

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ



VYHODNOCENÍ POHYBU VODY V POVODÍ NISY

ASSESSMENT OF THE WATER DYNAMICS IN NISA CATCHMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autorka: Pavlína Sedlmaierová

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

Katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Praha 2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby
akademický rok: 2014/2015


Jméno a příjmení studenta: Pavčina Sedlmaierová
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Šanda, Ph.D.
Název bakalářské práce: Vyhodnocení pohybu vody v povodí Nisy
Název bakalářské práce
v anglickém jazyce: Assessment of the water dynamics in Nisa catchment.


Rámcový obsah bakalářské práce: Pomocí sady dat stabilních izotopů kyslíku a vodíku vyhodnoťte dynamiku tvorby odtoku v povodí Nisy po měrný profil Žitava.

Datum zadání bakalářské práce: 16.2.2015 Termín odevzdání: 15.5.2015
(vyplňte poslední den výuky příslušného semestru)


Pokud student neodevzdal bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu bakalářskou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998. (SZŘ ČVUT čl. 21, odst. 4)

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


.....
vedoucí bakalářské práce


.....
vedoucí katedry

Zadání bakalářské práce převzal dne: 18.2.2015


.....
student

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x student, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání BP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se BP do databáze KOS.

BP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student BP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci studijních programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vyhodnocení pohybu vody v povodí Nisy* vypracovala samostatně s uvedením všech použitých zdrojů informací.

V Praze dne 15. 5. 2015

Podpis studenta



Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinovi Šandovi, Ph.D. za poskytnutí vstupních dat, odborné rady a za trpělivost a ochotu při zpracovávání bakalářské práce.

Poděkování patří také projektu AquaNisa za zprostředkovaná data, Dr. Ing. Mathiasovi Kändlerovi za doplňující hydrologická data z německého území a Ing. Martinovi Štichovi za poskytnutí mapových podkladů pro program GIS.



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vyhodnocením pohybu vody v povodí Lužické Nisy po měrný profil Žitava v Německu pomocí sady dat stabilních izotopů kyslíku a vodíku. Úvodní kapitoly jsou věnovány základní teorii izotopů, způsobům měření jejich koncentrace, konkrétním metodám analýzy stabilních izotopů, které byly použity pro měření vstupních hodnot a využití stabilních izotopů v hydrologii. Následuje popis řešeného území povodí Nisy včetně izotopových a hydrologických poměrů v regionu.

Další kapitoly se zabývají aplikací jednotlivých metod analýzy vstupních izotopových dat získaných ze srážkových vod, povrchového odtoku, půdních a podzemních vod. Mezi tyto metody patří zejména výpočet objemového podílu předsrážkové (staré) vody v povrchovém odtoku, teoretické doplnění chybných hodnot s využitím globální a lokální meteorické čáry vody, využití sinové funkce pro stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí, vyhodnocení periodického chování koncentrace izotopů ve vodním prostředí a využití statistického vyhodnocení dat pomocí grafického znázornění krabicovými grafy, tzv. box-ploty. V rámci konkrétních metod je zkoumána závislost jednotlivých jevů na nadmořské výšce, hloubce odběru vzorků, způsobu využití území, délce časové řady vstupních dat.

Anotation

This bachelor thesis deals with assessment of the water dynamics in Nisa catchment until the sampling site in Zittau, Germany using data set of stable isotope of oxygen and hydrogen in water. Introductory chapters are focused on basic theory of isotopes, method of measurement of their concentration, particularly methods of stable isotopes analysis which were used for measurement of input values and application of stable isotopes in hydrology. Further, description of the area of interest includes hydrological and isotopic conditions in the region.

Next chapters deal with the application of particular methods of isotope analysis of input data obtained from rainwater, surface runoff, soil and groundwater. These methods include in particular the calculation of pre-event (old) - water volume fraction in surface runoff, theoretical complement defective values with the using global and local meteoric water line, application of sine function for the assessment of the mean residence time of water in the catchment and periodic behaviour of the isotopic concentrations in the water environment and statistical assessment of data using the graphical representation by graphs called box-plots. Within each method the dependence on altitude, depth of sampling, land use, and length of the time row of input data is examined.



Obsah

1	Úvod	8
2	Izotopy v hydrologii	9
2.1	Základní pojmy	9
2.1.1	Atomové jádro	9
2.1.2	Izotopy a jejich stabilita	9
2.2	Stabilní izotopy v hydrosféře	11
2.3	Stanovení koncentrace stabilních izotopů ve vodě	12
2.3.1	Standardy v izotopové hydrologii	12
2.3.2	Metody analýzy stabilních izotopů: hmotnostní spektrometrie a laserová spektroskopie	13
2.4	Využití stabilních izotopů v hydrologii	16
2.4.1	Statistické zpracování izotopových dat	17
2.4.2	Globální a lokální meteorická čára vody	18
2.4.3	Průměrná doba zdržení vody v povodí	23
2.4.4	Objemový podíl staré vody v odtoku	23
3	Využití stabilních izotopů vodíku a kyslíku v hydrologii zájmového území povodí Nisy	24
3.1	Lužická Nisa	25
3.1.1	Významné přítoky a obce na českém území	25
3.1.2	Významné přítoky a obce na německém území	26
4	Odebírání a měření vzorků	28
4.1	Odebírání vzorků z lyzimetru Žitava	31
5	Hydrologické poměry v povodí Lužické Nisy	33
5.1	Srážky	33
5.2	Průtoky	38
6	Průběh koncentrace izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ ve vodách	43
6.1	Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v povrchových odtocích	43
6.2	Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdní a podzemní vodě	46
6.3	Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkách	47
7	Vliv nadmořské výšky na střední hodnotu $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$	49
8	Box ploty v jednotlivých odběrných profilech	51
8.1	Srážky v povodí Uhlířská CZ24, v Liberci CZ25, v Oldřichově v Hájích CZ26, v Lučanech nad Nisou CZ50 a v Žitavě D15	51
8.2	Lužická Nisa v regionu Jablonce nad Nisou CZ1-CZ5	52



8.3	Horní tok Lužické Nisy v Lučanech nad Nisou CZ1, Černá Nisa u památníku Porscheho smrt v povodí Uhlířská CZ17 a Malá Jeřice v Betlémě CZ44	53
8.4	Lužická Nisa v Liberci v blízkosti ČOV CZ6, CZ7, CZ8-1, CZ-1a, CZ8-2 a CZ8-3 a její přítoky Františkovský potok CZ7-1 a Jizerský potok CZ7-2	54
8.5	Povodí Jeřice CZ9-CZ16	55
8.6	Celkový přehled box plotů v profilech povrchového odtoku na české straně	56
8.7	Půdní voda v povodí Uhlířská	57
8.8	Podzemní voda v povodí Uhlířská	59
8.9	Půdní voda sbíraná na experimentálním území VÚRV, v.v.i. v Betlémě, povodí Malé Jeřice CZ39-43	60
8.10	Profily na německé straně zájmového území D1-14	63
8.11	Půdní voda sbíraná v žitavském lyzimetru D19-1 až D19-6, a podzemní voda z vrtu v Žitavské ekologické výzkumné stanici D20	65
9	Aplikace výpočtu objemového podílu předrážkové (staré) vody v povrchovém odtoku ve všech profilech	67
9.1	Objemový podíl staré vody v odtoku v profilech CZ1-CZ17, CZ44 a D1-D14	71
10	Aplikace globální a lokální meteorické čáry vody	73
10.1	Doplnění hodnot vypařovaných vzorků	73
10.1.1	Vliv použití přibližné náhrady dat na jejich statistické rozložení v box plotu na příkladu půdní vody z žitavského lyzimetru v profilu D19	74
10.2	Sklonitost lokální meteorické čáry vody	77
11	Prokládání dat sinovou funkcí – stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí	83
11.1	Srážky a povrchové odtoky	83
11.1.1	Vliv doby měření	84
11.2	Půdní a podzemní voda	86
11.2.1	Vliv hloubky odběru vzorku na sinovou funkci	86
11.2.2	Podzemní a půdní voda	86
11.2.3	Půdní voda rašelinná a svahová	88
11.3	Průměrná doba zdržení vody v povodí - vliv hloubky odběrného místa	90
12	Závěr	92
13	Zdroje	94
14	Přílohová část	96
15	Fotodokumentace	101
16	Seznam obrázků	111



1 Úvod

Izotopová hydrologie je relativně mladý obor, který využívá stabilních izotopů kyslíku a vodíku jako přirozených stopovačů pro určování pohybu vody v hydrosféře. Na základě zjištěných koncentrací stabilních izotopů lze určit, jak se chová voda od výparu z hladiny oceánu do atmosféry, přes kondenzaci v podobě srážek, dopadu na zemský povrch, částečný výpar ze zemského povrchu, infiltraci a mísení s půdní a podzemní vodou, které následně vodu vytlačí do povrchového odtoku. Velkým přínosem pro metody analýzy stabilních izotopů bylo zavedení laserové spektroskopie pro měření jejich koncentrace, která značně snížila finanční i časové náklady. Výhodou využívání stabilních izotopů je jejich přirozený výskyt v přírodě, není třeba je tedy do vzorků dodávat a navíc nejsou radioaktivní.

Cílem této práce je vyhodnocení pohybu vody v povodí Lužické Nisy pomocí sady dat stabilních izotopů kyslíku a vodíku. Povodí Lužické Nisy po měrný profil Žitava bylo rovněž zájmovým územím projektu AquaNisa prováděným od září 2012 do dubna 2014, který se zabýval vyhodnocením kvality vody pomocí vybraných chemicko-fyzikálních parametrů. Mezi měřené parametry patřily mimo živiny, těžké kovy, huminové kyseliny, suspendované částice a také koncentrace izotopů kyslíku a vodíku, jež byly využity pro zpracování této práce.



2 Izotopy v hydrologii

2.1 Základní pojmy

Každý atom se skládá z jádra, ve kterém se vyskytují protony a případně i neutrony, a obalu, v němž se nacházejí elektrony. Prvek je charakterizován svým protonovým (atomovým) a nukleonovým číslem.

2.1.1 Atomové jádro

- *Protonové (atomové) číslo* se značí písmenem Z vlevo dole u značky prvku a udává počet protonů v jádře [13].
- *Neutronové číslo* se značí písmenem N a udává počet neutronů v jádře [2].
- *Nukleonové (hmotnostní) číslo* se značí písmenem A vlevo nahoře u značky prvku a udává součet protonů a neutronů v jádře [13].
- Pro tato čísla platí:

$$A = N + Z$$

1

- Označení prvku:

A_Z značka prvku např. ${}^{16}_8\text{O}$

- *Chemický prvek* je tvořen atomy se stejným nábojem jádra bez ohledu na hmotnost jádra [8].
- *Nuklid neboli izotop* je tvořen pouze atomy jednoho druhu s jádry se stejným nábojem a stejnou hmotnostní jádra. (Nuklid je tedy na rozdíl od prvku charakterizován nábojem a hmotností jádra.) Dva různé nuklidy téhož prvku mají shodné chemické, ale rozdílné fyzikální vlastnosti (liší se hmotností jádra, tedy počtem neutronů) [8].

2.1.2 Izotopy a jejich stabilita

Izotopy se vyskytují ve *stabilní* nebo *nestabilní (radioaktivní)* formě. Stabilní izotopy, jako je právě ${}^2\text{H}$ (deuterium) nebo ${}^{18}\text{O}$, se nerozpadají a nejsou radioaktivní, proto jsou vhodné jako stopovače. Nestabilní izotopy neboli radionuklidy mají tendenci dostat se do stabilní formy pomocí procesu vyzařování nadbytečné energie nebo částic. Tento proces se



nazývá radioaktivita [13]. Radioaktivita může být přirozená (radionuklidy vyskytující se v přírodě) nebo umělá (radionuklidy uměle vytvořené v laboratoři) [9].

Míra stability izotopu je charakterizována tzv. *poločasem rozpadu (přeměny)*, jenž představuje čas, za který se s původního množství radionuklidu rozpadne právě polovina. Po uplynutí dvou poločasů rozpadu zůstává jen 1/4 nerozpadnutých radionuklidů, po třech poločasech je to 1/8 z původního množství (viz *Obrázek 1*), protože rozpad probíhá na základě radioaktivního zákona, který je dán vztahem[13]:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad 2$$

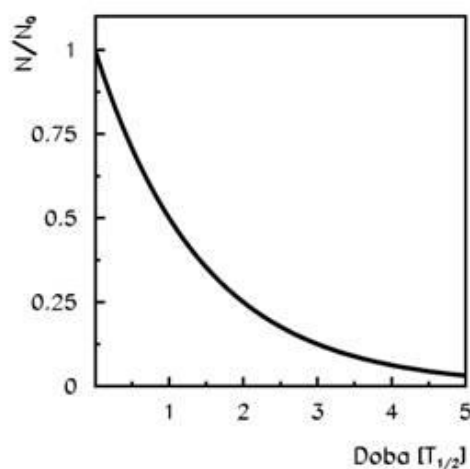
Kde:

- N je původní množství daného radionuklidu
- N_0 je počet nuklidů, které se po čase t ještě nerozpadly
- λ je rozpadová konstanta charakterizující rychlost rozpadu radionuklidů [s^{-1}]

Poločas rozpadu $T_{1/2}$ je veličina, která nahrazuje rozpadovou konstantu a je dán vztahem [13]:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

3



Obrázek 1 - úbytek poměru nerozpadnutých radionuklidů a jejich počátečního množství v závislosti na poločasu rozpadu [20]



Chemický prvek se může vyskytovat ve stabilní i nestabilní formě, například kyslík se vyskytuje v podobě tří stabilních izotopů (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) a ve čtyřech různých nestabilních formách (^{13}O , ^{14}O , ^{15}O a ^{20}O) [13]. Vodík se vyskytuje ve dvou stabilních formách (^1H a ^2H) a jedné nestabilní podobě (^3H).

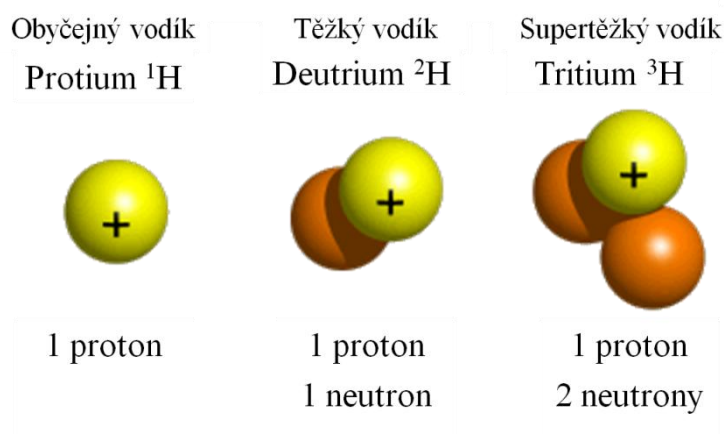
2.2 Stabilní izotopy v hydrosféře

Poměrné zastoupení jednotlivých izotopů v přírodě považujeme za konstantní, protože jejich procentuální výskyt je výsledkem dlouhodobého působení fyzikálních procesů, ale obsah izotopů v přírodních vodách je vlivem působení různých fyzikálních a chemických procesů proměnlivý [13].

V hydrosféře jsou za významné považovány zejména izotopy vodíku a kyslíku, vyskytují se ve všech formách přírodních vod, a podílejí se tedy na celkovém hydrologickém cyklu. Proto jsou také indikátorem různých dějů probíhajících v přírodních vodách. Kyslík vytváří tři stabilní izotopy, jejichž procentuální složení v přírodě je následující: ^{16}O ~ 99,76 %, ^{17}O ~ 0,037 % a ^{18}O ~ 0,204 % [13]. Vodík vytváří tři nuklidy (viz *Obrázek 2*), a sice:

- Stabilní protium (hydrogenium) ^1_1H , tzv. „lehký vodík“
- Stabilní deuterium ^2_1H , tzv. „středně těžký vodík“
- Radioaktivní tritium ^3_1H , tzv. „supertěžký vodík“

Z izotopů vodíku má největší procentuální zastoupení v přírodě stabilní izotop - protium ^1H ~ 99,985 %, následuje stabilní deuterium ^2H ~ 0,01 % a nejmenší podíl má radioaktivní tritium ^3H , které je množstevně zanedbatelné [14].



