

Metodika integrovaného monitoringu

NIR/NDVI kamera + půdní vlhkost + půdní teplota

Hodnocení vlivu frézování na růst a přežívání sazenic

Projekt Alcedo Frézování | Únor 2026

1. Přehled měřicího systému

Systém kombinuje tři nezávislé zdroje dat, které společně popisují řetězec: atmosféra → půda → rostlina. Každý zdroj měří jinou část tohoto řetězce a teprve jejich kombinace umožňuje identifikovat PŘÍČINY změn, nikoli pouze symptomy.

1.1 Co měří jednotlivé senzory

Čidlo / Výstup	Veličina	Jednotka	Typický rozsah (les, ČR)
Survey3W OCN – NIR kanál	Reflektance blízkého infračerveného (808 nm)	bezrozměrná (0–1) po kalibraci	Půda 0,10–0,20; vegetace 0,40–0,80
Survey3W OCN – NDVI	Normalizovaný vegetační index	bezrozměrný (−1 až +1)	Holá půda −0,1–0,15; sazenice 0,2–0,6
Půdní vlhkost 10 cm	Volumetrický obsah vody (VWC)	m ³ /m ³ nebo %	5–40 % (písek 5–15, hlína 15–40)
Půdní vlhkost 20 cm	VWC v zóně kořenového balu	m ³ /m ³ nebo %	10–40 %
Půdní vlhkost 48 cm	VWC v hluboké zóně	m ³ /m ³ nebo %	15–45 %
Teplota půdy 10 cm	Teplota rhizosféry (kořenová zóna)	°C	−2 až +25 °C (roční cyklus)
Teplota půdy 20 cm	Teplota hlubší kořenové zóny	°C	0 až +20 °C
Teplota půdy 48 cm	Teplota spodní vrstvy	°C	+2 až +15 °C
Teplota povrch 10 cm	Teplota vzduchu těsně nad půdou	°C	−10 až +45 °C (extrémy)

1.2 Proč potřebuji všechna tři měření

Samá kamera (NDVI) vám řekne "sazeniči se daří / nedáří", ale neřekne proč. Uvidíte pokles NDVI, ale nevíte, zda je to suchem, mrazem, škůdcem nebo kombinací.

Samá půdní vlhkost vám řekne "vody je dost / málo", ale neřekne, jestli ji sazenice skutečně využívá. Můžete mít VWC 25 % a sazenice stejně uschýná, protože kořeny ještě nedosáhly do té hloubky.

Samá půdní teplota vám řekne "podmínky pro růst kořenů existují / neexistují", ale neřekne, zda sazenice těch podmínek využívá.

Teprve kombinace všech tří vám řekne: "Na frézované ploše se půda na jaře ohřála o 10 dní dříve, vlhkost po dešti pronikla rychleji do 20 cm, a sazenice na to reagovaly měřitelným nárůstem NDVI o 0,08 oproti kontrolní ploše." To je vědecky publikovatelný výsledek.

2. Kauzální řetězce: co způsobuje co

Následující tabulka shrnuje hlavní kauzální vazby mezi prostředím, půdou a odezvou sazenice. Pro každý řetězec definuje, které veličiny ze senzorů použijete jako důkaz.

Příčina (prostředí)	Mechanismus	Dopad na sazenici	Čím to změříte
Dešťová srážka	Infiltrace do půdy	Dostupnost vody pro kořeny	VWC(10,20cm) nárůst → NDVI nárůst s lagem 1–7 dní
Sucho (délka >7 dní)	Pokles VWC v rhizosféře	Stomatický uzávěr → snížená fotosyn.	VWC(10–20cm) klesá → NDVI klesá se zpožděním
Jarní ohřev půdy	T(10cm) překročí 5–8°C	Aktivace kořenového růstu	T onset → NDVI onset s lagem 7–21 dní
Pozdní mráz	T(povrch) < -3°C po rashení	Mrazové poškození výhonů	T(10cm vzduch) spike → NDVI drop za 2–7 dní
Podmokření (waterlogging)	VWC(10cm) > 45% déle než 48h	Hypoxie kořenů, hniličky	VWC sat. + NDVI pokles během dnů
Podzimní senescence	T(10cm) klesá pod 5°C, fotoperioda krátí	Ukončení vegetace	T + fotoperioda → NDVI postupný pokles
Frézování (treatment)	Rozrušení humusové vrstvy, lepší aerace + infiltrace	Lepší kořenování, rychlejší růst	Vyšší NDVI a rychlejší odezva na srážky vs. kontrola

2.1 Časové zpoždění (tzv. "lag") – klíč k interpretaci

Nejdůležitější koncept celé metodiky: NDVI reaguje na půdní podmínky se zpožděním. Toto zpoždění je samo o sobě výsledkem – říká vám, jak rychle sazenice přijímá vodu a živiny.

