

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**Testování nových čidel tlaku půdního vzduchu**

Diplomová práce

Bc. Darina Špinettiová

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D.

Leden 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Špinetiová Jméno: Darina Osobní číslo: 396021  
Zadávající katedra: K143  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Testování nových čidel tlaku půdního vzduchu

Název diplomové práce anglicky: Testing the newly developed soil air pressure sensors

Pokyny pro vypracování:

Proveďte detailní rešerši literatury na téma měření tlaků tekutých fází v pórovitém prostředí, přičemž se zaměřte na měření tlaku půdního vzduchu.

Proveďte detailní analýzu datových řad získaných v lokalitách Roklan, Uhlířská a Nučice pomocí čidel tlaku vzduchu vyvinutých na Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Data statisticky vyhodnoťte.

V laboratoři ověřte funkci čidla za různých režimů, které mohou nastat v terénu (plné zanoření čidla pod hladinu podzemní vody, kontakt s bublinou vzduchu). Výsledky diskutujte a využijte pro interpretaci měření z terénu.

V závislosti na dostupnosti čidla ověřte také funkci miniaturní verze čidla pro měření v laboratoři.

Seznam doporučené literatury:

[1] HANGEN, E. a H. GERKE. Field Measurements of Air and Water Pressures in a Heterogeneous Forest-Reclaimed Lignitic Mine Soil. Vadose Zone Journal. 2007, 849-854.

[2] SAKAKI, T., A. LIMSUWAT and T.H. ILLANGASEKARE, An Improved Air Pressure Measuring Method and Demonstrated Application to Drainage in Heterogeneous Soils Vadose Zone Journal, May 2011, v. 10, 706-715

[3] Web of Knowledge

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

12.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Bc. Darina Špinetiová

### Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala doc. Ing. Michalu Sněhotovi, Ph.D. za vedení při psaní, výpomoc při provádění experimentů a za odborné rady.

Děkuji doc. Ing. Miroslavu Tesařovi, CSc. za veškerá poskytnutá data z lokality Roklan, za data z lokality Uhlířská děkuji doc. Ing. Martinu Šandovi, Ph.D. a v neposlední také děkuji Ing. Davidu Zumrovi, Ph.D. za data poskytnutá z lokality Nučice.

V neposlední řadě děkuji své rodině za trpělivost a podporu.

Tento výzkum byl podpořen studentským grantem č. SGS/143/OHK1/2T/11 „Experimentální výzkum proudění vody a transportu látek a tepla v heterogenním pórovitém prostředí“ (2016, nositel Ing. Jan Šácha).



## **Abstrakt**

Tématem diplomové práce je zjišťování tlaku půdního vzduchu pomocí nově vyvinutých čidel tlaku půdního vzduchu a vyhodnocení dat, která tato čidla naměřila v terénu.

Diplomová práce je rozdělena do tří částí. První část obsahuje rešerši dostupné literatury na téma půdní vzduch a teorii potřebnou pro pochopení problematiky půdního vzduchu. Druhá část se zabývá čidly tlaku půdního vzduchu vyvinutými na ČVUT v Praze a jejich testováním.

Třetí část se zabývá analýzou tlaku půdního vzduchu ze tří lokalit: Šumava-experimentální stanoviště Roklan, Jizerské hory-experimentální povodí Uhlířská a experimentální povodí Nučice. Analýza obsahuje základní charakteristiky tlaku půdního vzduchu, vztah tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu během zvlhčení a drenáže půdy a dynamiku tlaku půdního vzduchu. Výsledky analýzy z dané lokality jsou na konci diskutovány. Na závěr práce jsou shrnuty výsledky testování čidel tlaku půdního vzduchu a výsledky analýz provedené u každé lokality.

Klíčová slova: půdní vzduch, tlak půdního vzduchu, tenzometr

## **Abstract**

Master's thesis topic is measuring soil air pressure by newly developed soil air pressure sensors and analysis of data the sensors measured in the field.

Thesis is divided in three parts. First part contains literature review on the topic of soil air and all the theory, which is necessary for understanding of soil air. Second part is focused on soil air pressure sensors, which were developed in Czech technical university in Prague, and it's testing.

Third part is focused on analysis of soil air pressure measured in three locations: Šumava- Roklan, Jizerské hory-Uhlířská and Nučice. Analysis contains basic characteristics of soil air pressure, relation of soil water pressure and soil air pressure during the wetting and drainage of soil and the dynamics of soil air pressure. The results of the analysis from each locality are discussed in the end. Conclusion of the master's thesis contains summary of results from testing soil air pressure sensors and also results from all mentioned locations.

Keywords: soil air, soil air pressure, tensiometer

## Obsah

1. Úvod.....	8
2. Rešerše literatury .....	10
2.1 Měření tlakových výšek tenzometrem .....	10
2.2 Půdní vzduch.....	11
3. Teorie .....	14
3.1 Kapilární tlak.....	14
3.2 Potenciál půdní vody a jeho složky.....	15
3.2.1 Matriční potenciál .....	16
3.2.2 Pneumatický potenciál .....	16
3.2.3 Tenzometrický potenciál.....	17
3.3 Retenční čára a hystereze .....	17
4. Čidla na měření tlaku půdního vzduchu .....	19
4.1 Popis čidla .....	19
4.1.1 Princip funkce čidla tlaku půdního vzduchu.....	20
4.2 Zkouška čidel tlaku půdního vzduchu.....	21
4.3 Výsledky zkoušky čidel tlaku půdního vzduchu.....	22
4.4 Diskuze.....	24
5. Terénní měření .....	25
5.1 Šumava – Roklan .....	25
5.1.1 Charakteristika lokality .....	25
5.1.2 Materiál.....	26
5.1.3 Metody .....	28
5.1.4 Analýza dat za období 4. 6. 2015 – 21. 7. 2016 pro hloubku 15,9 cm .....	30
5.1.5 Analýza dat za období 4. 6. 2015 – 1. 12. 2015 pro hloubku 36,4 cm .....	35
5.1.6 Analýza dat za období 4. 6. – 4. 8. 2015 pro hloubku 15,9 cm .....	40
5.1.7 Analýza dat za období 4. 6. – 4. 8. 2015 pro hloubku 36,4 cm .....	44

5.1.8	Analýza dat za období 7. 9. – 12. 9. 2015 pro hloubku 36,4 cm .....	49
5.1.9	Analýza dat za období 6. 10. – 31. 10. 2015 pro hloubku 36,4 cm .....	53
5.1.10	Analýza dat za období 11. 11. – 29. 12. 2015 pro hloubku 15,9 cm .....	58
5.1.11	Analýza dat za období 24. 1. – 29. 2. 2016 pro hloubku 15,9 cm .....	63
5.2	Jizerské hory - Uhlířská .....	68
5.2.1	Charakteristika lokality .....	68
5.2.2	Materiál .....	68
5.2.3	Analýza dat za období 22. 6. 2015 – 5. 7. 2015 pro hloubku 55,9 cm .....	71
5.2.4	Analýza dat za období 7. 11. 2015 – 7. 1. 2016 pro hloubku 17 cm .....	75
5.2.5	Analýza dat za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016 pro hloubku 55,9 cm .....	79
5.3	Nučice .....	84
5.3.1.	Charakteristika lokality .....	84
5.3.2	Materiál .....	84
5.3.3	Analýza dat za období 17. 11. 2015 – 2. 12. 2015 pro hloubku 43 cm .....	86
5.4	Diskuze .....	91
6.	Závěr .....	93
7.	Použité zdroje .....	94

## 1. Úvod

Jednou z nejdůležitějších složek pro život na Zemi je voda, která je obsažena v každém živém organismu. Vytváří různé druhy ekosystémů, tvaruje krajinu a vytváří vhodné klimatické podmínky pro život. Pro fungování života na Zemi je také důležitá půda, která vytváří prostředí pro růst rostlin. Spojením těchto dvou složek získáme půdní vodu, která je nezbytná pro život rostlin, nejen sama o sobě, ale také protože je nejlepším rozpouštědlem a dokáže rozpustit a přenést přes kořeny do rostliny důležité prvky. Proto je důležité porozumět hydrologickým procesům, které v půdě probíhají. Nové poznatky se mohou využít pro efektivnější zavlažování, pro přesnější předpověď povodní nebo naopak pro co nejefektivnější zadržování vody v krajině pro stále častější doby sucha.

Proces, kdy se voda z povrchu půdy vsakuje dál přes půdní profil, se nazývá infiltrace. Každá půda je schopná pojmout jiné množství vody. Existují různé modely pro výpočet infiltrace. Žádný z modelů ale nepopisuje proces infiltrace dokonale. Především pokud se jedná o množství, které je půda schopná do sebe vsáknout. V mnohých případech je množství vody, která se dokázala vsáknout, menší než předpokládají modely (Hammecker et al., 2003). Jedním z důvodů je přítomnost vzduchu v půdě, který zaplňuje prostor a preferenční cesty v půdě, a tím mění proudění vody v půdě (Sněhota et al., 2015). Tato diplomová práce se proto zaměřuje tlak půdního vzduchu.

Diplomová práce je rozdělena do tří částí. První část je teoretická a obsahuje rešerši literatury na téma půdní vzduch a tenzometry. Dále se v první části nachází teorie, která je potřebná pro pochopení dané problematiky. Jedná se o potenciál půdní vody a jeho dílčí složky, kapilární tlak a retenční čáru a její hystereze.

Druhá část pojednává o čidlech tlaku půdního vzduchu vyvinutých na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství, ČVUT v Praze. Tato část se zabývá popisem čidel tlaku půdního vzduchu a experimentem pro zjištění, zda měření čidel ovlivňuje tlak vody.

Třetí část se zabývá analýzou dat získaných z čidel tlaku půdního vzduchu, která jsou již naistalována na třech lokalitách: Šumava-Roklan, Jizerské hory-Uhlířská a Nučice. Na každé z těchto lokalit jsou naistalována tři čidla tlaku půdního vzduchu. Data z těchto čidel jsou porovnávána s daty získanými z tenzometrů (tlaková výška půdní vody) a vlhkostních čidel (objemové vlhkosti). Pro správný popis probíhajících procesů

v půdě je důležité k sobě jednotlivé přístroje přiřadit podle hloubky. V každé hloubce může docházet k jiným procesům. Přístroje musí být také co nejbližší u sebe. U každé lokality jsou popsány metody, kterými byla data zpracována.

Cílem práce je: (i) z dostupné literatury zpracovat rešerši pojednávající o půdním vzduchu a tenzometrech, (ii) v laboratoři otestovat nová čidla tlaku půdního vzduchu na vliv tlaku vody a (iii) zpracovat terénní data naměřená na třech lokalitách: Šumava-Roklan, Jizerské hory-Uhlířská a Nučice.

## 2. Rešerše literatury

### 2.1 Měření tlakových výšek tenzometrem

Tenzometr je měřicí zařízení, které se používá v laboratořích a terénu pro měření tlakových výšek v nenasyčeném porézním prostředí.

Tenzometr se skládá z trubice, na jejímž spodním konci se nachází polopropustná membrána (Shock a Wang, 2011). Nejčastěji se používá porézní keramická čepička. Tenzometr je v horní části osazen manometrem a na konci uzavřen víčkem. Před osazením do půdy se tenzometr naplní odplyněnou vodou. Porézní keramická čepička umožňuje proudění vody z tenzometru do půdy a naopak. Pokud se tenzometr nachází v nenasyčeném prostředí, proudí voda z tenzometru do půdního prostředí a v tenzometru vzniká podtlak, který je přenášen na manometr. Pokud se vlhkost půdy zvýší, začne voda proudit zpět do tenzometru a podtlak se začne snižovat. Nulové čtení na manometru znamená, že je půda plně nasycena, to znamená, že se čepička tenzometru nachází v plně nasycené půdě, pod hladinou podzemní vody. Maximální hodnota, kterou je schopný tenzometr naměřit, je 100 kPa (1 bar nebo 10 m v. s.) (Warrick, 2002)

U dnešních moderních tenzometrů je manometr nahrazen tlakovým čidlem, které je v přímém kontaktu s odplyněnou vodou v tenzometru. Keramická čepička umožňuje přenos tlaku (podtlak i přetlak) z půdního prostředí do kapaliny uvnitř tenzometru, která vzhledem ke své nestlačitelnosti přenáší tlak dále až k tlakovému čidlu. U moderních tenzometrů jsou navíc zabudované i teplotní čidla (Ori, 2003).

Tenzometr se používá při měření tlaků v pórovitém prostředí. Finsterle a Faybishenko (1998) zkoumali, co tenzometr měří v rozpukané hornině. Tenzometry byly umístěny pukliny čedičového jádra. Další tenzometry byly naistalovány mimo tuto puklinu. Dále byly provedeny numerické simulace pro vztah tenzometru a pukliny. Časový vývoj tlaku naměřený tenzometrem v terénu i v laboratoři společně s numerickou simulací dokázaly, že měření na manometru je ovlivněno především rozpukanou částí, která vede vodu do nebo z keramické čepičky tenzometru. Během zvlhčení vzorku manometr zaznamenával kapilární tlak. Naopak během drenáže manometr ukazoval tlak matriční. Vztah mezi puklinou, maticí (hornina) a tenzometrem vede k hystereznímu chování

tlaku vody, i přesto že se u hydraulických vlastností pukliny ani u matrice nemusí toto chování projevit.

## 2.2 Půdní vzduch

Při studiu infiltrace a proudění vody v půdě se tradičně předpokládá, že vzdušná fáze v půdě má atmosférický tlak. V mnoha případech je tento předpoklad správný. Například při srážce s vysokou intenzitou, kdy vrstva půdy nasycená vodou ze srážky společně s kapilárními silami uvězní vzduch v půdě a brání mu, aby mohl probublávat. Tento vzduch má odlišný tlak než je tlak atmosférický. Vzduch uvězněný v půdě může zapříčinit snížení infiltrace nebo změnu preferenčního proudění. Pravděpodobnost, že vzduch zůstane v půdě uvězněn, se zvyšuje, pokud se v lokalitě vyskytuje mělká hladina podzemní vody nebo nepropustné vrstvy. Vzduch může být v půdě uvězněn také v důsledku kapilárních bariérových efektů (Sakaki et al., 2011).

Touma a Vauclin (1986) zkoumali na pískovém válci vztah mezi vodou a vzduchem v půdě. Válec byl uzpůsoben tak, aby podle potřeby mohl vzduch z válce volně unikat nebo aby zůstal uvězněný v půdě. Následným porovnáním numerického řešení, naměřenými hodnotami a jednofázového modelu zjistili, že proudění vzduchu může výrazně ovlivnit proudění vody.

Experiment Hagena a Gerkeho (2007) se zabývá měřením tlaku půdního vzduchu v půdách hnědouhelného dolu. V bývalém hnědouhelném lomu bylo naistalováno devět čidel tlaku půdního vzduchu v hloubce 80 cm. Tyto čidla tlaku půdního vzduchu byla doplněna o dvě řady tenzometrů v hloubce 70 cm a 90 cm. Na dvou čidlech byly pozorovány odchylky tlaku půdního vzduchu od tlaku atmosférického. Pouze v těchto dvou polohách byly naměřené nasycené nebo téměř nasycené vlhkostní podmínky. Po zohlednění teplotních efektů, bylo zjištěno, že kolísání tlaku půdního vzduchu během infiltrace souviselo s okolní tlakovou výškou. Výsledky tohoto experimentu ukazují, že proudění vody má lokální vliv na tlak půdního vzduchu.

Na rýžových polích v severním Senegalu bylo provedeno několik sérií měření infiltrace v plně nasycené půdě (Hammecker et al., 2003). Jednalo se o půdu, která je zavlažována výtopou. Hladina podzemní vody se nachází v malé hloubce. Ve stejném čase byla zaznamenávána tlaková výška z neuronových sond a z tenzometrů. Hodnoty stanovené

pomocí hydraulických gradientů a hodnoty stanovené měřením se lišily o několik řádů. Tyto výsledky ukazují, že vzduch zachycený mezi mělkou hladinou podzemní vody a čelem zvlhčení potlačuje infiltraci. Jednofázový model nemohl dobře tuto situaci popsat. Hladina podzemní vody v menších v hloubkách se nachází na místech, kde se zavláží výtopou. V těchto podmínkách je nutné počítat se zachyceným vzduchem v půdě.

Vliv uzavřeného vzduchu můžeme pozorovat i na hydraulické vodivosti. Hydraulická vodivost může být vlivem uzavřeného vzduchu snížena o 50 až 70 % (Schultze et al., 1999). Faybishenko (1995) proto zavedl termín kvazi-nasyčená hydraulická vodivost. Tento termín popisuje vztah mezi hydraulickou vodivostí a obsahu zachyceného vzduchu. Tato charakteristika, která se v čase mění, vyjadřuje schopnost půdy vést vodu při nulových nebo kladných tlakových výškách. Při testech na heterogenních vzorcích půdy Faybishenko zjistil, že kvazi-nasyčená hydraulická vodivost může být 5krát až 7krát nižší než hydraulická vodivost.

Geistlinger et al. (2014) zkoumal pomocí rentgenové tomografie tvar vzduchových bublin zachycených v půdě. Zjistil, že vzduch uvězněný v půdě se vyskytuje ve formě jedné bubliny, více bubliny nebo ve velkých propojených útvarech. Tyto velké sítě mohou tvořit téměř 50% z celého objemu zachyceného vzduchu v půdě. Podle této studie pouze 53% zachyceného vzduchu v půdě se vyskytuje ve formě jednotlivých bublin o průměru menším než maximální průměr zrna a splňují tak nezbytné podmínky pro aplikaci standardního kapilárního modelu.

Pro zjištění, kde se uvězněný půdní vzduch nejvíce v půdě vyskytuje, byl proveden experiment se vzorkem, který se skládal ze tří různých frakcí písku a který byl monitorován pomocí neuronové tomografie (Sněhota et al., 2015). Snímky ukázaly, že objem vody během jedné infiltrační události se v jemném písku zvýšil. Naopak v hrubém písku se obsah vody snížil a obsah vzduchu se zvýšil. V hrubém písku, který ve vzorku tvoří preferenční cesty, se vytvořily vzduchové bubliny, které byly vytlačeny z písku jemného. Důsledkem bylo snížení kvazi-nasyčené hydraulické vodivosti o 23% za stejné období. Tímto experimentem bylo dokázáno, že uvězněný vzduch se zachycuje především v preferenčních cestách proudění. Proto je vliv vzduchu významnější u půd s preferenčním prouděním.



Mizhari et al (2016) se zabýval jaký vliv má sklon povrchu na výskyt zachyceného půdního vzduchu. V případě vodorovného povrchu terénu (vzorku) stlačený vzduch může infiltraci snížit o 70-90%. U nakloněného povrchu se tento efekt snižuje a infiltrace se zvýší až o 50%. U nakloněného povrchu byla také pozorována jiná dynamika tlaku půdního vzduchu než u vodorovného povrchu. U vodorovného povrchu vzduch přerušovaně unikal, zatímco u nakloněného povrchu vzduch unikal plynule.

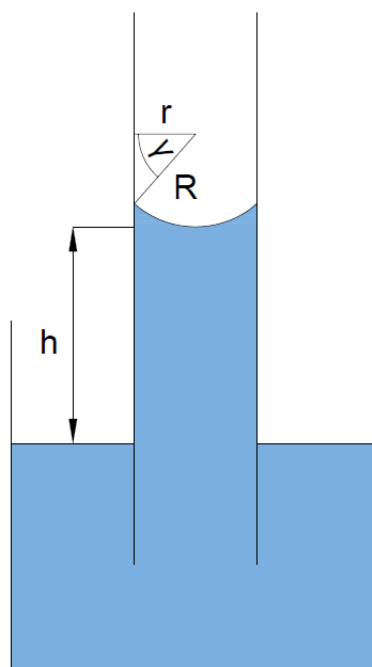
Výše uvedené experimenty dokázaly, jak může vzduch uvězněný v půdě ovlivňovat infiltraci. Při studii infiltrace je proto nutné zaměřit se i na vzdušnou fázi půdy. Jedním z nezbytných kroků pro objasnění chování vzduchu v téměř nasycených půdách je měření tlaku půdního vzduchu. Sakakiho (2011) cílem bylo zlepšit metody pro měření tlaku vzduchu v nasycené půdě a pochopit jakou hraje roli uvězněný vzduch při odvodnění. Experiment se skládal ze dvou částí. V první části byly vyzkoušeny materiály, ze kterých bude vyrobena čepička tenzometru pro měření tlaku půdního vzduchu. Zkoušeny byly materiály: porézní keramické čepičky, porézní čepičky z nerezové oceli a porézní skleněné disky, které jsou ošetřeny látkou na bázi fluoridu, který je dostatečně hydrofobní a nakonec netkaná PTFE. Test materiálů se zabýval úhlem smáčení, odezvou v měření a jaká je vstupní hodnota vody. Ošetřené porézní sklo a nerezová ocel odolávaly až do přetlaku 10 kPa. Porézní keramické čepičky ošetřené fluoridem odolávaly až do přetlaku 25 kPa a PTFE funguje do doby než je vystavena kladnému hydrostatickému tlaku (1-2 kPa a více).

Pro další fázi experimentu byly vybrány skleněné disky. Vzorek půdy, který byl použit, se skládal ze dvou frakcí písku. Hrubší písek se nacházel uprostřed dvou vrstev jemnějšího písku. Při následném odvodnění vzorku se vzduch dostal přes jemnější písek do hrubšího písku. Důsledkem bylo rychlé snížení tlaku. Při pokračování odvodnění dále klesala vlhkost vzorku, tlak vody i tlak půdního vzduchu až do hodnoty okolo 1kPa, kdy hodnota tlaku půdního vzduchu náhle vzrostla na atmosférický tlak. V tento okamžik se dříve zachycený vzduch znovu spojil s atmosférou.

### 3. Teorie

#### 3.1 Kapilární tlak

Kapilarita pochází z názvu úzkých trubic: kapilár, na kterých je tento jev nejlépe pozorovatelný. Při ponoření kapiláry do široké nádoby s kapalinou, nastanou dva případy. U prvního případu kapalina začne v kapiláře vzlínat a v kapiláře se vytvoří konkávní zakřivení povrchu kapaliny. Tomuto jevu se říká kapilární elevace. U druhého případu má povrch kapaliny v kapiláře konvexní tvar a hladina se nachází níže než je hladina v nádobě. Tomuto jevu říkáme kapilární deprese. Oba kapilární jevy nazýváme kapilaritou, která úzce souvisí s povrchovým napětím. Povrchové napětí je výsledkem kohezivních sil atomů či molekul kapaliny. Uvnitř kapaliny se tyto síly uvnitř kapaliny vyruší, na povrchu kapaliny však zůstává již zmiňované napětí.



Obrázek 1: Kapilára ponořená do nádoby s kapalinou (upraveno Hiller, 1998)

Kapilární tlak  $p_\sigma$  je určen poloměrem zakřivení povrchu kapaliny  $R$ . Vnitřní tlak pod zakřiveným povrchem kapaliny je menší nebo větší než tlak na povrchu kapaliny v nádobě a to právě o velikost kapilárního tlaku.

$$p_\sigma = \frac{2\sigma}{R}$$

$$R = \frac{r}{\cos\gamma}$$

kde  $p_\sigma$  ... kapilární tlak

$\sigma$  ... povrchové napětí

$R$  ... poloměr zakřivení

$r$  ... poloměr kapiláry

$\gamma$  ... úhel smáčení

### 3.2 Potenciál půdní vody a jeho složky

Potenciál je práce na jednotku množství, která je potřebná k přenesení čisté vody z místa se standardním stavem do daného místa v půdě. Pohyb vody v půdě je způsoben rozdílem potenciálů mezi různými místy v půdním prostředí. Tento rozdíl určuje směr a dynamiku proudění vody v půdě.

Potenciál může být vyjádřen jako:

- energie na jednotkovou hmotnost  $\varphi$  – jednotkou je J/kg
- energie na jednotkový objem  $\psi, p$  – jednotkou je Pa = N/m<sup>2</sup> pro tuto jednotku se používá termín tlak
- energie na jednotkovou tíhu  $h$  – jednotkou jsou jednotky délky nejčastěji cm; pro toto vyjádření potenciálu se také používá termín tlaková výška

Potenciál můžeme rozdělit na jednotlivé složky. Celkový potenciál je součet všech dílčích složek:

$$\phi = \varphi_g + \varphi_w + \varphi_a + \varphi_e + \varphi_o$$

kde  $\phi$  ... celkový potenciál

$\varphi_g$  ... gravitační potenciál

$\varphi_w$  ... matriční potenciál

$\varphi_a$  ... pneumatický potenciál

$\varphi_e$  ... zátěžový potenciál

$\varphi_o$  ... osmotický potenciál

**Matriční potenciál**  $\varphi_w$  zahrnuje působení rozdílných vlhkostí neboli matričních sil, proto se také nazývá matričním potenciálem.

**Pneumatický potenciál**  $\varphi_a$  zahrnuje vliv tlaku v půdě, který může být jiný, než je tlak atmosférický.

**Gravitační potenciál**  $\varphi_g$  zahrnuje vliv gravitační síly na vodu.

**Zátěžový potenciál**  $\varphi_e$  zahrnuje vliv zeminy, kterou je voda v půdě stlačována.

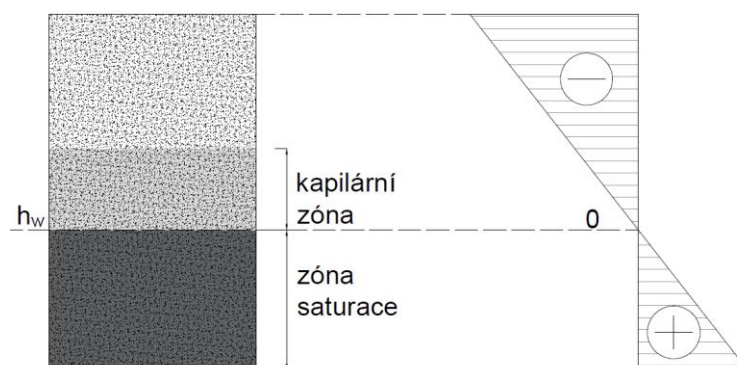
**Osmotický potenciál**  $\varphi_o$  zahrnuje vliv rozpuštěných látek.

Nejdůležitějšími a největšími složkami pro výpočet potenciálu půdní vody je potenciál gravitační a matriční. Pneumatický, zátěžový a osmotický potenciál může být za určitých podmínek ve výpočtu celkového potenciálu zanedbán.

### 3.2.1 Matriční potenciál

Vlhkostní nebo také tlakový potenciál je kombinací kapilárních a adsorpčních sil v půdním prostředí. Vlhkostní potenciál se nejčastěji udává v *cm* nebo *Pa*.

Pro stanovení matričního potenciálu je důležité si zvolit referenční hladinu  $h_w$ . Nejčastěji je za referenční hladinu zvolena hladina podzemní vody. Tato hladina má nulový vlhkostní potenciál. Systém je na této hladině v rovnováze. Nad touto hladinou se nachází nenasycená zóna a v důsledku působení kapilárních sil nabírá vlhkostní potenciál v nenasycené zóně záporných hodnot. Pod hladinou podzemní vody (zóna saturace) přestávají kapilární síly působit a vlhkostní potenciál začne nabývat kladných hodnot. Matriční složku půdního potenciálu měříme tenzometrem.



Obrázek 2: Tlaková výška a zvolení referenční hladiny (upraveno Hillel, 1998)

### 3.2.2 Pneumatický potenciál

Tlak okolního vzduchu může ovlivňovat potenciál půdní vody. Pneumatický potenciál je definovaný jako změna potenciální energie na jednotku objemu (hmotnosti) vody, když se tlak vzduchu změní ze standardního stavu (standardní atmosférický tlak). Tento potenciál bývá často zanedbáván vzhledem k tomu, že atmosférický tlak je většinou konstantní.

### 3.2.3 Tenzometrický potenciál

Tenzometrický potenciál je potenciál, který měří tenzometr. Jedná se o tři složky z celkového potenciálu:

$$\varphi_w + \varphi_a + \varphi_e$$

kde  $\varphi_w$  ... matriční potenciál

$\varphi_a$  ... pneumatický potenciál

$\varphi_e$  ... zátěžový potenciál

V praxi se pneumatická a zátěžová složka zanedbává a uvažuje se, že tenzometr měří pouze matriční potenciál. Pro výpočet celkového potenciálu je potřeba k tenzometrem naměřenému matričnímu potenciálu přičíst ještě gravitační složku. Pro větší praktičnost je celkový potenciál vyjádřen ve výškovém tvaru [m]:

$$H = h + z$$

kde  $H$  ... celkový potenciál

$h$  ... tlaková výška

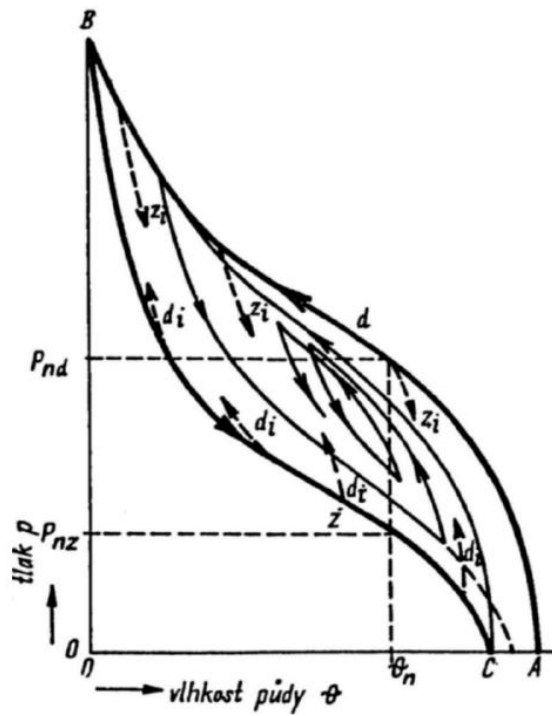
$z$  ... výška nad srovnávací hladinou

### 3.3 Retenční čára a hystereze

Retenční čára je charakteristika, která zobrazuje rovnovážný stav mezi tlakovou výškou (vlhkostním potenciálem  $\varphi_w$ ) a objemovou vlhkostí půdy  $\theta$ .

U plně nasyceného vzorku půdy při snižování tlakové výšky zůstává vzorek plně nasycen až do doby, kdy tlaková výška klesne na vstupní hodnotu vzduchu. Při této hodnotě se začnou drénovat největší póry. Při dalším snižování tlakové výšky se začnou odvodňovat i póry menší až po ty nejmenší. Se snižováním tlakové výšky se snižuje i objemová vlhkost.

Při měření retenční křivky při drénování vzorku získáme drenážní větev retenční čáry. Při zpětném zvlhčení půdy získáme větev zvlhčení. Rozdíl mezi těmito dvěma křivkami se nazývá hystereze. Drenážní křivka a křivka zvlhčení tvoří tzv. obalový prostor. Z libovolného bodu při zvlhčování může nastat drenáž a naopak. Jedná se o přechodové větve retenční čáry (tzn. přírodní procesy).



**Obrázek 3: Ukázka retenční čáry (upraveno Jury,2004)**

Na obrázku 3 je znázorněna z bodu A do bodu B drenážní větev a zvlhčovací větev vede z bodu B do bodu C. Rozdíl mezi body A a C vniká při zpětném nasycení půdy, kdy v některých pórech zůstává zachycený vzduch, a proto nemůže být půda zpětně půda plně nasycena.

Veškerá teorie byla čerpána z prací Hillera 1998; Warricka,2002 a Juryho 2004.

## 4. Čidla na měření tlaku půdního vzduchu

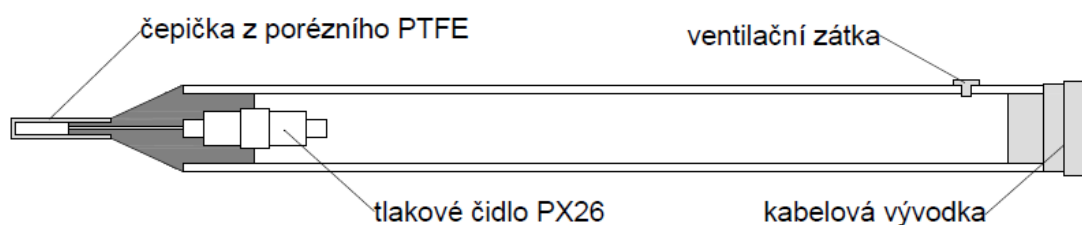
Tato kapitola představuje čidla tlaku půdního vzduchu. V kapitole je popsáno čidlo, princip jeho fungování, experiment, který byl s čidlem proveden a nakonec výsledky s diskuzí.

### 4.1 Popis čidla

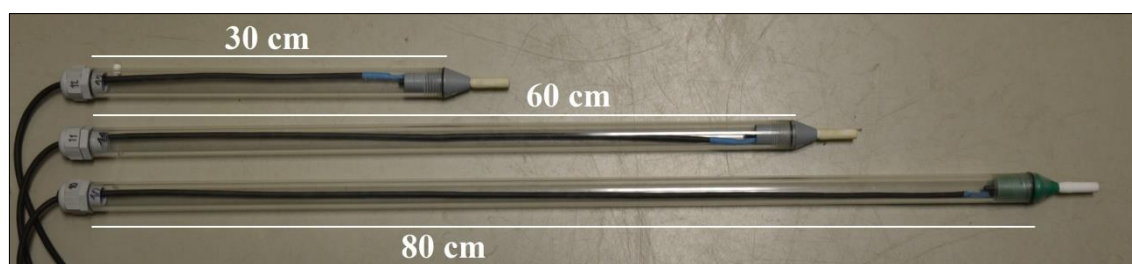
Zařízení na měření tlaku půdního vzduchu bylo vyvinuto na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakultě stavební, ČVUT v Praze. Tělo zařízení se skládá z plexiskla (viz obr. 4). V horní části těla se nachází ventilační zátka a kabelová vývodka. Čidlo na měření tlaku (PX26, Omega Engineering) je umístěno v dolní části zařízení. Tlakové čidlo je propojeno s dutinkou čepičky, která je z porézního PTFE materiálu – polytetrafluoretylen. Tento materiál je propustný pro vzduch, takže tlak vzduchu v půdním prostředí je v rovnovážném stavu s tlakem vzduchu uvnitř čepičky. Pro možnou instalaci v různých hloubkách byla vyrobena čidla se třemi různými délkami těla. Označení a délka jednotlivých čidel je zaznamenána v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Označení a délka čidel tlaku půdního vzduchu

Označení čidla	PA(1)	PA(2)	PA(3)
Délka čidla (cm)	30	60	80



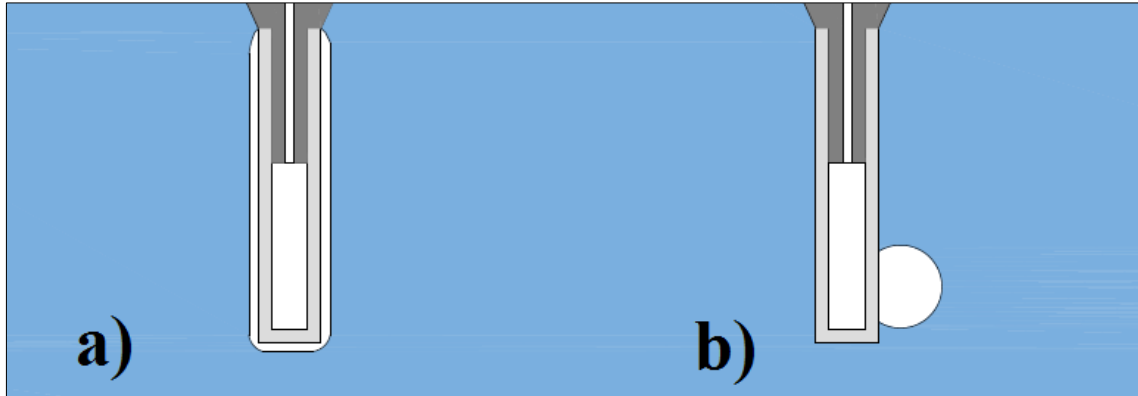
Obrázek 4: Schéma čidla na měření tlaku půdního vzduchu



Obrázek 5: Zařízení na měření tlaku půdního vzduchu s vyznačením délek jednotlivých zařízení

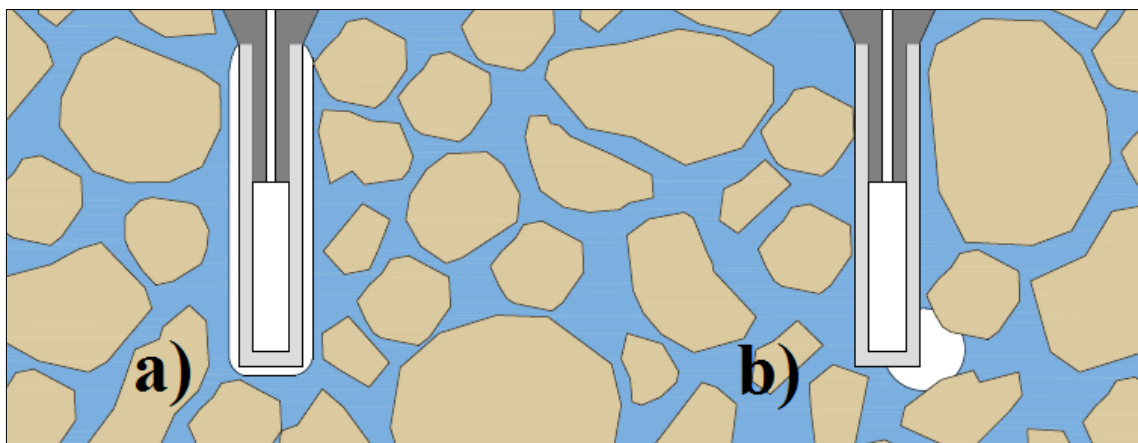
#### 4.1.1 Princip funkce čidla tlaku půdního vzduchu

Čepička zařízení je vyrobena z porézního PTFE. Protože je PTFE pro vodu nesmáčivý, voda se přes čepičku z porézního teflonu nedostane, pro vzduch je však tento materiál propustný. Při instalaci do půdního prostředí pak tlakové čidlo měří tlak půdního vzduchu.



**Obrázek 6: Čidlo tlaku půdního vzduchu ponořené ve vodě a) čepička obalená vzdušným filmem, b) čepička v kontaktu se vzduchovou bublinou**

Při měření tlaku vzduchu mohou nastat dvě situace. V prvním případě (viz obr. 6a) kolem čepičky se vytvoří vzduchový film, a čidlo tlaku půdního vzduchu měří tlak vody, který se přes vzduchový film přenáší k tlakovému čidlu. Ve druhém případě (viz obr. 6b) je čidlo tlaku půdního vzduchu v kontaktu se vzduchovou bublinou a měří přes čepičku tlak vzduchu uvnitř této vzduchové bubliny.



**Obrázek 7: Čidlo tlaku půdního vzduchu instalované v půdě a) čepička obalená vzdušným filmem, b) čepička v kontaktu se vzduchovou bublinou**

Při měření tlaku půdního vzduchu v půdě nastávají stejné dvě odlišné situace. V první situaci (viz obr. 7a) se opět kolem čepičky čidla vytvořil vzduchový film. Čidlo tlaku půdního vzduchu měří tlak vody. U druhé situace (viz obr. 7b) čidlo tlaku půdního vzduchu měří tlak vzduchové bubliny (nebo i bublin), se kterou je v kontaktu.

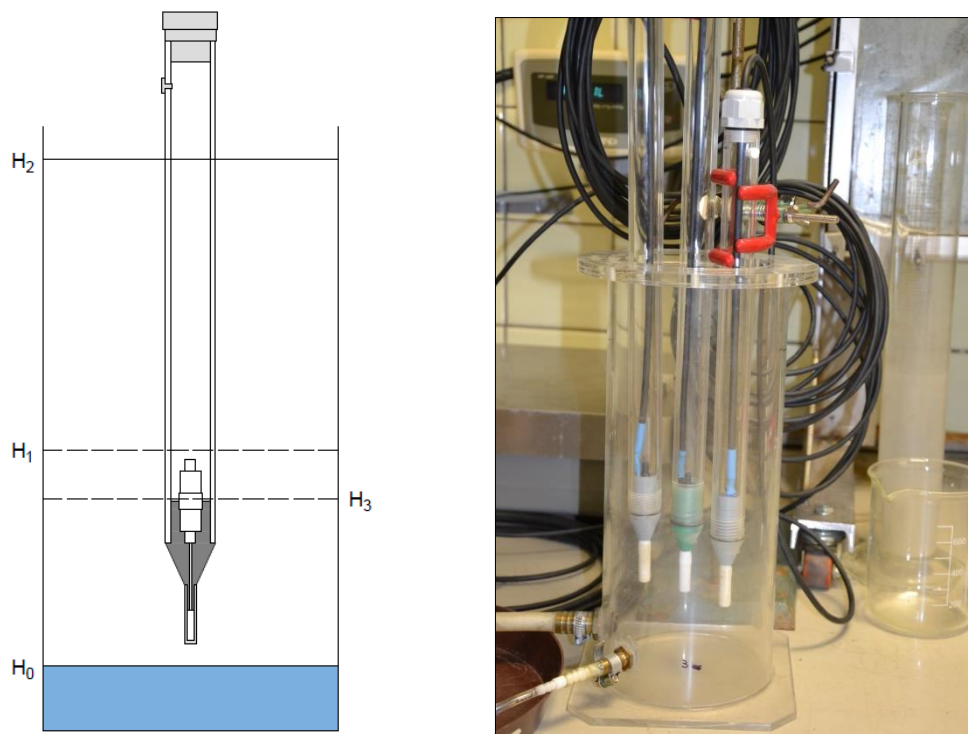


## 4.2 Zkouška čidel tlaku půdního vzduchu

Níže popsaná zkouška simuluje podmínky pod hladinou podzemní vody. Cílem zkoušky je zjistit, zda tlak vody, který působí na čidlo a zcela obklopuje jeho porézní čepičku, neovlivňuje měření tlaku vzduchu a pokud ovlivňuje tak jakým způsobem.

Experiment byl prováděn se třemi čidly na měření tlaku vzduchu a nádobou, ve které se v čase měnila hladina vody. Čidlo bylo umístěno do nádoby nad počáteční hladinu vody  $H_0$  (viz obr. 8). Po ustálení měření byla hladina vody navýšena na hladinu  $H_1$ . Měření na této hladině bylo ponecháno po dobu 2 hodin. Poté byla hladina vody navýšena na hladinu  $H_2$  a měření znovu probíhala 2 hodiny. Po dvou hodinách byla pomocí ventilu umístěného na dně nádoby hladina vody snížena na hladinu  $H_3$ . Měření na této hladině probíhalo přibližně dvě hodiny a poté byla hladina naposled snížena na počáteční hladinu  $H_0$ . Experiment končí po ustálení měření.

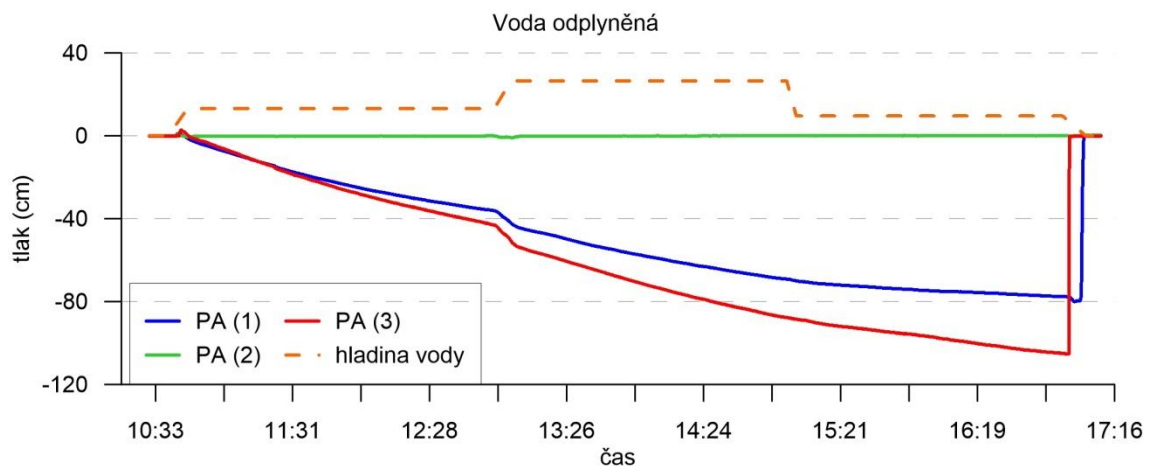
Výše popsaný experiment byl třikrát zopakován. První pokus byl uskutečněn s odplyněnou vodou. Voda byla zbavena plynné fáze pomocí podtlaku. U druhého pokusu byla použita voda, která je odstátá 24 hodin v prostředí laboratoře. U třetího pokusu byla také použita voda odstátá. Měření třetího pokusu trvalo ale 9 dní a hladina vody je navýšena z hladiny  $H_0$  na hladinu  $H_2$  a po devíti dnech snížena z hladiny  $H_2$  na hladinu  $H_0$ . Na všechny pokusy byla použita voda destilovaná.



Obrázek 8: Schéma zkoušky čidla tlaku půdního vzduchu a fotografie před zahájením experimentu

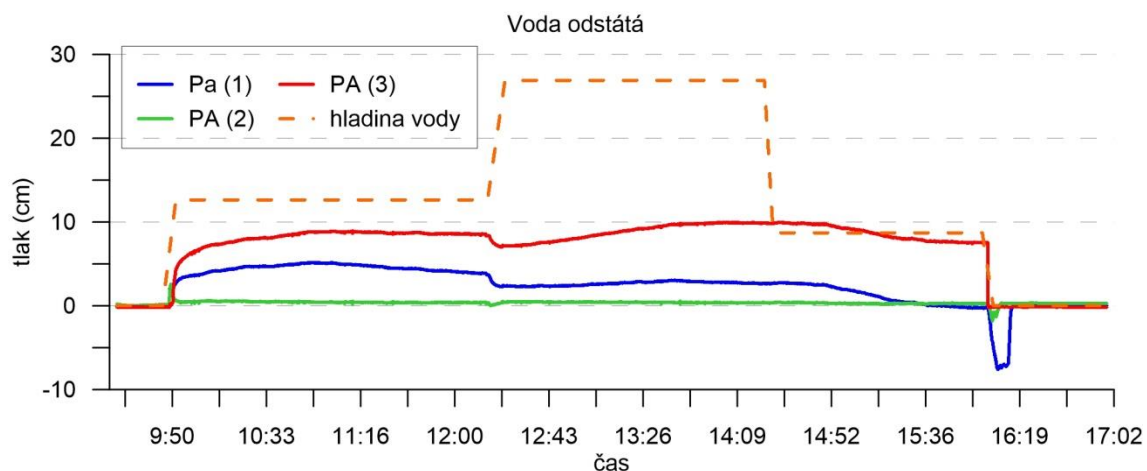
### 4.3 Výsledky zkoušky čidel tlaku půdního vzduchu

Z obrázku č. 9 je patrné, že čidlo s označením PA(2) nereaguje na žádnou změnu hladiny. Po celou dobu experimentu měří atmosférický tlak. U čidel PA(1) a PA(3) probíhá při změně hladiny vody z 0 cm na 13 cm malé zvýšení tlaku vzduchu, poté však tlak vzduchu začne klesat. U zvýšení hladiny vody z 13 cm na 26 cm tlak vzduchu u obou čidel tlaku půdního vzduchu klesne rychleji a poté pokračuje v poklesu jako před změnou hladiny. Při snížení hladiny z 26 cm na 10 cm se u čidla PA(1) pokles tlaku vzduchu zpomalí. Při snížení hladiny zpět na počáteční hladinu nula tlak vzduchu u obou čidel rychle stoupá, než dosáhne tlaku atmosférického. U čidla PA(3) toto stoupání nastává již během snižování hladiny u čidla PA(1) se začne tlak vzduchu vyrovnávat s atmosférou, v době kdy už čidlo není v kontaktu s vodou. Tlak vzduchu nabývá záporných hodnot, protože parciální tlak vzduchu v odplyněné vodě je menší než atmosférický.



