmen fixují, přiléhá pevně k obvodu kmene. U starších stromů je proto někdy nezbytné oškrábat vnější odlupující se vrstvu kůry. U mladých stromů může naopak držák dendrometru vyvolat vznik prasklin v kůře, což může negativně

ovlivňovat kvalitu snímaných dat. Dendrometry je třeba pravidelně kontrolovat a přeinstalovat je v případě, že přírůstek kmene překročí měřitelný rozsah. Reinstalace dendrometrů ve většině případů postačí jednou za 1–2 roky, ale u rychle rostoucích stromů může být tento interval i kratší.



Obrázek 19. Automatický (nahore) a manuální (dole) páskový dendrometr nainstalovaný na kmeni jabloně



Obrázek 20. Změna obvodu kmene během pěti dnů zaznamenaná automatickým dendrometrem u nezavlažované (ETC-0) a zavlažované (ETC-100) varianty ve výsadbě jabloní. Kmen pomalu přirůstá a zároveň je patrná pravidelná oscilace související se změnou zásoby vody v kmeni. Denní přírůstky i amplituda oscilace jsou nižší u nezavlažované jabloně.

Měření transpiračního toku

Poslední rostlinně-fyziologickou metodou, které se budeme podrobněji věnovat, je měření transpiračního toku termálními metodami. Tato měření lze provádět v různých modifikacích, nicméně jejich společným principem je, že používají měření přenosu tepla v kmenech k výpočtu transpiračního toku vody. Do části kmene se senzor instaluje tak, aby byly elektrody čidla zapuštěny do cévních svazků pod kůru ovocného stromu. Kmen nebo jeho část je zahříván (kontinuálně nebo pulsem) a monitoruje se přenos tohoto tepla do nevyhříváných částí kmene, přičemž se předpokládá, že teplo je přenášeno zejména s transpiračním tokem. Instalované senzory proto musí být dobře izolované od vlivu prudkých změn v okolní teplotě (např. hliníkovou fólií). Základními principy komerčně vyráběných přístrojů je (v chronologickém pořadí dle doby od zavedení do praxe) měření rychlosti pohybu tepelného pulzu, tepelné bilance kmene, disipace tepla a deformace tepelného pole. Nejpřesnější jsou metody tepelné bilance, výrobně nejjednodušší metoda disipace tepla a nejméně elektrické energie spotřebuje metoda tepelného pulzu.

3.1.3.3 Interpretace měření a řízení závlahy

Vodní potenciál rostlin – Změřené hodnoty vodního potenciálu je třeba interpretovat v širším fyziologickém kontextu. Ačkoliv je vodní potenciál přímým ukazatelem vodního stavu rostliny, jeho hodnota podléhá zpětnovazebné fyziologické kontrole, jejíž parametry se liší mezi jednotlivými druhy i odrůdami plodin. Zatímco u některých druhů hodnoty vodního potenciálu kopírují vysychání půdy (tzv. druhy anizohydrické), jiné druhy (tzv. isohydrické) mají tendenci udržovat konstantní hodnotu vodního potenciálu i za podmínek zvyšujícího se sucha. Této hodnoty vodního potenciálu je dosaženo především v důsledku zavírání průduchů listů. Měření průduchové vodivosti listů je proto dalším důležitým ukazatelem vodního stavu plodiny.

Průduchová vodivost – Interpretace výsledků měření průduchové vodivosti a listové výměny plynů by měla brát v potaz rozdíly mezi izo- a anizohydrickou reakcí druhů či odrůd, jak již bylo uvedeno výše v sekci o měření vodního potenciálu. Z dlouhodobého hlediska je též možné, že rostliny v důsledku sucha sníží velikost listové plochy opadem listů, a tím zredukovat výpar nezávisle na průduchové vodivosti. Důležité je také brát v potaz rozdíly v násadě plodů, jelikož stromy s vysokou násadou plodů obvykle mají i vyšší průduchovou vodivost než stromy s nízkou násadou.

Změna obvodu kmene – Při interpretaci dat je někdy problematické oddělit od sebe změny obvodu v důsledku růstu a změny v důsledku měnění se obsahu vody. Změny obvodu kmene též citlivě reagují na srážky, kdy během deštivých dnů dochází k výraznému zvýšení obvodu kmene, pravděpodobně v důsledku nasátí vody do pletiv, které se za normálních podmínek na zásobní funkci nepodílejí. Tyto nepravidelné oscilace tak ztěžují interpretaci dat a činí rutinní použití dendrometrů v prostředí s častými srážkami (tedy i v podmínkách České republiky) problematické. Nicméně, v současné době se testují nové modely kombinující měření obvodu kmene s měřením transpiračního toku, které jsou robustnější a umožňují tyto odchylky identifikovat.

Měření transpiračního toku – Nejdůležitější parametry, které lze touto metodou získat, zahrnují objemovou hustotu toku (sap flux density) a velikost toku (sap flux), který integruje objemovou hustotu toku přes danou plochu průřezu kmene nebo běle kmene (tzn. mladší radiální část kmene obsahující funkční dřevo). Snížení objemové hustoty nebo velikosti toku lze vnímat jako indikátor stresu suchem a závlahové potřeby. Tok může být integrován i přes jednotku času a lze tak vypočítat např. tok za jeden den, který pak můžeme považovat za denní spotřebu vody stromem (daily water use). Tento parametr je z hlediska řízení závlah velmi informativní, neboť od něj lze odvozovat i doporučenou denní dávku závlahy (v mm. den⁻¹). Měření transpiračního proudu teoreticky poskytuje dobrou možnost automatizace, neboť instalované senzory měří kontinuálně a měřené parametry citlivě reagují na vodní stav rostliny. Na druhou stranu, transpirační proud citlivě reaguje na evapotranspirační požadavky atmosféry, proto je nutné jej posuzovat v kontextu aktuálního počasí. Interpretace naměřených dat je též ztížena heterogenitou v radiálních profilech toků napříč kmenem, kterou je třeba dobře charakterizovat.

Řízení závlahy

Vlastní řízení závlahy probíhá přístupem měření intenzity signálu vybraného fyziologického indikátoru vodního deficitu (IVD). Intenzita signálu (SI) je kvantifikována jako poměr IVD v závlahové variantě a IVD_r změřeného při absenci půdního sucha (tzv. referenční hodnota). Účelem tohoto výpočtu je zohlednit vliv výparu vody z rostliny do atmosféry, který vždy povede k vytvoření určitého vodního deficitu. Intenzita signálu (SI) je tedy vypočtena podle následujícího vzorce:

$$SI = \frac{IVD}{IVD_r}$$

Referenční IVD_r může být měřen na plně zavlažovaných stromech, případně určen např. před započatím zavlažování, kdy je půda ještě plně nasycena. Další možností je využít hodnoty fyziologického parametru měřené po dešti nebo v den následující po aplikaci závlahové dávky. Poslední často využívanou možností je odhad referenčního indikátoru pomocí tzv. referenčního vzorce, který vztahuje hodnotu IVD k vybranému mikrometeorologickému parametru, který souvisí s výparným potenciálem atmosféry (např. sytostní doplněk, globální radiace, referenční evapotranspirace, teplota vzduchu). Referenční vzorce však s sebou nesou určitou míru nejistoty a vztah mezi IVD a atmosférickým parametrem může být závislý na dalších významných okolnostech např. na fenologické fázi.

Dalším krokem pro určení závlahové dávky je stanovení požadované intenzity signálu. Pokud chceme zcela eliminovat půdní sucho, budeme cílit na SI = 1 (IVD závlahová varianta = IVD plně zavlažovaná varianta). Pokud budeme chtít zavlažovat v deficitním režimu, budeme požadovat SI > 1. Nastavení požadované intenzity signálu tedy provedeme podle vzorce:

$$\text{Požadovaný signál} = \text{referenční signál} \times \text{hraniční hodnota}$$

Hraniční hodnota je určena expertním odhadem na základě předchozích měření či z dostupné literatury.

Pokud tedy máme stanovený referenční signál a požadovanou hraniční hodnotu, provádíme měření IVD v cílové závlahové variantě a porovnáváme jej s požadovaným SI. V případě zjištěného rozdílu upravujeme závlahovou dávku o $\pm 10\text{--}20\%$ a tento postup pravidelně opakujeme v průběhu závlahové sezóny.

Z výše popsaného principu vyplývá, že nastavení závlah pomocí měření fyziologické odezvy rostliny vyžaduje dobrou znalost závlahového systému, která se ideálně opírá o poměrně podrobná předchozí měření. Výběr konkrétního IVD, druhově specifické parametry a vztahy potřebné k efektivnímu nastavení závlah jsou v současné době upřesňovány pro různé druhy a různé podmínky prostředí v rámci experimentálních měření. Spolu s rozvojem kontinuálně měřících senzorů, případně v důsledku kalibrace IVD s parametry získanými metodami dálkového průzkumu se v budoucnosti jistě dočkáme širšího zavedení těchto metod do praxe.

3.1.4 Metody dálkového průzkumu Země

Spolu s rozvojem technologií v oblasti průmyslu se rozvíjí i jejich využití v oblasti zemědělství, potažmo ovocnářství. Pokud se zaměříme na metody dálkového průzkumu Země (DPZ), jak už jejich souhrnný název napovídá, jedná se o metody, které získávají data vzdáleně bez přímého kontaktu s hodnocenou vegetací. Jedná se především o obrazová data. Jejich rozvoj v minulosti souvisel s vypuštěním satelitů na oběžné dráhy Země a možností využití snímků, které jsou schopny zaznamenat. V dnešní době se již nejedná pouze o snímky satelitní, mezi metody DPZ jsou zahrnuty i další platformy jako letadla či bezpilotní letouny, tzv. drony (anglicky UAV – Unmanned Aerial Vehicle). Všechny tyto platformy jsou zásadní jako nosiče senzorů, které získávají data. Tyto senzory pořizují snímky zájmové lokality, které jsou pak základním výstupem těchto technologií. Oproti klasickým stacionárním senzorům, či bodovým měřením jsou metody DPZ vždy schopny analyzovat větší plochy v kratším časovém úseku. V případě bodových měření lze takové efektivity dosáhnout pouze v případě modelování a odhadu chování rostlin v zájmové oblasti.

3.1.4.1 Principy metod DPZ

Co se týče senzorů a metod DPZ, které jsou využívány pro hodnocení kvality vegetace a nejrůznějších stresů, setkáváme se nejčastěji s využíváním vegetačních indexů. Tyto indexy jsou vlastně matematické vzorce, které pracují se získanými snímky. Snímky jsou výstupem nesených zařízení, která zaznamenávají intenzitu odrazu slunečního záření či přímo vyzařování různých povrchů (pasivní senzory), případně zaznamenávají odražené záření, které samy tyto senzory vyzařují (aktivní senzory). V případě vegetace je využíváno odrazu slunečního záření od povrchů především v oblasti blízkého infračerveného záření (Near Infra Red – zkráceně NIR). V této oblasti záření, která není viditelná lidským okem, dochází v buněčné struktuře rostlin k násobnému odrazu dopadajícího světla a tím zesílený signál je pak zachycen senzory. Z výsledných snímků je následně možné odlišit drobné rozdíly v odrazivosti, jejíž intenzita je závislá na stavbě a kvalitě rostlinných buněk. Získaná data lze porovnat právě s využitím vegetačních indexů.

Jedním z velmi často využívaných indexů je NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Jeho uplatnění v DPZ, potažmo precizním zemědělství je velice časté. Jedná se o index

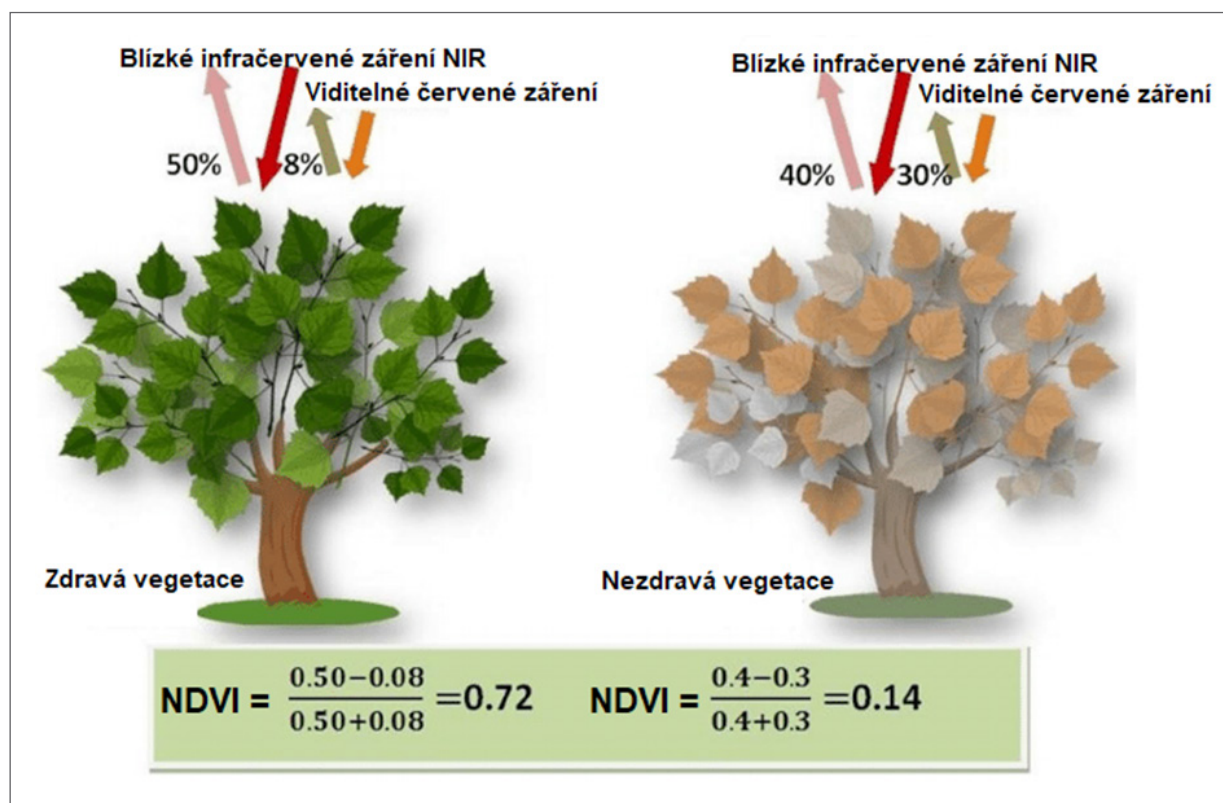
kombinující ve svém výpočtu intenzity odraženého záření v červené (RED) a blízké infračervené (NIR) části spektra.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

V průběhu let byly nalezeny určité nedostatky tohoto indexu pro aplikace v precizním zemědělství, a tak vznikly i další indexy schopné analyzovat stav vegetace. Lze jmenovat například NDRE, který využívá místo záření v délkách NIR tzv. oblast Red edge, tedy záření mezi červenou a blízkou infračervenou částí spektra, případně GNDVI (Green NDVI), který místo oblasti červeného záření pracuje se zelenou. Pro hodnocení stresu suchem existuje také index NDWI – Normalized Difference Water Index. Pro výpočet tohoto indexu se využívá záření NIR a SWIR (krátkovlnné infračervené záření; Short Wavelength Infra Red) a tento index má i své další modifikace.

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Výsledkem jsou pro všechny vegetační indexy mapy v tzv. nepravých barvách, které v hodnotách od 0 do 1 vyhodnocují stav vegetace. Pro interpretaci takových výsledků je využito základního principu snížené odrazivosti stresované vegetace v porovnání s vegetací v dobrém zdravotním stavu. Tohoto fenoménu je využíváno také pro hodnocení stresu, nelze s jeho pomocí ale detailněji určit jeho příčinu. Příklad výpočtu a interpretace pro index NDVI je uveden na obrázku 21.



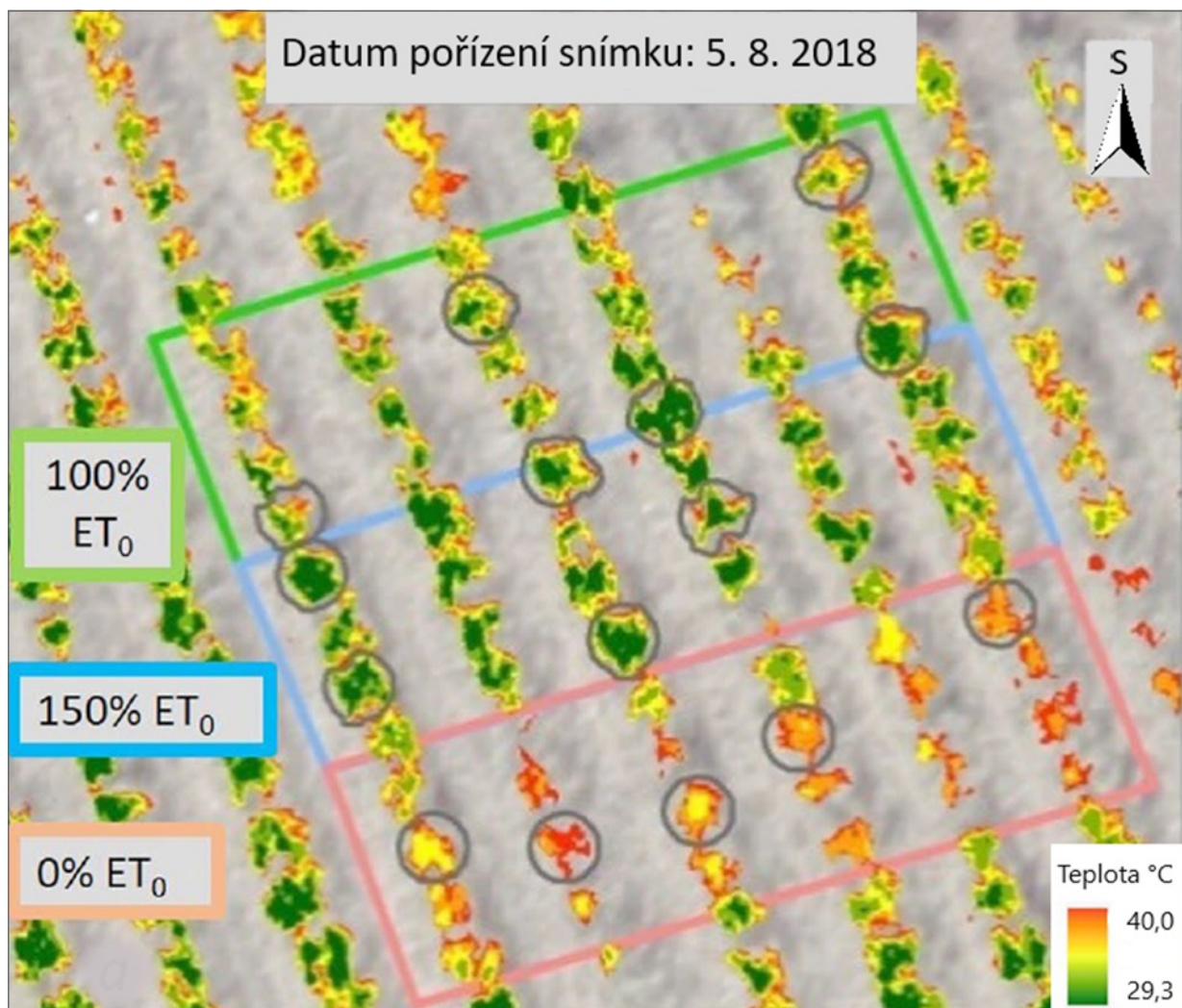
Obrázek 21. Schématické znázornění výsledků hodnocení vegetace indexem NDVI v případě zdravého porostu (vlevo) a stresovaného porostu (vpravo; zdroj: Wu a kol., 2014, upraveno)

Snížení odrazivosti slunečního záření od vegetace, tedy především listů, je způsobeno změnami v buněčné struktuře listů. V případě že vegetace trpí stresem, dochází k degradaci buněčných struktur a chlorofylu, čímž dochází k barevným změnám. Tyto změny mohou být později viditelné i lidským okem, ale kamery jsou ho díky možnosti snímání širšího spektra vlnových délek, než jen okem viditelných, mohou zaznamenat dříve. Nicméně se v případě degradace v buněčných strukturách vždy jedná o změnu oproti skutečnému stavu zpožděnou a nelze tedy tento postup doporučit pro odhad aktuální závlahové potřeby. Je možné ale jeho využitím odhalit plochy více náchylné k vodnímu stresu a tím vytvořit zónaci pozemku pro efektivnější závlahu. Borgono-Mondino a kol. (2022) nicméně prokázali možnost využití vegetačních indexů pro odhad vodního potenciálu kmene (midday stem water potential). Tito autoři využívali snímky satelitu Sentinel 2 a vegetační indexy NDVI, NDRE a modifikovaný NDWI, jejichž výsledky porovnávali s bodovými měřeními v sadu marhaníku granátového (granátové jablko).

Pro monitoring stresu suchem a jeho využití pro plánování závlah pomocí metod DPZ je tedy vhodné se spíše zaměřit na jiné parametry, než je odrazivost záření. Je možné využít termální kamery a snímky, které mají vysokou citlivost a dokáží hodnotit teploty povrchů ve vztahu k aktuálním podmínkám ovzduší (Obrázek 22). Pro tento typ dat byl vyvinut index CWSI (Crop Water Stress Index), který je schopen v daném okamžiku vyhodnotit teplotu povrchu rostliny (T_c) ve vztahu k okolní teplotě vzduchu (T_a). Zároveň do rovnice vstupují teploty dobře zavlažované vegetace ($T_c - T_a$)_{II}, která netrpí stresem suchem (T_{wet}), a představuje potenciálně nejnižší hodnotu. Druhá proměnná ($T_c - T_a$)_{ul} naopak vyjadřuje nejvyšší hodnotu vysušeného listu, který má uzavřené průduchy (T_{dry}). Oba tyto parametry je možné modelovat z naměřených teplot a dalších aktuálních parametrů atmosféry dle Idsy a kol. (1981), případně lze tyto povrchy uměle simulovat v porostu a měřit reálné hodnoty, jak uvádí autoři Poblete-Echeverría a kol. (2017). Vzorec výpočtu tohoto indexu je uveden níže včetně jeho zjednodušené verze, která je využívána za předpokladu konstantní okolní teploty.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{II}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{II}}$$

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$



Obrázek 22. Termální snímek sadu broskvoní v horkém letním dni po jeho úpravě. Zelená barva na obrázku značí nižší teplotu, červená vyšší. Jasně lze rozeznat vyšší teplotu povrchu rostlin v nezavlažované části (červeně ohraničená oblast 0% ET_0), zatímco teplota plně zavlažované (100% ET_0) zelené oblasti a intenzivně zavlažované (150% ET_0) modře vyznačené oblasti je nižší. Obdobné snímky jsou využívány pro výpočet CWSI (zdroj: Katz a kol., 2022, upraveno).

I přesto, že byl index CWSI vyvinut a je využíván pro odhad vodního režimu rostlin, ani on nepředstavuje stoprocentně nejspolehlivější metodu odhadu závlahové potřeby a míry stresu suchem rostlin. I v případě tohoto indexu tedy vývoj postupuje neustále kupředu a pro jeho zpřesňování jsou modelovány nové vztahy, které kombinují tepelné a multispektrální analýzy. Ty budou moci lépe zaznamenávat skutečnou míru transpirace korun. Aktuálně je pro modelování potřeby závlahy rostlin možné tento index využít ideálně v kombinaci s dalšími parametry naměřenými či dopočítanými pro danou lokalitu a závlahovou oblast (zónu), jako je například vodní potenciál popisovaný autory Katz a kolektiv (2022). Autoři Poblete-Echeverría a kol. (2017), zabývající se vodním režimem rostlin a jeho hodnocením pomocí metod DPZ také prokázali korelace CWSI například s vodním potenciálem kmene. Lze ho tedy využít i pro odhad těchto veličin, které jsou dále využity pro predikci potřeby závlahy.

3.1.4.2 Porovnání metod DPZ

Plánování závlahového režimu pomocí metod DPZ není zcela běžné. Jelikož je pro odhad potřeby závlahy nutné získávat data co nejvíce odpovídající skutečnému stavu, je nutné snímky pořizovat v co nejkratším pravidelném intervalu. To je také jedno z potenciálních omezení, proč nelze plně využít satelitní snímky. Ty totiž snímají stejnou lokalitu na Zemi v intervalu závisícím na výšce satelitu na oběžné dráze, čímž se určuje jejich frekvence snímání stejné lokality. Běžně se tento interval pohybuje v rozmezí 4–10 dnů. V případě špatné meteorologické situace, především při výskytu oblačnosti pak může dojít ke znehodnocení snímku, kdy oblačnost částečně či zcela zakryje zájmovou oblast a snímek nelze v tento den využít pro analýzy. Z hlediska vývoje vegetace a různých pěstebních regionů se pak může potřeba vyhodnocování lišit jak v průběhu sezóny, tak i mezi jednotlivými lokalitami či regiony. Vhodnou variantou pro pravidelné přelety je snímání s pomocí letadel či dronů. Zejména drony, nebo také bezpilotní letouny, se pro svou relativně jednoduchou obsluhu a schopnost pořizovat snímky ve vysokém rozlišení dostaly do popředí v oblasti využití metod DPZ v precizním zemědělství. To je v ovocnářství zásadní vzhledem k systémům pěstování ovocných dřevin v moderních tvarech štíhlých větven především u jablek. Vyšší rozlišení umožňuje postihnout co největší část koruny stromu a získané výsledky tak lze považovat za relevantní. Pro své nedostatečné rozlišení v řádech až desítek metrů je totiž pro využití v ovocnářství většina volně dostupných satelitních snímků nevhodná. Přesnější družicové snímky jsou ve většině případů poskytovány za úplaty soukromými společnostmi. Přesto jejich rozlišení nedosahuje takových přesností jako rozlišení snímků z letadel či dronů.

Pro hodnocení pomocí vegetačních indexů jsou důležité také parametry senzoru, který je nesen danou platformou a získává data. Znamená to mimo jeho prostorového rozlišení především spektrální rozlišení, které udává, v jakých pásmech a s jakým rozsahem je schopen zachytávat odražené či vyzařované záření. V zásadě rozlišujeme 3 typy senzorů. Nejjednodušší z nich, panchromatické nebo také monochromatické, snímají vždy pouze jedno širší pásmo vlnových délek. Snímek se pak jeví černobíle. Kombinaci několika spekter včetně spektra infračerveného pak snímají kamery multispektrální a hyperspektrální. Z těchto kamer již můžeme získávat jak snímky panchromatické v jednom pásmu, tak i snímky kombinující několik pásem, které už vytváří barevné snímky (mapy) kombinací spekter. V případě kamer multispektrálních jsou snímána pásma široká v rozsahu několika desítek nanometrů, zatímco pásma hyperspektrální kamery jsou velmi úzká a ve výsledku tvoří vlastně kontinuální křivku odrazivosti pro daný povrch. V případě hodnocení vodního deficitu pomocí CWSI jsou využívány senzory termální, u nichž je důležité, aby byly dostatečně citlivé pro rozeznání jemných teplotních rozdílů. Zároveň je pro jejich praktické využití třeba brát v potaz i aktuální meteorologickou předpověď a aktuální parametry prostředí, jako je teplota vzduchu, vlhkost apod.

3.1.4.3 Provozní využití metod DPZ pro stanovení potřeby závlahy

Jak již bylo zmíněno, metody DPZ jsou schopny snímat velké plochy v relativně krátkém časovém intervalu. To tyto metody předurčuje k jejich využití i pro větší pěstební plochy. Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům nosičů, senzorů, potřebě znalostí v oblasti

zpracování snímků a práci se specializovanými softwary a specializovaným oprávněním pro přelety drony nebo letadly je nicméně v dnešní době běžnější využívání těchto metod formou služby od specializovaných firem a odborníků. Tento způsob získávání dat se ale může při splnění podmínky co nejčastějších a v pravidelných intervalech prováděných přeletů stát velmi nákladným a časově náročným vzhledem k nutnosti zpracování digitálních snímků, jejich vyhodnocení a využití v praxi. Proto jsou v oblasti závlah metody DPZ častěji využívány pro vytvoření určité zonace pozemků na základě parametrů zájmové lokality.

Vytvoření zonace pozemku znamená, že informaci získanou jednou z metod DPZ využijeme k rozdělení pozemku na menší celky, které jsou si podobné svými vlastnostmi a lze je považovat za homogenní. Důležitou roli v tomto ohledu hraje jak velikost pozemku, tak jeho orientace ke světovým stranám, topografie, půdní podmínky, pěstovaný druh apod. Pro tyto účely je pak vhodné využít nejen vegetačních indexů, termálních snímků, analýz půd apod. ale také praktických zkušeností pěstitele. Vhodné je zonaci provádět také na základě historických dat, která mohou lépe napovědět o charakteristikách lokality. K tomu lze opět využít data získaná metodami DPZ. Pravidelným snímkováním je možné získávat soubor dat s cennými informacemi vytvářejícími časovou řadu, ke kterým se lze dle potřeby vracet a hodnotit zpětně provedené zásahy. Analýzy historických dat také umožňují lépe odhalit určité trendy, které mohou být v rámci hodnocení pouze jednotlivých ročníků skryty. Zonaci pozemků je vhodné aplikovat nejen při využívání metod DPZ, ale i v případě dalších metod hodnocení závlahové potřeby pěstovaných rostlin.

Při vyhodnocování dat získaných výpočty vegetačních indexů je třeba mít na paměti skutečnost, že v různých termínech mohou být ovlivněna aktuální meteorologickou situací. Jejich výsledek může být taktéž ovlivněn různými fenologickými fázemi a genotypy rostlin. Zmíněné parametry je třeba brát v potaz především při porovnávání jednotlivých termínů hodnocení, aby byla zaručena určitá standardizace. Výsledky totiž mohou být ovlivněny jak stavem atmosféry, například výskytem oblačnosti, množstvím částic rozptýlených v ovzduší apod., ale samozřejmě i samotný vodní režim rostlin je ovlivňován aktuální meteorologickou situací. Při zohlednění těchto vstupů se lze skutečně co nejvíce přiblížit množství vody, které rostlina potřebuje doplnit a maximálně tak zefektivnit využití závlahové dávky na jednotku produkce. Zároveň je pak možné vytvářet datové řady hodnocení vodního režimu rostlin a ty správně interpretovat.

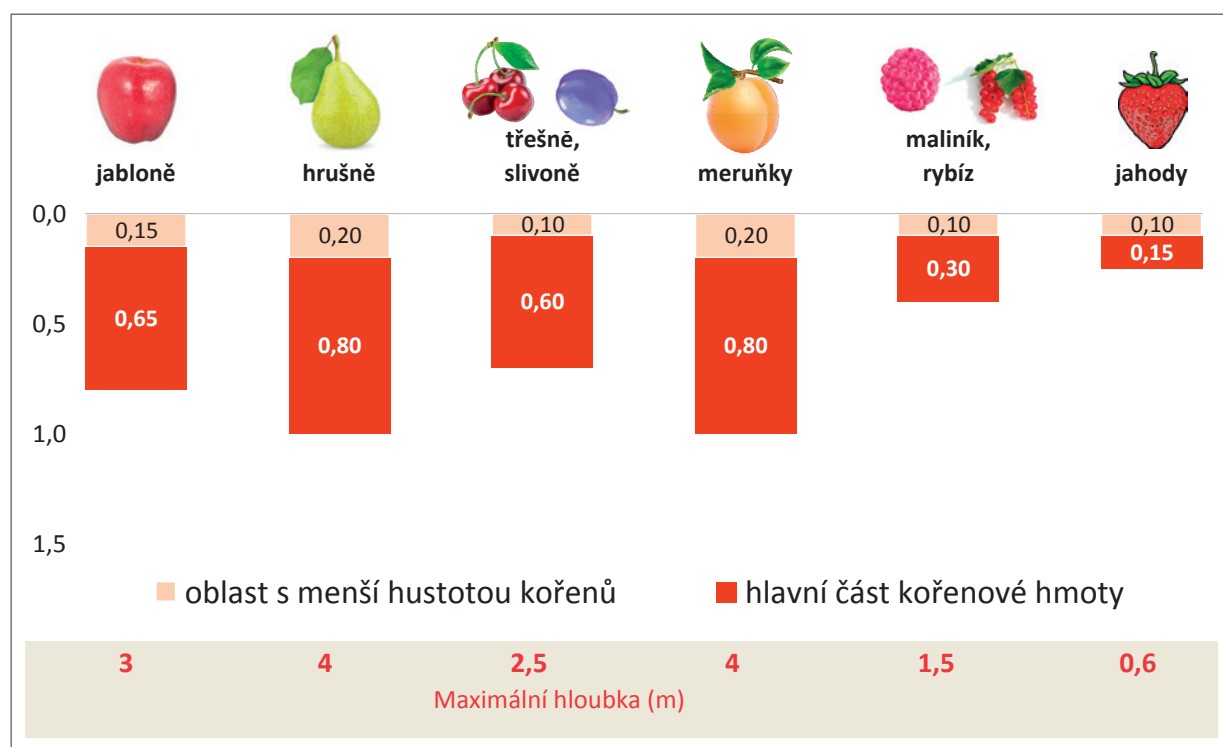
3.2 Stanovení závlahové dávky

Závlahová dávka představuje jednorázové množství vody potřebné pro dostatečné zavlažení ovocných dřevin ve výsadbě. Její objem se odvíjí od již popsané kapacity půdy pro zadržování vláhy, resp. od dosaženého vláhového deficitu na pozemku, hloubky a tvaru kořenové soustavy a závlahového detailu. Vzhledem k poměrně podrobnému popisu prvních dvou podmínek v kapitolách 3.1.1 a 3.1.2 se v této kapitole zaměříme na charakteristiku kořenové soustavy a vlivu závlahového detailu.

3.2.1 Kořenová soustava ovocných dřevin

Celkové množství vody dostupné pro rostliny, včetně ovocných dřevin, závisí kromě hydro-pedologických znaků, na hloubce kořenů a jejich horizontálního rozsahu. Výzkum kořenů se zabývá řadou detailních morfologických a fyziologických znaků kořenů, charakterem větvení kořenů, celkovou geometrií a topologií kořenového systému, které ve větší či menší míře ovlivňují příjem vody a živin. Z hlediska rozložení kořenů ve vztahu k příjmu vody můžeme situaci zjednodušit tak, že ovocné stromy jsou schopny odčerpávat vodu z celé kořenové zóny, tj. objemu půdy, kde se vyskytují kořeny.

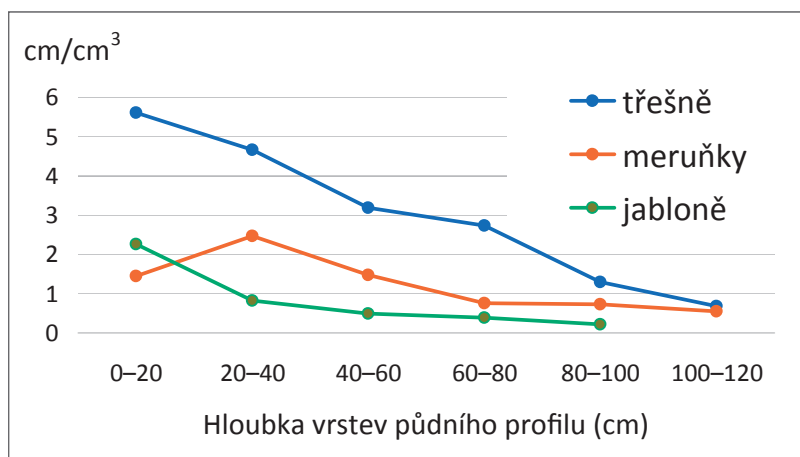
Velikost kořenového systému ovocných stromů závisí na mnoha faktorech. Z těch nejvýznamnějších jsou to druh a stáří ovocných dřevin, typ použité podnože a dané vláhové a půdní podmínky. Obecně lze říci, že ovocné stromy mohou mít intenzivní růst kořenů do stran i do hloubky, ale hlavní část kořenové hmoty je soustředěna v úrodnější vrchní vrstvě půdy. Na obrázku 23 jsou uvedeny údaje o maximální hloubce kořenů vybraných ovocných druhů, které jsou jednotlivé druhy schopny za vhodných podmínek dosáhnout. Pro příjem vody a živin je však důležitější část půdy, kde se vyskytuje hlavní část kořenové hmoty. Z uvedených hodnot je patrné, že v průměru hlouběji pod povrchem půdy je soustředěna hlavní část kořenové hmoty u hrušní a meruňk.



Obrázek 23. Maximální hloubka a soustředění hlavní části kořenové hmoty v půdním profilu u vybraných druhů ovocných dřevin (Blažek a kol. 1998, upraveno dle vlastních měření autorů publikace)

Praktická ukázka rozložení kořenové soustavy u tří ovocných druhů je uvedena na obrázku 24. Z obrázku, i přes určitý rozdíl ve věku výsadby, je patrné, že kořeny jednotlivých druhů mají rozdílné rozložení v půdním profilu. Na zájmových lokalitách uvedené druhy peckovin

tvoří hlubší a bohatší kořenový systém v porovnání s jabloněmi v intenzivních výsadbách. Je třeba připomenout, že růst kořenů je obvykle také závislý na půdních a klimatických podmínkách a managementu výsadeb.