- **Krátký lag (1–3 dny):** Dešť → VWC nárůst → NDVI nárůst. Indikuje dobrý kontakt kořenů s půdou, funkční kořenový systém.
- **Střední lag (3–14 dní):** Typický pro mladé sazenice s omezeným kořenovým systémem.
- **Dlouhý lag (>14 dní):** Indikuje problém – kořeny nerostou, poškození, špatný kontakt s půdou.

Hypotéza pro Alcedo: Sazenice na frézované ploše budou mít kratší lag než na nefrézované, protože frézování rozrušuje zhutnělou humusovou vrstvu a umožňuje lepší kontakt kořenů s minerální půdou.

3. Testovatelné hypotézy

Kombinací tří datových toků můžete formulovat a testovat následující hypotézy. Každá je kvantitativně ověřitelná z našich dat.

#	Hypotéza	Metrika	Očekávaný výsledek
H1	Frézování zlepšuje příjem vody kořeny sazenic	Korelace VWC(10–20cm) vs. NDVI, fréz. vs. kontrola	Vyšší korelace a vyšší NDVI při stejné VWC na frézované ploše
H2	Frézovaná půda se na jaře ohřívá rychleji	Porovnání T(10cm) onset >5°C vs. NDVI onset	Dřívější dosažení prahu T + dřívější nástup NDVI na fréz. ploše
H3	Sazenice na frézované ploše lépe přežívají letní sucho	NDVI pokles v suchém období (VWC(20cm) < 15%)	Menší NDVI pokles na fréz. ploše díky lepší infiltraci
H4	Hluboká vlhkost (60cm) koreluje s dlouhodobým zdravotním stavem	Lag-korelace VWC(48cm) vs. NDVI s posunem 2–4 týdny	Signifikantní pozitivní lag-korelace
H5	Mrazové poškození sazenic je detektovatelné přes NDVI	NDVI drop po nocích s T(povrch 10cm) < -5°C	Pokles NDVI o 0,05–0,15 do 3–7 dní po mrazu
H6	Frézování prodlužuje vegetační sezónu sazenic	Délka období NDVI > 0,25 (GDD-analog)	Delší vegetační sezóna na fréz. ploše o X dní

4. Co vám řekne hloubkový profil

Tři hloubky měření vlhkosti a teploty (10, 20, 48 cm) nejsou nahodilé – každá zachycuje jinou funkční zónu půdního profilu:

4.1 Hloubka 10 cm – povrchová zóna

Toto je nejdynamičtější vrstva. Reaguje okamžitě na dešť (VWC nárazově roste), výpar (rychle klesá) a teplotu vzduchu. Pro sazenice v prvním roce po výsadbě je to často jediná zóna, kde mají kořeny.

- **Vysoká korelace VWC(10cm) vs. NDVI** = sazenice závisí na povrchové vodě (= zranitelné vůči suchu)
- **Frézování tady pomáhá:** rozrušená humusová vrstva lépe infiltruje vodu → VWC(10cm) po dešti roste rychleji a výše
- T(10cm) určuje začátek vegetační sezóny: kořenový růst začíná při ~5–8°C

4.2 Hloubka 20 cm – kořenová zóna

Tady by se kořeny sazenic měly nacházet od druhého vegetačního období dále. Je to klouzavé – výrazně reaguje na srážky, ale s měkkým zpožděním (hodiny až 1–2 dny za 10cm vrstvou).