Obrázek 2 - izotopy vodíku [11]



2.3 Stanovení koncentrace stabilních izotopů ve vodě

2.3.1 Standardy v izotopové hydrologii

Mořská voda tvoří kolem 96,54 % v hydrosféře z hlediska objemu i nuklidového složení [25]. Proto se používá jako standard pro vyjádření obsahu ^2H (deuteria) a ^{18}O v přírodní vodě. Množství izotopů se nevyjadřuje přímým množstvím (kvantitativně), ale relativním poměrem odchylky δ množství izotopů vůči standardu [13]. Současně používaný standard od roku 1967 V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) se používá jako referenční materiál pro porovnání deficitu těžších izotopů ve vzorku vůči směsi vody z vybraných oceánů. Směs oceánských vod V-SMOW má známé poměry $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($2,0052 \cdot 10^{-3}$) a $^2\text{H}/^1\text{H}$ ($1,5576 \cdot 10^{-4}$), s nimiž se porovnávají deficity ve zkoumaných vzorcích [17]. Tento deficit se označuje řeckým písmenem δ . Jedná se vždy o vyjádření poměru těžšího izotopu k lehčímu izotopu, jde tedy o poměry $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ nebo méně častý poměr $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$. Odchylky množství vůči standardu jsou vyjádřeny následujícími vzorci:

- Izotopy kyslíku:

$$\delta_{8}^{18}\text{O}_{\text{vzorek}} = \left(\frac{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}_{\text{vzorek}}}{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 [\text{‰}]$$

4

- Izotopy vodíku:

$$\delta_{1}^{2}\text{H}_{\text{vzorek}} = \left(\frac{\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}_{\text{vzorek}}}{\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 [\text{‰}]$$

5

kde ^2_1H , ^1_1H , $^{18}_8\text{O}$ a $^{16}_8\text{O}$ je množství jednotlivých izotopů v molekule vody vzorku vyjádřený vůči množství jednotlivých izotopů v molekule oceánské vody V-SMOW. Oceánská voda má



tedy odchylku rovnou nule, zatímco pro Českou republiku je běžná odchylka $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkách a ostatních vodách v přibližném rozmezí -2 ‰ až -20 ‰ [16]. Odchylka $\delta^2\text{H}$ v České republice běžně nabývá zpravidla hodnot v rozmezí -5 ‰ až -150 ‰. Záporné hodnoty odchylky znamenají, že poměr těžšího k lehčímu izotopu vzorku je menší než stejný poměr V-SMOW, a proto je vzorek izotopově lehčí než standard. Čím vyšších dosahuje odchylka hodnot, tím je vzorek izotopově těžší.

Podle V-SMOW se kalibrují přístroje, které slouží k měření koncentrací izotopů vyjádřených formou odchylek od tohoto standardu. Vytvořená směs V-SMOW i druhý základní standard SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation) jsou skladovány v BIPM v Paříži (Bureau International des Poids et Mesures) a v laboratořích IAEA (International Atomic Energy Agency) ve Vídni. Problémem je, že se malé vzorky směsi posílají do jednotlivých laboratoří pro kalibraci měřicích přístrojů a tím dochází k postupnému vyčerpání původní směsi. Proto byla v roce 2006 pod vedením IAEA vytvořena náhradní směs nazývaná V-SMOW2. Originální směs V-SMOW byla nahrazena téměř perfektně, neboť V-SMOW2 má skoro identické izotopové složení jako původní směs. Toho bylo dosaženo smícháním tří vzorků oceánské vody [7].

2.3.2 Metody analýzy stabilních izotopů: hmotnostní spektrometrie a laserová spektroskopie

Mezi analytické metody vyjadřování obsahu izotopu ve vzorku řadíme několik metod. Jednou ze skupin metod jsou metody využívající určení poměru veličin, které na izotopovém složení přímo závisí, je to například hmotnostní spektrometrie. Další skupina metod využívá jaderných vlastností posuzovaného izotopu, jedná se například o aktivační analýzu, jadernou rezonanční spektroskopii nebo o metody založené na absorpci a rozptylu záření [2].

Hmotnostní spektrometrie

Univerzální metodou pro stanovení téměř všech druhů izotopů je hmotnostní spektrometrie. Jde o metodu IRMS (stable isotope-ratio mass spectrometry) používanou po desítky let [6]. Jedná se o analytickou metodu, která určuje izotopové složení na základě přeměny molekul vzorku na ionty a jejich rozlišení pomocí poměru jejich hmotnosti a náboje (m/z , kde m je hmotnost iontu a písmeno z značí počet elementárních nábojů bez ohledu na polaritu) [5]. Základními částmi hmotnostního spektrometru jsou iontový zdroj, iontooptický



systém umožňující rozdělení iontů podle jejich specifických nábojů a kolektor (detektor). Vzorek je převeden do plynného stavu a napouštěcím zařízením převáděn do spektrometrické trubice, kde jsou molekuly pomocí iontového zdroje přeměněny na ionty, které vytváří iontový svazek a pohybují se směrem ke kolektoru vlivem potenciálního spádu. Iontový zdroj, spektrometrická trubice a kolektor jsou napojeny na vakuové zařízení, jež zajišťuje potřebný tlak. Na iontový svazek ve spektrometrické trubici působí magnetické pole, jehož vlivem se ionty rozdělí podle svého náboje, na kolektor tedy dopadnou jen ionty s daným specifickým nábojem. Ionty mohou být kromě magnetického pole urychlovány i elektrickým polem, kdy částice s menším poměrem m/z doletí k detektoru dříve. Na základě zaznamenaného spektra je pak vyhodnoceno množství izotopu ve vzorku. Hmotnostní spektrum lze zobrazit graficky zaznamenaním intenzity na ose y (množství částic ve vzorku) s daným poměrem m/z zobrazeným na ose x [2], [1].

Laserová spektroskopie

Laserová spektroskopie (LAS – Laser absorption spectroscopy) je nově vyvinutá technologie, která nabízí nízké náklady a vysokou přesnost pro stanovování izotopu vodíku a kyslíku ve vzorcích vody [6]. Tato nová technika je méně pracná a méně ekonomicky náročná – má nižší pořizovací i provozní náklady než klasická hmotnostní spektrometrie. Na rozdíl od hmotnostní spektrometrie umožňuje současné měření izotopu vodíku a kyslíku. Laserová spektroskopie proto poskytuje výkonný nástroj pro zvýšený hydrologický monitoring v prostoru a čase. Dříve bylo měření izotopů vzhledem k vysoké ceně analýzy limitováno průměrnými směsnými měsíčními hodnotami nebo vzorky odebíranými jedenkrát měsíčně. Díky laserové spektroskopii se stává běžnější odebírat a vyhodnocovat vzorky denně nebo hodinově, popř. i v kratších intervalech. Vzorkování všech součástí hydrologického cyklu, jako jsou srážky, půdní i podzemní voda a povrchový odtok, se může stát běžným standardem v hydrologických studiích povodí [16].

Princip laserové spektroskopie je průchod vlnění médii (pevným, kapalným nebo plynným) a je utlumováno v důsledku rozptylu a absorpce. Výsledek měření znázorňuje spektrogram, který zachycuje závislost relativního útlumu laserového paprsku na relativní vlnové délce (viz *Obrázek 3*). Zkoumaný plyn je rozptýlen do měřicí komory.



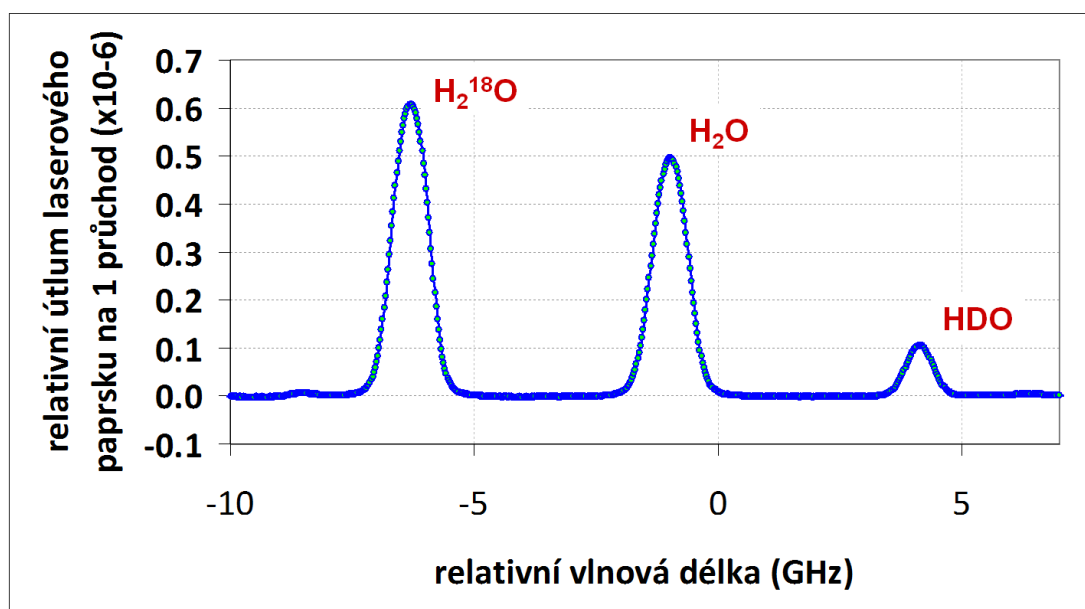
Útlum světla při dostatečně malé absorpci popisuje Beer-Lambertův zákon [18]:

$$I = I_0 \times e^{-\sigma NL}$$

6

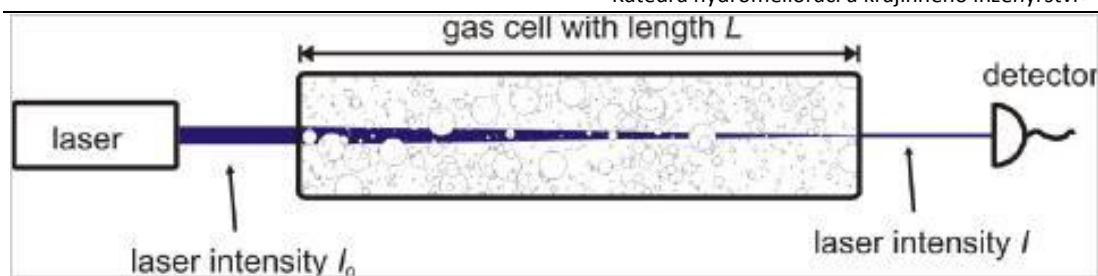
kde:

- I je intenzita měřená detektorem
- I_0 je původní intenzita světla vstupující do komory
- σ je absorpce [$\text{cm}^2/\text{molekulu}$]
- N je hustota absorbentu [$\text{molekula}/\text{cm}^3$]
- L je délka dráhy interakce světla s hmotou, neboli absorpční délka dráhy



Obrázek 3 - spektrogram znázorňující útlum vlnové délky (prostým H a O je nahrazen ^1H a ^{16}O) [17]

Při použití laserové spektroskopie je třeba zajistit specifičnost (možnost měření pouze plynu, který je předmětem zkoumání) a citlivost (možnost měření i malého množství plynu). Proto se často používají optické dutiny, uvnitř nichž jsou umístěna vysokoreflexní zrcadla, která umožňují prodloužení absorpční délky dráhy, tedy doby interakce světla a hmoty, tím se zvyšuje měřený signál a citlivost při současném zachování velikosti rezonátoru (viz Obrázek 5) [18].

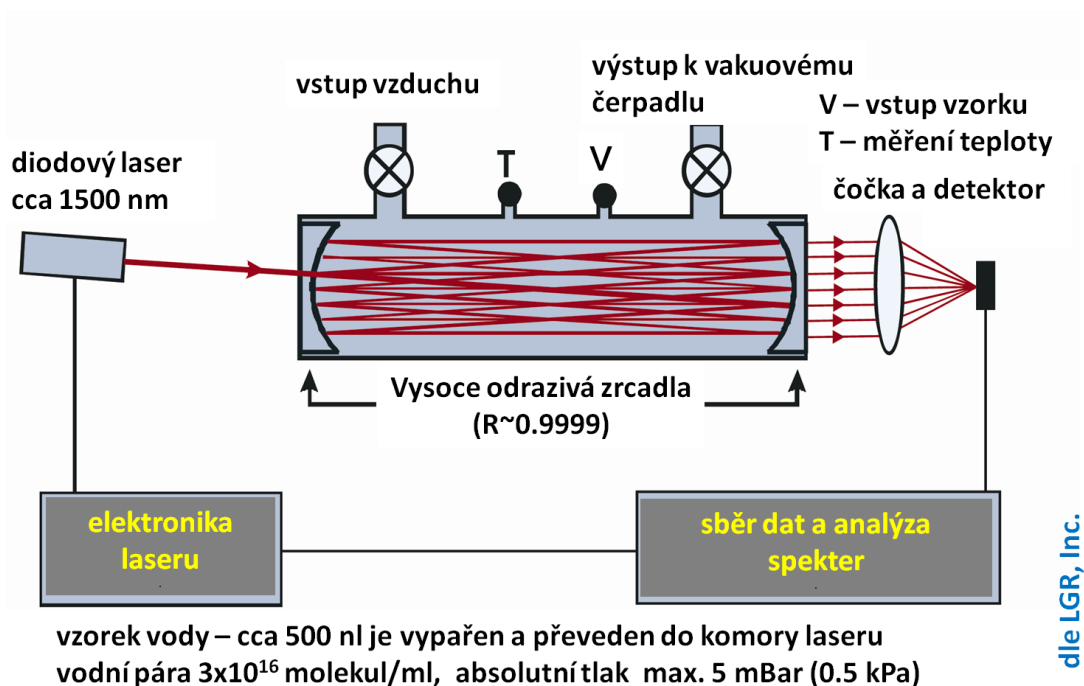


Obrázek 4 - jednoduchá absorpční spektroskopie [18]

Schéma přístroje mimo-osého laseru

Integrated Cavity Output Spectroscopy (ICOS)

Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)



Obrázek 5 - absorpční spektroskopie s prodlouženou absorpční délkou dráhy [17]

2.4 Využití stabilních izotopů v hydrologii

Vzhledem k tomu, že se izotopy vodíku a kyslíku vyskytují ve všech přírodních vodách a jejich poměrné zastoupení je v současnosti relativně snadno a levně měřitelné pomocí laserové spektroskopie, využívají se pro identifikaci různých hydrologických procesů. V závislosti na poloze, nadmořské výšce, teplotě a dalších faktorech lze pozorovat změny poměrů nuklidového složení ve směsi vody a z nich vyvodit procesy, k nimž dochází. Mezi tyto procesy lze zařadit například výpar a kondenzaci srážkové vody nebo veškeré děje probíhající ve srážkových, povrchových vodách v tocích i ve vodních plochách, půdních a podzemních vodách [13]. Dále lze izotopy vodíku a kyslíku využít pro stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí, objemového podílu staré a nové vody v povrchovém odtoku,



odlišení původu vody z různých zdrojů (ve vhodné situaci např. dešťová, splašková), určení vlivu tání sněhu, výparu z vodní plochy, mísení vod různého původu apod.

2.4.1 Statistické zpracování izotopových dat

Další kapitoly se věnují základnímu statistickému vyhodnocování dat, proto následuje stručný přehled statistických veličin.

Výběrový průměr „*charakterizuje, kde jsou data na reálné ose umístěna, nebo jinak řečeno jaké hodnoty nabývají data jako celek.*“ [10].

Výběrový rozptyl i směrodatná odchylka určují, jak se data liší od průměru. Výběrový rozptyl „*lze použít jako míru rozptýlenosti (variability).* Čím větší je výběrový rozptyl, tím více výsledky jevu kolísají.“ [10]. Výběrová směrodatná odchylka je definována jako druhá odmocnina výběrového rozptylu. Význam těchto veličin je stejný.

Uspořádaný výběr je náhodný výběr seřazený podle velikosti od nejmenší do největší. Na základě uspořádaného výběru určujeme kvantily. „*Hodnotě, pro kterou platí, že 100 p % pozorování je menších nebo rovných této hodnotě a 100 (1 - p) % pozorování je větších nebo rovných této hodnotě, říkáme 100 p% dolní výběrový kvantil. Hodnotě, pro kterou platí, že 100 (1 - q) % pozorování je menších nebo rovných této hodnotě a 100 q % pozorování je větších nebo rovných této hodnotě, říkáme 100 q% horní výběrový kvantil.*“ [10].

Dolní kvartil je 25% výběrový dolní kvantil, tedy 25 % pozorování je menších nebo rovných hodnotě dolního kvantilu. Horní kvartil je 25% výběrový horní kvantil, tedy 25 % pozorování je větších nebo rovných hodnotě horního kvantilu. Medián je 50% horní, respektive dolní kvantil, dělí tedy uspořádaný výběr na dvě poloviny. Rozdíl mezi horním a dolním kvartilem se nazývá mezikvartilové rozpětí. Rozdíl mezi minimem a maximem je označován jako rozpětí a nejčastěji vyskytovaná hodnota v souboru dat se nazývá modus.