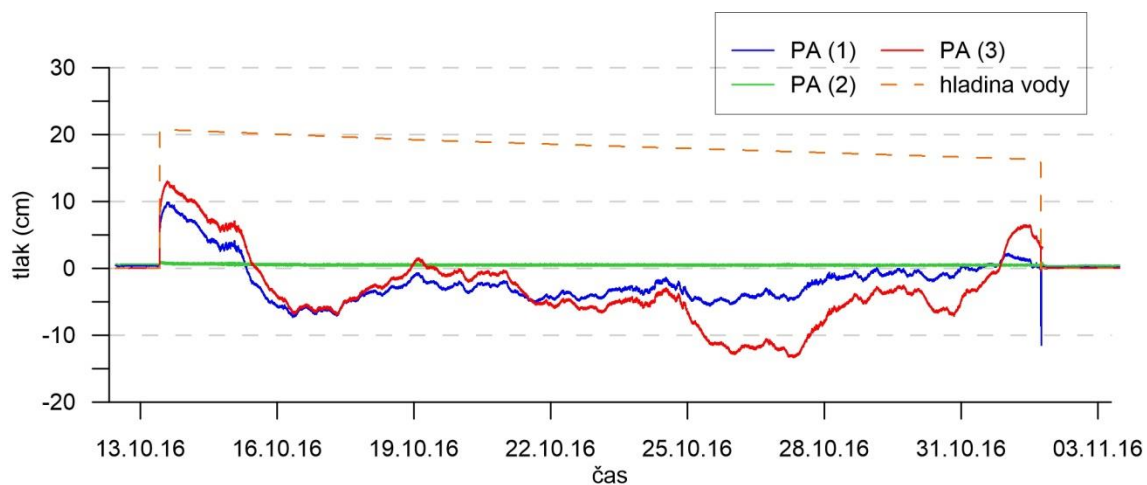
Obrázek 9: Graf tlaku vzduchu a hladiny vody během experimentu s odplyněnou vodou

I u experimentu s odstátou vodou (viz obr. 10) čidlo PA(2) stále měří pouze atmosférický tlak. Na rozdíl od odplyněné vody u vody, která byla odstátá 24 hodin, má parciální tlak vzduchu ve vodě větší velikost než je tlak atmosférický. Při zvýšení hladiny z 0 cm na 13 cm začne tlak vzduchu stoupat. Při dalším zvýšení hladiny vody z 13 cm na 26 stejně jako u experimentu s odplyněnou vodou tlak na krátkou dobu prudce klesne a dále pokračuje ve dřívějším trendu stoupání tlaku vzduchu. Snížení hladiny vzestup tlaku vzduchu zpomalí a při snížení hladiny vody na počáteční hladinu nula se tlak vzduchu vyrovná s tlakem atmosférickým. U čidla PA(1) při snížení hladiny vody na počáteční hladinu nula nastává rychlý pokles a zpětné rychlé stoupání tlaku, které může být způsobeno povrchovým napětím vody.



**Obrázek 10: Graf tlaku vzduchu a hladiny vody během experimentu s vodou odstátou 24 hodin, krátká epizoda**

Další experiment (viz obr. 11) se od předchozích liší délkou trvání, která byla 9 dní. Stejně jako u předchozích dvou experimentů i v tomto případě čidlo PA(2) neměřilo jiný tlak než tlak atmosférický. Čidla PA(1) a PA(3) se v první fázi experimentu chovají stejně jako u předchozího pokusu. Po přibližně dvou dnech začne tlak vzduchu klesat a poté v nepravidelných intervalech znovu tlak vzduchu stoupá a klesá. Po devíti dnech při snížení hladiny na počáteční hladinu nula, se čidla dostanou do kontaktu s atmosférou a získají zpět atmosférický tlak.



**Obrázek 11: Graf tlaku vzduchu a hladiny vody během experimentu s vodou odstátou 24 hodin, dlouhý experiment**

U všech experimentů po snížení hladiny na počáteční hladinu nula, čidla opět měří hodnotu atmosférického tlaku, čímž bylo prokázáno, že u čidel nedošlo ke změně nulového čtení.

#### 4.4 Diskuze

V případě experimentu s částečně odplyněnou vodou při ponoření čidla tlaku půdního vzduchu do vody hodnoty tlaku vzduchu nabývají záporných hodnot. V tomto případě byl parciální tlak ve vodě nižší než atmosférický tlak. U experimentu s odstátou vodou byly ve stejném případě zaznamenány kladné hodnoty tlaku vzduchu. Parciální tlak vzduchu ve vodě byl větší než atmosférický tlak nebo se na čepičce nacházel vzduchový film, který přenesl tlak vody k tlakovému čidlu.

Experiment prokázal, že čidla jsou do jisté míry ovlivněna změnou tlakové výšky vody. Především při zatopení čidel nastává prudký nárůst tlaku vzduchu. U krátkých experimentů je zřejmé, že náhlé zvýšení tlakové výšky (hladiny vody), způsobí na krátkou dobu rychlý pokles tlaku vzduchu, na rozdíl od snížení tlakové výšky, které měření tlaku vzduchu nikterak neovlivní. Ani u dlouhého experimentu pomalé snižování tlakové výšky neovlivňuje měření tlaku vzduchu. Zpomalení poklesu tlaku vzduchu v případě odplyněné vody a pokles tlaku vzduchu u odstáté vody je způsobeno snížením tlaku vzduchu, na který snížením hladiny vody působí menší tlaková výška.

Pro zjištění jestli čidlo PA(2) reaguje na změnu tlaku vzduchu, byl proveden s čidlem pokus mimo vodní prostředí. Čidlo tlaku půdního vzduchu bylo vystaveno podtlaku i přetlaku o hodnotách od -50 cm do 50 cm. Poprvé bez teflonové čepičky podruhé s teflonovou čepičkou. Čidlo reagovalo na změnu tlaku vzduchu v obou případech. Proto byl zopakován experiment s ponořením pod hladinu vody, opět se stejným výsledkem.

## 5. Terénní měření

Tato kapitola se zabývá analýzou dat naměřených v terénu na třech různých lokalitách v České republice. Jedná se o lokality: Šumava – Roklan, Jizerské hory – Uhlířská a Nučice. Na všech těchto lokalitách jsou naistalována čidla tlaku půdního vzduchu vyvinuta na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství, ČVUT v Praze.

Pro zjištění bližších souvislostí mezi vodní a vzdušnou fází v půdním prostředí, byla data z čidel tlaku půdního vzduchu porovnána s daty z tenzometrů, vlhkostních čidel a se srážkami naměřenými v dané lokalitě. U každé lokality se nachází stručný popis dané oblasti, přístroje, které jsou na dané lokalitě naistalovány, data, která jsou k dispozici a metody, kterými byla data zpracována. Na konci kapitoly jsou diskutovány výsledky analýz ze všech lokalit.

### 5.1 Šumava – Roklan

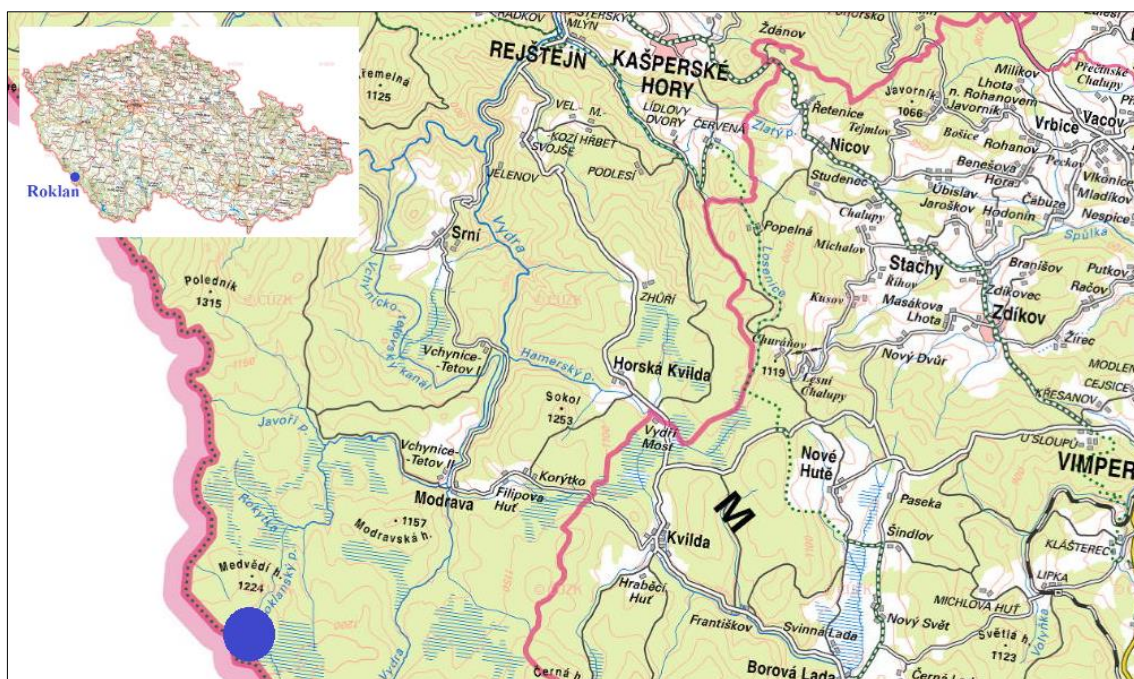
#### 5.1.1 Charakteristika lokality

Experimentální povodí Roklan (Tesař et al, 2008) se nachází v Národním parku Šumava poblíž státních hranic se Spolkovou republikou Německo (viz obr. 12). Roklanský potok je hlavním přítokem řeky Vydry. V povodí Vydry 12,7% plochy povodí řeky Vydry je tvořeno rašeliništními a zrašeliněnými půdami. Průměrná roční teplota 3°C patří k nejnižším na Šumavě. Průměrné roční srážky se pohybují okolo 1100 mm. Nadmořská výška povodí se pohybuje od 1050 m n. m. do 1100 m n. m. Povodí Roklanského potoka je pokryto odumřelým smrkovým porostem. Půda je zaříděná jako kyselá hnědozem a půdní druh podle zařídění dle Nováka je hlinitopísčité až písčitohlinitý. Za hydraulické charakteristiky jsou v tabulce č. 2 uvedeny parametry retenční čáry podle van Genuchtenovy funkce.

Tabulka 2: Parametry retenčních čar dle van Genuchtenovy funkce (převzato: Čejková, 2013)

Hloubka (cm)	15	30	45	60
$\alpha$	0,11	0,03	0,04	0,07
$\theta_r$	0,16	0,00	0,16	0,00
$\theta_s$	0,55	0,48	0,48	0,45
$n$	1,27	1,13	1,23	1,11
$m$	0,21	0,12	0,19	0,10





Obrázek 12: Poloha experimentální povodí Roklan (upraveno @ ČÚZK, 2016)

### 5.1.2 Materiál

Stanoviště s experimentálním měřením na Roklanu bylo zprovozněno v roce 2011. Od tohoto roku se zde měří tlakové výšky, objemové vlhkosti v půdě, srážky, rychlost větru, přízemní teplota a teplota vzduchu ve výšce 2 m. Od roku 2015 jsou na lokalitě Roklan naistalována i tři čidla tlaku půdního vzduchu ve třech různých hloubkách. (popis čidla viz kapitola 4.1). Dále jsou na lokalitě naistalovány tenzometry UMS T8 (viz obr. 13), vlhkostní čidla typu TDR 100, váhový srážkoměr, anemometr a teplotní čidla.

Data, která byla použita pro analýzu, pocházejí z osmi tenzometrů a osmi vlhkostních čidel nainstalovaných v osmi různých hloubkách. Interval mezi jednotlivými záznamy měření je u každého zařízení 15 minut. Označení všech čidel a hloubky, ve kterých jsou čidla naistalována, jsou uvedeny v tabulce č. 3.



Obrázek 13: Tenzometr UMS T8 (převzato 5. 1. 2017 z <http://www.ums-muc.de/en/>)

**Tabulka 3: Označení a hloubka tenzometrů, čidel tlaku půdního vzduchu a vlhkostních čidel**

Označení tenzometru	Hloubka (cm)	Označení vlhkostního čidla	Hloubka (cm)	Označení čidla tlaku vzduchu	Hloubka (cm)
P T8(1)	24	TDR 1	10	PA(1)	15,9
P T8(2)	20	TDR 2	20	PA(2)	36,4
P T8(3)	25	TDR 3	30	PA(3)	54,1
P T8(4)	49	TDR 4	40		
P T8(5)	36	TDR 5	50		
P T8(6)	45	TDR 6	60		
P T8(7)	50	TDR 7	70		
P T8(8)	71	TDR 8	80		

Celkové analyzované období naměřených dat na lokalitě Roklan je od 4. 6. 2016 do 21. 7. 2016. Tento časových interval byl podle srážek a událostí naměřených čidly tlaku půdního vzduchu rozdělen na šest menších časových intervalů, a to z důvodu větší přehlednosti a lepší orientace v grafech.

Čidlo s označením PA(3) nenaměřilo žádnou událost za celé sledované období, a proto je z analýzy vyjmut. Celkové srážky za celé analyzované období jsou 688, 4 mm.

Označení časových intervalů:

1) 4. červen – 4. srpen 2015

Jedná se o letní období, ve kterém se vyskytlo sedm srážkových událostí. Záznamy o změně tlaku půdního vzduchu oproti atmosférickému zaznamenaly čidla PA(1) a PA(2).

2) 7. září – 12. září 2015

Tento podzimní časový interval je nejkratší, a během jeho trvání, se vyskytla pouze jedna srážková událost. Čidlo PA(2) zaznamenalo jednu událost a čidlo PA(1) neznamenalo za toto období změnu oproti atmosférickému tlaku.

3) 6. říjen – 31. říjen 2015

Tento interval se také odehrává na podzim, a pouze čidlo PA(2) zaznamenalo změnu tlaku půdního vzduchu. Výrazné srážky se za toto období objevily dvakrát.

4) 11. listopad – 29. prosinec 2015

V tomto zimní období, kdy se objevují nízké a protože se na lokalitě nachází nevyhříváný srážkoměr, nebyly srážky za toto období zaznamenány. Čidlo PA(2)

vykazuje od prosince 2015 chybné měření, proto bylo z analýzy vyjmuto a analýza dále probíhá pouze s čidlem PA(1)

5) 24. leden – 29. únor 2016

Ani u tohoto intervalu nebyly naměřené srážky z výše uvedeného důvodu. Stále je jedná o zimní období.

Pro popsání procesů vzdušné fáze je důležité k čidlům tlaku půdního vzduchu vybrat tenzometry a vlhkostní čidla ve stejné hloubce jako jsou čidla tlaku půdního vzduchu, protože v každé hloubce je odlišná vlhkost a odlišná tlaková výška. Pokud se tenzometr nebo vlhkostní čidlo nenachází ve stejné hloubce, jsou vybrány ty, které jsou k čidlům tlaku půdního vzduchu nejbližší.

V tabulce č. 4 jsou uvedena čidla tlaku půdního vzduchu, vlhkostní čidla a tenzometry, které byly v analýze použity a v jakých časových intervalech byly analyzovány.

**Tabulka 4: Čidla tlaku vzduchu a k nim přiřazené tenzometry, vlhkostní čidla a časové intervaly**

<b>Hloubka (cm); podle čidla tlaku vzduchu</b>	<b>Tenzometr</b>	<b>Čidlo tlaku vzduchu</b>	<b>Vlhkostní čidlo</b>	<b>Označení intervalu</b>
15,9	P T8(2)	PA(1)	TDR2	1, 4, 5
36,4	P T8(5)	PA(2)	TDR 4	1, 2, 3

### **5.1.3 Metody**

Analýza obsahuje histogram tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu. Naměřené hodnoty obou veličin v daném časovém intervalu jsou rozděleny do jednotlivých tříd. Histogram zobrazuje jaké je procentuální zastoupení hodnot, které spadají do daných tříd. Pomocí histogramu tak můžeme zjistit, v jakých hodnotách se tlaková výška a tlak půdního vzduchu nejčastěji pohybují. Dále analýza obsahuje časový vývoj tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu se srážkami. Z tohoto grafu lze vyčíst reakci tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu srážkové události.

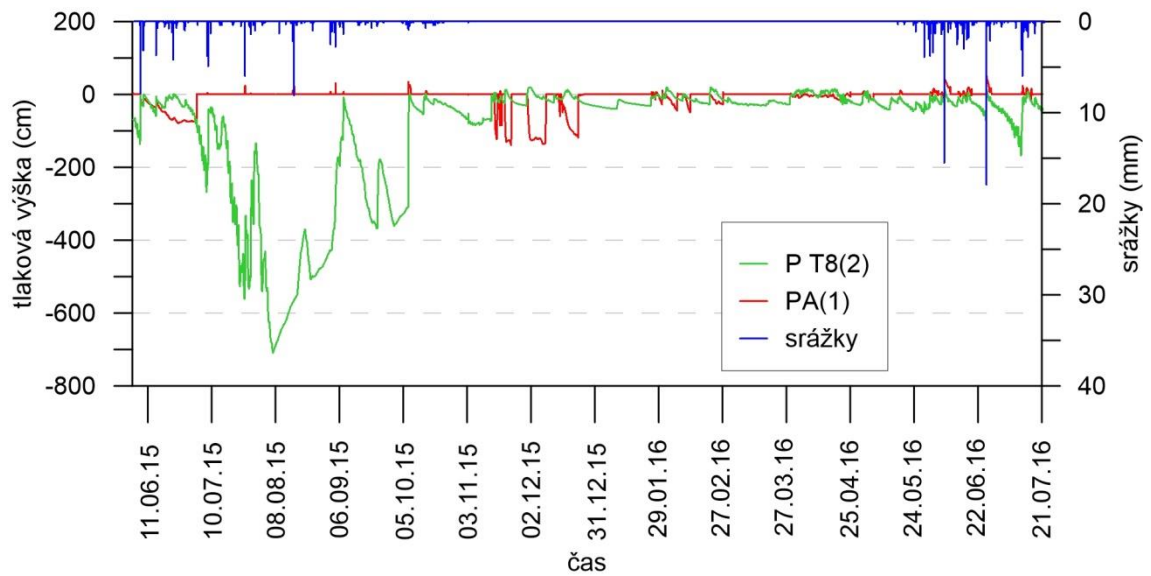
Analýza se také zabývá závislostí tlaku půdního vzduchu na tlakové výšce při drenáži a zvlhčení půdy. Pro zjištění zda probíhal v půdě proces zvlhčení či drénování byl použit klouzavý průměr z 21 hodnot tlakové výšky (u celého sledovaného období se jedná o klouzavý průměr z 31 hodnot). Ze dvou po sobě následujících zprůměrovaných hodnot byl udělán rozdíl. Pokud je rozdíl těchto hodnot větší než nula jedná se o drenáž a pokud je rozdíl menší než nula jedná se o zvlhčení půdy.



Dynamika tlaku půdního vzduchu obsahuje histogramy změny tlaku půdního vzduchu  $\Delta p_a/\Delta t$  a změny tlakové výšky  $\Delta p/\Delta t$ . Tyto histogramy zobrazují procentuální zastoupení hodnot změn tlaku, které spadají do jednotlivých tříd. Hodnoty změn obou veličin byly získány z rozdílů zprůměrovaných hodnot tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky. Změny jsou vyjádřené v *cm/hod*, proto je nutné získaný rozdíl podělit časovým intervalem ve kterém byly naměřeny (v tomto případě 15/60).

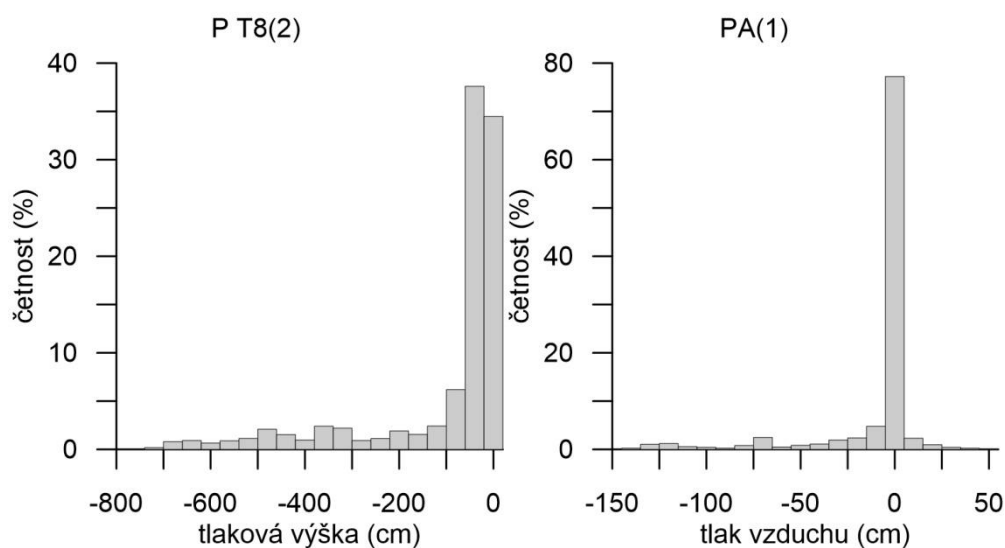
Dále analýza obsahuje změnu tlaku půdního vzduchu v závislosti na čase, kde můžeme pozorovat časový vývoj změn tlaku půdního vzduchu. Grafy změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti a v na tlaku půdního vzduchu, ukazuje, jaká změna nastala při daném tlaku půdního vzduchu. Všechny tyto analýzy byly provedeny i pro změnu tlakové výšky. V neposlední řadě je porovnaná změna tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky. Ve všech grafech týkajících se dynamiky tlaku půdního vzduchu bylo pro lepší čitelnost a přehlednost na ose y použito logaritmické měřítko. Změny tlaku vzduchu jsou kvůli logaritmickému měřítku rozděleny na kladné a záporné hodnoty. Změny o hodnotě nula jsou zahrnuty v kladných hodnotách.

#### 5.1.4 Analýza dat za období 4. 6. 2015 – 21. 7. 2016 pro hloubku 15,9 cm



**Obrázek 14: Graf tlakové výšky vody a tlak půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm a srážky za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016**

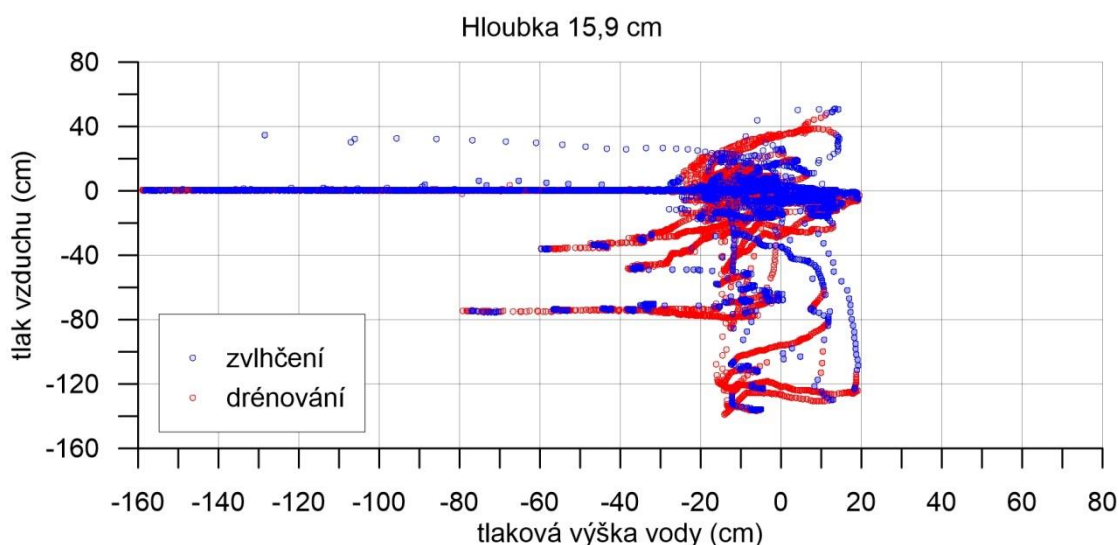
Z obr. 14 vyplývá, že nejvíce změn tlaku půdního vzduchu můžeme pozorovat v zimních měsících. V tomto ročním období se na povrchu půdy může nacházet sněhová pokrývka, která roztává a znovu zamrzá. Vzduch zůstává v půdě vlivem vrstvy ledu nebo vrstvou vody z roztátého sněhu ze shora v půdě uvězněn. V tomto období také probíhají největší změny tlaku vzduchu. U tlakové výšky vody největší rozdíly pozorujeme během podzimních měsíců v roce 2015. V tomto období má také tlaková výška maximální velikost.



**Obrázek 15: Histogram tlakové výšky vody a tlaku vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016**

Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 15 vody jsou po 40 cm. Maximální hodnota tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za celé období má velikost 19,5 cm. Naopak minimální hodnota je -708,8 cm. Nejvíce hodnot (cca 60%) tlakové výšky vody se nachází v intervalu od -60 cm do 0 cm. Všechny ostatní hodnoty se pohybují v záporných hodnotách.

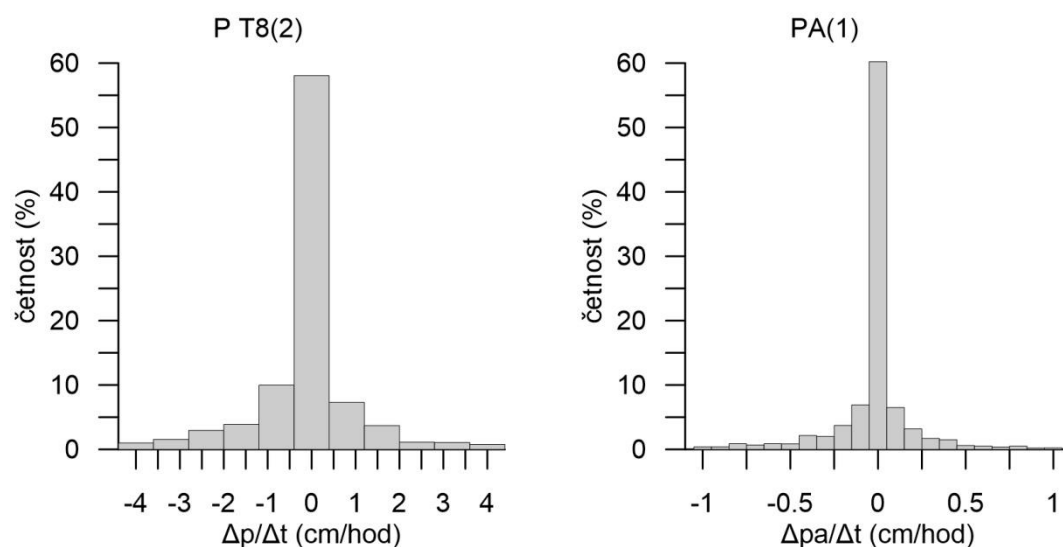
Na obrázku 15 jsou třídy u histogramu tlaku vzduchu rozděleny po 10 cm. Maximální hodnota tlaku půdního vzduchu naměřená v hloubce 15,9 cm za celé analyzované období má velikost 51,18 cm a minimální hodnota má velikost -138,8 cm. Nejvíce hodnot se nachází v intervalu od -5 cm do 5 cm. Relativní četnost této třídy je 80%. V tomto intervalu se nachází především nulové hodnoty tlaku, které představují atmosférický tlak. Po převážnou většinu času je tlak půdního vzduchu v kontaktu s atmosférou a proto má i její tlak. Interval od -5 cm do 5 cm má vysokou relativní četnost, právě protože obsahuje tlaky půdního vzduchu rovnající se nule. Zbylých 20% se nachází především v záporných hodnotách. Kladné hodnoty představují 3% ze všech naměřených hodnot tlaku půdního vzduchu.



**Obrázek 16: Graf tlak půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody při zvlhčení a drenáži půdy**

Z obr. 16 je patrné že, tlakové výšky vody o hodnotách -60 cm a -80 cm určují hranici pro pokles tlaku vzduchu. Po dosažení tlakové výšky -60 cm má tlak půdního vzduchu velikost -40 cm a při nižších tlakových výškách je již hodnota tlaku vzduchu nula. U tlakové výšky vody -80 cm tlak půdního vzduchu dosahuje také -80 cm, při dalším poklesu tlakové výšky má tlak vzduchu hodnotu nula. Mezi tlakovými výškami vody -20 cm a 20 cm tlak vzduchu dosahuje až podtlaku -138 cm. Všechny tyto tlaky

vzduchu jsou dosaženy především v době, kdy se půda drénovala. V rozmezí -130 cm a -20 cm tlakové výšky vody můžeme pozorovat kladné hodnoty tlaku půdního vzduchu a to při zvlhčení půdy.

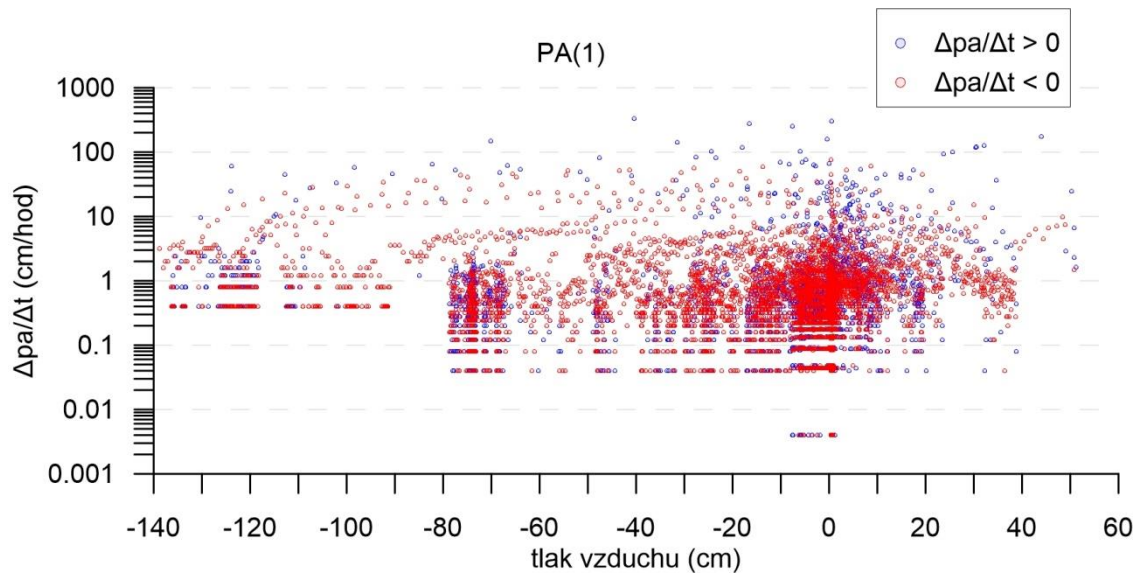


**Obrázek 17: Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 – 21. 7. 2016**

U histogramu změn tlakové výšky vody na obr. 17 jsou třídy rozděleny po 0,8 cm/hod. Největší změna tlakové výšky vody za celé období je kladná a má velikost 392,8 cm/hod. Největší záporná změna tlakové výšky je o hodnotě -108,4 cm/hod. Největší četnost má třída, která obsahuje nulové změny tlakové výšky vody a to 58%. Četnost nulových změn tlakové výšky je 52% ze všech změn tlakové výšky. Ve více než polovině případů zůstávala tlaková výška stejná.

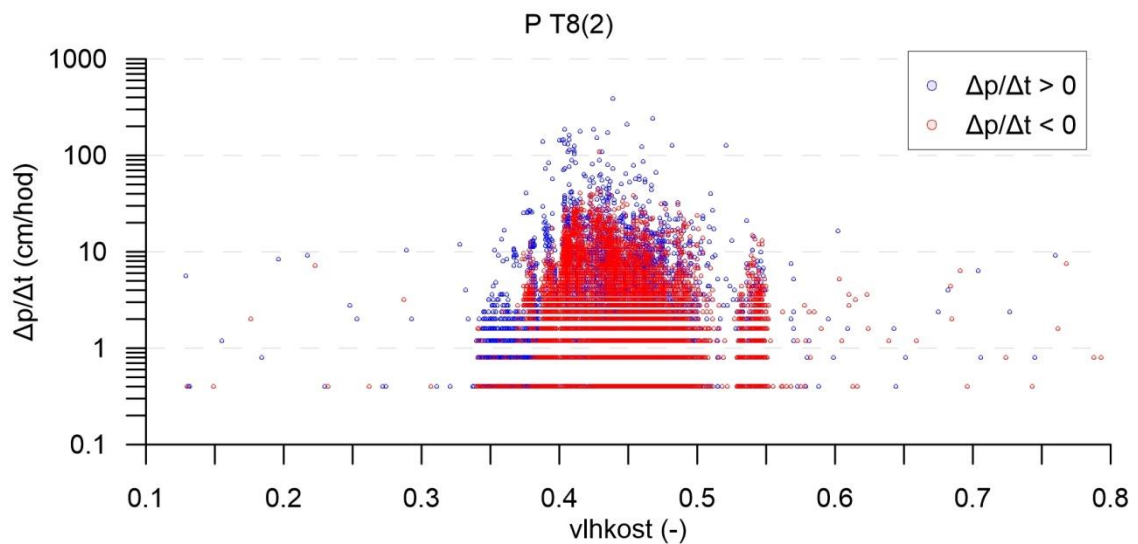
Obr. 17 ukazuje histogram změn tlaku půdního vzduchu, jehož třídy jsou rozděleny po 0,1 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu za celé období má kladnou hodnotu a velikost 333,56 cm/hod. Největší záporná změna tlaku vzduchu je o hodnotě -76,9 cm/hod. Největší četnost zaujímá třída od -0,05 cm/hod do 0,05 cm/hod. V této třídě se nachází změny tlaku vzduchu o hodnotě nula. Tato třída má relativní četnost 60%. Nulové hodnoty zaujímají 49% ze všech změn tlaku půdního vzduchu za celé období. Tedy za polovinu času ze sledovaného období na lokalitě Roklan, se tlak vzduchu nikterak nezměnil.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 1.

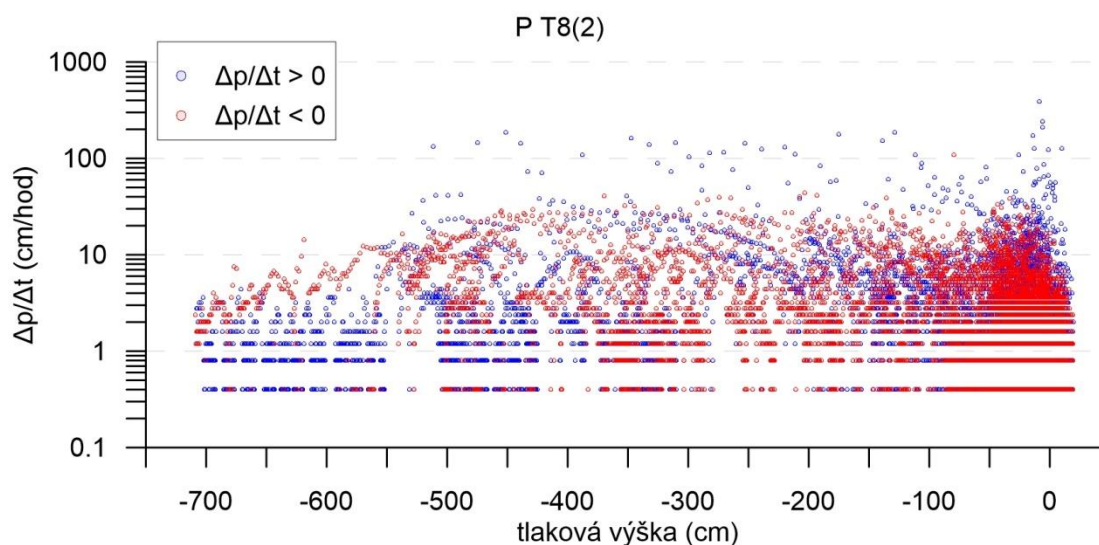


**Obrázek 18: Graf změn tlaku půdního vzduchu a tlak půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016**

Z obr 18 vyplývá, že největší změny tlaku vzduchu se odehrávají, když se tlak půdního vzduchu změní na tlak atmosférický. U hodnoty tlaku půdního vzduchu menší než -80 cm se odehrává méně zato intenzivnějších změn tlaku vzduchu. Nulové změny se vyskytují pouze u tlaku vzduchu rovnající se nule nebo nule se blížící. Obr 19 ukazuje, že změny tlakové výšky vody nacházejí především v rozmezí vlhkosti od 0,30 do 0,55.

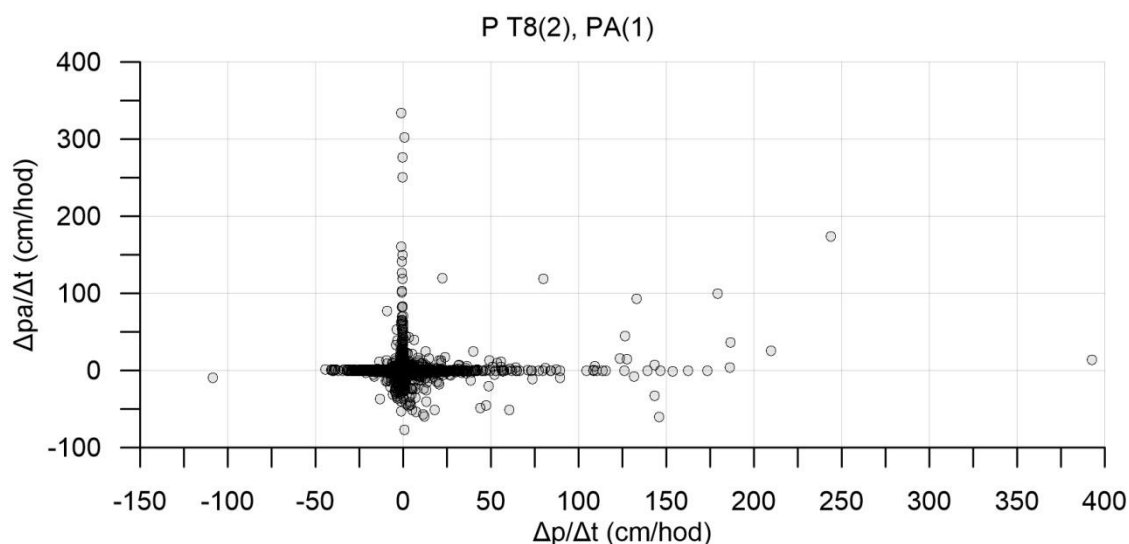


**Obrázek 19: Graf změny tlakové výšky v závislosti na vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016**



**Obrázek 20:** Graf změny tlakové výšky a tlakové výšky v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016

Z obr. 20 je patrné, že nejvíce a největší změny tlakové výšky vody připadají na rozmezí tlakových výšek vody od -50 cm do 0 cm. Změna tlakové výšky ukazuje, o jakou hodnotu byla tlaková výška, aby dosáhla na danou hodnotu. Největší změny tlakové výšky se odehrávají při vlhčení půdy, kdy se tlaková výška z nízkých hodnot dostává k nulové hodnotě.

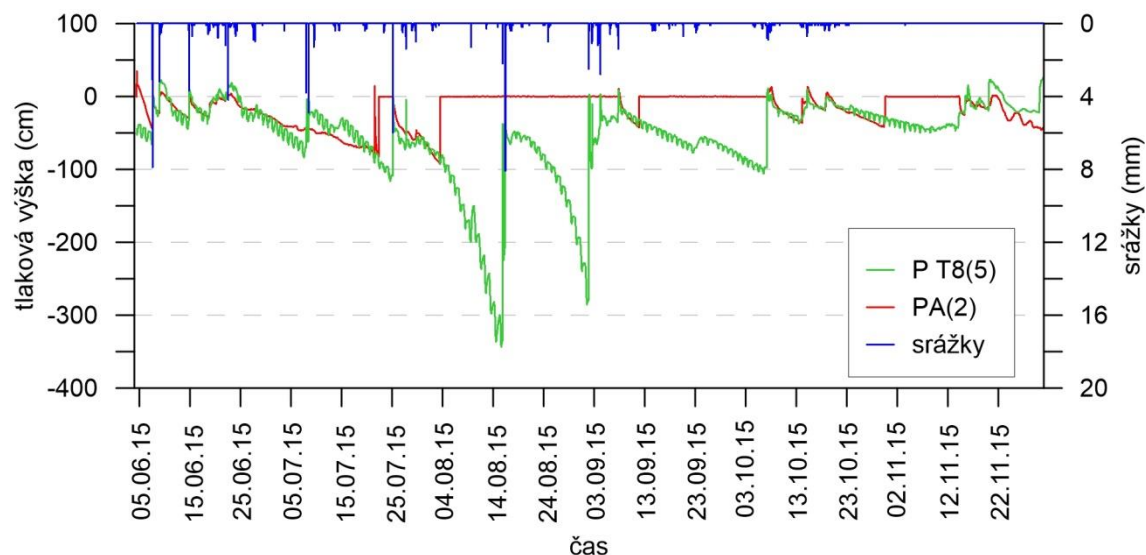


**Obrázek 21:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016

Z obrázku 21 vyplývá, že největší kladné i záporné změny tlaku vzduchu nastávají při téměř nulové změně tlakové výšky vody a největší kladné i záporné změny tlakové výšky připadají téměř na nulové změny tlaku vzduchu. Nejvíce změn tlaku vzduchu

připadá na kladné změny tlakové výšky vody. U kladných změn tlaku vzduchu, které jsou větší než většina, spadá na kladné změny tlakové výšky.

### 5.1.5 Analýza dat za období 4. 6. 2015 – 1. 12. 2015 pro hloubku 36,4 cm



**Obrázek 22: Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm a srážky za období od 4. 6. 2015 - 21. 7. 2016**

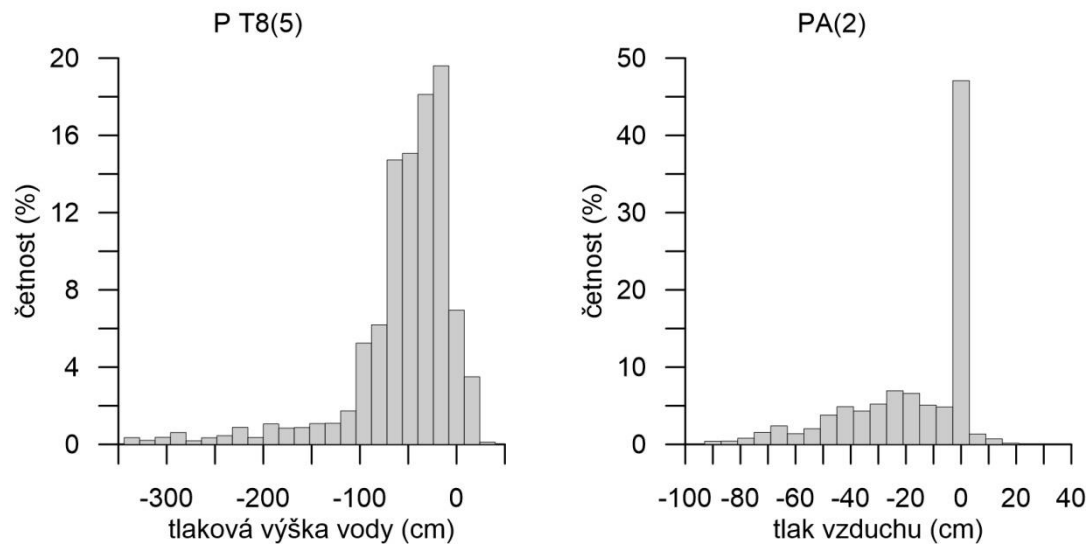
Protože čidlo tlaku vzduchu PA(2) vykazuje od prosince 2015 chybné měření, je analyzovaný časový interval zkrácen na období od 4. 6. 2015 do 1. 12. 2015.

U čidla s označením PA(2) můžeme na obr. 22 pozorovat dva typy chování tlaku půdního vzduchu. Při chování prvního typu tlak vzduchu kopíruje tlakovou výšku vody. Druhý typ chování je stejný jako u čidla PA(1) v hloubce 17 cm. Největší změny tlakové výšky probíhají s největšími srážkami. Největší změny tlaku půdního vzduchu probíhají na začátku analyzovaného období. V tomto období tlak vzduchu kopíruje tlakovou výšku.

Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 23 jsou po 16 cm. Maximální hodnota naměřená v hloubce 36,4 cm během analyzovaného období je 25,5 cm a minimální hodnota tlakové výšky vody má velikost -343,6 cm. Nejvíce, 20 % ze všech naměřených hodnot tlakových výšek vody se nachází ve třídě od -24 cm do -8 cm. Třídy u histogramu tlaku vzduchu jsou po 6 cm. Maximální hodnota tlaku vzduchu má velikost 34,81 cm a naopak minimální hodnota činí -92,7 cm. Téměř 50% ze všech naměřených hodnot tlaku vzduchu se nachází v intervalu od -3 cm do 3 cm. V tomto intervalu jsou opět nejvíce zastoupeny nulové hodnoty, které představují atmosférický

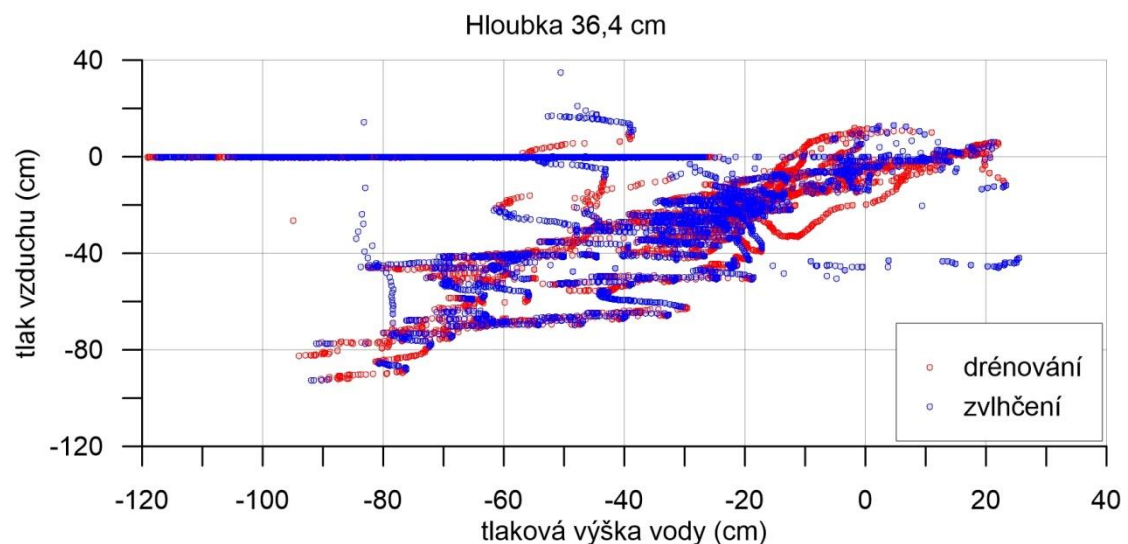


tlak. Proto je tato třída již z výše popsaných důvodů zase nejčetnější. Ze zbylých 50% představují kladné hodnoty tlaku vzduchu pouze necelé 2%.