- **Porovnání VWC(10cm) vs. VWC(20cm)** = infiltracní rychlosť. Na frézované ploše by měla být vyšší (rychlejší prosak vody do 20cm).
- **Pokud NDVI koreluje s VWC(20cm) lépe než s VWC(10cm):** kořeny už dosáhly 20cm hloubky = sazenice je dobře zakoreněná

4.3 Hloubka 48 cm – hluboká zásobní zóna

Tato vrstva reaguje na dešť s výrazným zpožděním (dny až týdny), ale zato si vodu drží dlouho. Funguje jako "strategická rezerva".

- Pro mladé sazenice (1–2 roky) bude korelace s NDVI slabá – kořeny tam ještě nejsou
- **Pozitivní lag-korelace VWC(60cm) vs. NDVI s posunem 2–4 týdny:** indikuje, že kapilarní vzlínání z hloubky zásobuje povrchové vrstvy
- S rostoucím věkem sazenic bude korelace s VWC(60cm) růst = kořeny prorůstají hlouběji

4.4 Povrchová teplota (10 cm nad půdou)

Teploměr ve výšce 10 cm měří mikroklima těsně nad půdou, které se může dramaticky lišit od meteorologické stanice. Toto čidlo je klíčové pro:

- **Detekci přízemních mrazů:** Teplota v 10 cm nad půdou může být o 3–8°C nižší než ve 2 m (standardní meteostanice). Sazenice vysoké 20–48 cm jsou přímo v této zóně.
- **Frézovaná vs. nefrézovaná plocha:** Frézovaná plocha má menší pokryvnou vegetaci → větší teplotní extrémy (teplo přes den, chladno v noci). V noci na frézované ploše může být o 2–4°C chladněji (radiační mráz).
- **Tepelný stres:** letní povrchová teplota nad 40°C může poškodit výhony mladých sazenic

5. Analytické metody

5.1 Základní časové řady

Pro každou plochu (frézovaná A, B; kontrola C, D) vytvoříte denní časovou řadu:

- NDVI: průměrný NDVI z oblasti zájmu (ROI) okolo sazenic, z nejlepšího snímku dne
- VWC(10), VWC(20), VWC(48): průměrná denní hodnota
- T(10cm půda), T(povrch 10cm): denní minimum, maximum, průměr

Všechny časové řady uložte s jednotným časovým razzítkem (UTC nebo CET).

5.2 Křížová korelace (lag-analýza)

Klíčová metoda. Pro každý pár (např. VWC(20cm) vs. NDVI) vypočtěte Pearsonovu korelací při různých časových posunech (-7 až +30 dní). Lag s nejvyšší korelací udává typickou dobu odezvy sazenice na změnu půdních podmínek.

- Porovnejte lag mezi frézovanou a kontrolní plochou
- Sledujte, jak se lag mění během sezóny (jaro vs. léto) a mezi roky

5.3 Reakce na události (event analysis)

Identifikujte klíčové události v půdních datech a sledujte NDVI odezvu:

- **Dešťová epizoda:** VWC(10cm) nárůst > 5 procentních bodů za 24h → sledujte NDVI přírůstek v následných 1–14 dnech
- **Suché období:** VWC(20cm) < 15 % po dobu > 7 dní → kdy a o kolik začne NDVI klesat?
- **Mrazová noc:** T(povrch 10cm) < -3°C → detekujte NDVI drop v následných 2–7 dnech
- **Jarní onset:** T(půda 10cm) trvale > 5°C → za kolik dní NDVI překročí 0,20?

5.4 Sezonní integrované metriky

Pro celkové porovnání frézovaných a kontrolních ploch vypočtěte za celou vegetací sezónu:

- **iNDVI (integrovaný NDVI):** plocha pod NDVI křivkou – měří celkovou zelenou produktivitu sezóny
- **SOS (Start of Season):** datum, kdy NDVI trvale překročí 0,20 (nebo 20 % roční amplitudy)
- **EOS (End of Season):** datum, kdy NDVI klesne pod práh
- **NDVI_{max}:** roční maximum NDVI (indikátor maximálního zdravotního stavu)
- **Stress days:** počet dní, kdy VWC(20cm) < 15% a současně NDVI klesá

5.5 Statistické testování

Pro hypotézy H1–H6 použijte:

- Dvouvpýberový t-test nebo Mann-Whitney U test pro porovnání metrik mezi frézovanou a kontrolní plochou
- ANOVA s opakováním měřením pro sezonné porovnání
- Granger causality test pro ověření, že půdní podmínky skutečně předcházejí změnám NDVI