Výše uvedené veličiny graficky znázorňuje tzv. box-whisker plot neboli krabicový graf, jenž vyjadřuje souhrnné informace o pravděpodobnostních charakteristikách náhodného výběru. Základní část grafu tvoří „krabíčka“, jež je ohraničená dolním a horním kvartilem. Čára mezi horním a dolním kvartilem značí medián. Vzdálenost mezi horním a dolním kvartilem se nazývá mezikvartilové rozpětí. Postranní čáry box plotu sahají do vzdálenosti



minima, respektive maxima, v případě, že v souboru nejsou odlehlá pozorování. Vzdálenost mezi minimem a maximem je označována jako rozpětí.

Za odlehlá pozorování jsou považována data ležící ve vzdálenosti větší než 1,5 násobek mezikvartilového rozpětí od horního, respektive dolního kvartilu. V případě přítomnosti odlehlých pozorování jsou tato data označena a za minimum, respektive maximum je považována hodnota nejvzdálenější od dolního, respektive horního kvartilu, která zároveň není větší než 1,5 násobek mezikvartilového rozpětí.

2.4.2 Globální a lokální meteorická čára vody

Meteorická čára vody obecně vyjadřuje závislost $\delta^{18}\text{O}$ na $\delta^2\text{H}$. Globální meteorickou čáru (GMWL – Global meteoric water line), (viz *Obrázek 6*), empiricky stanovil Craig jako „vztah mezi poměrem izotopu vodíku a kyslíku v přírodních vodách vyjádřený jako celosvětový průměr“ [21]. Globální meteorickou čáru srážek lze vyjádřit rovnicí

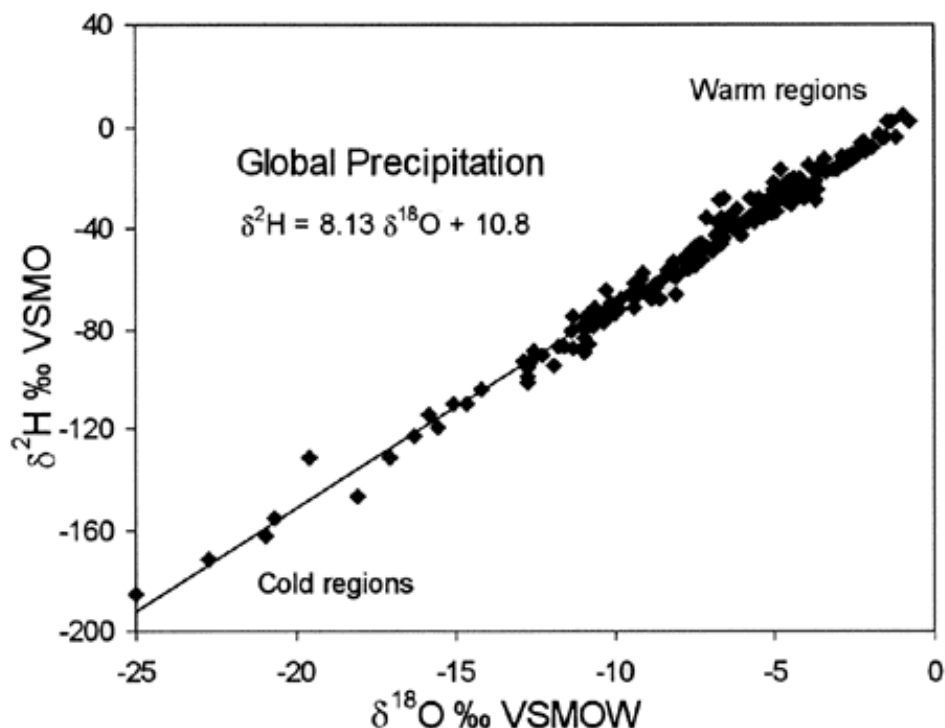
$$\delta^2H = 8 \times \delta^{18}O + 10 \quad 7$$

kde:

- $\delta^2\text{H}$ je izotop vodíku,
- $\delta^{18}\text{O}$ je izotop kyslíku.

Zavádí se pak veličina deuteriový přebytek d :

$$d = \delta^2H - 8 \times \delta^{18}O \quad 8$$



Obrázek 6 - globální meteorická čára vody [7]

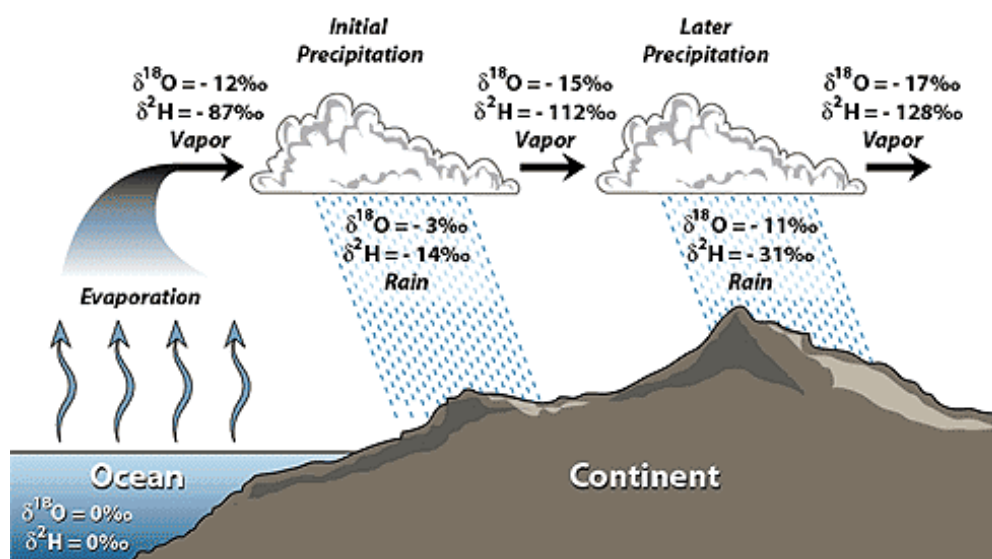
Lokální meteorická čára (LMWL – Local meteoric water line) je závislost $\delta^{18}\text{O}$ na $\delta^2\text{H}$ v konkrétní oblasti. Deficit izotopů vodíku i kyslíku se mění v závislosti na (viz Obrázek 9):

- vzdálenosti od oceánu,
- teplotě a klimatu,
- nadmořské výšce,
- zeměpisné šířce,
- ročním období,
- vlhkosti vzduchu.

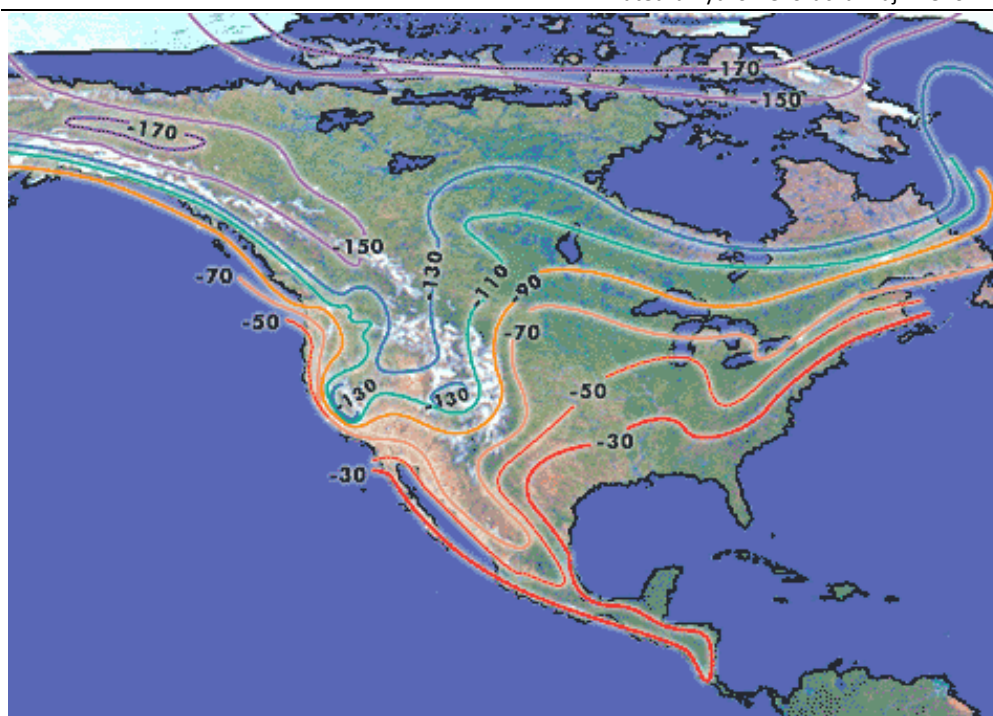
Molekuly vody obsahující těžší izotop nemají takovou tendenci se vypařovat jako molekuly vody s lehčím izotopem. Proto při výparu vody nastává ochuzení zbývající vody o lehčí izotopy (více se vypaří molekul s ^2H než s ^{18}O) a deficit δ nabývá záporných hodnot. Naopak při kondenzaci mají větší tendenci se shlukovat těžší molekuly a srážka je izotopově těžší, nabývá vyšších hodnot δ , ale ve většině případů stále záporných vzhledem ke standardu V-SMOW. Počáteční voda, která se dostala do cyklu je s postupem do vnitrozemí cyklicky (výpar vs. kondenzace) ochuzována o těžší izotopy (viz Obrázek 7). Obrázek 8 ukazuje na příkladu Severní Ameriky vliv vzdálenosti od pobřeží na průměrnou velikost deficitu izotopu



vodíku ve srážkové vodě, který se směrem do vnitrozemí zvyšuje. Dále lze vidět vliv zeměpisné šířky, kdy se deficit zvyšuje s rostoucí zeměpisnou šířkou. Závislost na zeměpisné šířce souvisí i s průměrnou teplotou – v nižších zeměpisných šířkách se obecně nachází teplejší regiony a hodnoty $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ nabývají vyšších hodnot než v chladnějších regionech ležících ve vyšších zeměpisných šířkách (viz *Obrázek 6*). Směrem k pólu jsou srážky izotopově lehčí. Mapa také zobrazuje vliv návětrné a závětrné strany velkých hor na západním pobřeží Severní Ameriky, kde dochází k vypršení těžších izotopů a deficit tak roste mnohem rychleji než na rovině (východní pobřeží), kde jsou čáry označující místa se stejným deficitem navzájem vzdálené řidčeji [7].

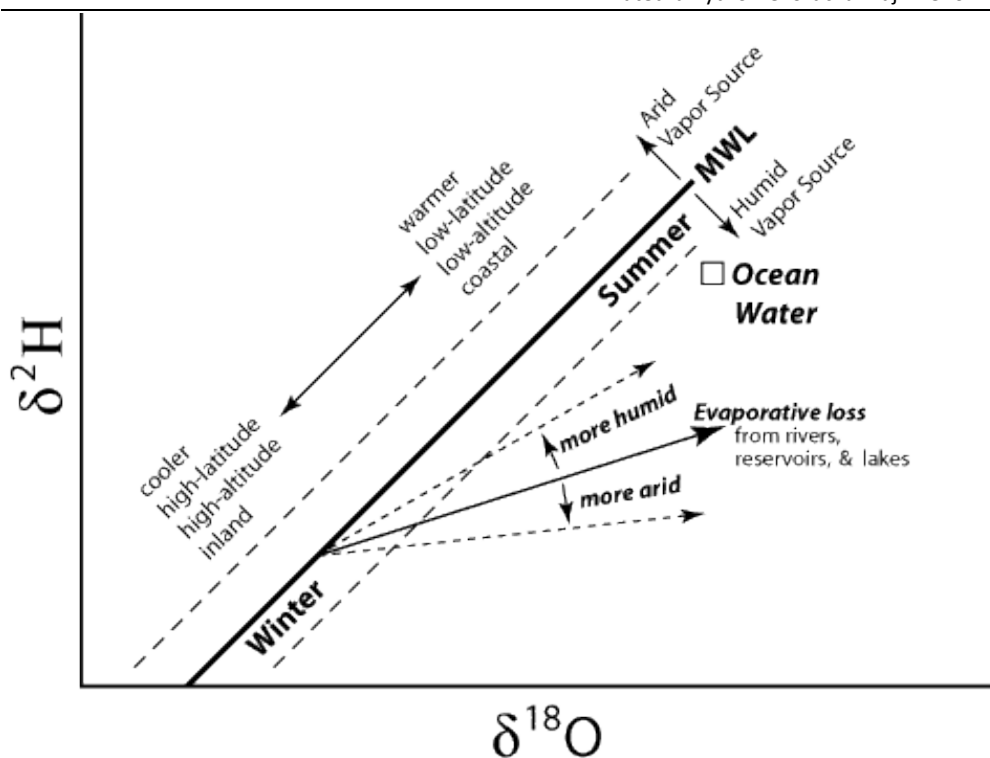


Obrázek 7 - změna deficitu izotopu vodíku a kyslíku v závislosti na výparu a kondenzaci [7]

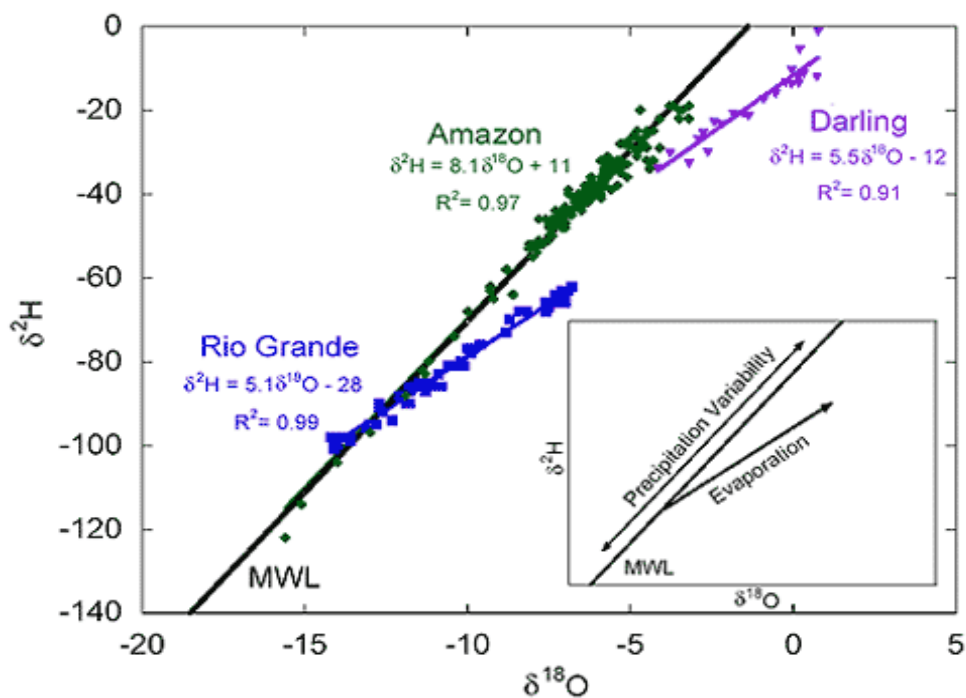


Obrázek 8 - vliv kontinentality na velikost deficitu izotopu vodíku ve srážce na příkladu Severní Ameriky [7]

Lokální meteorická čára v suché oblasti vykazuje stejný sklon jako ve vlhké oblasti, ale v teplém suchém klimatu bude položena výš než v teplém vlhkém klimatu v důsledku zvýšeného výparu (viz Obrázek 9). Stejný jev pozorujeme u čáry znázorňující ztrátu těžších izotopů výparem (viz Obrázek 10). Tento obrázek znázorňuje vliv vlhkosti a teploty na lokální meteorickou čáru. S rostoucí teplotou se kondenzace obohacuje těžšími izotopy. Pro kyslík platí obohacení o 0,5 ‰ na každý 1°C. Lokální meteorická čára ve vlhké oblasti se od globální liší jen nepatrně (řeka Amazonka v rovníkové oblasti Jižní Ameriky), kdežto v suchých oblastech, kde nastává výpar, se liší sklon lokální meteorické čáry značně. Umístění čáry výparu v suchých oblastech závisí na teplotě. Čím je teplota vyšší, tím je voda izotopově těžší, má menší deficit δ a proto je umístěna výš (viz Obrázek 10, řeka Darling v Austrálii). Naopak čím je teplota nižší, tím je čára výparu umístěna níž, voda je izotopově lehčí (viz Obrázek 10, řeka Rio Grande na jihozápadě Spojených států) [7].