Obrázek 24. Hustota kořenů ve vrstvách půdního profilu u třešně ('Sweet Early'/Gisela 5, stáří 14 let), meruňek ('Bergarouge'/Wawit, stáří 13 let) a jabloní ('Red Jonaprince'/M9, stáří 9 let)

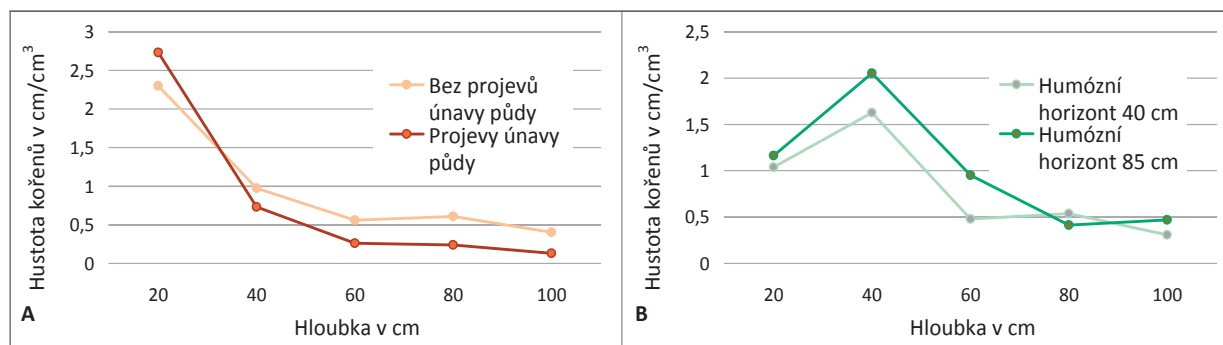
Z hlediska podnože bývá mohutnější a hlubší kořenový systém u generativně množných (semenných) podnoží než u podnoží množných vegetativně. Ale i v rámci vegetativních podnoží je předpoklad větších rozdílů. V tabulce 1 je uvedena hustota kořenů v hlubších vrstvách půdy u jabloní odrůdy 'Jonagold' a hrušni 'Williams', které byly pěstovány ve stejném sadu, ale na podnožích s různou intenzitou růstu. Stromy s podnožemi zakrslejšího růstu vykazovaly ve stejných vrstvách půdního profilu nižší hodnoty hustoty kořenů.

Tabulka 1. Hustota kořenů jabloně odrůdy 'Jonagold' a hrušně 'Williams', pěstované na různých podnožích, v hlubokých vrstvách půdního profilu (cm/cm³)

Jabloň	vrstva půdy	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	100-120 cm
Jonagold - J-TE-G (zakrslý růst)		0,34	0,23	0,20	0,21
Jonagold - J-TE-H		0,96	0,72	0,42	0,35
Hrušeň	vrstva půdy	80-100 cm	100-120 cm	120-140 cm	140-160 cm
Williams - S1 (zakrslý růst)		0,34	0,16	0,27	
Williams - PS		0,73	0,41	0,37	0,20

Z půdních podmínek má podobně jako u polních plodin negativní vliv na kořenový systém půdní únava, utužení půdy, kamenité podloží nebo těžká, jílovitá půda. Nevhodné je i zamokření nebo nadbytek solí a sucho.

Na obrázku 25 je na příkladu jabloní vidět, že únava půdy může nepříznivě ovlivňovat hloubku prokořenění a tím i rozsah aktivní části kořene. Odlišná mocnost úrodnějšího, humózního půdního horizontu (v rámci jednoho sadu) měla za následek vyšší hustotu kořenů meruněk v části sadu s větší mocností tohoto horizontu. Zvláště na svažitéjších pozemcích jsou často půdní podmínky odlišné ve svrchních a spodních partiích sadu (rozdílná zrnitost), což může mít za následek potřebu odlišných vstupních parametrů pro nastavení závlahy.



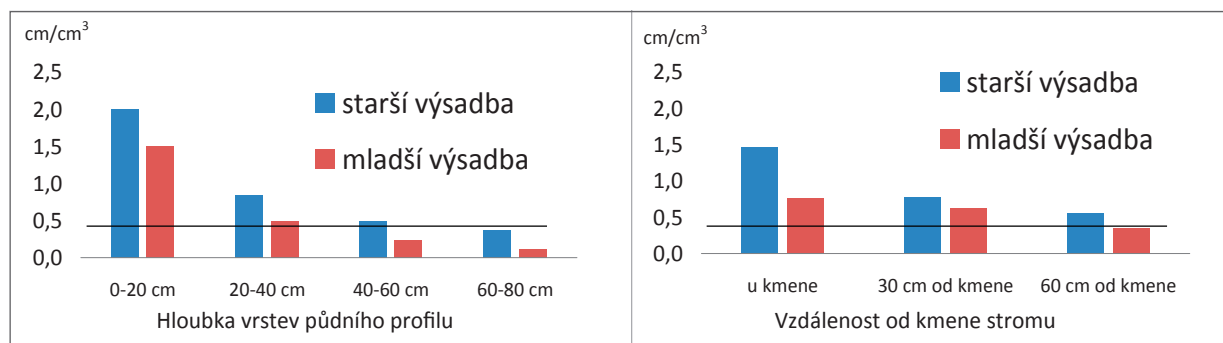
Obrázek 25. Hustota kořenů A) jabloní v závislosti na projevu únavy půdy a B) meruněk v půdních vrstvách s odlišným humózním horizontem (do 85 cm nebo do 40 cm)

Rychlost a efektivita čerpání vody z určité vrstvy půdy nebo vzdálenosti od kmene závisí hlavně na hustotě kořenů. U polních plodin se udává, že při průměrné hustotě kořenů pod 1,0 nebo 0,5 cm/cm³ je již využití vody a živin z dané vrstvy obtížné. V těchto případech je vzdálenost mezi jednotlivými kořeny příliš velká, jejich rozložení nerovnoměrné a voda musí putovat delší vzdálenost. Pohyb vody ke kořenům závisí na půdním druhu. V tomto směru střední hlinité půdy poskytují lepší podmínky než písčité, kamenité nebo jílovité půdy. Důležitým předpokladem je také dostatečná půdní vlhkost v rozsahu volně dostupné části využitelné vodní kapacity, která umožňuje volný kapilární tok vody difuzí směrem ke kořenům. Přítok z mimokořenové zóny může být významný na místech s vyšší hladinou spodní vody.

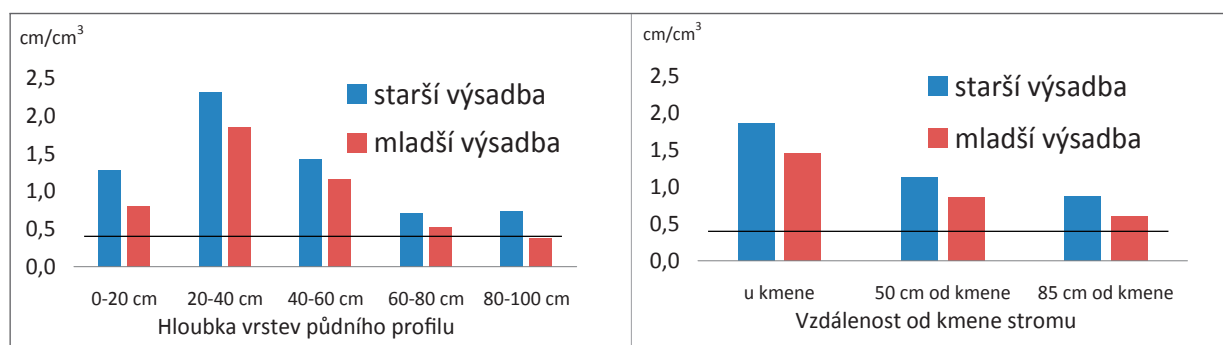
Hloubka, ze které jsou schopny kořeny bez velkého omezení využívat většinu živin a vody je označována termínem efektivní hloubka kořenů. V podmínkách mírného klimatu, na běžných hlinitých půdách, se u jabloní udává hloubka 0,4 až 0,8 m nebo až 1 m, podle fáze vývoje. ČSN 75 0434 (2017) udává maximální účinnou hloubku navlažení (odvozenou z efektivní hloubky kořenů) u dospělých ovocných stromů v rozsahu mezi 0,7 a 0,9 m. To je ale pouze orientační hodnota, která si vyžaduje upřesnění podle stáří stromu, hloubky půdy a podmínek pro růst kořenů. Se stářím stromů se zvětšuje koruna stromu i rozsah kořenové zóny.

Na obrázku 26 a 27 je znázorněno porovnání hustoty a hloubky kořenů jabloní a meruněk u mladších výsadby v počátku významnější produkce plodů a starších, plně plodných výsadby. Pokud bychom si stanovili jako hranici pro efektivní příjem vody a živin hodnotu hustoty kořenů 0,5 cm/cm³ (naznačená černá příčka v obrázcích), tak u jabloní by u starší výsadby byla možná hloubka navlažení do 0,6 m a ještě 0,6 m od kmene stromu. U mladší výsadby by efektivní navlažení mělo být do hloubky 0,4 m a do kratší vzdálenosti od kmene stromu.

U výsadby meruněk by u starší výsadby byla teoreticky efektivní hloubka navlažení do hloubky půdy 1 m, u mladší výsadby do 0,8 m. Navlažení z hlediska vzdálenosti od kmene stromu se jeví u meruněk pro starší i mladší výsadbu jako efektivní do stejné vzdálenosti od kmene. Sledované mladší výsadby měly obdobné půdně klimatické podmínky a způsob pěstování, jako starší výsadby. Nacházely se vždy nedaleko od sebe.



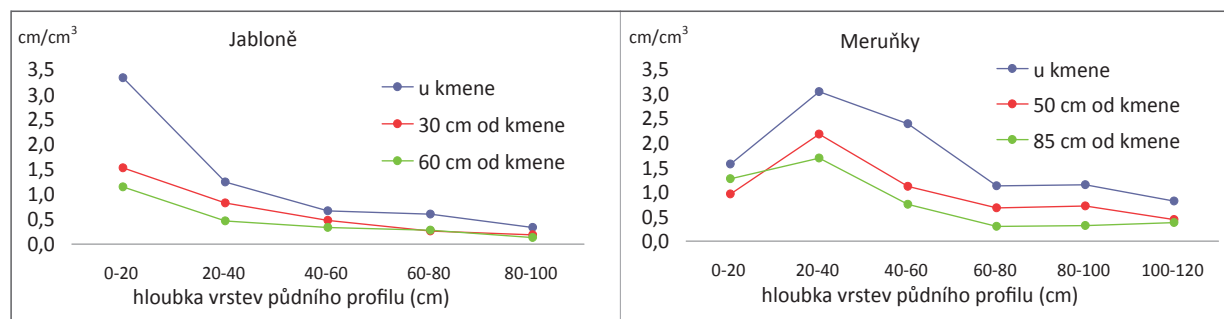
Obrázek 26. Porovnání hustoty délky kořenů jabloní u mladší výsadby ('Breaburn'/M9, stáří 3 roky) a starší výsadby ('Red Jonaprince'/M9, stáří 9 let) ve vrstvách půdního profilu a v různých vzdálenostech od kmene stromu



Obrázek 27. Porovnání hustoty délky kořenů meruněk u mladší výsadby ('Koolgat'/Wawit, stáří 3 roky) a starší výsadby ('Bergarouge'/Wawit, stáří 13 let) ve vrstvách půdního profilu a v různých vzdálenostech od kmene stromu

U ovocných dřevin na rozdíl od hustě setých polních plodin je důležitý i horizontální rozsah kořenů, tzn. do jaké vzdálenosti zasahují kořeny od kmene stromu, z hlediska optimálního místa aplikace vody a živin. V případě, že mělké kořeny dosahují dále do meziřadí, může někdy docházet k jejich poškození projíždějící mechanizací a v tomto prostoru také dochází ke konkurenci stávajícího porostu (trávy, krycí a pomocné druhy) a ovocné výsadby o vodu. Na obrázku 28 je uvedena hustota kořenů jabloní a meruněk ve vrstvách půdního profilu a v různých vzdálenostech od kmene stromu. U obou výsadeb tvoří podíl kořenů v blízkosti kmene stromu zhruba 50 %, ve větší vzdálenosti 30 % a ve vzdálenosti, která se nachází uprostřed mezi sousedními dvěma stromy, zbývajících 20 %. Bylo také zjištěno, že hustota kořenů směrem do travnatého meziřadí vykazovala v průměru o 15–25 % menší hustotu kořenů, než v řadě mezi jednotlivými stromy v důsledku konkurence kořenového systému ovocných stromů a kořenů porostu v meziřadí.

Odlišná je ale distribuce kořenů z hlediska půdních vrstev. U sledované výsadby jabloní byla největší hustota kořenů v horní 20 cm vrstvě půdy (cca 50 % z celého půdního profilu). U výsadby meruňek byla největší hustota kořenů ve vrstvě půdy 20 až 40 cm, a představovala zhruba třetinu z celého půdního profilu.

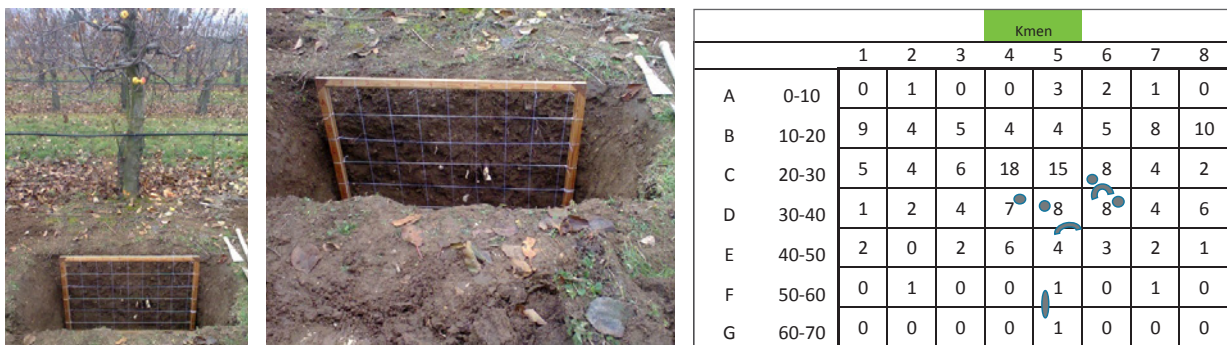


Obrázek 28. Hustota kořenů jabloní a meruňek ve vrstvách půdního profilu a různých vzdálenostech od kmene stromu

3.2.1.1 Určení rozsahu kořenů v provozních podmínkách

V provozních podmínkách je možné i bez speciálního vybavení určit rozsah kořenů i hustotu kořenů v různé hloubce nebo vzdálenosti od kmene. Nejjednodušší je tzv. profilová metoda, která byla často použita právě při výzkumu kořenů ovocných dřevin, révy nebo chmele autory Středa a kolektiv (2017). Na stěně výkopu lze pozorovat jednotlivé kořeny v jejich přirozené pozici v půdě. Vytvořením výkopu, podél řady stromů i kolmo na ni, v různé vzdálenosti od kmene, získáme dobrý obrázek o rozložení a hustotě kořenů. Stěnu řezu je možné uhladit nožem či špachtlí, u těžších půd jsou kořeny lépe vidět po přirozeném odlomení povrchové vrstvy řezu. U lehčích půd lze pomocí vodního proudu nebo tlakem vzduchu odstranit několik milimetrů půdy pro lepší pozorování kořenů. Hodnocení kořenového systému spočívá v zaznamenání počtu a pozice kořenů ve stěně půdy pomocí vzorkovací mříže nebo se pozice kořenů zakreslí na průhlednou polyetylenovou fólii pro následnou analýzu. Nejjednodušší je přiložení čtvercové sítě (například s velikostí ok 10 × 10 cm) na stěnu, a polohu každého kořenu zaznamenat na milimetrový papír jako tečku o různém průměru v závislosti na průměru odkrytých kořenů (Obrázek 29). U ovocných stromů z hlediska hloubky kořenů pro závlahu dostačuje výkop do 100–120 cm, aby byl přístup ke kořenům do cca 80 cm. Na stěně výkopu jsou také dobře patrné případné překážky pro růst kořenů a rozložení kořenů, utužené podorniči nebo mezivrstvy šterku nebo jílu, které brání růstu kořenů i přirozenému pohybu vody v půdním profilu.

Kořeny ovocných stromů lze dobře odlišit od jiných druhů, mají hnědou barvu a odlišnou strukturu ve srovnání s kořeny plevelů nebo trav aj. druhů. Kořeny rychle rostoucích jednoletých plevelů nebo travin jsou světlé a jemné, nedosahují do hlubokých vrstev, které jsou z hlediska pozorování kořenů ovocných stromů důležitější. I přesto je vhodné si pro hodnocení hustoty kořenů ovocných dřevin vybrat čisté místo, případně na plánovaném místě odstranit s předstihem rostoucí plevel.



Obrázek 29. Rám s čtvercovou sítí ve výkopu a grafické znázornění počtu kořenů jabloně v různé hloubce a vzdálenosti od kmene. Modře jsou označena místa s vystupujícími hlavními kořeny

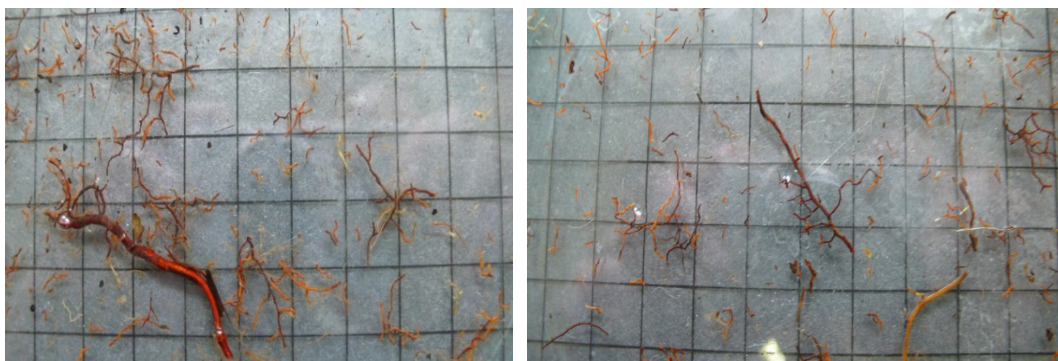
3.2.1.2 Stanovení délky a hustoty kořenů

Pro detailnější monitoring hustoty kořenů je nutné odebrat určitý objem půdy ze stěny výkopu nebo půdním vrtákem (například sondýrka používaná pro odběr půdních vzorků na agrochemickou analýzu; Obrázek 30). Půda se pak následně rozplaví ponecháním několik hodin v roztoku běžné krystalické sody, rozplavení urychluje použití teplé vody a rozmělnění hrud půdy. Jednodušší je analyzovat menší objemy půdy (max. 0,5–1 kg). Po rozplavení půdy se kořeny vyplavují mírným proudem vody, k zachycení je třeba použít síto s malou velikostí ok (1–2 mm). Celková délka kořenů ve vzorku se stanoví buď přímým měřením, nebo (u velkého počtu tenkých, větvených kořenů a jejich zlomků) pomocí metody odpočtu křížení kořenů se čtvercovou sítí podle Tennanta (1975). Pro čtvercovou síť s velikostí ok 1×1 cm je celková délka kořenů v daném vzorku (v cm) získána takto: průměrný počet křížení rovnoměrně rozložených kořenů s vertikálními a horizontálními liniemi u použité sítě se vynásobí koeficientem 1,57 (Obrázek 31). Počítají se pouze živé kořeny, které jsou většinou dobře rozlišitelné od starých (polo)rozložených kořenů nebo jiných organických zbytků.

Pro zjednodušení a získání okamžitých informací o přítomnosti kořenů v dané vrstvě půdy je možné stanovit jen sušinu kořenů ve vzorku a tu následně přepočítat na jednotku objemu půdy.



Obrázek 30. Odběr vzorků půdy s kořeny půdním vrtákem (sondýrkou) v různých vzdálenostech od kmene stromu



Obrázek 31. Kořeny ovocných stromů na čtvercové síti s velikostí ok 1×1 cm.

3.2.1.3 Průsak vody, vyplavení minerálních živin

Hodnota PVK indikuje současně hranici, při jejímž překročení dochází k průsaku vody do hlubších vrstev a případně z dosahu kořenů. Intenzita doplňkové závlahy je podle ČSN 75 0434 (2017) počítána tak, aby k průsaku nedošlo. To zaručuje vysokou efektivitu využití závlahové vody. S příliš velkým množstvím vody protékajícím půdou totiž dochází k vyplavování živin, zvláště nitrátového dusíku, K, Ca a Mg. V případě ovocných výsadeb je riziko vyplavení nitrátů nižší než u polních plodin a zelenin, proto zatím není aplikace N hnojiv v rámci opatření Nitrátové směrnice limitována, jako je tomu u ostatních kultur v oblastech zranitelných dusičnany. Přesto lze u intenzivních mladších výsadeb zaznamenat na podzim i obsahy N-NO₃ přes 100 kg/ha a racionální dávky závlahové vody tak šetří nejen vodu, ale snižují i riziko vyplavení minerálních živin.

3.2.2 Vliv závlahového detailu na stanovení vhodné závlahové dávky

Jak už bylo naznačeno v předcházejících kapitolách této metodiky, cílem závlahy je pokrýt potřeby vláhy ovocných dřevin. Toho lze obecně dosáhnout za předpokladu rovnoměrného pokrytí kořenové zóny provlažením. Celková dávka závlahy by přitom neměla přesahovat stanovenou hloubku aktivní části kořenové zóny. Důležité je však vnímat i prostorové rozložení kořenového systému. Abychom byly schopni tyto požadavky pokrýt, je nezbytné mít správně nastavené technické provedení závlahy, tedy i tzv. závlahový detail. Ten nám udává polohu závlahové hadice i hustotu a průtok kapkovačů, které nám následně určují, jak velkou část kořene jsme schopni provlažit. Tedy jak dobře jsme schopni naplnit potřeby pěstovaných ovocných dřevin.

Příklad:

Při běžné dávce závlahy odpovídající dvěma hodinám aplikace s kapkovači o vydatnosti 2,3 l.h⁻¹ je celková aplikovaná dávka vody na půdu rovna 4,5–4,6 mm. Z pohledu hloubky provlhlení tato dávka odpovídá v prostoru zavlažené půdy přibližně 18 mm srážkové vody. Při uvedené dávce v případě středně těžkých půd dochází při přibližně 70% nasycení půdní VVK k provlhlení půdy do hloubky 40–60 cm a do přibližně stejné šířky (Obrázek 32). Za uvedených podmínek by se tedy takové zavlažení na průběhu půdní vlhkosti mělo

projevit následovně. V hloubce 30 cm obsahující např. u jabloní většinu aktivních kořenů by vlhkost půdy měla stoupnout k hranici polní vodní kapacity. Na druhou stranu v hloubce 60–80 cm, která je podle zkušeností hraniční pro výskyt aktivních kořenů jabloní, by se vlhkost půdy měla zvednout pouze částečně.

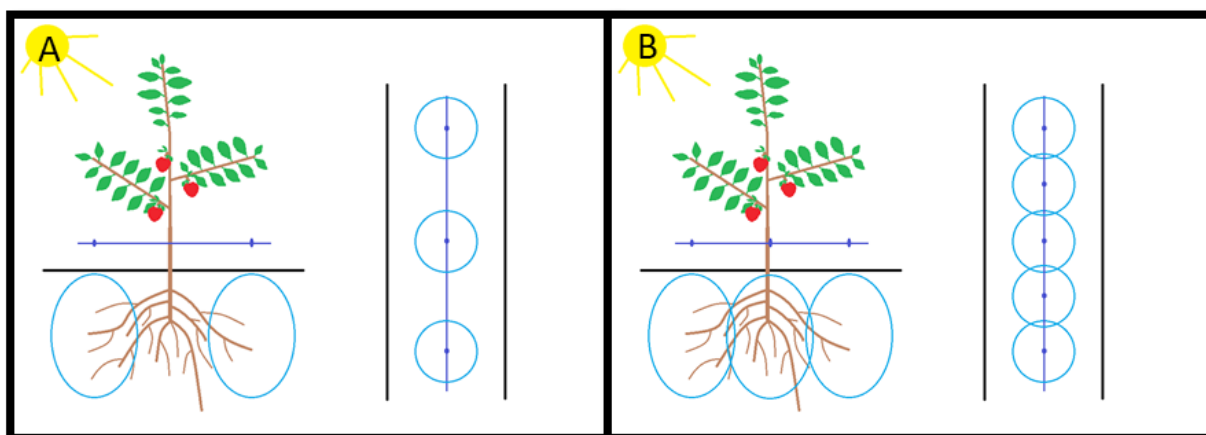
Nicméně, jak je patrné z obrázku 33A, při klasické šířce řádku 1 m a vzdálenosti kapkovačů 1 m se tímto způsobem celkově provlhčí pouze čtvrtina až necelá třetina objemu půdy potenciálně obsahujícího kořeny ovocných dřevin. Při dosažení určité intenzity atmosférického sucha pak tento systém zejména u jádřovin vede k rozvoji intenzivního stresu suchem tlumícím intenzitu růstu plodů. Děje se tak do značné míry nezávisle na množství dodané vody. Při snaze doplnit větší množství vody rostlinám tato obvykle protéká do hlubších vrstev půdy mimo dosah kořenů ovocných dřevin ze všemi důsledky pro efektivitu a ekonomiku managementu výsadby.

Naproti tomu při stejné dávce vody s vyšší hustotou kapkovačů po 0,5 m dochází k jejímu rovnoměrnějšímu rozložení v rámci prokořeněné části půdy a k propojení zavlažovaných profilů z jednotlivých kapkovačů (Obrázek 33B). Prakticky to umožňuje doplnit ke kořenům dvojnásobné množství vody bez rizika překročení optimální hloubky provlažení. Tento způsob vede k provlhčení až cca 50–60 % půdy v příkmenném pásu, tedy většiny prokořeněné části půdního profilu, a tím i k celkovému zvýšení odolnosti pěstované kultury k suchu.

Pokud zmíněné skutečnosti vyjádříme číselně, zatímco dávka vody 9 mm při hustotě kapkovačů 0,5 m představuje pro hloubku zavlažení přibližně srážku v úhrnu 18 mm v provlhčené části půdy, při vzdálenosti kapkovačích otvorů 1 m je tato hodnota prakticky dvojnásobná a odpovídá až 36 mm vody. Takovéto množství vody způsobí významné překročení optimální závlahové hloubky.



Obrázek 32. Zobrazení půdního profilu a provlžení kořenové zóny vodou smíchanou s potravinářským barvivem. Bílé jmenovky na povrchu půdy označují rozmístění kapkovačů. Spodní řada jmenovek označuje hloubku půdy ve 30 cm, jak je patrné s přiložené trasírkou.



Obrázek 33. Schématické znázornění rozložení závlahy v rámci prokořeněného horizontu půdy při použití závlahové hadice s roztečí kapkovačů A) 1 m a B) 0,5 m.

3.3 Strategie zavlažování v ovocných sadech

Strategie zavlažování představuje vedle stanovení potřeby a výpočtu dávky pro zavlažování třetí důležitou část managementu závlah ovocných dřevin. Jedná se prakticky o způsob nastavení závlahového režimu ve výsadbách v průběhu celé vegetační sezóny. To se obvykle provádí v závislosti na vývoji meteorologických podmínek a pěstovaném druhu plodiny, kdy je reflektována potřeba vody ovocných dřevin v průběhu vegetační sezóny. Jejím zohledněním je možné vedle klasické strategie poskytující doplnění plné potřeby rostlin využívat také tzv. deficitní strategie pro závlahu. Jejich smyslem je doplnění menšího množství vody pomocí závlahy, než které se v rámci vodní bilance s pozemku odpaří a tím dosáhnout další úspory vody a zvýšení efektivity závlahy za současného zachování objemu a kvality produkce ovoce. Deficitní strategie lze obecně rozdělit na základě časové nebo prostorové implementace vodního deficitu na tzv. řízenou deficitní závlahu a závlahu parciální části kořenového systému.

3.3.1 Řízená deficitní závlaha

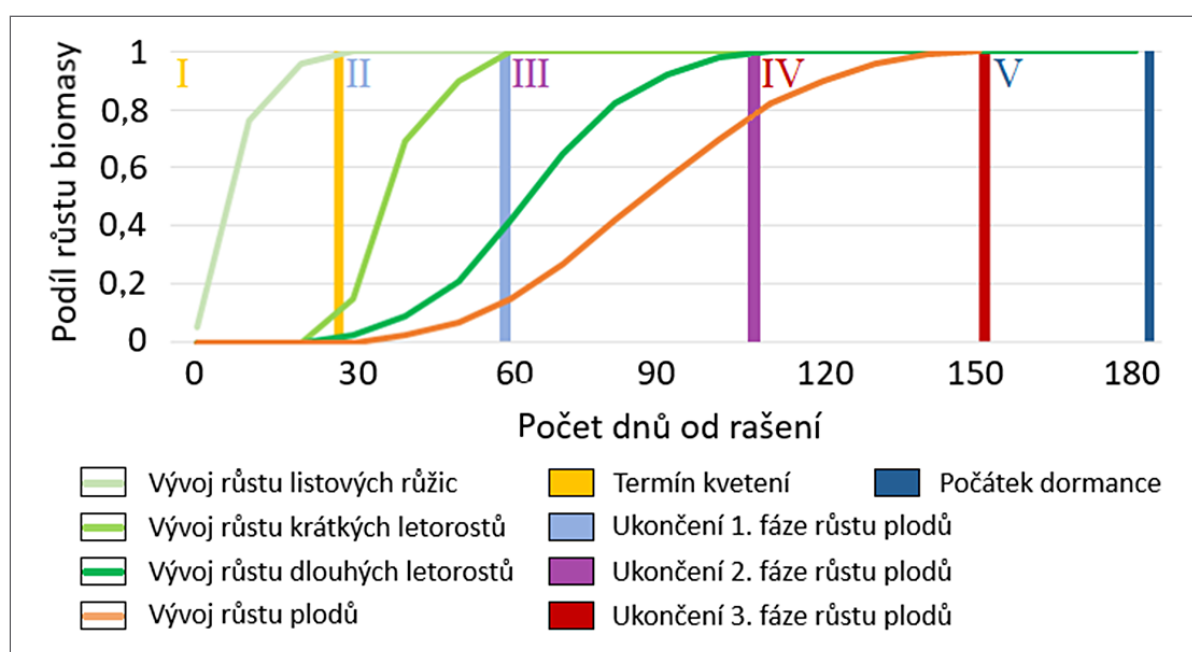
Řízená deficitní závlaha (ŘDZ), v zahraničí také známá jako „regulated deficit irrigation“ nebo „stage-based deficit irrigation“, je založena na časové proměnlivosti v řízení dávek vody ovocným dřevinám v závislosti na jejich vývojové fázi. Rostliny jsou tedy v průběhu vegetační sezóny zalévány odlišnými dávkami vody vyplývajícími z jejich aktuálních potřeb.

3.3.1.1 Principy závlahové strategie ŘDZ

Princip této strategie spočívá v rozličné citlivosti ovocných druhů na dostupnost vody v jednotlivých vývojových fázích jejich růstu v průběhu vegetační sezóny. Tato citlivost se přitom posuzuje vzhledem k plánovanému výnosu plodiny, v našem případě k objemu a kvalitě produkce ovoce, které by neměly být negativně ovlivněny. K úspěšnému využití této strategie je nutné definovat kritická fenologická období růstu a zároveň podmínky, za kterých je plodinu možné vystavit vodnímu deficitu. Vývoj ovocného stromu v průběhu

vegetační sezóny můžeme rozdělit na 5 období zobrazených na obrázku 34. Zde je pro příklad zobrazena jako modelová rostlina jabloň. V textu je však uvedeno srovnání potřeb pro dostupnou vláhu i pro další ovocné druhy.

I. období – začíná rašením pupenů. Zatímco u jaderovin se současně s květy vyvíjí i první listová plocha z listových růžic smíšených pupenů, u peckovin se v tomto období vyvíjí pouze květy a ukončeno je jejich kvetením. V tomto období ovocné dřeviny vyžadují neomezený přísun vláhy. Důvodem je potřeba zajištění bezproblémového opylení, oplození a dostatečného rozvoje první listové plochy, která bude v pozdější fázi vývoje sloužit pro výživu mladých plůdků. Nicméně listová plocha v I. období je ještě poměrně malá a půda v podmínkách střední Evropy obvykle obsahuje dostatek vláhy po zimě. Dochází k nízké úrovni výparu, a pokud nenastane extrémně teplé a suché počasí závlaha není nezbytná.



Obrázek 34. Průběh vývoje vegetativních a generativních orgánů jabloní během vegetační sezóny
Vegetační období jabloní s pohledu citlivosti k vodnímu deficitu:

I. období – rašení, růst první listové plochy, kvetení (BBCH 10–65)

II. období – růst krátkých letorostů a 1. fáze růstu plodů (BBCH 67–72)

III. období – růst dlouhých letorostů a 2. fáze růstu plodů (BBCH 72–77)

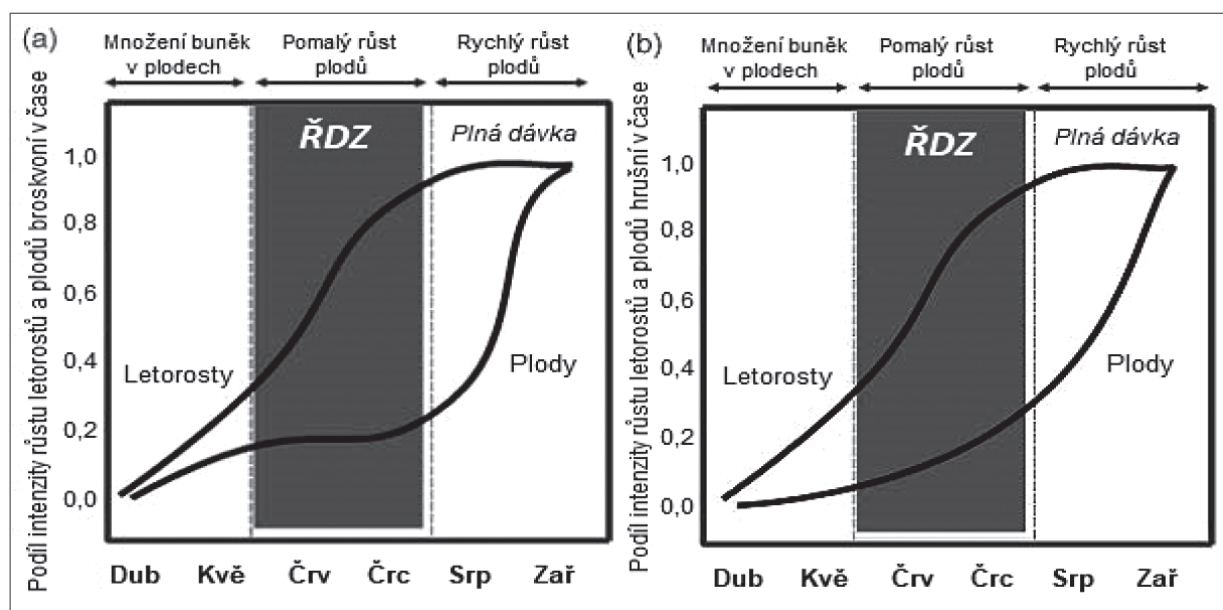
IV. období – ukončení vegetativního růstu a 3. fáze růstu plodů, sklizeň (BBCH 77=91–87)

V. období – posklizňové období, opad listů, počátek dormance (BBCH 87–95)

II. období – nastává odkvětem květů a trvá v závislosti na ovocném druhu a na počasí přibližně tři až šest týdnů. Toto období je charakteristické intenzivním růstem krátkých letorostů a první fázi růstu plodů. Nárůst plodů je zde pozvolný a probíhá především prostřednictvím intenzivního dělení buněk. Počet buněk v plodech, vytvořený během této fáze, rozhoduje o potenciální finální velikosti plodů, jelikož jejich další nárůst v následujících obdobích již probíhá výhradně prostřednictvím buněčného růstu. Proto je toto období považováno za kritické z pohledu úrovně dostupné vláhy a ovocné dřeviny by

obecně ve II. období vývoje (1. fáze růstu plodů) neměly být vystavovány stresům, jakým je i stres suchem. Vystavení stresu by se mohlo u ovocných dřevin projevit špatným vývojem mladých plůdků, resp. jejich intenzivnějším propadem. Na konci tohoto období jabloně obvykle dosahují průměrné velikosti královských plůdků 1,5–2 cm a ukončují růst krátkých plodných letorostů. Vývoj listové plochy v této době u plodných stromků odpovídá přibližně 50–65 % finální velikosti.