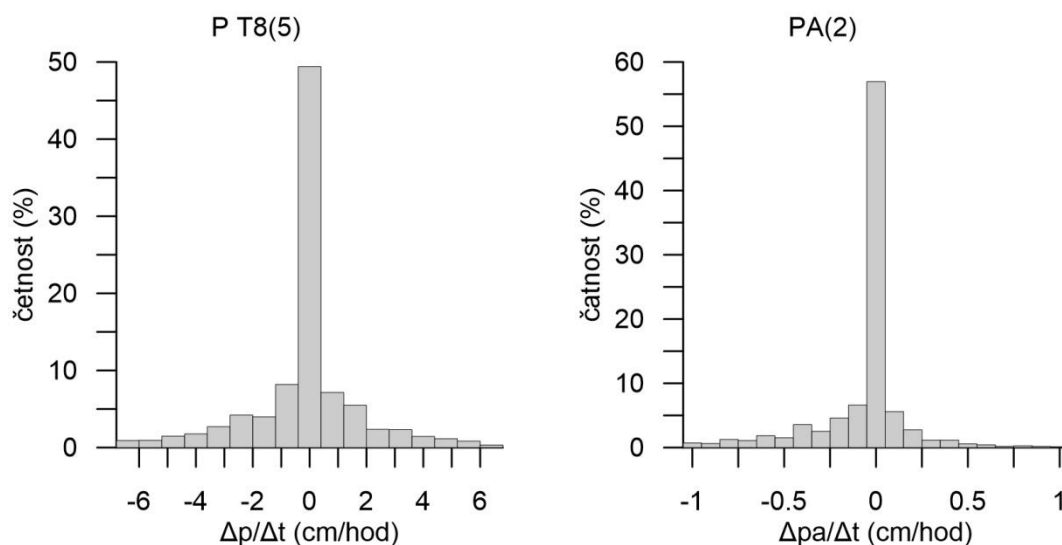
**Obrázek 23: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. 2015 - 1. 12. 2015**

Obr. 24 ukazuje, že u hloubky 36,4 cm je pro nižší tlakové výšky než -95 cm, tlak půdního vzduchu roven nule. V hloubce 15,9 je tato hranice tlakové výšky rovna -80cm. Tlak vzduchu má, při hodnotě -95 cm tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm velikost -92,7 cm.



**Obrázek 24: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody při zvlhčení a drenáži půdy**



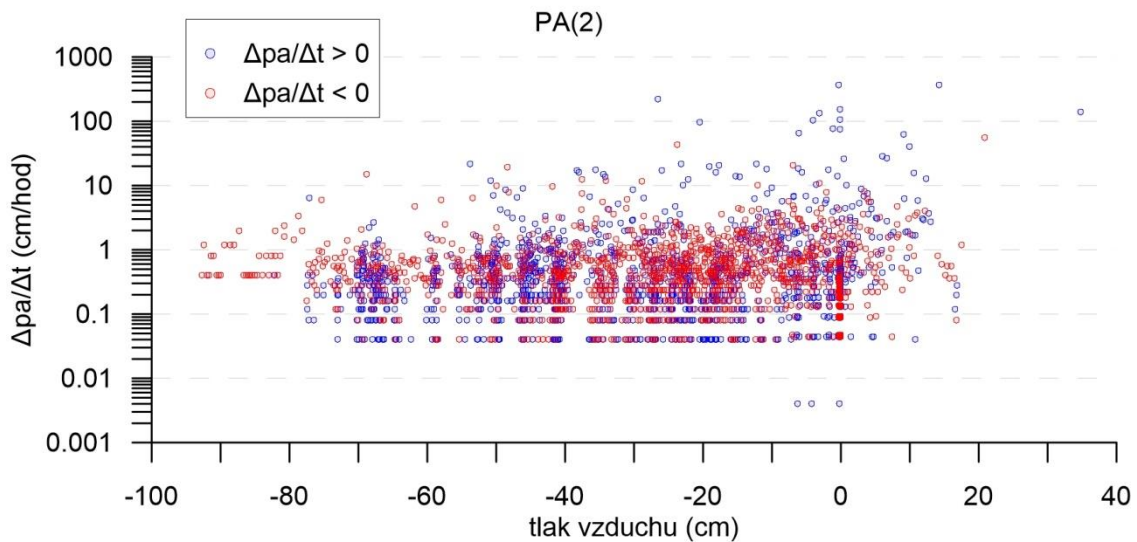


**Obrázek 25: Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 1. 12. 2015**

Třídy u histogramu změny tlakové výšky vody na obr. 25 jsou rozděleny po 0,8 cm/hod. Největší změna tlakové výšky vody je kladná o velikost 1179,2 cm/hod. Největší záporná změna má velikost -425,6 cm/hod. Nulové změny tlakové výšky zaujímají 46% ze všech zaznamenaných změn tlakové výšky vody za období 4. 6. – 1. 12. 2015 v hloubce 36,4 cm. Tyto změny spadají do třídy od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod. Třída má relativní četnost 49%.

U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou třídy po 0,1 cm/hod. Největší změna má kladnou hodnotu a její velikost je 369,4 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu se zápornou hodnotou má velikost -108,7 cm/hod. Nulové změny tlaku půdního vzduchu zaujímají 46% ze všech zaznamenaných změn a nacházejí se ve třídě od -0,05 cm/hod do 0,05 cm/hod s relativní četností 56%.

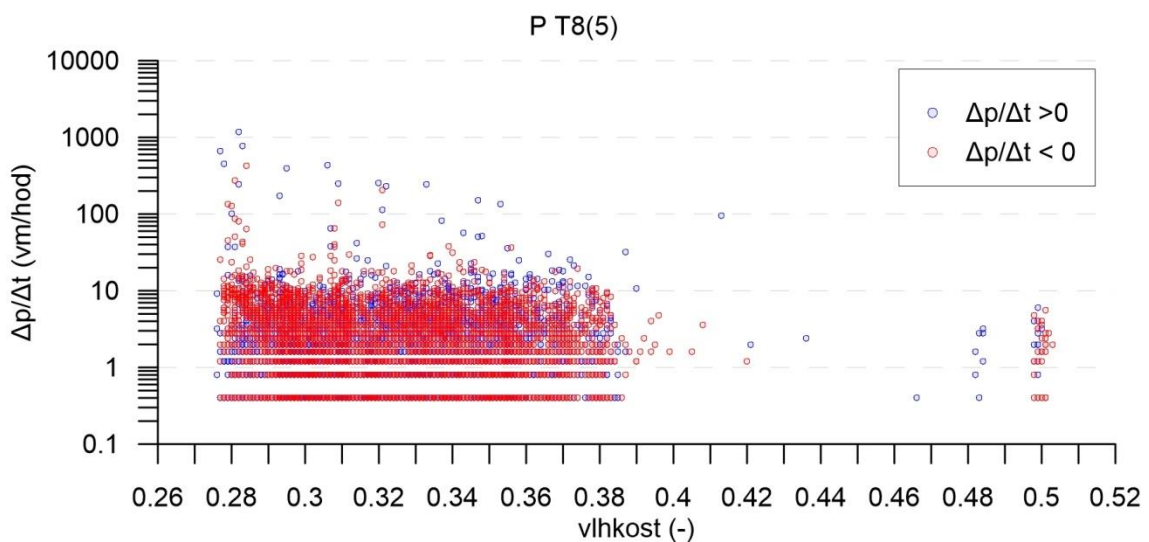
Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 2.



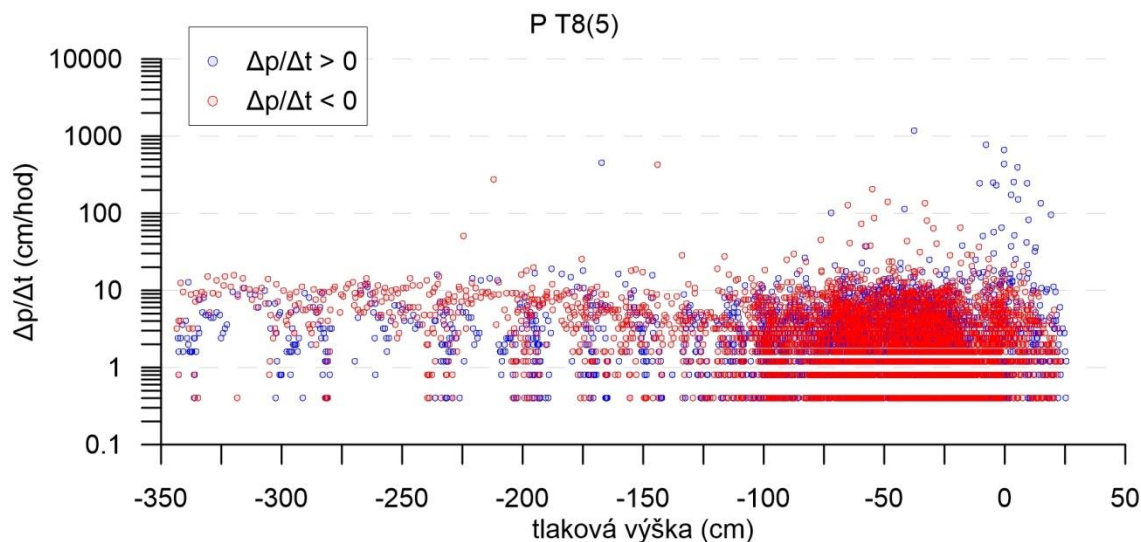
**Obrázek 26: Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 1. 12. 2015**

Z obr. 26 vyplývá, že nejvíce změn tlaku půdního vzduchu připadá opět na hodnoty tlaku vzduchu téměř rovnému nule. Většina změn tlaku půdního vzduchu se nachází v rozmezí od -80 cm do 20 cm. U tlaku vzduchu, který je menší než -80 cm se nacházejí změny tlaku vzduchu, které mají záporné hodnoty a které jsou v absolutní hodnotě větší než 0,2 cm/hod.

Obr. 27 ukazuje, že nejvíce změn tlakové výšky vody se odehrává v rozmezí vlhkosti od 0,27 do 0,39. Kromě tohoto rozmezí nachází změny tlakové výšky vody ještě u vlhkosti 0,48 a 0,5.

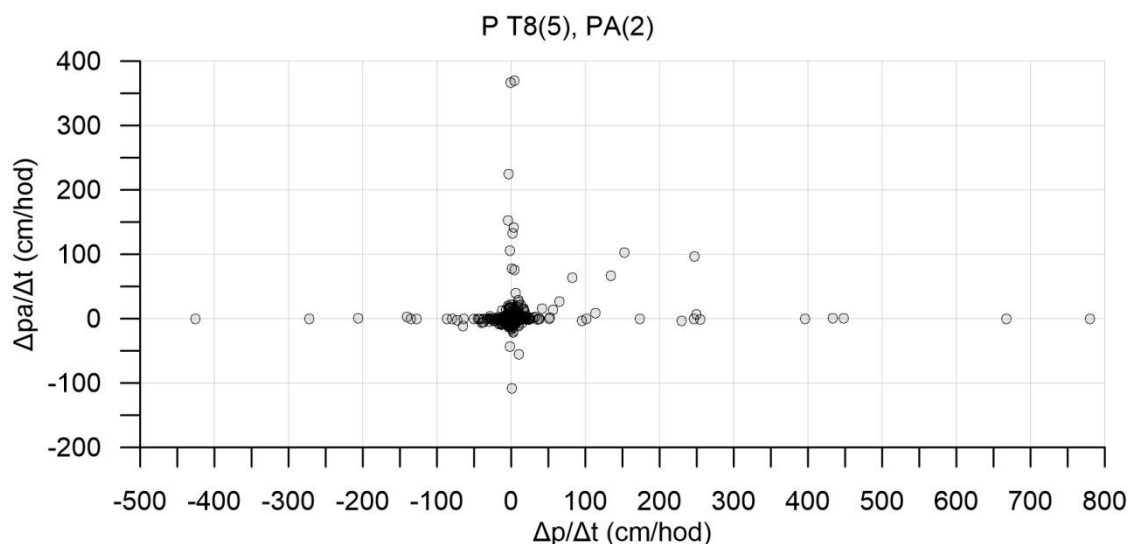


**Obrázek 27: Graf změny tlakové výšky vody v závislosti na vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 1. 12. 2015**



**Obrázek 28:** Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 1. 12. 2015

Obr. 28 ukazuje, že nejvíce a zároveň největší změny se nachází v rozmezí tlakové výšky od -100 cm do 25 cm. Největší změny se tedy odehrává, když se půda zvlhčí a tlaková výška se dostává ze svých minimálních hodnot k hodnotě nula. U tlakových výšek vody menších než -100 cm jsou změny tlakové výšky rychlé. Nachází se zde velmi málo malých změn a je zřejmý trend změny z jedné tlakové výšky do druhé a zpět.

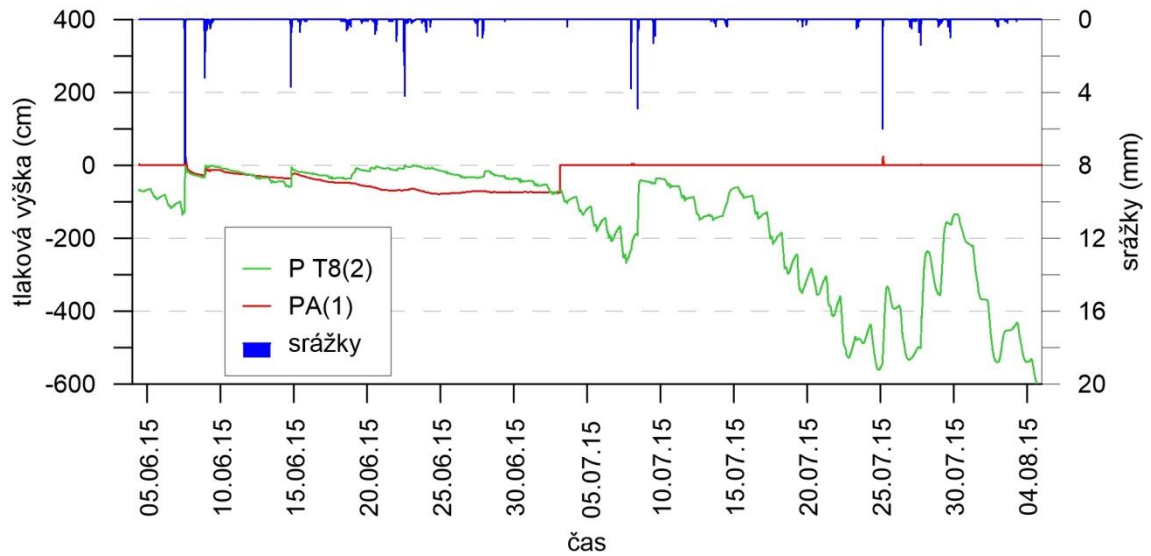


**Obrázek 29:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 1. 12. 2015

Největší kladné a záporné změny tlakové výšky připadají na nulové změny tlaku půdního vzduchu a největší kladné i záporné změny tlaku půdního vzduchu připadají na nulové změny tlakové výšky, jak vyplývá z obr. 29. Změny tlaku půdního vzduchu,

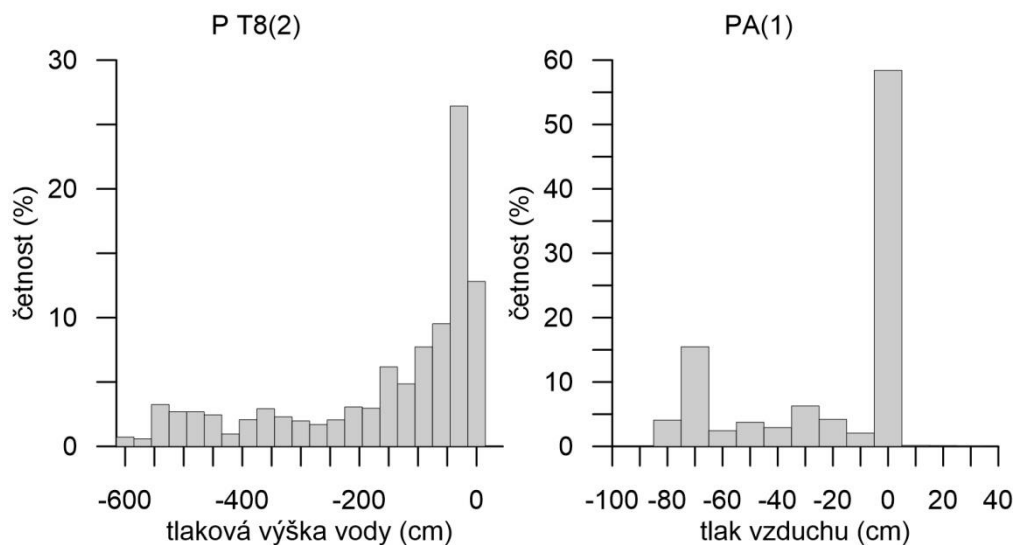
kteře jsou většič než většina změň tlaku vzduchu, jsou kladné a připadají na kladné změny tlakové výšky.

### 5.1.6 Analýza dat za období 4. 6. – 4. 8. 2015 pro hloubku 15,9 cm



**Obrázek 30:** Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm a srážek za období 4. 6. - 4. 8. 2015

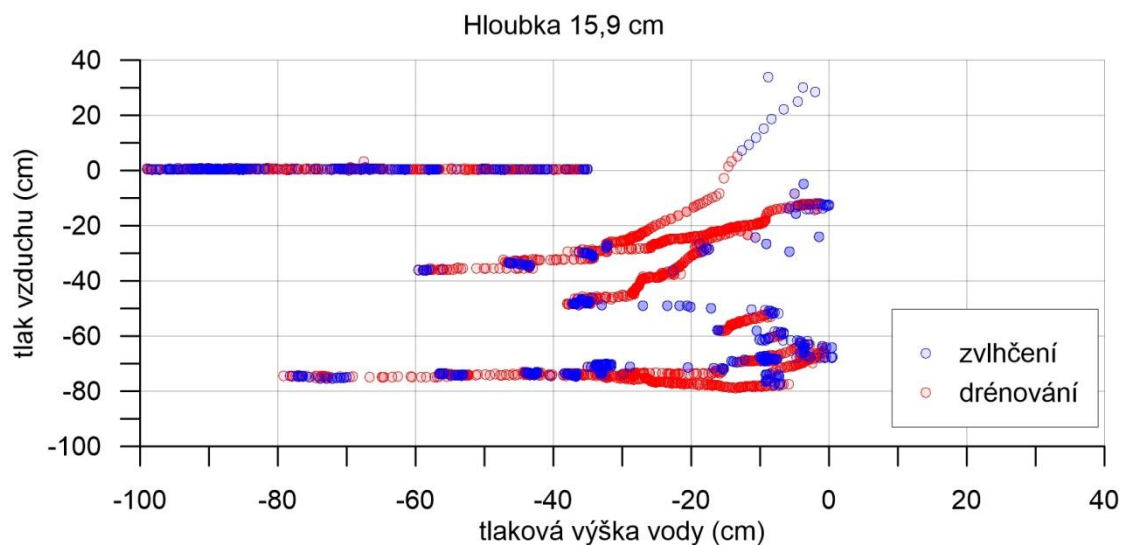
Z obr. 30 vyplývá, že čidlo PA(1) za tento časový interval naměřilo jednu událost vyvolanou srážkou, která spadla 7. 6. 2015. Během této srážky se vytvořily vhodné podmínky, pro uzavření vzduchu v půdě. Tlak vzduchu nejdříve kopíruje tlakovou výšku a poté postupně začne klesat až do hodnoty -80 cm, kdy se tlak vzduchu vyrovná s atmosférou. Změna tlaku půdního vzduchu je v tomto případě náhlá.



**Obrázek 31:** Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Třídy u histogramu tlakové výšky vody jsou po 30 cm. Maximální hodnota tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm během tohoto časového intervalu je 0,5 a minimální hodnota má velikost -625,9 cm. Nejvíce hodnot přibližně 26 % se nachází ve třídě -45 cm do -15 cm.

Třídy u histogramu tlaku půdního vzduchu na obr. 31 jsou po 10cm. Maximální hodnota tlaku vzduchu je 33,88 cm a naopak minimální hodnota má velikost -78,82 cm. V tomto časovém období se nejvíce hodnot pohybuje v rozmezí od -5 cm do 5 cm přibližně 58%.



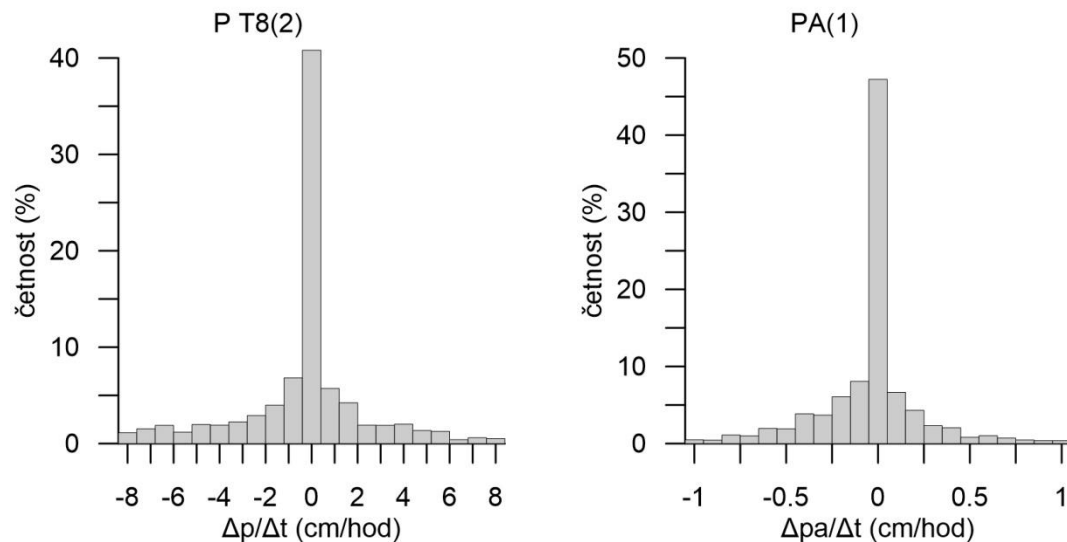
**Obrázek 32:** Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody při zvlhčení a drénování půdy

Po rozdělení do menších časových intervalů je na obr. 32 u hloubky 15,9 cm zřetelnější chování tlaku půdního vzduchu v oblasti tlakové výšky od 0 cm do -40cm. V této oblasti se nachází především hodnoty tlaku půdního vzduchu, které byly dosaženy při drenáži půdy v rozmezí tlakové výšky od -40 cm do 0 cm. Kladné velikosti tlaku půdního vzduchu se vyskytují pouze při zvlhčení půdy.

Na obr. 33 jsou třídy u histogramu změn tlakové výšky vody rozděleny po 0,8 cm/hod. Největší změna je opět kladná a má velikost 392,8 cm/hod. Největší záporná změna tlakové výšky vody má velikost -44,4 cm/hod. Nejmenší změny jsou opět -0,4 cm/hod a 0,4 cm/hod. Největší relativní četnost má třída obsahující nulové změny tlakové výšky a to 41%. Nulové změny představují 37,5% z celkového počtu změn tlakové výšky vody za období 4. 6. – 4. 8. 2015.

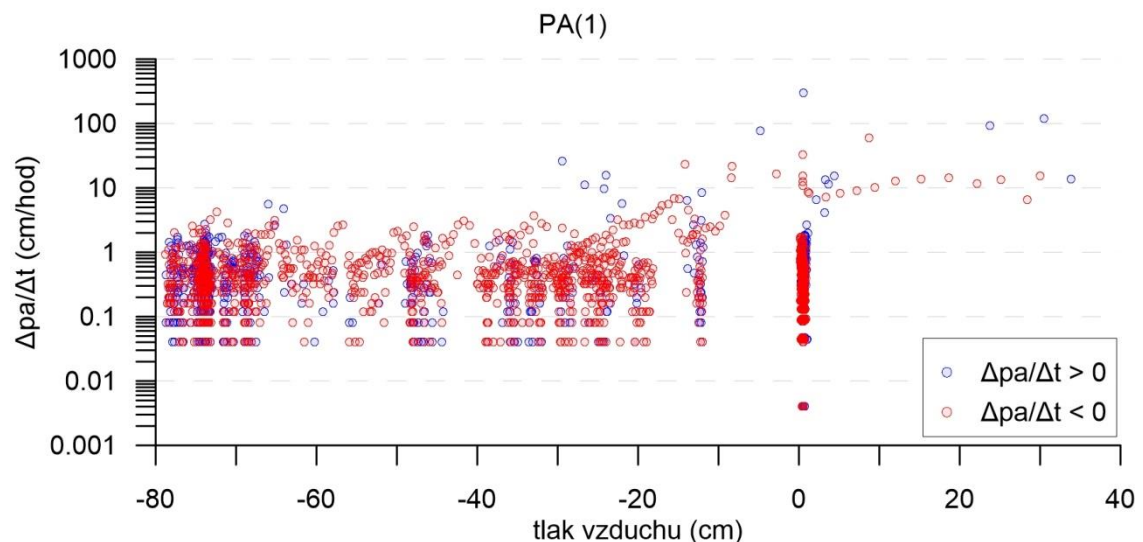
Třídy u histogramu změny tlaku půdního vzduchu jsou po 0,1 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu má kladnou hodnotu a velikost 302,1 cm/hod. Největší záporná

změna má velikost -60,3 cm/hod. Nejmenší změny jsou stejné jako u celého období a to -0,004 cm/hod a 0,004 cm/hod. Třída obsahující nulu má relativní četnost 42% a ze všech změn tlaku půdního vzduchu zaznamenaných v období od 4. 6. do 4. 8. 2015 má 37,5% nulovou hodnotu, což je stejné procento jako u změn tlakové výšky.



**Obrázek 33:** Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 3.



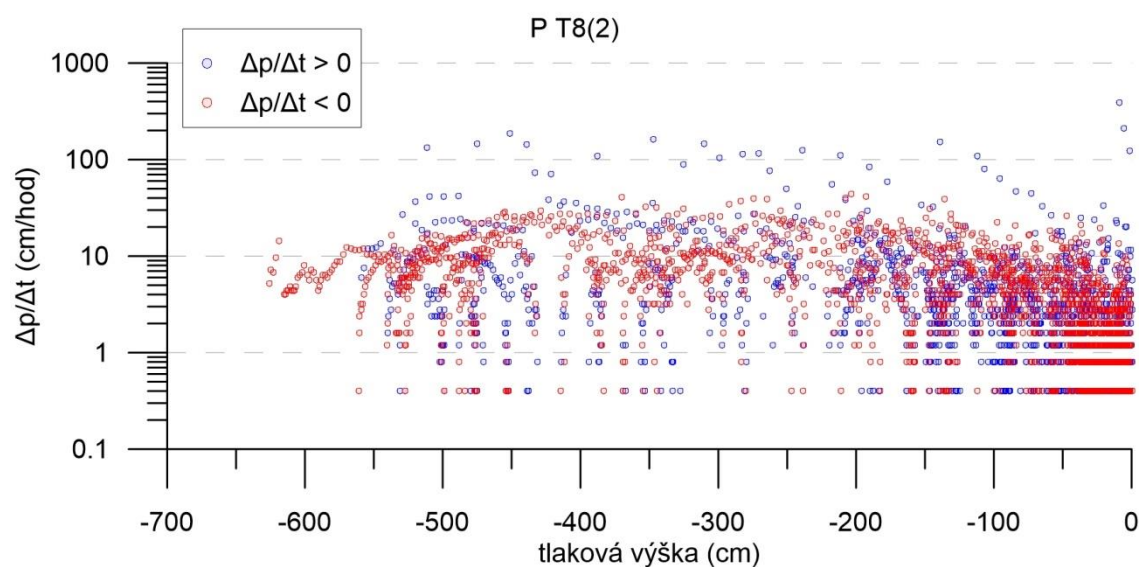
**Obrázek 34:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlak půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Z obr. 34 znovu vyplývá, že nejvíce změn tlaku půdního vzduchu znovu připadá na tlak vzduchu o hodnotě nula. Tyto změny jsou také největší a nabývají především záporných

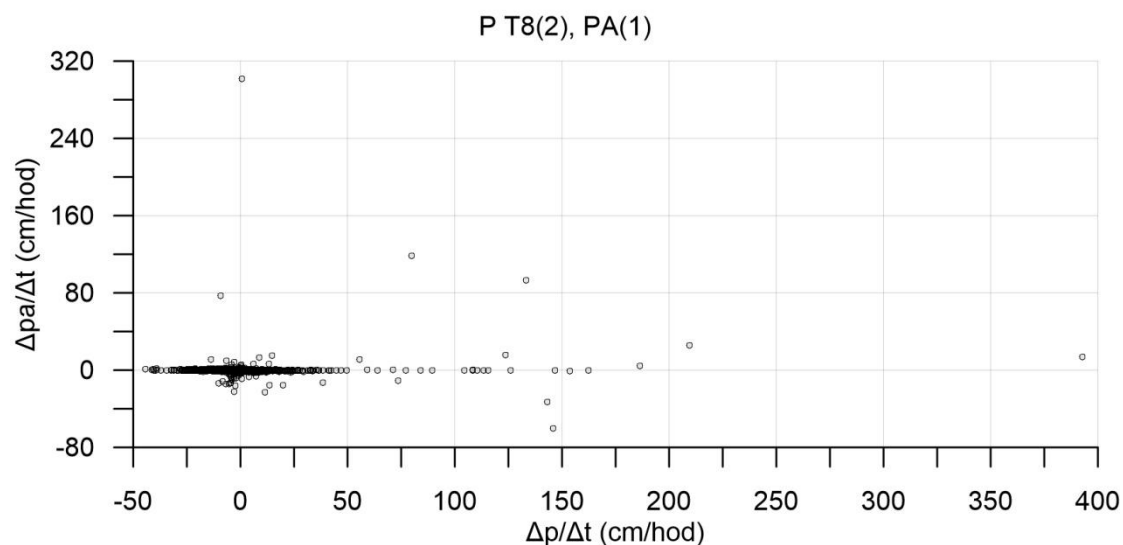


hodnot. To znamená, že největší změny tlaku jsou poklesy z nulové hodnoty do záporných hodnot tlaku půdního vzduchu.

Na obr. 35 se nachází rozmezí tlakové výšky vody od -50 cm do 0 cm, kde se vyskytuje nejvíce změn tlakové výšky vody a zároveň i největší změny tlakové výšky. Největší tlakové výšky mají kladnou hodnotu, to znamená, že největší změnu tlaková výška prodělá, když při zvlhčení půdy (například při srážce) začne rychle stoupat. Mezi tlakovými výškami -200 cm až -600 cm překlenují změny tlakové výšky jednotlivé tlakové výšky.



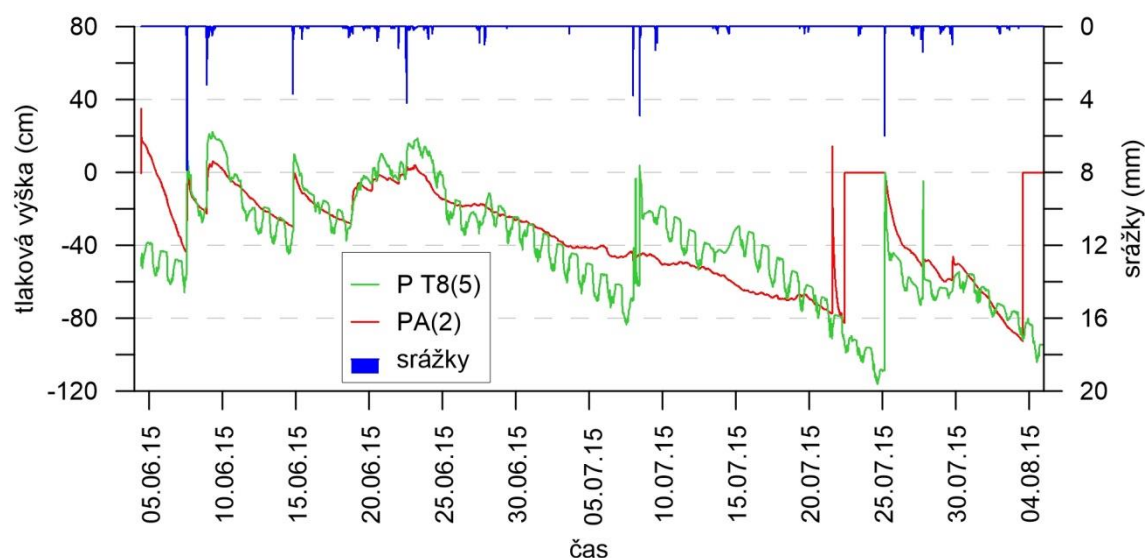
Obrázek 35: Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015



Obrázek 36: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Většina změn tlaku půdního vzduchu připadá na změnu tlakové výšky od -50cm/hod do 50 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu opět připadají na nulové změny tlakové výšky a kladné změny tlaku vzduchu, které jsou větší než většina změn vzduchu, připadají na kladné změny tlakové výšky, jak je vidět na obr. 36.

### 5.1.7 Analýza dat za období 4. 6. – 4. 8. 2015 pro hloubku 36,4 cm



**Obrázek 37:** Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm a srážek za období 4. 6. - 4. 8. 2015

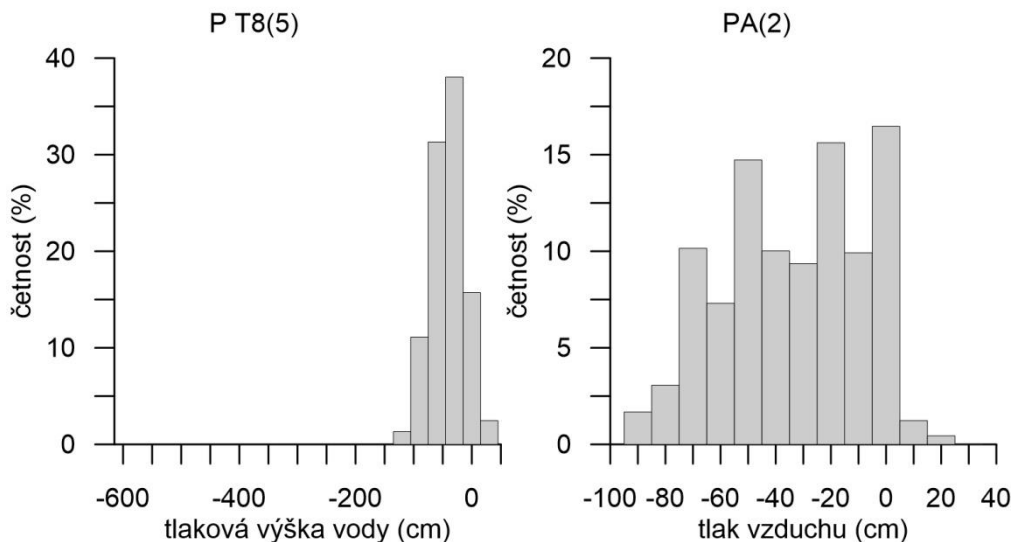
Na obr. 37 můžeme pozorovat u tlaku vzduchu pozorovat dva typy chování. U prvního typu tlak půdního vzduchu zcela kopíruje tlakovou výšku. Tento jev můžeme pozorovat v první třetině intervalu. Ve druhé třetině se tlak vzduchu chová stejně jako události, která byla zaznamenána v hloubce 15,9 cm během intervalu od 4. 6. 2015 do 4. 8. 2015. Ve třetí třetině tlak vzduchu kopíruje tlakovou výšku, ale pouze do doby, kdy tlaková výška dosáhne hodnoty -92 cm, v tomto okamžiku se vzduch uvězněný v půdě spojí s atmosférou. Tlaková výška a následně tlak vzduchu stoupá v reakci na v dané době spadlou srážku.

U histogramu tlakové výšky vody jsou stejně jako u předchozí hloubky po 30 cm. Maximální hodnota tlakové výšky vody má velikost 22,1 cm a naopak minimum je -116,3 cm. Nejvíce hodnot se pohybuje ve třídě od -45 cm do -15 cm. V této třídě je přibližně 38% hodnot ze všech hodnot tlakové výšky vody.

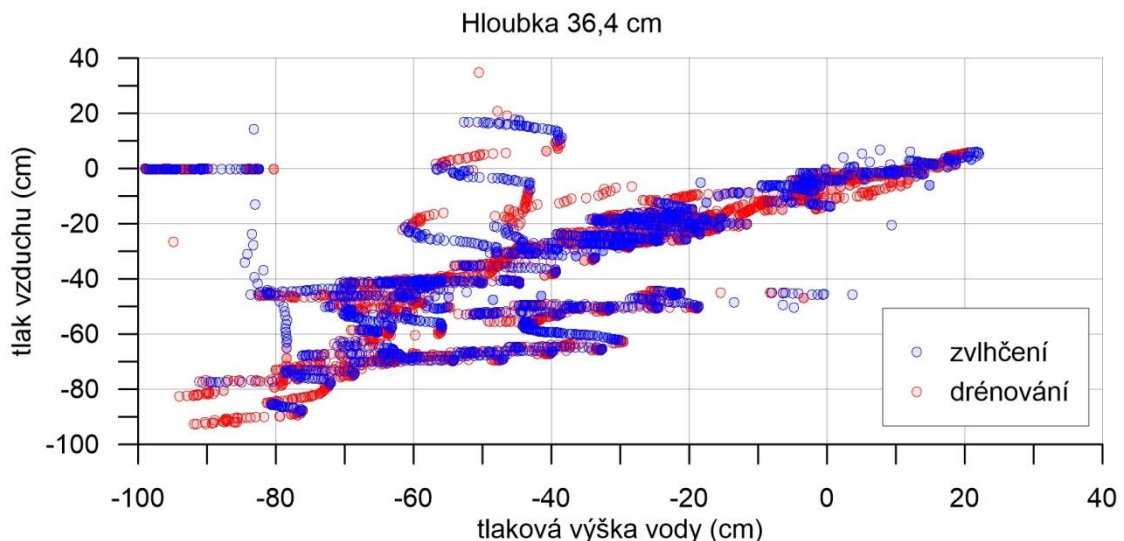
Na obr. 38 jsou třídy u histogramu tlaku půdního vzduchu rozděleny po 10 cm. Největší naměřená hodnota má velikost 34,81 cm a minimální naměřená hodnota v tomto



časovém intervalu má hodnotu  $-92,7$  cm. Největší zastoupení hodnot má znovu třída, která obsahuje nulové hodnoty a to třída od  $-5$  cm do  $5$  cm. V této třídě je 17% všech hodnot. Avšak rozdíl mezi nejčetnější a druhou či třetí nejčetnější třídou není tak veliký. Druhá nejčetnější třída obsahuje přibližně 15,5% ze všech hodnot a u třetí nejčetnější je to 10%. V tomto intervalu je tedy rozložení hodnot tlaku vzduchu mnohem vyrovnanější než u předchozí hloubky.

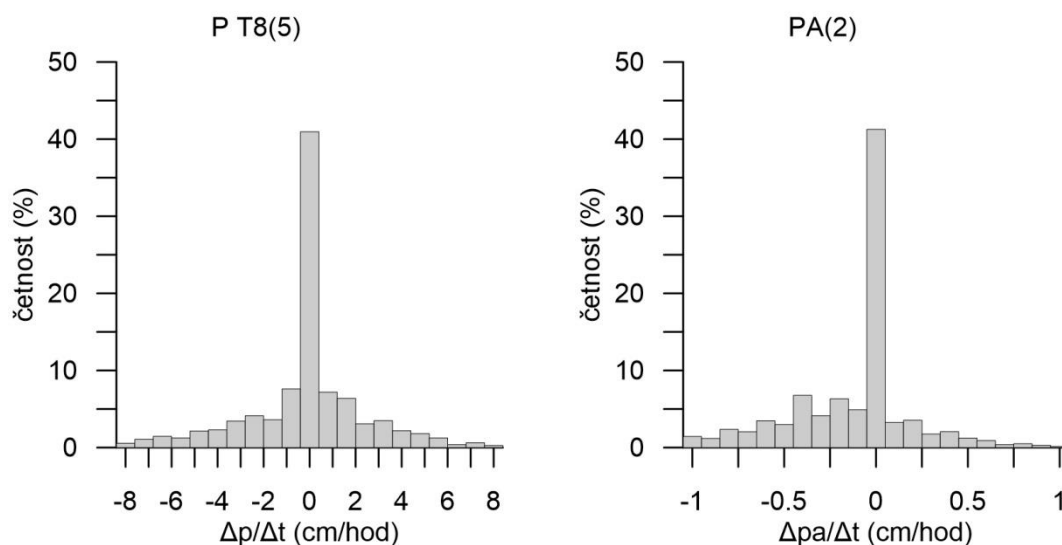


**Obrázek 38:** Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015



**Obrázek 39:** Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy

Zatímco u hloubky 15,9 cm jsou dobře čitelné hodnoty hranic tlakové výšky, u kterých když tlaková výška dále klesá, je tlak vzduchu stále nula, u hloubky 36,4 cm není tato hranice tlakové výšky tolik zřetelná. U hloubky 15,9 cm je tento tlak  $-80$  cm. U hloubky 36,4 cm lze za tuto hranici tlakové výšky vody podle obr. 40 považovat  $-95$  cm.

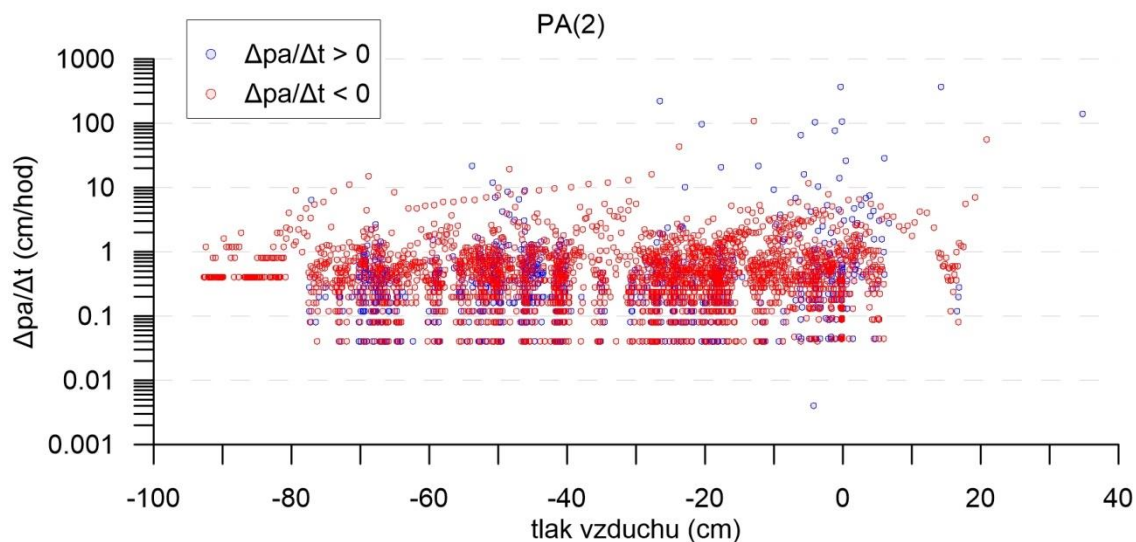


**Obrázek 40: Histogram změn tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015**

U obr. 40 jsou třídy u histogramu změn tlakové výšky vody rozděleny po 0,8 cm/hod. Maximální změna má kladnou hodnotu a velikost 433,2 cm/hod. Největší záporná změna tlakové výšky vody má velikost -206 cm/hod. Nečetnější třída od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod, obsahuje i nulové změny tlakové výšky, její relativní četnost je 41%. Nulové změny tlakové výšky představují 37,5% ze všech změn tlakové výšky. Počet záporných a kladných změn tlakové výšky je přibližně stejný.

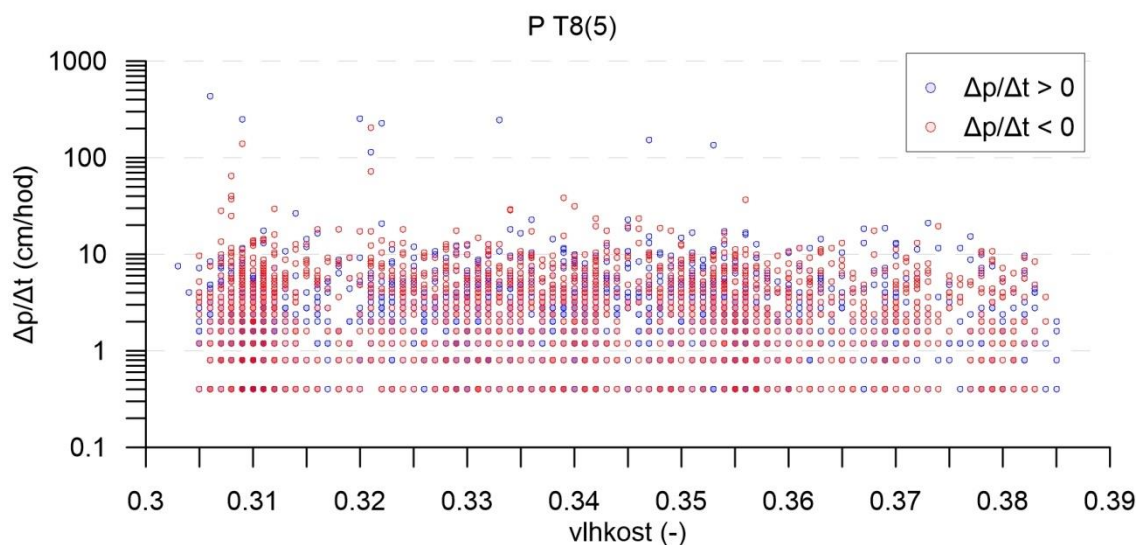
U histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou rozděleny po 0,1 cm/hod. Největší změna tlakové výšky je kladná a má velikost 369,4 cm/hod. Největší záporná změna má velikost -108,7 cm. Relativní četnost nejpočetnější třídy je 41%. V této třídě od -0,05cm/hod do 0,05 cm/hod se nacházejí i nulové změny tlaku půdního vzduchu, které představují 36%.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 4.