Obrázek 9 - souhrnné schéma procesů, které ovlivňují izotopové složení vody [7]



Obrázek 10 - ztráta těžších izotopů výparem v závislosti na klimatu [7]



2.4.3 Průměrná doba zdržení vody v povodí

Průměrná doba zdržení vody v povodí se značí MRT podle anglického výrazu „Mean residence time“. Tato hodnota vyjadřuje průměrnou dobu, za kterou voda, která se do systému (např. povodí) dostane, z téhož systému odeče. Tato doba byla stanovována pomocí utlumení amplitudy sinové funkce vstupu (srážek) a výstupu (odtoku). K výpočtu byl použit následující vzorec:

$$MRT = \frac{1}{b'} \times \left(\left(\frac{A_p}{A} \right)^2 - 1 \right)^{0,5}$$

9

kde:

- $(1/b') = 6/\pi$ je konverzní faktor z roků na měsíce
- A_p je amplituda proložené sinové funkce vstupu (srážek)
- A je amplituda proložené sinové funkce výstupu (odtoku)

Průměrná doba zdržení vody v povodí byla vypočtena pro všechna dílčí povodí, přičemž amplituda odtoku byla stanovena z příslušného profilu měření povrchových odtoků. Jako amplituda vstupu, tedy srážek, byla uvažována hodnota amplitudy sinové funkce proložené měřeními daty srážkoměrné stanice, která byla danému profilu nejbliže.

2.4.4 Objemový podíl staré vody v odtoku

Ke stanovení objemového podílu staré vody v aktuálním odtoku byl použit zjednodušený postup pomocí následujícího vzorce:

$$R_s = \frac{Q_s}{Q_t} = \frac{c_t - c_n}{c_s - c_n}$$

10

kde:

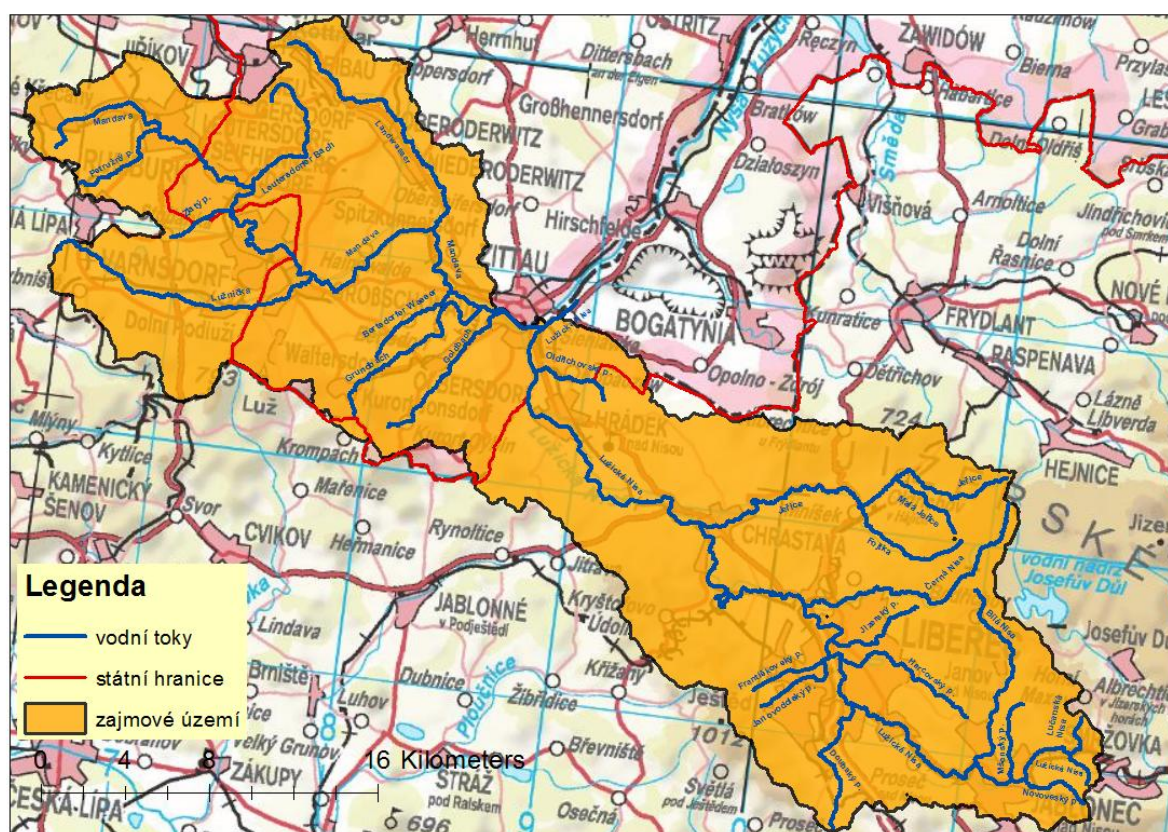
- c_t je celková koncentrace izotopu v odtoku [‰ V-SMOW]
- c_n je koncentrace izotopu ve srážce [‰ V-SMOW]
- c_s je koncentrace izotopu ve staré vodě [‰ V-SMOW]
- R_s je objemový podíl staré vody v odtoku [-]
- Q_s odtok staré vody [m^3/s]
- Q_t celkový odtok vody [m^3/s]



3 Využití stabilních izotopů vodíku a kyslíku v hydrologii zájmového území povodí Nisy

Rozsah zájmového území je totožný s územím řešeným v mezinárodním projektu AquaNisa, kde aktivně probíhal sběr vzorků vody od září 2012 do dubna 2014. Grafické znázornění zájmového území je zobrazeno na níže uvedeném obrázku (viz *Obrázek 11*). Jedná se o povodí Lužické Nisy až po průtočný profil Žitava (profil D01) v Německu.

Řešené povodí se rozkládá na území tří států, v tzv. Trojzemí, v Euroregionu Neisse-Nisa-Nysa, který zahrnuje Spolkovou republiku Německo, Českou republiku a Polskou republiku [4]. Toto povodí má celkovou rozlohu 694 km², z nichž 481 km² leží na českém, 207 km² na německém a 6 km² na polském území [26].



Obrázek 11 - řešené území povodí Lužické Nisy

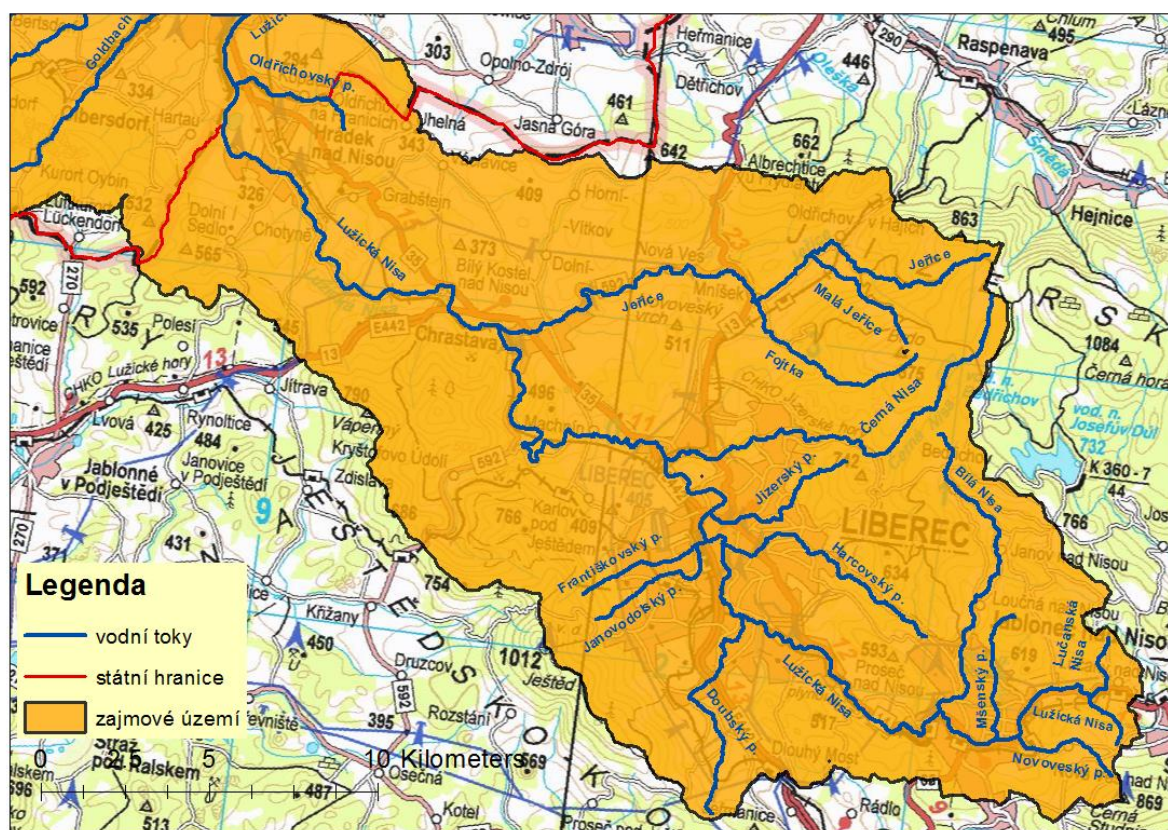


3.1 Lužická Nisa

Řeka Lužická Nisa pramení na území České republiky v katastrálním území Nová Ves nad Nisou v Jizerských horách. V České republice protéká Jizerskými horami a dále tvoří hranici mezi státy SRN a Polskou republikou a v oblasti jihovýchodního Braniborska tvoří levostranný přítok Odry, která dále pokračuje až do Baltského moře.

Celková plocha povodí Lužické Nisy, s hydrologickým pořadím 2-04-07-00, zaujímá 4 297 km² a délka toku od pramene až po ústí do Odry je 252 km. Délka Lužické Nisy v řešeném území, tedy od pramene po odtok ze Žitavy, činí 57 km [26], [24].

3.1.1 Významné přítoky a obce na českém území



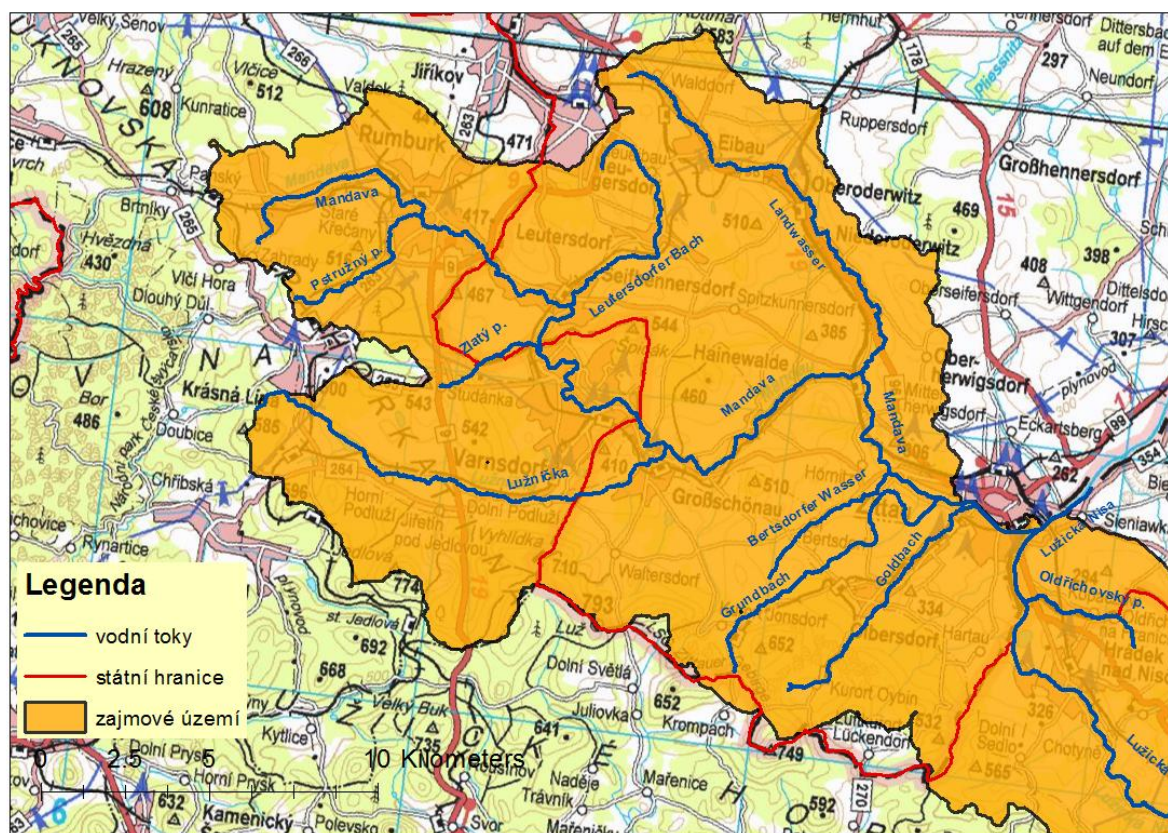
Obrázek 12 - významné vodní toky na české straně zájmového území

Mezi významné přítoky na české straně území patří Lučanská Nisa, která tvoří pravostranný přítok v Lučanech nad Nisou. V obci Jablonec nad Nisou se připojuje rovněž pravostranný přítok - Mšenský potok, jenž přivádí vodu z nádrže Mšeno, dále Bílá (Rýnovická) Nisa, která pramení v Jizerských horách nad obcí Bedřichov. V Liberci z levé strany toku vlévají přítoky Doubský, Janovodolský a Františkovský potok, z pravé strany pak



Harcovský potok přivádějící vodu z vodní nádrže Starý Harcov a Jizerský potok, který protéká Labutím jezírkem. Ve Stráži nad Nisou se nachází významný pravostranný přítok, a to Černá Nisa, která je součástí dílčího povodí Uhlířská, pramení v nadmořské výšce 820 m n. m. pod Olivetskou horou a protéká vodní nádrží Bedřichov a Rudolfov [22]. Dále po toku se v obci Chrastava nachází soutok Lužické Nisy s pravostranným přítokem Jeřice, jež pramení v Jizerských horách na jihovýchodním svahu hory Poledník (864 m n. n.) v nadmořské výšce 815 m n. m [23]. Jeřice protéká Oldřichovem v Hájích, za níž se do ní z levé strany vlévá Malá Jeřice protékající Betlémem, kde se nachází experimentální plocha VÚRV, v.v.i. (Výzkumný ústav rostlinné výroby). V obci Mníšek se do Jeřice z levé strany vlévá potok Fojtka přivádějící vody ze stejnojmenné nádrže a dále po toku z pravé strany potok vytékající z vodní nádrže Mlýnice. Posledním městem, jímž Lužická Nisa protéká na území České republiky, je Hrádek nad Nisou, u něž se zároveň nachází bod trojzemí, tedy hranice mezi státy SRN, ČR a Polskou republikou.

3.1.2 Významné přítoky a obce na německém území



Obrázek 13 - významné vodní toky na německé straně zájmového území



Na německé části území protéká Lužická Nisa Žitavou. Zde tvoří nejvýznamnější levostranný přítok řeka Mandava, která pramení ve Šluknovské pahorkatině západně od obce Staré Křečany v nadmořské výšce 433,38 m n. m. Mandava protéká Rumburkem a zde se dostává na území SRN, kde po přibližně pěti kilometrech protéká přes město Seifhennersdorf na české území do Varnsdorfu a dále pokračuje německým územím přes obce Großchönu, Hainewalde a Mittelherwigsdorf až do Žitavy. Největším přítokem Mandavy je Lužnička (Lausur), která se do ní vlévá na pravém břehu v Großchönu, pramení severozápadně od obce Rybníště, ve svém horním toku napájí Velký rybník a protéká Horním a Dolním Podlužím. Následuje levostranný přítok Leutersdorfer Bach, který ústí do Mandavy v obci Seifhennersdorf. Dalším přítokem Mandavy je potok Landwasser, jenž přitéká z levé strany řeky směrem z obce Oderwitz. Následujícím důležitým přítokem je pravostranný potok Bertsdorfer Wasser. V Žitavě se do Mandavy z pravé strany vlévá řeka Goldbach, která pramení v nejvyšších horách nacházejících se na německé části zkoumaného území. V Žitavě se v blízkosti ústí Goldbachu do Mandavy nachází jezero Olbersdorfer See, které vzniklo zatopením vytěženého hnědouhelného lomu.