III. období – vyznačuje se intenzivním růstem prodlužujících letorostů a nástupem druhé fáze růstu plodů. Plody v této fázi rostou v důsledku zvětšujícího se objemu již namnožených buněk. Třetí období vývoje je v závislosti na pěstovaném ovocném druhu poměrně specifické s ohledem na délku trvání a průběh vývoje plodů. Zatímco u jabloní nastává intenzivní lineární růst plodů (Obrázek 34), u peckovin nastupuje fáze tzv. tvrdnutí pecky. Během této fáze u peckovin dochází k několikatýdennímu zpomalení růstu plodů (Obrázek 35a), kdy se v plodech formuje pecka. U hrušní v tomto období plody rostou spíše do délky a jejich denní přírůstek prozatím nedosahuje maximálních hodnot (Obrázek 35b). Z pohledu závlahové potřeby jsou s výjimkou jabloní zmiňované ovocné druhy méně citlivé k nižší dostupnosti vody a mohou tedy být vystaveny určité míře stresu suchem, který nezanechá následky na plodnosti a spíše podporuje kvalitu plodů. Uvádí se, že v teplých aridních oblastech v tomto období strategie ŘDZ umožňuje omezovat silný vegetativní růst, který zvyšuje spotřebu vody a tvoří určitou konkurenci plodům ve spotřebě minerálních živin a asimilátů. Vzhledem k tomu, že ovocné dřeviny v tomto období již upřednostňují výživu ovoce na úkor letorostů, dřívější ukončení vegetativního růstu do jisté míry podporuje kompenzaci růstu plodu ve stresových podmínkách. Nicméně omezení růstu prodlužujících letorostů lze v našich podmínkách očekávat pouze v případě rozvoje intenzivního sucha již v průběhu jarních měsíců.



Obrázek 35. Vývoj plodů a letorostů a) peckového ovoce a b) hrušní v jednotlivých fázích růstu během vegetační sezóny s ohledem na využití řízené deficitní závlahy – (Goodwin a Boland, FAO 2022).

IV. období – u jaderovin a některých peckovin se tato fáze vyznačuje ukončením vegetativního růstu a intenzivním růstem plodů až do okamžiku jejich zrání. V tomto období je nutné obnovit plné dávky závlahy dle evapotranspiračních nároků pěstované kultury a v případě potřeby provést i určitou kompenzaci aktuální vlhkosti půdy tak, aby u rostlin již nedocházelo ke stresu suchem.

U jabloní se využití ŘDZ těsněji vztahuje k podmínkám prostředí. Lineární nárůst jablek je ve III. a IV. období vývoje (II. a III. fázi růstu plodů) stejně intenzivní a případný úbytek růstu plodů je znatelnější než u ostatních již zmiňovaných ovocných druhů. Proto je nutné u jabloní v rámci závlahy hlídat vývoj dostupné vláhy v půdě a vystavovat tyto dřeviny vláhovému deficitu pouze v omezené míře. Ze zahraničních zkušeností vyplývá, že pro pěstování jabloní v teplých aridních oblastech světa je tato strategie méně vhodná. Nicméně v podmínkách mírného klimatu, ve kterém kladou rostliny nižší evapotranspirační nároky a kde jsou suché periody alespoň občasně přerušovány atmosférickými srážkami, u rostlin dochází ke snadnější kompenzaci ztrát v růstu plodů během suché periody. V takových podmínkách lze pomocí ŘDZ účinně zvýšit efektivitu doplňkové závlahy i u jabloní.

V. období – nastává po sklizni ovoce. U některých peckovin je provázeno druhou vlnou (meruňky) nebo kontinuálním pokračováním (třešně) růstu letorostů. U těchto ovocných druhů je vhodné za suchého a teplého počasí ponechat plnou dávku závlahy alespoň po dobu několika následujících týdnů pro podporu vývoje květních pupenů. Principiálně je však tohle období již méně náročné na spotřebu vody, navíc u jaderového ovoce nastává v podzimním období, kdy lze předpokládat již častější atmosférické srážky doplňující půdní vláhu.

3.3.1.2 Provozní podmínky ŘDZ

Strategie řízení deficitní závlahy v praxi umožňuje úsporu 20–25 % vody určené pro zavlažování pěstované kultury. Pro bezpečné využití ŘDZ je u pěstovaných ovocných kultur obecně potřebné strategii nastavit v závislosti na aktuálních vláhových podmínkách stanoviště a managementu výsadby. Dosavadní poznatky stanovují určité limity vzhledem k metodě stanovení vláhové potřeby, které musí být dodrženy tak, aby nedocházelo k rozvoji intenzivního stresu suchem:

Vláhový režim

Závlaha se v citlivých obdobích nastavuje na plnou kompenzaci stanovené potřeby vody. V méně citlivém období, u jabloní cca od půlky června do konce července (BBCH 72–77), lze závlahovou dávku snížit až na 50 % stanovené potřeby. Následně je vhodné obnovit plnou dávku závlahy tak, aby byl zejména v druhé polovině letního období zajištěn dostatečný přísun vody pro růst plodů do finální velikosti.

Vlhkost v zavlažované části půdy by neměla klesat pod 60 % využitelné vodní kapacity. Důležitou roli přitom sehrává plošné pokrytí půdy závlahovou vodou, to znamená celková závlahová dávka a závlahový detail. Tyto veličiny v praxi rozhodují o tom, jak velkou část kořenové zóny lze provlažit pomocí závlahy. Z uvedených důvodů je před použitím řízené deficitní závlahy potřeba pečlivě zvážit možnosti závlahového systému a posoudit, jestli již v daných podmínkách nedochází k výraznému omezení přísunu vláhy prostorovým

rozdělením závlahové vody. Pro tyto potřeby lze vhodně využít měření vlhkosti v nezavlažované části půdy, která by pro využití strategie ŘDZ neměla klesat pod 50 % VVK.

Vodní deficit stanovený skrze evapotranspiraci by neměl přesahovat 45 % z využitelné vodní kapacity v kořenové zóně.

Při stanovení potřeby závlahy skrze fyziologické parametry, například vodní potenciál kmeňové ovocných dřevin, sací síla potřebná pro doplnění vláhy vodivých svazků by v poledních hodinách neměla klesat pod -1,5 kPa.

Pokud vláhový deficit dosáhne některého z uvedených limitů, je potřeba ŘDZ přerušit a obnovit vlhkost v zavlažované části půdy na polní vodní kapacitu. Vlhkost půdy by pak dále neměla klesat pod 70 % VVK naměřené v hloubce odpovídající největšímu objemu aktivních kořenů. V případě stanovení potřeby na základě vláhové bilance je potřeba na pozemek doplnit množství vody odpovídající alespoň 20 % celkové kapacity půdní vláhy v kořenové zóně. Obnova vlhkosti půdy nebo vláhové bilance pozemku by měla být prováděna pozvolně, a to opakovaným využitím obvyklé plné dávky závlahové vody vypočtené pro daný pozemek a ovocnou kulturu. Zabráni se tím riziku výraznější ztráty vody průsakem do hlubších vrstev půdy mimo kořenovou zónu. Tyto dávky by měly být aplikovány v závislosti na počasí v častějších intervalech až do dosažení potřebné vlhkosti půdy, resp. doplnění odpovídající části vodní bilance ovocného sadu.

Management půdy v ovocných sadech

K efektivnímu využití ŘDZ je dále potřeba dodržovat určité postupy v managementu ovocného sadu. Vedle standardních prvků managementu integrované produkce ovoce hrají z pohledu vodního režimu ovocných dřevin rozhodující roli především management půdy a adekvátní probírka plodů.

V rámci managementu půdy je potřeba dbát na omezování výskytu plevelu v kořenové zóně ovocných dřevin. Plevelné rostliny představují pro ovocné stromy konkurenci, a to především v rozvoji kořenové soustavy a s tím souvisejícím odčerpáváním živin a vody. Problém je významný především v intenzivních mladých výsadbách, kde jsou dřeviny pěstovány na slabě rostoucích a mělce kořenících podnožích. Plevel tak oslabují celkový růst a plodnost ovocných kultur, a také zvyšují neproduktivní transpiraci v ovocném sadu.

Plevely můžeme regulovat více způsoby, např. aplikací herbicidů, kultivací příkmených pásů, mulčováním a sežínáním plevelů. K nejběžnějším způsobům regulace plevelů patří v současné době chemická regulace. Tento způsob je časově a energicky nejméně náročný a je také velmi efektivní. Aplikace přípravků je potřeba provést v nejcitlivější fázi plevelu a zaměřit se především na převažující plevelné druhy. Kromě kontaktních herbicidů v ovocných výsadbách můžeme použít nejlépe na začátku vegetace půdní herbicidy s delším reziduálním působením, které nám zajistí příkmený pás delší dobu bez plevelů. V současné době se portfolio herbicidních účinných látek v ovocnářství velmi redukuje a jsou hledány alternativní postupy.

Mechanizovaná regulace plevelů patří mezi časově a finančně náročnější zásahy. Přináší však řadu výhod, např. vhodnost využití v mladých výsadbách, nebo u citlivých druhů či odrůd, kde lze použít pouze omezenou skladbu herbicidů. Důležitou výhodou je i mechanické zpracování povrchu půdy, které vede k přerušení kapilárního vztlínání. Takový zásah proto půdu

provzdušňuje, omezuje neproduktivní výpar evaporací z půdního povrchu a pomáhá zasakování atmosférických srážek. K mechanické regulaci plevelů lze využít např. výkyvný nůž, pasivní rotační plečku nebo aktivní kultivátor s horizontální nebo vertikální osou rotace.

K dalším možnostem regulace plevelů v příkmenných pásech patří mulčování, tj. nastýlání organickou hmotou nebo mulčovací folií (Obrázek 36). Mulč zabraňuje růstu plevelů a také zabraňuje nežádoucí evaporaci. Jako mulč se používá kromě fólie i posekaná tráva nebo mulčovaná kůra, nastýlaná zhruba na výšku 10 cm. Tento způsob se používá především v ekologických výsadbách, v integrované produkci se používá jen okrajově z důvodu velké manipulační náročnosti.



Obrázek 36. Využití mulčovací fólie ve výsadbě jabloní proti růstu plevelů

Zatížení ovocných dřevin plodností

Násada plodů představuje jeden z hlavních činitelů ovlivňujících spotřebu vody ovocnými dřevinami. Nadměrné zatížení plody z pravidla omezuje vegetativní růst a zvyšuje tak nároky na produkci asimilátů na jednotku listové plochy. Takto zatížené stromy ztrácejí prostor fyziologicky odolávat suchu a kompenzovat negativní vliv nedostatku vody bez projevu na objemu a kvalitě produkce. Proto je nezbytné především u jádrovin provádět včasnou a dostatečnou probírku. Pro podporu vývoje plůdků v první fázi jejich růstu je výhodné probírky provádět již v průběhu kvetení nebo v průběhu této fáze. Obecně zde platí, „čím dříve, tím lépe“. Včasně a dobře provedenou probírkou se prodlužuje doba, kdy se v intenzivnější míře zvětšuje počet nových buněk ve zbývajících plodech. Tedy zbývající plody mají větší potenciál pro svůj následný růst. Pro lepší názornost uvádíme příklad.

Příklad:

Ve VŠÚO Holovousy bylo v letech 2019–2022 provedeno hodnocení různých deficitních závlahových strategií včetně využití ŘDZ. Pokus byl hodnocen v sedmileté výsadbě jabloní odrůd ‘Gala Brookfield’ a ‘Red Jonaprince’ (pro zjednodušení jsou prezentovány pouze výsledky z odrůdy ‘Gala Brookfield’) pěstované na podnoži M9 ve středně těžké hlinité půdě.

Použitý pěstitelský tvar byl štíhlé větveno s řezem na „klik“. Jabloně byly vysazeny ve sponu $3,5 \times 1$ m a finální výška porostu byla udržována ve 3,2 m. Příkmenné pásy byly udržovány v bezplevelném stavu pomocí herbicidů, zatímco meziřadí bylo zatravněno s pravidelným sežínáním. U jabloní byla provedena ruční probírka plodů ve fenologické fázi BBCH 71–72 (královský plod ve velikosti 15–20 mm) s využitím pomůcky pro stanovení optimálního množství plodů na větev, „equilifruit“ (Obrázek 37, INRA Montpellier, Francie).



Obrázek 37. Pomůcka pro stanovení optimální násady plodů jabloní podle počtu smíšených pupenů (plodných výhonů) na bazální průměr větví „equilifruit“ (Foto: Luděk Laňar), vlevo znázornění použití v praxi

V pokusu bylo hodnoceno 7 závlahových variant uvedených v tabulce 2. Celková dávka vody se v pokusu odvíjela od průběhu počasí (Obrázek 38A) a v jednotlivých letech dosahovala hodnot 298 mm (2019), 54 mm (2020), 196 mm (2021) a 273 mm (2022).

Tabulka 2. Seznam hodnocených závlahových variant, použitá dávka v průběhu sezóny a násada plodů.

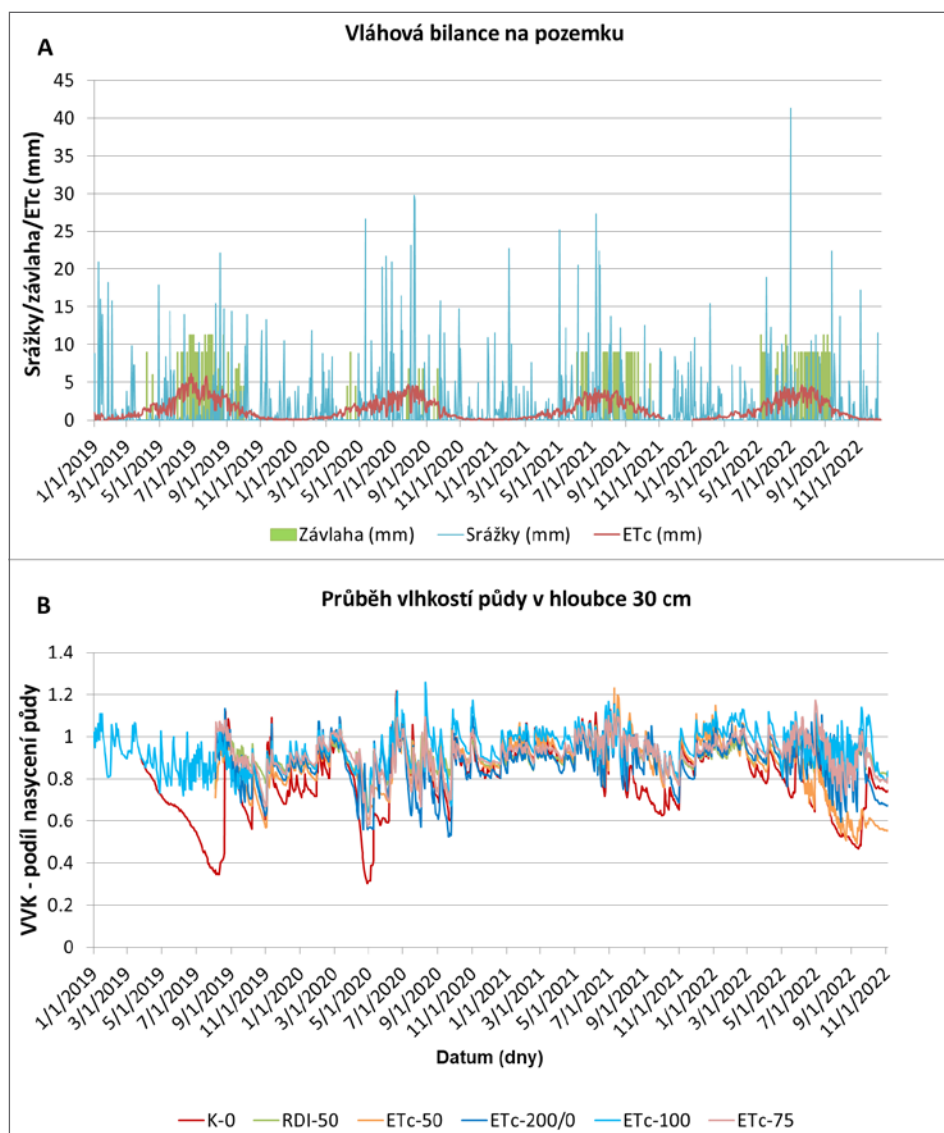
Varianta	Dávka závlahy	Období	Násada plodů
K-0	Nezavlažovaná	v průběhu veg. sezóny	s plnou násadou plodů
ETc-50	50% plné dávky	v průběhu veg. sezóny	s plnou násadou plodů
ETc-75	75% plné dávky	v průběhu veg. sezóny	s plnou násadou plodů
ETc-100	100% plné dávky	v průběhu veg. sezóny	s plnou násadou plodů
ETc-200/0	200/0 % ¹ plné dávky	v průběhu veg. sezóny	s plnou násadou plodů
ŘDZ-50	100/50 % ² plné dávky	BBCH ³ 72–77	s plnou násadou plodů
ŘDZ-50a	100/50% plné dávky	BBCH 72–77	s 50–60% násadou plodů

¹ Celoroční dávkování 200% dávky v každém druhém termínu zavlažování

² Řízená deficitní závlaha s 50% dávkou závlahové vody v období BBCH 72–77

³ BBCH 72–77 – období od velikosti královského plodu 20 mm po 70% finální velikosti plodů (polovina června až začátek srpna)

Z pohledu zhodnocení jednotlivých let byl rok 2019 nejteplejší s největším srážkovým deficitem, přičemž suchá perioda probíhala zejména v měsících červen a červenec. Naopak nejchladnější a nejvlhčí období během vegetační sezóny bylo pozorováno v roce 2020. Průběh počasí se do jisté míry promítal do vlhkostních poměrů v půdě a to zejména u variant s omezeným či nulovým přísunem vody pomocí závlahy. Nejnižší půdní vlhkost (Obrázek 38B) byla pozorována u nezavlažované varianty K-0 a v menší míře u zavlažovaných variant ETc-50 a ETc-200/0, které v letech 2019 v létě, 2020 na jaře a 2022 na podzim poklesly pod 60 % VVK.



Obrázek 38. Denní průběh A) závlahy, srážek a plodinové evapotranspirace (ETc) v mm, a B) vlhkosti půdy ve 30 cm u jabloní odrůdy ‘Gala Brookfield’ v letech 2019–2022

V tabulce 3 jsou uvedeny hospodářské vlastnosti jabloní odrůdy ‘Gala Brookfield’ v průběhu hodnoceného období a to zejména výsledky spojené s plodností, růstem vyjádřeným příčným průřezem kmene (PPK) a celkovým zatížením stromů na jednotku PPK. Z tabulky 3 je patrné, že v roce 2019 se vliv intenzivního sucha neprojevil na celkovém výnosu ani zatížení stromů plody. Nicméně jak je dále patrné z obrázku 39, sucho v roce 2019 výrazně

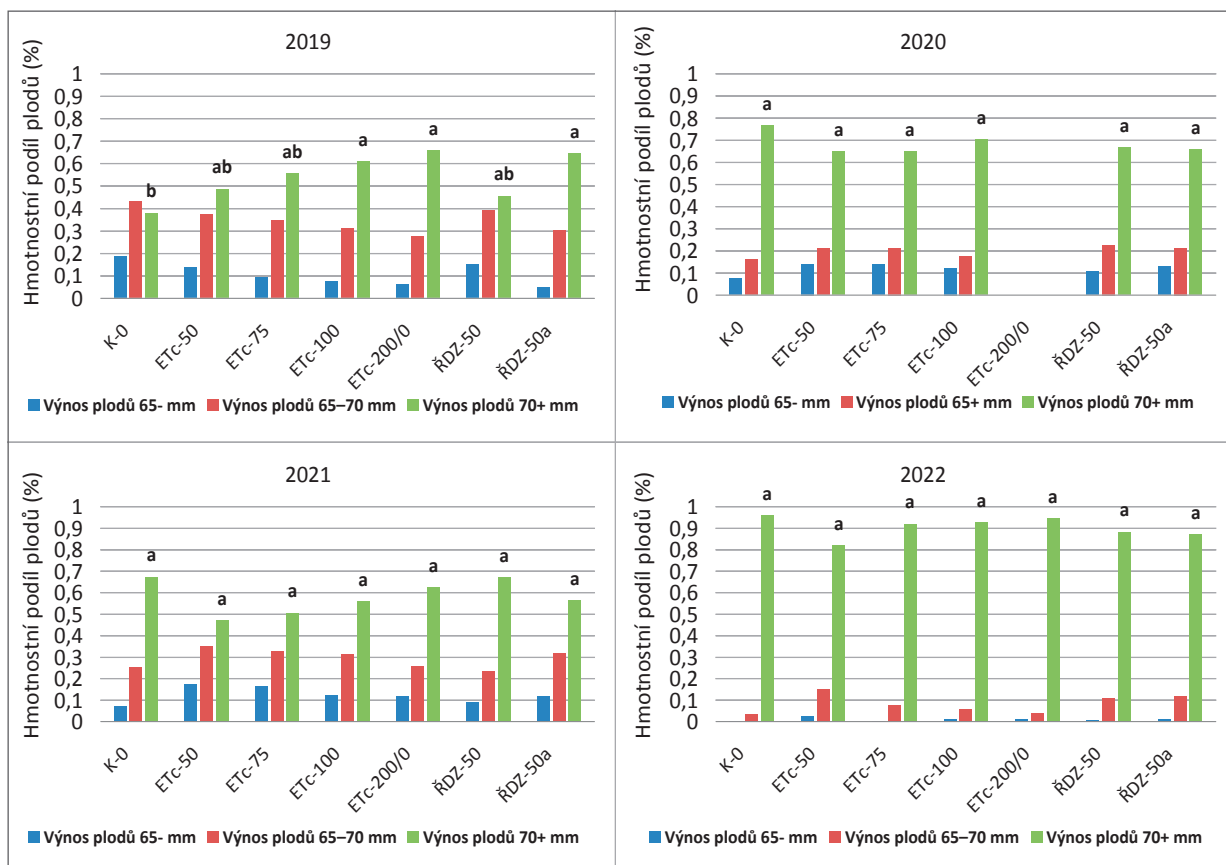
ovlivnilo finální kalibr plodů a to především těch, které splňují předpoklady pro první jakost, tedy větších než 70 mm. V tomto směru je patrná stoupající závislost velikosti kalibru na celkové dávce závlahy. Výjimku tvoří jabloně ve variantě ŘDZ-50, které navzdory stejnému objemu vody jako ve variantě ŘDZ-50a dosáhly rovněž menšího podílu kvalitních jablek. V tomto případě byl pokles kvality způsoben rozdílným zatížením stromů plody, kdy byl ve variantě ŘDZ-50a redukován počet plodů na polovinu v porovnání s ostatními variantami. Vysoká násada plodů tedy vedla k vyšší spotřebě vody.

Tabulka 3. Intenzita kvetení, průměrný roční výnos, plocha průřezu kmene, zatížení stromů v počtu plodů a specifickém výnosu na jednotku plochy kmene u jabloní 'Gala Brookfield'

Rok	Varianta	Kvetení (1-9)	Výnos (kg/strom)	Počet plodů na strom	PPK (cm ²)	Počet plodů PPK (ks/cm ²)	Specifický výnos-PPK (kg/cm ²)
2019	K-0	8,3 a	28,04 ab	211,4 ab	12,8 ab	16,67 a	2,21 a
	ETc-50	8,2 a	26,29 b	184,2 bc	11,6 b	16,27 a	2,31 a
	ETc-75	7,0 a	27,74 b	187,7 bc	11,2 b	16,67 a	2,47 a
	ETc-100	7,8 a	25,61 b	175,5 bc	11,0 b	16,25 a	2,39 a
	ETc-200/0	7,7 a	26,99 b	177,3 bc	12,3 ab	14,70 a	2,24 a
	ŘDZ-50	7,4 a	35,04 a	251,0 a	15,6 a	16,72 a	2,32 a
	ŘDZ-50a	8,0 a	25,16 b	157,8 c	12,2 ab	13,15 a	2,09 a
2020	K-0	4,7 b	16,97 c	105,7 b	16,7 ab	6,35 c	1,03 b
	ETc-50	4,6 b	15,90 c	105,1 b	15,3 b	7,22 bc	1,09 b
	ETc-75	6,3 ab	22,89 a	155,5 a	14,2 b	11,13 a	1,64 a
	ETc-100	5,6 ab	18,93 b	126,3 ab	14,2 b	8,98 ab	1,36 ab
	ETc-200/0	6,1 ab	-	-	16,1 ab	-	-
	ŘDZ-50	5,7 ab	22,94 a	149,3 a	21,2 a	7,14 bc	1,10 b
	ŘDZ-50a	6,6 a	23,64 a	159,1 a	16,0 b	10,09 a	1,50 a
2021	K-0	8,1 a	17,88 a	112,1 a	17,7 b	6,35 a	1,01 a
	ETc-50	8,8 a	18,25 a	128,8 a	15,5 b	8,34 a	1,19 a
	ETc-75	7,7 a	19,17 a	134,9 a	16,1 b	8,48 a	1,21 a
	ETc-100	8,1 a	19,41 a	135,1 a	16,0 b	8,55 a	1,23 a
	ETc-200/0	7,9 a	18,85 a	130,3 a	18,6 b	7,18 a	1,04 a
	ŘDZ-50	8,0 a	20,25 a	127,6 a	24,7 a	5,46 a	0,86 a
	ŘDZ-50a	7,7 a	18,62 a	121,9 a	18,4 b	9,36 a	1,45 a
2022	K-0	8,5 a	21,9 bc	114,9 bc	22,6 ab	5,15 c	0,98 d
	ETc-50	8,6 a	29,6 a	176,4 a	19,8 b	9,22 a	1,53 a
	ETc-75	8,5 a	26,4 ab	147,7 ab	18,4 b	8,21 ab	1,47 a
	ETc-100	8,3 a	25,5 abc	139,3 abc	18,3 b	7,75 ab	1,42 a
	ETc-200/0	8,2 a	19,7 c	104,5 c	23,8 ab	4,59 c	0,87 b
	ŘDZ-50	8,3 a	25,4 abc	154 ab	28,8 a	5,70 bc	0,95 b
	ŘDZ-50a	9,0 a	29,7 a	167,5 a	20,5 b	8,51 a	1,51 a

Statisticky významné rozdíly na hladině $\alpha = 0,05$ jsou označeny rozdílnými písmeny. Data jsou porovnávána v každém sloupci samostatně a pro sledované roky jednotlivě.

Pozoruhodný je také pokles plodnosti jabloní ve variantách K-0 a ETc-50 v následujícím roce 2020 a to i navzdory vlhkým podmínkám roku. V tomto roce však již vzhledem k nižšímu zatížení jabloní nedocházelo k omezení růstu plodů. V průměrně vlhkém roce 2021 byly výnosy a tedy i zatížení stromů mezi variantami pokusu relativně vyrovnané. Nicméně určitý trend v nižším zastoupení kalibru plodů větších než 70 mm byl patrný zejména u varianty ETc-50 s poloviční dávkou vody během celé vegetační sezóny. Vyšší podíl větších plodů u K-0 a ŘDZ-50 souvisí opět spíše s jejich aktuálním zatížením. V roce 2022 byla plodnost střední až vysoká. I navzdory tomu hodnocené jabloně napříč variantami pokusu dosáhly vysokého zastoupení plodů v kalibru nad 70 mm. Lze tedy říci, že hranice zatížení stromů plody ovlivňující jejich velikostní kalibr je každoročně závislá na aktuálním fyziologickém stavu ovocných dřevin a může se měnit. Při středním zatížení stromu v dobré kondici lze jabloním přisoudit určitou odolnost vůči krátkým periodám sucha. Ze zkušeností získaných v polních pokusech vycházela odrůda ‘Gala Brookfield’ jako více citlivá k nedostatku vláhy v porovnání s triploidní odrůdou ‘Red Jonaprince’, nakolik druhá ze jmenovaných odrůd bývá za stejných podmínek mohutnější v růstu a tvoří přirozeně větší plody.



Obrázek 39. Hmotnostní podíl jablek dle zastoupení velikostního kalibru u hodnocených variant v letech 2019–2022

Závěrem lze uvést následující pravidla pro využití ŘDZ u jabloní:

- ▶ závlahová strategie řízené deficitní závlahy je v podmínkách ČR uplatnitelná a za určitých podmínek umožňuje úsporu vody až 20–25 %,
- ▶ u odrůd typu ‘Gala’ by max. zatížení stromů v dospělosti nemělo překračovat 120–132 plodů na strom (11 plodů.cm⁻² PPK) při výšce koruny cca 3,2 m,
- ▶ vlhkostní režim může představovat 50 % evapotranspirace v období 3. fáze růstu (BBCH 72–77),
- ▶ vláhový deficit by neměl překračovat 20–25 % roční evapotranspirace,
- ▶ vlhkost půdy by neměla klesnout pod 75 % ve vlhké, a pod 60 % v suché periodě,
- ▶ při ponechání vysoké násady plodů (cca 15–16 plodů.cm⁻² PPK) by přísun vody v průběhu vegetační sezóny neměl být omezován,
- ▶ optimální zatížení stromů u triploidních odrůd, např. ‘Red Jonaprince’, může být vyšší, tedy 150–160 plodů (11 plodů/cm⁻² PPK).

3.3.1.3 Technické a technologické vybavení ŘDZ

Pro potřeby ŘDZ je nutné zajistit správné vybavení a nastavení systému závlahy. Systém vyžaduje závlahový detail o jedné hadici připevněné na drátěnce uprostřed řádku. Závlahová hadice představující závlahový detail by měla mít otvory ideálně po 0,5 m a průtok alespoň 2,3 mm/h. K řízení závlahy je zapotřebí řídicí jednotka napojená na senzorové vybavení pro stanovení potřeby závlahy. Vhodně lze využít senzory měřící půdní vlhkost, meteorologická data potřebná k výpočtu evapotranspirace nebo senzory monitorující fyziologické parametry rostlin.

3.3.2 Závlaha parciální části kořenového systému

Závlaha parciální části kořenového systému (parciální závlaha – PZ) je v zahraničí známá pod názvem „partial rootzone drying“ nebo „partial rootzone irrigation“. Tato závlahová strategie zohledňuje prostorové rozložení závlahy v rámci kořenové zóny ovocných dřevin, kdy při každé závlivce je zavlažována pouze část (polovina) kořenového systému.

3.3.2.1 Principy závlahové strategie PZ

Princip této strategie spočívá v poskytnutí dostatečného množství vody pouze do části kořenového systému, zatímco druhá polovina kořenů je vystavená určité míře sucha. Rostliny tak fyziologicky reagují na omezenou dostupnost vody a upravují své hospodaření s poskytnutou vláhou pomocí částečného přivírání průduchů. Tato strategie se využívá zejména v aridních oblastech, kde je obvykle zavlažován celý příkmený pás a to buď pomocí postřikovačů, nebo dvouramenného systému kapkovacích hadic (Obrázek 40) rozloženého po obou stranách kmene ovocných dřevin. Strategie přináší nespornou výhodu, kdy umožňuje zvětšení prostoru s vyhovujícími vláhovými poměry a tím i prostoru pro potenciální rozvoj kořenové soustavy. Střídavé spouštění závlahy na jednotlivých stranách umožňuje udržovat obě zavlažované strany půdního profilu alespoň částečně vlhké tak, aby

nedocházelo k rozvoji významného stresu suchem. Současně není pravidelně zvlhčován celý povrch půdy příkmenného pásu. To umožňuje regulovat výpar, omezuje spotřebu vody pro účely závlahy a zároveň zajišťuje zachování objemu a kvality produkce ovoce.



Obrázek 40. Znárodnění závlahového detailu se souběžným vedením dvou kapkovacích hadic podél řady z každé strany kmenů ovocných dřevin. Prostřední hadice na obrázku je zaslepena.

3.3.2.2 Provozní podmínky PZ

Strategie parciální závlahy v praxi umožňuje v aridních podmínkách při zavlažování celého příkmenného pásu úsporu 25–50% vody. Vzhledem ke klimatickým podmínkám v České republice je však význam této strategie prozatím okrajový, jelikož jsou ovocné sady zavlažovány běžně pouze jednou kapkovací hadicí. Na druhou stranu tento systém potenciálně umožňuje v sušších oblastech, resp. v extrémně suchých letech, kompenzovat již výše zmíněné problémy se zavlažením ovocných dřevin současnými systémy. Pro bezpečné využití závlahy parciální části kořenového systému je u pěstovaných ovocných kultur obecně potřebné strategii nastavit v závislosti na aktuálních vláhových podmínkách stanoviště a managementu výsadby. Při provozu metody je potřebné opět dodržovat určité podmínky.

Vláhový režim

V rámci uvedené strategie se závlaha spouští střídavě po jednotlivých stranách kořenového systému. Závlaha by přitom měla odpovídat plné dávce vody aplikované přes jednu

centrální kapkovací hadici. Vlhkost v zavlažované části půdy by neměla klesat pod 70% využitelné vodní kapacity. V nezavlažované části půdy by vlhkost obecně neměla klesat pod 50% VVK. Dávky vody, resp. interval mezi spouštěním závlahy lze pochopitelně podobně jako i v předešlé strategii regulovat podle průběhu počasí, tedy poměru srážek a evapotranspirace. Vodní deficit stanovený pomocí evapotranspirace by opět neměl přesahovat 45% z využitelné vodní kapacity půdy v kořenové zóně. Hraniční hodnotou vodního potenciálu kmene ovocných dřevin by mělo být -1,5 kPa.

Management sadu

V rámci managementu sadů je užitečné dbát na úpravu povrchu půdy i dostatečnou probírku plodů, i když způsob provedení závlahy zajišťuje lepší pokrytí kořenové zóny a tím i potenciálně menší riziko nedostatku vody pro zajištění dobrého výnosu a kvality ovoce.

Při přebudovávání systému využívajícího jednu kapkovací hadici na dvě s roztečí větší než 60 cm je potřeba počítat s určitým obdobím (2–3 roky), během něž se budou kořeny ovocných dřevin přizpůsobovat novému rozložení aplikované závlahové vody a mohou přijímat poskytnutou vodu méně efektivně. Důvodem je preference růstu kořenů v předchozí užší zavlažované zóně.

3.3.2.3 Technické a technologické vybavení PZ

Strategie závlahy parciální části kořenů vyžaduje zajistit správné vybavení a nastavení systému závlahy. Provozování systému je náročnější na technické provedení závlahového detailu, který se skládá ze dvou hadic. Mezi hadicemi je zapotřebí instalovat rozdělovač a uzávěry umožňující regulaci průtoku vody jednotlivými rameny tak, aby byly schopny autonomního provozu. Závlahové hadice by měly mít otvory ideálně po 0,5 m a průtok alespoň 2,3 mm/h. K řízení závlahy je opět zapotřebí řídicí jednotka napojená na sensorové vybavení pro stanovení potřeby závlahy. Vhodně lze využít senzory měřící půdní vlhkost, meteodata potřebná k výpočtu evapotranspirace nebo senzory monitorující fyziologické parametry rostlin. Při použití půdních vlhkostních sensorů je potřeba tyto instalovat souběžně pod každým ramenem závlahy tak, aby bylo možné sledovat půdu v zavlažované i nezavlažované části kořenové zóny. Jednotlivé metody je pro správnou kalibraci možné vhodně kombinovat.

4 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Publikace popisuje a rozšiřuje znalosti o pravidlech a principech stanovování potřeby závlahy v sadech pomocí měření a hodnocení půdní vlhkosti, vodní bilance a fyziologické odpovědi ovocných dřevin na podmínky stresu suchem. Publikace poskytuje návod k implementaci zmiňovaných metod včetně přístrojového vybavení, postupu při jeho instalaci a provozu, interpretace zjištěných údajů, možnostech automatizace systému závlahy a výhod, resp. omezení těchto řešení. Metodika dále uvádí popis možností využití bezpilotního snímkování porostů s ohledem na lokalizaci potřeby závlahy v rámci ovocného sadu. Jsou zde popsány také základní a alternativní strategie zavlažování umožňující zvýšení efektivity

vynaložené závlahy. V rámci uvedených deficitních strategií metodika popisuje nové výsledky výzkumu a tyto zkušenosti zohledňuje v nastavení podmínek využití deficitních závlahových strategií.

5 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika je určená pro pěstitele ovocných dřevin i specializované firmy poskytující technologie a poradenskou činnost na poli predikce potřeby závlahy ovocných dřevin. Publikace poskytuje komplexní návod popisující dostupné metody pro stanovení potřeby závlahy, stanovení potřebné dávky i základní závlahové strategie. U jednotlivých metod jsou vždy uvedeny principy, jejich technické provedení, funkčnost včetně popisu případných výhod, rizik a možnosti provozního využití v ovocnářské praxi. Uživatelé se tak mohou seznámit se stávajícími i moderními přístupy k závlaze ovocných dřevin a budou je moci v praxi využít pro účely řízení managementu závlah ve svých výsadbách.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Voda pro účely zavlažování představuje jeden z klíčových zdrojů v zemědělství. Optimalizace využití metod stanovení potřeby závlahy, její vhodné dávky a případné využití alternativní závlahové strategie účinně zvyšuje efektivitu závlahy a představuje jeden z důležitých kroků k preciznímu zemědělství. Vzhledem k rozdílné dostupnosti vodních zdrojů, technologií a postupů v managementu závlah se význam uvedené metodiky v jednotlivých oblastech světa může lišit. Avšak kombinací v metodice popsanych postupů lze v některých případech ušetřit 15–30 % vody použité pro závlahu ovocných dřevin bez negativních dopadů na objem a kvalitu jejich produkce ovoce. Na druhou stranu lze kvalitně provedenou závlahou účinně zvýšit jak výnos ovoce (v průměru až o 5–15 %), tak především jeho kvalitativní parametry (zejména průměrnou velikost plodů), a to v závislosti na průběhu ročníku až o 30 %. Pro vyčíslení ekonomických přínosů lze popsat podmínky v sadech České republiky. Pokud předpokládáme, že k uplatnění výsledku dojde alespoň na 12,5 % (1 330 ha) všech pěstitelských ploch jaderovin a peckovin odpovídajících 10 642 ha (Němcová a Buchtová, 2022), při průměrné úspoře závlahové vody 50–100 m³/ha lze ušetřit 1 064 200 m³ vody ročně. Navíc při zvýšení produkce kvalitního ovoce I. třídy například o 15 % o průměrné tržní ceně těchto plodů 16 Kč/kg je zisk vyšší o 75,3 mil. Kč. Výše zmíněná úspora vody a vyšší zisk z realizace kvalitnější produkce plodů v suchých letech nastávajících v našich podmínkách 1krát za 2–3 roky, za pět let lze očekávat z uvažované plochy sadů úsporu 2 661 tis. m³ vody a výnos až do výše 188,3 mil. Kč.