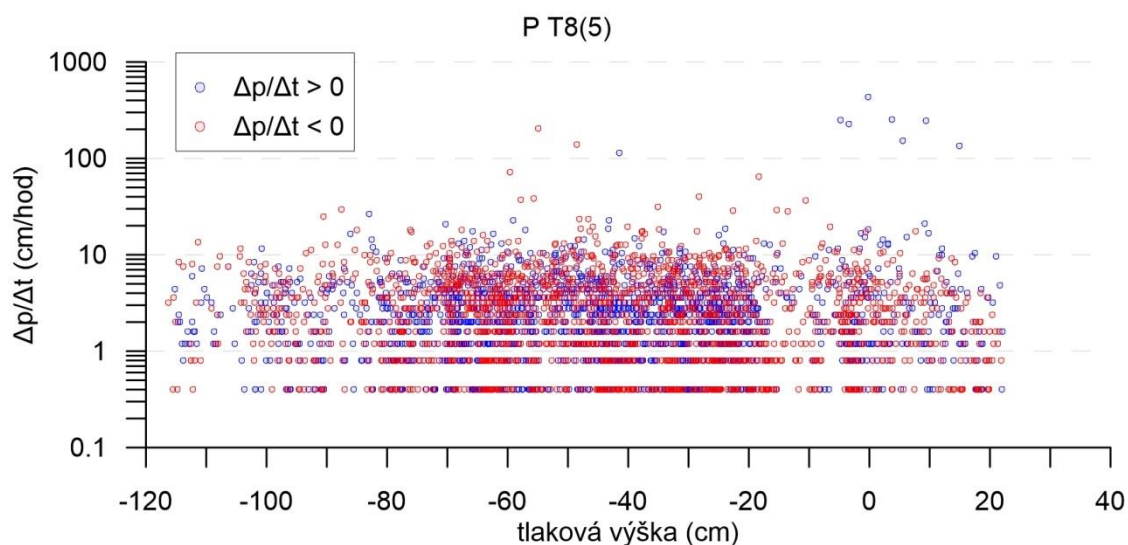
**Obrázek 41:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlak půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Obr. 41 ukazuje, že největší změny tlaku půdního vzduchu připadají na téměř nulovou hodnotu tlaku půdního vzduchu. Nejvíce změn se nachází mezi hodnotami -30 cm až 0 cm tlaku půdního vzduchu.



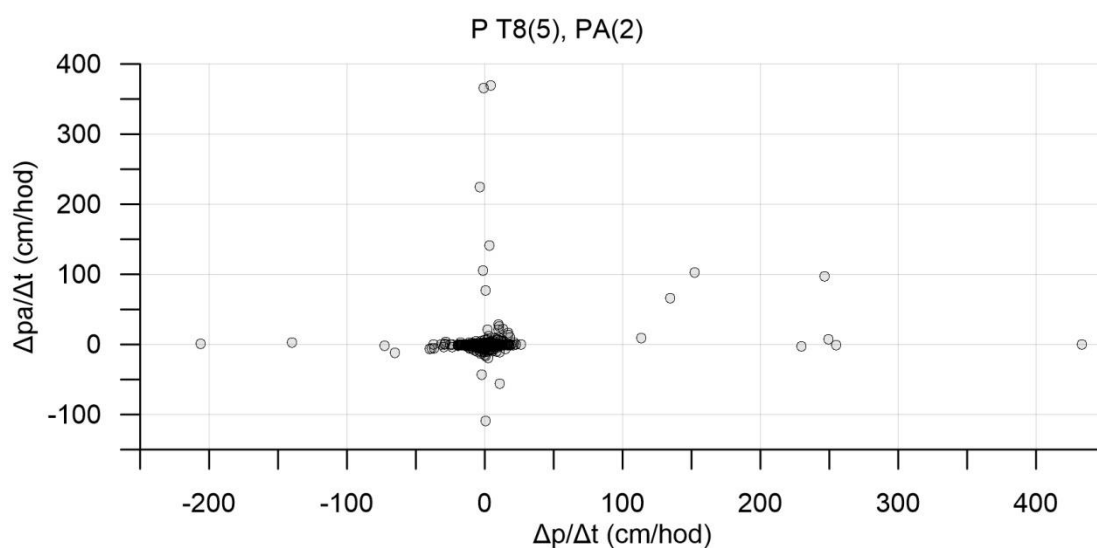
**Obrázek 42:** Graf změny tlakové výšky vody v závislosti na vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

Z obr. 42 vyplývá, že změny tlakové výšky vody jsou rovnoměrně rozmístěny po celém rozmezí naměřených vlhkostí. Jen u vlhkosti v rozmezí 0,315 až 0,32 se nachází méně změn tlakové výšky. Největší změny tlakové výšky vyskytují u nejnižších vlhkostí a to přibližně okolo hodnoty 0,305.



**Obrázek 43:** Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

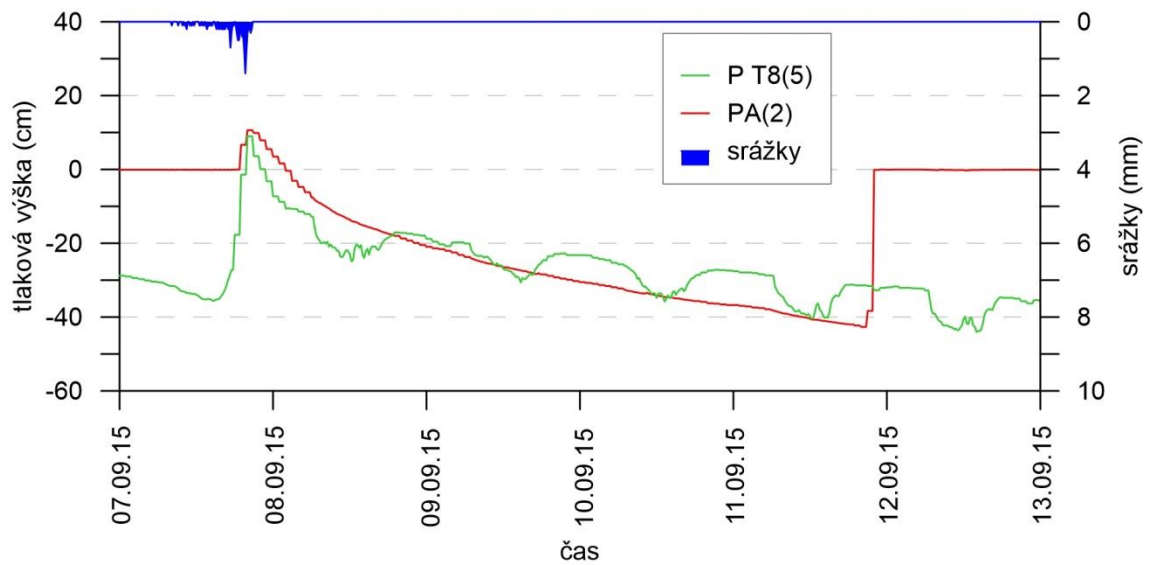
Největší změny tlakové výšky vody podle obr. 43 připadají na nulovou tlakovou výšku vody. Tlaková výška tedy překoná největší změnu při zvlhčení půdy, kdy její velikost stoupne k nulové hodnotě. Na rozdíl od předchozí hloubky se nejvíce změn tlakové výšky vody nachází mezi -70 cm a -20 cm tlakové výšky.



**Obrázek 44:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. - 4. 8. 2015

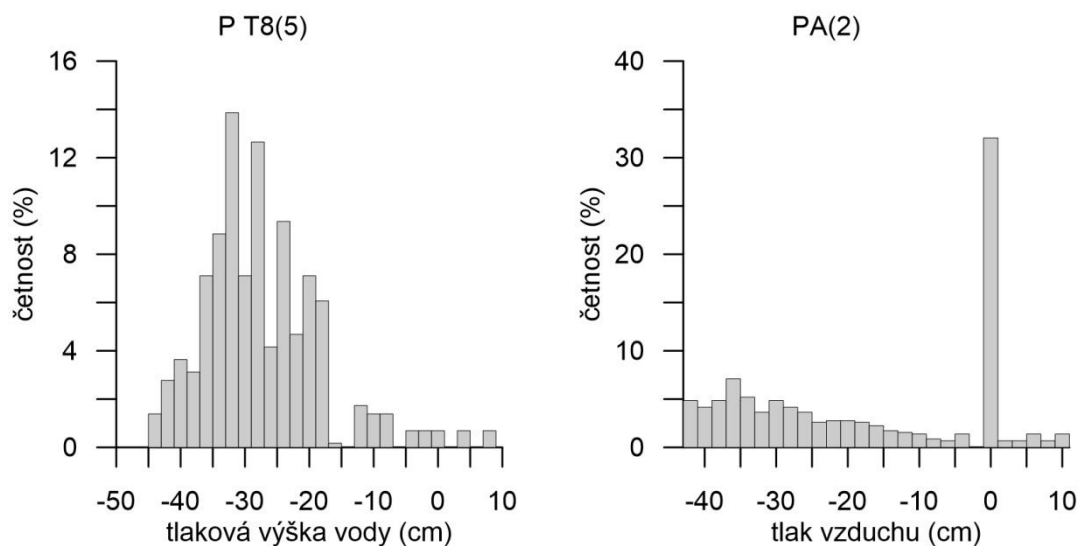
Obr. 44 ukazuje, že jako u předchozí hloubky převážná většina změn tlaku půdního vzduchu připadá na změnu tlakové výšky od -50 cm/hod do 50 cm/hod. Výjimku tvoří kladné změny tlaku půdního vzduchu větší než 50 cm/hod, které nastávají při kladných změnách tlakové výšky vody.

### 5.1.8 Analýza dat za období 7. 9. – 12. 9. 2015 pro hloubku 36,4 cm



**Obrázek 45: Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm a srážek za období 7. 9. - 12. 9. 2015**

Na obr. 45 je za časové období od 7. 9. 2015 do 12. 9. 2015 zaznamenána jedna srážková událost. Po spadlé srážce tlak půdního vzduchu i tlaková výška má po krátký čas kladnou hodnotu. To značí, že se čidla ocitla pod hladinou podzemní vody. Po skočení srážky se začne půda drénovat a tlak půdního vzduchu začne klesat v závislosti na poklesu tlakové výšky až do doby než se uzavřený půdní vzduch spojí znovu s atmosférou. Stane se tak při hodnotě -42,6 cm tlaku vzduchu.



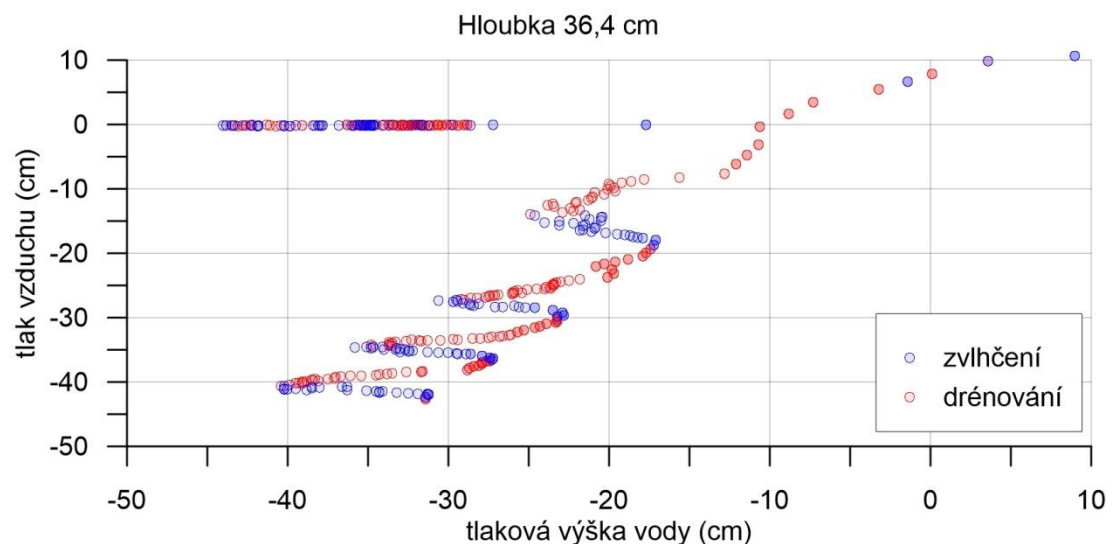
**Obrázek 46: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015**

Třídy u histogramu tlakové výšky na obr. 46 jsou rozděleny po 2 cm. Maximální naměřená hodnota tlakové výšky v tomto časovém intervalu má velikost 9 cm a naopak

minimum je -44cm. Třída od -33 cm do -31 cm má největší četnost a to 14%. Některé třídy neobsahují žádné hodnoty. Tyto třídy leží uprostřed jiných a neobsahují žádná data z důvodu rychlé změny tlakové výšky, kterou nedokáže 15-ti minutový interval mezi záznamy měření zachytit. Jedná se o třídy od -15 cm do -13 cm, od -7 cm do -5 cm, od 1cm do 3 cm a třída od 5 cm do 7 cm.

U histogramu tlaku vzduchu jsou třídy po 2 cm. Naměřené maximum v tomto intervalu má velikost 10,63 cm a minimum je o velikosti -42,67 cm. Nejpočetnější je opět třída, která zahrnuje nulové hodnoty a to s 32% četností. Hodně hodnot se pohybuje v nízkých tlacích od -20 cm a níže. Třída s nulovou četností je od -3 cm do -1 cm.

Na obrázku 47 body drenáže vytvářejí vzestupné linie a naopak body zvlhčení utvářejí sestupné linie. Jednotlivé linie na sebe navazují.

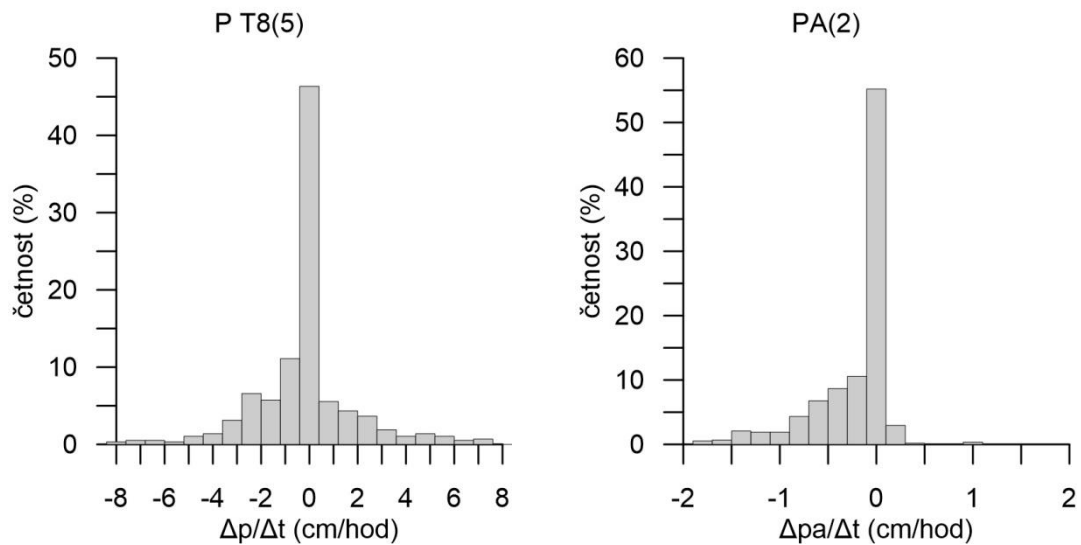


**Obrázek 47: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy**

Třídy u histogramu změn tlakové výšky vody na obr. 48 jsou rozděleny po 0,8 cm/hod. Největší změna tlakové výšky vody má kladnou hodnotu a má velikost 65,2 cm/hod. U záporných hodnot je maximum -21,6 cm/hod. Procentuální zastoupení nulových změn tlakové výšky vody je 43,5%. Třída od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod je nejčetnější a její relativní četnost činí 46%.

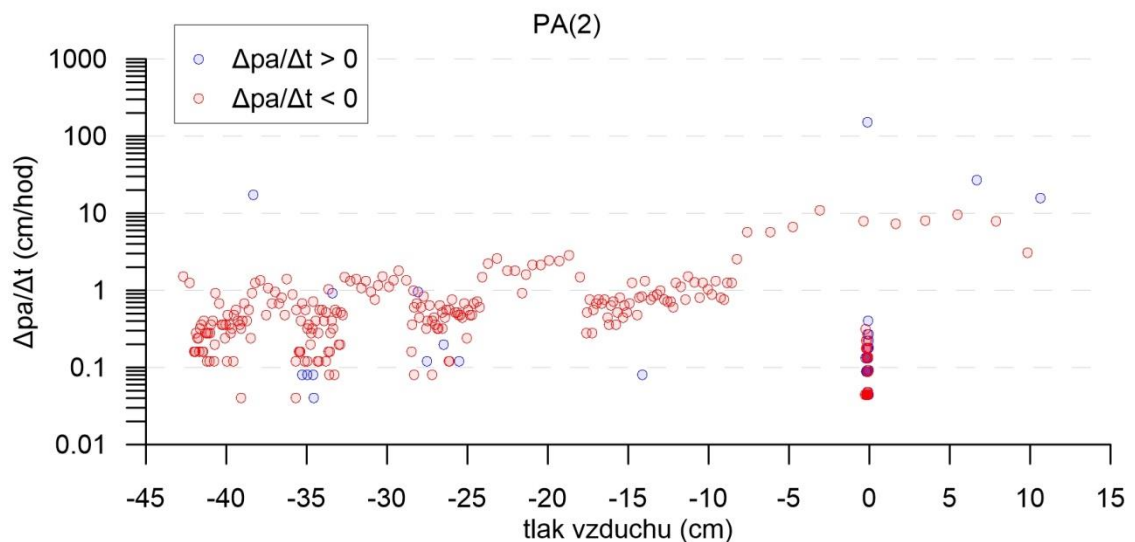
U histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou třídy rozděleny po 0,2 cm/hod. Maximální změna tlaku půdního vzduchu má velikost 152,9 cm/hod. I přesto kladné změny tlaku půdního vzduchu představují pouze 4% z celkového počtu změn tlaku půdního vzduchu. Největší záporná změna má velikost 10,9 cm/hod. Třída od -0,05

cm/hod do 0,05 cm/hod má relativní četnost 55% a zahrnuje nulové změny tlaku vzduchu, které představují 42% ze všech změn v tomto období v hloubce 36,4 cm.



**Obrázek 48: Histogram změn tlakové výšky a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015**

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 5.

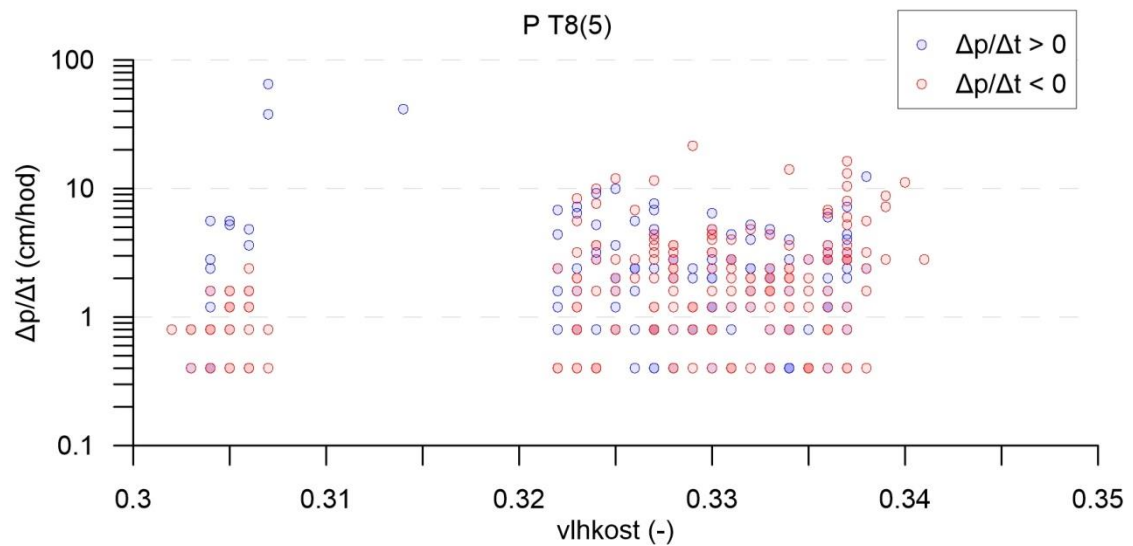


**Obrázek 49: Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015**

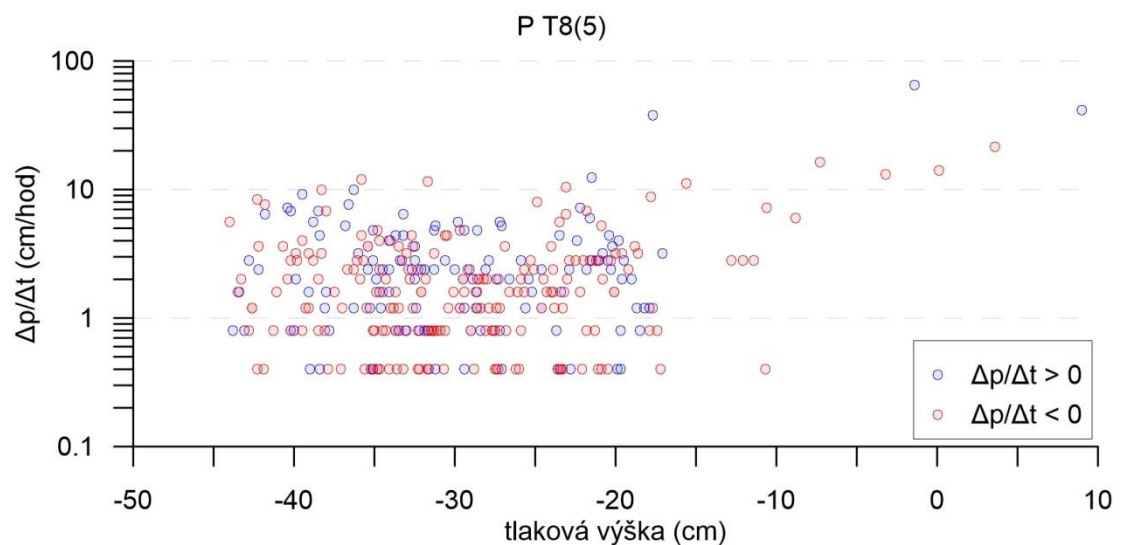
Z obr 49 je patrné, že nejvíce změn a největší změna tlaku půdního opět nastávají při téměř nulové hodnotě tlaku půdního vzduchu. S klesajícím tlakem půdního vzduchu se postupně snižují i změny tlaku půdního vzduchu, protože tlak půdního vzduchu se začal ustalovat.



Jako u předchozí časového intervalu největší změny tlakové výšky vody připadají na nejmenší vlhkosti, což můžeme pozorovat na obr 50. Výskyt ostatních změn je rovnoměrný kromě rozmezí vlhkostí od 0,305 do 0,32, kde se nachází pouze jedna změna tlakové výšky vody, která má kladná hodnotu.



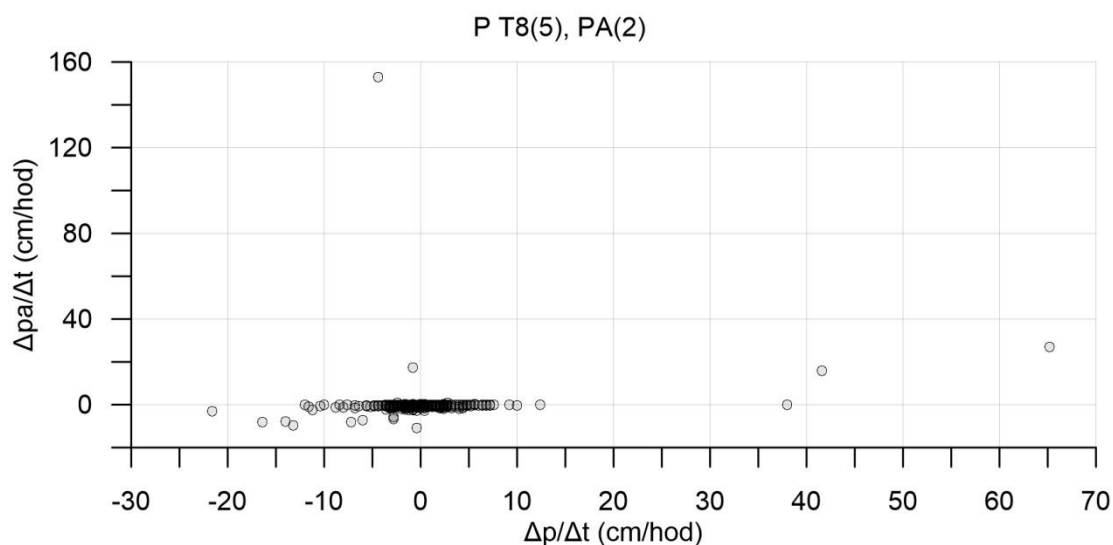
Obrázek 50: Graf změny tlakové výšky v závislosti na vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015



Obrázek 51: Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015

Z obr 51 je vidět, že většina změn tlakové výšky vody se nachází v mezi -45 cm a -20 cm velikosti tlakové výšky. Největší změna tlakové výšky opět připadá na 0 cm tlakové výšky. Druhá největší změna připadá na kladnou tlakovou výšku 10 cm. Tento bod popisuje zvýšení tlakové výšky, vlivem krátkého zatopení tenzometru.

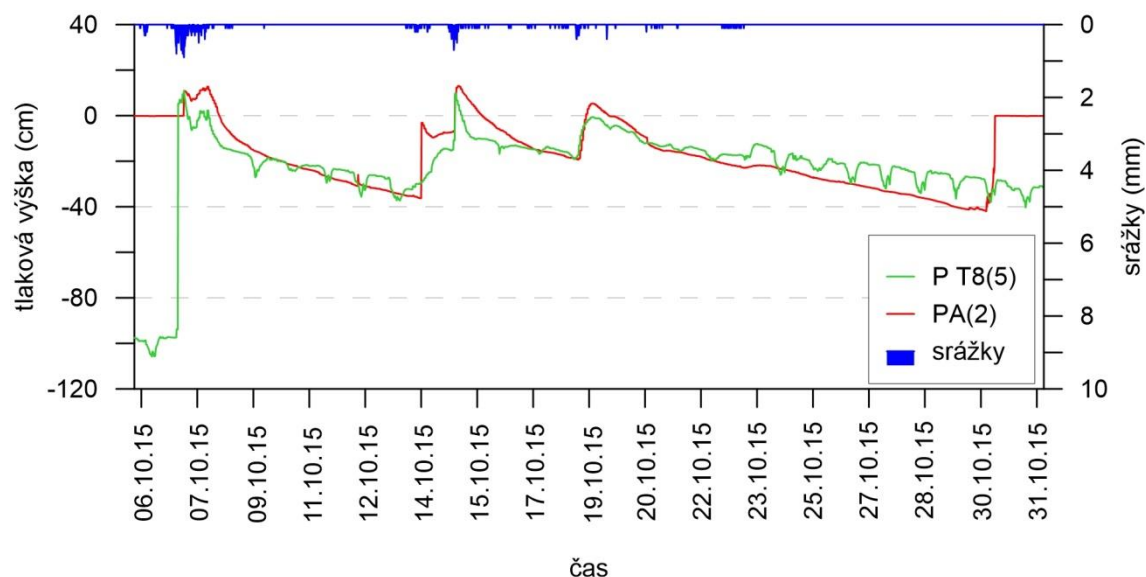




**Obrázek 52: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. - 12. 9. 2015**

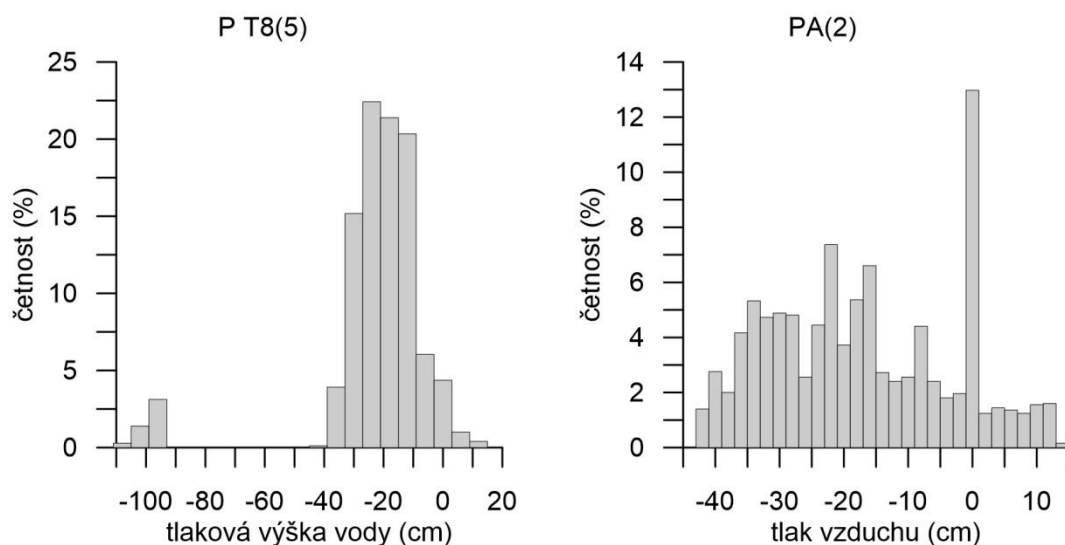
Obr. 52 ukazuje, že hodnoty změn se vyskytují především v rozmezí od -10 cm/hod do 10 cm/hod změn tlakové výšky vody a od -10 cm/hod do 10 cm/hod změn tlaku půdního vzduchu.

### 5.1.9 Analýza dat za období 6. 10. – 31. 10. 2015 pro hloubku 36,4 cm



**Obrázek 53: Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm a srážek za období 6. 10. - 31. 10. 2015**

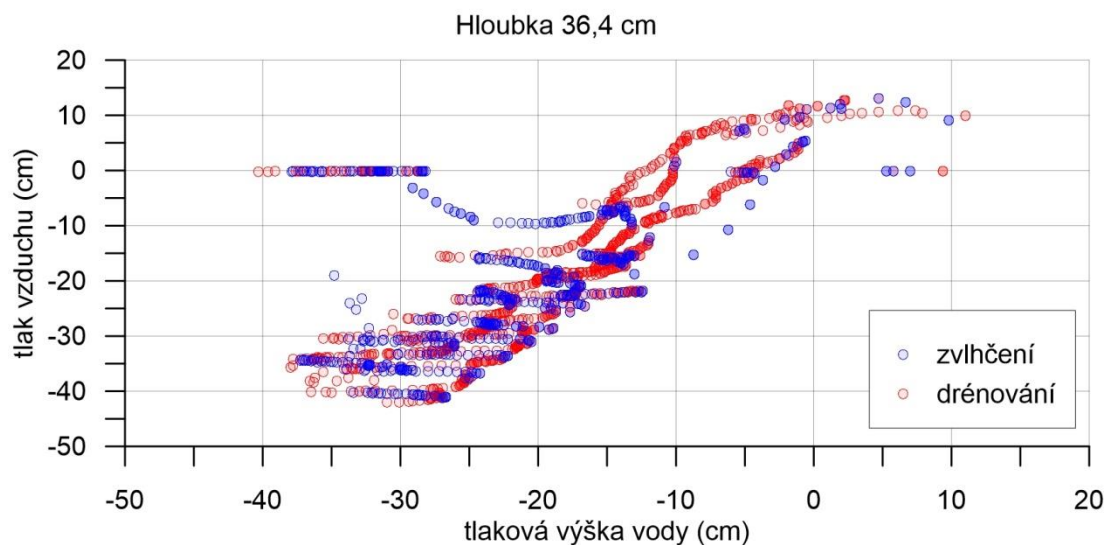
Z obr. 53 je patrné, že první srážka vyvolala stoupaní tlakové výšky vody a následně i stoupaní tlaku půdního vzduchu. Tlak vzduchu pak dále kopíruje tlakovou výšku až do doby, kdy se spojí s atmosférou. Změna, která v té době proběhne je náhlá.



**Obrázek 54: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. - 31. 10. 2015**

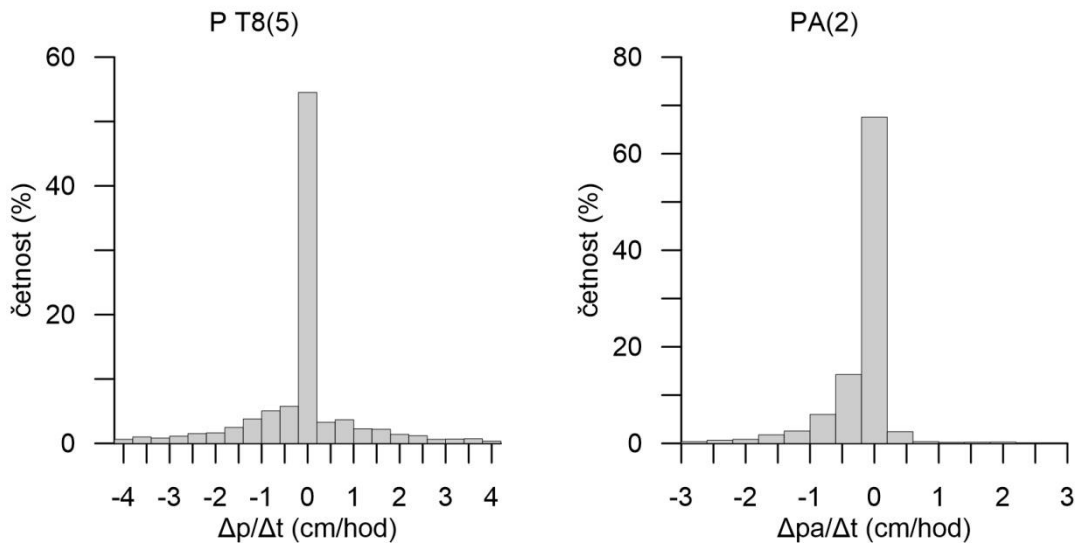
Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 54 jsou po 6 cm. Maximální zaznamenaná hodnota má velikost 11 cm a minimální má velikost -105,8 cm. Nejpočetnější je třída od -27 cm do -21 cm a nejvíce hodnot se nachází v rozmezí od -27 do -9cm a to přibližně 63%. Naopak v rozmezí od -93 cm do -45 cm se nenachází žádné hodnoty a to z důvodu rychlé změny na začátku daného časového období. Interval 15 minut mezi záznamy měření nedokáže zaznamenat tak náhlou změnu.

U histogramu tlaku vzduchu jsou třídy rozděleny po 2 cm. Maximální tlak půdního vzduchu dosahuje hodnoty 13,04 cm a naopak minimální tlak má hodnotu -42 cm. Nejpočetnější je opět třída obsahující nulové hodnoty. V této třídě se nachází 12% ze všech hodnot.



**Obrázek 55: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy**

Z obr. 55 nelze jednoznačně říci, jaký je trend při drenáži půdy a jaký je při zvlhčení půdy. Hodnota -40 cm tlakové výšky vody tvoří hranici, kdy při dalším poklesu tlakové výšky vody má tlak vzduchu nulovou nebo téměř nulovou hodnotu.

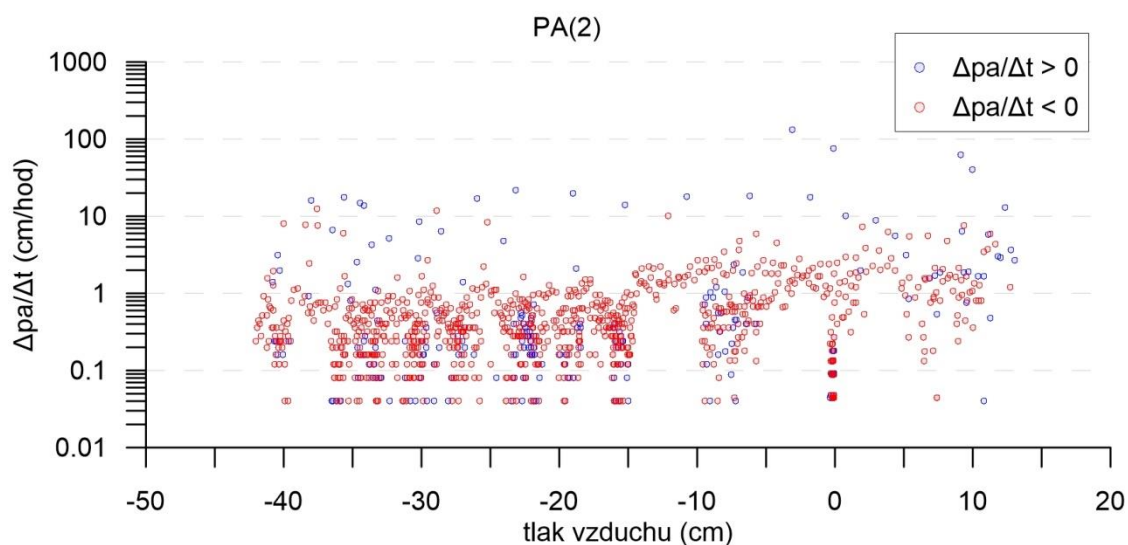


**Obrázek 56: Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. - 31. 10. 2015**

U histogramu změny tlakové výšky vody na obr. 56 jsou třídy rozděleny po 0,4 cm/hod. Maximální změna je kladná a má velikost 396,4 cm/hod. Největší záporná změna má velikost -14 cm/hod. Ve třídě od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod se nachází 54,5%. V této třídě se nacházejí pouze změny tlakové výšky vody rovnající se nule.

Třídy u histogramu změny tlaku půdního vzduchu jsou rozděleny po 0,4 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu je opět kladná a má velikost 132,7 cm/hod a maximální záporná změna tlaku půdního vzduchu má velikost -12,5 cm/hod. I když má největší velikost změna tlaku půdního vzduchu kladnou hodnotu, kladné změny představují pouze 4% ze všech změn v daném časovém intervalu. Nulové hodnoty představují 52,5% a nepočtenější třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod má relativní četnost 67,5%.

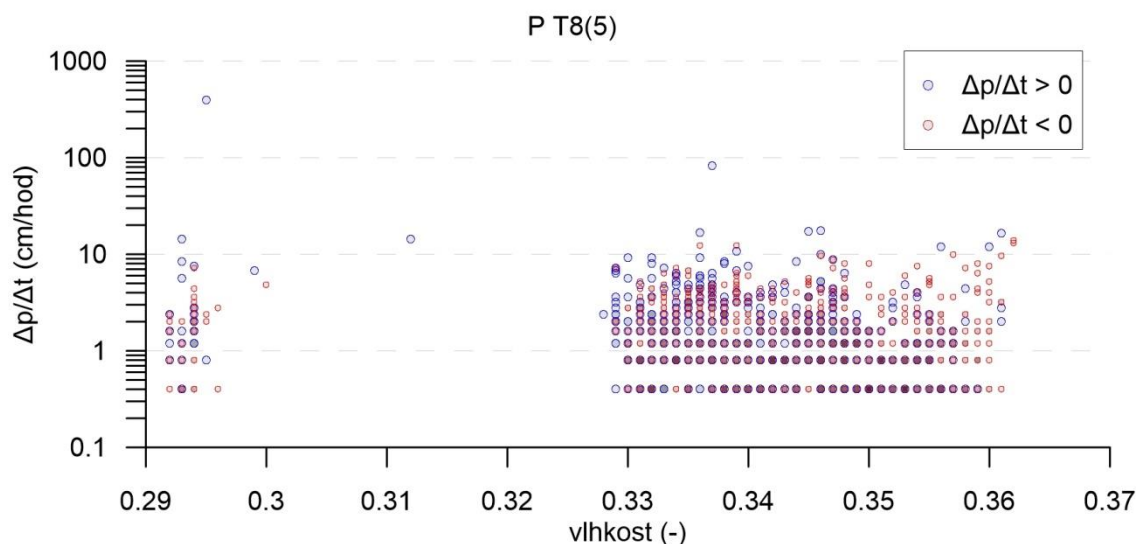
Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 6.



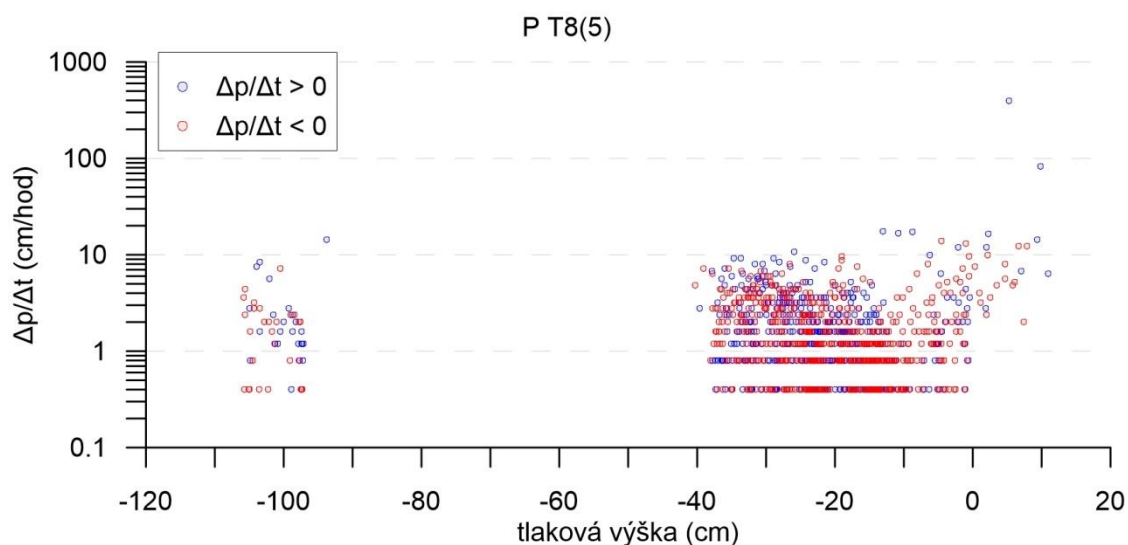
**Obrázek 57:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlak půdního vzduchu v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. - 31. 10. 2015

Z obr. 57 vyplývá, že nejvíce změn připadá na nulovou hodnotu tlaku půdního vzduchu. Od tlaku vzduchu -15 cm do 10 cm a od -10 cm do 0 cm se vyskytují pouze změny tlaku půdního vzduchu o větších hodnotách než je průměr a mají zápornou hodnotu.

Podle obr. 58 se v rozmezí hodnot vlhkosti od 0,3 do 0,33 se nachází pouze jedna kladná hodnota změny tlakové výšky. Největší změna tlakové výšky připadá na nejnižší vlhkost.

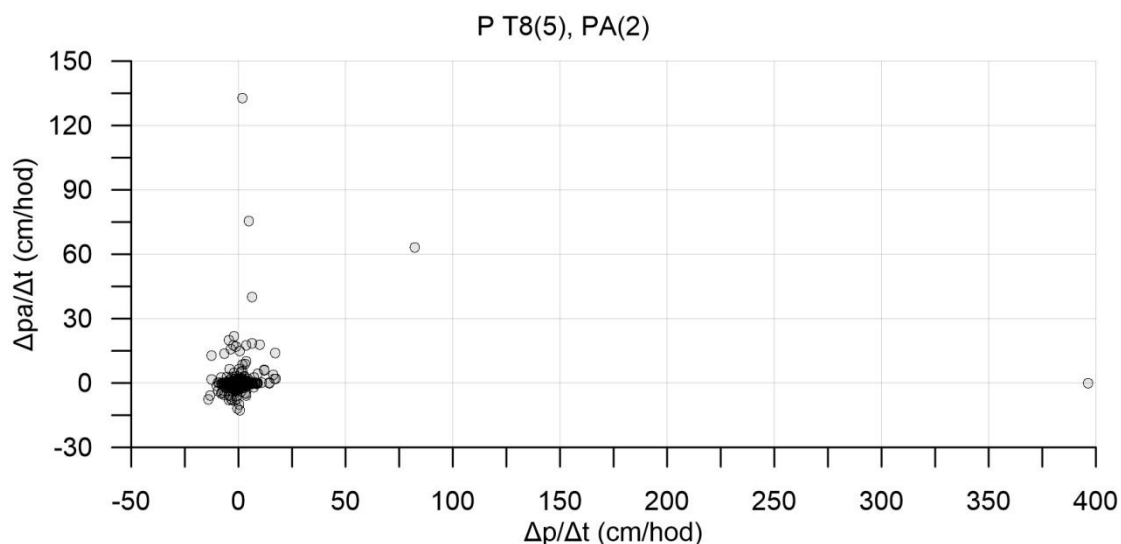


**Obrázek 58:** Graf změny tlakové výšky vody v závislosti na vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. - 31. 10. 2015



**Obrázek 59: Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. - 31. 10. 2015**

Obr. 59 ukazuje, že se malé množství změn tlakové výšky vody pochybuje okolo velikosti -100 cm tlakové výšky vody. Ostatní změny tlakové výšky se naházejí v rozmezí od -40 cm do 0 cm tlakové výšky. U kladných tlakových výšek vody se vyskytují především záporné hodnoty jejich změn. Největší změna tentokrát připadá na kladnou hodnotu tlakové výšky a to 11 cm, kdy tlaková výška vlivem srážky překonala největší rozdíl pro dosažení této hodnoty.