4 Odebírání a měření vzorků

Vzorky pro vyhodnocení obsahu izotopu kyslíku a vodíku byly odebírány jedenkrát týdně z povrchového odtoku (profily CZ1-17, CZ44 a D1-14) v místě největšího proudu povrchového toku. Výjimku tvoří období v září 2013, kdy byly vzorky odebírány denně. Vzorky byly odebírány do plastových lahvíček a následně uchovávány v laboratoři v chladu nebo mrazu.

V týdenních intervalech byla odebírána srážková voda (profily CZ24, 25, 26, 50 a D15). Vzorky s pojmenované GNIP (*The Global Network of Isotopes in Precipitation*) a GNIR (*The Global Network of Isotopes in Rivers*) označují vzorky odebírané měsíčně pro globální síť sledování izotopů v IAEA, přičemž GNIP značí srážkovou vodu (CZ24) a GNIR vodu povrchovou v profilu CZ17.

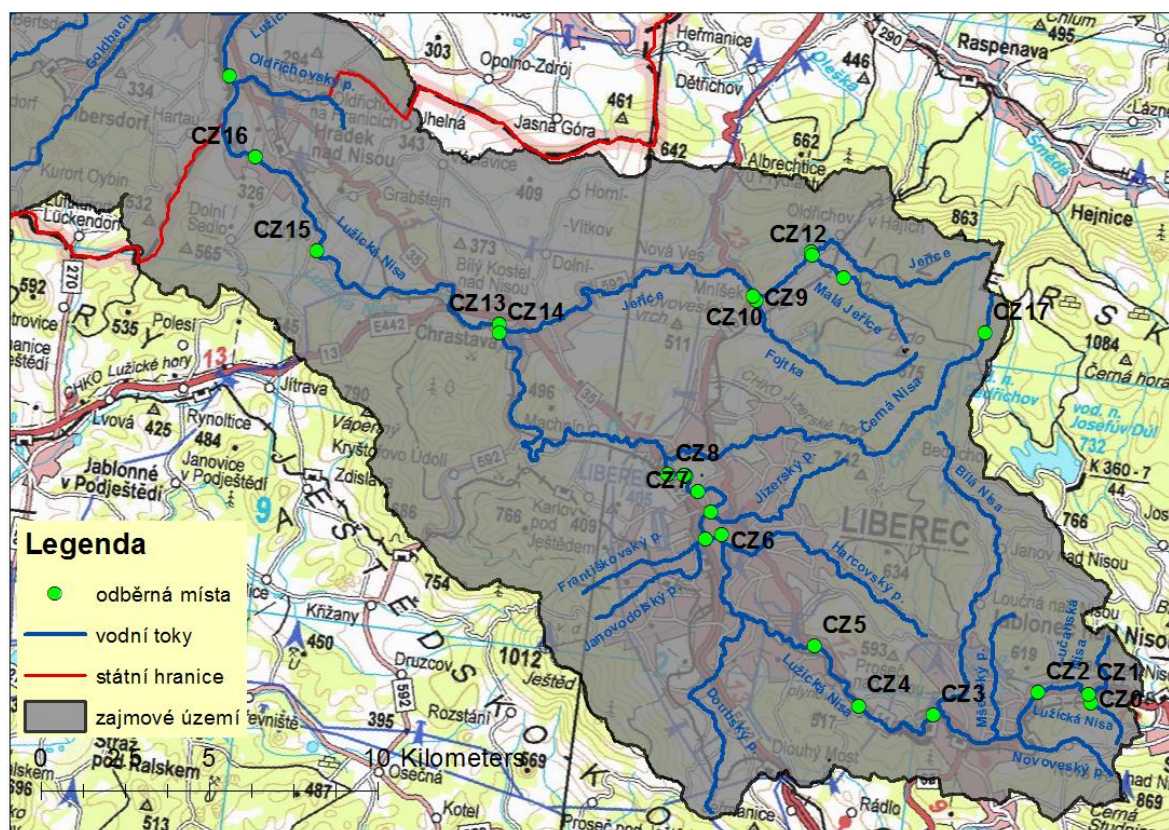
Dále byly sbírány vzorky půdní vody na německé straně (profily D19-1 až D19-6) v hloubkách 30 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm a 250 cm v půdní lyzimetrické stanici Žitava odsáváním vody z monolitu půdy. Na české straně byly vzorky půdní vody odebírány pomocí keramických podtlakových sběračů jedenkrát měsíčně, a to ve dvou hloubkách 30 cm (profily PVM) a 60 cm (profily PVH), jedná se o půdní vodu svahovou (PV 1, 5 a 8) a rašelinnou (PV 3 a 7). Odběrné profily na české straně se nachází na experimentálních plochách ČVUT v Praze v povodí Uhlířská, které je pokryto převážně kambizemí, podzoly a organozemí [12].

Vzorky podzemní vody byly odebírány měsíčně na německé straně v profilu D20 (10 metrů hluboký vrt) a na české straně v lokalitě Betlém v profilech CZ39 - CZ43 (1 - 2 m hloubky) a v mělkých vrtech v povodí Uhlířská (profily P84, HST, DST, PST 2,7 - 5,4 m hluboké) a ve vrtech (profily HV1C - 10 m, HV2B - 20 m a HV3A - 30 m hloubky).

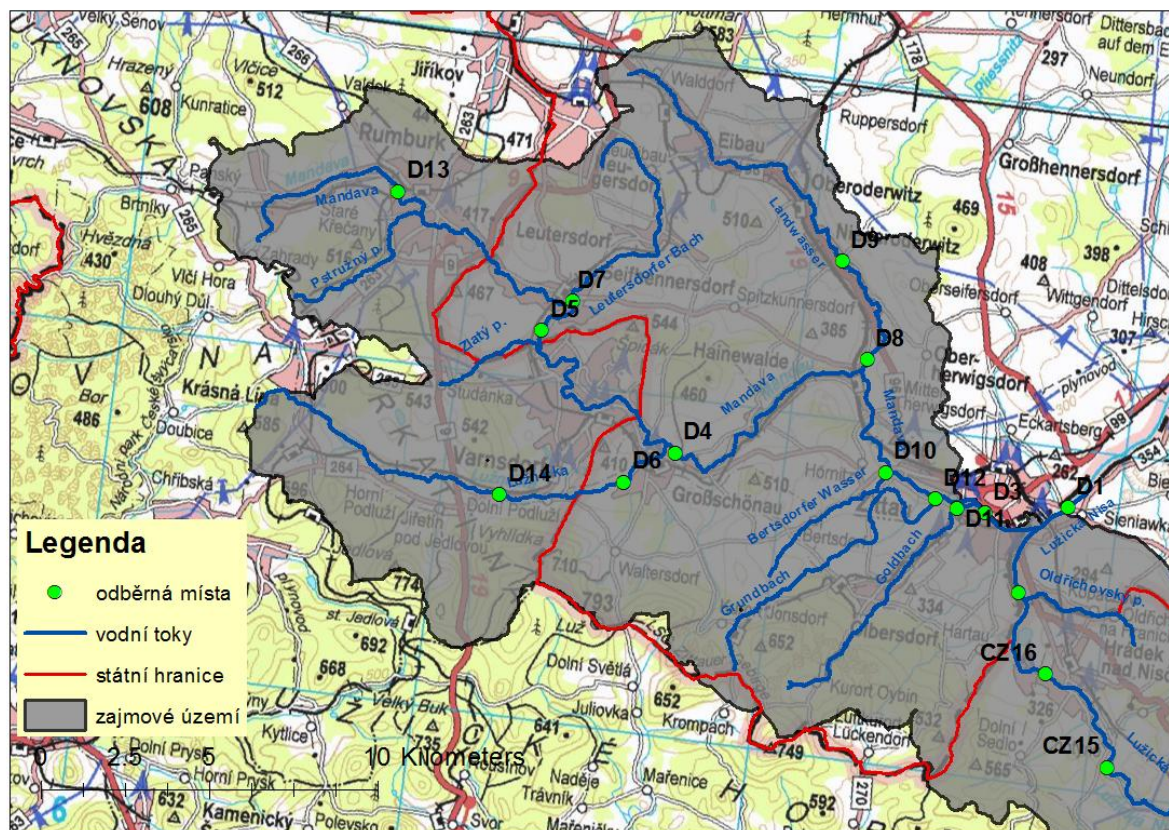


Tabulka 1 - přehled profilů povrchového odtoku

profil	řeka	místo	nadmořská výška (m n. m.)	ústí
D1	Lužická Nisa	Žitava	235	Odra
D2	Lužická Nisa	Žitava	237	-
D3	Mandava	Žitava	239	Lužická Nisa
D4	Mandava	nad Großschönau	302	
D5	Mandava	Seifhennersdorf	340	
D6	Lužnička	Neuschönalen Busch	325	Mandava
D7	Leutersdorfer Bach	Seifhennersdorf	353	Mandava
D8	Landwasser	Oberoderwitz	275	Mandava
D9	Landwasser	Oberoderwitz	291	-
D10	Bertsdorfer Wasser	Žitava	247	Mandava
D11	Goldbach	Žitava	243	Mandava
D12	Olbersdorfer See	Žitava	240	-
D13	Mandava	Rumburk	383	-
D14	Lužnička	Dolní Podluží	387	-
CZ1	Lužická Nisa	Lučany po soutoku Lužické a Lučanské Nisy	565	-
CZ2	Lužická Nisa	Jablonecké Paseky	529	-
CZ3	Lužická Nisa	konec Jablonce Nad Nisou	472	-
CZ4	Lužická Nisa	Proseč	401	-
CZ5	Lužická Nisa	Vratislavice	381	-
CZ6	Lužická Nisa	centrum Liberce	354	-
CZ7	Lužická Nisa	před ČOV	339	-
CZ7-1	Františkovský potok	Liberec	349	Lužická Nisa
CZ7-2	Jizerský potok	Liberec	351	Lužická Nisa
CZ8	Lužická Nisa	za ČOV	333	-
CZ8-1	Lužická Nisa	výpust z ČOV	333	-
CZ8-1a	Lužická Nisa	nečištěná odpadní voda	333	-
CZ8-2	Lužická Nisa	výpust z ČOV po 20 m	333	-
CZ8-3	Lužická Nisa	výpust z ČOV po 50 m	333	-
CZ9	Fojtecký potok	Mníšek	375	Jeřice
CZ10	Jeřice	Mníšek po soutoku s Fojteckým potkem	375	Lužická Nisa
CZ11	Malá Jeřice	Oldřichov v Hájích	394	Jeřice
CZ12	Jeřice	Oldřichov v Hájích	387	-
CZ13	Jeřice	Chrastava	290	-
CZ14	Lužická Nisa	Chrastava	286	-
CZ15	Lužická Nisa	Chotyně	265	-
CZ16	Lužická Nisa	Hrádek nad Nisou	245	-
CZ17	Černá Nisa	Uhlířská Porscheho smrt	792	Lužická Nisa
CZ44	Malá Jeřice	Betlém	407	-



Obrázek 14 - odběrná místa vzorků povrchového odtoku na české straně zájmového území



Obrázek 15 - odběrná místa vzorků povrchového odtoku na německé straně zájmového území



4.1 Odebírání vzorků z lyzimetru Žitava

Hodnoty koncentrace izotopu vodíku a kyslíku v půdní vodě byly měřeny ze vzorků vody odebírané pomocí lyzimetru. Lyzimetr slouží především k měření evapotranspirace vody z půdy. Jedná se o válcovou nádobu z nerezové oceli, která byla vtlačena do půdy, tím se zachovala struktura a prostorové uspořádání půdy uvnitř nádoby. Na povrchu je po instalaci lyzimetru vidět jen jeho kruhový půdorys. Vedle lyzimetru je přístupová šachta do místnosti vyhloubené pod nádobou, kde probíhají všechna měření a odběry vzorků vody.

Lyzimetr je postaven na váze, která průběžně zaznamenává kolísání jeho celkové hmotnosti. Další váha monitoruje hmotnost vody, která odtéká dnem lyzimetru. Na základě těchto hodnot se stanovuje množství vody, která se vypaří, není však zřejmé, zda k výparu došlo evaporací nebo transpirací.

V různých hloubkách lyzimetru mohou být odebírány vzorky vody pro vyhodnocení chemického nebo izotopového složení vody. Tyto vzorky jsou odebírány pomocí podtlaku. Nevýhodou je, že voda má tendenci vytvářet si preferenční cesty po stěnách lyzimetru a některá měření tak mohou být zkreslená.



Obrázek 16 - půdorys lyzimetru (vlevo) a vstupní šachta k lyzimetru (vpravo) v Žitavské výzkumné ekologické stanici



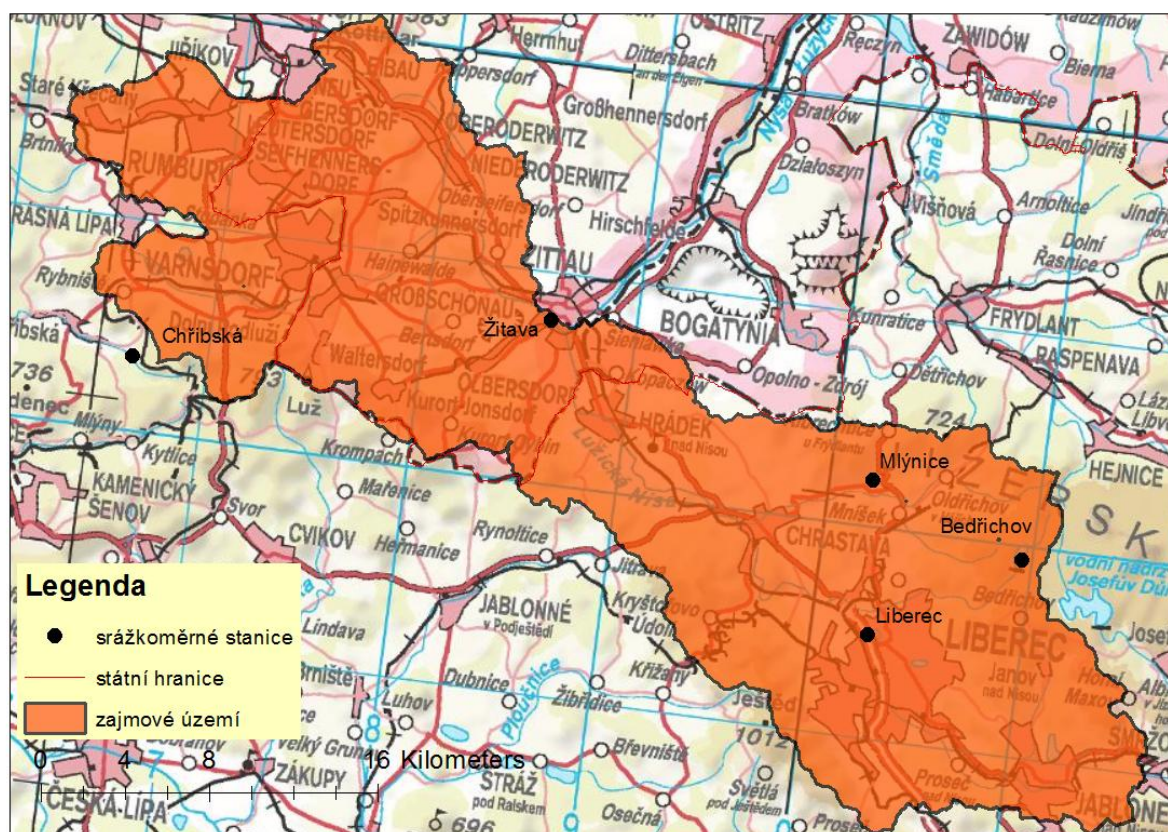
Obrázek 17 - podzemní část lyzimetru s měřicím zařízením



5 Hydrologické poměry v povodí Lužické Nisy

5.1 Srážky

Hodnoty srážkových výšek byly získány ze srážkoměrných míst na tělese hráze vodní nádrže Mlýnice, Bedřichov a Chřibská, dále v lokalitě VÚRV, v.v.i. v Liberci a v Žitavské ekologické výzkumné stanici (viz *Obrázek 18*). Všechna tato místa s výjimkou Chřibské leží v oblasti povodí Nisy. Lokalita Chřibská sice v daném povodí neleží, ale je nejbližším srážkoměrem pro severozápadní část řešeného území.