The background image shows a long, straight row of young fruit trees in an orchard. The trees are supported by wooden stakes and have a network of overhead pipes and wires, likely for irrigation and monitoring. A weather station is mounted on a tall pole in the foreground, featuring a white cup anemometer at the top, a sensor unit in the middle, and a control box at the bottom. The sky is a pale, overcast blue. The ground is covered with green grass and some dry leaves.

RESEARCH AND BREEDING INSTITUTE OF POMOLOGY HOLOVOUSY Ltd.

UNIVERSITY OF HRADEC KRÁLOVÉ

CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

CROP RESEARCH INSTITUTE

AMET

***Determining the need and strategy
for irrigation in fruit orchards***

Martin Mészáros et al.

CERTIFIED METHODOLOGY

2023

Annotation

The determination of irrigation requirements for pome and stone fruits of temperate climate is the main topic of this methodology. A detailed description of the principles of the different methods for determining irrigation requirements is given, including the possibilities of their automation, their operational advantages, and limitations for use in practice. In addition, the principles and rules for the use of standard and alternative (deficit) irrigation strategies are presented, which allow the refinement of irrigation management in orchards. This methodology is intended for growers, their advisors and consulting companies specializing in orchard irrigation systems, who will be able to use the information obtained to independently assess the need for supplemental irrigation and to automate irrigation management in orchards. The knowledge presented in this publication comes from the results obtained within the framework of the QK1910165 project and from a literature search of available sources.

1 INTRODUCTION

Water is one of the key resources for sustainable crop production. Water resources used for irrigation of crops are currently scarce in many regions of the world and this situation may further deteriorate due to ongoing climate change. It is possible to grow agricultural crops without irrigation in some areas, but such production may not be viable in the fiercely competitive European market, especially in dry years, which are likely to become more frequent. The uneven distribution of rainfall throughout the year makes the need for irrigation even more acute.

The amount of water used to irrigate agricultural crops accounts for up to two-thirds of total freshwater consumption worldwide. Its efficient use is therefore becoming crucial for sustainable food production, but also to maintain sufficient drinking water for a growing human population. To ensure efficient irrigation water management, it is necessary to know and be able to meet the requirements of the crops being grown. This is based on the biological needs of the species being grown and the water balance of the land, which is the difference between the evapotranspiration of the plants, i.e., their water loss through evaporation, and the water replenished by rainfall or irrigation. The latter must be replenished so that the plants do not become stressed by drought but also do not suffer from excess water.

With the help of the latest technology, the irrigation requirement and the optimum irrigation rate can nowadays be determined relatively reliably, and irrigation systems can be operated efficiently. By using various relationships and measurements, irrigation demand can be modelled, and the results used in practice to manage irrigation of agricultural crops. This results in a higher efficiency of irrigation water use per unit of harvest. Efficient irrigation can then be used to achieve minimal negative impacts on the crops and the environment. Methods that can be used in fruit growing to determine the need for irrigation, its optimum rate, as well as the possibility of using alternative irrigation strategies, are described in the present publication.

2 OBJECTIVES OF THE METHODOLOGY

The aim of this methodology is to familiarise fruit growers with the different methods of determining irrigation requirements in orchards, including a detailed description of their principles, procedures for setting dates and water rates, including an assessment of the benefits and risks of each method. The methodology also focuses on the description of technological equipment and possibilities of automation of irrigation of fruit trees, their calibration and maintenance. The publication is also intended to introduce users to principles and practices aimed at increasing the efficiency of irrigation water use through alternative deficit irrigation strategies. At the same time, the methodology aims to contribute to maintaining yields of quality fruit while making economical use of available water resources. The information summarized in this methodology is based on current international and domestic research results as well as many years of practical experience.

3 DESCRIPTION OF THE METHODOLOGY

The methodology describes different methods for determining irrigation requirements, the irrigation rate itself, and modern irrigation strategies. The methods for determining the irrigation requirement include their principles, the necessary instrumentation and technical equipment, operation, including a description of the most important advantages and risks associated with their use in practice, interpretation of the results and the possibilities for automating the operation of irrigation in orchards. This publication also presents the procedure for determining the appropriate irrigation rate for specific fruit tree species and the possibilities of using alternative irrigation strategies.

3.1 Determination of the need for irrigation

Irrigation is an effective tool for ensuring sufficient water supply to fruit trees. In order to operate it optimally, it is essential to determine the conditions under which irrigation is needed. Today, there are several direct and indirect methods for determining the need for irrigation based on measurements of environmental conditions (soil and atmosphere) and the physiological needs of the crop itself.

3.1.1 Method for determining irrigation need based on soil moisture

Soil generally provides the anchorage environment for fruit trees and, due to its sorption properties, acts as a key source of mineral nutrients and water. Soil can retain water through its physical and chemical properties. These properties affect the overall water-holding capacity of the soil and its subsequent availability to living organisms and fruit crops respectively. Drip irrigation control based on directly measured soil moisture is, if the conditions are right, one of the most reliable methods for dosing water to plants according to their needs and also according to how much they can take up and transpire back into the atmosphere through their roots.

The advantages of using soil moisture sensors for irrigation control include the possibility of continuous measurement, continuous monitoring of the irrigation system, identification of over- or under-watering of the soil environment, the possibility of setting parameters for irrigation control, efficient and relatively accurate irrigation, and some adaptation of the irrigation rate to weather conditions. Despite the financial cost, this method can be seen as relatively affordable.

Disadvantages include the difficulty of installing the sensor system, the interpretation of the measured results and the fact that it is a point measurement which does not necessarily provide information on the moisture content of all parts of the rooted soil.

3.1.1.1 Principles of the method

Due to the above characteristics, soil moisture is a measurable quantity and in practice we distinguish between two basic characteristics that can be measured by instrumentation: soil suction and soil moisture.

Soil suction (or soil water potential) – expresses the force with which water is held in the soil and which plants have to overcome to obtain it. As the amount of water in the soil decreases, the water is more retained and therefore the soil suction increases until it reaches values that the plants are unable to overcome, and wilting occurs.

The dimension of soil suction is given in pascals (Pa) and multiples thereof. In the available literature, however, one can also encounter units outside the SI system, namely centibar (cb) or pF value. In terms of unit conversion, 1 kPa = approximately 1 cb. The pF value represents the decadic logarithm of the so-called suction height of the water column (hst) expressed in meters or centimeters, for which it applies:

$$pF = \log_{10} hst \text{ (cm)}$$

The logarithmic expression of suction heights is used because of the significant order of magnitude differences between the maximum and minimum values.

Soil moisture – indicates the amount of water in the soil and can be expressed in two ways – volumetric moisture or soil moisture by mass.

Volumetric moisture (θ) is the ratio of the volume of water to the total volume of soil. Expressing soil moisture as a percentage by volume is more appropriate for irrigation practice as it indicates how much of a given soil volume is occupied by its water component.

Mass moisture (w) is given by the ratio of the weight of water to the weight of the solid phase of the soil. When expressed as a percentage by weight, it indicates the proportion by weight of water in the total weight of the soil sample. Under field conditions, w can be determined quickly and easily from the samples taken, even without special equipment. When converting to soil moisture by volume, it is important to know the soil bulk density (ρ_d) in the orchard under evaluation after drying. The conversion is then as follows:

$$\theta \text{ (cm}^3\text{.cm}^{-3}\text{)} = w \text{ (g.g}^{-1}\text{)} \times \rho_d \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$$

The result can then be expressed in volume percent by multiplying by 100.

The relationship between suction pressure and soil moisture is expressed by moisture retention lines (pF curves) with suction pressure plotted on the vertical axis and soil moisture plotted on the horizontal axis. The curve is specific for each soil.

3.1.1.2 Types of soil sensors and technical equipment

Suction pressure sensors

Tensiometers

A tensiometer is a device that can be used to measure the suction pressure of the soil (Figure 1). In the past, they were essentially the only way to non-destructively detect suction pressure in soil. The base of the tensiometer is a porous ceramic body, firmly connected at the bottom to a plastic pipe of the same diameter and of sufficient length to allow the tensiometer to be inserted at the depth at which the suction pressure is to be measured. For this reason, strain gauges are manufactured in different lengths. In the upper extended part of the

strain gauge, which protrudes above the surface when placed in the field, there is a vacuum sensor, either analogue for manual reading or electronic, which can be connected to a monitoring or control unit. The upper extended section, fitted with a plug, is used to fill the strain gauge with deaerated (vented) distilled water.



Figure 1. Tensiometer IRROMETER, on the left with manual pressure gauge, on the right with electronic gauge, allowing connection to a monitoring or control unit

The suction pressure measurement gives a closer indication of the availability of soil moisture for the plants compared to the soil moisture measurement. However, the response of the instruments to changes in moisture content tends to be slow. The main disadvantages of tensiometers also include the need for occasional water replenishment, calibration, and the need to remove the instrument from the soil before the onset of frost.

Gypsum blocks and WATERMARK

Sensors based on the measurement of electrical resistance between two electrodes encased in a porous material of suitable chemical properties are used to measure suction pressure indirectly. In the past, and even sometimes in the present, this was gypsum, and sensors made in this way are known as gypsum blocks (Figure 2). Their shortcomings include in particular the considerable dependence on ambient temperature, short lifetime, parameter variability and, last but not least, the small volume of soil to be measured. This is particularly problematic in the case of drip irrigation, where significant differences in soil moisture can exist even over short distances, placing great demands on their correct installation and ensuring an unchanging position relative to the impact of the irrigation water droplets. Gypsum blocks are susceptible to gradual dissolution and thus loss of contact with the soil. This phenomenon is most significant in saline and acidic soils.

An improved version of the gypsum blocks is the WATERMARK sensor, produced for more than 40 years and used in some orchards, which is characterized by a longer lifetime and greater stability of parameters, but measuring again in a limited volume of soil. The concentric electrodes are surrounded by porous quartz material, encapsulated in a synthetic hydrophilic membrane and perforated metal casing.

Special indicators are required to get the readings from these sensors, converting the resistance between the metal electrodes inside the sensors into a suction pressure reading. It is also possible to connect these sensors to monitoring or control units and to monitor the suction pressure remotely and, if necessary, to control the irrigation.

The advantages of the above-mentioned sensors include their low purchase price and relatively easy installation.



Figure 2. Gypsum blocks (left) and WATERMARK sensor (right)

Volumetric soil moisture sensors

As in other disciplines, soil moisture measurement has gone through a number of stages, from manual gravimetric measurements, which are still used today as a basic comparative measurement, to neutron probes, to capacitive sensors and sensors based on the propagation of electromagnetic waves in a soil environment composed of solid, liquid, and gas. For practical applications, the last two methods have achieved the greatest spread. Figures 3 and 4 show Netasense and Virrib sensors measuring volumetric soil moisture based on electromagnetic wave propagation in soil. They consist of two electrodes and electronics encased in epoxy resin and can be oblong or circular in shape and vary in size.

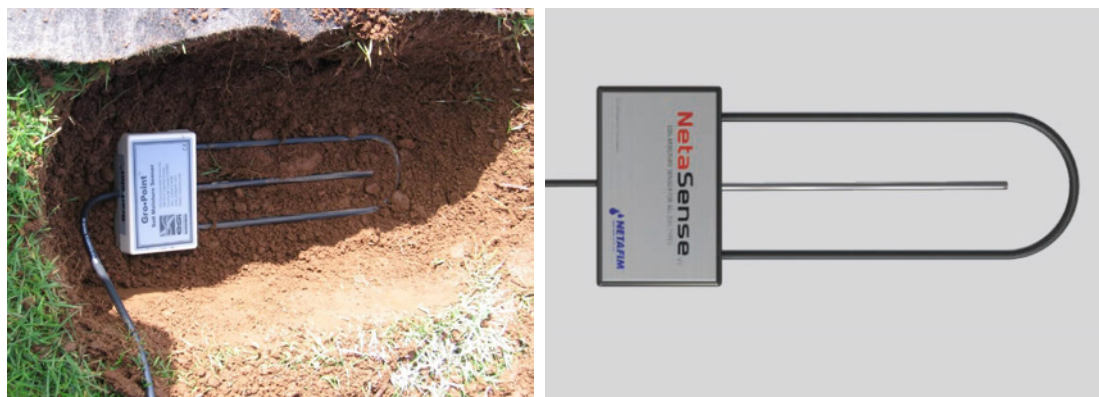


Figure 3. Soil volumetric moisture sensors GroPoint and NetaSense (product of AMET, Velké Bílovice)

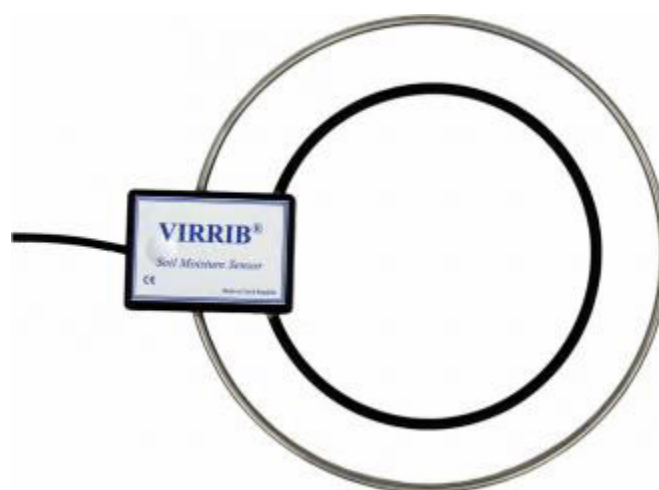


Figure 4. Soil volumetric moisture sensor VIRRIB (product of AMET, Velké Bílovice)

3.1.1.3 Installation of soil sensors

There are several principles to follow when installing sensors in orchards. The first one is based on the location of the sensors in the orchard, where sensors are generally not placed in the outermost rows, and further from the edge in the selected row. In order to ensure proper function of the soil moisture sensors for their use for autonomous drip irrigation control, the sensors must be properly installed under drip irrigation system and maintained. Incorrect installation of soil sensors can lead to inaccurate readings and therefore incorrect irrigation dosing. It is generally recommended to install 3 sensors at depths of approximately 10–30, 40–60, and 70–90 cm, where

- ▶ The top sensor is used to control the irrigation.
- ▶ The middle sensor monitors the irrigation of the profile to a greater depth.
- ▶ The bottom sensor monitors the infiltration outside the root zone.

Installation of tensiometers

The installation of tensiometers is relatively simple and does not disturb the soil profile to any great extent. An iron pipe with a diameter slightly larger than the diameter of the tensiometers is driven into the appropriate depth at which the lower end of the tensiometer is to be located. Never make the hole deeper than required depth so that there is no empty space under the strain gauge. Before pulling the tube out, a small amount of water shall be poured on the surface of the soil around it to prevent loose soil particles from being released into the hole thus made. After the tube has been pulled out, a denser mixture of water and local soil is poured into the hole via a funnel to ensure a better bond between the ceramic body at the bottom of the strain gauge and the surrounding soil. Finally, the tensiometer is inserted all the way to the bottom of the hole. It is important to ensure perfect contact between the ceramic body and the surrounding soil, otherwise the sensor will not give reliable readings.

When installing WATERMARK and similar sensors, a similar procedure is followed, except that instead of a tensiometer, a cylindrical sensor body attached to the end of a plastic pipe of approximately the same diameter is inserted into the hole. A shorter notch shall be made in the lower end of the tube through which the sensor wire shall be pulled so that it passes along the outside of the plastic tube when it is inserted into the hole. After the tube and the attached sensor have been inserted to the depth required at the bottom of the hole, a wooden or metal rod is pushed through the inside of the tube, holding the sensor at the bottom of the hole, and the tube is carefully pulled out. A mixture of water and soil is again poured into the hole above the transducer using a funnel and slowly filled in with the rod until it fills the hole to the surface of the surrounding ground.

Installing soil moisture sensors

Soil moisture sensors are larger than tensiometers and therefore require a slightly different installation method, in addition to the ability to monitor soil moisture in a larger volume of soil in most cases. Either a suitably sized pit can be dug next to where the sensors are to be placed, and then the sensors can be gradually inserted into the undisturbed soil profile (Figure 5, bottom right). Care must be taken to ensure that the sensors are completely surrounded by the surrounding soil and that there are no air pockets. This method is not suitable for skeletal soils. The excavated pit must be covered with progressively compacted soil so that it does not act as a drain and affect the measurement results.

The second method of installation is to place the sensors in a pre-excavated pit of sufficient depth and diameter to allow for easy insertion. The excavated soil is placed in a single pile so that the sequence of the individual horizons can be maintained when the sensors are backfilled. The pit should not be unnecessarily large to minimize disturbance to the surrounding soil profile. Some sensors, such as VIRRIB, can be installed either vertically or horizontally. When installed horizontally (Figure 5), soil moisture is measured only in a thin layer of a few centimeters at a given depth; when installed vertically, the average soil moisture is measured in a thickness corresponding to the height of the sensor. By tilting the sensor, the thickness of the layer monitored can be varied as required, from the thinnest layer corresponding to horizontal positioning to the maximum layer in vertical positioning. The sensors are placed one by one in the excavated pit, a layer of about 5 cm of excavated soil is thrown in and compacted, and

then the sensors are brought to the surface. It is important to avoid the formation of air pockets. When installed correctly, all excavated soil is returned to the original space. In the case of skeletal soils, only fine soil is backfilled, and rocks and larger pieces of gravel are removed.

The sensors must be placed in the ground in an area close to the drippers. Figure 6 shows an example of Netafim's recommended placement, with ECH₂O capacitive sensors on the left, NetaSense sensors in the middle, and electronic vacuum tensiometer gauges on the right. However, the sensors are not placed directly under the tree as shown, but close to it, also considering the position of the dripper. A distance of up to 10 cm from its vertical projection on the surface is recommended. With this condition in mind, it is also necessary to ensure that the droplets actually fall into the area monitored by the sensor. In practice, water may run down the drip tube and drip at a greater or lesser distance from the dripper. This should be prevented by placing a suitable stop on either side of the drip tubing for tubing placed on the ground, and for tubing placed on a wire frame at a height, it has been found useful to bend the tubing over the sensors with a suitable spacer (Figure 7). Since the drip tubing shrinks and expands with temperature changes, this spacer must be firmly attached to the wire mesh and the drip tubing to prevent it from falling out. It is also a requirement that the drip line near the sensors be functional and provide nominal flow. Its flow rate can be verified by placing a container under the drip head from which water is transferred to the measuring cylinder after a period of irrigation operation. The amount of water delivered can then be converted to the hourly capacity of the dripper. This value is sometimes displayed on the drip line.



Figure 5. Sequential installation of three Netasense soil moisture sensors in the excavated pit on the top of each other and two sensors in the side wall of the excavation (bottom right)

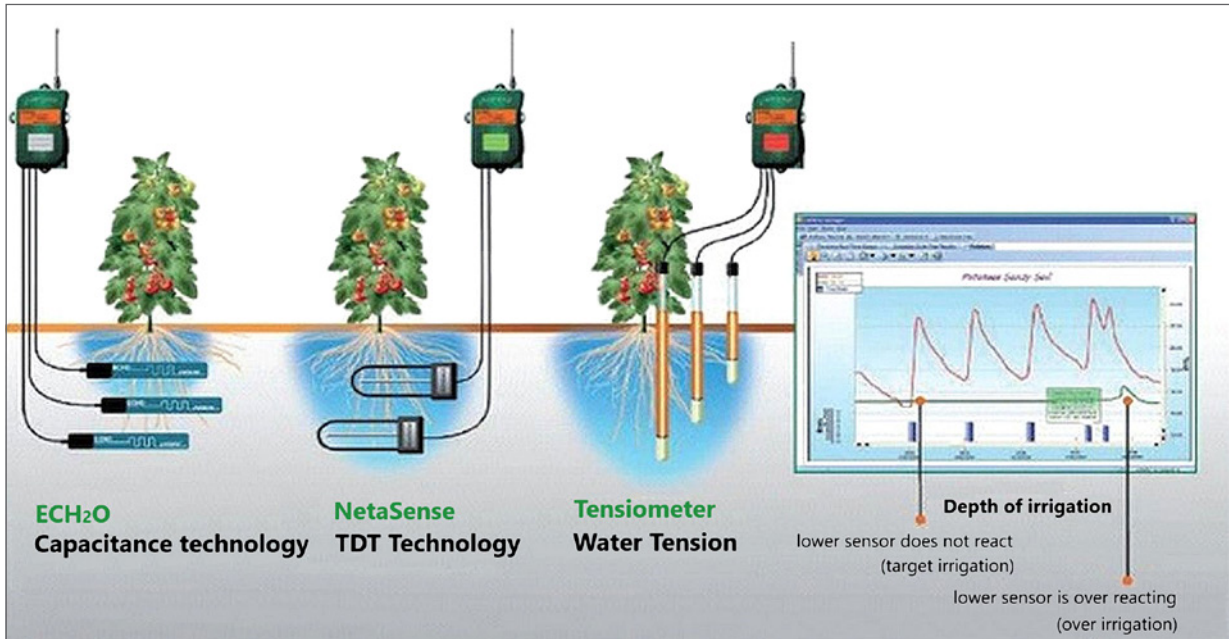


Figure 6. Location of soil moisture sensors in the wetted volume (by Netafim)



Figure 7. Detail of the drip hose bending over the location of the soil moisture sensors

3.1.1.4 Operation, measurement interpretation, and irrigation control

After the correct selection and installation of a suitable sensor, or even several sensors, it is possible to use the data obtained for irrigation control. The data can either be read manually, but here a frequency of at least twice a week during the irrigation season is required, or a suitable data logger with remote transmission, preferably to a data acquisition server allowing data visualization via a web interface, can be used. Another option is to use autonomous irrigation control device that measures the amount of water in the soil at regular intervals and triggers irrigation as needed.

For correct interpretation it is important to relate the measured results to the range of water content available for plants from the soil. To do this, it is necessary to determine the relevant soil hydrological properties, the most important of which are the field water capacity (FWC) and the wilting point (WP) or water holding capacity. While the holding capacity represents the temporary storage of water in the capillary and non-capillary pores of the soil, the field water capacity represents the maximum amount of water that the soil can hold in the long term. The wilting point represents the soil moisture content at which plants are no longer able to take up water through their roots and permanent wilting occurs. The difference between the wilting point and the field water capacity expresses the amount of water that plants can effectively extract from the soil through their roots, called the available water capacity (AWC).

Interpreting suction pressure readings

According to the recommendations of IRROMETER, the manufacturer of WATERMARK sensors and tensiometers, the following suction pressure data can be used to make irrigation decisions:

- ▶ **0–10 kPa** – saturated soil
- ▶ **10–30 kPa** – the soil is sufficiently wet (except for gravelly soils that are already starting to dry out)
- ▶ **30–60 kPa** – the usual range for irrigation in most soils
- ▶ **60–100 kPa** – the usual range for irrigation in heavy soils
- ▶ **100–200 kPa** – the soil is too dry

Figure 8 shows the retention lines for selected soil types, indicating the relationship between the deficit in AWC and the suction pressure. It is generally accepted that plants do not suffer from drought stress if this deficit does not exceed 50%. In Figure 8, the determination of the suction pressure value for a value of 50% of the usable water capacity is shown in yellow, corresponding to a suction pressure of about 85 kPa for clay soils. Depending on the phenological development, it is recommended to irrigate at lower values; fruit trees are most water-intensive during the fruiting period, when it is recommended to maintain a deficit of 30–40% of the available water capacity, i.e. to keep the soil moisture at 60–70% of the available water capacity.

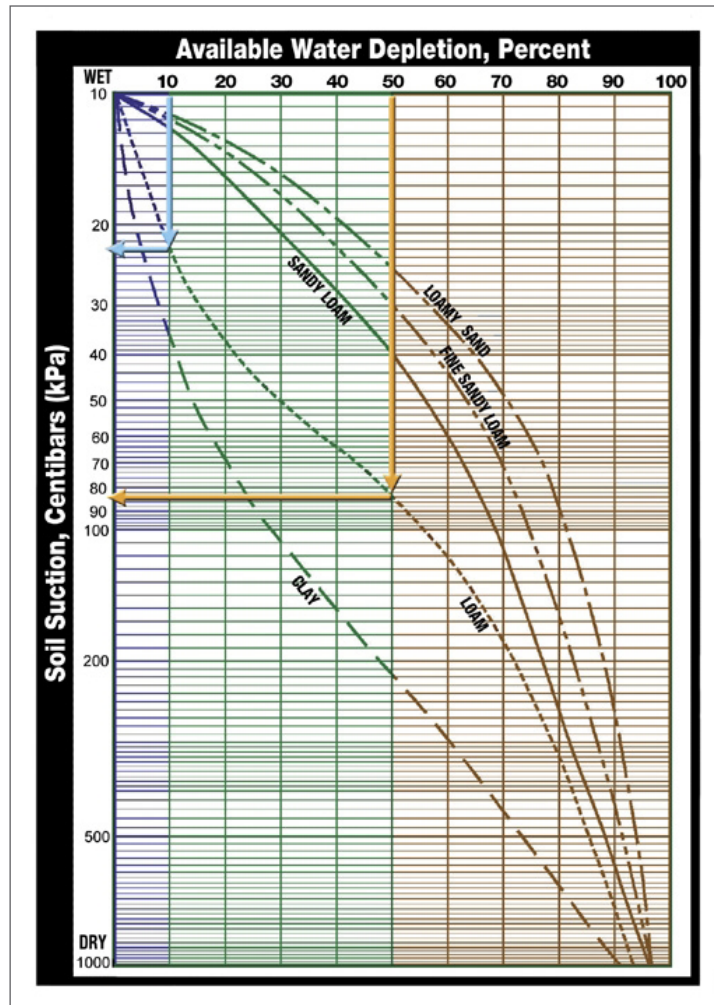


Figure 8. Relationship between usable water deficit and suction pressure for different soil types (based on data obtained with an IRRIMETER)

Interpreting the results of soil moisture measurements

When managing irrigation of fruit trees based on measured soil moisture data, it is first necessary to determine the amount of water in the soil that is available to the crop. FWC and other soil hydrologic properties can be determined by laboratory grain size analysis of intact soil samples or by an installed soil moisture sensor. If grain size analysis is used, the percentages of silt particle categories (< 0.01 mm), clay content (< 0.001 mm), and sand (> 0.05) content must first be determined (Figure 9). The soil hydrological limits are further determined according to published pedotransfer functions (Figure 10). The medium soils, which have a silt content ranging from 20 to 45%, have a FWC of about 24–37% by volume and a AWC of 15–22% by volume. For example, at a depth of 1 m, this corresponds to 150–220 mm at full water saturation (up to the FWC level), i.e. 150–220 liters of water per m^2 .

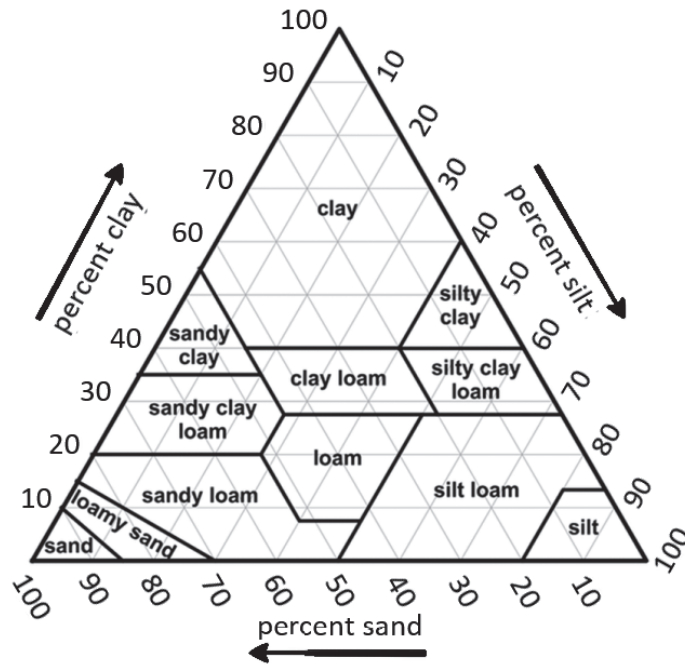


Figure 9. Soil textural triangle and textural classes (image from USDA-NRCS)

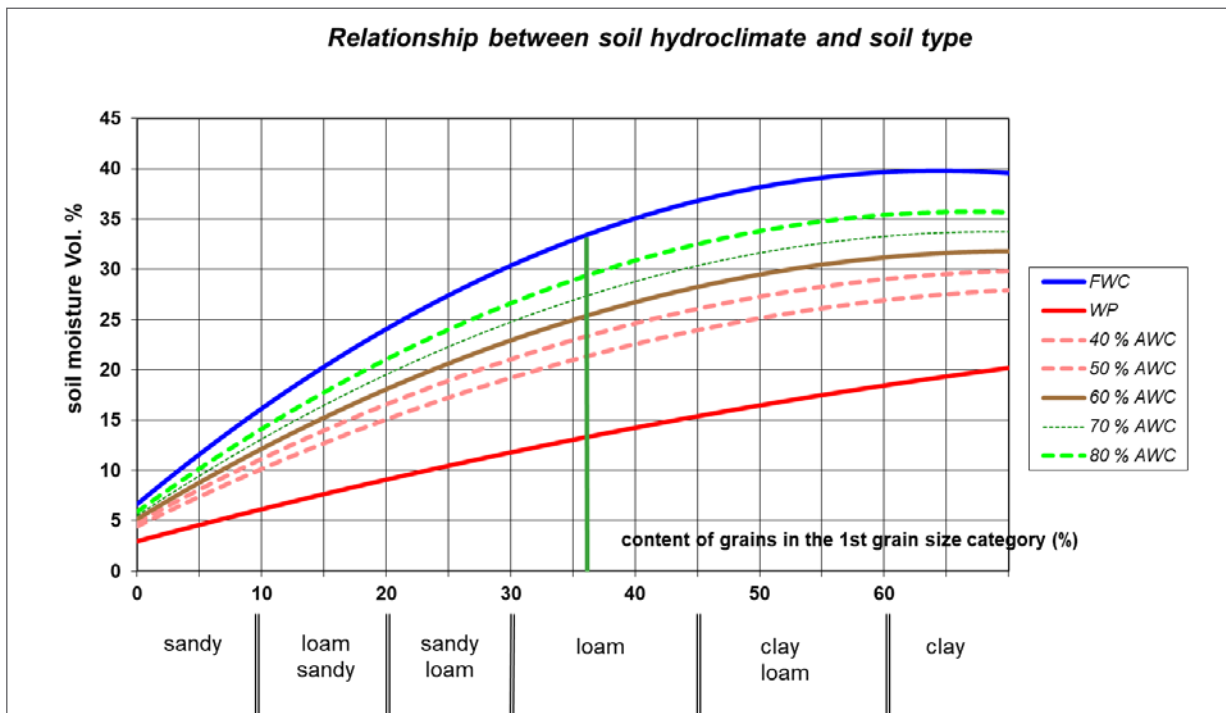


Figure 10. Relationship between soil hydrolimits and soil type

Using a sensor to determine FWC helps to offset the need to calibrate most sensors for that soil. In fact, the actual absolute value of the field water holding capacity is less important than the value of that limit identified by the sensor. What is more important is the accuracy of the sensor measurement, specifically its ability to give the same reading for the same soil

water content. The practical procedure for indicative determination of field soil water capacity by soil moisture sensors is to evaluate the waveform of the measured soil moisture. After heavy rainfall (at least 20–30 mm) or irrigation, soil moisture increases rapidly due to filling of capillary and non-capillary pores. If the subsoil is permeable, the non-capillary pores will gradually drain and after about a day the soil moisture content will drop to the FWC. On the graph, the change is reflected by a curve showing the moderation of the sharp drop in soil moisture captured by retention and its stabilization during the night hours (Figure 11). The measured soil moisture at the steady state point then corresponds to the FWC.

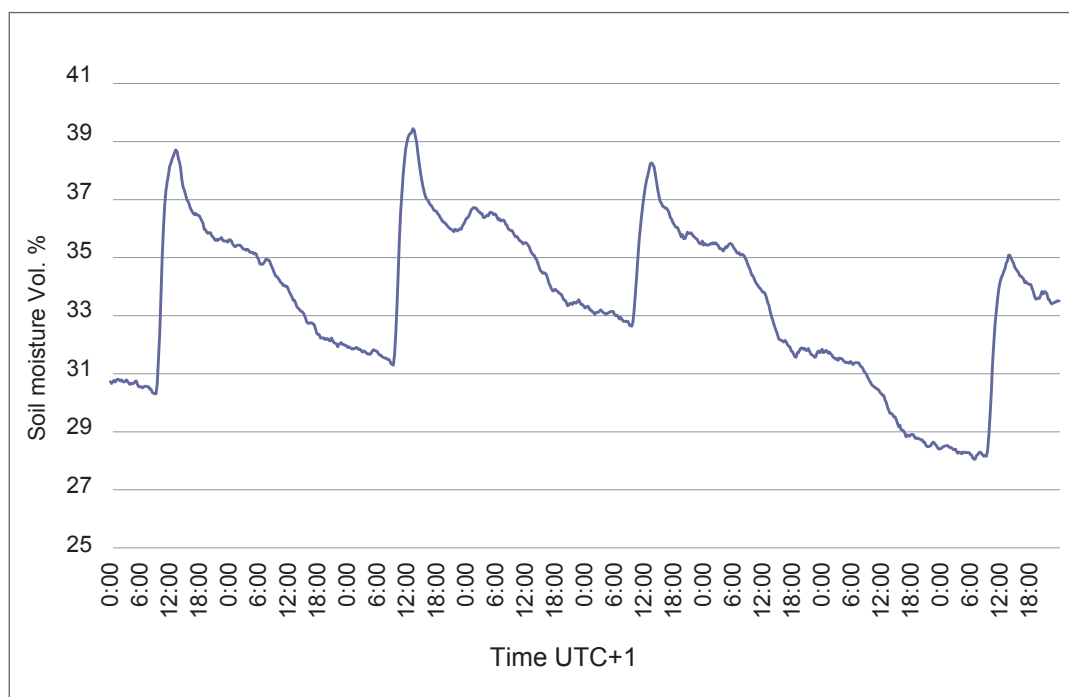


Figure 11. Illustration of soil moisture in apricots under drip irrigation from May 30 to June 6, 2022.

After the water is drained from the noncapillary pores, the soil moisture drops sharply again during the day as the plant roots draw water from the capillary pores while transpiring. The soil water content curve gradually decreases over the range of AWC. This range is further subdivided into freely available water and restricted water, depending on the availability of water to the plant. The boundary between these two states is called the point of reduced availability and is generally considered to be about half of the AWC. Within the range of freely available water, plants can extract moisture from the soil without limit. This pumping is reflected by a steady decrease in the curve of the soil moisture graph, the so-called “daily steps”, and allows some tolerance in the choice of the optimum irrigation value (Figure 12). In areas of reduced availability, there is insufficient uptake of water from the soil and consequently plants are usually drought stressed. The reason for reduced water availability is the gradual interruption of capillary water flow to the roots, and the plants are also forced to actively seek water through intensive root growth. Reduced water availability is reflected

in decreased intensity of roots water uptake and consequently by decreased drop of the soil water content (Figure 13).

Example:

If a soil analysis or soil moisture measurement shows that the field water holding capacity of a given soil is in the range of 33–34 vol. %, the wilting point, approximately 13 vol. %, can be read from the graph in Figure 10. In this case, the AWC of the soil is about 21 vol. %, of which the freely available water content is about 40–50%, i.e., in our case about 9 vol. %. It follows from the example given that in the soil moisture range of about 25–34 vol. % (corresponding to a limit of about 55% of the available water capacity), the plants can take up water without limitation and without suffering from drought. In the model example in Figure 12, the threshold for starting irrigation was set at 30 vol. %. For most of the period considered, the soil moisture in the controller-regulated irrigation was within the recommended range from the field water holding capacity to the point of reduced availability, and only after irrigation did overwatering occur for a period of time.