6. Časové měřítka analýz

Časové měřítka	Co měříte	Klíčová proměnná	Vzorkovací frekvence
Hodinové (denní cyklus)	Denní kollisání T povrchu, osvětlení	T(povrch 10cm), kvalita snímku	Každou 1–2 h
Denní	Odezva na srážky, mráz, sucho	VWC(10,20cm), NDVI, T(10cm)	1× denně (nejl. snímek dne)
Týdenní	Krátkodobé trendy, stresové epizody	Průměrný NDVI, VWC, T	7denní klouzavý průměr
Měsíční	Fenologické fáze, sezónní dynamika	NDVI max/min, kumulativní VWC	Měsíční agregáty
Vegetační sezóna	Celkový efekt frézování	Integrovaný NDVI (plocha pod křivkou)	Roční porovnání

7. Doporučené schéma experimentu

7.1 Minimální sestava

Každá plocha (frézovaná / kontrolní) by měla mít:

- 1× MAPIR Survey3W OCN kamera (snímá obě plochy, nebo 1 kamera na plochu)
- 1× sada půdních senzorů: VWC sondy v 10, 20 a 48 cm + tepletorní čidla ve stejných hloubkách + povrchový teploměr v 10 cm
- 1× datalogger pro půdní senzory (vzorkování každých 15–30 min)
- 1× kalibrační terč v záběru kamery

7.2 Ideální replikace

Pro statisticky robustní výsledky doporučuji minimálně 3 replikace každého treatmentu, tedy 3 frézované + 3 kontrolní plochy, každá s vlastní sadou senzorů. Kamera může být sdílena (pokud záběr pokrývá více ploch).

7.3 Synchronizace dat

Kritické je, aby kamera a datalogger měly synchronizovaný čas (UTC). Snímky z kamery mají časové razítko v EXIF. Datalogger musí logovat se stejnou časovou zónou. Při zpracování sloučíte obě datové sady na společnou časovou osu (typicky denní aggregáty).

8. Příklad: jak bude vypadat výstup

Po jednné vegetační sezóně budete schopni říct například:

"Na frézované ploše A dosla půda v 10 cm trvale 5°C dne 28. března (o 12 dní dříve než kontrola C). První měřitelný nárůst NDVI nad 0,20 nastal 15. dubna, tj. lag 18 dní od teplotního prahu (vs. 29 dní na kontrole). Po dešťové epizodě 12.–14. května (22 mm) vzrostla VWC(20cm) z 18 % na 31 % během 8 hodin na frézované ploše (vs. 18 hodin na kontrole), a NDVI reagovalo nárůstem o 0,06 za 4 dny (vs. 0,03 za 9 dní). Integrovaný NDVI za sezónu (duben–říjen) činil 38,2 na frézované vs. 29,7 na kontrolní ploše ($p < 0,05$, Mann-Whitney)."

Toto je typ výsledku, který je publikovatelný v lesnickém časopise a kvantitativně dokládá efekt frézování na úrovni fyziologické odezvy sazenic.

9. Omezení a doporučení

- **NDVI není přímá míra biomasy:** U mladých sazenic s malým listovým pokryvem bude NDVI signál smíchán s půdním pozadím. Použijte SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) jako alternativu, pokud je pokryv $< 30\%$.
- **Jednobodové půdní měření:** VWC sonda měří objem ~1 litr půdy. Půdní vlhkost může být prostorově velmi variabilní. Umístěte sondu do reprezentativního místa v blízkosti sazenic v záběru kamery.
- **Oblačnost a osvětlení:** Bez kalibračního terče v záběru jsou NDVI hodnoty ovlivněny osvětlením. S terčem získáte absolutní reflektanci, která je porovnatelná mezi dny.
- **Sníh, déšť, rosa:** Tyto podmínky znehodnocují NIR snímky. Využijte hodinový interval k výběru nejlepšího snímku dne. Automatický výběr lze dle jasu/kontrastu.
- **Saturace NDVI:** Nad LAI ~3 se NDVI saturuje (nerozliší mezi zdravou a velmi zdravou vegetací). Pro mladé sazenice to není problém, ale zvvažte NDRE (Red Edge) pro pozdější fáze.