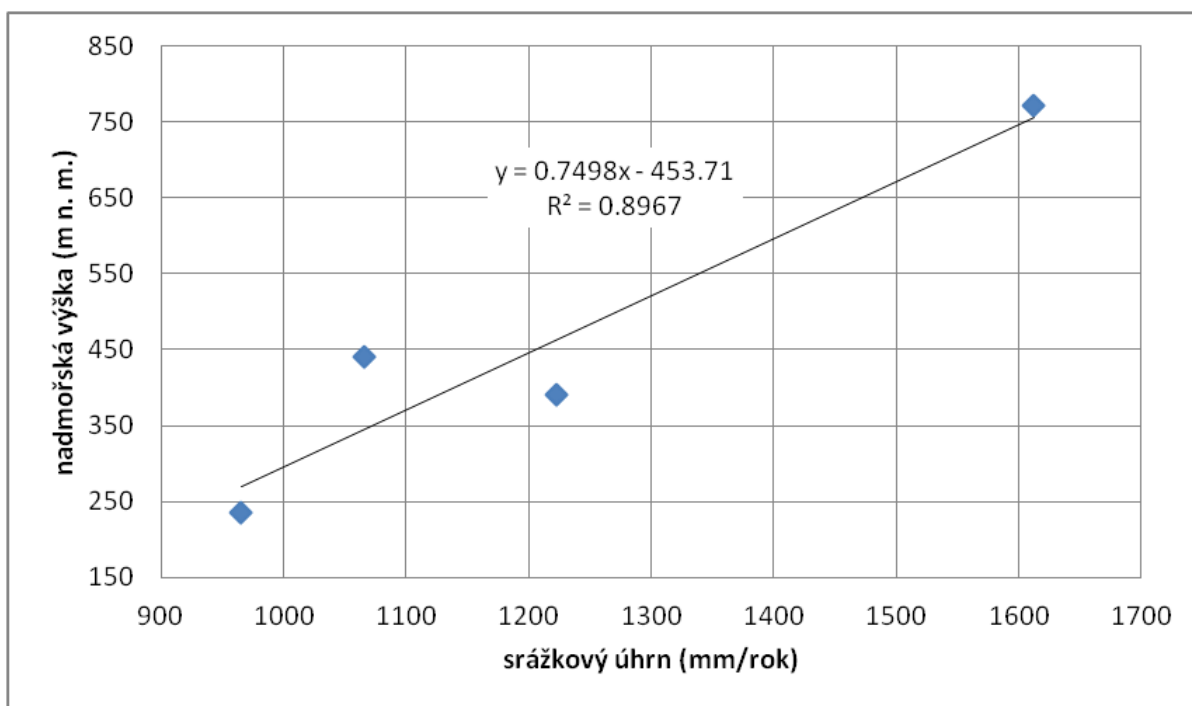


Obrázek 18 - srážkoměrné stanice v Mlýnici, Bedřichově, Chřibské, Liberci a Žitavě

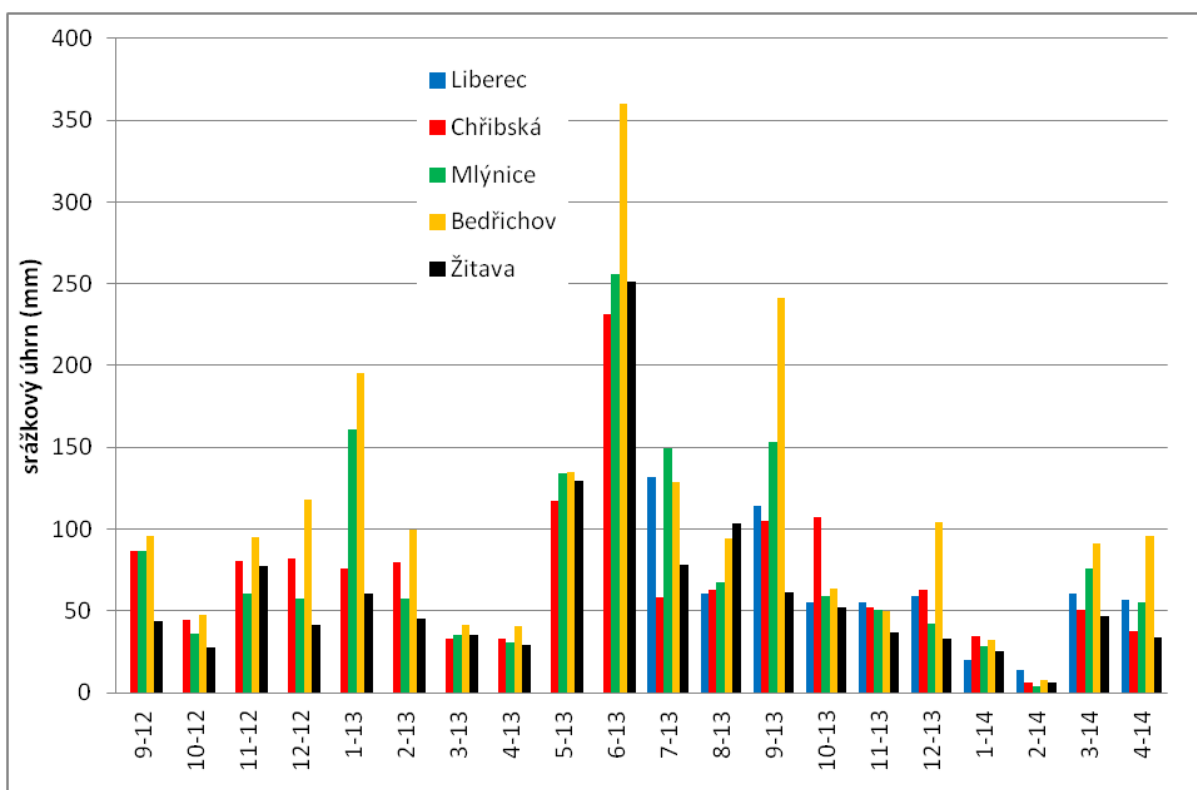
S nadmořskou výškou roste množství vypadlých srážek a zároveň se ve vyšších polohách méně projevuje výpar. Tato závislost je vidět na následujícím obrázku (viz *Obrázek 19*). Tento jev lze pozorovat i v následujících grafech měsíčních srážkových výšek v celém období i týdenních intervalech v září 2013 (viz *Obrázek 20*, *Obrázek 21* a *Obrázek 22*), kde nejvyšší měsíční srážkové výšky vykazuje srážkoměrný profil v Bedřichově ležící v nadmořské výšce 770 m n. m., ostatní profily vykazují podobné hodnoty srážkové výšky, neboť leží ve vzájemně blízkém rozmezí nadmořských výšek (Liberec 365 m n. m., Mlýnice



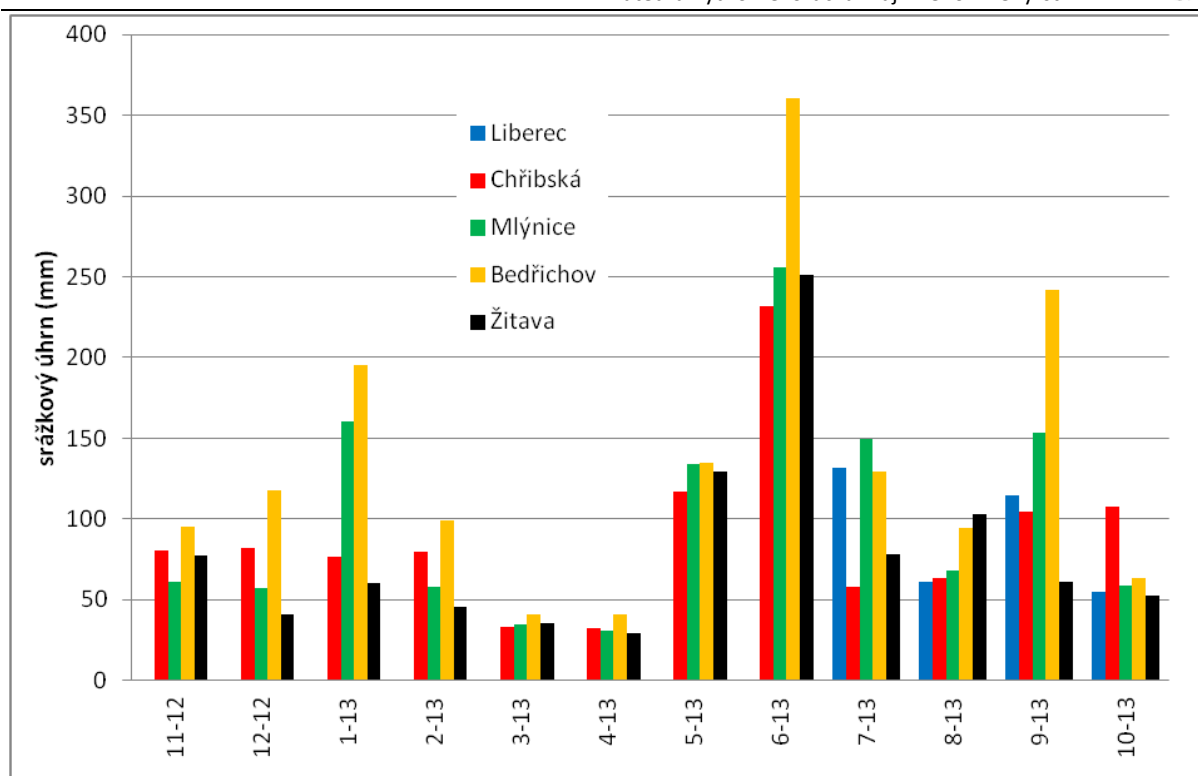
390 m n. m., Chřibská 440 m n. m. a Žitava 235 m n. m.). Týdenní srážky v září 2013 (viz Obrázek 22) jsou uvedeny k datu, který uvádí srážkovou výšku vždy za předchozí týden.



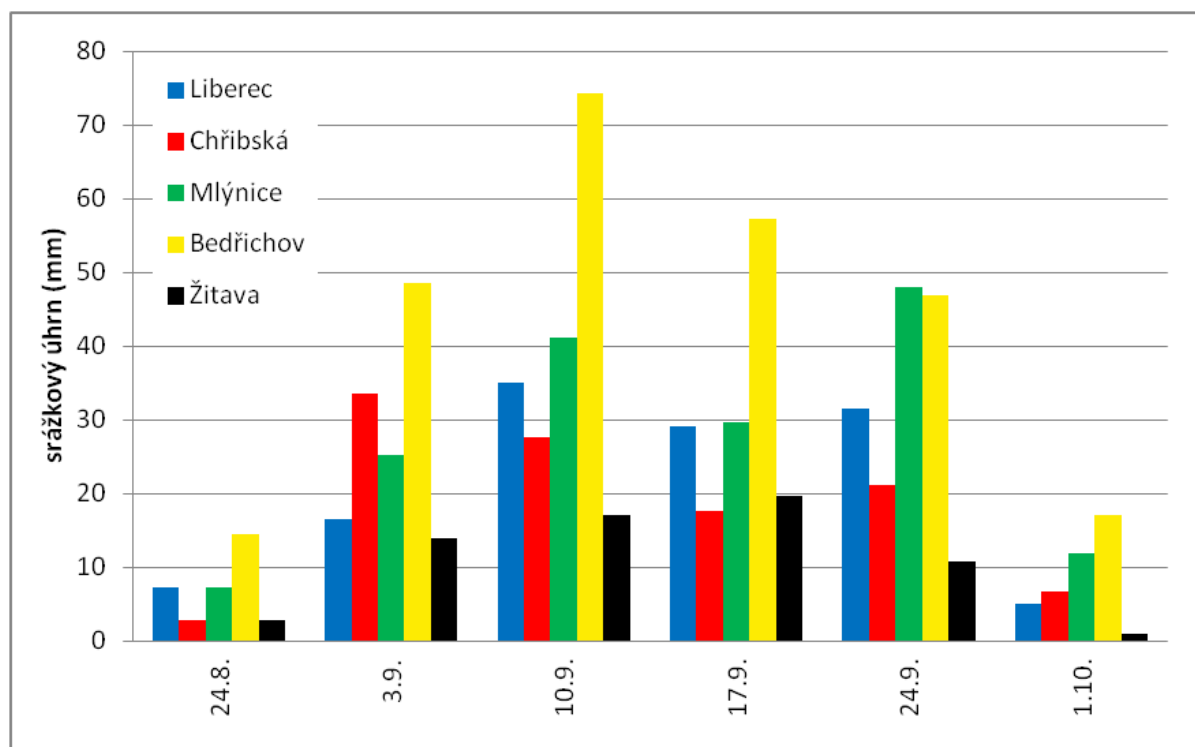
Obrázek 19 - závislost množství srážek na nadmořské výšce v hydrologickém roce 2013



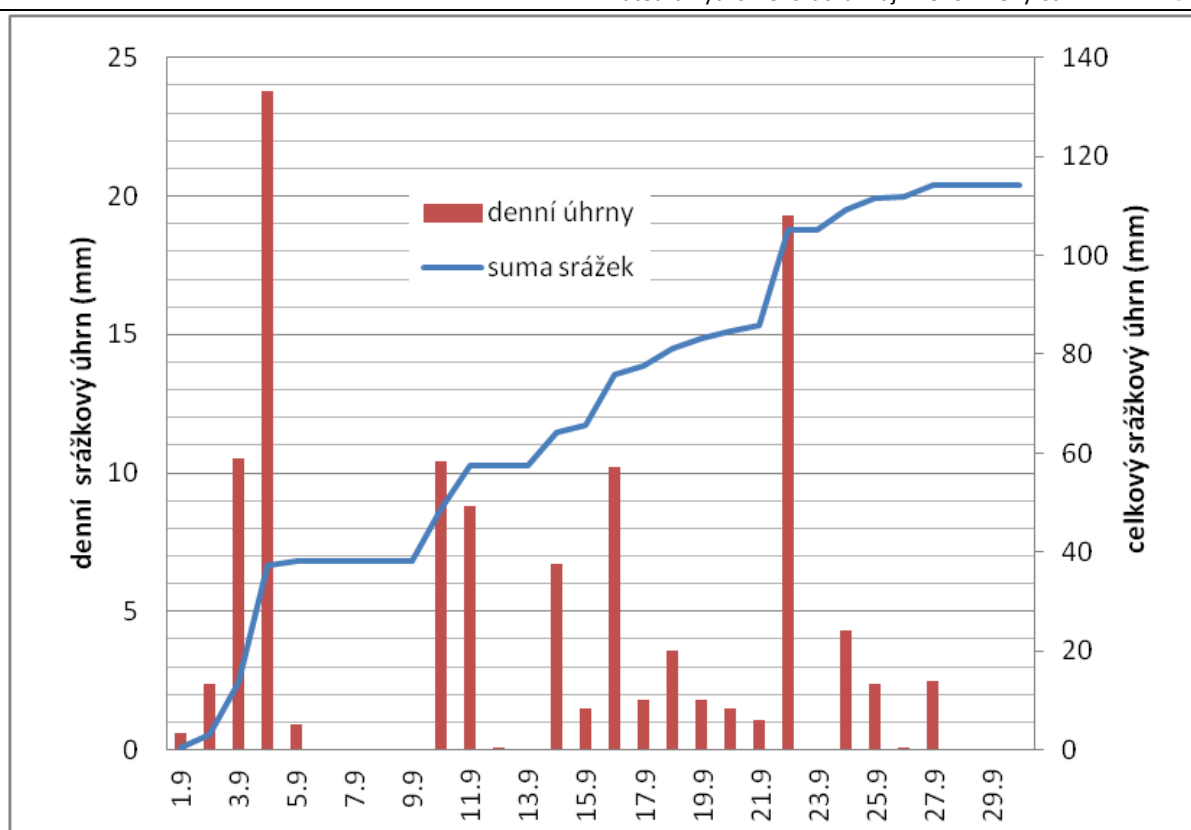
Obrázek 20 - měsíční srážkové výšky v celém období 9/12 - 4/14