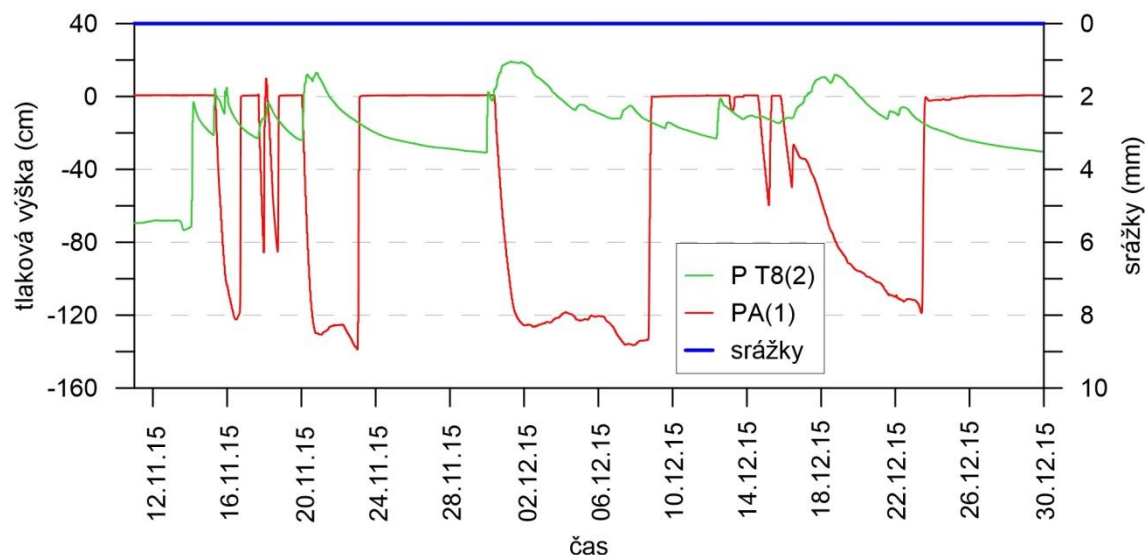


**Obrázek 60: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky v hloubce 36,4 m za období 6. 10. - 31. 10. 2015**

Obr. 60 ukazuje, že stejně jako u předchozích časových interval a u hloubky 36,4 cm se většina hodnot soustřeďuje okolo nuly a to v rozmezí od -25 cm/hod do 25 cm/hod změn tlakové výšky a od -15 cm/hod do 15 cm/hod změn tlaku půdního vzduchu.

Největší změna tlaku půdního vzduchu připadá na nulovou změnu tlakové výšky a největší změna tlakové výšky připadá zase na nulovou změnu tlaku půdního vzduchu.

### 5.1.10 Analýza dat za období 11. 11. – 29. 12. 2015 pro hloubku 15,9 cm



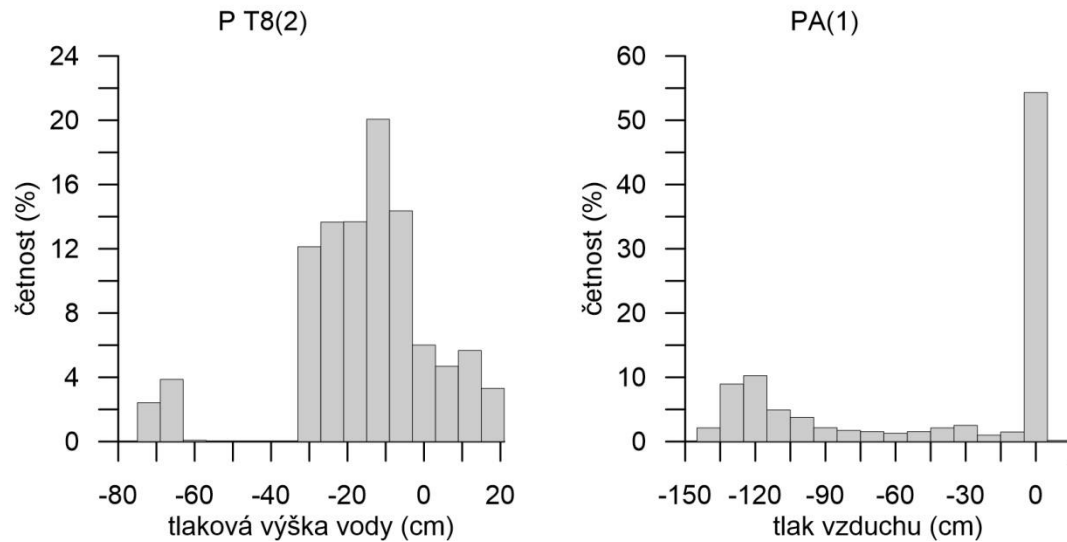
**Obrázek 61: Graf tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm a srážek za období 11. 11. - 29. 12. 2015**

Podle obr. 61 nejsou v časovém období od 11. 11. do 29. 12. 2015 zaznamenané žádné srážkové události, protože se na lokalitě nachází nevytápěný srážkoměr, který srážky při teplotě menší než  $0^{\circ}\text{C}$  nezaznamenává. Avšak se jedná o zimní měsíce, kdy je povrch půdy pokryt sněhovou pokrývkou, která roztává a znovu zamrzá. V tomto období se může v povrchové vrstvě půdy tvořit ledová krusta nebo vrstva vody, která ze shora uzavírá vzduch v půdě. Proto jsou změny tlaku vzduchu v tomto období nejčastější a největší. U tlakové výšky se takové změny tlaku nevyskytují. Tlak vzduchu je nižší než tlaková výška vody, která se často pohybuje v okolí nulového tlaku, je zřejmě významně nasycená z odstávajícího sněhu.

Na obr. 62 jsou třídy u histogramu tlakové výšky vody rozděleny po 6 cm. Maximum má velikost 19,2 cm. Minimální naměřená hodnota má velikost -73,4 cm. V rozmezí od -57 cm do -33 cm se nacházejí třídy s nulovou četností. Naopak největší četnost má třída od -15 cm do -9 cm s četností 20%.

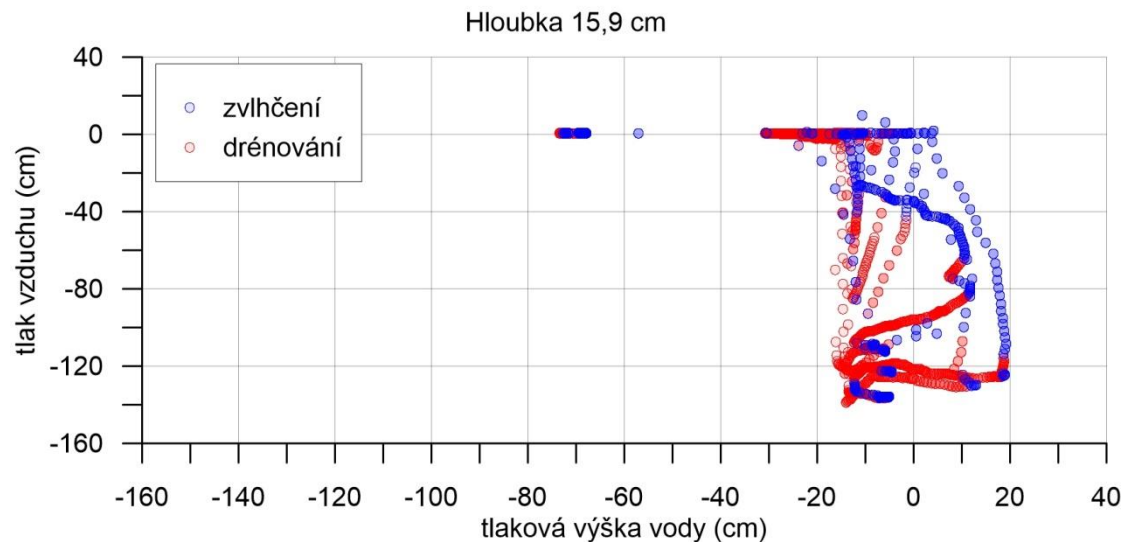
U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou po 10 cm. Naměřené maximum tlaku vzduchu v tomto časovém období má hodnotu 9,84 cm a naopak minimum má velikost -138,8 cm. Největší zastoupení hodnot je opět ve třídě s nulovou hodnotou, která

představuje atmosférický tlak. Tato třída je od -5 cm do 5 cm a nachází se v ní 54% ze všech hodnot z období od 11. 11. do 29. 12. 2015. Všechny ostatní hodnoty tlaku vzduchu mají zápornou hodnotu.

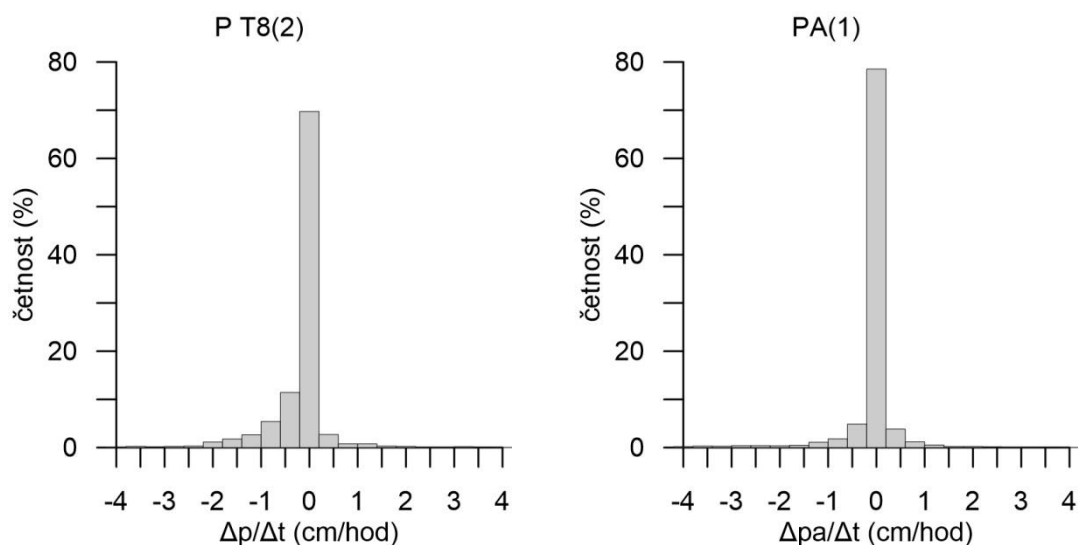


**Obrázek 62: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. - 29. 12. 2015**

Podle obr. 63, při tlakové výšce nižší než -20 cm byla hodnota tlaku půdního vzduchu vždy nulová.



**Obrázek 63: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody v hloubce při drenáži a zvlhčení půdy**



**Obrázek 64: Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9cm za období 11. 11. – 29. 12. 2015**

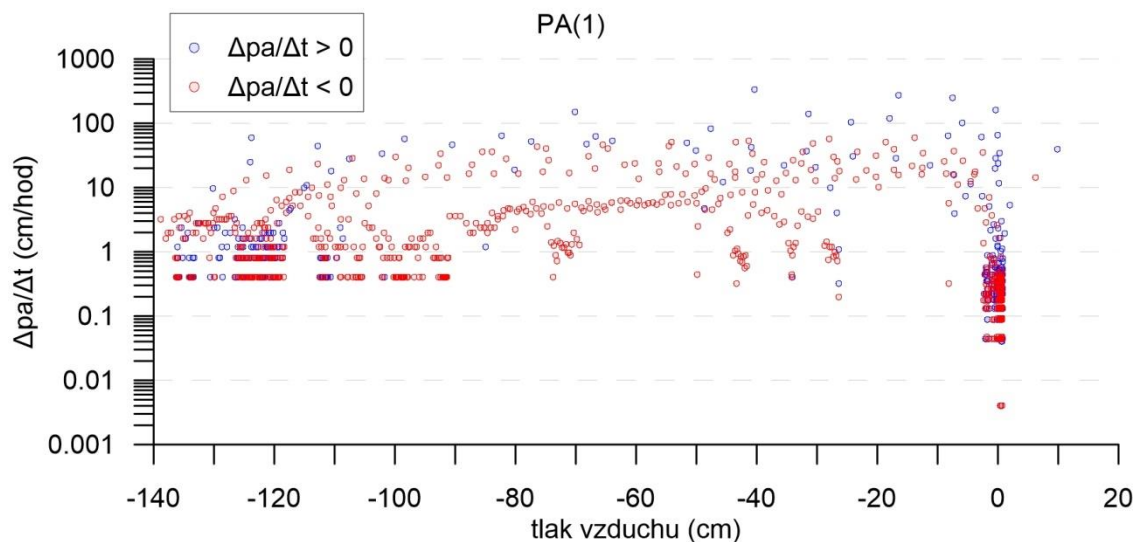
U histogramu změn tlakové výšky vody na obr. 64 jsou třídy po 0,4 cm/hod. Maximální změna tlakové výšky vody má kladnou hodnotu a velikost 173,6 cm/hod. Maximální záporná změna je o velikosti -16,8 cm/hod. I přes vysokou kladnou změnu tlakové výšky jsou nejčetnější záporné změny tlakové výšky. Nejpočetnější třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod má relativní četnost 70% a obsahuje pouze změny tlaku vzduchu o hodnotě nula.

U histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou třídy rozděleny po 0,4 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu má kladnou hodnotu a velikost 333,5 cm/hod a největší záporná změně je o velikosti -59,4 cm/hod. Třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod je nepočetnější a její relativní četnost činí 78,5%. Změny tlaku půdního vzduchu o velikosti nula představují 65% ze všech změn tlaku půdního vzduchu v daném období v hloubce 15,9 cm.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 7.

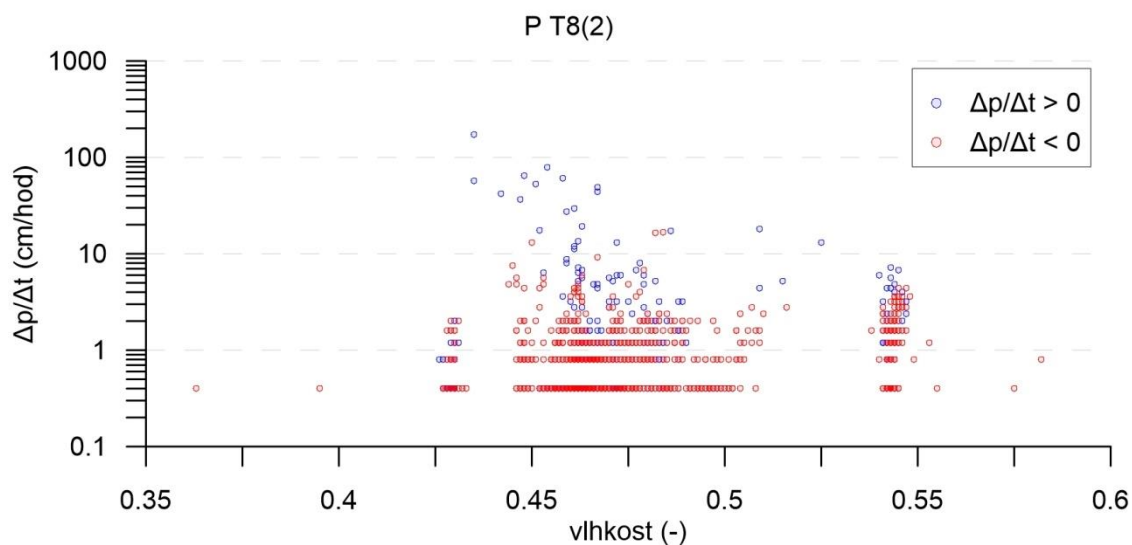
Z obr. 65 vyplývá, že největší četnost změn tlaku půdního vzduchu nastává v blízkosti nulové hodnoty tlaku půdního vzduchu. Mezi hodnotami -90 cm a 0 cm tlaku půdního vzduchu se nacházejí ty největší změn. V tomto rozmezí se vyskytuje také nejméně změn, protože změna z nulového tlaku půdního vzduchu byla prudká. Nulové hodnoty se vyskytují s tlakem vzduchu 0 cm a od -140 cm do -90 cm.



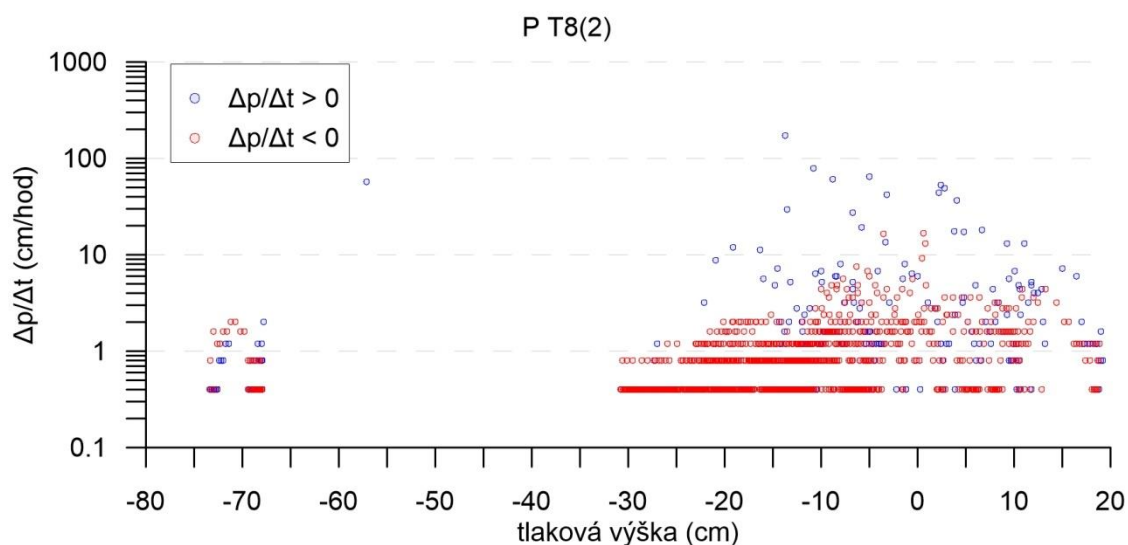


Obrázek 65: Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlak půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. - 29. 12. 2015

Obr. 66 ukazuje, že u vlhkosti 0,55 se nachází sloupec tvořený především zápornými změnami tlakové výšky stejně jako u změny tlaku půdního vzduchu. Největší změna připadá na vlhkost o hodnotě 0,43. Nulové změny tlakové výšky se vyskytují v rozmezí vlhkostí od 0,425 do 0,5.

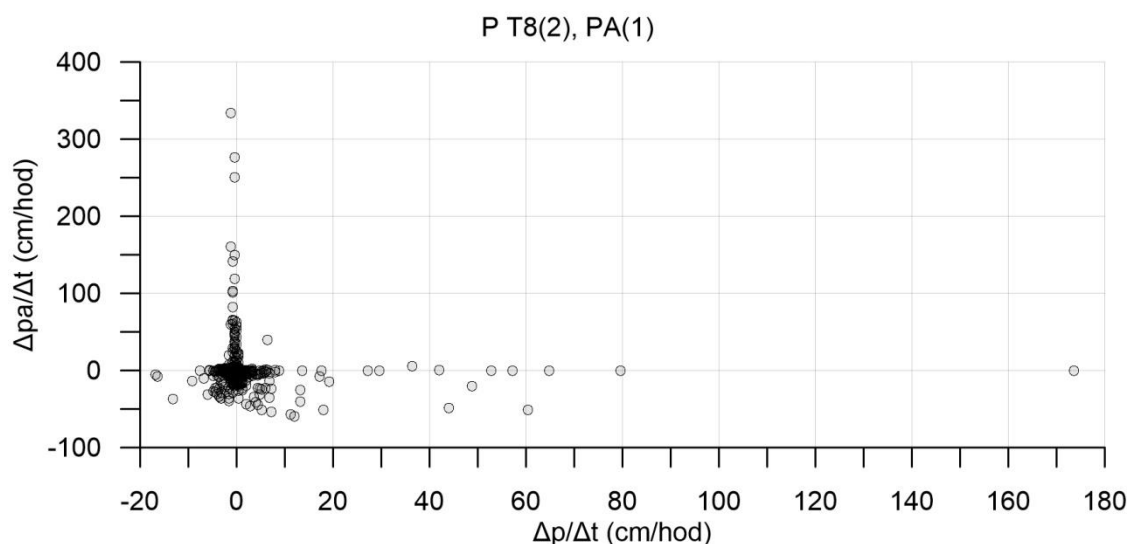


Obrázek 66: Graf změny tlakové výšky v závislosti na vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. - 29. 12. 2015



**Obrázek 67:** Graf změny tlakové výšky vody a tlaková výška vody v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. - 29. 12. 2015

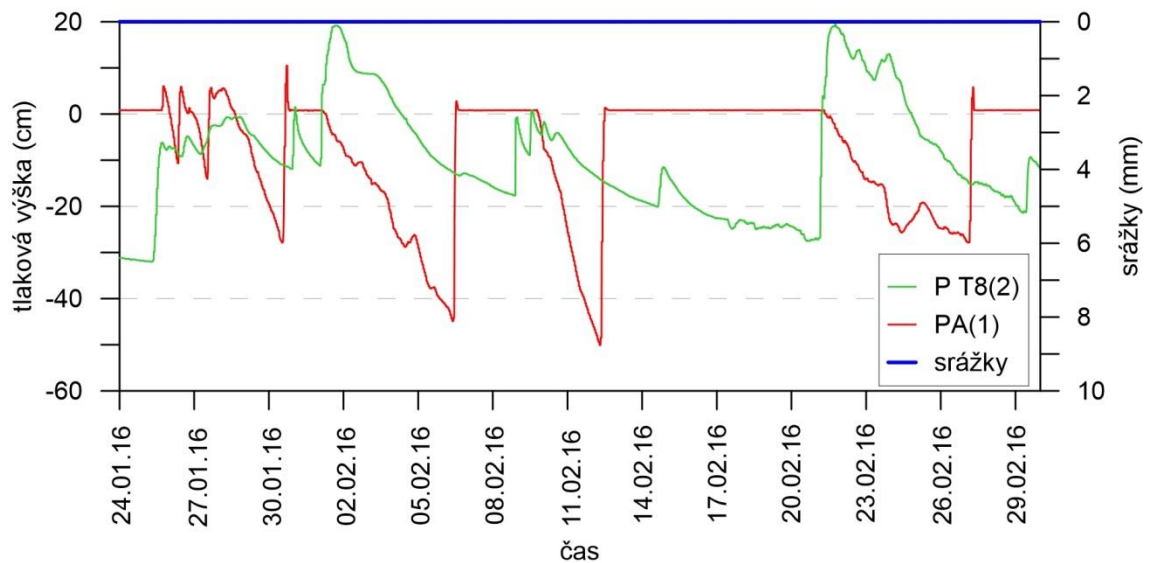
Podle obr. 67 se změny tlakové výšky nacházejí především rozmezí tlakové výšky od -30 cm do 0 cm. Menší shluk datových bodů se vyskytuje kolem -70 cm tlakové výšky. Největší změna tlakové výšky připadá na tlakovou výšku o velikosti -14 cm. Nulové změny se nacházejí po celém naměřeném rozmezí tlakové výšky kromě -77 cm do -32 cm.



**Obrázek 68:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. - 29. 12. 2015

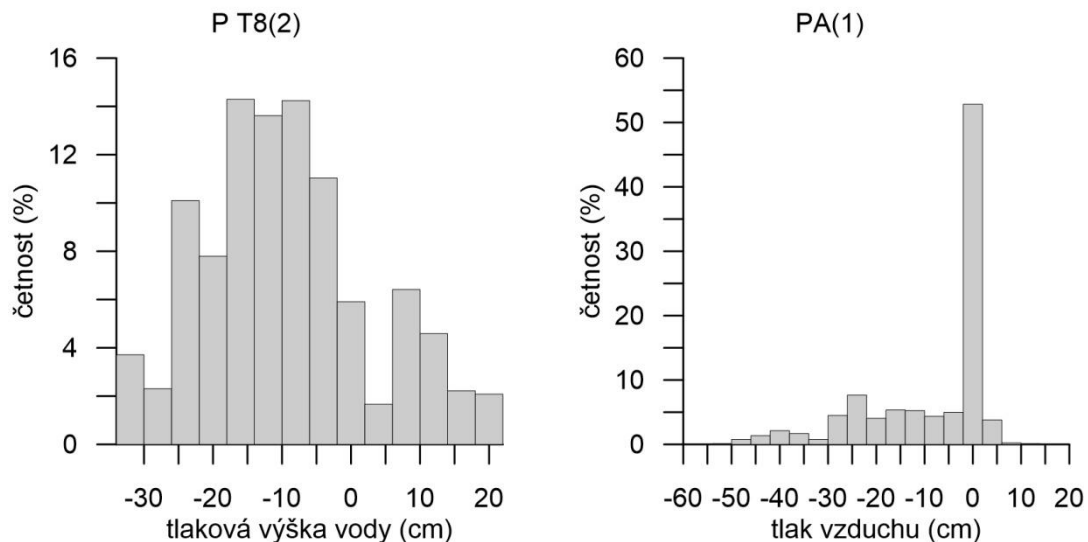
Z obr. 68 je patrné, že změny tlaku půdního vzduchu se vyskytují především v rozmezí od -20 cm/hod do 20 cm/hod. Změny tlakové výšky vody připadající na tyto změny tlakové výšky vody se pohybují v rozmezí od 0 cm/hod do -100 cm/hod.

### 5.1.11 Analýza dat za období 24. 1. – 29. 2. 2016 pro hloubku 15,9 cm



**Obrázek 69:** Graf tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm a srážek za období 24. 1. - 29. 2. 2016

Z obr. 71 je vidět, že v časovém intervalu 24. 1. – 29. 2. 2016 stejně jako u předchozího časového intervalu nejsou zaznamenány srážkové události. Jedná se stále o zimní měsíce, během kterých leží na povrchu sněhová pokrývka nebo ledová vrstva, která uzavírá ze shora vzduch v půdě. Tlak půdního vzduchu se dostává do nižších hodnot než tlaková výška, která se dvakrát dostane do kladných hodnot. Čepička tenzometru se v tomto případě nacházela pod hladinou podzemní vody.

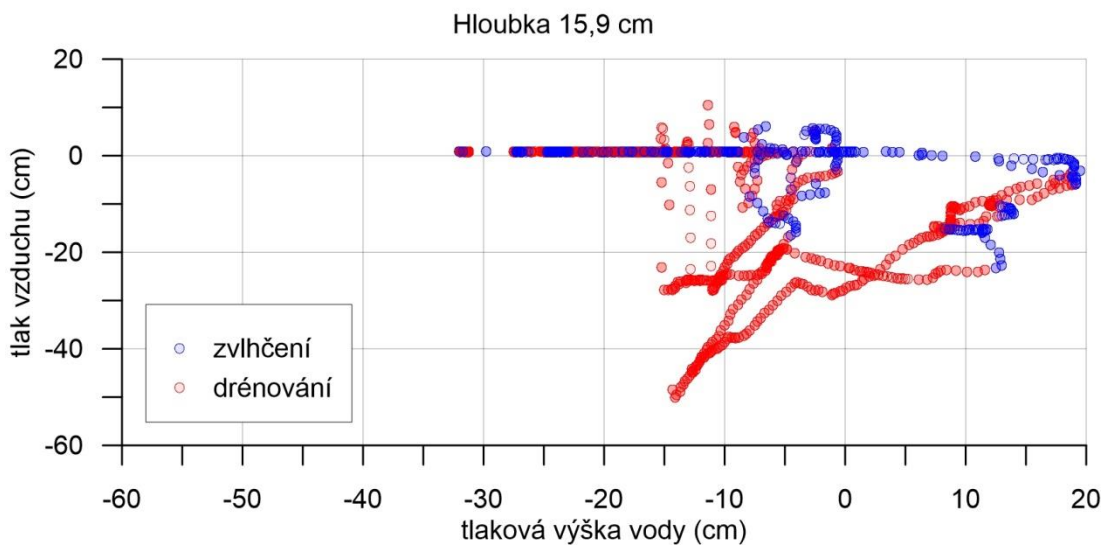


**Obrázek 70:** Histogram tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. – 29. 2. 2016

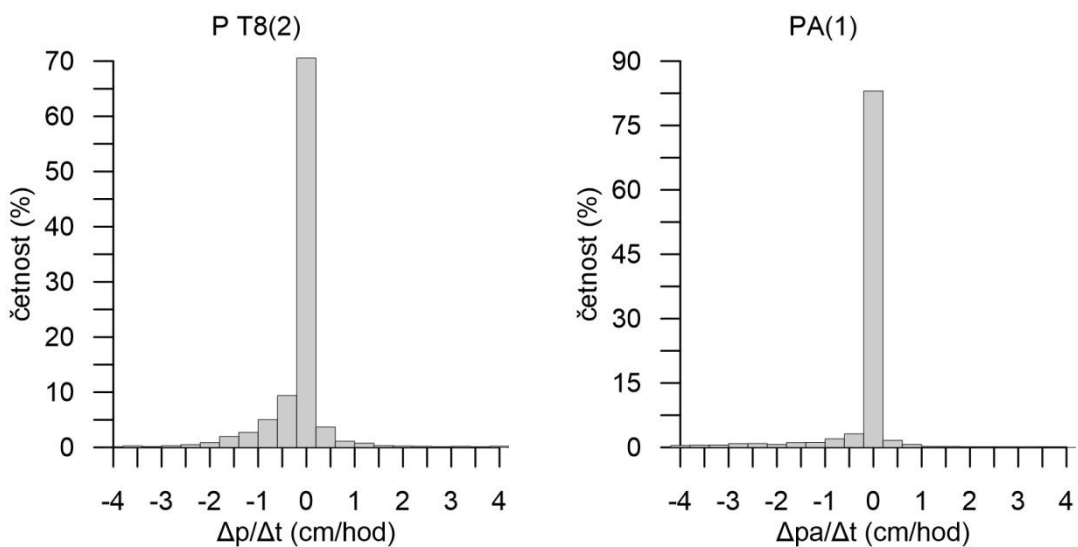
Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 70 jsou rozděleny po 4 cm. Maximální hodnota tlakové výšky vody je 19,5 cm a minimální hodnota má velikost -32 cm. Oproti

jiným časovým intervalům je v tomto intervalu 16% hodnot kladných. To je nejvíce ze všech časových intervalů.

U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou rozděleny po 4 cm. Maximum tlaku vzduchu má velikost 10,49 cm a naopak minimum má hodnotu -50,08 cm. Nejvíce hodnot je opět ve třídě s nulovými hodnotami. Je to třída od -2 cm do 2 cm. V této třídě se nachází 52% ze všech naměřených hodnot v daném časovém intervalu. Na rozdíl od tlakové výšky je zastoupení kladných hodnot tlaku půdního vzduchu pouze 4%. Nejvíce hodnot se pohybuje v záporných hodnotách.



**Obrázek 71:** Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody při zvlhčení a drenáži půdy

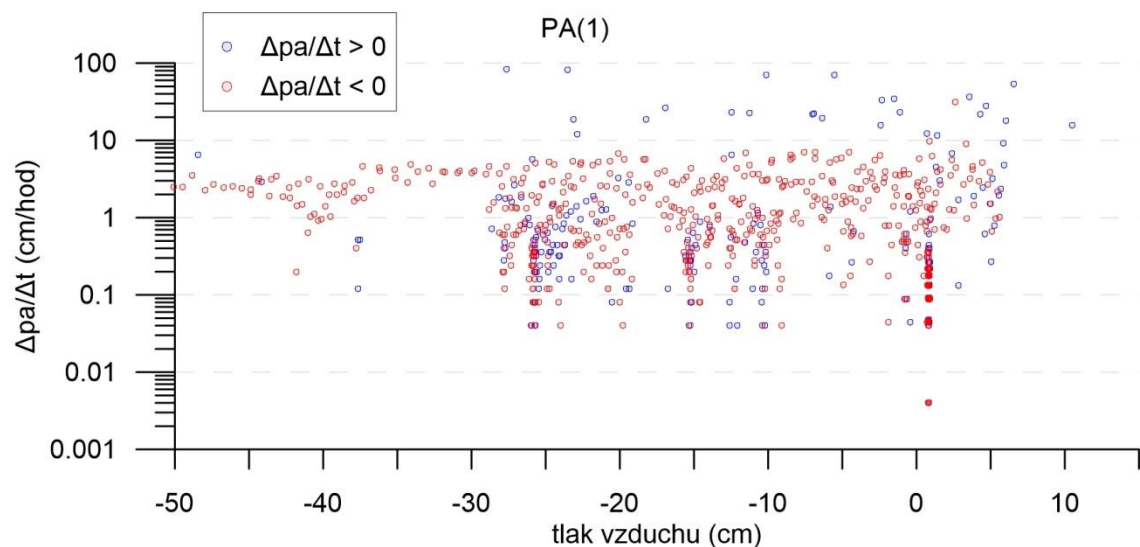


**Obrázek 72:** Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. - 29. 2. 2015

U obr. 72 jsou třídy u histogramu změn tlakové výšky vody rozděleny po 0,4 cm/hod. V nejpočetnější třídě, která je od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod se proto nacházejí pouze změny tlakové výšky o velikosti nula. Tato třída má relativní četnost 70,5 %. Maximální změna změny tlakové výšky je opět kladná a má velikost 66,4 cm/hod a největší záporná změna je o velikosti -8 cm/hod.

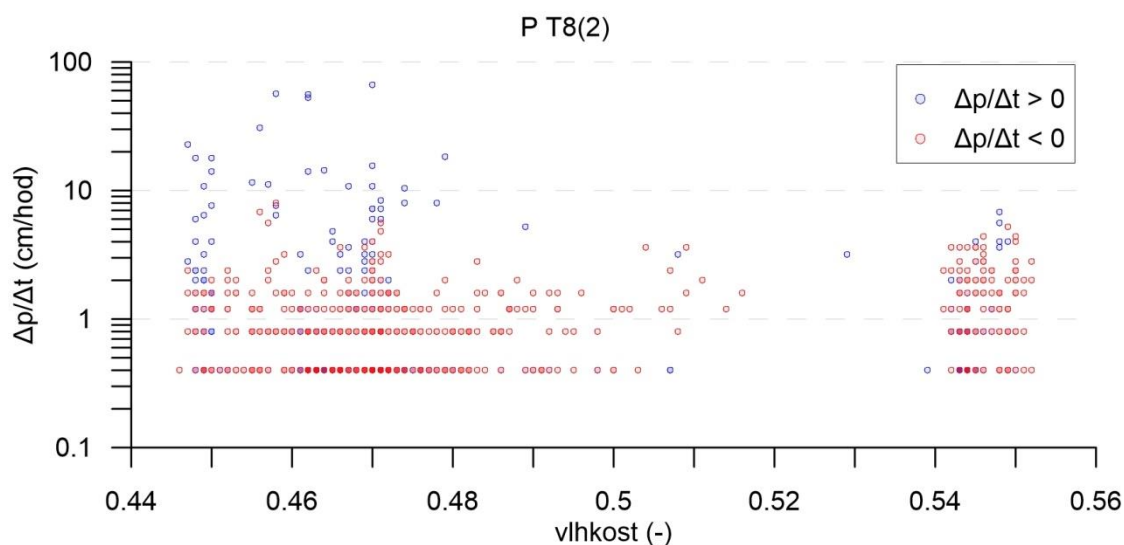
Rozdělení tříd u změn tlaku vzduchu je po 0,4 cm/hod. Největší změna má také kladnou hodnotu a její velikost je 83,1 cm/hod. Třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod má největší relativní četnost a to 83%. Změny tlaku půdního vzduchu o velikosti nula zaujímají 65%.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky a graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na vlhkosti je uveden v příloze 8.



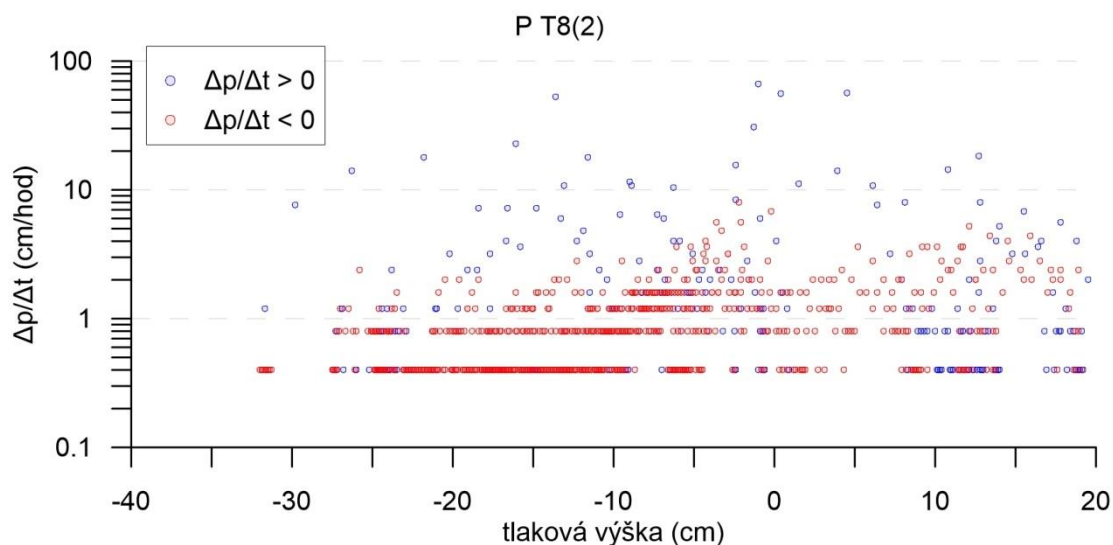
**Obrázek 73:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. - 29. 2. 2015

Z obr. 73 je patrné, že jako u většiny časových intervalů i zde má tlak půdního vzduchu, na který připadá nejvíce změn, hodnotu blízkou nule. Největší změny tlaku půdního vzduchu tentokrát nepřipadají na nulový tlak vzduchu, ale nacházejí ve větším rozmezí a to od -36 cm do -2 cm hodnot tlaku půdního vzduchu.



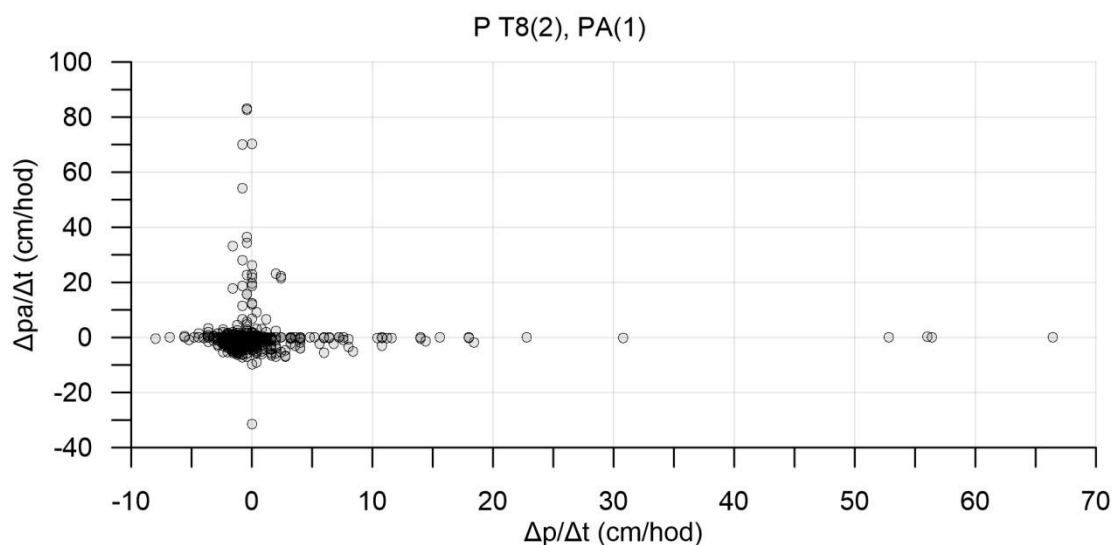
**Obrázek 74:** Graf změny tlakové výšky vody v závislosti na vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. - 29. 2. 2015

Obr. 74 ukazuje, že mezi vlhkostí 0,54 až 0,55 se nachází shluk datových bodů. Největší změny tlakové výšky opět připadají na nejmenší vlhkosti a nulové změny tlakové výšky se vyskytují rovnoměrně od nejmenších naměřených vlhkostí po hodnotu vlhkosti 0,51.



**Obrázek 75:** Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. - 29. 2. 2015

Velké změny tlakové výšky připadají na celé naměřené rozmezí hodnot tlakových výšek v tomto časovém intervalu, což je patrné z obr. 75.



**Obrázek 76: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. - 29. 2. 2015**

Obr. 76 ukazuje, že jako u předchozích časových intervalů se opakuje trend největších změn tlaku půdního vzduchu připadajících na nulové hodnoty změny tlakové výšky vody a naopak největších změn tlakové výšky, připadající na nulové změny tlaku půdního vzduchu. Nejvíce změn tlaku půdního vzduchu se nachází v rozmezí -10 cm/hod a 10 cm/hod změny tlakové výšky. Změny tlaku půdního vzduchu jsou v tomto rozmezí především záporné.

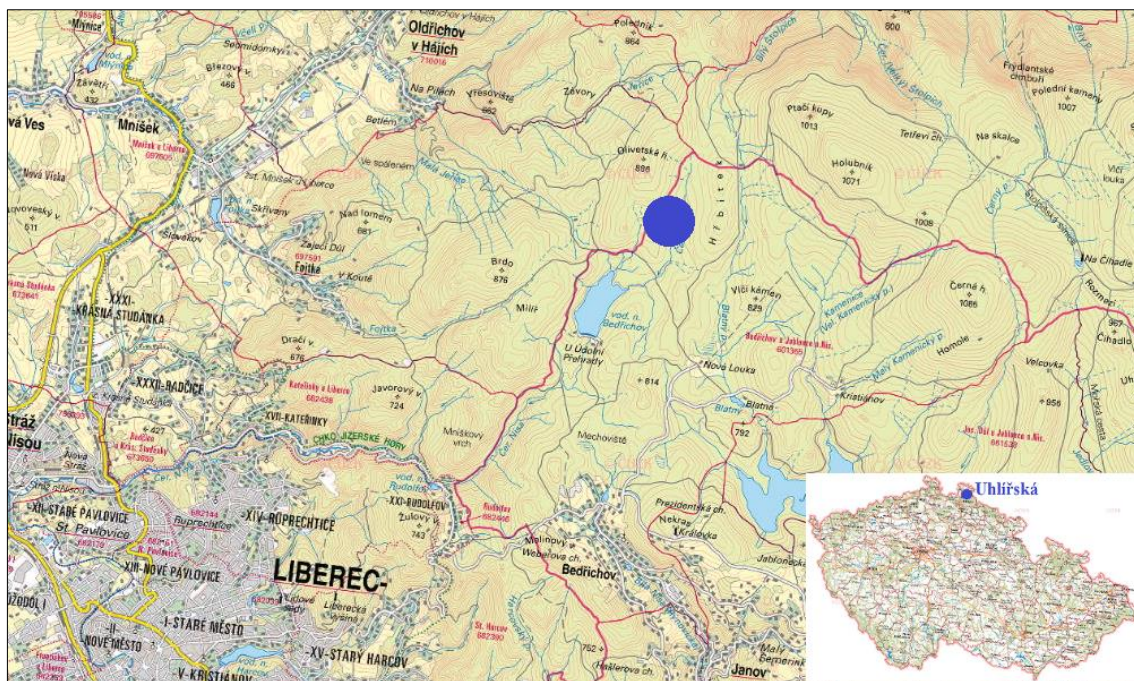


## 5.2 Jizerské hory - Uhlířská

### 5.2.1 Charakteristika lokality

Experimentální povodí Uhlířská se nachází na severu České republiky v Jizerských Horách. Zaujímá plochu 1,87 km<sup>2</sup> horní části povodí Černé Nisy. Průměrná nadmořská výška povodí je 822 m n. m. a průměrný sklon povodí je 2,3%. Průměrná roční teplota je 4,5°C a srážkový úhrn je nejvyšší v České republice a převyšuje 1200mm/rok. (Tachecí, 2002)

Půda je klasifikovaná jako kambizemě s označením hnědé půdy kyselé. Z hlediska půdního druhu dle Nováka se jedná o hlinitopísčité až písčitolhinité půdy. „Půdní profil je tvořen 5 cm vegetačního krytu, 10 až 15 cm zrašelinělé humusové vrstvy černé barvy, 10 cm přechodové oglejené šedočerné jílovitohlinité vrstvy, 30 cm hnědé či okrové hlinitopísčité vrstvy a 30 cm eluviální žlutohnědé vrstvy, která plynule přechází do zvětralého žulového substrátu.“ (Šanda et al., 2006)



Obrázek 77: Poloha experimentálního povodí Uhlířská (upraveno ČÚZK, 2016)

### 5.2.2 Materiál

Na lokalitě Uhlířská se nachází několik meteorologických stanic, na kterých se měří přízemní teplota a teplota vzduchu ve 2 metrech, radiace, srážky a rychlost a směr větru. Od roku 2015 jsou zde naistalována i tři čidla tlaku půdního vzduchu ve třech různých hloubkách. Dále jsou zde naistalovány tenzometry UMS T8 a UMS T4 a vlhkostní čidla CS616.

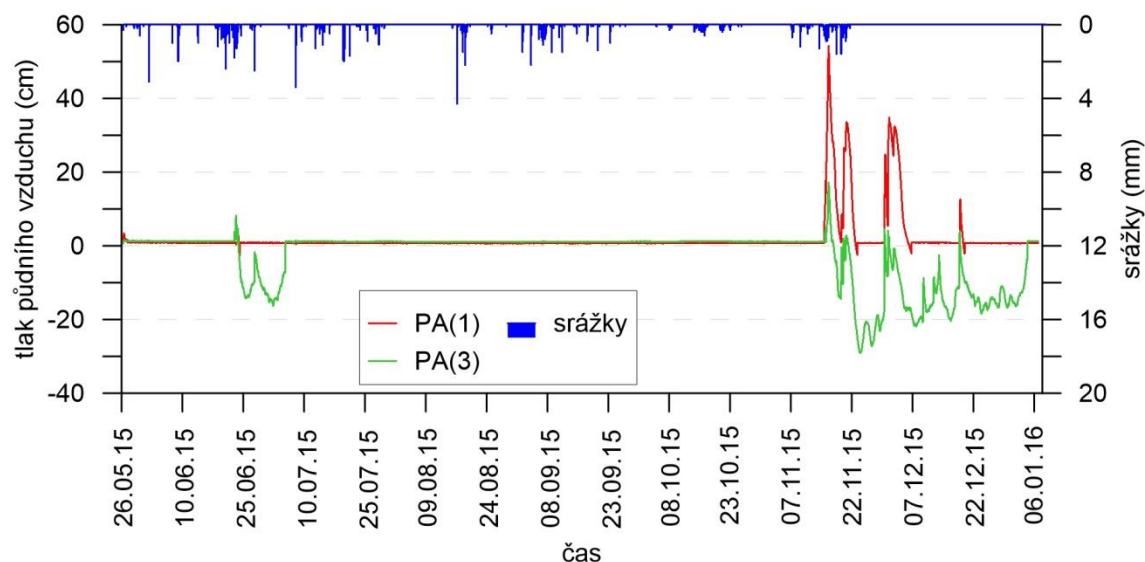


Data použitá v analýze pocházejí ze dvou tenzometrů UMS T8, třech tenzometrů UMS T4 a ze tří čidel tlaku půdního vzduchu. Označení tenzometrů a čidel tlaku půdního vzduchu a hloubky, ve kterých jsou naistalována, jsou uvedeny v tabulce č. 5. Časový interval mezi datovými záznamy tlakové výšky a tlaku vzduchu je po 5-ti minutách, srážky jsou zaznamenávány v 10 minutovém intervalu.