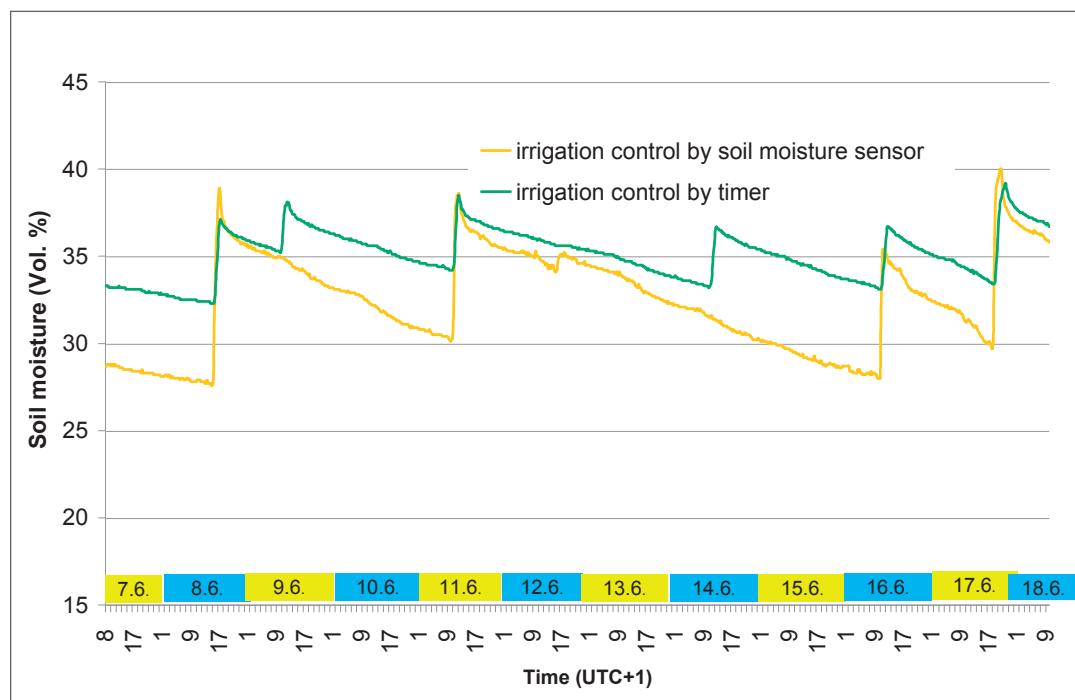


Figure 12. Soil moisture in the 5–30 cm layer determining field water capacity and other hydrolimits

The fact that the point of reduced availability has not been reached is indicated by the steady decrease in soil moisture during the period of no rainfall between the two irrigations, in Figure 12 it is the period from June 11 to 16, 2022.

It is neither physiologically nor practically advisable to keep the soil moisture close to the field water capacity values. This is because there is insufficient aeration of the soil and roots

do not thrive under these conditions. In addition, during heavy rainfall, the soil is already saturated, and the excess water drains away without benefit. On the other hand, it is not advisable to start watering only when the soil reaches a point of reduced water availability. If there is a deviation in the accuracy of the determination or a higher evapotranspiration requirement, there is no longer a reserve of water in the soil to meet the needs of the plants and they may suffer from drought.

Irrigation can be controlled manually or by an automatic irrigation system that evaluates soil moisture readings. Manual control is only suitable for small orchards with multiple irrigation sections where the grower decides to irrigate after taking soil moisture readings. Automatic irrigation makes it much easier to manage these processes. In the simplest version, the valve is controlled only by a set soil moisture limit in the irrigated soil volume under the dripper. More sophisticated systems allow other parameters including water pressure and flow, meteorological parameters to be monitored and transmitted to the control computer that opens the valves. The control of drip irrigation, not only for orchards, based on measured soil moisture is quite widespread in the world and allows to respond adequately to the individual parameters that affect the water balance in the soil, whether it is the amount of effective rainfall, water uptake by plant roots in different weather conditions, or the amount of irrigation water delivered. With rising electricity prices and more frequent dry spells with insufficient irrigation water, properly managed irrigation can result in significant savings without affecting yields. The system thus outperforms conventional systems of automated irrigation control by timer alone.

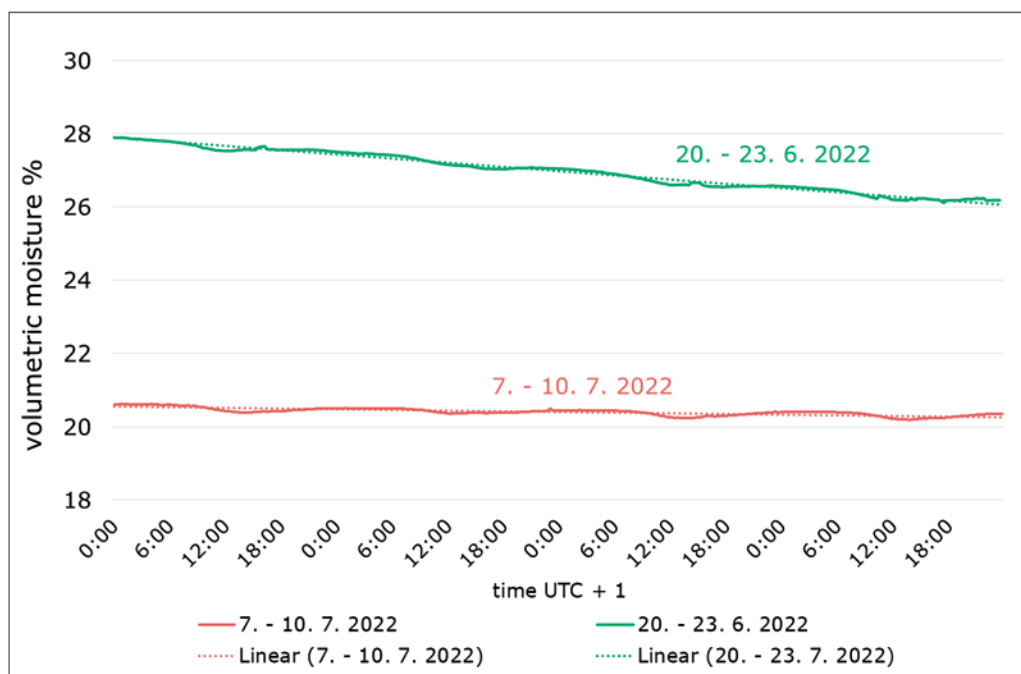


Figure 13. Plot of soil moisture in the orchard of apple trees without irrigation with sufficient soil moisture (green curve) and with moisture below the point of reduced availability (brown curve).

3.1.2 Method for determining irrigation requirements based on the moisture balance of the land

In addition to the soil, the atmosphere is an integral part of water movement in the plant environment. Water enters the atmosphere by evaporation from the surface of inanimate materials or by transpiration from living plant or animal systems. It is found here primarily in the vapor state, but it can also condense and return to the earth surface as rain or snow. From these and other variables, the movement of water in the environment, its volume, and its overall balance can be empirically determined.

3.1.2.1 Principles of the method

The determination of irrigation requirements based on the land water balance is based on comparing the gain and loss components. The method is based on the simplified assumption that water is transferred through the soil profile only in the vertical direction and the relationship can be defined by the equation:

$$V_f - V_i = P - I - O - E \pm Q$$

where:

- V_f ... soil water content at the end of the time interval,
- V_i ... soil water content at the beginning of the time interval,
- P ... precipitation per unit area of soil surface area during the time interval,
- I ... interception of precipitation on the plant surface,
- O ... surface and subsurface runoff,
- E ... evapotranspiration per time interval per unit area of soil surface,
- Q ... the volume of water passing through the lower boundary of the soil profile.

Assuming that interception, surface and subsurface runoff and water transport across the lower boundary of the soil profile are close to zero, the profile water balance equation can be simplified:

$$V_f - V_i = P - E$$

This simplification shows that the change in soil water content is based on the balance of precipitation or irrigation already applied on the input side and evapotranspiration on the loss side. If evapotranspiration exceeds precipitation and the water content of the soil profile falls below the optimum limit, the required amount of water must be supplied by irrigation.

3.1.2.2 Methods for direct measurement of evapotranspiration

The simplest method of measuring evapotranspiration is to determine evapotranspiration from the water surface. The principle is to take a daily reading of the water level in the container and subtract the evaporation loss from the rainfall. Light-colored metal containers (metallic silver, white) placed below or above the ground surface are usually used for this purpose.

Probably the most common way to measure evaporation from the water surface is to use the Class A evapotranspiration pan (Figure 14), which is a metal cylinder 120.7 cm in diameter and 25.4 cm in height placed 15 cm above the ground surface. This method is used as a standard in many countries and uses empirically determined coefficients to convert evaporation from the water surface into potential evapotranspiration of vegetation – mainly grassland and/or agricultural crops.

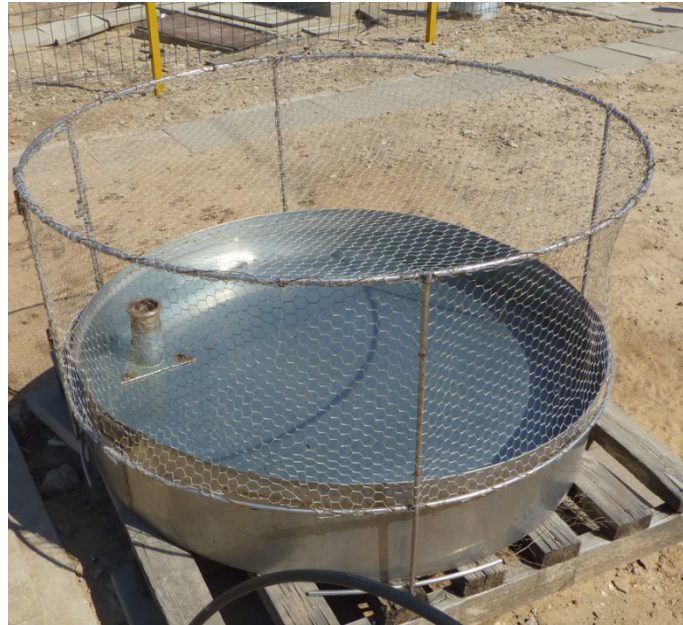


Figure 14. The Class A evaporation pan (Fiala, 2014)

A Lyzimeter (Gravity Monolithic Lyzimeter) is used for direct measurement of vegetation evapotranspiration. It uses a sample of the soil profile with the vegetation to be tested (e.g. grassland), which is placed in a weighted chamber (e.g. metal cylinder) equipped with instrumentation to record soil moisture. In addition to soil moisture and sample weight, the amount of water entering the chamber coming from rainfall or irrigation and leaving the chamber via outflow through the profile is measured. This equipment is typically used in research institutions, mainly because of the higher purchase price and the high requirements for maintenance, operation, control and evaluation of the measured data.

3.1.2.3 Determination of evapotranspiration by calculation

There are many calculation methods to determine evapotranspiration. Temperature, radiation, and other elements affecting surface evaporation (water, soil, vegetation) as well as vegetation activity and transpiration are usually included in the calculation. Simple empirical formulas require a minimum of input data. In contrast, combined methods are more accurate but also more demanding in terms of input data and instrumentation.

According to Novak (1995), evaporation calculation methods can be divided into:

- (a) Micrometeorological calculation methods (turbulent diffusion method, energy balance method, combined method, and pulsation method), which are based on the analysis of the distribution of meteorological elements in the surface atmosphere,
- (b) Empirical equations, used in particular when data are not available for the application of other methods
- (c) Water balance methods, which are based on the construction of a balance of the water content of a given volume of soil,
- (d) Evapotranspiration calculation methods based on the solution of the soil-root water transfer equations,
- (e) Methods based on the solution of water and heat transfer equations in vegetation
- (f) Determination of transpiration by measuring the intensity of solution flow in the xylem of plants, where this method allows the transpiration of an individual plant to be determined.

Among the less demanding methods, we can mention the Papadakis, Budyko and Zubenok, and Thornthwaite method. The most sophisticated and widely used method is the combined Penman equation and its modifications and developed forms.

3.1.2.3.1 *Methods for evapotranspiration calculation*

Papadakis method

$$ETP = 5.625(e_{mx} - e_{mn})$$

where:

- ETP ... evapotranspiration potential [mm.month⁻¹],
- e_{mx} ... the saturation water vapor stress calculated from the monthly mean of the daily maximum air temperature at 2 m above the ground [hPa]
- e_{mn} ... the saturation water vapor pressure calculated from the monthly mean of the minimum daily air temperatures at 2 m above the ground minus 2 °C [hPa].

Budyko and Zubenokova method

$$ETP = \rho \times D \times (q_s - q)$$

where:

- ETP ... potential evapotranspiration [mm],
- D ... turbulent transport velocity coefficient between the evaporating surface level and the measuring level in the weather booth [m.s⁻¹] (in summer $D \sim 0.003 \text{ ms}^{-1}$),
- ρ ... air density [kg.m⁻³],
- q_s ... specific humidity of air saturated with water vapor at evaporating surface temperature [kg.kg⁻¹],
- q ... the specific humidity of the air at a height of 2 m above ground [kg.kg⁻¹].

Thornthwaite method

This method works only with air temperature and calculates potential evapotranspiration only for months with positive temperatures

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10 \times T_m}{I} \right)^a$$

Where:

ETP ... potential evapotranspiration [cm.month⁻¹],

T_m ... mean monthly temperature [°C],

I ... temperature index [°C],

$$I = \sum \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.51}$$

T_i – long-term average air temperature in the i-th month of the year,

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 + (77.11 \times 10^{-6})I^2 + (17.921 \times 10^{-3})I + 0.49239$$

Mintz and Walker (1993) linearized the original Thornthwaite equation into a relationship that can be used to calculate evapotranspiration for individual days:

$$ETP = 0.17 \left(\frac{n_{max}}{12} \right) T$$

where:

ETP ... evapotranspiration potential [mm.day⁻¹],

n_{max} ... astronomically possible sunshine duration [h],

T ... average daily air temperature [°C].

Other simple empirical methods also exist, such as the equations of Turcova as well as Linacre and Ivanov. The result of these calculations is always the potential evapotranspiration.

Combined method of determining potential evapotranspiration

This method was first published by Penman (1948) and is based on the simultaneous solution of a system of equations describing the steady flow of heat and water vapor over an evaporating surface (turbulent diffusion method) together with an energy balance equation at the level of the evaporating surface.

The development of the Penman method resulted in a methodology for calculating crop water requirements published by Allen *et al.* in 1998 as the FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: “Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements”. The methodology is known as FAO 56.

It is based on the calculation of the reference evapotranspiration ET₀. This is the evapotranspiration of hypothetical grass canopy, which is defined as a short, fully established stand of 12 cm height, well supplied with water, with a constant albedo of 0.23 and a stand surface resistance of 70 s.m⁻¹.

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273.16} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)}$$

where:

- ET₀ ... reference evapotranspiration of the hypothetical grass surface [mm.day⁻¹],
- Δ ... is the derivative of the saturation water vapor pressure with respect to the air temperature [kPa.°C⁻¹],
- R_n ... is the radiation balance on the crop surface [MJ.m⁻².day⁻¹],
- G ... soil heat flux [MJ.m⁻².day⁻¹],
- γ ... psychrometric constant [kPa.°C⁻¹],
- T ... mean daily air temperature at 2 m above the surface [°C],
- u₂ ... mean daily wind speed at 2 m above the surface [m.s⁻¹],
- e_s ... saturation water vapor pressure at air temperature measured at a standard height of 2 m [kPa],
- e_a ... actual water vapor pressure calculated from air temperature and humidity at 2 m [kPa].

Among the meteorological elements, air temperature, humidity or water vapor pressure, wind speed, and solar radiation or sunshine hours from which theoretical radiation can be calculated, are needed to calculate the reference evapotranspiration.

To calculate the evapotranspiration of another crop, the reference evapotranspiration ET₀ is converted to the potential evapotranspiration of the crop by the crop coefficient K_c:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

This coefficient is different for different crops and also varies over time depending on the development of the vegetation during the season. A further calculation can be made to obtain the so-called actual evapotranspiration, using the water stress coefficient (K_s) determined on the basis of the knowledge of the soil moisture or the actual water availability for the crop. Information on rainfall and irrigation, information on the water holding capacity of the soil, and information on the ability of the crop to extract water from the soil are used in the calculation. The method is fully described by Allen *et al.* (1998) in the FAO 56 mentioned above.

3.1.2.3.2 Input Data for evapotranspiration calculation

Evapotranspiration of orchard crops can be calculated empirically by measuring selected characteristics. The data can be obtained from internal or external sources.

The data needed to calculate potential and actual evapotranspiration, or to model soil moisture or irrigation rates, can be divided into the following information groups:

- ▶ Geography of the site
- ▶ Soil profile characteristics
- ▶ Vegetation parameters
- ▶ Meteorological data

Geographic location

The basic geographic information that characterizes the location of a calculation point (e.g., station, plot) are latitude, longitude, and elevation. Latitude is used in some models for calculations related to solar radiation. The daily dawn and dusk data are used to determine the theoretical duration of sunshine by season (or day of the year). Geographic data can be determined using mapping portals, i.e. maps.google.com. In addition, some models use slope and exposure information.

Soil profile characteristics

The information about soil profile are needed to calculate actual evapotranspiration and soil moisture. Models use soil grain size (which indicates soil type) or hydrogeological parameters. In some models, soil grain size is converted to hydrolimits by a set of empirical functions (equations). The important parameters are wilting point, field capacity and available water capacity. Some models balance the input of water to the soil (precipitation, irrigation) and evapotranspiration on the output side and use this balance to determine the actual water supply in the soil, e.g., in the range of the available water capacity. According to the available water capacity (degree of saturation of the soil profile), the models then reduce the potential evapotranspiration to the actual evapotranspiration. Using hydrogeological parameters, actual soil saturation can be converted to soil moisture values.

Vegetation parameters

Vegetation information used in evapotranspiration models describes the temporal variation of vegetation parameters that affect water transport in the soil-plant-atmosphere system. Examples include root zone volume or depth of active rooting zone, stand height, and leaf area. Other data include selected phenological phases that affect vegetation development and water requirements. These include the onset of emergence, the onset of leafing, leaf fall, and fruit set. The data entered is usually converted into what is known as aerodynamic and surface resistance of the stand. Simply put, the aerodynamic resistance in the models affects the airflow and thus the transport of evaporated water from the plant surface, while the surface resistance represents the passage of water through the plant and the vents from the plant body (leaves) to the atmosphere. These parameters are calculated by subroutines and equations within each model. Aerodynamic drag interacts with wind speed, and vegetation surface drag interacts with solar radiation, temperature, and humidity, among other factors. Surface drag is also influenced in models by available soil moisture or other (stress) factors that affect the closure of vents. The FAO 56 methodology provides a large extent of information on a wide range of crops that can be used in the calculation of evapotranspiration, including the data required and the procedures for their determination.

Meteorological data

Meteorological data used in more complex models include average, minimum, and maximum air temperature, average humidity, global radiation or sunshine duration, average wind speed, and precipitation. Most models work with daily data. Humidity is most often included in models in the form of water vapor pressure, which can be calculated from humidity

and temperature. Direct information on solar radiation is also often not available. This can be calculated from sunshine duration for the purposes of the models. Precipitation information is usually not needed to calculate potential evapotranspiration. It only enters the calculation when actual evapotranspiration is calculated, and soil moisture (soil water storage) is modeled.

Some models consider an annual run from the beginning of the year (January 1), and the initial soil moisture at the beginning of the run (year) must also be included in the values used by the model. In some models, full profile water saturation is considered for simplicity. Similarly, initial conditions must be specified if the model is run during the growing season. Some models can be used in a continuous run, i.e., several years in a row. In this case, winter conditions must be considered.



Figure 15. Meteorological station for automatic collection of data

Actual meteorological data collection

The actual measurement of meteorological data can be done by purchasing and operating a meteorological station (Figure 15). If the measurement of meteorological variables is to be carried out in a standardized way, a description of the methods and characteristics of the instruments and other details are presented in the World Meteorological Organization (WMO)

Methodology No. 8: Guide to “Instruments and Methods of Observation”, which is freely available on the WMO website (2021).

The actual measurements are demanding in terms of station acquisition, maintenance, and data control. If the process of calculating evapotranspiration or other parameters is to be automated, it is also necessary to operate an in-house data server (or a computer) connected to the weather station, or to outsource it as a paid service. However, this method is now widely used and allows for more flexible data manipulation and easier process automation.

External sources of weather data

The national meteorological service operates measurement and provision of meteorological data in every state. In some cases, current or historical data can be found on the meteorological service’s website, in some cases if the data are opened, they are available via API.

Additional meteorological data can be found on the websites of various organizations, cities, and companies, but these products may have different approaches to data measurement both in terms of the instrumentation used and its location, and in terms of data control.

Measured meteorological data and the results of climate scenario models for the future can be accessed can through the Copernicus Climate Data Store, (<https://cds.climate.copernicus.eu>).

If it is necessary to perform model calculations for the near future, weather forecast data must be obtained. Weather forecast information is provided by national meteorological services. Weather forecasts are available on numerous websites, for example, the national meteorological services and other portals: www.windy.com, www.yr.no, charts.ecmwf.int and many others.

Apart from the irreplaceable position of human meteorologists, weather forecasts today are largely the result of meteorological models. Meteorological models compute the predicted values of individual elements from the initial state of the atmosphere at a given time, which together describe the predicted future state of the atmosphere. By time integration of equations describing the dynamics, thermodynamics, and energetics of the atmosphere, they calculate mainly the components of the flux. In addition, other elements such as precipitation intensity and cloud cover are calculated indirectly using various complex parameterizations. With respect to the extent of the area considered in the models, there are local and global models.

Global prediction models simulate the behavior of the atmosphere over the entire Earth. They are computationally very demanding. The best known are the US GFS model, the ISF model of the European Center for Medium-Range Forecasting in the UK (ECMWF), and the ARPAGE model of Meteo France.

Local models calculate weather forecasts for a limited area, possibly based on and refined by global model results. Almost all national meteorological services in Europe operate their own local model, and there are also several models operated by private companies and research centres.

3.1.2.4 Methods for Evapotranspiration Modeling

At present, there are many computer programs – models that result in evapotranspiration (reference, potential or actual), modeled soil water storage (soil water saturation), or even recommended irrigation amounts. In terms of the principle of calculation of evapotranspiration, most of the models use a modified Penman equation, where different coefficients or sub-algorithms are used to calculate these coefficients.

In addition to rewriting these equations in a spreadsheet (e.g. MS Excel), a freely available simple form of evapotranspiration calculation is, for example, the package ‘EcoHydroTools’ or ‘Evapotranspiration’ within the freely available programming language R (www.r-project.org).

Some of the models or programs that include equations for calculating evapotranspiration, auxiliary coefficients, and other methods are for example CropWat, AquaCrop, and ETo Calculator developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) or Czech model SoilClim.

CropWat

CropWat is a computer program for the calculation of crop water requirements and irrigation requirements based on soil, climate and crop data. The program allows the development of irrigation schedules for different management conditions and the calculation of scheme water supply for varying crop patterns. Downloads of the programs and detailed information can be found at <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>.

AquaCrop and ETo Calculator

ETo calculator is used to determine reference evapotranspiration according to the FAO 56 methodology. AquaCrop is a crop growth model that simulates the yield response to water supply. It uses a relatively small number of input parameters and mostly intuitive variables that require simple methods for their determination. The computational procedures are based on fundamental and often complex biophysical processes to ensure accurate simulation of the crop response in the plant-soil system. It is a very comprehensive program with well elaborated documentation. Downloads of the programs and detailed information can be found at <https://www.fao.org/aquacrop> and <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en>.

SoilClim Model

This model has been developed by a broad scientific team, including experts from the USA. The program can also be found and downloaded at www.snowmaus.wz.cz.

The model is based on the FAO 56 methodology, but sub-algorithms and methods have been modified as part of the research activities of the model developers. For the meteorological elements, maximum and minimum daily air temperature, average daily humidity, global solar radiation, average wind speed, and precipitation are included in the SoilClim model.

The Institute of Global Change Research of the Czech Academy of Sciences (CzechGlobe), the Mendel University in Brno, and the State Land Office operate the web portal Intersucho.cz, which presents, among other things, the results of the SoilClim model.

The very comprehensive system presented on the intersucho.cz web portal includes, in addition to the model results, information from a network of expert newsletters from agriculture, forestry, orchards, viticulture, nurseries, and related fields, which provide regular weekly reports assessing the current state of the drought and its effects. The system also uses satellite imagery from the Earth Remote Sensing Program.

Commercial software applications for irrigation of fruit trees

There are several sophisticated software's dedicated directly to determining the irrigation requirements of fruit crops. These programs process data for calculating evapotranspiration daily allowing variable setting of irrigation regime according to chosen irrigation strategy. They are user friendly giving the results visualized in clear graphs using web interface including a suggestive description of the water balance in the orchard and recommendation for irrigation. In many cases, these programs allow on-line control of the orchard status and accessing of the operation of the irrigation system from a mobile device. These programs are principally provided commercially in form of software applications or services, like for example:

<https://www.itk.fr/en/research-and-development-projects/vintel-orchards/>

<https://www.swansystems.com/industries/horticulture/>

As part of the use of remote sensing of Earth (RSE), some of the evapotranspiration calculation equations and models are applied to the post-processing of Earth images. Such products and projects include for example:

MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD 16) – University of Montana –
<http://www.nts.gov/umt.edu/project/modis/mod16.php>

Crop Productivity and Evapotranspiration Indicators from 2000 to Present Derived from Satellite Observations – Copernicus Climate Change Service –
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agroproductivity-indicators>

Sentinels for Evapotranspiration (Sen-ET) – European Space Agency (ESA) –
<https://www.esa-sen4et.org>.

3.1.2.5 Interpretation of results and irrigation management

The methods described – both equations and models – either provide information on crop evapotranspiration or directly model soil moisture storage (~ soil moisture) or moisture balance, i.e., quantification of rainfall surplus and deficit relative to evapotranspiration. Most models provide results in units equivalent to rainfall – i.e., mm water column. For some applications, the values must be converted to, for example, m³.ha⁻¹ or other units used in irrigation practice. The need to start irrigation occurs when the sum of the moisture deficit observed over the previous period reaches the volume of the specified optimum rate. An important factor is the quantification of the optimum moisture or soil moisture volume (moisture in % volume or percentage of available water capacity) to be maintained by irrigation. Due to the nature of the input and output processes, the system allows for full automation of irrigation. Thus, when the demand is met, an automatic start occurs by opening the valve and irrigation occurs at the set rate.

3.1.3 Method for determining irrigation need based on plant physiological response

A method based on the assessment of the physiological response of the plant can be used to determine irrigation requirements. From this perspective, plants can be viewed as “biosensors” that integrate the influence of soil moisture availability, the evaporative potential of the atmosphere, and the characteristics of the plant itself. Plants respond to drought stress with a variety of physiological responses, the study of which is the subject of plant physiology.

3.1.3.1 Principles of the method

The theoretical advantage of methods based on the physiological response of the plant over methods based on soil moisture or the water balance of the land is that they focus directly on the condition of the crop rather than on the condition of the environment in which the crop is located. For example, methods based on the physiological response of the crop can better capture spatial heterogeneity in irrigation needs, better relate irrigation needs to phenological development and crop age. Another important application of physiological methods is the precise adjustment of deficit irrigation, which has advantages both in water saving and in improving quantitative and qualitative yield parameters. The disadvantage of these methods is the need for specialized and often quite expensive instrumentation. Another limitation associated with the use of mainly conventional, non-automated methods for determining crop water status is their complexity and the associated need for measurement and evaluation of results by a skilled person. The second option is the use of automated continuous sensors for selected plant physiological processes, which, together with automated adjustment of the irrigation system, eliminates this need.

In practice, plant water status can be assessed using the following methods:

Plant water potential – This is the basic variable that describes the water status of a plant. It is an expression of the chemical energy of water in the system. It is conventionally expressed in units of pressure and indicates the tension of the water column in the vessels of the conducting tissue.

Stomatal conductance – Stomata are miniature openings in plant leaves that allow water to evaporate from the leaves and carbon dioxide to enter the plant from the surrounding air, a necessary substrate for photosynthesis. The stomata are very sensitive to water deficiency and respond by closing in the absence of water. Therefore, a reduction in leaf stomatal conductance can be a very good indicator of drought stress and therefore the irrigation needs of the crop.

Stem Circumference Change – Another method of providing information on plant water status and drought stress is to measure changes in stem circumference using automatic dendrometers. These measurements record not only the gradual increase in stem width due to the growth of wood bundles, but also the periodic expansion of the stem during the night and its contraction during the day due to water loss through transpiration. The magnitude of the amplitude of this diurnal oscillation, i.e., the reduction in daily increments or even termination of growth, is considered a good indicator of drought stress and irrigation needs.

Measurement of transpiration flux – Transpiration flux and its intensity can be measured by thermal methods. The principle of this group of methods is to measure the heat transfer that occurs with the movement of water through the transpiration stream in the woody bundles. Again, the flux and its changes provide the basis for determining the irrigation needs of the crops being grown.

3.1.3.2 Types of meters, installation methods, operation, and technical equipment

Water Potential Measurement

The most direct method of determining the water status of a plant is to measure the water potential of its organs. This method has a long tradition in plant physiology and is technically relatively simple. Water potential measurements can be made in an intermittent (discrete) or continuous mode. In the discrete mode, measurements are made on cut plant parts (usually leaves) using a Scholander pressure chamber (Figure 16). This apparatus consists of a steel vessel with a rubber-sealed lid connected to a pressure gauge. The vessel is closed with the sample to be measured inside so that the cutting surface of the stem protrudes from the lid and is properly sealed in the lid. The vessel is then pressurized by introducing compressed nitrogen or air from the attached cylinder. The pressure in the chamber is gradually increased until the cutting surface of the stem begins to wet with water squeezed out of the observed sample. The Scholander chamber operator carefully observes the cutting surface of the petiole and records the pressure value at which the cutting surface is wetted. When observing small petioles (e.g. apricots), it is advisable to use a magnifying glass for observation. The pressure at which the cutting surface of the petiole is wetted is called the equilibrium pressure and corresponds to the absolute value of the water potential of the sample. The water potential of the leaf is then given as a negative number, since it corresponds to the suction pressure that the plant must exert to take up and transport water in the woody bundles (Figure 17).

Water potential measurements can be performed in several modifications. Water potential can be measured directly on transpiring leaves. Such a measurement is strongly affected by actual evaporation from the leaf and is for example sensitive to changes in irradiance. A more robust parameter, and therefore recommended for assessing irrigation needs, is xylem water potential. This measurement is made on leaves that have been sealed in a bag covered with impermeable aluminum foil for at least 1 hour. The water potential of the xylem is equalized in the wrapped leaves, which are not transpiring. Measurements of leaf or xylem water potential should be taken around midday when the values are usually lowest (i.e. most negative). Water potential measurements are also often made on leaves taken before dawn. In this case, it is assumed that trees do not transpire at night and that the water potential between the plant and the soil is in equilibrium. The water potential measured before dawn can therefore be considered as an indicator of the water potential of the soil within reach of the plant root system.

Water potential measurements made in this way allow an informed estimate of drought stress thresholds for different species and under different environmental conditions. The disadvantage is that these measurements must be made manually at discrete intervals, which makes it impossible to link them to automatic irrigation management systems.

A promising alternative to these measurements appears to be the newly developed continuous microtensometer-type sensors Florapulse for measuring water potential (<https://www.florapulse.com/>). The sensors are installed on two sides of the tree trunk and allow continuous monitoring of the orchard and transfer of data to a web interface that allows evaluation of the condition of the fruit trees in the orchard as well as irrigation management.



Figure 16. Scholander pressure chamber for water potential measurement. At lower right, a leaf is fixed in the lid of the pressure chamber.

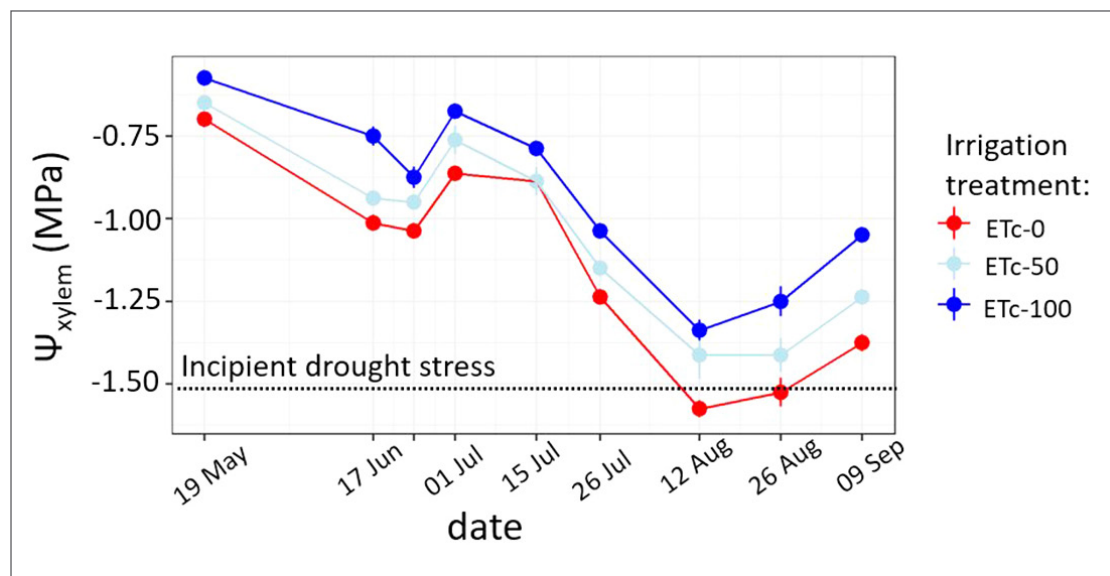


Figure 17. Comparison of xylem water potential (Ψ_{xylem}) for the three irrigation treatments during the 2022 growing season. For the non-irrigated treatment (ETc-0), the water potential value dropped below -1.5 MPa during the season, a threshold considered to be the onset of significant drought stress.

Measurements of stomatal conductance and leaf gas exchange

Measurements of leaf conductance can be made with porometer or infrared gas analyzer-based instruments (Figure 18). Due to the relatively complex and very expensive instrumentation, these methods are currently only used in research, but are routinely used in plant physiology. Measurements are made on intact, i.e., unstressed leaves enclosed in a measuring chamber. The leaf is left in the chamber for a few minutes to adapt to the new environmental conditions. More sophisticated instruments have a wide range of parameters that can be controlled in the sample chamber including irradiance, humidity, and leaf temperature. Stomatal conductance, transpiration rate, and photosynthetic rate are then calculated from the measured changes in water vapor and carbon dioxide concentrations in the sample chamber. Measurements of leaf gas exchange are very sensitive to changing environmental conditions, so it is recommended that measurements be taken in sunny weather and around midday. It is also ideal to measure diurnal variations in stomata conductance or the response to different levels of irradiance before beginning a larger seasonal measurement. However, these recommendations imply a significant limitation on the number of plants that can be measured on a given day or season so that results can be compared. In our experience, a maximum of 30 plants can be measured in field conditions on any given day.



Figure 18. Measurement of air conductivity, photosynthesis, and transpiration with an infrared gas analyzer (LI-6800).

Measuring changes in trunk circumference with an automated dendrometer

Dendrometers are sensitive sensors (Figure 19) that can detect changes in trunk circumference or diameter with a resolution of up to 1 μm over a time interval of 5 min. These sensors are attached to the trunk with a steel band or drilled into the trunk with a screw. The data are measured continuously, providing continuous information on changes in stem growth during the growing season.

Dendrometric measurements of changes in trunk circumference (Figure 20) provide a good option for irrigation automation. Commercial irrigation management systems using this method have already been developed in southern European countries Spain and France. However, even with this method, the correct execution of the measurements as well as the evaluation and interpretation of the data are not straightforward. The temperature sensitivity of the measurements must be considered when installing the sensors. Although the sensors are made of a material with low thermal expansion, it is recommended to install the dendrometers in the set so that they are exposed to as little direct sunlight as possible. Care should also be taken to ensure that the steel band used to secure the dendrometers to the trunk fits tightly around the circumference of the trunk. On older trees, it is sometimes necessary to scrape off the outer peeling layer of bark. On young trees, the dendrometer holder may cause cracks in the bark, which can affect the quality of the data. Dendrometers should be checked periodically and reinstalled if stem growth exceeds the measurable range. Reinstalling the dendrometers every 1–2 years is sufficient in most cases, but this interval may be shorter for fast-growing trees.



Figure 19. Automatic (top) and manual (bottom) band dendrometers installed on the trunk of an apple tree.