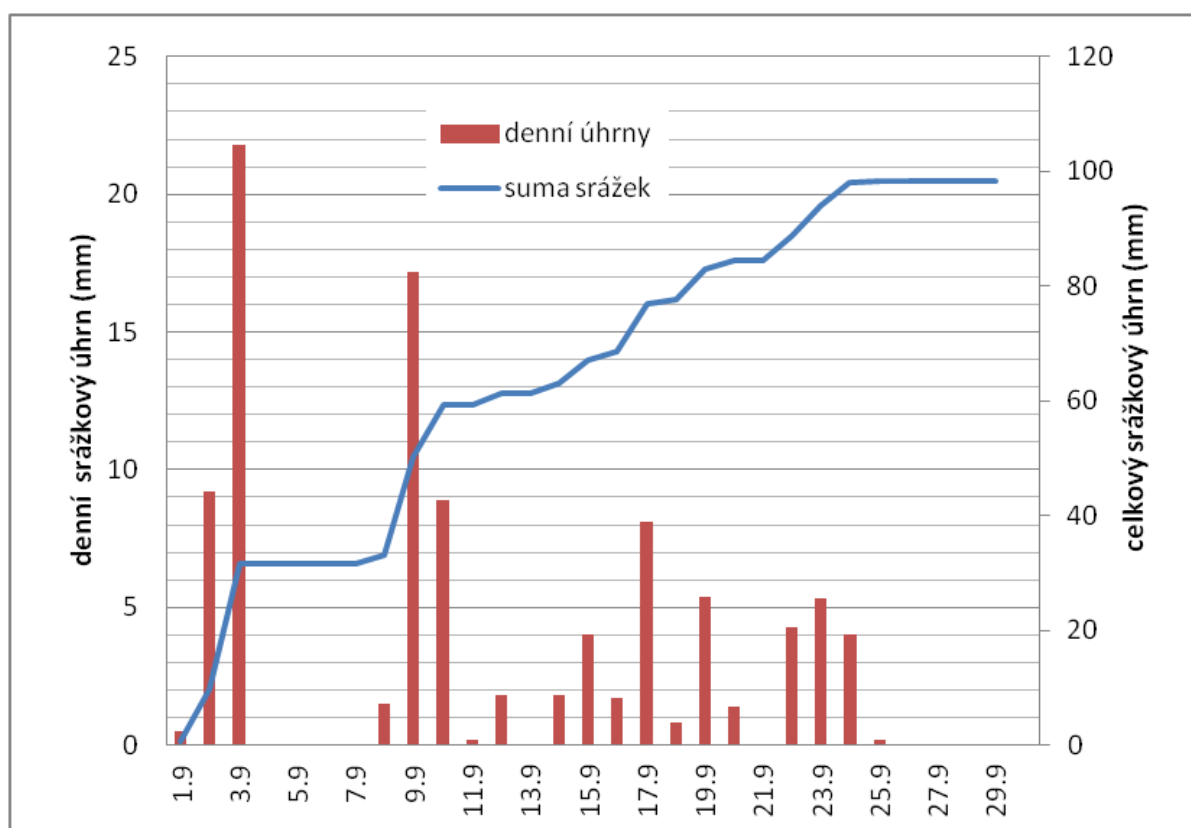
Obrázek 21 - měsíční srážkové výšky v období hydrologického roku 11/12 - 10/13



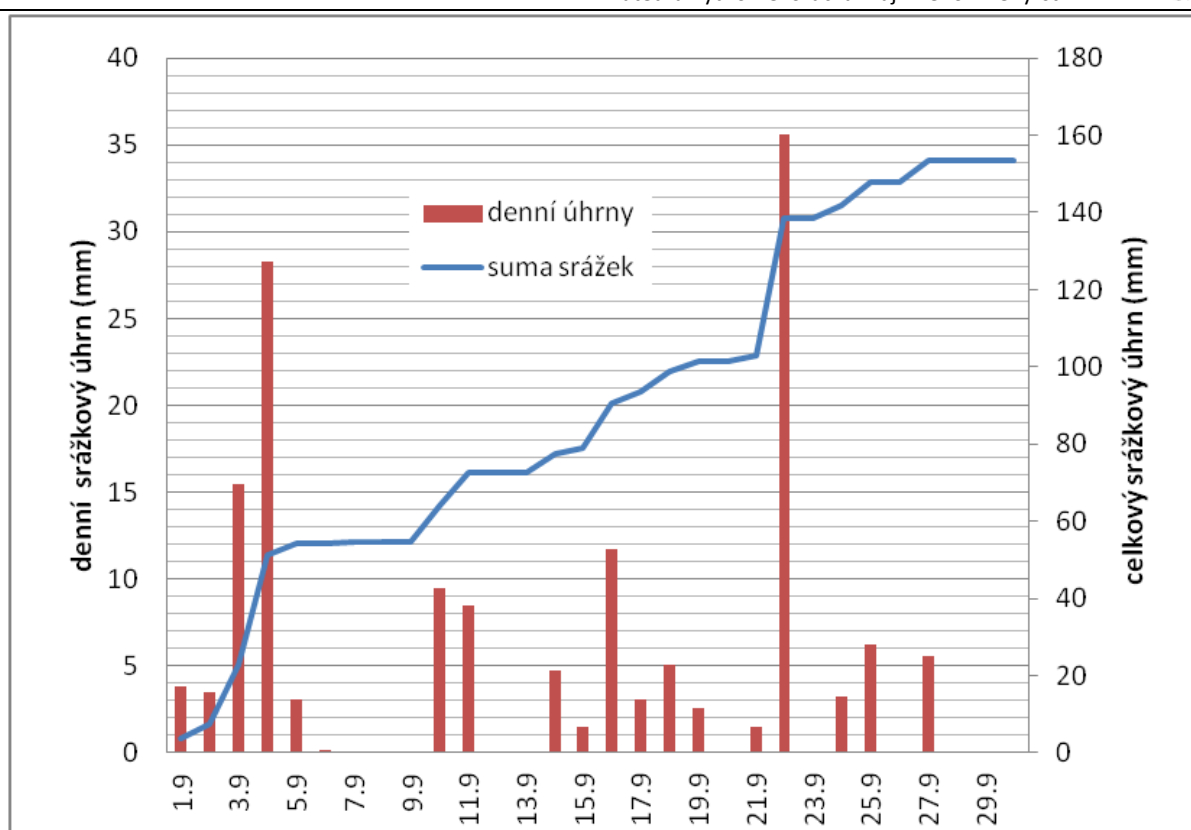
Obrázek 22 - srážková epizoda v září 2013



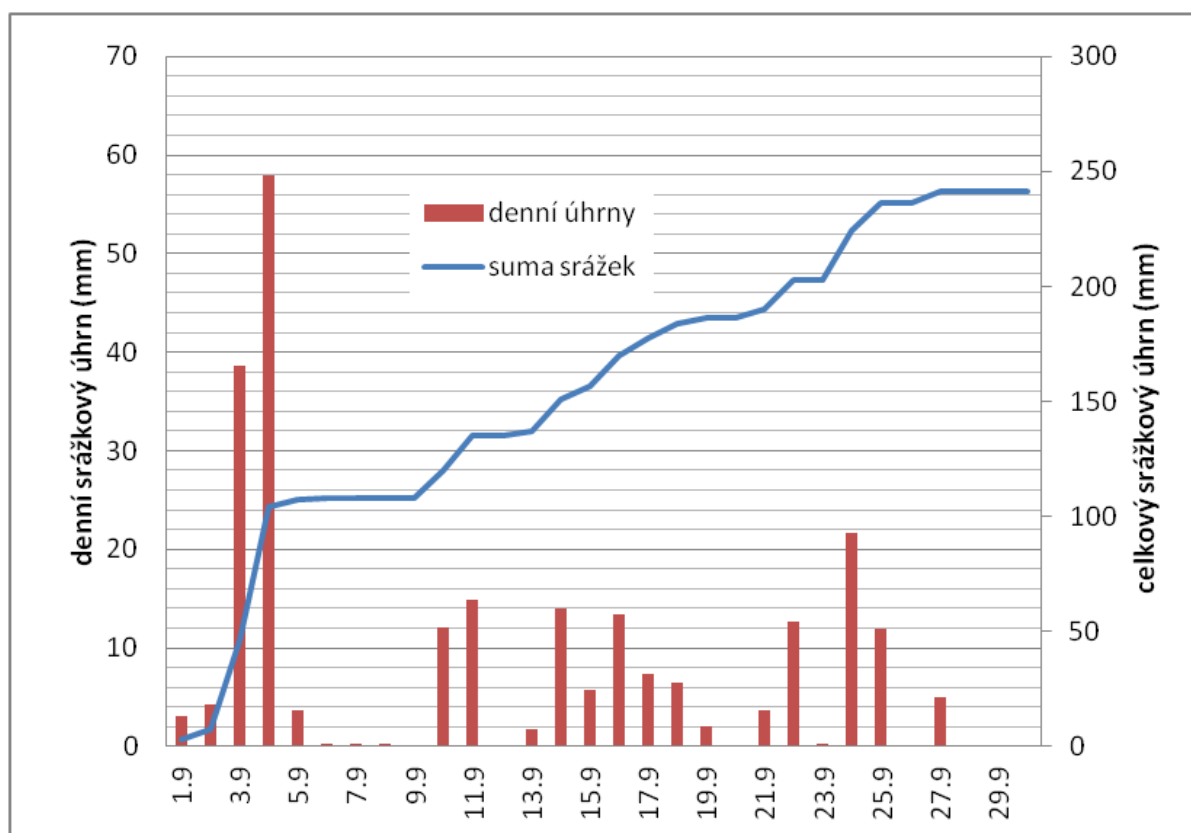
Obrázek 23 - denní srážkové výšky v září 2013 v Liberci



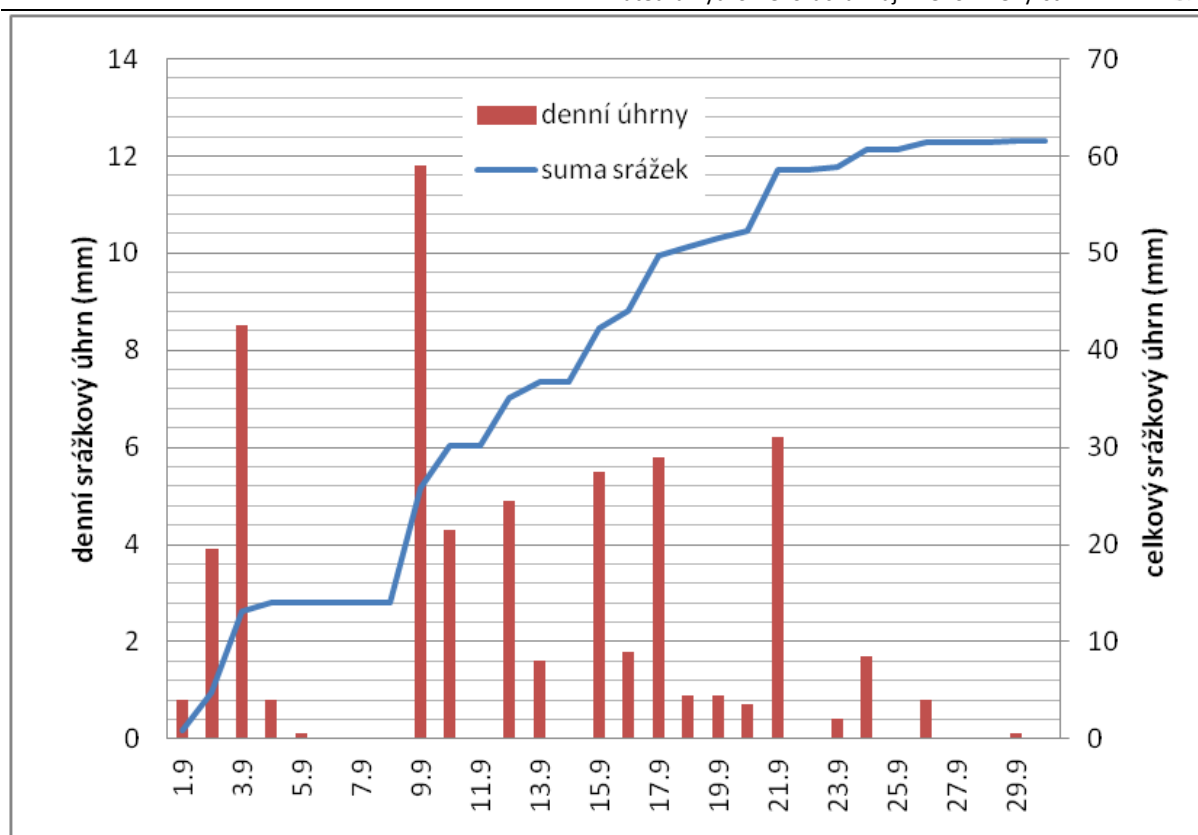
Obrázek 24 - denní srážkové výšky v září 2013 v Chřibské



Obrázek 25 - denní srážkové výšky v září 2013 v Mlýnici



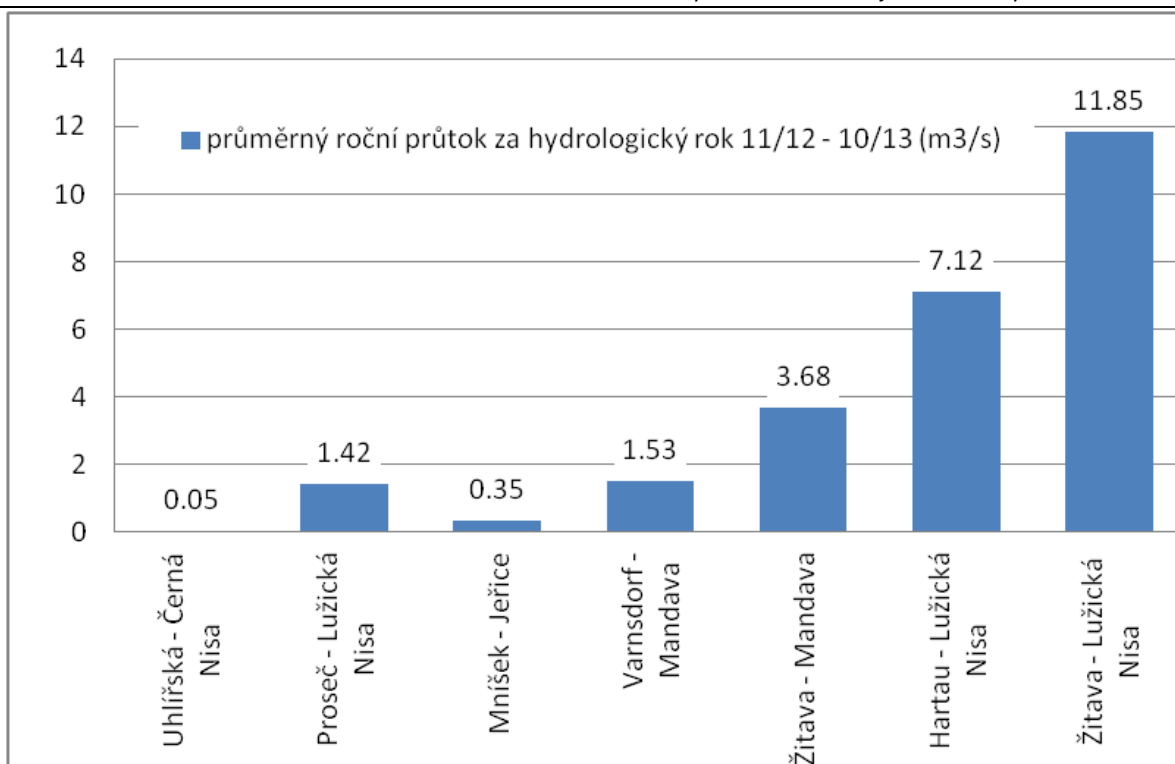
Obrázek 26 - denní srážkové výšky v září 2013 v Bedřichově



Obrázek 27 - denní srážkové výšky v září 2013 v Žitavě

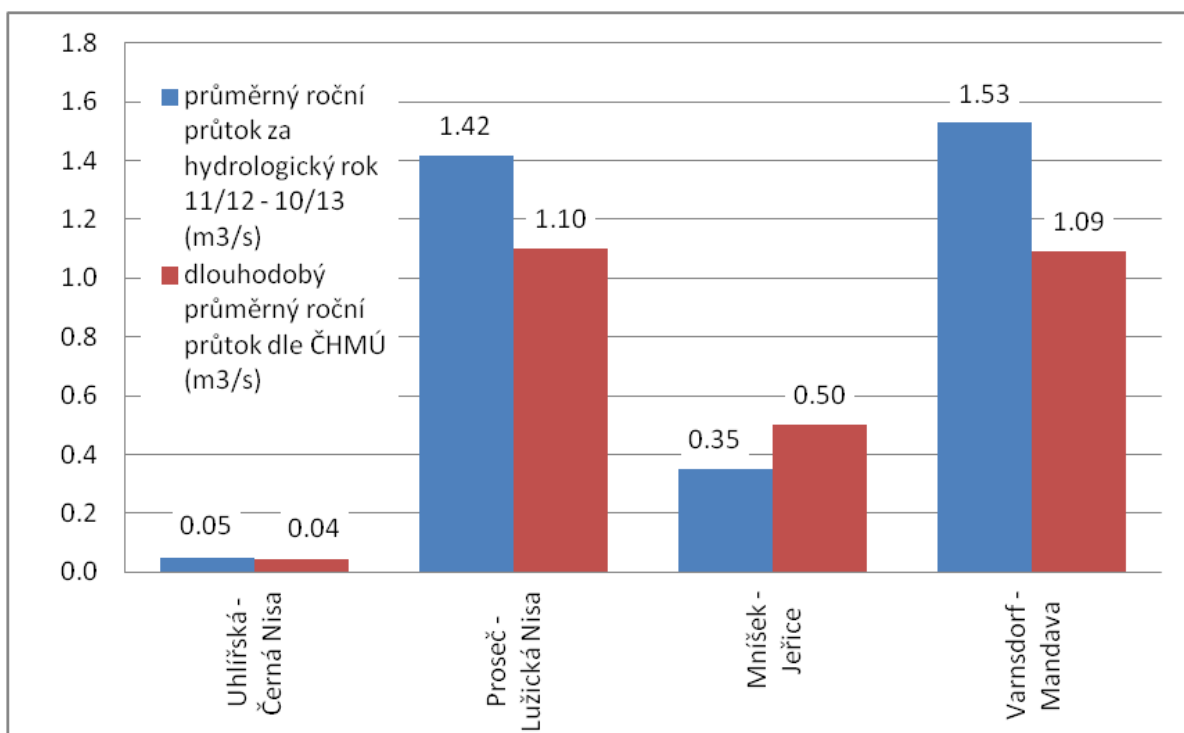
5.2 Průtoky

Na české straně zájmového území spadá Lužická Nisa pod správu Povodí Labe a Mandava pod správu Povodí Ohře. Sledované povodí zabírá rozsáhlé území s vysokou variabilitou nadmořských výšek, od pramenných oblastí v Jizerských horách až po odtok Lužické Nisy ze Žitavy, kde se průměrný průtok pohybuje kolem $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Směrem od pramenných oblastí tok nabírá na mohutnosti a na průtoku. To lze vidět na následujícím obrázku (viz *Obrázek 28*), který zobrazuje průměrné hodnoty průtoku za hydrologický rok 2013 získané z limnigrafických profilů na Černé Nise, Jeřici, Mandavě a Lužické Nise.