**Tabulka 5: Označení a hloubka tenzometrů, čidel tlaku vzduchu a vlhkostních čidel**

Označení tenzometru	Hloubka (cm)	Označení čidla tlaku půdního vzduchu	Hloubka (cm)
P T8(1)	23,7	PA(1)	17
P T8(2)	64,7	PA(2)	38,2
P T4(1)	24,4	PA(3)	55,9
P T4(2)	42,8		
P T4(3)	52,7		

Celkové analyzované období na lokalitě Uhlířská je od 26. 5. 2015 do 7. 1. 2016. Toto časové období je pro lepší přehlednost rozděleno do dvou časových intervalů, ve kterých čidla tlaku vzduchu zaznamenala jiný tlak než tlak nulový, který představuje atmosférický tlak, jak je vidět na obr. 78.



**Obrázek 78: Graf tlaku půdního vzduchu a srážek na lokalitě Uhlířská za období 26. 5. 2015 - 7. 1. 2016**

K čidlu s označením PA(2), které se nachází v hloubce 38,2 cm, je přiřazen tenzometr s označením P T4(2), který je naistalován v hloubce 42,8 cm. Tento tenzometr vykazuje chybné měření a k čidlu PA(2) nelze přiřadit jiný tenzometr, protože zbylé tenzometry

se nacházejí v příliš hluboké nebo mělké hloubce. Z tohoto důvodu bylo čidlo PA(2) z analýzy vyřazeno.

**Tabulka 6: Tenzometry a čidla, která jsou porovnávána**

<b>Hloubka (cm); podle čidla tlaku vzduchu</b>	<b>Tenzometr</b>	<b>Čidlo tlaku vzduchu</b>	<b>Období</b>
17	P T8(1)	PA(1)	2
55,9	P T4(3)	PA(3)	1, 2

#### Označení časových intervalů

1) 22. červen – 5. červenec 2015

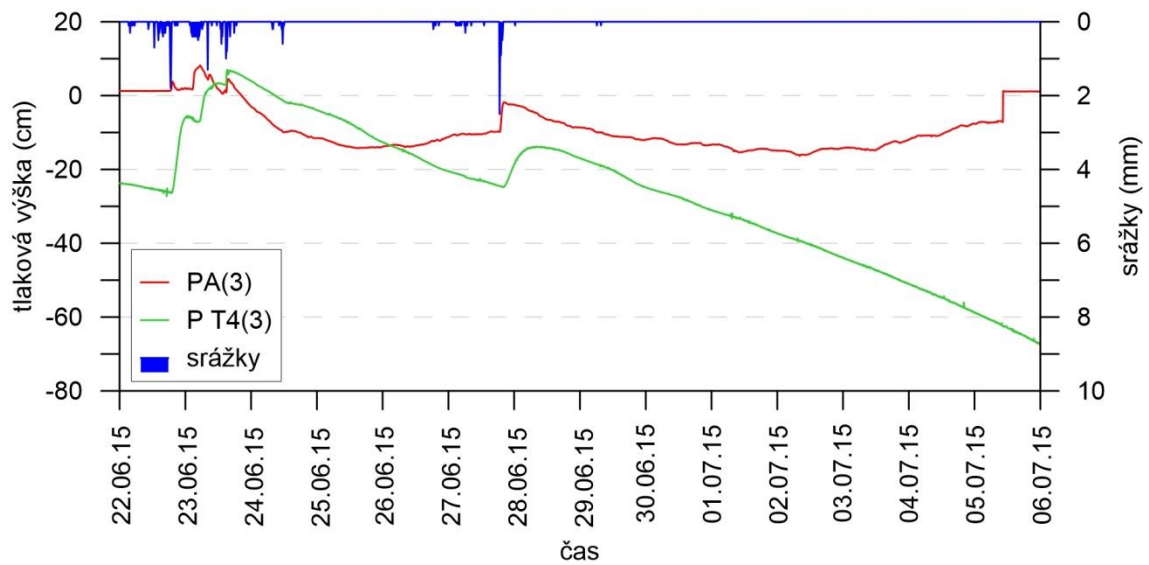
Jedná se o letní období, kdy se vyskytly čtyři srážkové události. V tomto intervalu čidlo PA(1) (hloubka 17 cm) nenaměřilo žádnou změnu oproti atmosférickému tlaku, analýza proto období je provedena pouze pro hloubku 55,9 cm.

2) 7. listopad 2015 – 7. leden 2016

V tomto časovém období zaznamenala obě čidla hodnoty tlaku půdního vzduchu odlišné od hodnoty atmosférického tlaku. Časový interval trvá od podzimu do zimy, protože na tomto experimentálním povodí jsou také naistalovány nevyhřívané srážkoměry, data o srážkových událost od půlky listopady chybí. V době, kdy srážkoměr zaznamenával srážky, se vyskytly čtyři srážkové události.

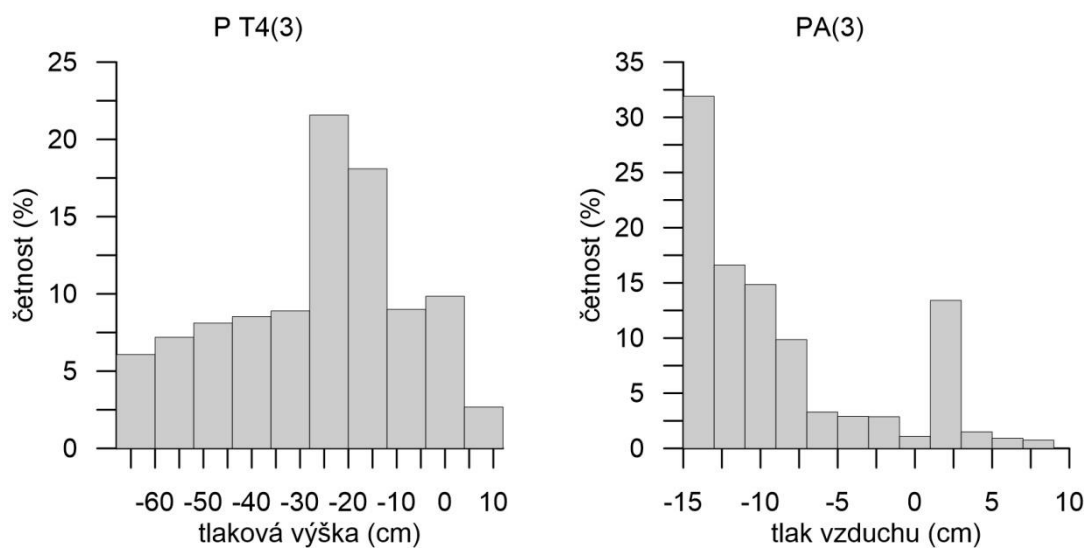
Data pro analýzu byla zpracována stejnou metodikou, jako u lokality Roklan viz kapitola 5.1.3

### 5.2.3 Analýza dat za období 22. 6. 2015 – 5. 7. 2015 pro hloubku 55,9 cm



**Obrázek 79: Graf tlakové výšky vody a tlaku vzduchu v hloubce 55,9 cm a srážek za období 22. 6. - 5. 7. 2015**

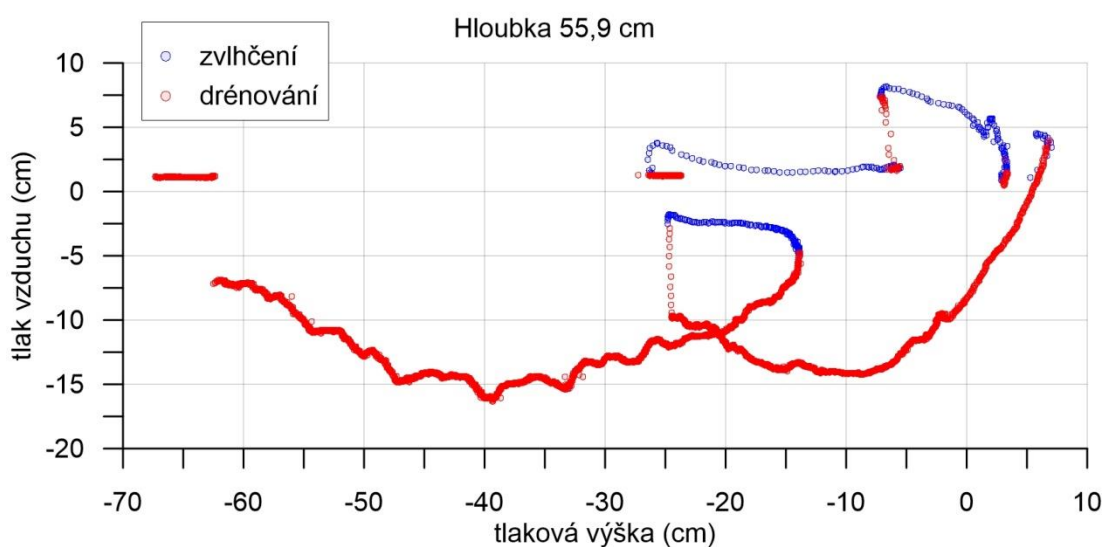
Po srážce se zvyšuje množství vody v půdě a tím i se zvyšuje i tlaková výška vody. Z obr. 79 je patrné, že s tlakovou výškou se začne zvyšovat i hodnota tlaku půdního vzduchu. Po skončení srážkové události, začne tlaková výška vody i tlak půdního vzduchu klesat. Při dosažení hodnoty tlaku půdního vzduchu -16 cm tlak vzduchu pomalu stoupá až do doby, kdy jeho hodnota skočí na hodnoty atmosférického tlaku. V tomto časovém intervalu se tlak půdního vzduchu nestihne po první srážce vrátit na hodnotu atmosférického tlaku, protože nastane další srážka, která zapříčiní, že proces poklesu tlaku půdního vzduchu i tlakové výšky začne od začátku.



**Obrázek 80: Histogram tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 22.6. - 5. 7. 2015**

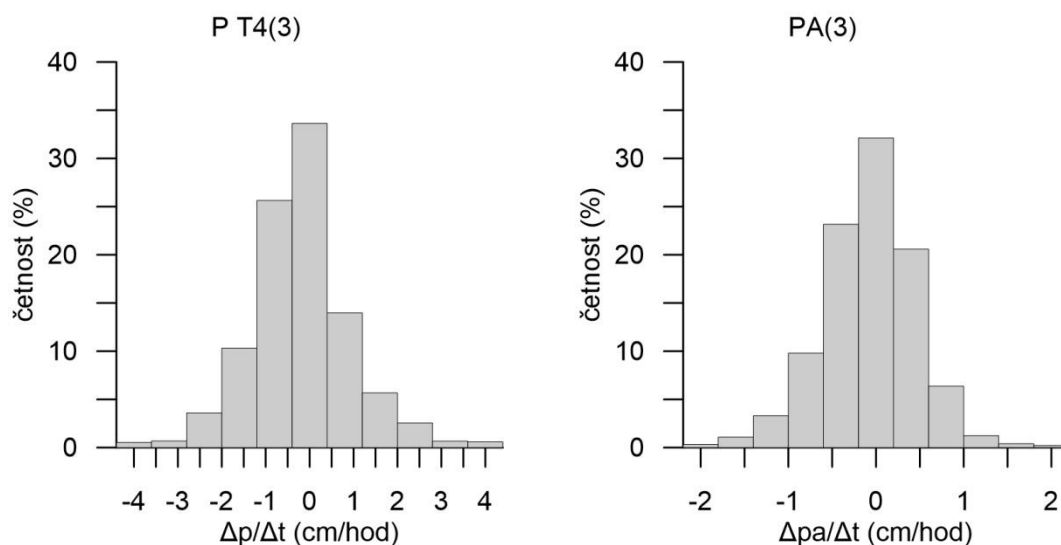
U obr. 80 jsou třídy u histogramu tlakové výšky rozděleny po 8 cm. S relativní četností 21,5% se nejvíce hodnot tlakové výšky pohybuje v intervalu od -28 cm do -20 cm. Maximální hodnota tlakové výšky je 7 cm naopak nejnižší hodnota má velikost -63,7 cm. Nejvíce tlakových výšek nabývá záporných hodnot.

U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou třídy rozděleny po 2 cm. Maximální tlak půdního vzduchu má velikost 8,1 cm a naopak nejnižší má velikost -16,3 cm. Nejvíce hodnot tlaku půdního vzduchu jsou ve třídě od -15 cm do -13 cm. Do této třídy zároveň spadají nejnižší hodnoty tlaku půdního vzduchu. Tlak půdního vzduchu nabývá především záporných hodnot.



**Obrázek 81: Tlak půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy**

Podle obr. 81 se půda v tomto období především drénovala. Hodnoty tlaku půdního vzduchu nižší než -5 cm se vyskytovaly jenom při drenáži stejně tak jako tlakové výšky nižší než -25 cm. Na tlakové výšky nižší než -64 cm připadají pouze nulové hodnoty tlaku půdního vzduchu. U drenáže je vidět, že při poklesu tlakové výšky nejdříve tlak půdního vzduchu klesá, a při dalším snížení tlakové výšky začne tlak půdního vzduchu stoupat. A naopak při zvlhčení nastane stoupání jak tlakové výšky, tak i tlaku půdního vzduchu. Body zvlhčení a drenáže na sebe plynule navazují.



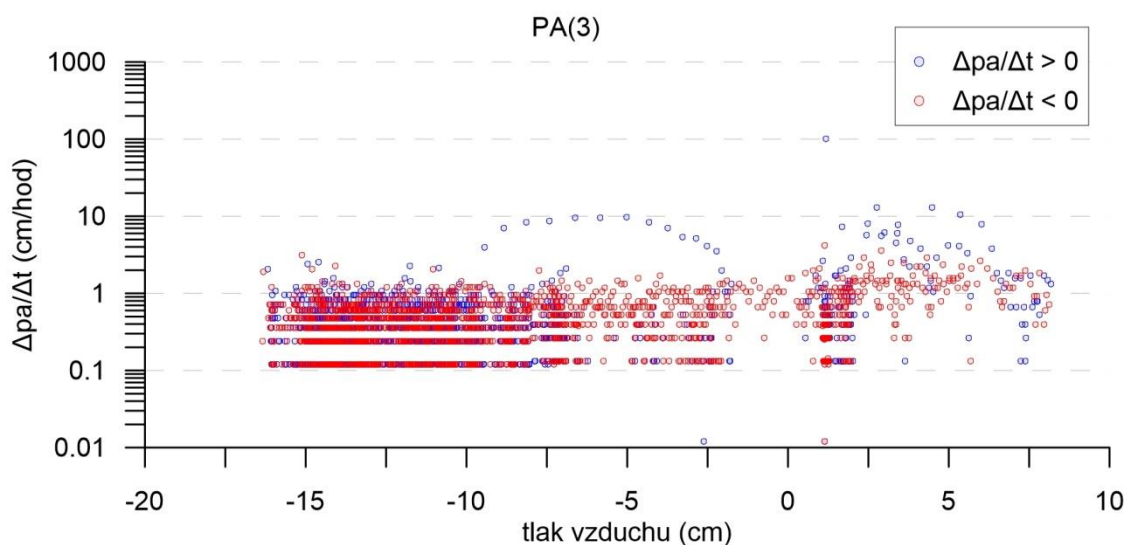
**Obrázek 82: Histogram změn tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 22. 6. - 5. 7. 2015**

Rozdělení tříd u histogramu změny tlakové výšky vody na obr. 82 je po 0,8 cm/hod. Nejvíce hodnot spadá do třídy, která obsahuje nulové. Tato třída má relativní četnost 33,6% a je od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod. Největší změna tlakové výšky nabývá kladné hodnoty a její velikost je 28,7 cm/hod. Nejvyšší pokles tlakové výšky je -17,1 cm/hod. Nulové změny představují pouze 4,1%.

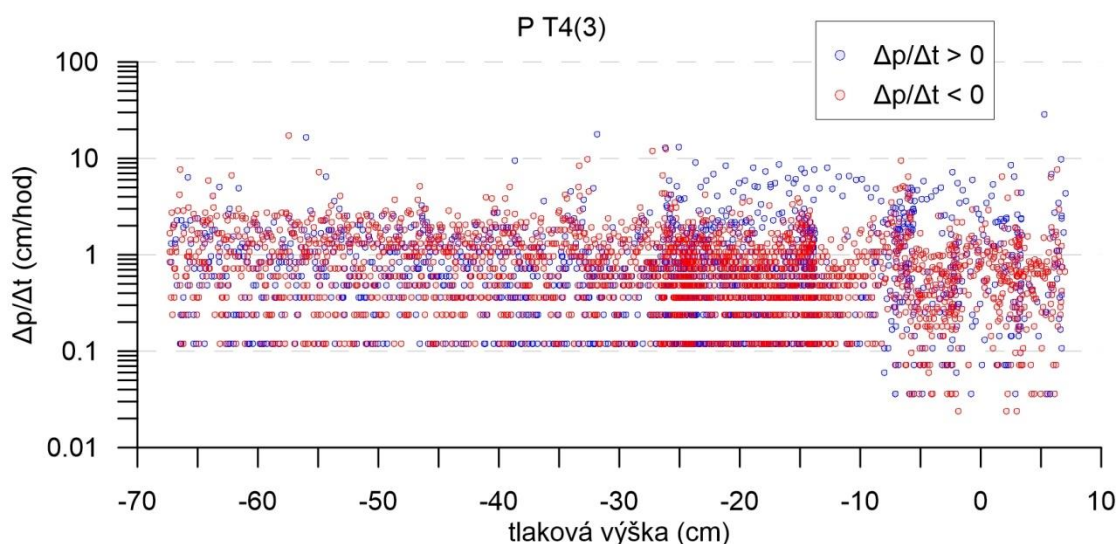
Třídy u histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou po 0,4 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu nabývá kladné hodnoty a její velikost je 100,5 cm/hod. Největší záporná hodnota změny činí -4,2 cm/hod. Největší relativní četnost 32,1 % má třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod. Nulové hodnoty změny tlaku půdního vzduchu představují 11,5% ze všech změn tlaku půdního vzduchu v tomto časového intervalu.

Z obr. 82 vyplývá, že u změny tlaku půdního vzduchu vůči tlaku půdního vzduchu se nejvíce změn tlaku půdního vzduchu odehrává v rozmezí od -16 cm do -7 cm tlaku půdního vzduchu. Z grafu také vyplývá, že pokud tlak půdního vzduchu nabyt vyšší hodnoty než 0 cm, byla tato hodnota pouze přechodná a rychle se změnila, protože se v této oblasti nachází málo změn a také málo malých změn nebo změn o hodnotě nula.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky je uveden v příloze 9.

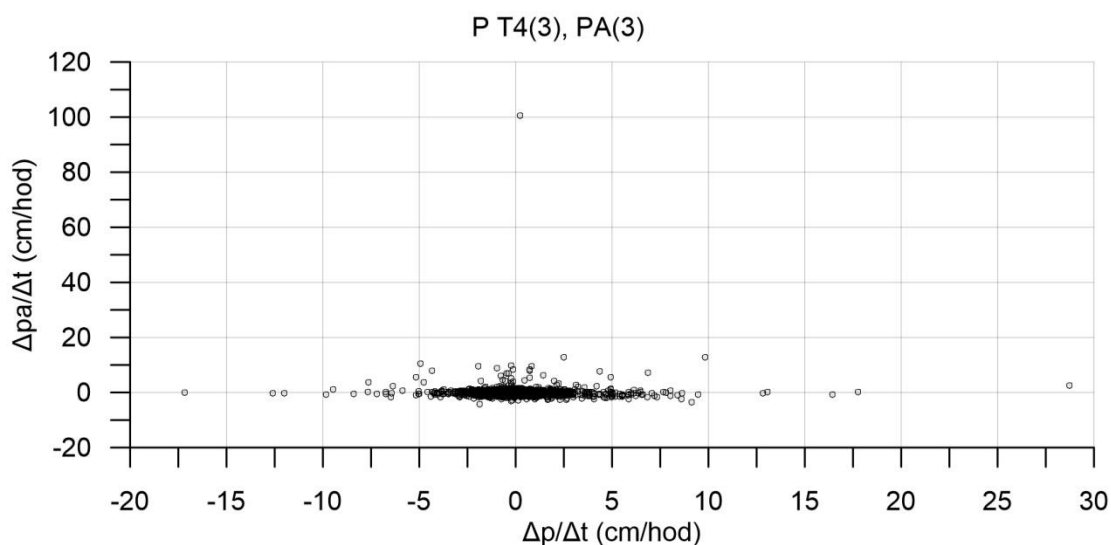


Obrázek 83: Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 22. 6. - 5. 7. 2015



Obrázek 84: Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 55,9 cm za období 22. 6. - 5. 7. 2015

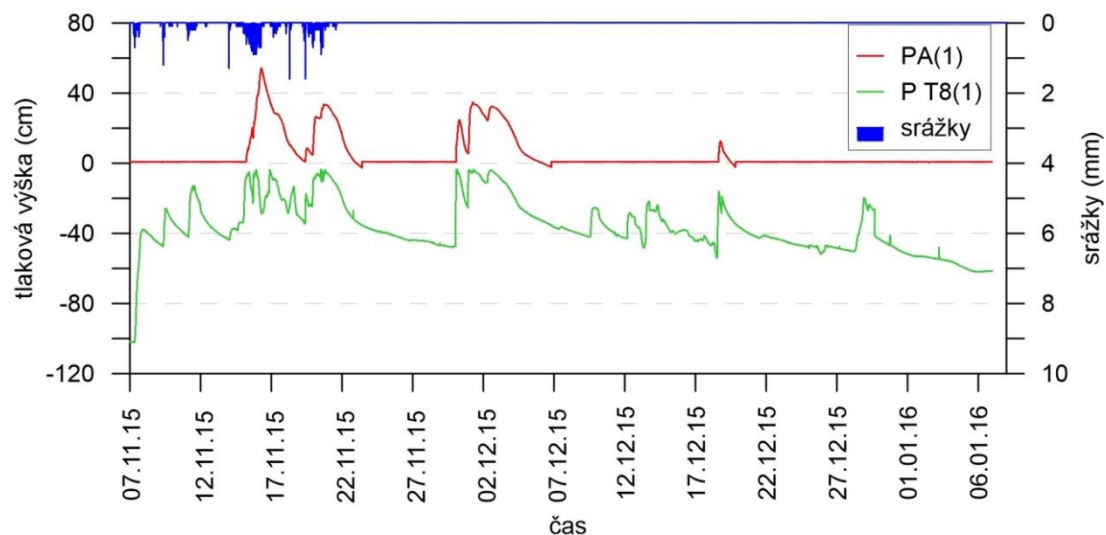
U změn tlakové výšky vody na obr. 84 se v rozmezí hodnot tlakové výšky vody od -10 cm do 10 cm odehrávají nejmenší a nulové změny. Změna mezi těmito tlakovými výškami vody není tedy nikterak veliká. Nejvíce změn tlakové výšky vody připadá na rozmezí od -30 cm do -10 cm. V tomto rozmezí jsou změny tlakové výšky vody intenzivnější.



**Obrázek 85: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 55,9 cm za období 22. 6. - 5. 7. 2015**

Na obr. 85 největší změny tlakové výšky připadají na nulové změny tlaku půdního vzduchu a naopak největší změny tlaku půdního vzduchu připadají na nulové změny tlakové výšky. Ostatní změny vyskytují v rozmezí od -10 cm/hod do 10 cm/hod změny tlaku půdního vzduchu a od -10 cm/hod do 10 cm/hod změny tlakové výšky.

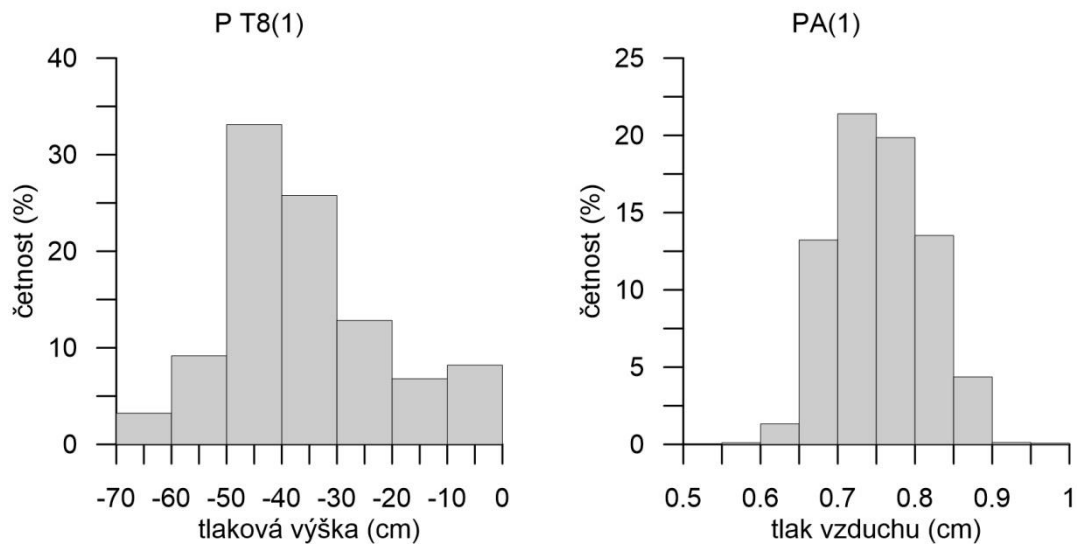
#### 5.2.4 Analýza dat za období 7. 11. 2015 – 7. 1. 2016 pro hloubku 17 cm



**Obrázek 86: Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 17 cm a srážek za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

Na obr. 88 je patrné, že od konce listopadu nejsou zaznamenány žádné srážky. Data o srážkách pocházejí ze srážkoměru, který není vyhříváný, proto od konce listopadu, kdy

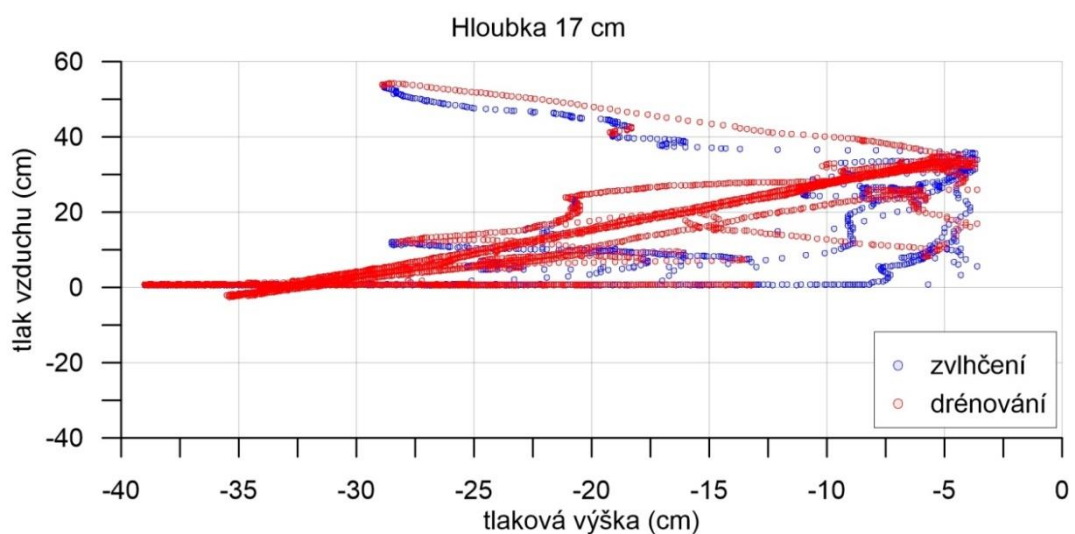
se již vyskytují nižší teploty, nezaznamenal žádné srážky. Tlak půdního vzduchu nabývá především kladných hodnot a kopíruje chování tlakové výšky.



**Obrázek 87: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 87 jsou rozděleny po 10 cm. Všechny hodnoty tlakové výšky mají záporné hodnoty. Nejvíce hodnot se nachází ve třídě od -50 cm do -40 cm. Tato třída má relativní četnost 33%. Maximální tlaková výška vody má hodnotu -3,6 cm a nejnižší má velikost -102,2 cm.

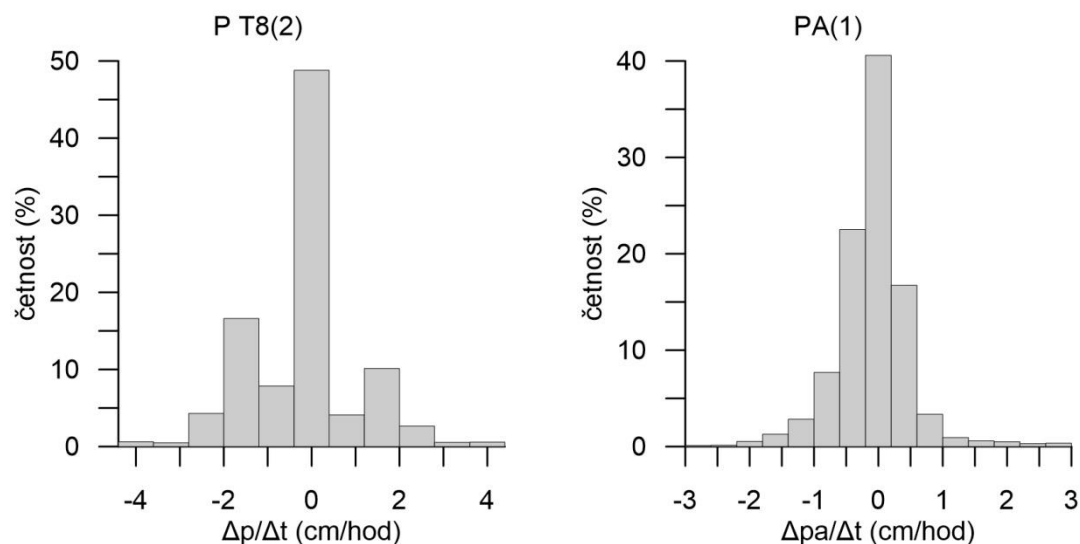
Přibližně 80% hodnot tlaku půdního vzduchu naměřeno v rozmezí od 0,6 cm do 1 cm. U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou proto rozděleny po 0,05 cm. Nejčetnější třída je od 0,65 cm do 0,7 cm a má relativní četnost 21%. Nejvyšší hodnota tlaku půdního vzduchu má velikost 54,23 cm a nejnižší má velikost -2,4 cm.



**Obrázek 88: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy**



Obr. 88 ukazuje, že při tlakové výšce nižší než -35 cm nabývá tlak půdního vzduchu nulové hodnoty. I v tomto časovém intervalu se půda především drénovala. Body drenáže vytvářejí hlavní vzestupnou i sestupnou přímku doplněnou o další vedlejší přímkou, které nejsou tak viditelné. Body zvlhčení vytvářejí přestup mezi těmito přímkami.

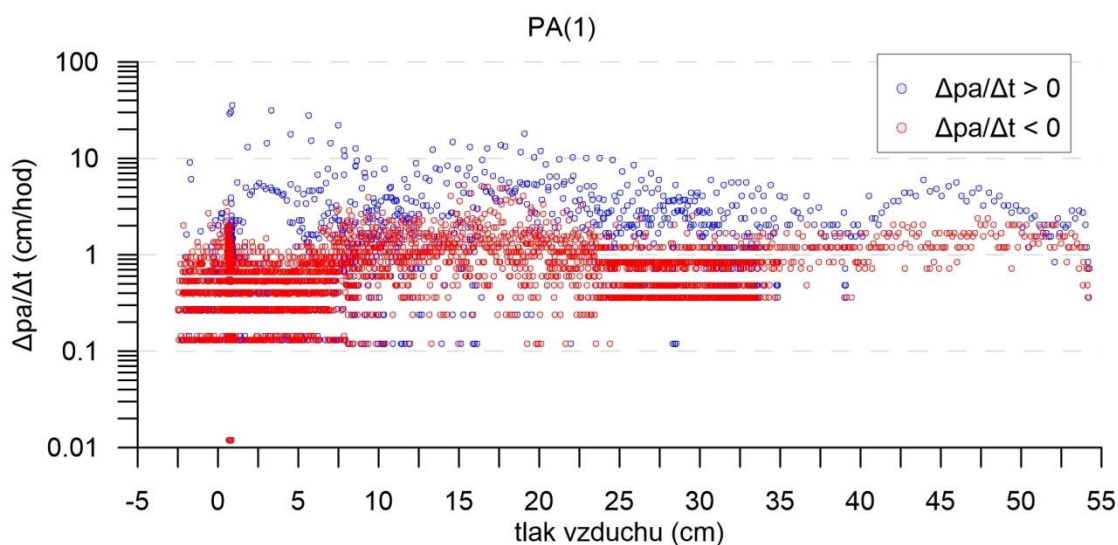


**Obrázek 89: Histogram změn tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

Histogram změn tlakové výšky vody na obr. 89 má třídy rozdělené po 0,8 cm/hod. Třída od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod má největší relativní četnost 48,9%. Tato třída obsahuje nulové změny tlakové výšky. Největší změna nabývá záporné hodnoty a její velikost je -132 cm/hod. Největší kladná změna má velikost 109,2 cm/hod. Nulové změny tlakové výšky představují 48%.

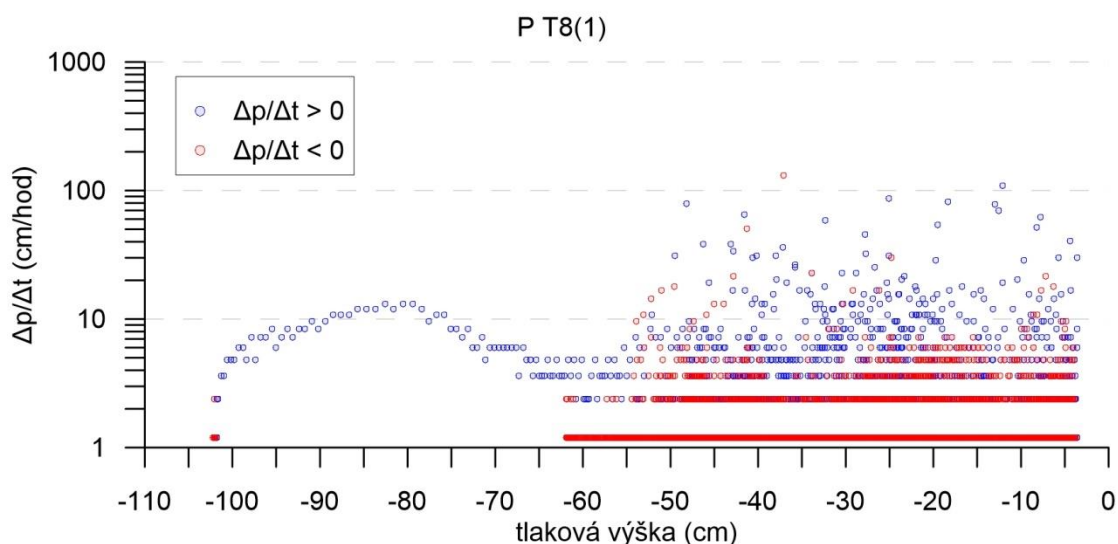
Třídy u histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou rozděleny po 0,4 cm/hod. Největší změna tlaku půdního vzduchu je kladná a má velikost 35,6 cm/hod. Největší záporná změna má velikost -5,28 cm/hod. Nejčetnější třída je od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod a její relativní četnost je 40,5%. Nulové změny tlaku půdního vzduchu představují 20%.

Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky je uveden v příloze 10.



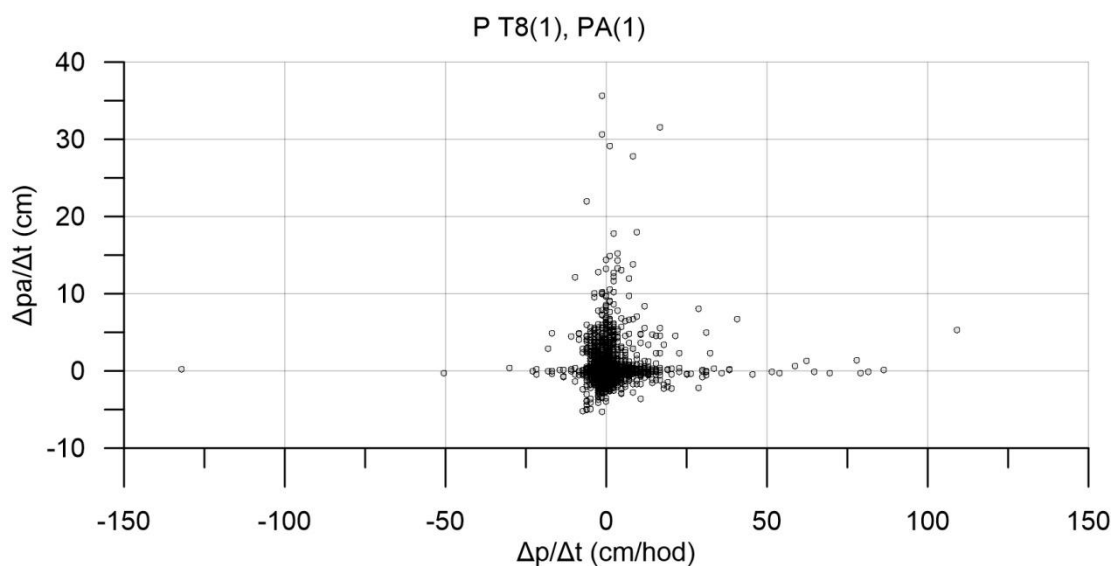
**Obrázek 90:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016

Z obr. 90 vyplývá, že u tlaku půdního vzduchu větší než 35 cm se stejně jako u přechozí hloubky vyskytuje málo změn tlaku půdního vzduchu o vyšší hodnotě. Hodnoty tlaku půdního vzduchu nad 35 cm jsou pouze přechodové a nastává jejich rychlá změna. Největší a zároveň nejmenší tlaku půdního vzduchu připadají na nulový tlak půdního vzduchu.



**Obrázek 91:** Graf změny tlakové výšky a tlakové výšky v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016

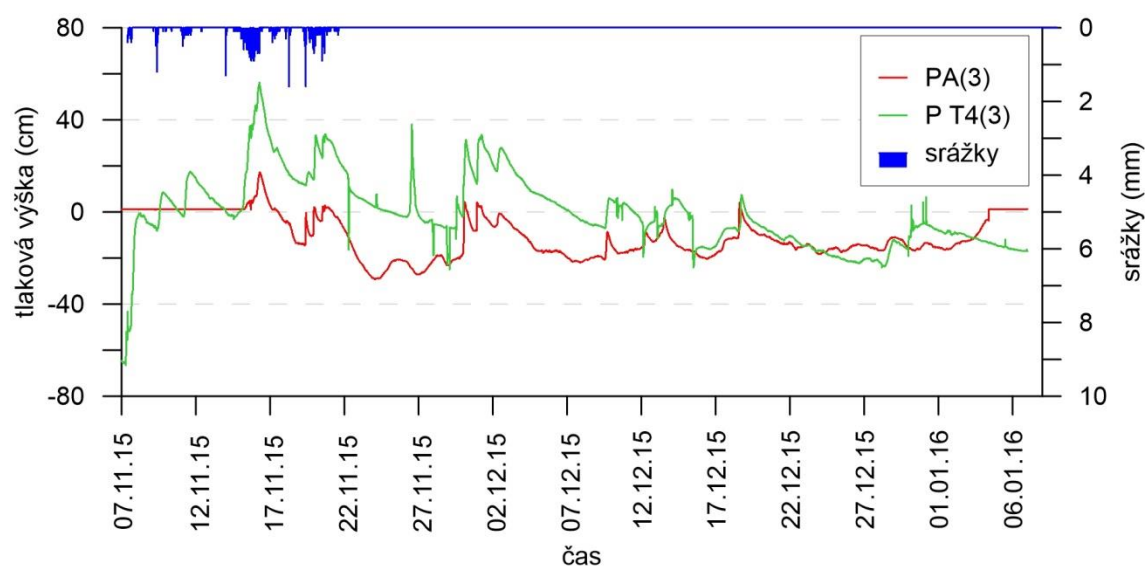
Nejvíce hodnot podle obr. 91 připadá na tlakovou výšku v rozmezí od -60 cm do 0 cm. V tomto rozmezí tlakové výšky se také nacházejí největší změny tlakové výšky. S tlakovou výškou -60 cm a nižší se vyskytují změny, které představují rychlý nárůst z tlakové výšky -102 cm na -65 cm.



**Obrázek 92: Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

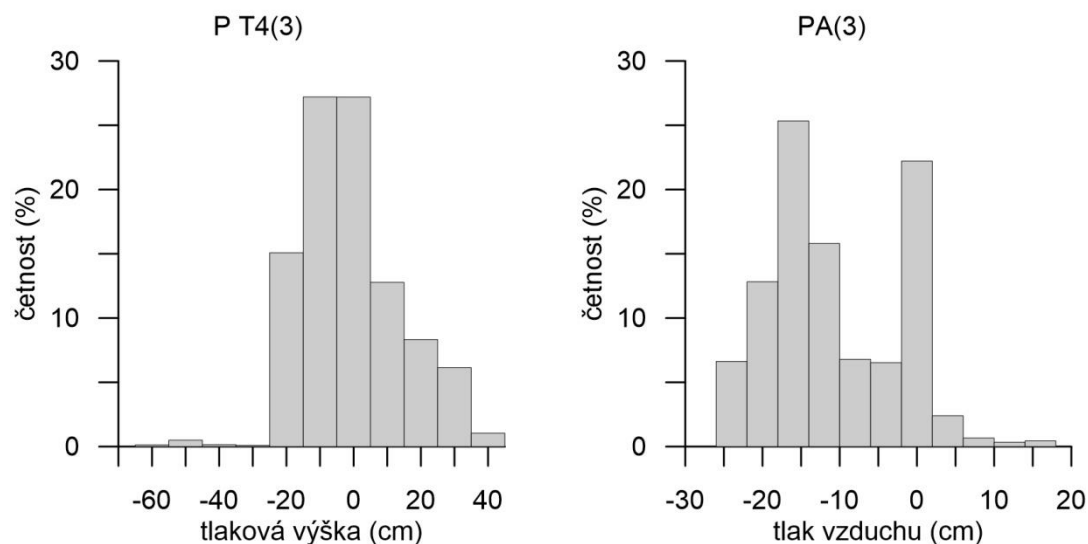
U obr. 92 stejně jako u předchozího intervalu největší změny tlaku půdního vzduchu připadají na nulové změny tlakové výšky. Největší záporná změna tlakové výšky také připadá na nulovou změnu tlaku půdního vzduchu. Zatímco největší změna tlakové výšky připadá na změnu tlaku vzduchu o hodnotě 5 cm/ hod. Jedná se zatím o jediný případ, kdy největší změna tlakové výšky nepřipadá na nulovou změnu tlaku půdního vzduchu. Ostatní změny se pohybují v rozmezí od -50 cm/hod do 50 cm/hod změny tlakové výšky a od -10 cm/hod do 10 cm/hod změny tlaku půdního vzduchu.

### 5.2.5 Analýza dat za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016 pro hloubku 55,9 cm



**Obrázek 93: Graf tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm a srážek za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

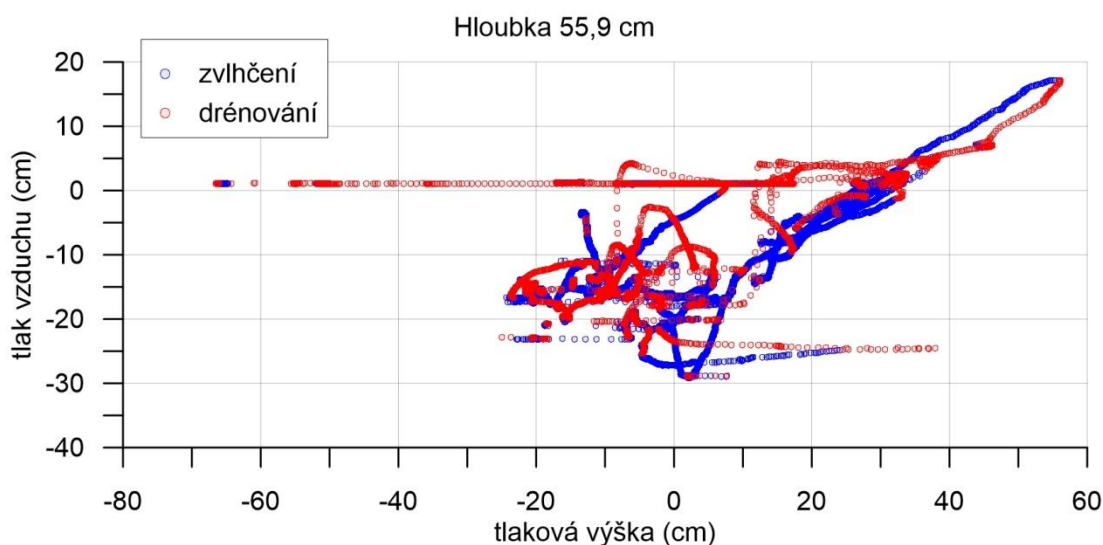
Obr. 93 ukazuje, že stejně jako u předchozí hloubky od konce listopadu nejsou zaznamenány v lokalitě žádné srážky. Tlak vzduchu v hloubce 55,9 cm kopíruje chování tlakové výšky vody. Na konci časového intervalu začne tlak půdního vzduchu pomalu stoupat při klesající tlakové výšce. Dalším poklesu tlakové výšky se tlak půdního vzduchu skočí na hodnotu atmosférického tlaku.



**Obrázek 94: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

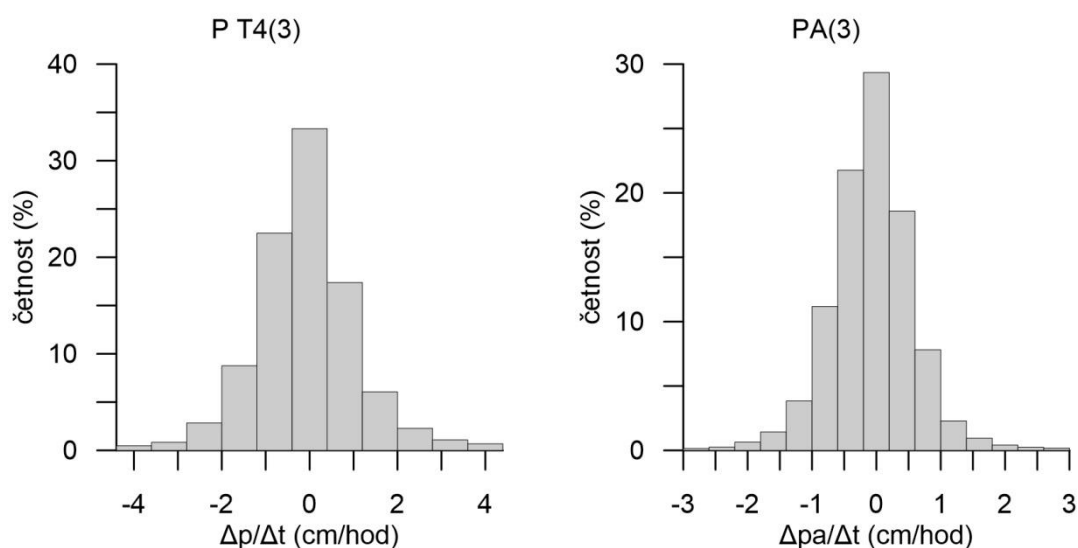
U obr. 94 jsou třídy u histogramu tlakové výšky vody rozděleny po 10 cm. Dvě nejpočetnější třídy mají stejnou relativní četnost a to 27,2%. Více jak polovina hodnot tlakové výšky se tedy nachází v rozmezí od -15 cm do 5 cm. Maximální hodnota tlakové výšky má velikost 56,1 cm a minimální hodnota má velikost -66,5 cm.