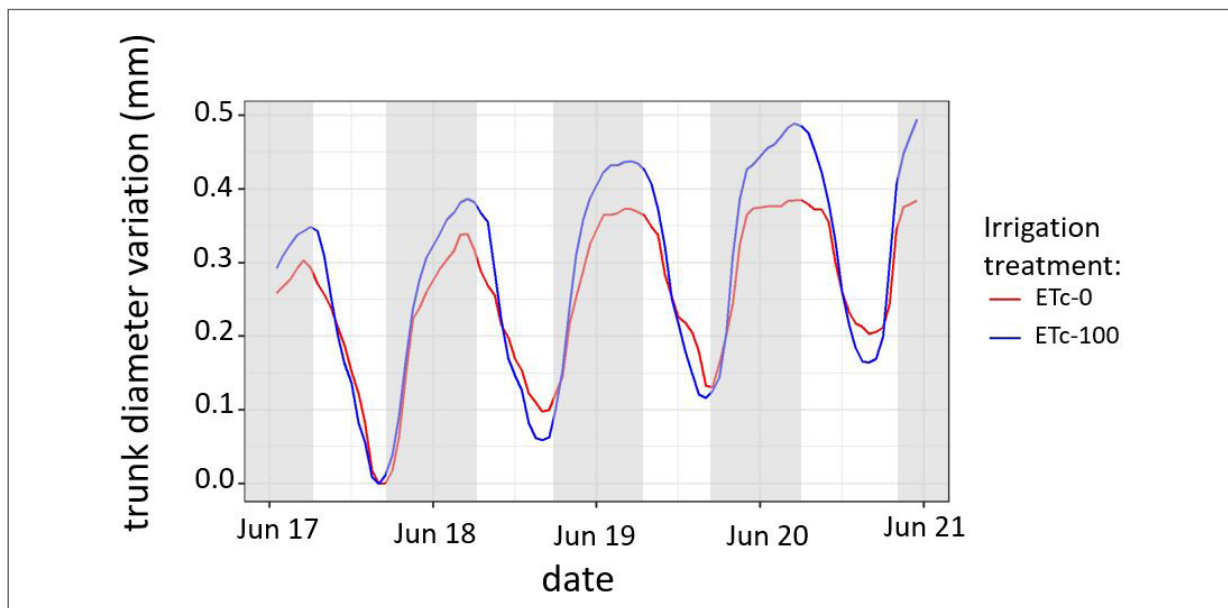


Figure 20. Change in trunk circumference over five days recorded by the automatic dendrometer for the non-irrigated (ETc-0) and irrigated (ETc-100) variants of the apple tree orchard. The trunk grows slowly and at the same time there is a regular oscillation related to the change of water supply in the trunk. The daily increments and the amplitude of the oscillation are lower in the non-irrigated apple tree.

Measurement of transpiration flux

The last plant physiological method that is discussed in more detail is the measurement of transpiration flux by thermal methods. These measurements can be carried out in various modifications, but their common principle is that they use measurements of heat transfer in the trunk to calculate the transpiration flux of water. The sensor is installed in the trunk so that the sensor electrodes are embedded in the vascular bundles under the bark of the fruit tree. The trunk or part of the trunk is continuously or in pulses heated and the transfer of this heat to the unheated parts of the trunk is monitored, assuming that the heat is mainly transferred with the transpiration flux. The installed sensors must therefore be well insulated from the effects of rapid changes in ambient temperature, e.g., by aluminum foil. The basic principles of commercially produced instruments are (in order of introduction in practice) measurement of the rate of movement of the heat pulse, heat balance of the strain, heat dissipation, and deformation of the thermal field. The heat balance method is the most accurate, the heat dissipation approach is the easiest to manufacture, and the heat pulse method consumes the least electricity.

3.1.3.3 Interpretation of Irrigation Measurements and Control

Plant water potential – Water potential measurements must be interpreted in a broader physiological context. Although water potential is a direct indicator of plant water status, its value is subject to feedback physiological control, the parameters of which vary between species and crop varieties. While in some species called anisohydric the water potential values follow the drying of the soil, other species called isohydric species tend to maintain

a constant water potential value even under increasing drought conditions. This water potential value is mainly achieved by closing the leaf stomata. Measuring leaf stomatal conductance is therefore another important indicator of plant water status.

Leaf stomatal conductance – The interpretation of the results of stomatal conductance and leaf gas exchange measurements should take into account the differences between the iso – and anisohydric response of species and cultivars, as mentioned above in the section on water potential measurements. In the long term, it is also possible that plants may reduce leaf area by their abscission in response to drought, thereby reducing evaporation independently of stomatal conductance. It is also important to consider differences in fruit set, as trees with high fruit set tend to have higher stomatal conductance than trees with low fruit set.

Trunk circumference change – When interpreting data, it is sometimes difficult to separate circumference changes due to growth from those due to changes in water content. These changes are also sensitive to rainfall, with a significant increase in trunk circumference on rainy days, probably due to water being drawn into the canopy, which normally does not contribute to water storage. These irregular oscillations complicate data interpretation and make routine use of dendrometers in environments with frequent rainfall such as in the temperate climate zone difficult. However, more robust models combine trunk circumference with measurements of the transpiration flux allowing to amend these oscillations are recently tested.

Transpiration Flux Measurements – The most important parameters that can be obtained with this method include sap flux density and sap flux magnitude, which integrates sap flux density over a given cross-sectional area of the trunk or sapwood, i.e., the younger radial portion of the trunk containing functional wood. A reduction in volume density or flux magnitude can be considered an indicator of drought stress and irrigation requirements. Flow can also be integrated over a unit of time and, for example, flow per day can be calculated, which can then be considered as the daily water use of the tree. This parameter is very informative from an irrigation management point of view, as it can be used to derive the recommended daily irrigation rate in $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$. The measurement of transpiration flux theoretically offers a good possibility for automation, since the installed sensors measure continuously, and the measured parameters are sensitive to the water status of the plant. On the other hand, transpiration flux is sensitive to the evapotranspiration requirements of the atmosphere and therefore needs to be considered in the context of the current weather. Interpretation of measured data is also complicated by the heterogeneity of radial flux profiles across the stem, which needs to be well characterized.

Irrigation management

The actual irrigation management involves measuring the signal intensity of a selected physiological water deficit indicator (WDI). The signal intensity (SI) is quantified as the ratio of the WDI in the irrigated variant and the WDI_r (the reference value) measured in the absence of soil drought. The purpose of this calculation is to consider the effect of evaporation of water from the plant to the atmosphere, which will always result in a water deficit. The signal intensity is therefore calculated using the following formula:

$$SI = \frac{IVD}{IVDr}$$

The reference WDI_r can be measured on fully irrigated trees or determined, for example, before irrigation begins when the soil is still fully saturated. Another possibility is to use physiological parameter values measured after rain or the day after irrigation. Finally, a commonly used option is to estimate a reference indicator using a reference formula, which relates the WDI value to a selected micrometeorological parameter related to the evaporative potential of the atmosphere including vapour pressure deficit, global radiation, reference evapotranspiration, and air temperature. However, reference formulas have a degree of uncertainty, and the relationship between the WDI and the atmospheric parameter may depend on other relevant circumstances, such as the phenological phase.

The next step in determining the irrigation rate is to determine the required signal intensity. If we want to completely eliminate soil drought, we will aim for $SI = 1$ (WDI irrigated variant = WDI_r fully irrigated variant). If we want to irrigate in deficit mode, we aim at $SI > 1$. Therefore, we will set the required signal intensity according to the formula

$$\text{Required signal} = \text{reference signal} \times \text{threshold}$$

The threshold is determined by expert judgment based on previous measurements or available literature.

If we have a reference signal and a desired threshold, we make an WDI measurement at the target irrigation and compare it to the desired SI. If a difference is found, we adjust the irrigation rate by $\pm 10\text{--}20\%$ and repeat this process periodically during the irrigation season.

The principle described above implies that adjusting irrigation by measuring the physiological response of the plant requires good knowledge of the irrigation system, ideally based on detailed previous measurements. The selection of a particular WDI, the species-specific parameters and the relationships required for effective irrigation adjustment are currently being refined in experimental measurements for different species and different environmental conditions. Together with the development of continuously measuring sensors, or as a result of the calibration of WDI with parameters obtained by remote sensing methods, we will certainly see a wider implementation of these methods in the future.

3.1.4 Methods of remote sensing of the Earth

Along with the development of technologies in the industrial sector, their use in agriculture and horticulture is also developing. If we focus on methods of remote sensing of Earth (RSE), these are methods that acquire data from a distance as their collective name suggests, without direct contact with the vegetation being assessed. These are mainly image data. Their development in the past was linked to the launch of satellites into orbit and the possibility of using the images they were able to record. Today, it is not only satellite images that are used, but also other platforms such as aircrafts or unmanned aerial vehicles. All these platforms are essential as data-gathering sensor platforms. These sensors take images of the area of interest, which are then the basic output of these technologies. Compared to conventional stationary sensors or point measurements, RSE methods are able to analyze larger

areas in a shorter period of time. In the case of point measurements, such efficiency can only be achieved by modeling and estimating the system behavior in the area of interest.

3.1.4.1 Principles of RSE methods

Regarding the sensors and RSE methods that are used for assessing vegetation quality and various stresses, we encounter most often the use of vegetation indices. These indices are actually mathematical formulas that work with the acquired images. The images are the output of carried devices that record the intensity of the reflection of solar radiation or the direct radiation of various surfaces (passive sensors) or record the reflected radiation that these sensors themselves emit (active sensors). In the case of vegetation, the reflection of solar radiation from surfaces is mainly used in the near infrared (NIR) region of spectra. In this region of radiation, which is not visible to the human eye, the incident light is reflected many times in the plant cell structure and the amplified signal is then picked up by the sensors. From the resulting images, it is then possible to distinguish subtle differences in reflectance, the intensity of which depends on the structure and quality of the plant cells. The data obtained can be compared using vegetation indices.

One of the most frequently used indices is the normalized difference vegetation index (NDVI). Its application in RSE and precision agriculture is very common. It is an index combining in its calculation the intensity of reflected radiation in the red and near-infrared part of the spectrum.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Over the years, some shortcomings of this index for precision agriculture applications have been identified and other indices have been developed to analyze vegetation condition. Examples include the normalized difference red edge (NDRE), which uses the so-called red edge region, i.e. the radiation between the red and near-infrared parts of the spectrum, instead of the NIR, or the Green NDVI (GNDVI), which uses the green region. The normalized difference water index (NDWI) can also be applied for assessing drought stress. The NIR and short wavelength infra-red (SWIR) radiation is used to calculate this index, and this index has other modifications.

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

The results for all vegetation indices are maps in so-called false colors, which evaluate the vegetation status in values from 0 to 1. The basic principle of reduced reflectance of stressed vegetation compared to vegetation in good health is used to interpret such results. This phenomenon is also used to assess stress, but it cannot be used to determine the cause in detail. An example of the calculation and interpretation of the NDVI index is shown in Figure 21.

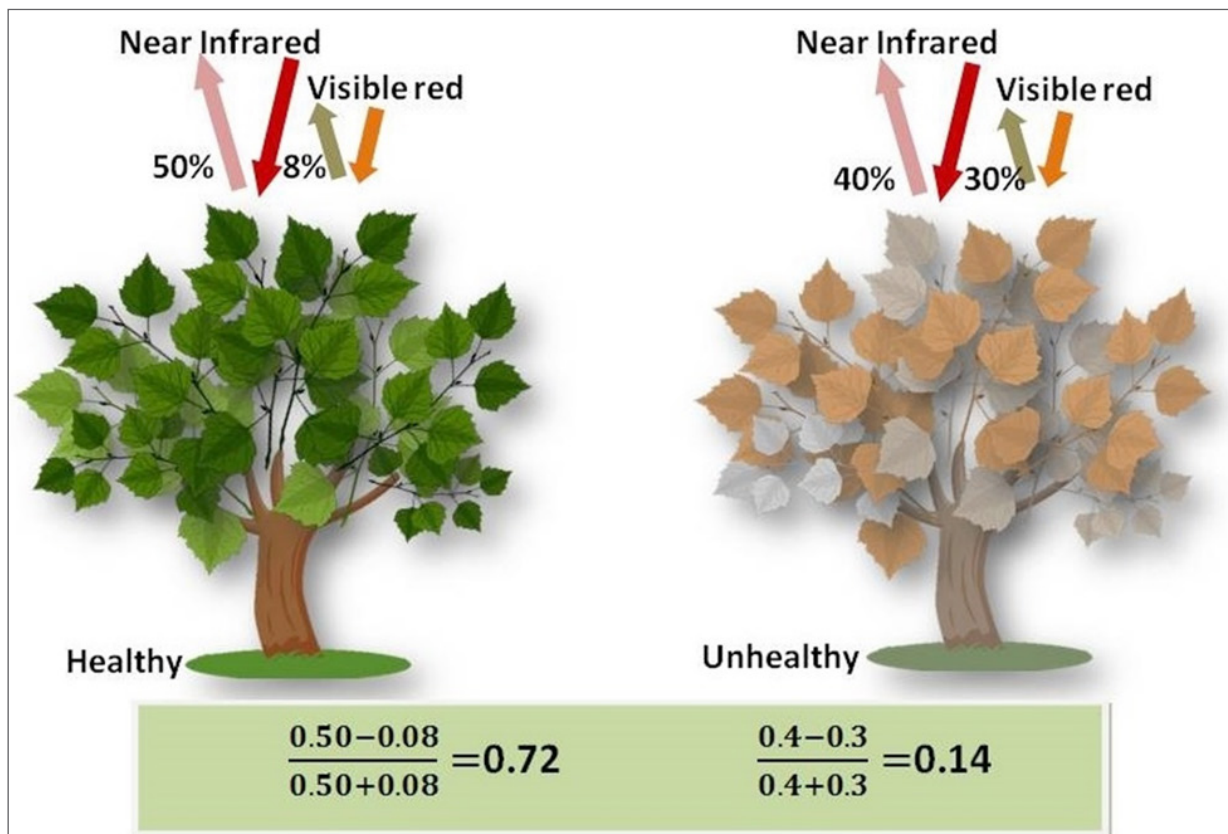


Figure 21. Schematic representation of NDVI vegetation assessment results for a healthy stand (left) and a stressed stand (right). Adapted from Wu *et al.*, 2014.

The reduction in solar reflectance of vegetation, mainly leaves, is caused by changes in the cellular structure of the leaves. When vegetation is stressed, cellular structures and chlorophyll are degraded, resulting in color changes. These changes may be visible to the human eye later, but sensors are able to detect them earlier due to their ability to capture a wider range of wavelengths than those visible to the eye. However, in the case of degradation in cellular structures, the change is always delayed compared to the actual condition, and therefore this method cannot be recommended for estimating the current irrigation requirement. However, it can be used to identify areas that are more susceptible to drought stress and thus create a zoning of the plot for more efficient irrigation. However, Borgono-Mondino *et al.* (2022) demonstrated the possibility of using vegetation indices to estimate midday stem water potential. These authors used Sentinel 2 satellite imagery and the vegetation indices NDVI, NDRE, and modified NDWI and compared the results with point measurements in a pomegranate orchard.

Therefore, for drought stress monitoring and its use in irrigation scheduling using RSE methods, it is advisable to focus on parameters other than radiation reflectance. It is possible to use thermal cameras and imagery that have high sensitivity and can assess surface temperatures in relation to current atmospheric conditions (Figure 22). For this type of data, the crop water stress index (CWSI) has been developed, which is able to evaluate the plant surface temperature (T_c) at a given time in relation to the ambient air temperature (T_a). At the same time, the temperatures of the well-watered vegetation ($T_c - T_a$)_{II}, which does not

suffer from drought stress (T_{wet}), enter the equation and represent the potentially lowest value. The second variable $(T_c - T_a)_{ul}$, on the other hand, expresses the maximum value of the dried leaf with closed stomata (T_{dry}). Both parameters can be modeled from measured temperatures and other real atmospheric parameters, according to Idsa *et al.* (1981), or these surfaces can be artificially simulated in the place and real values measured, as reported by Poblete-Echeverría *et al.* (2017). The formula for calculating this index presented below, includes a simplified version that is used assuming a constant ambient temperature.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{II}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{II}}$$

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$

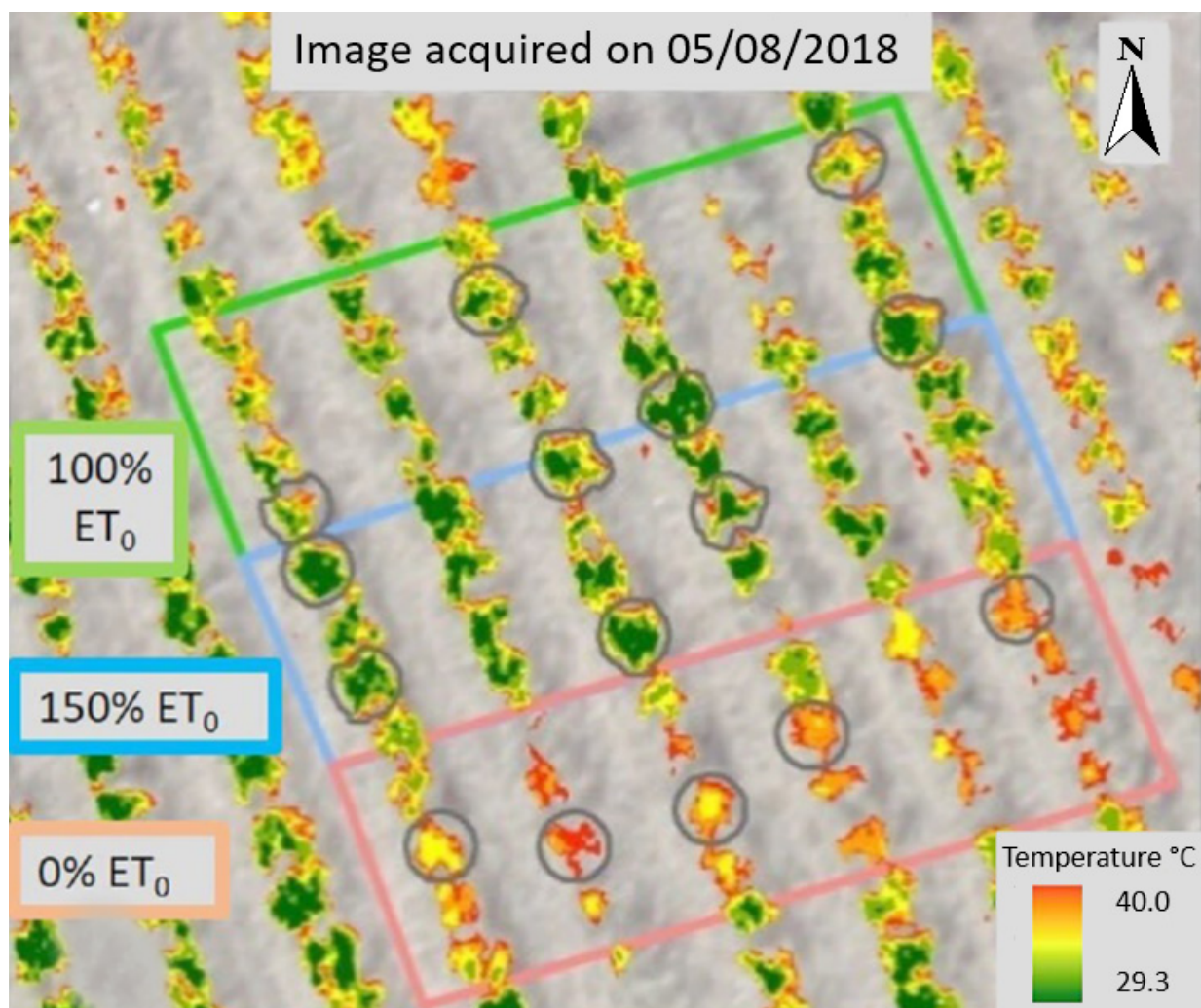


Figure 22. Thermal image of a peach orchard on a hot summer day after treatment. The green color in the image indicates a lower temperature, while the red color indicates a higher temperature. The higher plant surface temperature in the non-irrigated area (red area 0% ET_0) is clearly seen, while the temperature of the fully irrigated (100% ET_0 green area) and the intensively irrigated (150% ET_0 blue area) is lower. Similar images are used to calculate the CWSI (adapted from Katz *et al.*, 2022).

Although the CWSI was developed and is used to estimate plant water use, it is not the most reliable method for estimating irrigation requirements and plant drought stress. Therefore, even this index is under continuous development and new relationships are being modeled to refine it, combining thermal and multispectral analysis. These will be able to better capture the true transpiration rate of the canopy. Currently, this index can be ideally used in combination with other parameters measured or calculated for a given site and irrigated area (zone), such as the water potential described by Katz *et al.* (2022), to model the irrigation needs of plants. Poblete-Echeverría *et al.* (2017), who deal with plant water regime and its assessment using RSE methods, have also shown correlations of CWSI for example with stem water potential. Thus, it can also be used to estimate these variables, which are further used to predict irrigation needs.

3.1.4.2 Comparison of RSE methods

Irrigation scheduling using RSE methods is not very common. Since it is necessary to obtain data as close as possible to the actual situation to estimate irrigation needs, it is necessary to take images at the shortest possible regular interval. This is also one of the potential limitations of satellite imagery. Pictures of the same location on Earth are taken at an interval that depends on the height of the satellite in orbit, which determines how often they take pictures of the same location. Typically, this interval is in the range of 4–10 days. In case of bad meteorological conditions, especially if there are clouds, the image may be degraded where the clouds partially or completely cover the area of interest and the image cannot be used for analysis on that day. In terms of vegetation development and different growing regions, the need for evaluation can then vary both during the season and between sites or regions. A suitable option for periodic overflights is airborne or drone imaging. Aircrafts and drones in particular, have come to the forefront of RSE applications in precision agriculture due to their relative ease of operation and ability to capture high-resolution imagery. This is essential in orchards due to the modern slender, spindle-shaped fruit tree growing systems, especially for apple trees. The higher resolution allows as much of the tree canopy as possible to be covered and the results obtained to be considered relevant. Due to their lack of resolution on the order of tens of meters, most freely available satellite images are then unsuitable for use in orchards. More accurate satellite images are usually provided by private companies for a fee. However, their resolution is not as accurate as that of airplanes or drones.

The parameters of the sensor that is carried by the platform and collects the data are also important for the evaluation using vegetation indices. This means both the spatial resolution and the spectral resolution, i.e., in which bands and over which range the sensor can detect reflected or emitted radiation. Three types of sensors are available. The simplest, panchromatic or monochromatic, capture only one broad band of wavelengths at a time. The image then appears in black and white. Multispectral and hyperspectral cameras capture a combination of several spectra, including the infrared spectrum. With these cameras, both panchromatic images in one band and images combining several bands can be obtained, which already produce color images (maps) by combining all the spectra. In the case of multispectral cameras, the bands imaged are wide, in the range of a few tens of nanometers, while the bands of hyperspectral cameras are very narrow, forming in effect a continuous reflectance curve for a given surface. In the case of water stress assessment using CWSI, thermal sensors are used where

it is important that they are sensitive enough to distinguish subtle temperature differences. At the same time and for their practical use, the current meteorological forecast and current environmental parameters such as air temperature and humidity must also be taken into account.

3.1.4.3 Operational use of RSE methods to determine irrigation needs

As mentioned above, RSE methods are capable of scanning large areas in a relatively short period of time. This makes these methods suitable for larger crop areas. However, due to the high cost of the carriers, sensors, the need for knowledge of image processing and working with specialized software, and the need for special permits to fly drones or aircraft, it is more common today to outsource these methods to specialized companies and experts. However, this method of data collection can be very costly and time-consuming, given the need to process digital images, evaluate them, and use them in practice, if the condition of frequent and regular overflights is met. Therefore, in the field of irrigation, RSE methods are more often used to create a certain zoning of land based on the parameters of the site of interest.

Creating a zonation of a plot of land means that the information obtained by one of the RSE methods is used to divide the land into smaller units that are similar in their characteristics and can be considered homogeneous. The size of the parcel, its orientation to the compass points, topography, soil conditions, and crops play an important role. For these purposes, it is appropriate to use not only vegetation indices, thermal images, and soil analyses, but also the practical experience of the grower. It is also advisable to carry out zoning on the basis of historical data, which can give a better indication of the characteristics of the site. Again, data obtained by RSE methods can be used for this purpose. Moreover, by taking periodic snapshots, it is possible to obtain a dataset with valuable time series information that can be referred to as needed to evaluate retrospective interventions. Analyzing historical data also allows to better identify certain trends that may be hidden in single-year evaluations. Plot zoning is useful not only when using RSE methods, but also when using other methods of crop irrigation needs assessment.

When evaluating the data obtained by calculating vegetation indices, it is important to keep in mind that they may be affected by the current meteorological situation at different times. Their result can also be influenced by different phenological phases and plant genotypes. These parameters should be considered, especially when comparing different evaluation dates, in order to ensure a certain standardization. The results can be influenced by the state of the atmosphere, for example the presence of clouds, and the number of particles suspended in the air, but of course the water regime of the plants themselves is also affected by the current meteorological situation. Taking these factors into account, it is indeed possible to get as close as possible to the amount of water that the plant needs to replenish itself, thus maximizing the efficiency of the irrigation rate per unit of production. At the same time, it is possible to generate and correctly interpret data series for the evaluation of the plant's water regime.

3.2 Determination of the irrigation rate

The irrigation rate is the single amount of water needed to sufficiently irrigate the fruit trees in the orchard. Its volume depends on the soil water-holding capacity, as already described, or the moisture deficit achieved in the plot, the depth and shape of the root system, and

the irrigation system detail. Given the relatively detailed description of the first two conditions in sections 3.1.1 and 3.1.2, the following section will focus on the characteristics of the root system and the influence of irrigation system detail.

3.2.1 Root systems of fruit trees

The total amount of water available to plants, including fruit trees, depends on the depth of the roots and their horizontal extent, in addition to hydro-pedological characteristics. Root research is concerned with several detailed root morphological and physiological characteristics, the nature of root branching, and the overall geometry and topology of the root system. All these items influence water and nutrient uptake to a greater or lesser extent. In terms of root distribution in relation to water uptake, the situation can be simplified by realizing that fruit trees are able to extract water from the entire root zone, i.e., the volume of soil in which the roots occur.

The size of the root zone of fruit trees depends on many factors. The most important of these are the type and age of the fruit tree, the type of rootstock used, and the moisture and soil conditions. In general, fruit trees can have extensive lateral and deep root growth, but most of the root mass is concentrated in the more fertile topsoil. Figure 23 indicates the maximum root depth of perennial crops that different species can achieve under suitable conditions. More important for water and nutrient uptake, however, is the part of the soil with the roots where the bulk of the root mass occurs. From the above cases, the main part of the root mass of pears and apricots is concentrated deeper below the soil surface.

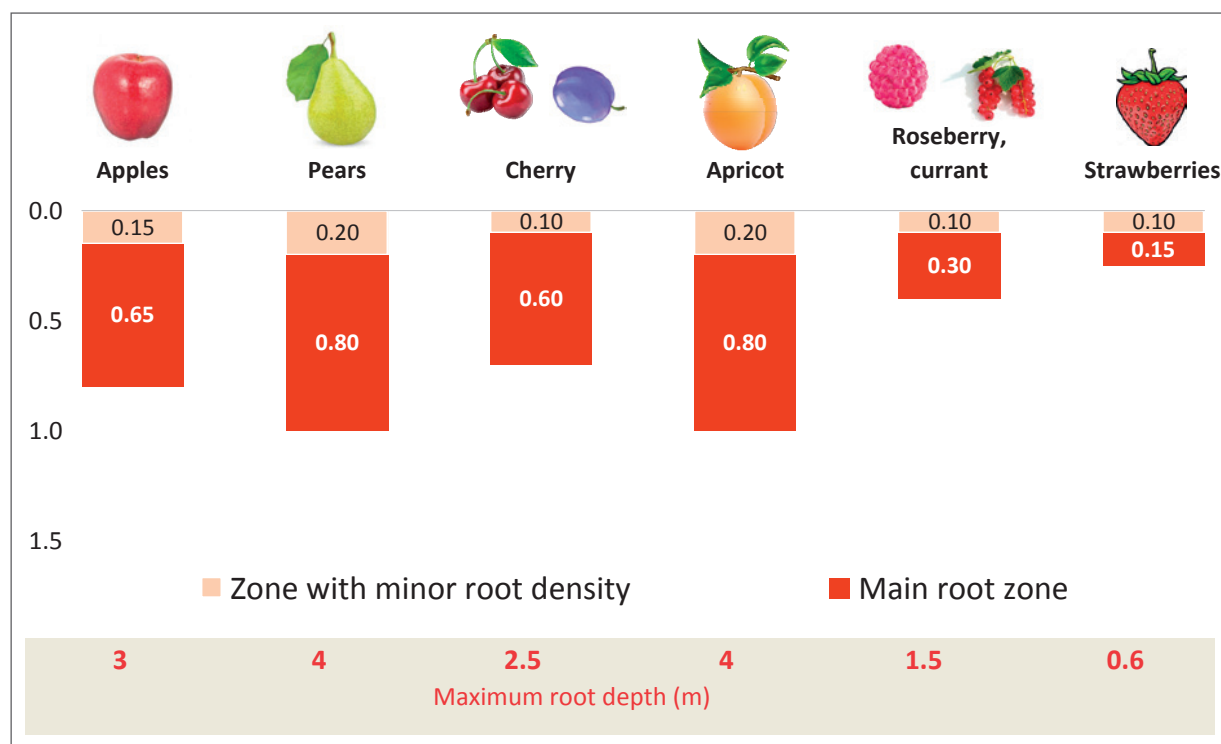


Figure 23. Maximum depth and density of the main part of the root mass in the soil profile for selected fruit tree species (Blazek et al. 1998, updated by the authors measurements).

A practical example of the distribution of the root system in three fruit species is shown in Figure 24. The figure shows that despite some differences in age of planting, the roots of the different species have different distributions in the soil profile. In the experimental sides, the stone fruit species have a deeper and richer root system than the apple trees in the orchards. It should be noted that root growth is usually also dependent on soil and climatic conditions and orchard management.

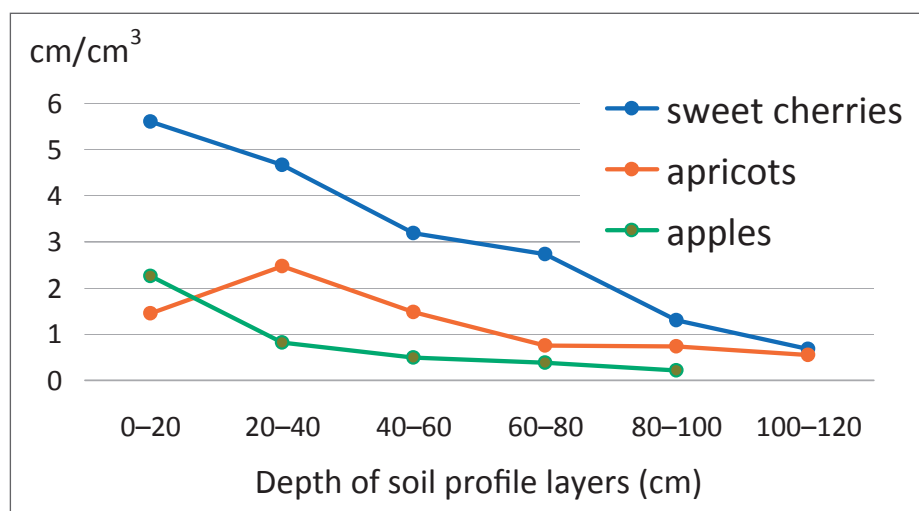


Figure 24. Root density in soil profile layers for cherry (*'Sweet Early'/Gisela 5*, age 14 years), apricot (*'Bergarouge'/Wawit*, age 13 years), and apple (*'Red Jonaprince'/M9*, age 9 years).

In terms of rootstock, the root system of generatively propagated (seed) rootstocks tends to be stronger and deeper than that of vegetatively propagated rootstocks. However, even within vegetatively propagated rootstocks greater differences are likely to exist. Table 1 shows root dry matter in deeper soil layers for *'Jonagold'* apple and *'Williams'* pear trees grown in the same orchard but on rootstocks with different growth rates. Trees with dwarf rootstocks had lower root dry matter values in the same soil profile layers.

Table 1. Root density of *'Jonagold'* apple and *'Williams'* pear grown on different rootstocks in deep soil profile layers (cm.cm⁻³).

Apple	soil layer	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	100-120 cm
Jonagold - J-TE-G (dwarfing growth)		0.34	0.23	0.20	0.21
Jonagold - J-TE-H		0.96	0.72	0.42	0.35
Pear	soil layer	80-100 cm	100-120 cm	120-140 cm	140-160 cm
Williams - S1 (stunted growth)		0.34	0.16	0.27	
Williams - PS		0.73	0.41	0.37	0.20

As with field crops, soil conditions such as soil fatigue, soil compaction, stony subsoils or heavy clay soils have a negative effect on the root system. Waterlogging, excess salts, and drought have also negative impact on roots.

Figure 25 shows that different depth of the more fertile, humic soil horizon within an orchard resulted in higher apricot root density in the part of the orchard with the higher extent of this horizon. Especially on sloped land, the soil conditions in the upper and lower parts of the orchard are often different because of different grain size, which may require different input parameters for irrigation settings.

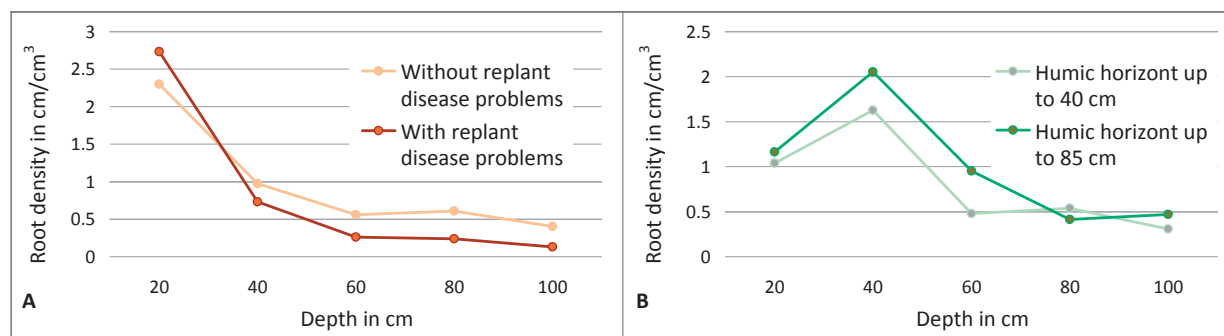


Figure 25. Apricot root density in soil layers with humic horizons up to 85 and 40 cm.

The rate and efficiency of water extraction from a given soil layer or distance from the trunk depends primarily on root density. For field crops, it is reported that when the average root density is below 1.0 or 0.5 cm/cm³, it is already difficult to extract all available water and nutrients from the layer. In these cases, the distance between roots is too large, their distribution is uneven, and water has to travel a longer distance. The movement of water to the roots depends on the soil type. Medium loam soils provide better conditions than sandy, stony, and clay soils. An important requirement is also sufficient soil moisture in the range of the freely available part of the available water capacity to allow free capillary flow of water by diffusion to the roots. Inflow from the non-root zone can be significant in places with higher groundwater levels.

The depth from which roots can use most nutrients and water without much restriction is called the effective root depth. In temperate climates, apple trees on normal loam soils are given a depth of 0.4 to 0.8 m or even up to 1 m, depending on the stage of development (Figure 26). However, this is only a guideline that needs to be refined according to tree age, soil depth and root growth conditions. As trees age, the crown of the tree and the extent of the root zone increase.

For apricot plantings, the theoretical effective watering depth would be 1 m soil depth for older plantings and 0.8 m for younger plantings (Figure 27). In terms of distance from the trunk, irrigation at the same distance from the trunk appears to be effective for apricots in both older and younger orchards.

The younger orchards studied had similar soil and climatic conditions and management practices to the older orchards. They were always located close to each other.

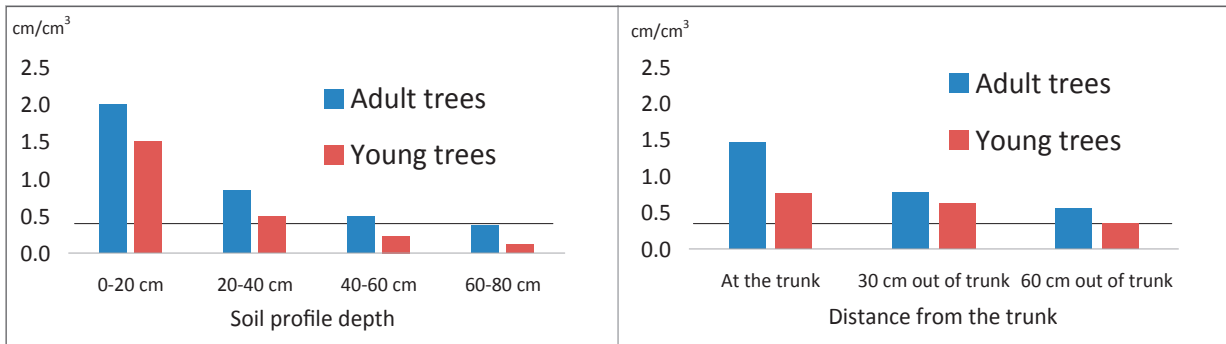


Figure 26. Comparison of root length density of apple trees in the younger planting ('Breaburn'/M9, age 3 years) and the older planting ('Red Jonaprince'/M9, age 9 years) in soil profile layers and at different distances from the trunk.