U histogramu tlaku půdního vzduchu jsou třídy rozděleny po 4 cm. Maximální tlak vzduchu má velikost 17,2 cm a minimální je o velikost -29,1 cm. Třída s největší relativní četností 25,3% je od -18 cm do -14 cm. Druhá nejčetnější třída obsahuje i nulové tlaky půdního vzduchu, které představují atmosférický tlak. Její relativní četnost je 22,2% a její rozmezí je od -2 cm do 2 cm.



**Obrázek 95: Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti n270a tlakové výšce při zvlhčení a drenáži půdy**

Z obr. 95 vyplývá, že při tlakové výšce nižší než -30 cm se tlak půdního vzduchu vždy rovná tlaku atmosférickému. Body zvlhčení doplňují body získané při drenáži, avšak kromě vzestupné přímky zvlhčení není zřejmý žádný výraznější trend.

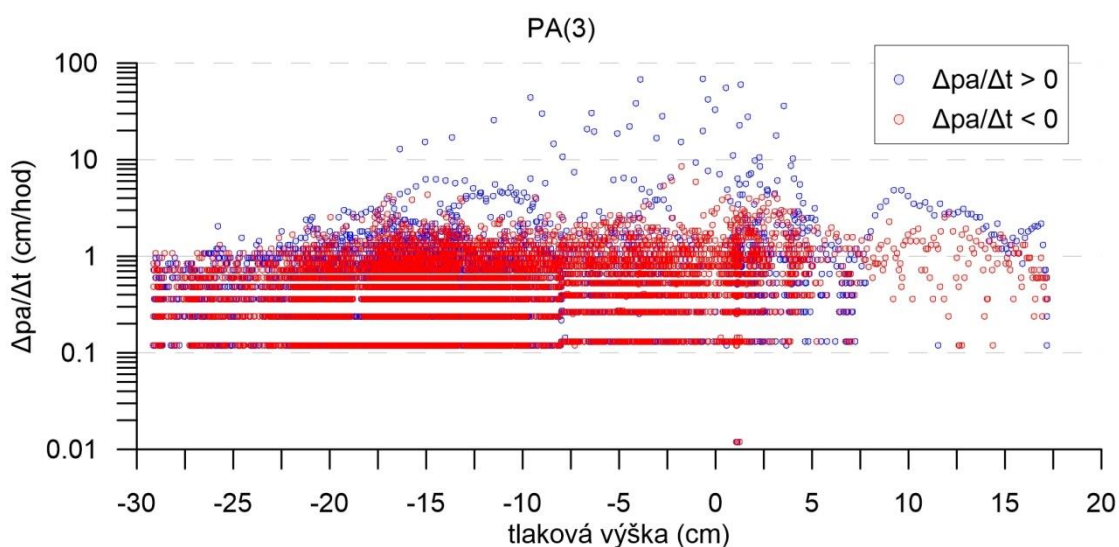


**Obrázek 96: Histogram změn tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

U histogramu změn tlakové výšky vody na obr. 96 jsou hodnoty rozděleny do tříd po 0,8 cm/hod. Maximální změna tlakové výšky vody nabývá záporné hodnoty a má velikost -270,2 cm/hod. Největší kladná změna má velikost 219,7 cm/hod. Třída od -0,4 cm/hod do 0,4 cm/hod má největší relativní četnost a to 33%. Nulové změny tlakové výšky představují pouze 3,5%.

Třídy u histogramu změn tlaku půdního vzduchu jsou po 0,4 cm/hod. S relativní četností 29% je třída od -0,2 cm/hod do 0,2 cm/hod nejpočetnější. Tady třída obsahuje nulové změny, které představují 10,6% ze všech zaznamenaných změn tlaku půdního vzduchu v tomto časovém intervalu v hloubce 55,9 cm. Maximální změna tlaku půdního vzduchu má kladnou hodnotu a velikost 69,18 cm/hod. Největší záporná změna má velikost -8,5 cm/hod.

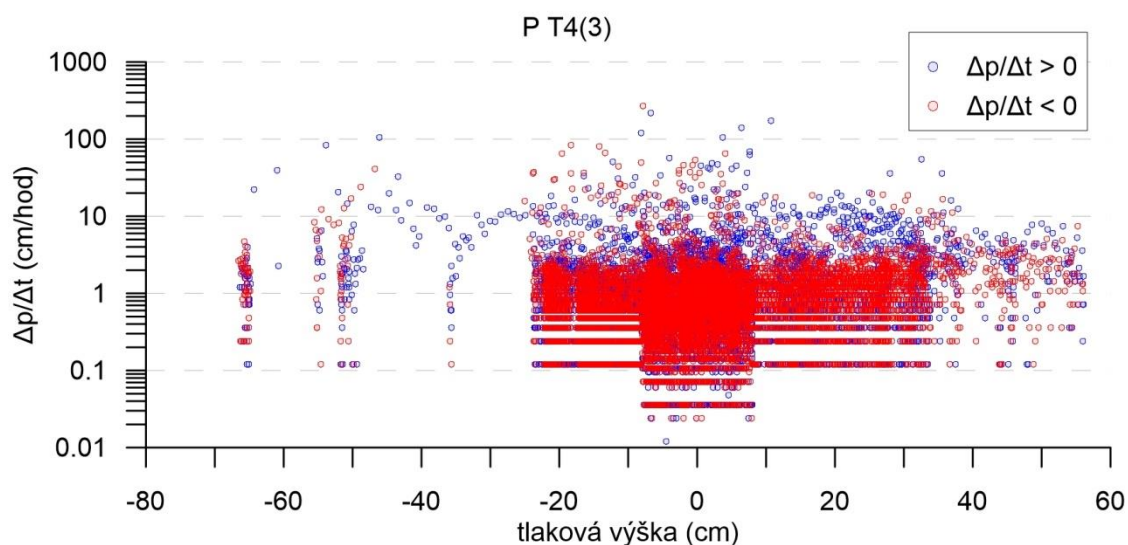
Graf časového vývoje změn tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky je uveden v příloze 11.



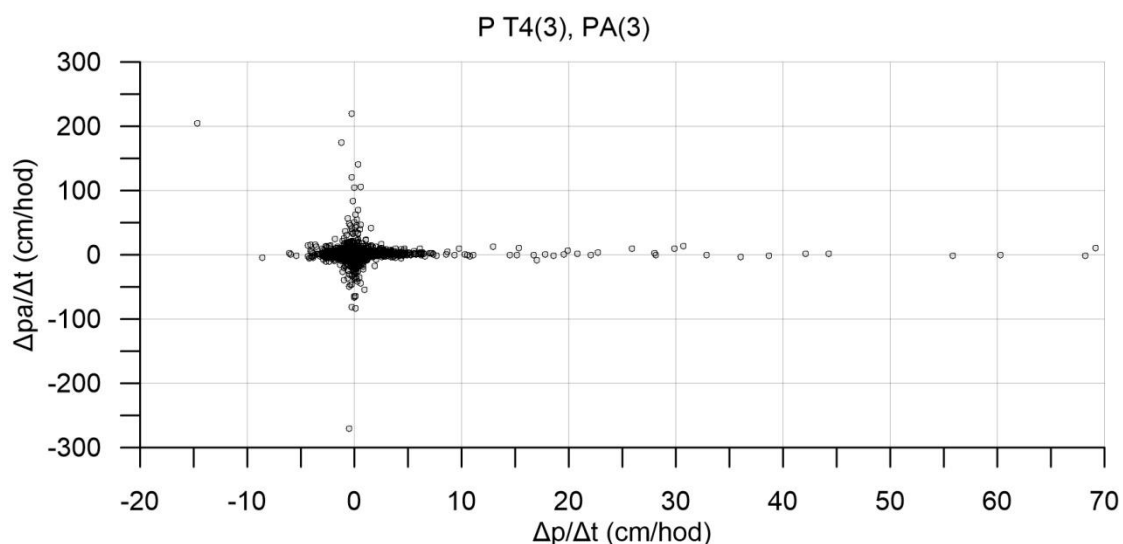
**Obrázek 97: Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016**

Z obr. 97 vyplývá, že v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 – 7. 1. 2016 se nad hodnotou 7 cm tlaku půdního vzduchu vyskytuje změn, které jsou ale větší než většina ostatních změn tlaku půdního vzduchu. Tlaky půdního vzduchu o větších hodnotách než 7 cm byly zaznamenány v málo případech, proto změny, které připadají na tyto tlaky půdního vzduchu, jsou náhlé. Největší změny tlaku půdního vzduchu připadají na tlak vzduchu o hodnotě nula nebo nule velmi blízké.

Obr. 98 ukazuje, že mezi hodnotami tlakové výšky vody -10 cm a 10 cm se nachází nejvíce změn, změny nulové a nejmenší změny tlakové výšky vody. V tomto rozmezí se tlaková výška vyskytuje nejčastěji a její změna na tyto hodnoty není příliš velká. Změna tlakové výšky vody z hodnot nižších než je -25 cm na vyšší hodnoty, je rychlá. Stejně tak změna ještě na nižší hodnoty než je -25cm.



**Obrázek 98:** Graf změny tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016



**Obrázek 99:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 - 7. 1. 2016

Stejně jako u předchozích časových intervalů a hloubek na lokalitě Uhlířská největší změny tlaku půdního vzduchu připadají na nulové změny tlakové výšky a největší kladná změna tlakové výšky připadá na nulovou změnu tlaku půdního vzduchu, což můžeme pozorovat na obr. 99. Největší záporná změna tlakové výšky však připadá na změnu tlaku půdního vzduchu o hodnotě -202 cm/hod. Stejně jako u předchozí hloubky se jedná o výjimku. Zbylé hodnoty změn se nachází v rozmezí od -10 cm/hod do 10 cm/hod změn tlakové výšky a od -100 cm/hod do 100 cm/hod změn tlaku půdního vzduchu.

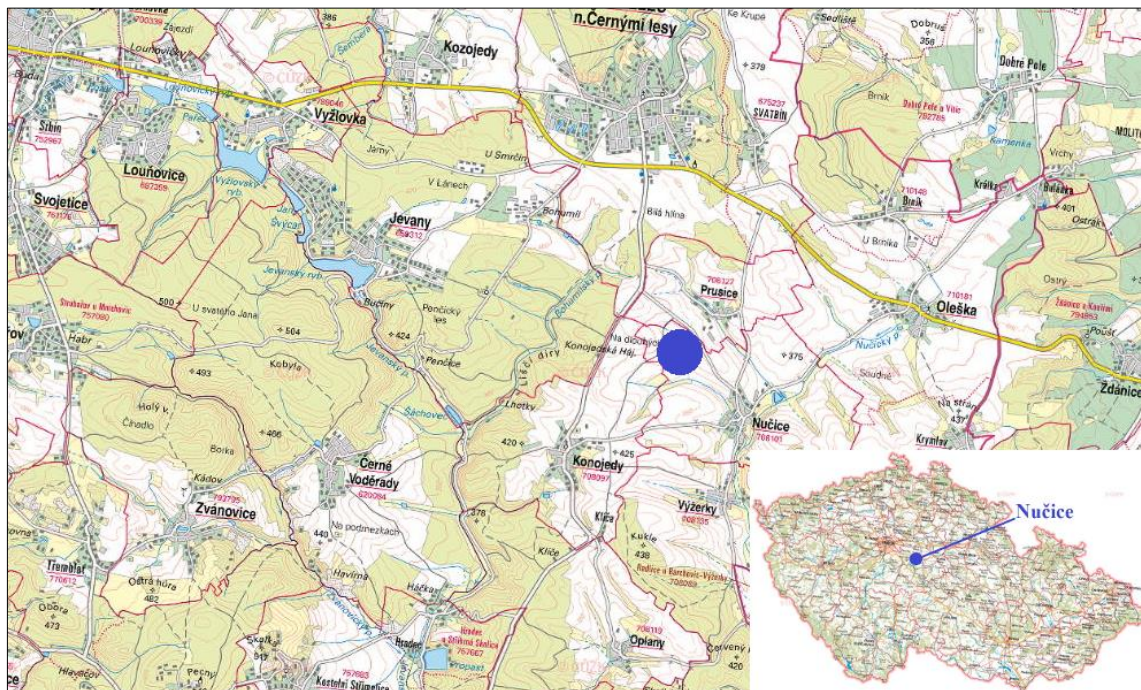


## 5.3 Nučice

### 5.3.1. Charakteristika lokality

Experimentální povodí Nučice o ploše 0,531 km<sup>2</sup> se nachází ve Středočeském kraji přibližně 30 km na východ od hlavního města Prahy. Průměrné roční srážky činí 630 mm a průměrná roční teplota je 6°C. Nadmořská výška povodí se pohybuje od 382 m n. m. do 417 m n. m. a 95,3% území tvoří zemědělsky obhospodařovaná půda.

Půdy v experimentálním povodí Nučice jsou klasifikovány jako luvizemě a kambizemě. Půdní profil má základ na prachovcích, slepencích a pískovcích a je tvořen v hloubce 0,1 až 0,2 metrů jílovým orníčním horizontem Ap. Podpovrchový horizont B tvoří jílové sedimenty. Ornice obsahuje 8% jílových částic. (Zumr et al., 2015)



Obrázek 100: Poloha experimentálního povodí Nučice (upraveno ČÚZK, 2016)

### 5.3.2 Materiál

V Nučicích se od roku 2011 měří tlakové výšky, tlak půdního vzduchu, objemové vlhkosti v půdě, srážky a teplota vzduchu. Měření probíhá na dvou odlišných stanovištích. První stanoviště se nachází na poli a druhé na břehu potoka vzdáleného přibližně 50 metrů od prvního stanoviště. Na břehu potoka jsou naistalována tři čidla tlaku půdního vzduchu, vyvinuta na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství. Poblíž těchto čidel jsou naistalovány dva tenzometry UMS T8. Vlhkostní čidla jsou naistalována na stanovišti na poli, kde je odlišný vlhkostní režim než na stanovišti

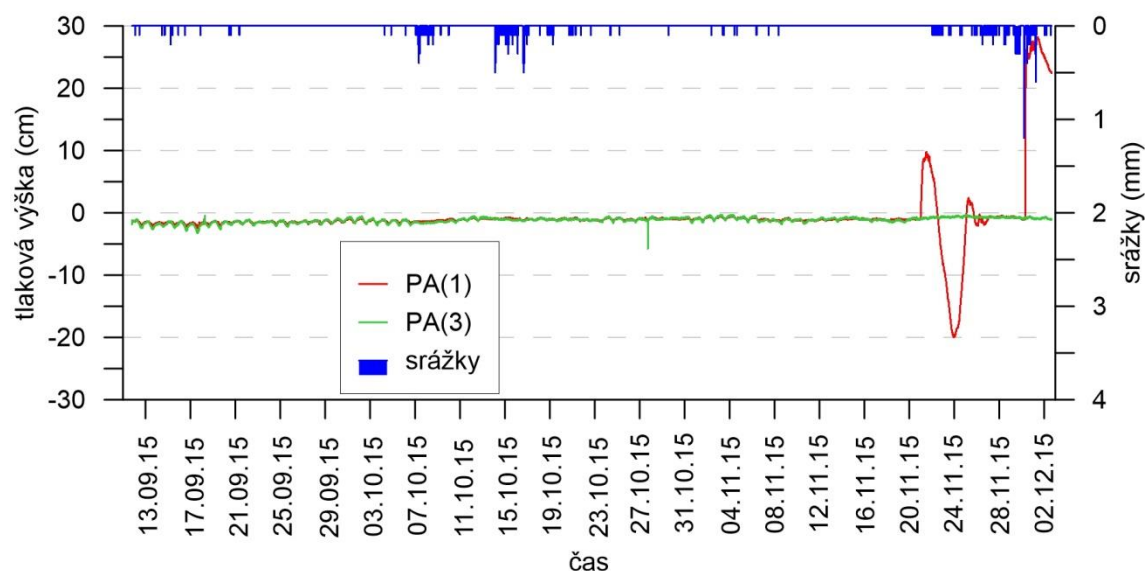


na břehu potoka, z tohoto důvodu nebyla data z vlhkostních čidel v analýze použita. Tenzometry a čidla tlaku půdního vzduchu, ze kterých data pochází, jsou zaznamenány v tabulce č. 7 i s hloubkami a označením. Interval mezi datovými záznamy je 5 minut.

**Tabulka 7: Označení a hloubka čidel tlaku vzduchu a tenzometrů**

Označení čidla tlaku vzduchu	Hloubka (cm)	Označení tenzometru	Hloubka (cm)
PA(1)	43	P T8(1)	17
PA(2)	33,5	P T8(3)	30
PA(3)	16		

Celkové analyzované období na lokalitě Nučice je od 11. 9. 2015 do 2. 12. 2015. Čidlo s označení PA(2) není za toto období v provozu a čidlo PA(3) nezaznamenalo žádnou událost. Pouze čidlo PA(1) ke konci období naměřilo tlak půdního vzduchu, který je odlišného od atmosférického tlaku. Čidlo PA(1) až do 20. 11. 2015 zaznamenalo pouze nulové hodnoty. Z tohoto důvodu je celkový časový interval zkrácen na období od 17. 11. 2015 do 2. 12. 2015. Jedná se jediný analyzovaný časový interval z této lokality. Během tohoto intervalu se vyskytlo sedm menších srážkových událostí a jedna srážková událost s velkou intenzitou. Časový interval trvá během pozdně podzimního až zimního období.



**Obrázek 101: Graf tlaku půdního vzduchu a srážek na lokalitě Nučice za období 11. 9. – 2. 12. 2015**

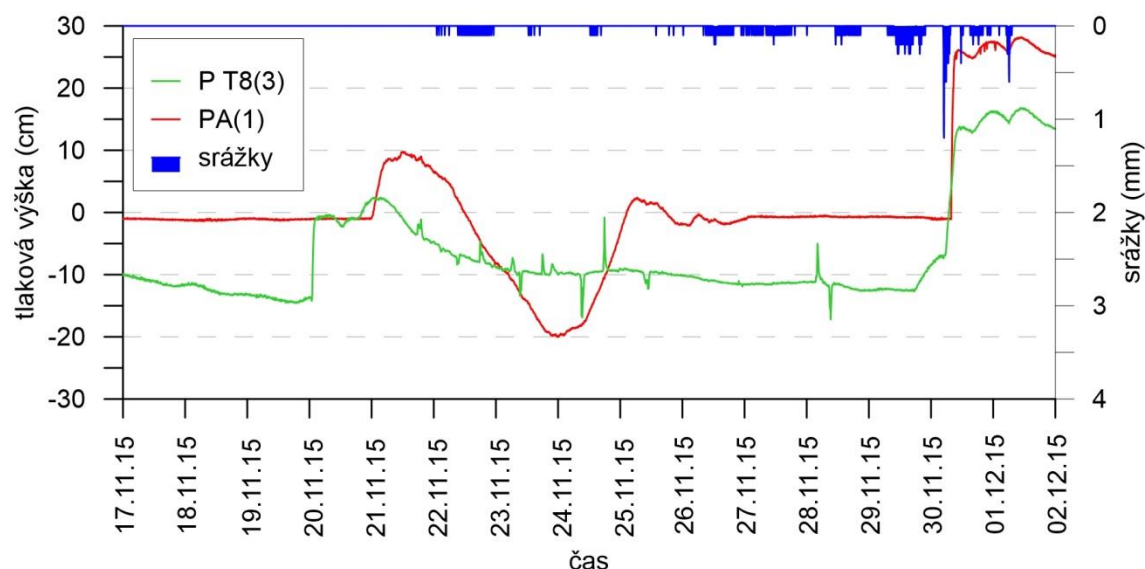
V tabulce č. 8 je uvedeno čidlo tlaku půdního vzduchu a k němu podle hloubky přiřazený tenzometr a časový interval, ve kterém byla analýza provedena. Metodika,

kteřá byla pouřžita pro zpracování dat, je stejná jako u předchozích dvou lokalit viz kapitola 5.1.3.

**Tabulka 8: Čidla tlaku vzduchu a k nim přiřazené tenzometry a časové intervaly**

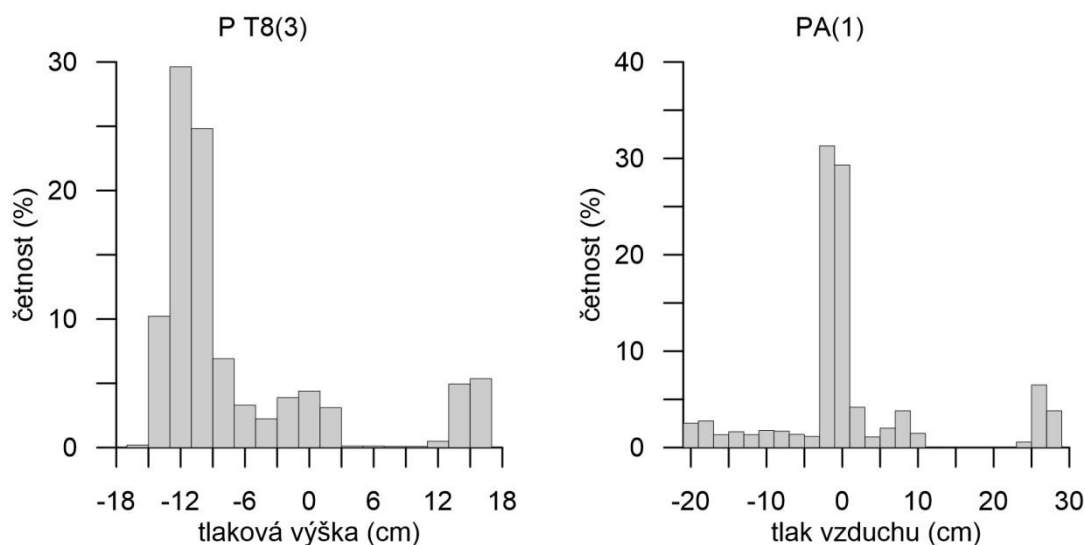
Hloubka podle čidla tlaku vzduchu (cm)	Označení čidla tlaku vzduchu	Označení tenzometru	Časový interval
43	PA(1)	P T8(3)	17. 11. - 2. 12. 2015

### 5.3.3 Analýza dat za období 17. 11. 2015 – 2. 12. 2015 pro hloubku 43 cm



**Obrázek 102: Graf tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu v hloubce 43 cm za období 17. 11. - 2. 12. 2015**

Na obr. 102 se vyskytují dva typy chování tlaku půdního vzduchu. U prvního typu chování tlak vzduchu postupně stoupá, klesá a nakonec zase stoupá. V této době nejsou zaznamenány žádné srážky. Ke konci časového intervalu tlak vzduchu kopíruje chování tlakové výšky. Tlaková výška i tlak půdního vzduchu reagují na srážky, které spadly v této době. Změna tlaku vzduchu je náhlá stejně jako změna tlakové výšky. Podle tlakové výšky se obě čidla v tomto čase nacházejí pod hladinou podzemní vody a čidlo tlaku půdního vzduchu měří tlak vzduchu ve vodní fázi stejně jako při experimentu popsáném v kapitole 4.3.

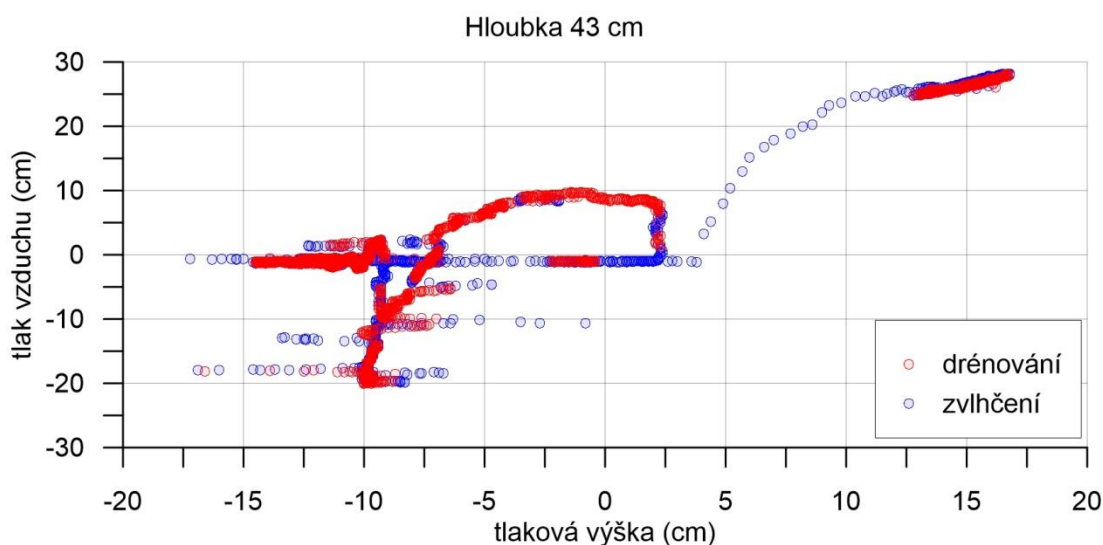


**Obrázek 103: Histogram tlakové výšky vody a tlaku půdního vzduchu v hloubce 43 cm za období 17. 11. - 2. 12. 2015**

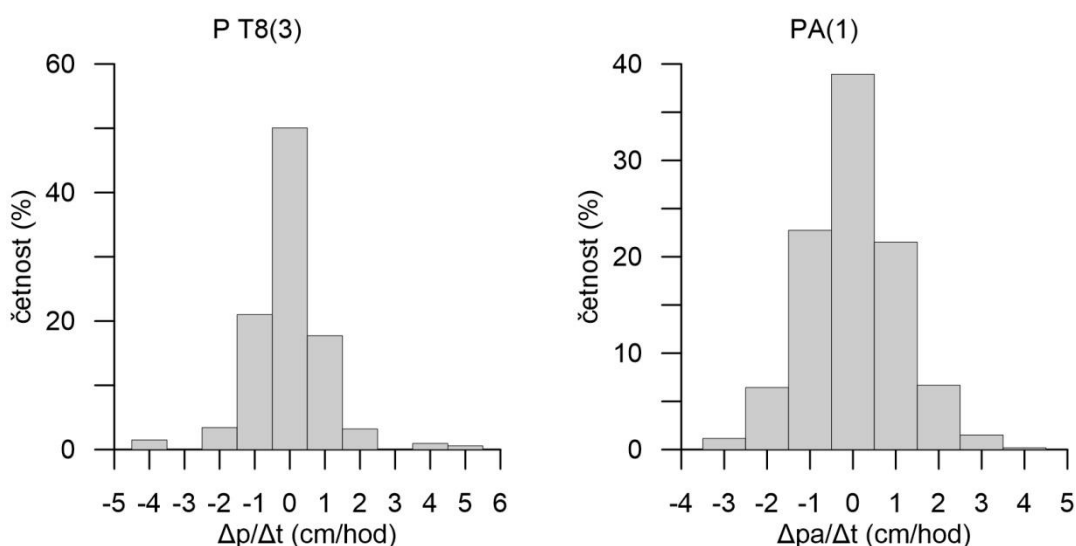
Třídy u histogramu tlakové výšky vody na obr. 103 jsou rozděleny po 2 cm. Maximální hodnota tlakové výšky má velikost 16,8 cm a naopak má velikost -17,2 cm. Ze všech naměřených hodnot tlakové výšky vody se 50% nachází v intervalu od -13 cm do -9 cm. Třídy nacházející se v rozmezí od 3 cm do 11 cm mají skoro nulovou četnost, přibližně 0,1%.

Třídy u histogramu tlaku půdního vzduchu jsou také po 2 cm. Maximální tlak půdního vzduchu má hodnotu 28,21 cm a minimální -20,02 cm. Přibližně 60% hodnot tlaku půdního vzduchu se pohybuje v rozmezí od -3 cm do 1 cm. V tomto intervalu jsou zahrnuty i všechny tlaky půdního vzduchu s nulovou hodnotou, která představuje atmosférický tlak. Ve třídě od 11 cm do 13 cm se nevyskytují žádné hodnoty tlaku půdního vzduchu a třída má tedy nulovou četnost. Třídy v rozmezí od 15 cm do 23 cm zahrnují pouze jednu nebo dvě hodnoty a jejich četnost se pohybuje kolem 0,02%.

Z obr. 104 vyplývá, že mezi 5 cm a 12 cm tlakové výšky a mezi 10 cm a 25 cm tlaku půdního vzduchu se nachází pásmo bodů zvlhčení. Tyto body označují stoupání tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky na konci časového intervalu. Zda se v tomto rozmezí nacházejí pouze body zvlhčení, není jisté, protože datový záznam končí dřív, než tlak půdního vzduchu i tlaková výška začne znovu klesat.



**Obrázek 104:** Graf tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce vody při zvlhčení a drenáži půdy



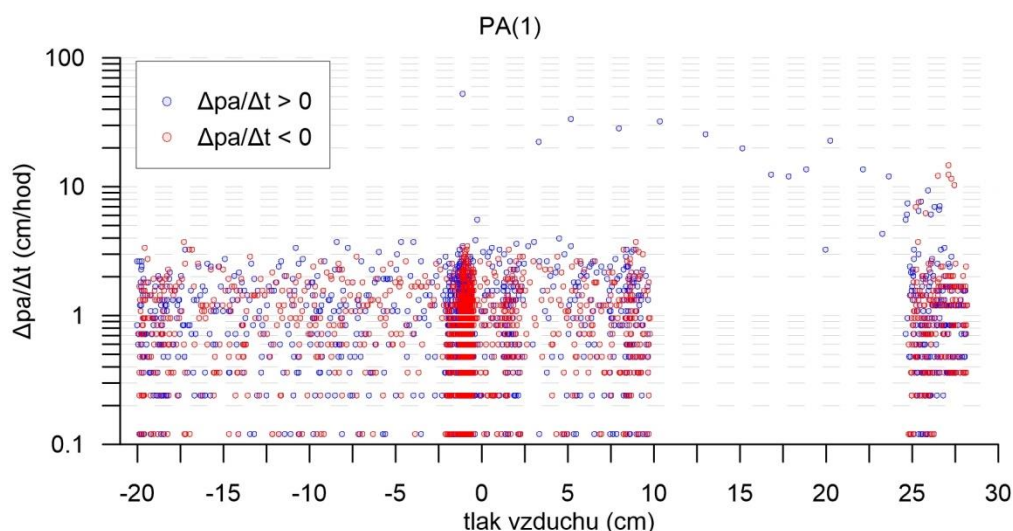
**Obrázek 105:** Histogram změn tlakové výšky vody a změn tlaku půdního vzduchu v hloubce 43 cm za období 17. 11. - 2. 12. 2015

Třídy u histogramu změny tlakové výšky vody na obr. 105 jsou rozděleny po 1 cm/hod. Maximální změna tlakové výšky má zápornou hodnotu a její velikost činí -66 cm/hod. Maximální změna tlakové výšky o kladné hodnotě má velikost 44 cm/hod. Třída od -0,5 cm/hod do 0,5 cm/hod obsahuje pouze změny tlakové výšky o nulové hodnotě, které tvoří 50% ze všech změn tlakové výšky vody.

U histogramu změny tlaku půdního vzduchu jsou třídy znovu rozděleny po 1 cm/hod. Maximální změna tlaku půdního vzduchu má kladnou hodnotu a její velikost činí 52,92 cm/hod. Největší záporná změna tlaku půdního vzduchu má velikost -14,64 cm/hod. Nejčetnější je třída od -0,5 cm/hod do 0,5 cm/hod a její relativní četnost

činí 39%. Změny tlaku půdního vzduchu o nulové hodnotě představují pouze 6% ze všech změn tlaku půdního vzduchu.

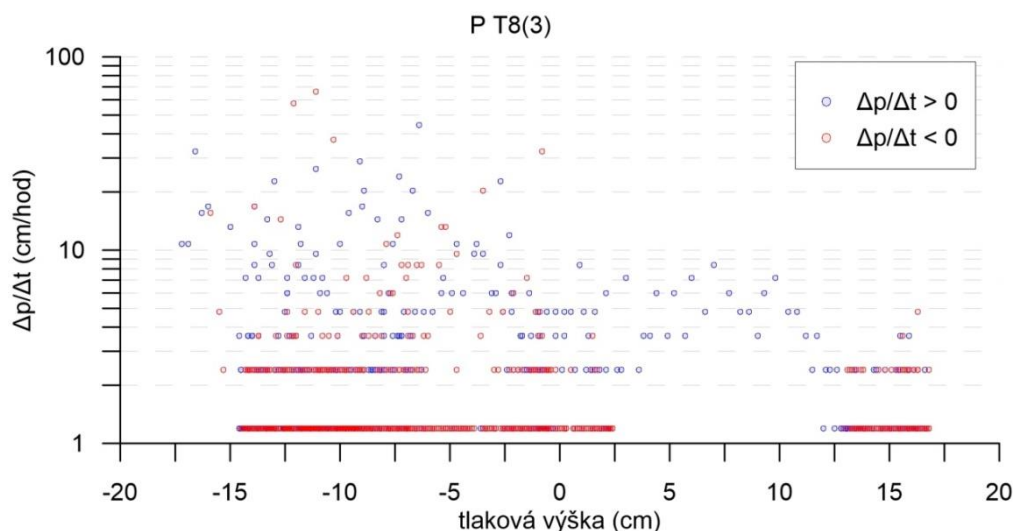
Grafy časových vývoje změn tlakové výšky a tlaku půdního vzduchu jsou uvedeny v příloze 12.



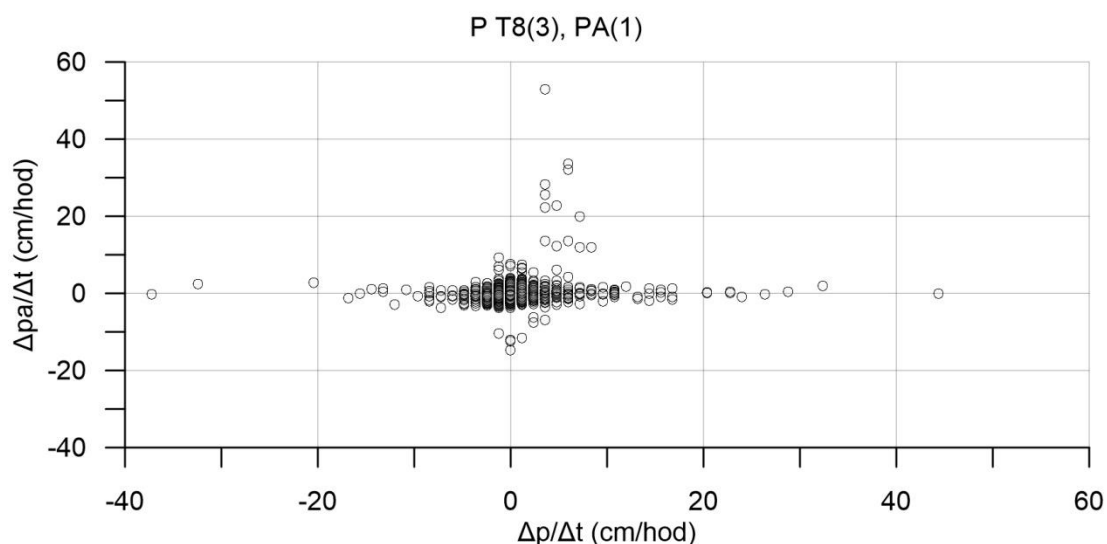
**Obrázek 106:** Graf změny tlaku půdního vzduchu a tlaku půdního vzduchu v hloubce 43 cm za období 17. 11. – 2. 12. 2015

Obr. 106 ukazuje, že mezi tlaky vzduchu od 10 cm do 25 cm se nachází pásmo s malým počtem změn tlaku půdního vzduchu, kvůli malé četnosti tlaku půdního vzduchu, která je dána rychlým poklesem či stoupáním, který 5-ti minutový interval mezi datovými záznamy není schopný zaznamenat. Změny tlaku půdního vzduchu v rozmezí od 10 cm do 25 cm tlaku půdního vzduchu patří mezi největší a nastávají při hodnotách tlaku půdního vzduchu, které jsou větší než nula. Nejvíce změn připadá na tlaky půdního vzduchu od -3 cm do 0 cm.

Z obr. 107 vyplývá, že v rozmezí od 2,5 cm do 12 cm tlakové výšky vody se nacházejí pouze změny tlakové výšky o hodnotě větší než nula. Mezi těmito hodnotami nastala rychlá změna tlakové výšky. Nejvíce změn tlakové výšky připadá na záporné tlakové výšky vody, na které připadají také největší změny tlakové výšky vody.



**Obrázek 107:** Graf změn tlakové výšky vody a tlakové výšky vody v hloubce 43 cm za období 17. 11. – 2. 12. 2015



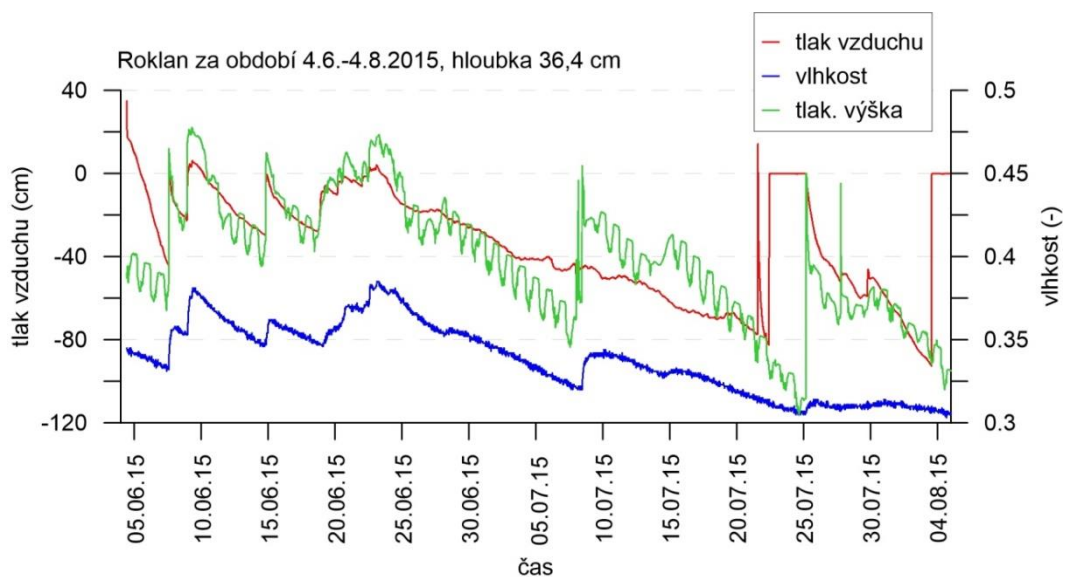
**Obrázek 108:** Graf změny tlaku půdního vzduchu v závislosti na změně tlakové výšky vody v hloubce 43 cm za období 17. 11. – 2. 12. 2015

Na obr. 108 největší kladné i záporné změny tlakové výšky připadají na nulové změny tlaku půdního vzduchu. Největší záporné změny tlaku půdního vzduchu připadají na nulové změny tlakové výšky. Kladné změny tlaku půdního vzduchu se nachází především u kladných změn tlakové výšky. Změny tlaku vzduchu větší než 10 cm/hod připadají na změny tlakové výšky od 0 cm/hod do 10 cm/hod. Ostatní změny se nacházejí v rozmezí od -20 cm/hod do 20 cm/hod změn tlakové výšky a od -20 cm/hod do 20 cm/hod změn tlaku půdního vzduchu.

## 5.4 Diskuze

Nulové nebo téměř nulové hodnoty tlaku půdního vzduchu představují hodnotu atmosférického tlaku. Hodnoty tlaku půdního vzduchu byly po většinu času na všech lokalitách rovny atmosférickému. Tlak půdního vzduchu se začal měnit, nejčastěji při a po srážkové události, kdy se v půdě zvyšuje vlhkost. Půdní vzduch se v tento okamžik oddělil od atmosféry a má tedy i odlišný tlak, protože vrchní půda nasycená po srážce vodou společně s kapilárními silami, brání půdnímu vzduchu se znovu spojit s atmosférou. Tento jev byl v minulosti potvrzen a publikován mnoha autory například: [Touma a Vauclin \(1986\)](#), [Hammecker et al. \(2003\)](#), [Hangen a Gerke \(2007\)](#) i [Sakaki et al. \(2011\)](#).

Na obr. 109, který byl vybrán pro názornou ukázkou, je vidět, že změna tlaku půdního vzduchu nastává se změnou tlakové výšky vody, kdy se po srážkové události zvýší vlhkost v půdě. Průběh půdního vzduchu nejdříve opisuje průběh tlakové výšky vody. V tomto případě se pravděpodobně kolem čepičky čidla, nacházel vzduchový film, jak je naznačeno na 7a, který přenášel tlak vody k tlakovému čidlu a proto měl tlak vzduchu a tlaková výška stejnou hodnotu. Na obr. 109 na konci sledovaného období tlak půdního vzduchu kopíruje chování tlakové výšky, nabývá však odlišných hodnot než tlaková výška. V tomto případě čidlo tlaku půdního vzduchu mohlo být v kontaktu se vzduchovou bublinou, tak jak je naznačeno na obr. 7b, která má odlišný tlak než je hodnota atmosférického tlaku a hodnota tlaku vody, která ji obklopuje. Obě dva typy vývoje tlaku vzduchu lze pozorovat u všech lokalit.



Obrázek 109: Graf tlakové výšky, tlaku půdního vzduchu a vlhkosti v čase



Změnu tlaku půdního vzduchu při zvýšení vlhkosti, byly pozorovány i u experimentu v bývalém hnědouhelném dole [Hangena a Gerkeho](#) (2007). Čidla naistalována v hnědouhelném dole zaznamenala změnu tlaku půdního při plně nasycených podmínkách. Kdy tlaková výška dosáhla kladných hodnot.

Po skončení srážkové události nastává drénování půdy, během kterého klesá společně tlaková výška i tlak půdního vzduchu, do doby než tlak půdního vzduchu dosáhne určité hodnoty, při které hodnota tlaku půdního vzduchu náhle vroste na hodnotu atmosférického tlaku. Na obr. 109 je tento jev zaznamenán například v čase od 10. 7. do 22. 7. 2015. V tomto okamžiku je vlhkost půdy natolik nízká, že dojde k propojení vzduchové fáze a vyrovnání jejího tlaku s atmosférou.

Stejný nárůst tlaku půdního vzduchu během odvodnění vzorku ze dvou frakcí písku pozoroval při svém experimentu i [Sakaki et al](#) (2011). Během odvodnění vzorku, vlhkost vzorku společně s tlakem vody a tlakem půdního vzduchu postupně klesala a při hodnotě tlaku půdního vzduchu kolem 1kPa tlak půdního vzduchu náhle vrostl na hodnotu tlaku atmosférického.

Stejný jev jako u [Sakakiho](#) experimentu (2011) lze pozorovat ve všech lokalitách, časových intervalech a hloubkách, kromě lokality Nučice a hloubky 17 cm v lokalitě Uhlířská. U lokality Uhlířská v hloubce 55,9 cm tomuto náhlému vzrůstu hodnoty na atmosférický tlak, předchází mírný nárůst tlaku půdního vzduchu. Při jaké tlakové výšce nebo tlaku půdního vzduchu tento jev nastává nelze jednoznačně říci. Tento jev nastává při různé tlakové výšce, různém tlaku půdního vzduchu i při různé hloubce nebo při různé vlhkosti. Roli může hrát i velikost objemu zachyceného vzduchu v půdě.

Největší změny tlaku půdního vzduchu nastávají právě při opětovném spojení půdního vzduchu s atmosférou, a pokaždé připadají na nulové změny tlakové výšky. Protože tlaková výška s pokračující drenáží klesá pomalu, a tak její změna není nikterak veliká. Naopak největší změny tlakové výšky připadají na nulové změny tlaku půdního vzduchu, protože tlaková výška reaguje na srážkovou událost skoro okamžitě, zatímco změna tlaku půdního vzduchu nastává až ve chvíli, kdy se ve vrchní vrstvě půdy vytvoří dostatečně velké vlhkosti, které společně s kapilárními silami zabrání půdnímu vzduchu spojit se s atmosférou.



## 6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo otestovat nově vyvinutá čidla tlaku půdního vzduchu v laboratoři a zpracovat analýzu dat naměřených těmito čidly v terénu ve třech lokalitách.

Test čidel tlaku půdního vzduchu provedený v laboratoři měl za cíl zjistit, zda tlak vody, který působí na čidlo, neovlivňuje měření tlaku vzduchu. Výsledky testů ukazují, že čidla jsou do jisté míry ovlivněna změnou tlaku vody a že při zatopení čidel nastává nárůst tlaku vzduchu indikovaný čidlem. Snížení tlakové výšky (hladiny vody) neovlivnilo měření čidel tlaku půdního vzduchu, na rozdíl od zvýšení tlakové výšky (hladiny vody), kdy při měření čidel tlaku půdního vzduchu docházelo k náhlému poklesu hodnot měřených čidlem tlaku vzduchu.

Pro vyhodnocení funkce čidel v terénu, byla využita naměřená data z lokalit Šumava-Roklan, Jizerské hory-Uhlířská a Nučice, kde jsou od roku 2015 čidla půdního vzduchu ve zkušebním provozu. Nejobsáhlejší analýza je provedena u lokality Roklan, protože z této lokality pochází nejvíce využitelných dat. U ostatních lokalit čidla tlaku půdního vzduchu nenaměřila žádnou událost, nebyla v provozu nebo vykazovala chybné měření. Pro analýzu byla použita data tlaku půdního vzduchu, tlakové výšky, srážkové události a vlhkosti. Analýza dat se zabývala časovým vývojem tlaku půdního vzduchu v závislosti na tlakové výšce a na srážkách, dále dynamikou tlaku půdního vzduchu v závislosti na dynamice tlakové výšky. Z analýz ze všech lokalit vyplývá:

- a) po a během srážkové události průběh tlaku půdního vzduchu kopíruje či opisuje průběh tlakové výšky vody
- b) při drenáži tlak půdního vzduchu klesá do hodnoty (od -20 cm do -100 cm v závislosti na hloubce a půdě), kdy se zachycený vzduch může spojit s atmosférou
- c) v rámci dynamiky tlaku půdního vzduchu se změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky pohybují ve stejných hodnotách, s výjimkou největších změn tlaku půdního vzduchu i tlakové výšky.

Výsledky analýzy potvrdily závěry dříve provedené autory nemnoha publikací, které se měření tlaku vzduchu v minulosti věnovali. Dále je zapotřebí potvrdit, princip měření čidel tlaku půdního vzduchu (například rentgenovou tomografií).