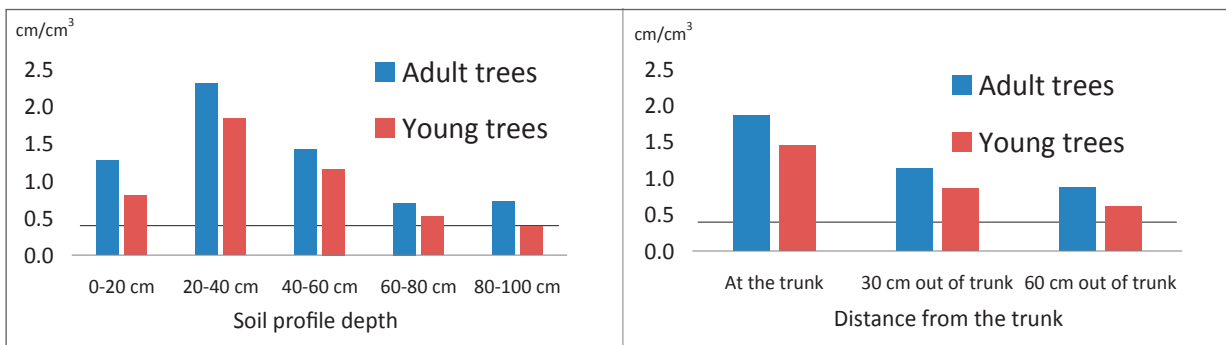


Figure 27. Comparison of apricot root length density in the younger planting ('Koolgat'/Wawit, age 3 years) and the older planting ('Bergarouge'/Wawit, age 13 years) in soil profile layers and at different distances from the trunk.

As opposed to densely seeded field crops, the horizontal extent of the roots for fruit trees, i.e., the distance the roots extend from the trunk, is also important for the optimal point of application of water and nutrients. If the shallow roots extend further into the inter-row spacing, they can sometimes be damaged by passing machinery, and there is also competition for water between the existing crop including grasses, cover, and support species, and the fruit trees. Figure 28 shows the root density of apple and apricot trees in the soil profile layers and at different distances from the tree trunk. For both plantings, the proportion of roots close to the trunk is about 50%, at a greater distance 30%, and at a distance halfway between two adjacent trees the remaining 20%. It was also found that the root density towards the grassy inter-row was on average 15–25% lower than that in the row between the individual trees, due to competition between the root system of the fruit trees and the roots of the stand in the inter-row.

However, the distribution of roots in relation to soil layers is different. In the apple orchard we studied, the highest root density was in the top 20 cm of the soil layer which is about 50% of the total soil profile. In the apricot orchard, the highest root density was in the 20 to 40 cm soil layer and represented about one third of the total soil profile.

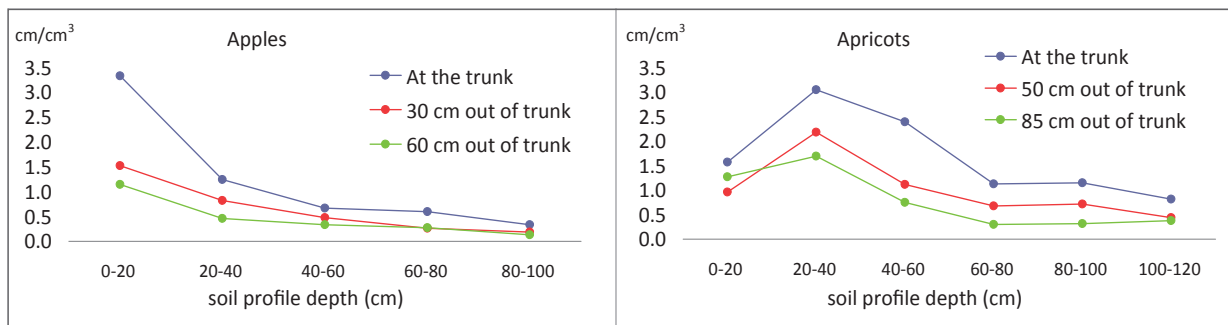


Figure 28. Root density of apple and apricot trees in soil profile layers and at different distances from the trunk

3.2.1.1 Determination of root extent under field conditions

Under field conditions, it is possible to determine root extent and density at various depths or distances from the trunk, even without special equipment. The simplest method is the profile method, which has often been used by Středa *et al.* (2017) especially in root research on fruit trees, grapevines, and hops. On the wall of the trench, individual roots can be observed in their natural position in the soil. By making an excavation along the tree line and perpendicular to it, at different distances from the trunk, it is possible to get a good picture of the distribution and density of the roots. The surface of the wall can be smoothed with a knife or spatula, and in heavier soils the roots are better seen after the surface layer has naturally broken away. In lighter soils, a few millimeters of soil can be removed with a water jet or air pressure to better observe the roots. Evaluation of the root system consists of recording the number and position of roots in the soil wall using a sampling grid or plotting the root positions on a transparent polyethylene film for later analysis. The simplest method is to attach a square grid (e.g., 10 × 10 cm mesh size) to the wall and record the position of each root on millimeter paper as a dot of varying diameter depending on the diameter of the exposed roots (Figure 29). For fruit trees, in terms of root depth for irrigation, excavation to 100–120 cm is sufficient to allow access to the roots to about 80 cm. Any obstructions to root growth and distribution, compacted subsoil, interlayers of gravel or clay that impede root growth and the natural movement of water in the soil profile will also be clearly visible on the trench wall. The roots of fruit trees can be clearly distinguished from other species because they are brown in color and have a different texture than the roots of weeds and grasses. The roots of fast-growing annual weeds or grasses are light and fine and do not reach deep layers, which are more important for observing the roots of fruit trees. Nevertheless, it is advisable to select a clean site for evaluating the root density of fruit trees and to remove weeds growing in the proposed site in advance.

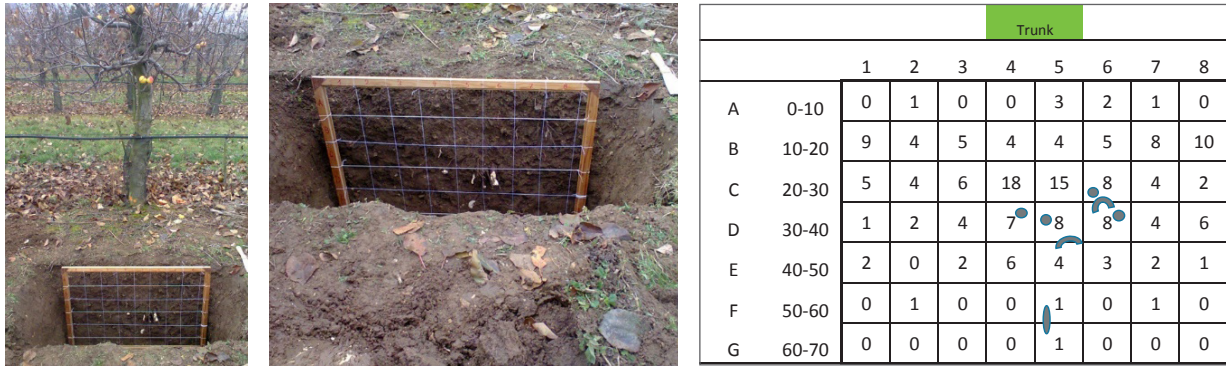


Figure 29. Square mesh frame in the trench and graphical representation of the number of apple tree roots at different depths and distances from the trunk. Blue spots indicate locations with protruding main roots.

3.2.1.2 Determining root length and density

For more detailed monitoring of root density, it is necessary to collect a certain volume of soil from the trench wall or with a soil drill such as a probe used to collect soil samples for agrochemical analysis (Figure 30). The soil is then washed by soaking it in a solution of sodium carbonate for several hours. The washing process is accelerated by the use of warm water and the crushing of soil clods. Smaller volumes of soil with a weight of 0.5–1 kg are easier to analyze. The roots are washed out with a gentle stream of water. A fine mesh sieve (1–2 mm) should be used to capture them. The total length of the roots in the sample is determined either by direct measurement or for large numbers of thinner, branched roots and their fragments by the line intersect method of Tennant (1975). For a 1×1 cm square mesh, the total length of roots in cm in each sample is obtained by multiplying the average number of crossings of evenly distributed roots with vertical and horizontal lines for the mesh used by a factor of 1.57 (Figure 31). Only live roots are counted, which are usually well distinguishable from old (semi)decomposed roots and other organic debris.

For simplicity and immediate information on the presence of roots in a given soil layer, it is possible to determine only the dry weight of roots in the sample and then convert this to a unit soil volume.



Figure 30. Soil with roots sampling using a soil drill at different distances from the tree trunk.

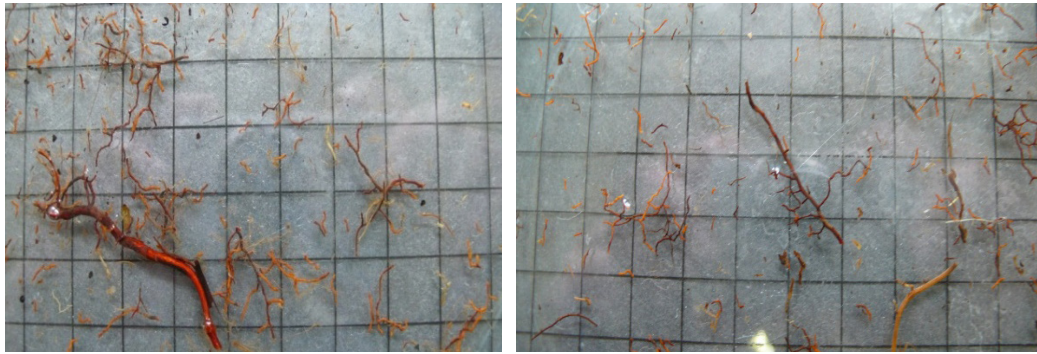


Figure 31. Fruit tree roots on a 1×1 cm square mesh.

3.2.1.3 Water percolation, mineral nutrient leaching

The FWC value also indicates the threshold above which water percolates into deeper layers and possibly out of the reach of roots. This guarantees high efficiency of irrigation water use. If too much water flows through the soil, nutrients leach out, especially nitrate nitrogen, K, Ca, and Mg. In orchards, the risk of nitrate leaching is lower than in arable crops and vegetables. Thus, the application of N fertilizers is not yet restricted by the measures of the Nitrates directive, as is the case for other crops in nitrate vulnerable areas. Nevertheless, N-NO₃ levels more than 100 kg.ha⁻¹ can be recorded in intensive young orchards, and rational use of irrigation water not only saves water but also reduces the risk of mineral nutrient leaching.

3.2.2 Effect of irrigation system details on the determination of the appropriate irrigation rate

As indicated in the previous chapters of this methodology, the goal of irrigation is to meet the water needs of fruit trees. In general, this can be accomplished if irrigation provides even coverage of the root zone. The total irrigation rate should not exceed the specified depth of the active part of the root zone. However, it is also important to consider the spatial distribution of the root system. In order to meet these requirements, it is essential to have the correct technical irrigation design, i.e., the irrigation system detail. This gives us the position of the irrigation hose, as well as the density and flow rate of the drippers, which then determines how much of the root zone we can irrigate. In other words, how well the needs of the growing fruit trees can be met.

Example:

At a normal irrigation rate of two hours with a drip rate of 2.3 l.h⁻¹, the total water applied to the soil is 4.5–4.6 mm. In terms of depth of wetting, this rate corresponds to approximately 18 mm of rainwater in the irrigated soil area. At this rate, the soil will be wetted to a depth of 40–60 cm and about the same width in moderately heavy soils with about 70% soil saturation with AWC (Figure 32). Therefore, under these conditions, such irrigation should have the following effect on the soil moisture profile: At a depth of 30 cm, which contains most of the active roots of apple trees, soil moisture should rise to the limit of the field water capacity. On the other hand, at a depth of 60–80 cm, which experience shows to be the limit for the presence of active roots of apple trees, the soil moisture should rise only partially.

However, as shown in Figure 33A, with a conventional row width of 1 m and drip spacing of 1 m, only a quarter to less than a third of the volume of soil potentially containing fruit tree roots is wetted in this way. When a certain intensity of atmospheric drought is reached, this system leads to the development of intense drought stress, especially in pome fruit, which inhibits the intensity of fruit growth. This is largely independent of the amount of water supplied. When plants try to replenish more water, it usually flows into deeper layers of soil, beyond the reach of the roots of the fruit trees, with all the consequences for the efficiency and economy of orchard management.

In contrast, the same amount of water with a higher density of drippers spaced 0.5 m apart results in a more even distribution of water within the rooted portion of the soil and in the interconnection of irrigation profiles from individual drippers (Figure 33B). In practice, this allows twice as much water to be applied to the roots without the risk of exceeding the optimum irrigation depth. Such design of the irrigation detail results in irrigation of up to about 50–60% of the soil in the stubble belt, i.e., most of the rooted portion of the soil profile, thus increasing the overall drought resistance of the crop.

In numerical terms, while a water rate of 9 mm at a drip density of 0.5 m corresponds to a rainfall of approximately 18 mm for the irrigation depth in the wetted part of the soil, this is practically doubled for a drip hole spacing of 1 m and corresponds to up to 36 mm of water. This amount of water causes a significant overshoot of the optimum watering depth.



Figure 32. Soil profile and root zone wetted with water mixed with food coloring. The white labels on the soil surface indicate the location of the drippers. The bottom row of tags indicates the soil depth at 30 cm as seen with the attached tracer stick.

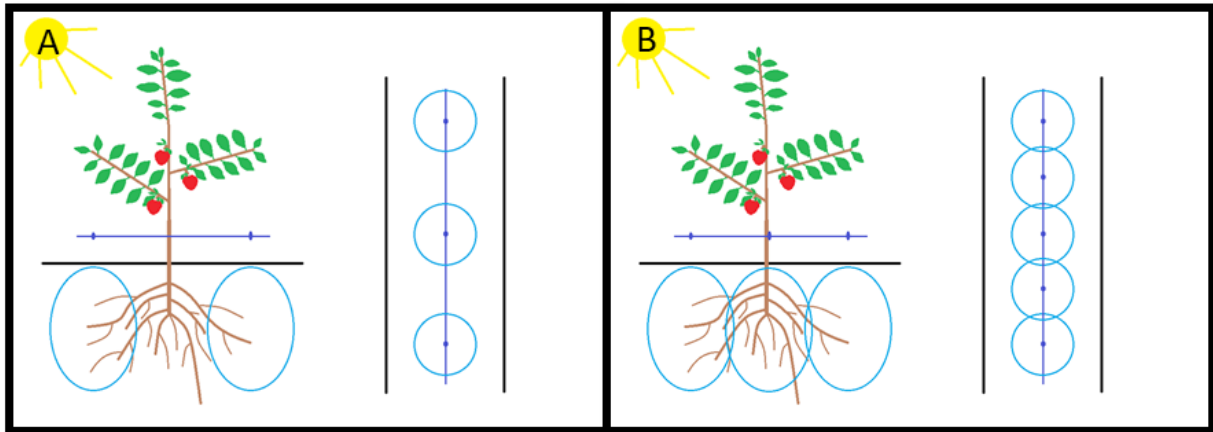


Figure 33. Schematic representation of irrigation distribution within the rooted soil horizon using an irrigation hose with drip spacing of (A) 1 m and (B) 0.5 m.

3.3 Irrigation strategy in orchards

Irrigation strategy is the third important part of orchard irrigation management, along with demand assessment and irrigation rate calculation. It is practically a way of determining the irrigation regime in orchards throughout the growing season. This is usually done depending on the evolution of the meteorological conditions and the type of crop grown, reflecting the water requirements of the fruit trees during the growing season. Taking this into account, in addition to the classic strategy of supplementing the full needs of the plant, it is also possible to use a so-called deficit irrigation strategies. The goal is to irrigate with less water than is evaporated from the plot in the water balance, thereby achieving further water savings and increasing irrigation efficiency while maintaining the volume and quality of fruit production. Deficit strategies can be broadly categorized into regulated deficit irrigation and partial root zone drying, based on the temporal or spatial implementation of the water deficit.

3.3.1 Regulated deficit irrigation

Regulated deficit irrigation (RDI) or stage-based deficit irrigation, is based on the temporal variability in the control of water application to fruit trees depending on their stage of development. Plants are therefore irrigated at different rates during the growing season according to their actual water requirements.

3.3.1.1 Principles of the RDI irrigation strategy

The concept behind this strategy consist in the different sensitivity of fruit species to water availability at different stages of their development during the growing season. This sensitivity is assessed in relation to the intended yield of the crop, in this case the quantity and quality of fruit production, which should not be adversely affected. To use this strategy successfully, it is necessary to define the critical phenological stages of growth and the conditions under which the crop can be exposed to water deficit. The development of a fruit tree during the growing season can be divided into the 5 periods shown in Figure 34.

A comparison of available moisture requirements for other pome and stone fruit species is given in the text.

Period I – Begins with budding. While in pome fruit trees the first leaf area develops simultaneously with the flowers from the leaf rosettes of mixed buds, in stone fruit trees only the flowers develop during this period, and it ends with flowering. Fruit trees require an unlimited supply of moisture during this period. The reason for this is the need to ensure smooth pollination, fertilization, and sufficient development of the first leaf area, which is then used to feeding the young fruits later in their development. However, the leaf area in the first period is still relatively small and the soil in temperate conditions usually contains sufficient moisture after the winter. Evaporation is low and irrigation is not necessary unless the weather is extremely warm and dry.

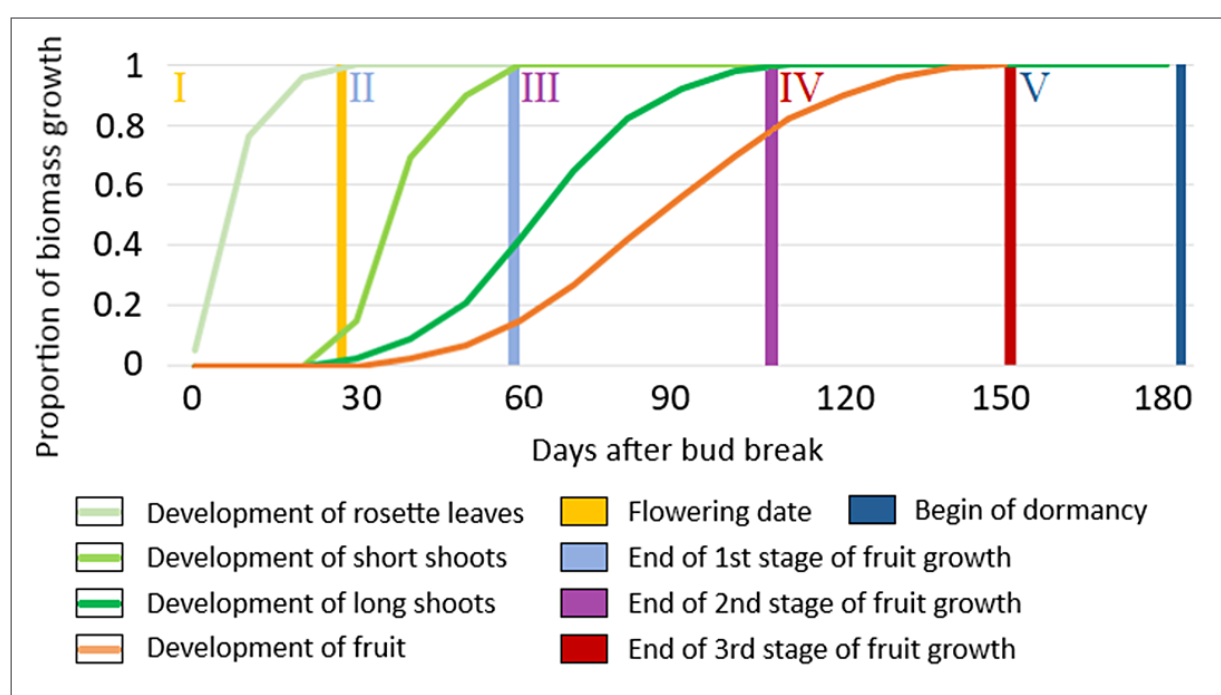


Figure 34. Development of vegetative and generative organs of apple trees during the growing season
 Growing season of apple trees in relation to sensitivity to water deficit:

Period I – bud burst, first leaf area growth, flowering (BBCH* 10–65)

Period II – growth of short bearing shoots and first stage of fruit growth (BBCH 67–72)

Period III – growth of long shoots and second fruiting stage (BBCH 72–77)

Period IV – end of vegetative growth and third phase of fruit growth, harvest (BBCH 77=91–87)

Period V – post-harvest period, leaf fall, beginning of dormancy (BBCH 87–95)

*BBCH – the used shortcut describes the phenological stages of agricultural crops according to Meier (2001)

Period II – Begins with the end of flowering and lasts from three to six weeks, depending on the type of fruit and the weather. This period is characterized by intensive growth of short bearing shoots and the first stage of fruit growth. The growth of the fruit is gradual and occurs mainly through intensive cell division. The number of cells in the fruit formed during this phase determines the potential final size of the fruit, since further growth in subsequent periods is exclusively by cell growth. Therefore, this period is considered critical in terms

of available moisture, and fruit trees should generally not be subjected to stress, such as drought, during the second developmental period (first stage of fruit growth). Exposure to stress could result in poor development of young fruit or increased fruit drop. At the end of this period, apple trees usually reach an average size of 1.5–2 cm for the King’s fruit and have finished growing short bearing shoots. Leaf area development at that time is approximately 50–65% of its final size.

Period III – Characterized by intensive growth of elongated shoots and the beginning of the second stage of fruit growth. At this stage, the fruits grow due to the increasing volume of already multiplied cells. Depending on the type of fruit grown, the third developmental period is quite specific in terms of duration and progress of fruit development. While apple trees show intensive linear fruit growth (Figure 34), stone fruits enter a phase called “stone hardening”. During this phase, the growth of the stone fruit slows down for a few weeks (Figure 35a) as the stone forms in the fruit. In pears, the fruit tends to grow in length during this period and the daily growth rate is not yet at its maximum (Figure 35b). From the point of view of irrigation requirements, except for apple trees, the fruit species mentioned are less sensitive to reduced water availability. Therefore, they can be subjected to a degree of drought stress that does not affect crop fruit production but rather promotes fruit quality. It has been argued that in warm, arid regions at this time of year, the RDI strategy allows to limit strong vegetative growth, which increases water consumption and creates some competition with the fruit for mineral nutrients and assimilates. Since fruit trees already favor fruit nutrition at this time at the expense of annual shoots, the earlier finish of vegetative growth to some extent supports the compensation of fruit growth under stress conditions. However, under temperate conditions, a reduction in the growth of elongating shoots can only be expected if intense drought develops during the spring months.

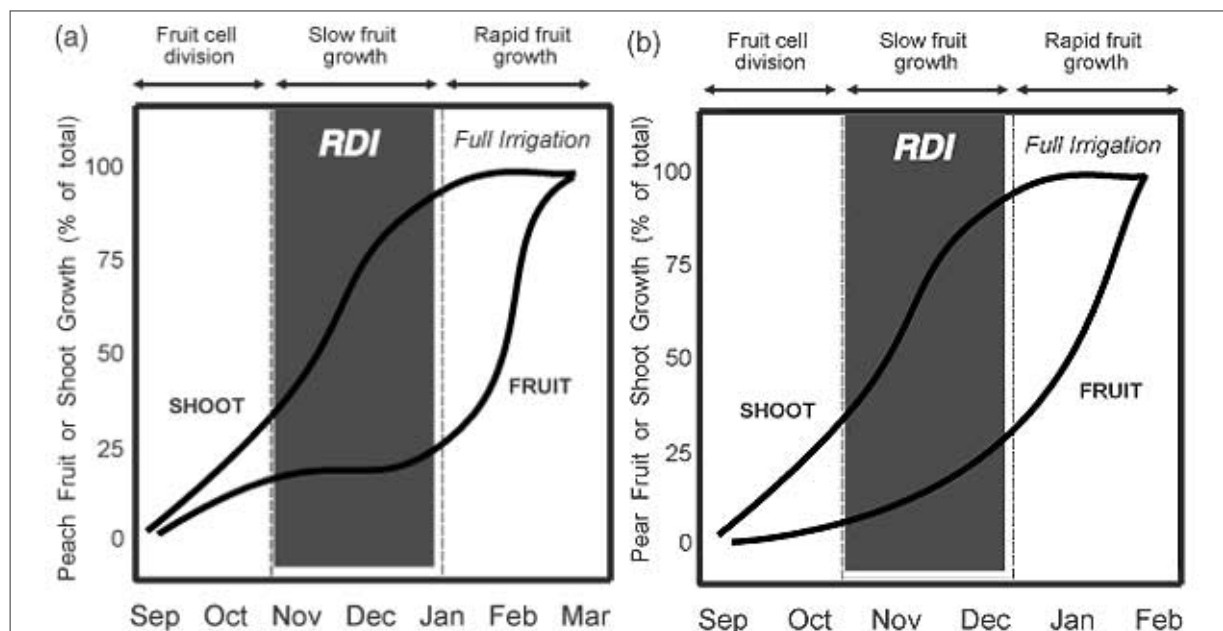


Figure 35. Fruit and tree development of (a) stone fruit and (b) pear fruit at different growth stages during the growing season in relation to the use of controlled deficit irrigation according to Goodwin and Boland (FAO 22).

Period IV – For pome and some stone fruit species, this stage is characterized by the cessation of vegetative growth and intensive fruit growth until ripening. During this period, it is necessary to restore full irrigation rates according to the evapotranspiration requirements of the crop and, if necessary, make some compensation for the current soil moisture so that the plants are no longer under drought stress.

For apple trees, the use of RDI is more closely related to environmental conditions. The linear growth of apples is equally intense in period III and IV of development (stages II and III of fruit growth) and any loss of fruit growth is more noticeable than in the other fruit species already mentioned. Therefore, it is necessary to monitor the development of available soil moisture in apple trees and to expose them only to a limited extent of moisture deficiency. Experience shows that this strategy is less suitable for apples growing in warm, arid regions of the world. However, in temperate climates, where plants have lower evapotranspiration requirements and where droughts are at least occasionally interrupted by atmospheric precipitation, plants can more easily compensate for losses in fruit growth during the dry season. Under such conditions, the efficiency of supplemental irrigation of apple trees can be effectively increased with the help of RDI.

Period V – Occurs after fruit harvest. In some stone fruits, it is accompanied by a second wave (apricots) or continuous growth (cherries) of annual shoots. For these fruit species, it is advisable to leave full irrigation on for at least the next few weeks in dry and warm weather to encourage flower bud development. In principle, however, this period is less demanding in terms of water consumption, and, in the case of pome fruits, it occurs in the fall when more frequent atmospheric precipitation can be expected to replenish soil moisture.

3.3.1.2 RDI operating conditions

In practice, the controlled deficit irrigation strategy can save 20–25% of the water used for crop irrigation. For the safe use of RDI in orchards, it is generally necessary to adjust the strategy according to the current moisture conditions of the site and the crop management. Current knowledge places certain limits considering the method of determining moisture requirements that must be respected to avoid the development of severe drought stress:

Moisture regime

Irrigation must be adjusted to fully compensate for the determined water demand during the sensitive periods. In the less sensitive period, for apple trees from about mid-June to the end of July (BBCH 72–77), the irrigation rate can be reduced to 50% of the established requirement. Thereafter, it is advisable to restore the full irrigation rate to ensure sufficient water supply, especially in the second half of the summer period, for the fruit to grow to final size.

The moisture content of the irrigated part of the soil should not fall below 60% of the available water content. An important role is played by the area coverage of the soil with irrigation water, i.e., the total irrigation rate and the irrigation system detail. In practice, these variables determine how much of the root zone can be irrigated. For these reasons, before using controlled deficit irrigation, one should carefully consider the capabilities of the irrigation system and whether the spatial distribution of the irrigation water is already significantly

limiting the moisture supply under the given conditions. For this purpose, it may be appropriate to use moisture measurements in the non-irrigated part of the soil, which should not fall below 50% of the AWC for the use of the RDI strategy.

The water deficit determined by evapotranspiration should not exceed 45 % of the AWC in the root zone.

When determining the irrigation requirement through physiological parameters such as the water potential of the fruit tree trunk, the suction force required to replenish the moisture of the conducting bundles should not fall below -1.5 kPa at midday.

If the moisture deficit reaches any of these limits, the RDI should be discontinued, and the irrigated soil moisture restored to field water capacity. Furthermore, soil moisture should not fall below 70% of the AWC measured at the depth corresponding to the largest active root volume. If the need is determined on the basis of a moisture balance, an amount of water equivalent to at least 20% of the total AWC in the root zone should be added to the plot. Restoration of soil moisture or plot moisture balance should be carried out gradually by repeated application of the normal full irrigation water rate calculated for the plot and the fruit crop. This avoids the risk of significant water loss through drainage into deeper soil layers outside the root zone. These doses should be applied at more frequent intervals depending on the weather until the necessary soil moisture is reached or the corresponding part of the orchard water balance is replenished.

Orchard management

In order to effectively use RDI, certain orchard management practices must also be followed. In addition to the standard elements of integrated orchard management, soil management, and appropriate fruit thinning plays a critical role in the water regime of fruit trees.

As part of soil management, care must be taken to limit weed infestations in the root zone of fruit trees. Weeds compete with fruit trees, particularly in the development of the root system and the associated nutrient and water uptake. The problem is particularly significant in intensive young orchards where trees are grown on slow growing and shallow rooting rootstocks. Weeds therefore affect the overall growth and production of the orchard and also increase unproductive transpiration in the orchard.

Weeds can be controlled in a number of ways, including herbicide application, stubble strips, mulching, and weed cutting. Chemical control is currently one of the most common methods of weed control. This method is the least time and energy consuming and is also very effective. Products should be applied at the most vulnerable stage of the weed and should target the predominant weed species. In addition to contact herbicides in orchards, we can use soil herbicides with longer residual activity, preferably early in the growing season, to ensure a weed-free row strip for a longer period of time. Currently, the portfolio of herbicide active ingredients in orchards is very limited and alternatives are being sought.

Mechanized weed control is one of the more time-consuming and costly options. However, it has numerous advantages, such as its suitability for use in young plantings, on sensitive species, and varieties where only a limited herbicide mix can be used. Another important advantage is the mechanical treatment of the soil surface, which interrupts the water capillary

rise. This aerates the soil, reduces unproductive evaporation from the soil surface, and helps to absorb atmospheric precipitation. Mechanical weed control can be done with a swinging knife, a passive rotary weeder, and an active cultivator with a horizontal or vertical rotation axis.

Another option for weed control in row strips is mulching, which is the application of organic matter or mulch film (Figure 36). Mulch prevents weed growth and undesirable evaporation. In addition to film, grass clippings and mulch bark spread to a height of about 10 cm are also used as mulch. This method is mainly used in organic production but is only marginally used in integrated production due to the high handling requirements.



Figure 36. Use of mulch film for weed control in apple orchard.

Fruit thinning

Fruit set is one of the most important factors influencing fruit tree water use. Excessive fruit load usually limits vegetative growth and thus increases the requirement for assimilates production per unit leaf area. Trees stressed in this way lose the space to physiologically resist drought and compensate for the negative effects of water deficit without affecting the volume and quality of production. Early and sufficient thinning is therefore essential, especially for pome fruit trees. To promote the development of the fruit in the first stage of its growth, it is preferred to carry out the thinning during the flowering or during this stage. In general, the earlier, the better. Early and good thinning extends the time when the number of new cells in the remaining fruit increases more intensively. This gives the remaining fruit a greater potential for future growth. To illustrate, here is an example.

Example:

An evaluation of different deficit irrigation strategies, including the use of RDI, was carried out at the Holovousy location in 2019–2022. The experiment was evaluated in a seven-year-old planting of apple cultivars ‘Gala Brookfield’ and ‘Red Jonaprince’ (for simplicity, only results with cultivar ‘Gala Brookfield’ are presented), grown on rootstock M9 in medium

silty-loam soil. The trees were grown as slender spindle with a “click” pruning. The trees were planted in a spacing of 3.5×1 m and the final height of the trees was maintained at 3.2 m. The row strips were kept weed-free with herbicides, while the interrows were grassed with regular mowing. In apple trees, hand thinning was carried out at the phenological stage BBCH 71–72 (royal fruit size 15–20 mm) using the tool for determining the optimal number of fruits per branch, ‘equilifruit’ (Figure 37, from INRA Montpellier, France).

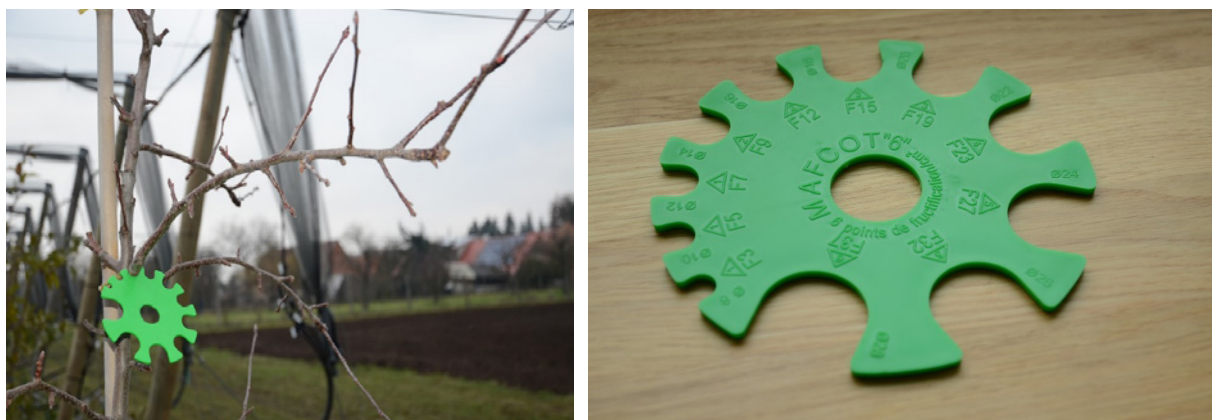


Figure 37. A tool for determining the optimum fruit set of apple trees according to the number of mixed buds (fruiting shoots) per basal diameter of ‘equilifruit’ branches (right, photo: Luděk Laňar). Left, illustration of practical application.

In the experiment, 7 irrigation treatments shown in Table 2 were evaluated. The total water application in the experiment depended on the weather conditions (Figure 38A) and reached values of 298 mm (2019), 54 mm (2020), 196 mm (2021), and 273 mm (2022) in each specific year.

Table 2. List of irrigation options evaluated, application rates during the season, and fruit set.

Treatment	Irrigation rate	Period	Fruit set
C-0	Non irrigated	during the growing season	with full fruit set
ETc-50	50% full rate	during the growing season	with full fruit set
ETc-75	75% full rate	during the growing season	with full fruit set
ETc-100	100% full rate	during the growing season	with full fruit set
ETc-200/0	200/0 % ¹ full rate	during the growing season	with full fruit set
RDI-50	100/50 % ² full rate	BBCH ³ 72–77	with full fruit set
RDI-50a	100/50% full rate	BBCH 72–77	with 50–60% fruit set

¹Yearly application of 200% of dose on every second irrigation date.

²Managed deficit irrigation with 50% irrigation rate at BBCH 72–77

³BBCH 72–77 – period from 20 mm King’s fruit size to 70% of final fruit size (mid-June to early August)

In terms of yearly assessment, 2019 was the hottest year with the greatest rainfall deficit, with the dry period occurring mainly in the months of June and July. In contrast, the coolest and wettest period of the growing season was observed in 2020. The weather pattern was reflected to some extent in the soil moisture conditions, specifically for the treatments with limited or no irrigation water supply. The lowest soil moisture (Figure 38B) was observed for the non-irrigated treatment C-0 and to a lesser extent for the irrigated treatment ETc-50 and ETc-200/0, which fell below 60% of the AWC in summer 2019, spring 2020 and fall 2022.

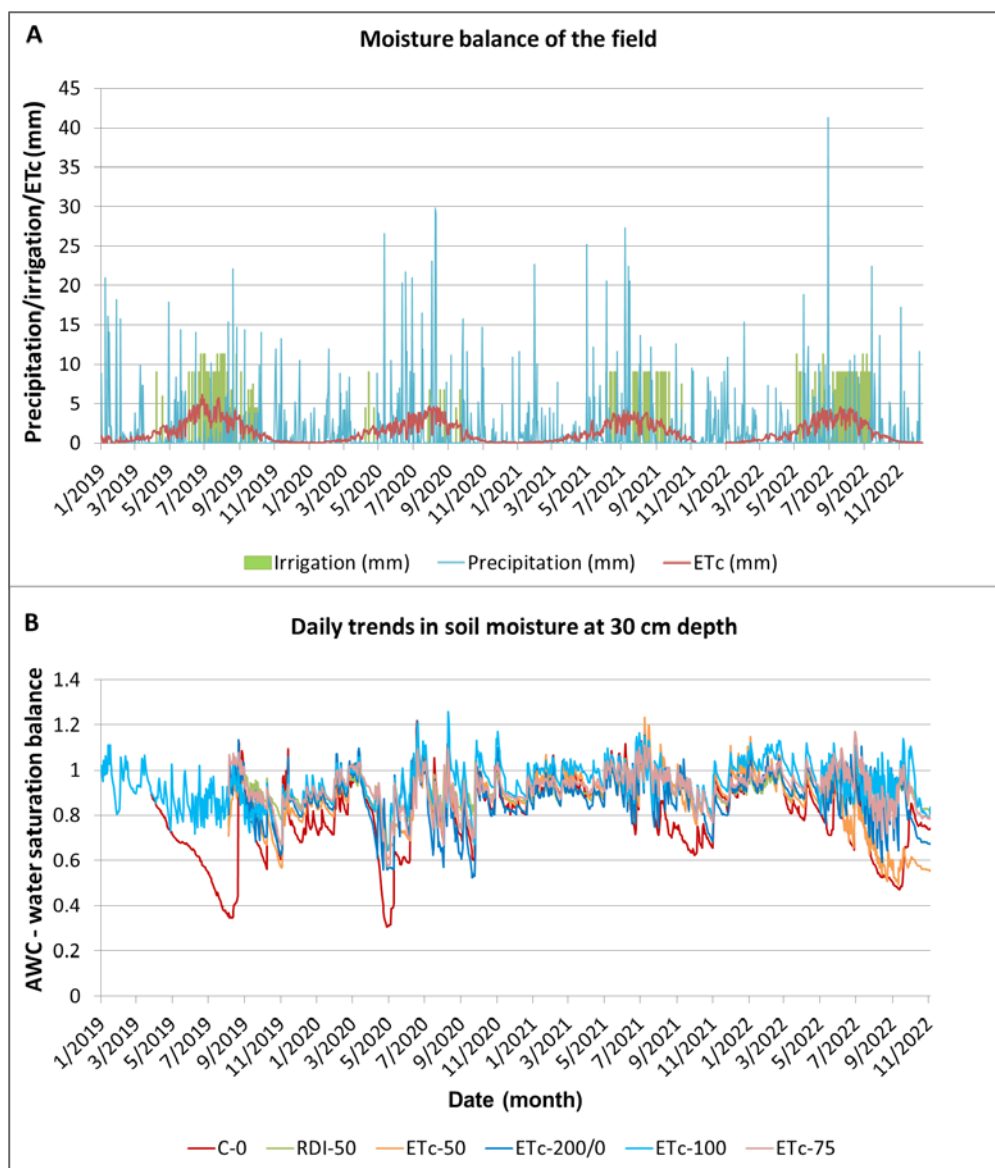


Figure 38. Daily trends in (A) irrigation, rainfall, and crop evapotranspiration in mm and (B) soil moisture at 30 cm for ‘Gala Brookfield’ apple trees in 2019–2022.

Table 3 shows the economic characteristics of ‘Gala Brookfield’ apple trees over the evaluation period, in particular the results related to yield, growth expressed as trunk cross-sectional area (TCSA) and total tree load per unit of TCSA. Table 3 shows that in 2019, the effect of the intense drought did not affect total yield or tree fruit load. However,

as can be further seen in Figure 39, the drought in 2019 significantly affected the final fruit caliber, especially those meeting the first quality requirements, i.e., larger than 70 mm. In this respect, the size of the fruit increasingly depended on the total amount of irrigation. The exception are the apple trees in the RDI-50 treatment, which, despite the same amount of water as in the RDI-50a treatment, also produced a lower proportion of quality apples. In this case, the decrease in quality was due to the different fruit load on the trees, with half the number of fruits in the RDI-50a treatment compared to the other treatments. The high fruit set therefore resulted in higher water consumption.

Table 3. Flowering intensity, average annual yield, trunk cross-sectional area, tree load in number of fruits and specific yield per unit trunk area of 'Gala Brookfield' apple trees

Year	Variant	Flowering (1–9)	Yield (kg/tree)	Number of fruit per tree	TCSA (cm ²)	Number of fruit (pc/cm ²)	Yield efficiency (kg/cm ²)
2019	C-0	8.3 a	28.04 ab	211.4 ab	12.8 ab	16.67 a	2.21 a
	ETc-50	8.2 a	26.29 b	184.2 bc	11.6 b	16.27 a	2.31 a
	ETc-75	7.0 a	27.74 b	187.7 bc	11.2 b	16.67 a	2.47 a
	ETc-100	7.8 a	25.61 b	175.5 bc	11.0 b	16.25 a	2.39 a
	ETc-200/0	7.7 a	26.99 b	177.3 bc	12.3 ab	14.70 a	2.24 a
	RDI-50	7.4 a	35.04 a	251.0 a	15.6 a	16.72 a	2.32 a
	RDI-50a	8.0 a	25.16 b	157.8 c	12.2 ab	13.15 a	2.09 a
2020	C-0	4.7 b	16.97 c	105.7 b	16.7 ab	6.35 c	1.03 b
	ETc-50	4.6 b	15.90 c	105.1 b	15.3 b	7.22 bc	1.09 b
	ETc-75	6.3 ab	22.89 a	155.5 a	14.2 b	11.13 a	1.64 a
	ETc-100	5.6 ab	18.93 b	126.3 ab	14.2 b	8.98 ab	1.36 ab
	ETc-200/0	6.1 ab	-	-	16.1 ab	-	-
	RDI-50	5.7 ab	22.94 a	149.3 a	21.2 a	7.14 bc	1.10 b
	RDI-50a	6.6 a	23.64 a	159.1 a	16.0 b	10.09 a	1.50 a
2021	C-0	8.1 a	17.88 a	112.1 a	17.7 b	6.35 a	1.01 a
	ETc-50	8.8 a	18.25 a	128.8 a	15.5 b	8.34 a	1.19 a
	ETc-75	7.7 a	19.17 a	134.9 a	16.1 b	8.48 a	1.21 a
	ETc-100	8.1 a	19.41 a	135.1 a	16.0 b	8.55 a	1.23 a
	ETc-200/0	7.9 a	18.85 a	130.3 a	18.6 b	7.18 a	1.04 a
	RDI-50	8.0 a	20.25 a	127.6 a	24.7 a	5.46 a	0.86 a
	RDI-50a	7.7 a	18.62 a	121.9 a	18.4 b	9.36 a	1.45 a
2022	C-0	8.5 a	21.9 bc	114.9 bc	22.6 ab	5.15 c	0.98 d
	ETc-50	8.6 a	29.6 a	176.4 a	19.8 b	9.22 a	1.53 a
	ETc-75	8.5 a	26.4 ab	147.7 ab	18.4 b	8.21 ab	1.47 a
	ETc-100	8.3 a	25.5 abc	139.3 abc	18.3 b	7.75 ab	1.42 a
	ETc-200/0	8.2 a	19.7 c	104.5 c	23.8 ab	4.59 c	0.87 b
	RDI-50	8.3 a	25.4 abc	154 ab	28.8 a	5.70 bc	0.95 b
	RDI-50a	9.0 a	29.7 a	167.5 a	20.5 b	8.51 a	1.51 a

Statistically significant differences at the $\alpha = 0.05$ level are indicated by different letters. The data are compared separately in each column and for the years of interest.

Also noteworthy is the decrease in apple fruit set in the C-0 and ETc-50 treatments in the following year, 2020, despite the wet conditions of the year. In this year, however, the fruit growth was no longer reduced due to the lower apple tree load. In the moderately wet year 2021, yields and thus tree load was relatively balanced among the experimental treatments. However, there was a trend towards a lower proportion of fruit with a caliber greater than 70 mm, especially in the ETc-50 variety with half the water applied during the growing season. The higher proportion of larger fruits in C-0 and RDI-50 is again more related to their current fruit load. In 2022 yield was medium to high. Despite this, the apple trees evaluated in all treatments achieved a high proportion of fruit caliber over 70 mm. Therefore, the threshold of tree load affecting fruit size caliber depends on the current physiological state of the fruit trees and can vary from year to year. With a medium tree load in good condition, apple trees can be considered somewhat resistant to short periods of drought. Field experience has shown that the Gala Brookfield variety is more sensitive to drought than the triploid Red Jonaprince variety, which tends to grow more vigorously and naturally produces larger fruit under the same conditions.

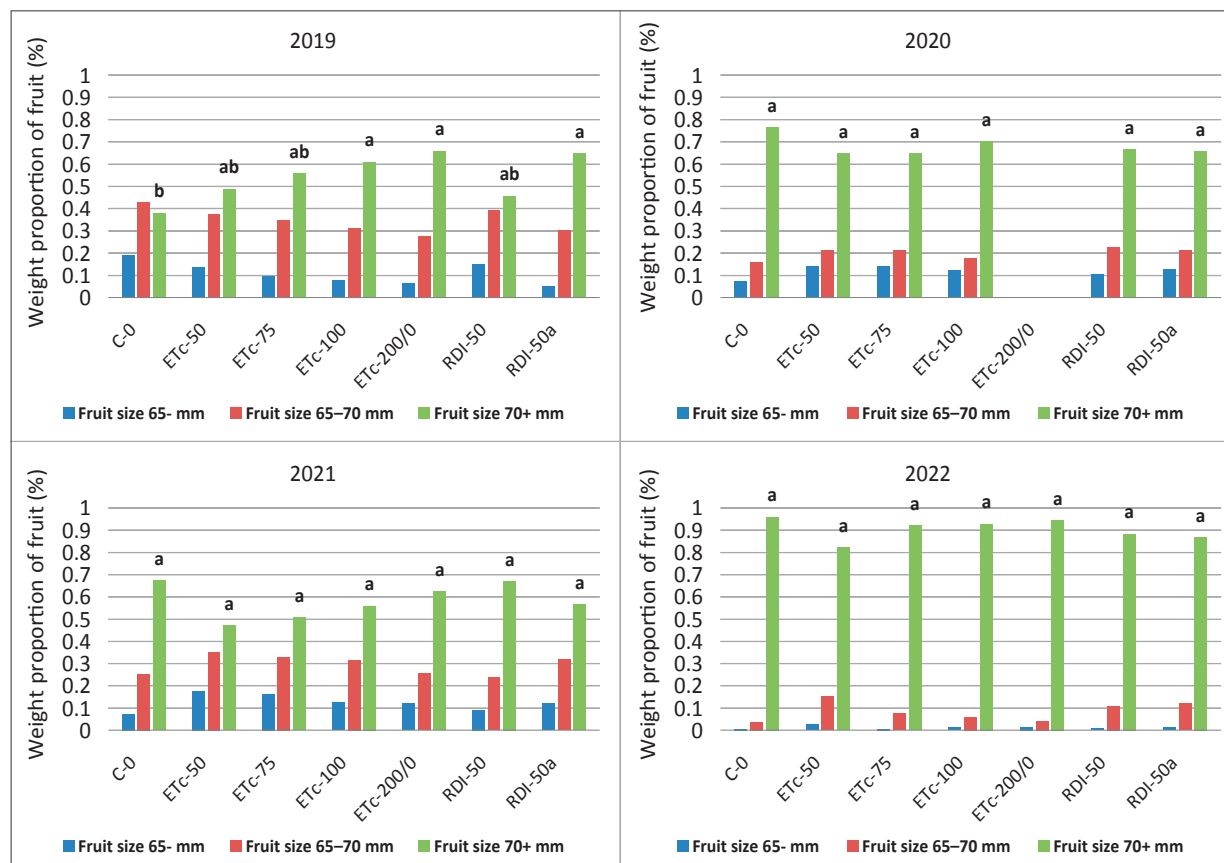


Figure 39. Weight proportion of apples by size caliber evaluated in 2019-2022

In conclusion, the following rules of thumb can be mentioned for the application of RDI in apple trees:

- ▶ The irrigation strategy of regulated deficit irrigation is feasible in the temperate climate and allows water savings of up to 20–25% under certain conditions.
- ▶ For Gala varieties, the maximum tree load at maturity should not exceed 120–132 fruits per tree (11 fruits/cm² TCSA) at a canopy height of approximately 3.2 m.
- ▶ The moisture regime can be 50% evapotranspiration during the third growth phase (BBCH 72–77),
- ▶ The moisture deficit should not exceed 20–25% of the annual evapotranspiration.
- ▶ Soil moisture should not fall below 75% in the rainy season and 60% in the dry season.
- ▶ Water supply should not be restricted during the growing season if high fruit set (approx. 15–16 fruits/cm² CSA) is maintained,
- ▶ The optimum tree load for triploid varieties, e.g. ‘Red Jonaprince’, may be higher, i.e. 150–160 fruits (11 fruits/cm² TCSA).

3.3.1.3 Technical and technological equipment of the RDI

For the needs of the RDI, it is necessary to ensure that the irrigation system is properly equipped and set up. The system requires an irrigation detail of a hose attached to a wire in the middle of the row. Ideally, the irrigation hose that represents the irrigation system detail should have 0.5 m holes distance and a flow rate of at least 2.3 mm.h⁻¹. A controller connected to sensor equipment is required to control the irrigation and determine irrigation needs. Sensors that measure soil moisture, meteorological data needed to calculate evapotranspiration, and/or sensors that monitor plant physiological parameters can be used.

3.3.2 Partial root zone drying

Partial root zone drying (PRD) strategy considers the spatial distribution of irrigation within the root zone of fruit trees, whereby only a part typically a half of the root system is irrigated at each watering.

3.3.2.1 Principles of the PRD Irrigation Strategy

The principle of this strategy is to provide sufficient water to only part of the root system, while subjecting the other half of the root system to some degree of drought. Plants respond physiologically to limited water availability and adjust their management of the moisture provided by partially closing the stomata. This strategy is particularly used in arid regions, where the entire row strip is usually irrigated, either by sprinklers or by a two-armed drip system (Figure 40) distributed on both sides of the fruit tree trunk. This strategy has the undeniable advantage of increasing the area of suitable moisture conditions and thus the space for potential root development. Alternating irrigation on each side allows both irrigated sides of the soil profile to remain at least partially moist, preventing significant drought stress from developing. At the same time, the entire soil surface of the flanking strip is not uniformly wetted. This allows evaporation to be regulated and limits irrigation water use while maintaining fruit production volume and quality.



Figure 40. Illustration of irrigation system detail with two drip hoses running parallel along the row on either side of the fruit tree trunks. The center hose in the illustration is dummy.

3.3.2.2 PRD operating conditions

In practice, the PRD irrigation strategy allows a water saving of 25–50% in dry conditions when irrigating the entire row strip. However, in temperate climatic conditions, the importance of this strategy is marginal for the time being, as orchards are usually irrigated with only one drip hose. On the other hand, in drier areas or in extremely dry years, this system can potentially compensate for the above-mentioned problems with irrigation of fruit trees using current systems. In general, the safe use of partial root system irrigation in orchards requires that the strategy be adapted to the current moisture conditions of the site and the management of the orchard. Again, certain conditions must be met when applying the method.

Moisture Regime

In the above strategy, irrigation is applied alternately to each side of the root system. Irrigation should correspond to a full dose of water applied through a central drip hose. The moisture content of the irrigated portion of the soil should not fall below 70% of the available water capacity. In the non-irrigated part of the soil, the moisture content should generally not fall below 50% of the AWC. Of course, as in the previous strategy, water rates or the interval between irrigation starts can be regulated according to the weather pattern, i.e., the ratio of rainfall to evapotranspiration. Again, the water deficit determined by evapotranspiration should not exceed 45% of the usable water capacity of the soil in the root zone.

Orchard management

As part of orchard management, it is useful to ensure that the soil surface is maintained and that the orchard is adequately thinned, although the irrigation method ensures better root zone coverage and thus potentially less risk of water shortage to ensure good yield and fruit quality.

When changing from a system with one drip tube to two with a distance of more than 60 cm, a period of 2–3 years must be allowed for the roots of the fruit trees to adapt to the new distribution of the irrigation water applied during which the roots may absorb the water provided less efficiently. This is due to a preference for root growth in the previous narrower irrigation zone.

3.3.2.3 Technical and technological equipment of the PRD

The strategy of partial root zone irrigation requires that the irrigation system is properly equipped and set up. The operation of the system is more demanding on the technical design of the irrigation system detail, which consists of two hoses. A manifold and shut-off valves must be installed between the hoses to regulate the flow of water through each arm to operate autonomously. The irrigation hoses should ideally have openings of 0.5 m and a flow rate of at least 2.3 mm.h⁻¹. Again, a controller connected to sensors is needed to control the irrigation and determine the irrigation needs. Sensors that measure soil moisture, meteorological data needed to calculate evapotranspiration, and/or sensors that monitor plant physiological parameters can be used. If soil moisture sensors are used, they should be installed in parallel under each irrigation arm so that the soil in both the irrigated and non-irrigated parts of the root zone can be monitored. The different methods can be combined as appropriate for proper calibration.

4 DETERMINATION OF NOVELTY OF THE PRACTICES

This publication describes and extends the knowledge of the rules and principles for determining the irrigation needs of orchards by measuring and evaluating soil moisture, water balance, and the physiological response of fruit trees to drought stress conditions. It provides guidance on the implementation of these methods, including instrumentation, installation and operation procedures, data interpretation, irrigation automation options, and the advantages and limitations of these approaches. The methodology also includes a description of the possibilities of unmanned crop imaging to locate irrigation needs within an orchard. Basic and alternative irrigation strategies to increase the efficiency of irrigation expenditures are also described. Within the framework of these deficit strategies, the methodology describes new research results and takes these experiences into account when setting conditions for the use of deficit irrigation strategies.

5 DESCRIPTION OF THE METHODOLOGY APPLICATION

The methodology is intended for fruit tree growers and specialized technology and consulting companies in the field of predicting irrigation needs of fruit trees. The publication provides a comprehensive guide describing the methods available for determining irrigation needs, determining the required rate, and basic irrigation strategies. For each method, the concepts, technical design, functionality, including a description of possible advantages, risks, and possibilities of operational use in orchard practice are always given. In this way, users can familiarize themselves with existing and modern approaches to fruit tree irrigation and apply them in practice for irrigation management in their orchards.

6 ECONOMIC ASPECTS

Irrigation water is one of the most important resources in agriculture. Optimizing the use of methods to determine the need for irrigation, its appropriate rate, and the possible use of alternative irrigation strategies effectively increases the efficiency of irrigation and is one of the important steps towards precision agriculture. Considering the different accessibility to water resources, technologies, and methods in irrigation management, the contribution of the methodology may vary among the regions of the world. However, by combining the practices described in this methodology, 15–30% of the water used to irrigate fruit trees can be saved in some cases without negatively affecting the quantity and quality of their fruit production. On the other hand, irrigation can effectively increase both fruit yield by 5–15% under temperate climate conditions and, above all, fruit quality parameters such as average fruit size by up to 30%, depending on the year. For quantifying, the benefits can be described in conditions of the Czech Republic orchards. Thus, assuming the results will be applied to at least 12.5% (1,330 ha) of all nut and stone fruit growing areas, corresponding to 10,642 ha (Němcová and Buchtová, 2022), with an average saving of irrigation water of 50–100 m³·ha⁻¹ it is possible to save up to 1 064 200 m³ of water annually. In addition, provided the production of fruit quality class I increases by e.g., 15% with an average market price of 0.70 €·kg⁻¹, the profit will increase by 3.14 million €. Adding up the above-mentioned savings and the higher profit from the realization of better quality fruit production in dry years that occur in our conditions every 2–3 years, a five-year yield of up to 7.84 million € can be expected.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY / REFERENCES

- Allen, R.G. a Pereira, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science* [online]. 2009, vol. 28, s. 17–34. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z> [cit. 2023-04-25].
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., a Smith, M. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements* [online]. Rome: FAO, 1998, ISBN 92-5-104219-5. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm> [cit. 2023-12-03].
- Bahat, I., Netzer, Y., Grünzweig, J. M., Alchanatis, V., Peeters, A., Goldshtein, E., Ohana-Levi, N., Ben-gal, A., a Cohen, Y. In-season interactions between vine vigor, water status and wine quality in terrain-based management-zones in a 'Cabernet Sauvignon' vineyard. *Remote Sensing* [online]. 2021, vol. 13, č. 9, s. 1636. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13091636> [cit. 2023-18-04].
- Blanco, V., Blaya-Ros, P.J., Castillo, C., Soto-Vallés, F., Torres-Sánchez, R., a Domingo, R. Potential of UAS-based remote sensing for estimating tree water status and yield in sweet cherry trees. *Remote Sensing* [online]. 2020, vol. 12, č. 15, s. 2359. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs12152359> [cit. 2023-18-04].
- Blažek, J. a kol. *Ovocnictví*. Praha, Květ, 1998, ISBN 80-85362-33-3.
- Borgogno-Mondino, E., Farbo, A., Novello, V., a Palma, L. A fast regression-based approach to map water status of pomegranate orchards with sentinel 2 data. *Horticulturae* [online]. 2022, vol. 8, č. 9, s. 759. ISSN 2311-7524 Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090759> [cit. 2023-18-04].
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L. a Evans, R.G. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience*. 1995, vol. 30, č. 6, s. 1229–1232. ISSN 0018-5345.
- Fereres, E. a Goldhamer, D.A. Suitability of stem diameter variations and water potentials as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* [online]. 2003, vol. 78, s. 139–144. ISSN 2380-4084. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511596> [cit. 2023-04-25].
- Fernández, J.E. Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae* [online]. 2017, vol. 3, č. 2, s. 35. ISSN 2311-7524 Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035> [cit. 2023-04-25].
- Fernández, J.E. Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. *Agricultural Water Management* [online]. 2014, vol. 142, s. 99–109. ISSN 1873-2283. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.017> [cit. 2023-04-25].
- Gautam, D., a Pagay, V. A review of current and potential applications of remote sensing to study the water status of horticultural crops. *Agronomy* [online]. 2020, vol. 10, č. 1, s. 140. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agronomy10010140> [cit. 2023-18-04].
- Goodwin, I. a Boland, A.M. *Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency* [online]. Rome: FAO, 2000, ISBN 92-5-104768-5. Dostupné z: <https://www.fao.org/3/Y3655E/y3655e00.htm#TopOfPage> [cit. 2023-12-03].
- Hájková, L., Voženílek, V. a Tolasz, R. *Atlas fenologických poměrů Česka*. Praha: ČHMÚ, 2012, 320 s. ISBN 978-80-86690-98-8.
- Hlavinka, P., Trnka, M., Balek, J., Semerádová, D., Hayes, M., Svoboda, M., Eitzinger, J., Možny, M., Fischer, M., Hunt, E., Žalud, Z. Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management*. 2011, vol. 98. s. 1249-1261.

- Hough, M.N. a Jones, R.J.A. The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0 – an overview. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1997, 1.2: 227–239. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/hess-1-227-1997>.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H-L., Waskom, R.M., Niu, Y. a Siddique, K.H.M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development* [online]. 2016, vol. 36, č. 3, s. 21. ISSN 1773-0155 Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6> [cit. 2023-02-08].
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J. a Hatfield, J.L. Normalizing the stress–degree–day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 1981, vol. 24, s. 45–55. ISSN 0002-1571.
- Jandák, K., Pokorný, E. a Prax, A. *Půdoznalectví*. Brno: Mendelova univerzita, 2010. 3. přepracované vydání, 143 s.
- Jones, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. 2004, vol. 55, s. 2427–2436. ISSN 0022-0957.
- Katz, L., Ben-Gal, A., Litaor, M. I., Naor, A., Peres, M., Peeters, A., Alchanatis, V., a Cohen, Y. A spatiotemporal decision support protocol based on thermal imagery for variable rate drip irrigation of a peach orchard. *Irrigation Science* [online]. 2022, vol. 41, č. 21 s. 1-19. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00830-x> [cit. 2023-18-04].
- Kohut, M. *Vláhová bilance zemědělské krajiny* (textová část). Doktorská disertační práce. Brno: Mendelova univerzita, 2007, 128 s.
- Kott, I. *Vláhová bilance na území České republiky v letech 1974 – 1990*. Praha: Český hydrometeorologický ústav Praha. 1992, vol. 42, 135 s. ISBN 80-900206-9-0.
- Lakso, A.L. a Goffinet, M.C. Apple fruit growth. *New York Fruit Quarterly* [online]. 2013, vol. 21, č. 1, s. 11-14. ISSN: 1068-6959. Dostupné z: <http://www.hort.cornell.edu/expo/proceedings/2014/Tree%20Fruit/Apple%20Fruit%20Growth%20Lakso.pdf> [cit. 2023-02-08].
- Leib, B.G., Caspari, H.W., Redulla, C.A., Andrews, P.K. a Jabro, J.J. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrigation Science* [online]. 2006, vol. 24, s. 85–99. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0013-9> [cit. 2023-02-08].
- Lemur, R., Fernández, J.E. a Steppe, K. Symbols, SI units and physical quantities within the scope of sap flow studies. In: *VII International Workshop on Sap Flow* 846. 2008, s. 21–32.
- Litschman, T. a Klementová, E. Srovnání výpočetních metod potenciální evapotranspirace. *Seminář Evaporace a evapotranspirace*. Brno: Czech hydrometeorological institute, 2005. ISBN 80-86690-24-5.
- Majerčák, J. a Novák, V. *GLOBAL, one-dimensional variable saturated flow model, including root water uptake, evapotranspiration structure, corn yield, interception of precipitations and winter regime calculation*. Bratislava: Institute of Hydrology, 1994. 75 s.
- Matějka, V. Potenciální evapotranspirace na území ČSSR. *Meteorologické zprávy*. 1972, vol. 25, č. 1–2, s. 97–101.
- Miháliková, M., Khel, T., Almaz, C., Duffková, R., Matula, S., Fučík, P., Vopravil, J., Kara, R.S., Havelková, L., Bátková, K. a Vlčková, M. NearriCZ: Databáze pro odhad polní vodní kapacity a bodu vadnutí v zemědělských půdách ČR pro účely řízení závlah 2019 [online]. Databáze. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvz/nearriCZ> [cit. 2023-08-02].

- Mintz, Y. a Walker, G.K. Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1993, vol. 32., s. 1305-1334. ISSN 1558-8424.
- Morison, J.I.L., Baker, N.R., Mullineaux, P.M., a Davies, W.J. Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 2008, vol. 363, č. 1491, s. 639-658. ISSN 1471-2970. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2175> [cit. 2023-18-04].
- Možný, M. Automatizace měření výparu z volné vodní hladiny. *Meteorologické zprávy*. 2003, vol. 56, č. 5, s. 150–155.
- Naor, A. Irrigation Scheduling and Evaluation of Tree Water Status in Deciduous Orchards. *Horticultural Review*. 2006, vol. 32, s. 111–165. ISSN 0163-7851.
- Naor, A., Naschitz, S., Peres, M. a Gal, Y. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiology* [online]. 2008, vol. 228, s. 1255–1261. ISSN 1758-4469 Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/treephys/28.8.1255> [cit. 2023-02-08].
- Norma, Česká technická. Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu ČSN 75 0434. 2016.
- Novák, V. *Vyparovanie vody v prírode a metody jeho určovania*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied. 1995, s. 158–191.
- Novotný, M., Kervališvili, D.M. a Šanta, M. *Závlaha poľných a špeciálnych plodín*. Bratislava: Príroda, 1990, 312 s. ISBN 80-07-00267-7.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W. a Torrecillas, A. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential reference equations for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* [online]. 2009, vol. 27, s. 121–127. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0126-z> [cit. 2023-04-25].
- Poblete-Echeverría, C., Espinace, D., Sepúlveda-Reyes, D., Zúñiga, M., a Sanchez, M. Analysis of crop water stress index (CWSI) for estimating stem water potential in grapevines: Comparison between natural reference and baseline approaches. In *VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops* [online]. 2015 vol. 1150, s. 189–194. ISSN 2406-6168. Dostupné z: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.27> [cit. 2023-18-04].
- Raes, D. BUDGET – a soil water and salt balance model. Reference manual. *KU Leuven, Department Land Management, Leuven, Belgium*, 2022.
- Raes, D. BUDGET 6.0 – A soil water and salt balance model. *IRRISOFT. KU Leuven University (Faculty of Bioscience Engineering). Division of Soil and Water Management. Celestijnenlaan*, 2004, 200. Dostupné z: <http://www.iupware.be> and select downloads and next software, last update June 2004.
- Spitz, P., Zavadil, J., Duffková, R., Korsuň, S., Nechvátal, M. a Hemerka, I. *Metodika řízení závlahového režimu plodín výpočetním programem IRRIPROG*. Praha: VÚMOP, v. v. i., 2011, 41 s. [CD-ROM]. ISBN 978-80-87361-11-5.
- Spitz, P., Zavadil, J., Duffková, R., Korsuň, S., Nechvátal, M. a Hemerka, I. *Metodika řízení závlahového režimu plodín výpočetním programem IRRIPROG*. Praha: VUMOP, v. v. i., 2011, 42 s. ISBN 978-80-87361-11-5.
- Steppe, K., De Pauw, D.J.W., a Lemeur, R. A step towards new irrigation scheduling strategies using plant-based measurements and mathematical modelling. *Irrigation Science* [online]. 2008, vol. 26, s. 505–517. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0111-6> [cit. 2023-18-04].

- Středa, T., Haberle, J., Klimešová, J., Svoboda, P., Středová, H. a Khel, T. *Metodika odběru a hodnocení kořenového systému polních plodin*. Certifikovaná metodika. Brno: Mendelova Univerzita v Brně, VÚRV, v. v. i. Praha, 2017, 54 s. ISBN 978-80-7427-261-5.
- Středová, H., Středa, T., Litschmann, T. a Rožnovský, J. *Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin a kultur*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2016. ISBN 978-80-7509-461-2.
- Tennant, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*. 1975, vol. 63, s. 995–1001.
- Van, De Put, H. a Steppe, K. Automated detection of atmospheric and soil drought stress in *Ficus benjamina* using stem diameter measurements and modelling. *Irrigation Science* [online]. 2022, vol. 40, s. 29–43. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00757-9> [cit. 2023-04-25].
- Váša, J. Půdní vláhové charakteristiky. *Vodohospodářský časopis SAV*. 1960, č. 8, s. 235–243.
- Vopravil, J. a kol. *Půda a její hodnocení v ČR*. Díl I. – 2. vydání. Praha: VÚMOP, v. v. i., 2010, 148 s.
- Vopravil, J. a kol. *Půda a její hodnocení v ČR*. Díl II. – 1. vydání. Praha: VÚMOP, v. v. i., 2011, 156 s.
- Wit, A., Elhaddad, A., Meyer zum Alten Borgloh, S., Turdukulov, U. a Hutjes, R. Crop productivity and evapotranspiration indicators from 2000 to present derived from satellite observations, 2022. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.b2f6f9f6.
- WMO. *Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO – No. 8)* [online]. World Meteorological Organization: ©2018. Dostupné z: https://library.wmo.int/index.php?id=12407&lvl=notice_display#.ZF3Qm3ZBxaQ [cit. 2023-02-05].
- Wu, C. D., McNeely, E., Cedeño-Laurent, J.G., Pan, W.C., Adamkiewicz, G., Dominici, F., Lung, S.C.C., Su, H.J., a Spengler, J.D. 2014. Linking student performance in Massachusetts elementary schools with the “greenness” of school surroundings using remote sensing. *PloS one* [online]. 2014, vol. 9, č. 10, e108548. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108548> [cit. 2023-18-04].

8 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE / LIST OF PUBLICATIONS THAT PRECEDED THIS METHODOLOGY

- Duffková, R., Fučík P., Miháliková M., Haberle J., Rožnovský J. a kol. *Metodika hodnocení vláhových potřeb zemědělských plodin pro účely závlah*. Certifikovaná metodika. Praha: VÚMOP v. v. i., 2020. ISBN 978-80-88323-12-9.
- Haberle, J. a Svoboda, P. Calculation of available water supply in crop root zone and water balance of crops. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2015, vol. 45, č. 4, s. 285–298.
- Haberle, J., Středa, T., Svoboda, P., Henzlová, B. a Kurešová G. Kořenový systém plodin pro 21. století – efektivní příjem vody a živin. In: Rožnovský a kol. (eds.) *Monitoring přírodního prostředí*, 2018, s. 13 [CD]. ISBN 978-80-7509-570-1.
- Haberle, J., Vlček, V., Kohut, M., Středa, T., Dostál, J. a Svoboda, P. *Bilance a určení dostupné zásoby vody v kořenové zóně plodin*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby v. v. i., 2015, 35 s. ISBN: 978-80-7427-173-1.

- Klementová, E. a Litschmann, T. Potreba závlahovej vody pre broskyne. In.: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): *Seminář „Extrémny počasí a podnebí“*, Brno, 11. března 2004. ISBN 80-86690-12-1.
- Kurešová, G., Mészáros, M., Svoboda, P., Neumannová, A., Menšík, L. a Haberle, J. Obsah minerálního dusíku v půdě jabloňových sadů a riziko vyplavení nitrátů. *Vědecké práce ovocnářské*. 2017, vol. 25, s. 79–88.
- Litschmann, T. Optimalizace množství dodané vody při kapkové závlaze jabloní s využitím snímačů půdní vlhkosti. In: *Hospodaření s vodou v krajině 2022: sborník příspěvků z mezinárodní konference*. Třeboň 13. – 14. 9. Brno: ČHMÚ, 2022. ISBN 978-80-7653-045-4.
- Litschmann, T. VIRRIB: A soil moisture sensor and its application in agriculture. *Communications in soil science and plant analysis*. 1991, vol. 22, č. 5–6, s. 409–418.
- Litschmann, T., Klementová, E. a Oukropec, I. Příspěvek způsobu obdělání meziřadí ovocného sadu k jeho celkové vláhové bilanci. *Acta horticultrae et regiotecturae*. 2005, s. 31–35. ISSN 1335-2563.
- Mészáros, M. a Scháňková, K. Řízená deficitní závlaha u jabloní Gala Brookfield. *Zahradnictví*. 2021, č. 9, s. 16–21. ISSN 1213-7596.
- Mészáros, M., Bělíková, H., Čonka, P. a Náměstek, J. Influence of the environmental conditions under hail nets on irrigation and fertilization efficiency in 'Golden Delicious' apple trees on replant soils. *Acta Horticulturae*. 2022, vol. 1335, s. 239–246. ISSN 0567-7572.
- Mészáros, M., Plavcová a L., Jupa, R. Metody stanovení závlahové potřeby používané nejen v ovocných sadech. *Vinař-Sadař, Ovocnářství*. 2020, č. 6, s. 30–34. ISSN 1804-3054.
- Plavcová, L., Mészáros, M., Jupa, R., Scháňková, K., Kovalíková, Z., Náměstek, J. a Mahrová, A. Yield and water relations of two apple cultivars under irrigation. *Irrigation Science*. ISSN 0342-7188 (in press). Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00839-2>.
- Svoboda, P. a Haberle, J. 2014. Hloubka kořenů polních plodin. *Úroda*. 2014, vol. 62, č. 12, s. 433–436.
- Svoboda, P., Haberle, J., Moulik, M., Raimanová, I., Kurešová, G. a Mészáros, M. The Effect of Drip Irrigation on the Length and Distribution of Apple Tree Roots. *Horticulturae*. 2023, vol. 9, s. 405. ISSN 2311-7524. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030405>.



v y d á v á

OSVĚDČENÍ

UKZUZ 106484/2023

o uznání metodiky v souladu s podmínkami Metodiky hodnocení výzkumných organizací a programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací, schválené usnesením vlády dne 8. února 2017, číslo 107 a její samostatné přílohy č. 4 schválené usnesením vlády dne 29. listopadu 2017 č. 837.

Název metodiky: **Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech**
(Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards)

Autor/autoři: **Ing. Martin Mészáros, Ph.D.; Ing. Klára Scháňková;**
Ing. Jan Náměstek, Ph.D.; RNDr. Lenka Plavcová, Ph.D.;
Ing. Rostislav Fiala, Ph.D.; Ing. Pavel Svoboda; Ing. Jan Haberle, CSc.;
Ing. Tomáš Litschamann, Ph.D.

Název organizace/cí: **VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ**
HOLOVOUSY s.r.o.;
Univerzita Hradec Králové; Český hydrometeorologický ústav;
Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.; AMET

Místo vydání: Holovousy

Rok vydání: 2023

Metodika byla vypracovaná v rámci výzkumného projektu/podpory MZeČR NAZV č. QK1910165 s názvem „Moderní postupy v závlahovém režimu ovocných dřevin v podmínkách vodního deficitu“. Při zpracování metodiky byla rovněž využita infrastruktura projektu RO1523.

Brno 20. 6. 2023

Ing. Daniel Jurečka
ředitel ústavu

.....
podpis/elektronický podpis
zástupce odborného útvaru státní správy

Souhlas ředitele Odboru precizního zemědělství, výzkumu a vzdělávání MZeČR
V dne

Mgr. Jan Radoš
Datum: 2023.06.22
16:44:16 +02'00'

.....
podpis/elektronický podpis
ředitele/ředitelky
Odboru precizního zemědělství,
výzkumu a vzdělávání



**Stanovení potřeby a strategie zavlažování v ovocných sadech /
*Determining the need and strategy for irrigation in fruit orchards***

Autoři:

Mészáros, M. a kol.

Vydal:

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s. r. o.

Grafická úprava, sazba a tisk:

ŽAKET – KARTOGRAFICKÉ VYDAVATELSTVÍ A TISKÁRNA

ISBN 978-80-87030-88-2 (online; pdf)

[https://doi.org/ 10.60615/VNNA-HQ23](https://doi.org/10.60615/VNNA-HQ23)

ISBN 978-80-87030-88-2
(online; pdf)



VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY, s.r.o.

© 2023