## 7. Použité zdroje

### Literatura

ČEJKOVÁ, E. (2013) *Vyhodnocení monitoringu vodního režimu půdy v lokalitě Roklan*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.

FAYBISHENKO, B. A. (1995), *Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air—Laboratory experiments*, Water Resour. Res., 31(10), 2421–2435, doi:10.1029/95WR01654

FINSTERLE S., B. Faybishenko (1998), *What does a Tensiometer Measure in Fractured Rock?*, In: Proc. of the Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, CA. 22, 24 Oct. 1997. U.S. Salinity Lab., Riverside

GEISTLINGER, H., S. Mohammadian, S. Schlueter, and H.-J. Vogel (2014), *Quantification of capillary trapping of gas clusters using X-ray microtomography*, Water Resour. Res., 50, 4514–4529, doi:10.1002/2013WR014657

HAMMECKER, C., A.C.D. ANtonino, J.L. Maeght a P. Boivin (2003). *Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: Evidence os air entrapment*. European Journal of Soil Science, 491-503

HANGEN, E. a Horst H. Gerke (2007). *Field Measurements of Air and Water Pressures in a Heterogeneous Forest-Reclaimed Lignitic Mine Soil*. Vadose Zone Journal, 849-854.

HILLEL, Daniel. *Environmental soil physics*. San Diego, CA: Academic Press, 1998, ISBN 0123485258

JURY, William A. a Robert Horton. *Soil Physics*. 6. vyd. USA: Wiley, 2004, s. 53-57. ISBN 0-471-05965-X.

MIZHARI, G., A. Furman a N. Weisbrod (2016). *Infiltration under Confined Air Conditions: Impact od Inclined Soil Surface*. Vadose Zone Journal, 1-8

ORI D., M. Tuller aj. M. Wraith (2003) *Soil water potencial*. University of Connecticut Storrs

SAKAKI, T., A. Limsuwat and T.H. Illangasekare (2011). *An Improved Air Pressure Measuring Method and Demonstrated Application to Drainage in Heterogeneous Soils*. Vadose Zone Journal, v. 10, 706-715

SHOCK C.C a F. Wang (2011) *Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship*. Sci. Hortic. 46, 178-185

SCHULTZE, B. , O. Ippisch , B. Huwe, W. Durner. (1999). *Dynamic nonequilibrium during unsaturated water flow*. p. 877, 892. In: Proc. of the Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, CA. 22, 24 Oct. 1997. U.S. Salinity Lab., Riverside

SNĚHOTA, M., V. Jelínková, M. Sobotková, J. Šácha, P. Vontobel a J. Hovind (2015), *Water and entrapped air redistribution in heterogeneous sand sample: Quantitative neutron imaging of the process*, Water Resour. Res., 51, doi:10.1002/2014WR015432.

ŠANDA M., M. Hrnčír, L. Novák, M. Císlarová (2006), *Vliv půdního profilu na srážkoodtokové procesy*, J. Hydrol. Hydromech., 54, 183-191

TACHECÍ P. (2002), *Hydrologický režim malého horského potoka a posouzení vlivu odlesnění*, Doktorská disertační práce, ČVUT v Praze, 54-59

TESAŘ M., M. Šír, M. Krejča aj. Váchal (2008), *Influence of vegetation cover on air and soil temperatures in the Šumava Mts. (Czech Republic)*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 4 (2008) 012029, doi:10.1088/1755-1307/4/1/012029

TOUMA, J., and M. Vauclin (1986). *Experimental and numerical analysis of two-phases infiltration in a partially saturated soil*. Transpost in Porous Media 1, 27-55

WARRICK, Arthur W. *Soil Physics Companion*. USA: CRC, 2002, s. 60-63. ISBN 0-8493-0837-2.

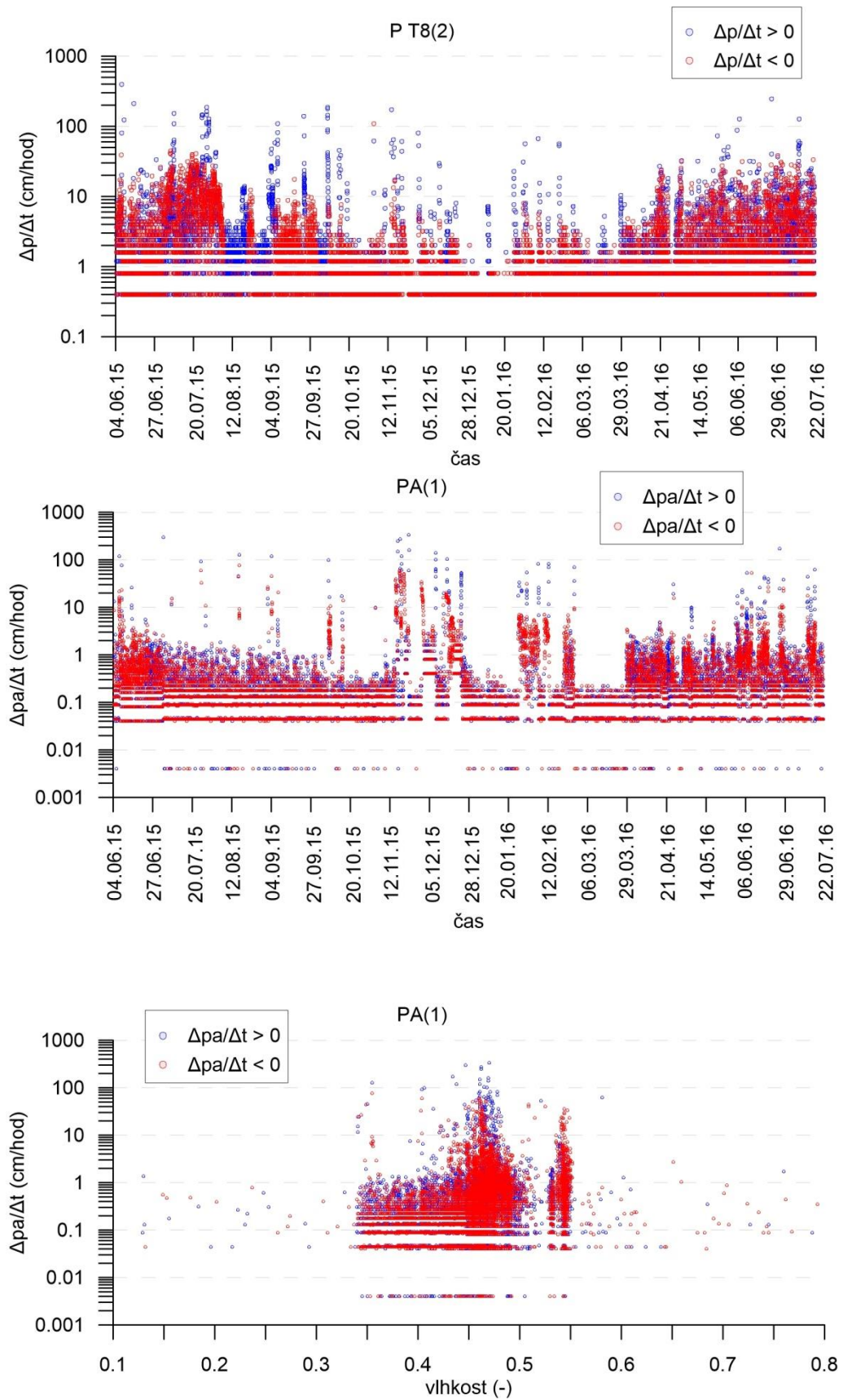
ZUMR D., T. Dostál, J. Devátý (2015), *Identification of prevailing storm runoff generation mechanisms in an intensively cultivated catchment*. J. Hydrol. Hydromech., 63, 246-254, doi: 10.1515/johh-2015-0022

### **Internetové zdroje**

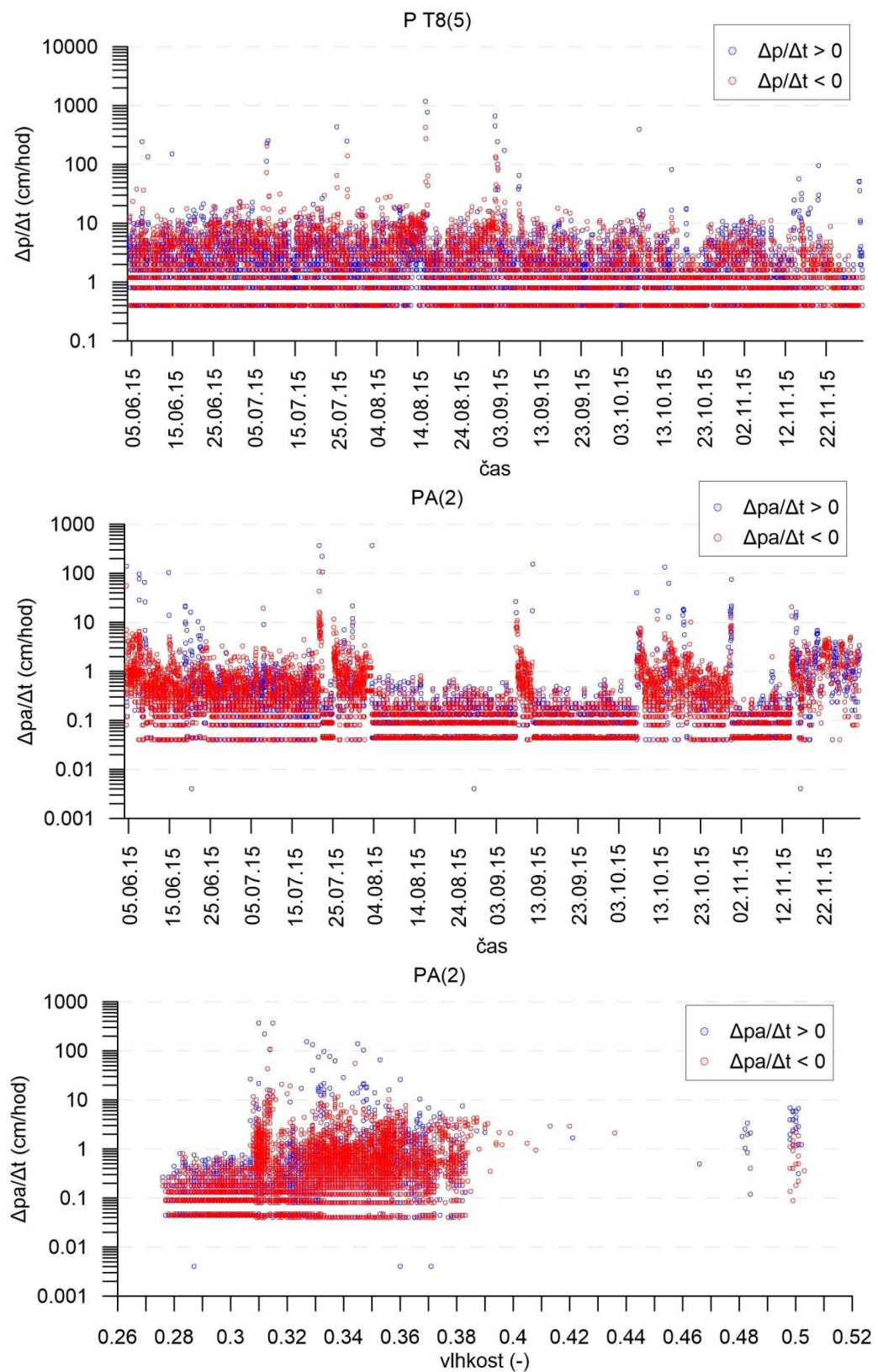
*Geoportál INSPIRE* [online]. Cenia, 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>

*UMS* [cit. 2016-12-16]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/en>

**Příloha 1:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 – 21. 7. 2016 (celé analyzované období)

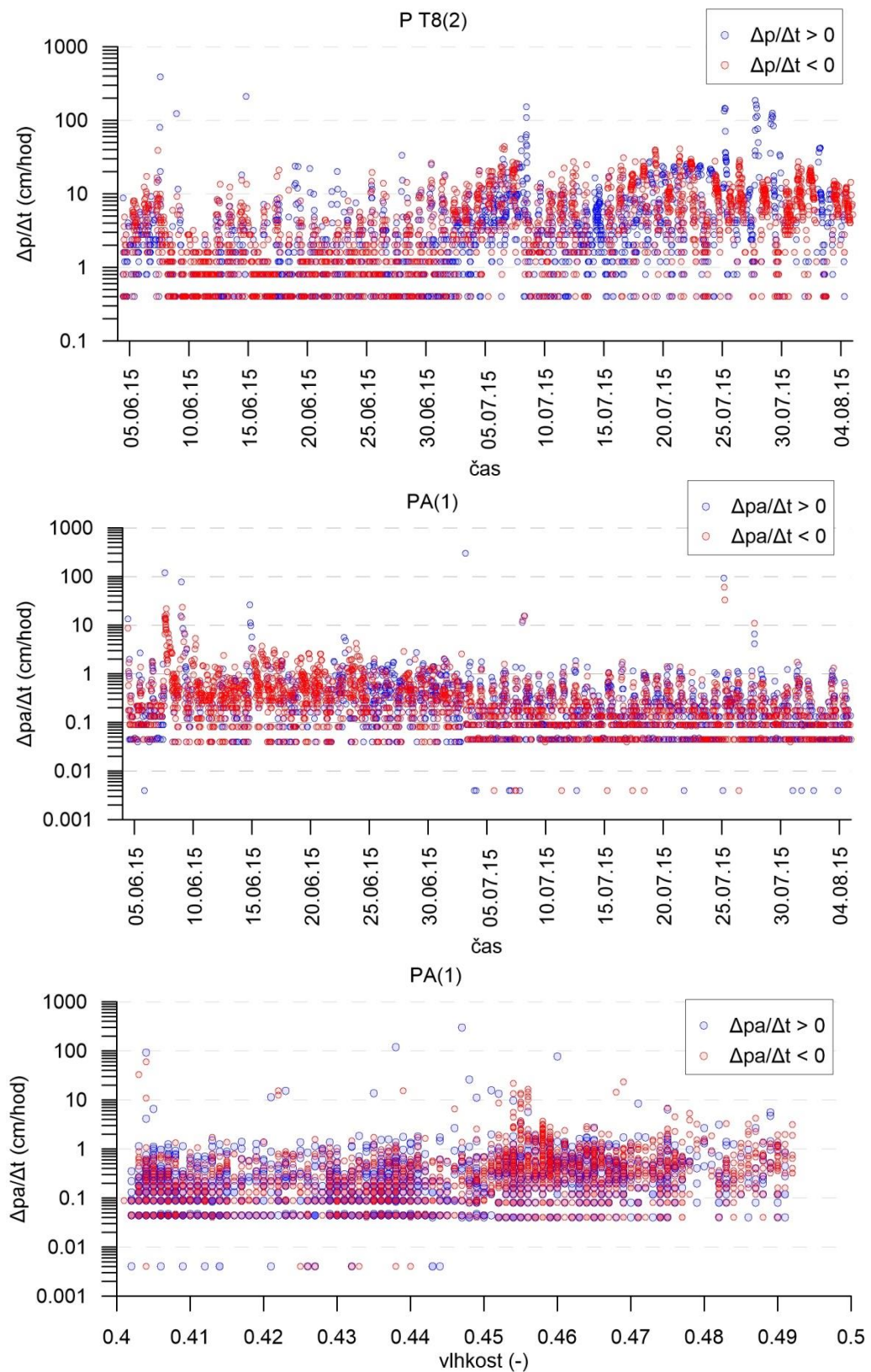


**Příloha 2:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. 2015 – 1. 12. 2015 (celé analyzované období)

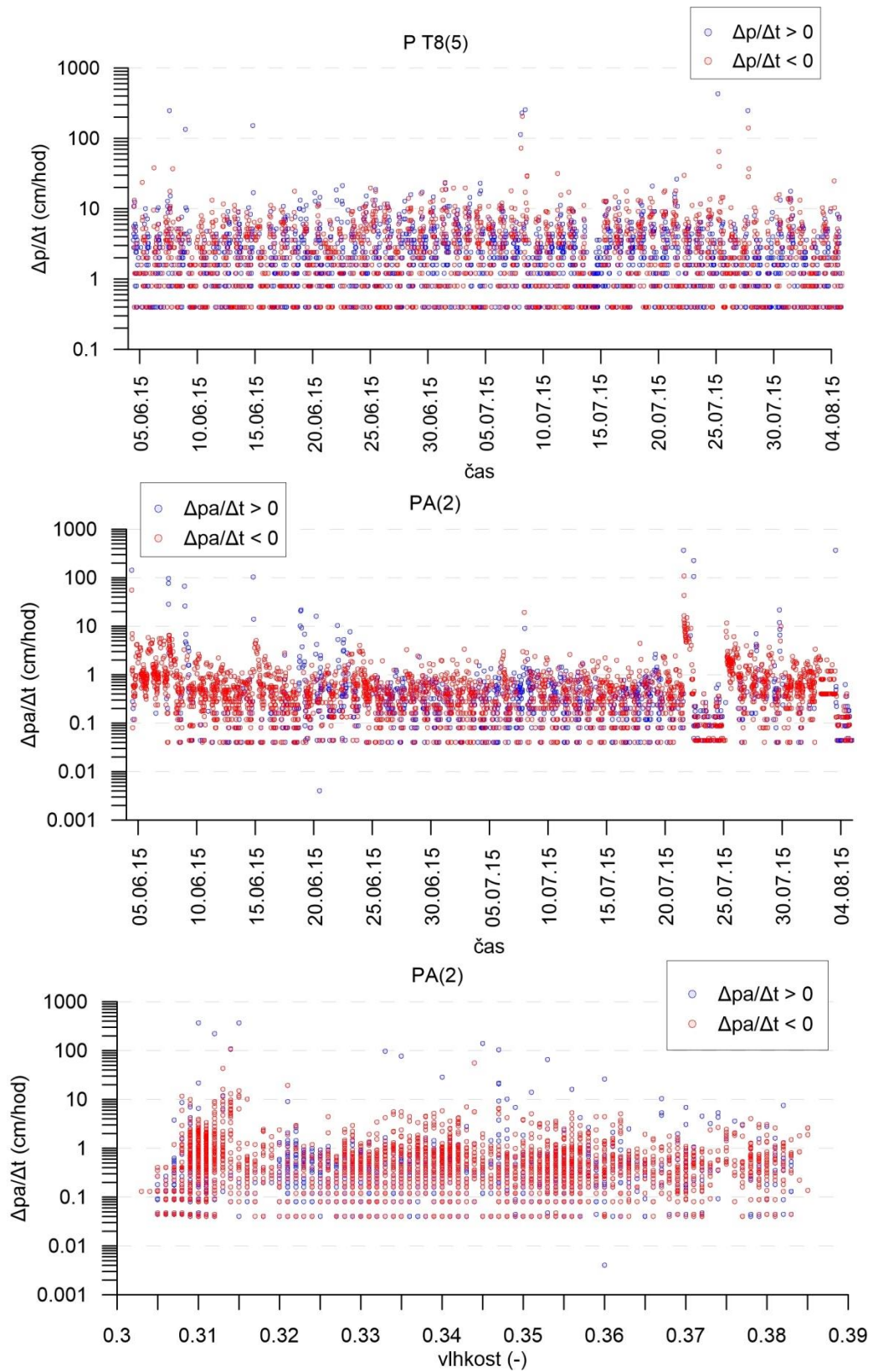




**Příloha 3:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 4. 6. 2015 – 4. 8. 2015

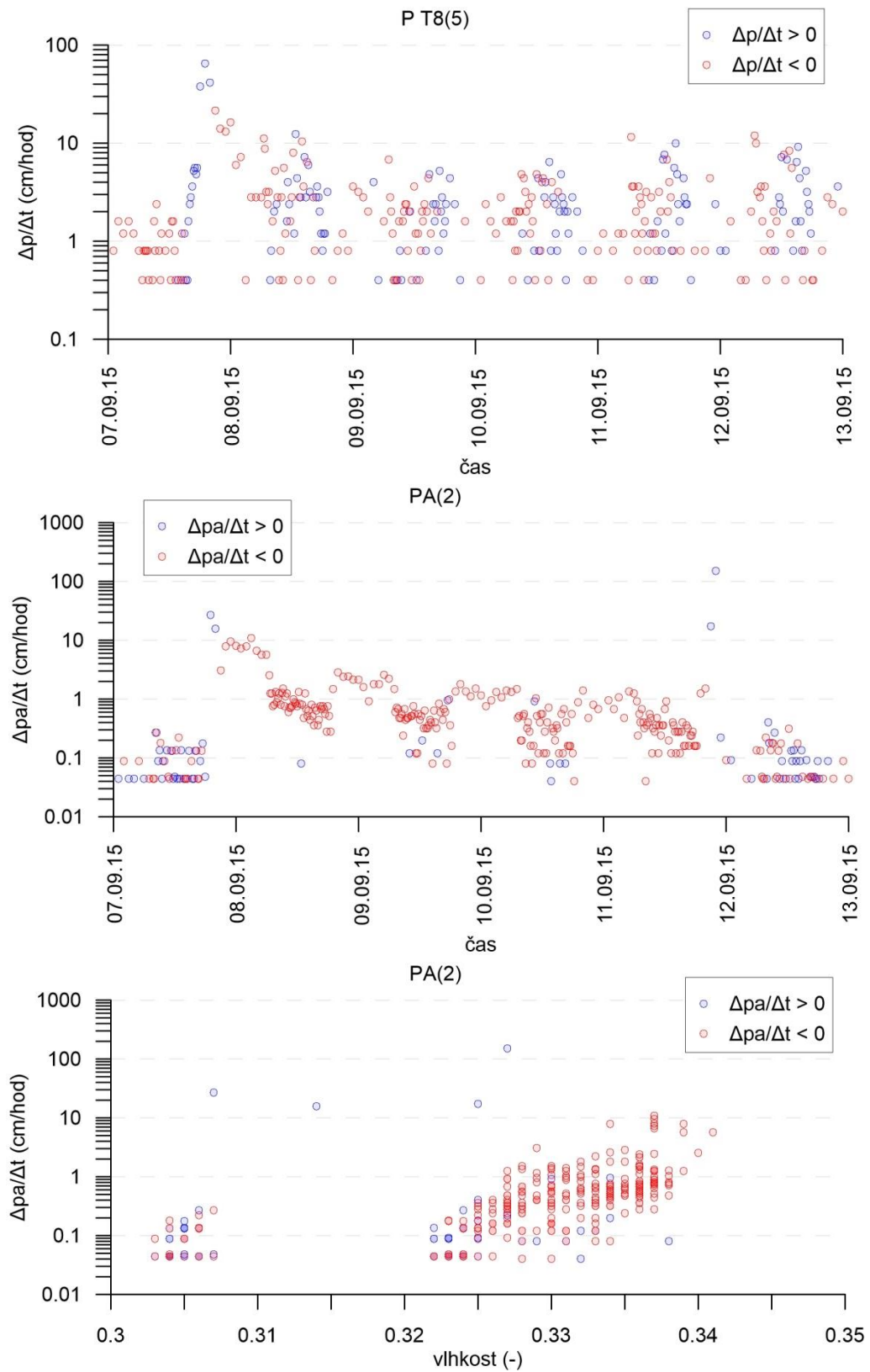


**Příloha 4:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 4. 6. 2015 – 4. 8. 2015

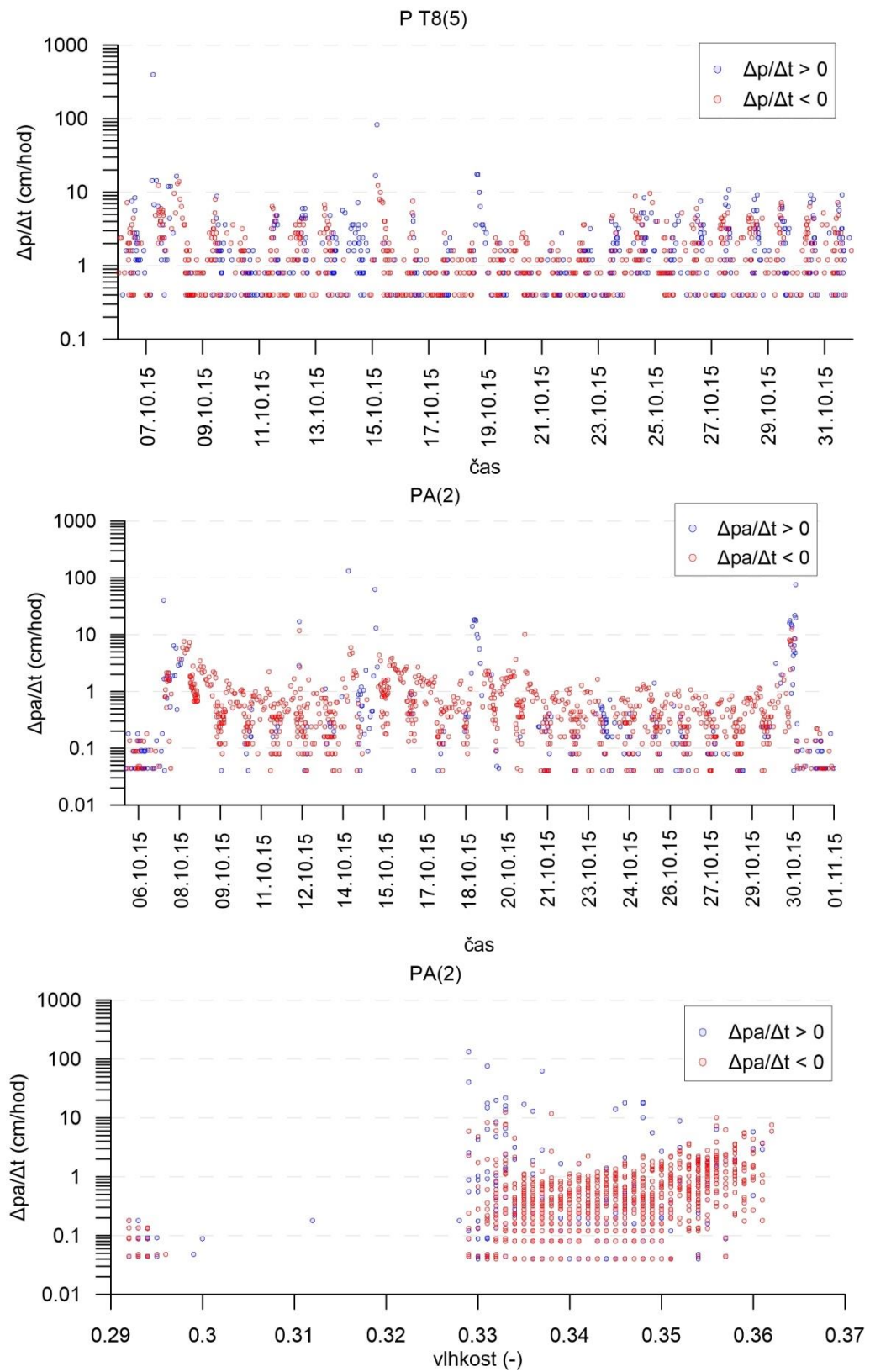




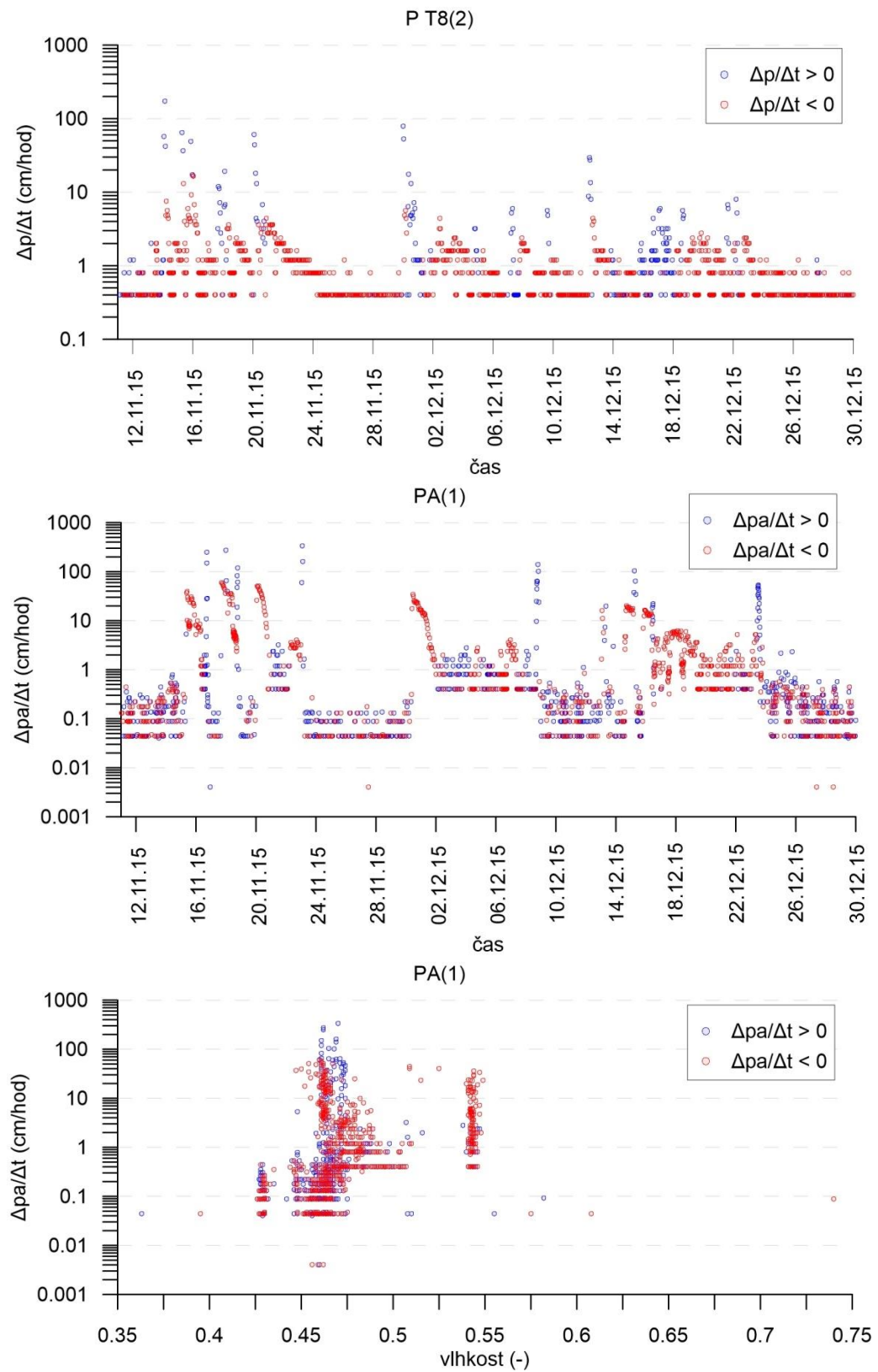
**Příloha 5:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 7. 9. 2015 – 12. 9. 2015



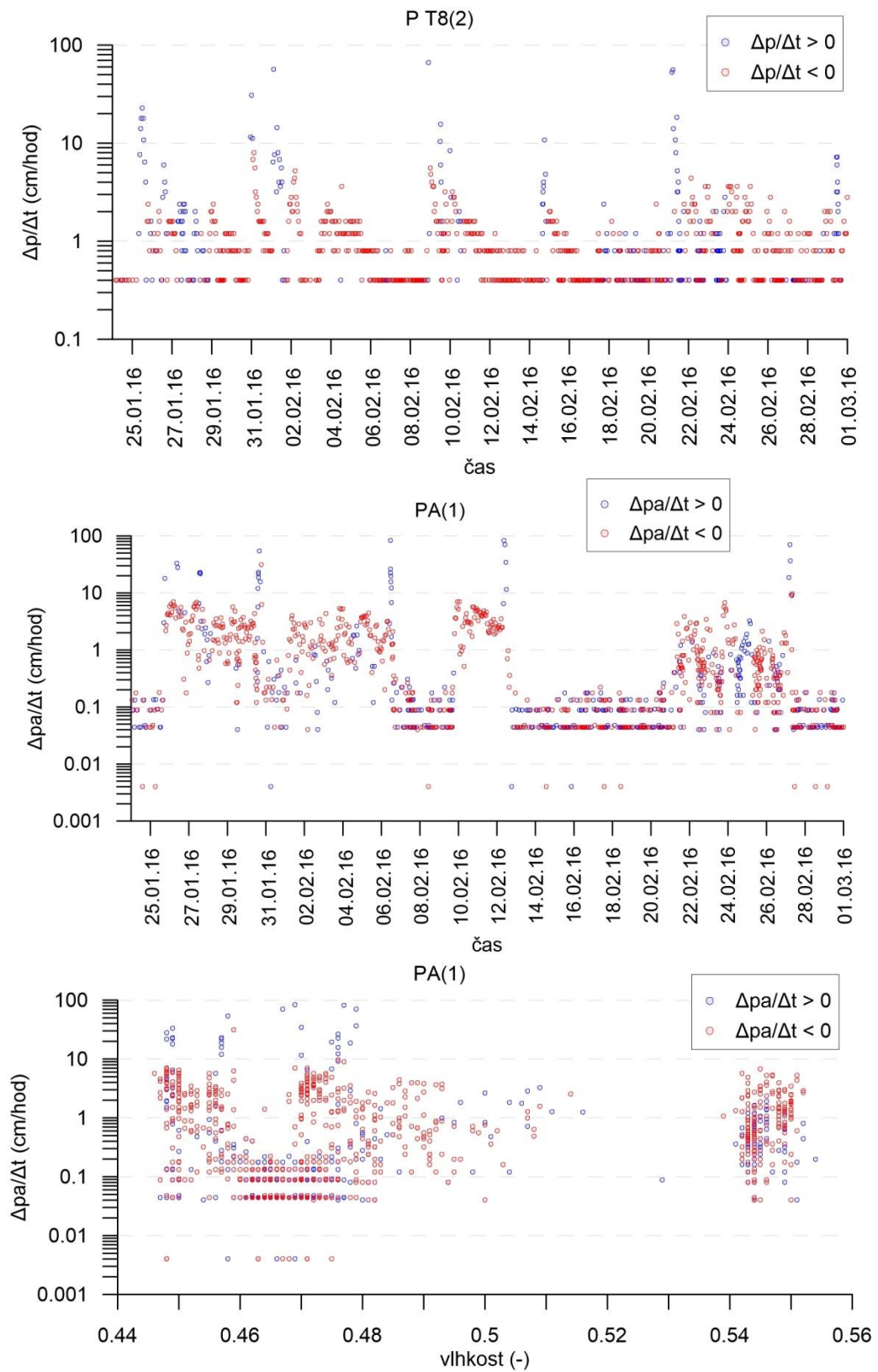
**Příloha 6:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 36,4 cm za období 6. 10. 2015 – 31. 10. 2015



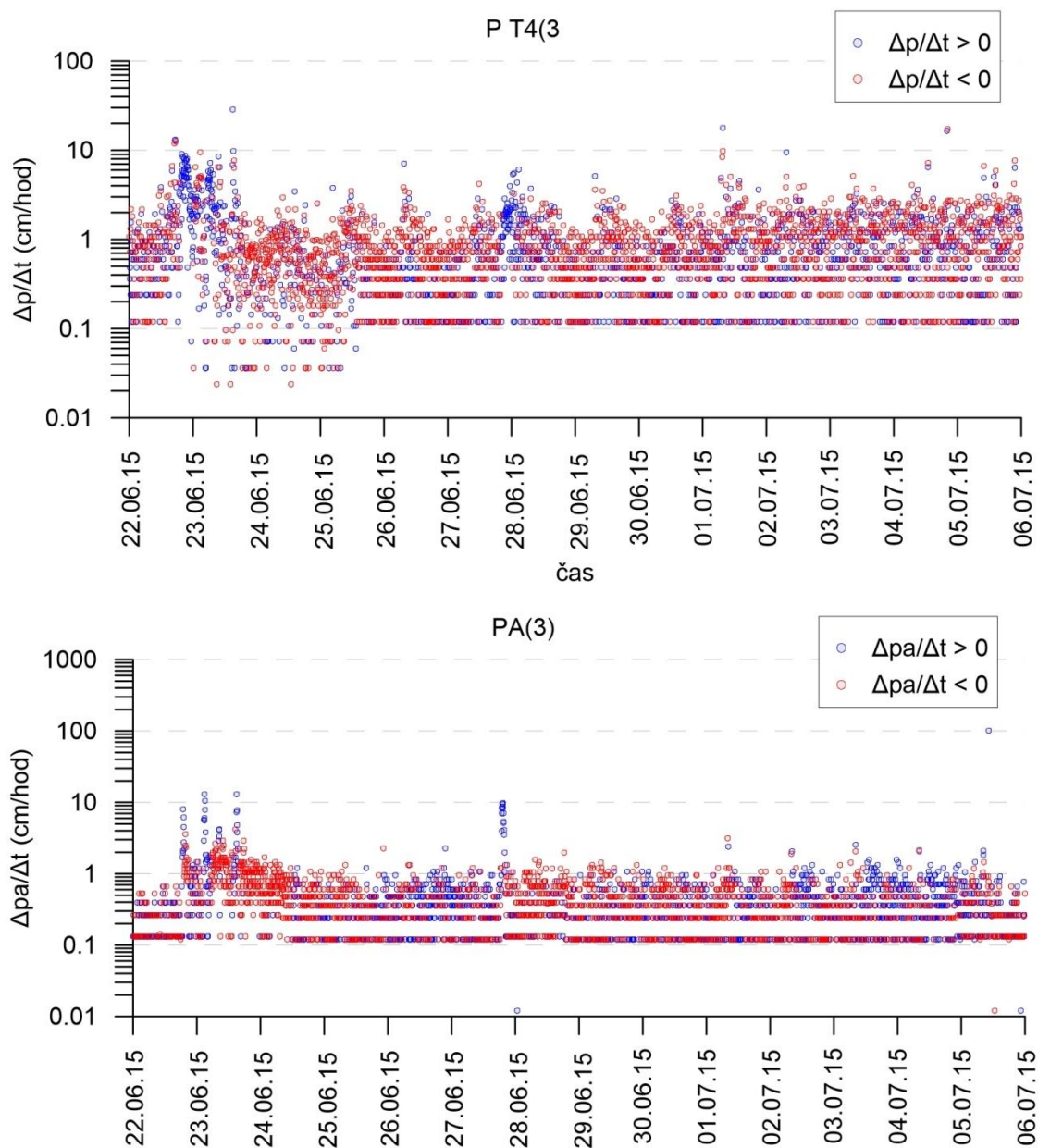
**Příloha 7:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 11. 11. 2015 – 29. 12. 2015



**Příloha 8:** Experimentální stanoviště Roklan graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas a změny tlaku půdního vzduchu v závislosti n vlhkosti v hloubce 15,9 cm za období 24. 1. 2016 – 29. 2. 2016

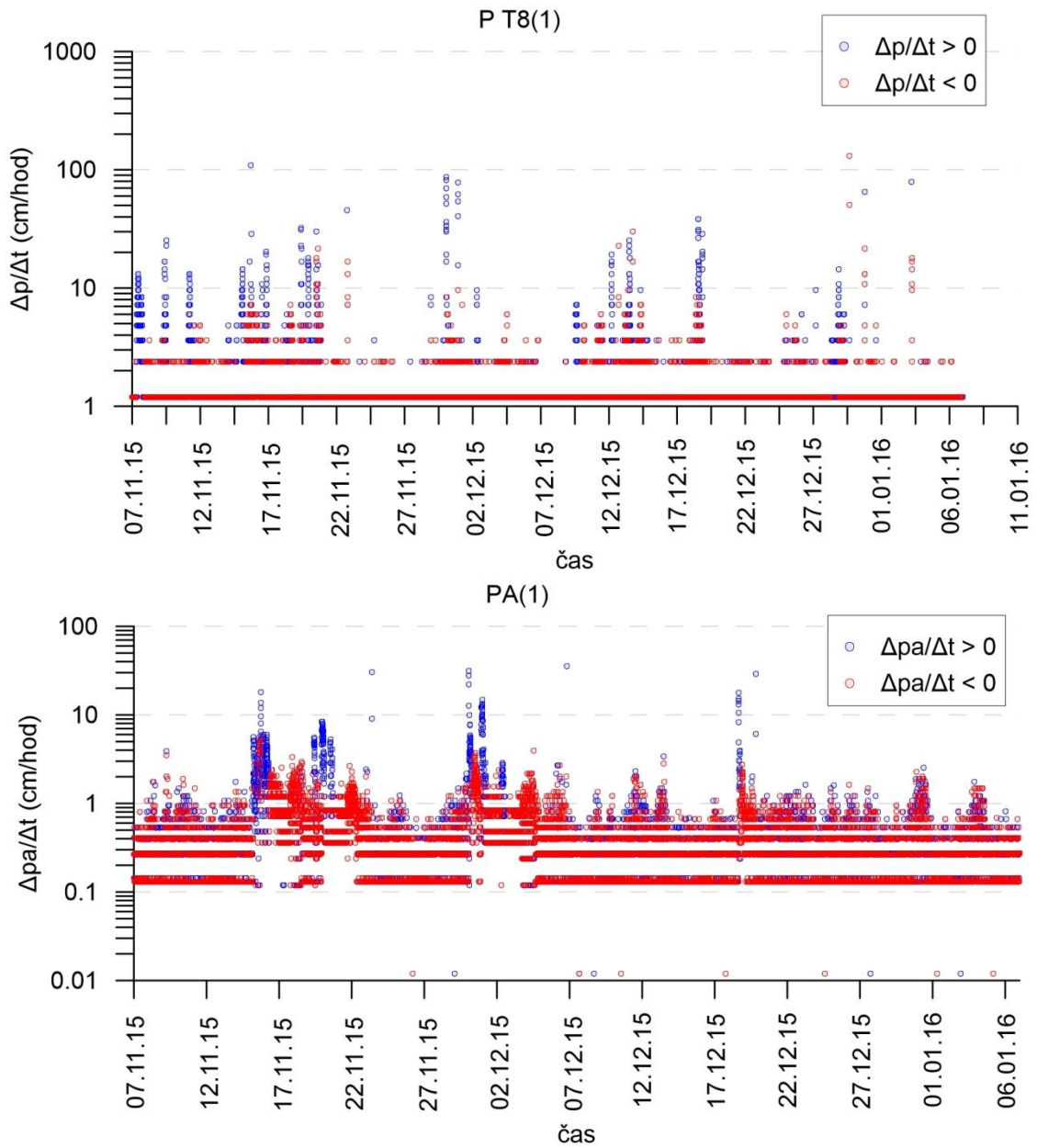


**Příloha 9:** Experimentální povodí Uhlířská graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas v hloubce 55,9 cm za období 22. 6. 2015 – 5. 7. 2015

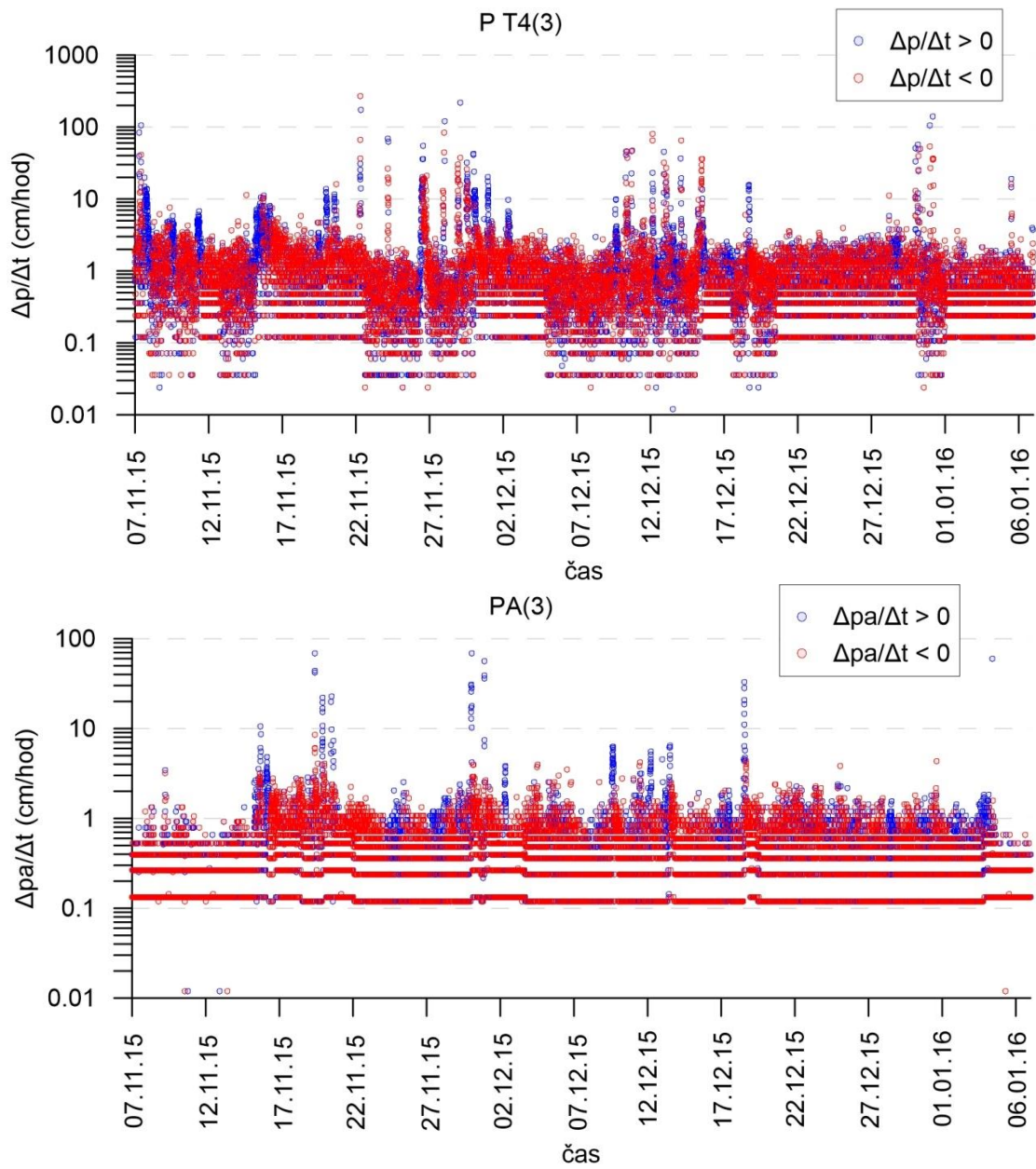




**Příloha 10:** Experimentální povodí Uhlířská graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas v hloubce 17 cm za období 7. 11. 2015 – 7. 1. 2016



**Příloha 11:** Experimentální povodí Uhlířská graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas v hloubce 55,9 cm za období 7. 11. 2015 – 7. 1. 2016



**Příloha 12:** Experimentální povodí Nučice, graf změny tlaku půdního vzduchu a tlakové výšky za čas v hloubce 43 cm za období 17. 11. 2015 – 2. 12. 2015