Obrázek 28 – průměrný roční průtok v jednotlivých profilech v období 11/12 – 10/13

Průměrné roční průtoky ve sledovaných letech se od dlouhodobých průměrných ročních průtoků stanovených dle ČHMÚ výrazně neliší (viz Obrázek 29).

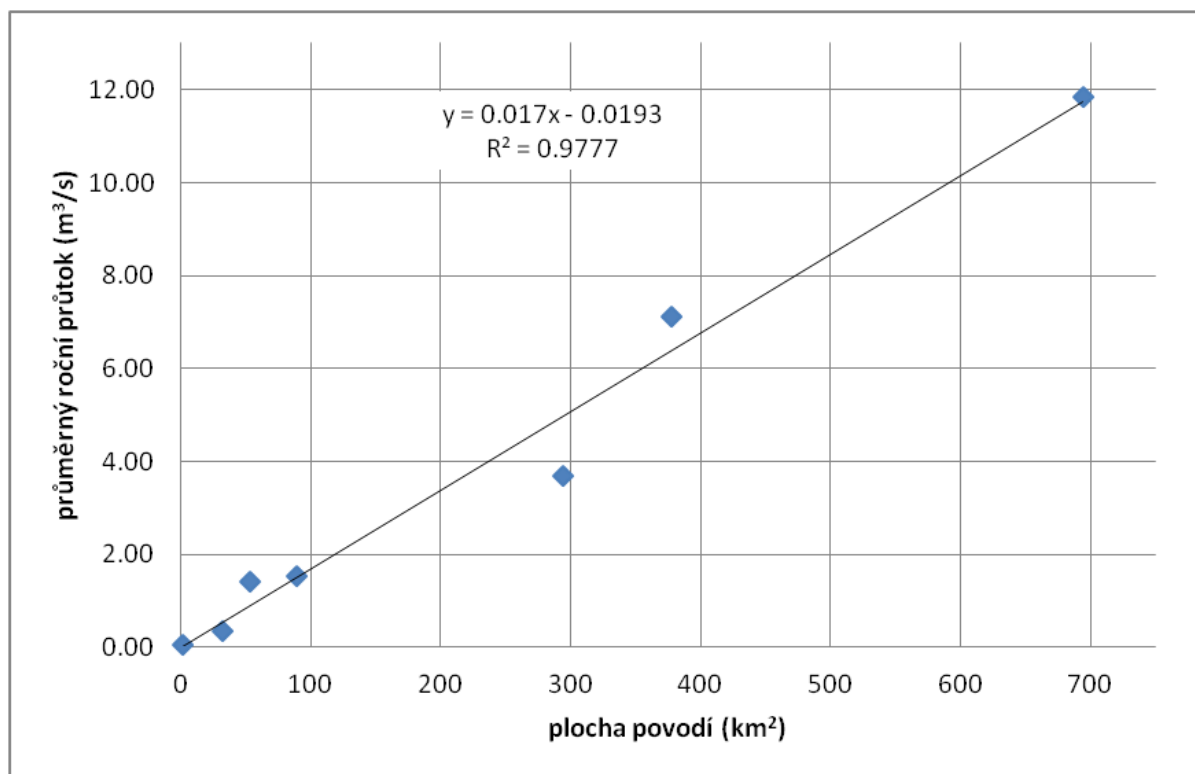


Obrázek 29 - průměrné roční průtoky měřené v období 11/12 - 10/13 v porovnání s dlouhodobými průměrnými ročními průtoky dle ČHMÚ

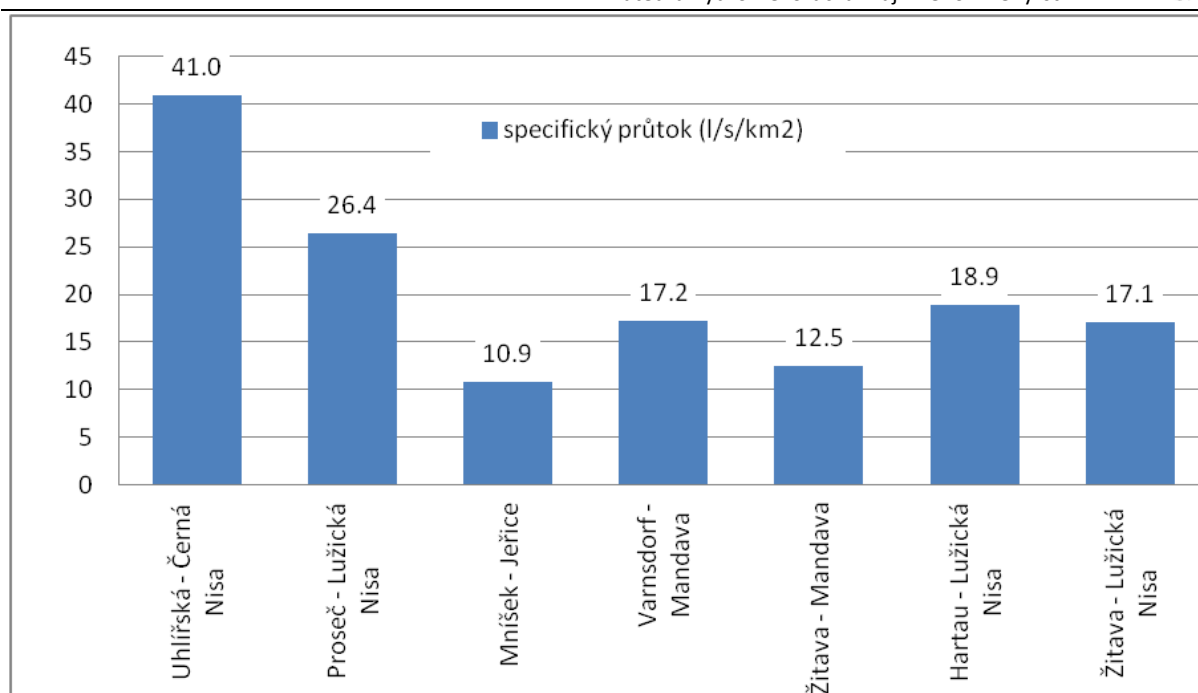


Poměr průtoků v Mandavě a v Nise je během roku rozdílný, v zimě nabývá hodnot přibližně 1:2 a v létě až 1:10. Tento jev je důsledkem rozdílnosti krajiny, kde povodí Nisy je ovlivněno horami a pramennými oblastmi, kdežto okolí Mandavy tvoří převážně zemědělská krajina nížin [26].

Průtoky jsou odezvou na srážky spadlé v oblasti daného povodí a jejich rozložení v čase, vykazují vždy jednotlivé epizody, které jsou charakteristické prudkým nárůstem s exponenciálním tvarem poklesu (viz *Obrázek 32*). Z grafu je také patrné, že průměrný průtok narůstá spolu s klesající nadmořskou výškou a tedy zároveň s rostoucí plochou povodí. Například řádově mnohem menší je průtok v profilu CZ17 na Černé Nise, s plochou povodí přibližně 1,18 km², než ostatní průtoky, jež mnohem vyšší, plochy jejich povodí se pohybují v řádech desítek km² (viz *Tabulka 2*). Naopak větších průtoků nabývá Mandava v Žitavě před ústím do Lužické Nisy, zahrnuje tedy relativně velkou plochu povodí. Na níže uvedeném grafu (viz *Obrázek 30*) lze vidět, že s rostoucí plochou povodí roste také průměrný roční průtok. *Obrázek 31* zobrazuje hodnoty specifických průtoků uvedených v l/s/km². Na obrázku lze pozorovat vliv Jizerských hor na hodnoty specifických průtoků, kde nejvyššího specifického průtoků dosahuje profil CZ17 na Černé Nise v nadmořské výšce 792 m n. m.



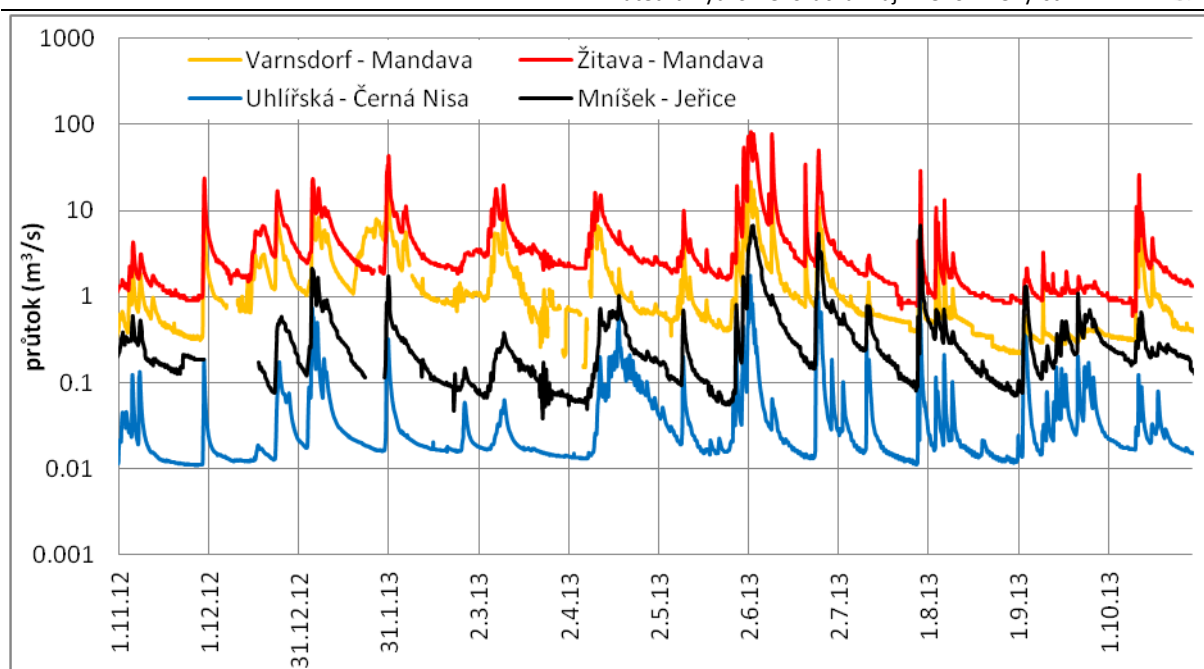
Obrázek 30 - závislost průměrného ročního průtoků na ploše povodí



Obrázek 31 - specifický průtok v jednotlivých profilech v období 11/12 – 10/13

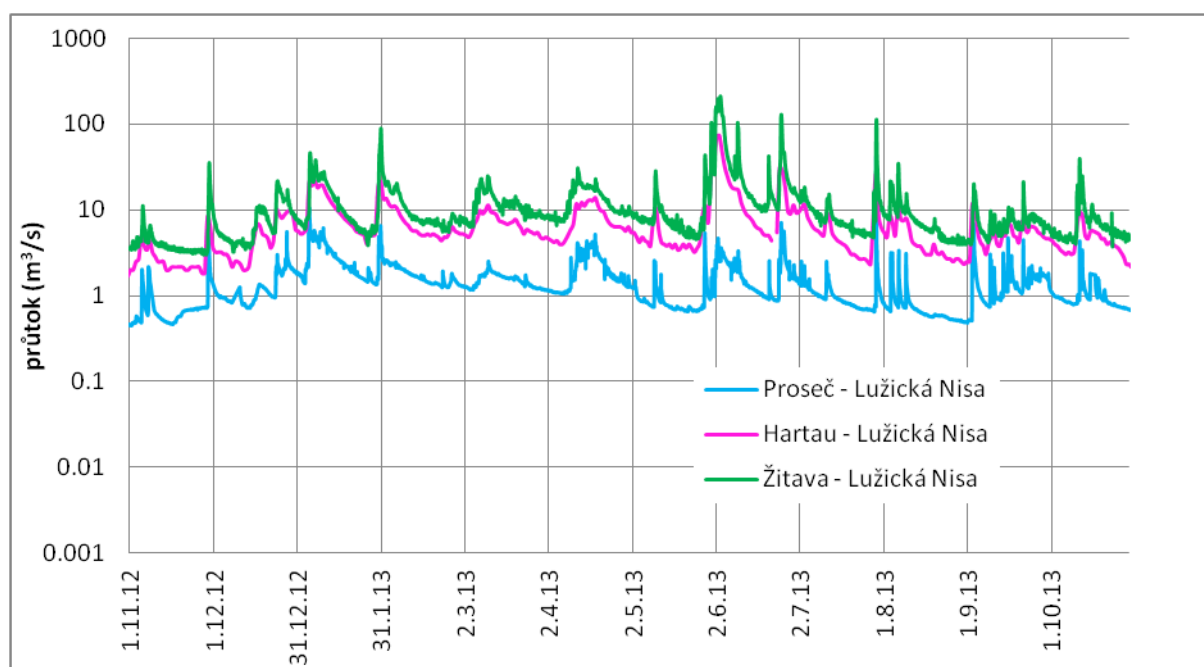
Tabulka 2 - přehled základních charakteristik limnigrafických profilů na české straně zájmového území dle ČHMÚ

stanice	Varnsdorf	Uhlířská	Proseč nad Nisou	Mníšek
obec	Varnsdorf	Bedřichov	Jablonec nad Nisou	Mníšek
tok	Mandava	Černá Nisa	Lužická Nisa	Jeřice
číslo hydrologického pořadí	2-04-08-005	2-04-07-0160-1-00-60	2-04-07-007	2-04-07-028
staničení (km)	2.1	12.9	40.0	10.2
plocha povodí (km ²)	88.92	1.18	53.72	32.20
nula vodočtu (m n. m.)	319.2	775.7	395.0	372.4
průměrný roční průtok (m ³ /s)	1.09	0.04	1.10	0.50
1.SPA	8.0	-	9.7	-
2.SPA	14.2	-	20.4	-
3.SPA	20.7	-	28.6	-



Obrázek 32 - rozložení průtoků v jednotlivých limnigrafických profilech na přítocích Lužické Nisy v rámci hydrologického roku 1. 11. 2012 - 31. 10. 2013

Obrázek 33 zobrazuje rozložení průtoků v čase na Lužické Nise, tyto průtoky proto nabývají větších hodnot než průtoky na jejích přítocích (viz Obrázek 32), které mají mnohem menší plochu povodí.



Obrázek 33 - rozložení průtoků v čase v limnigrafických profilech na Lužické Nise v rámci hydrologického roku 1. 11. 2012 - 31. 10. 2013



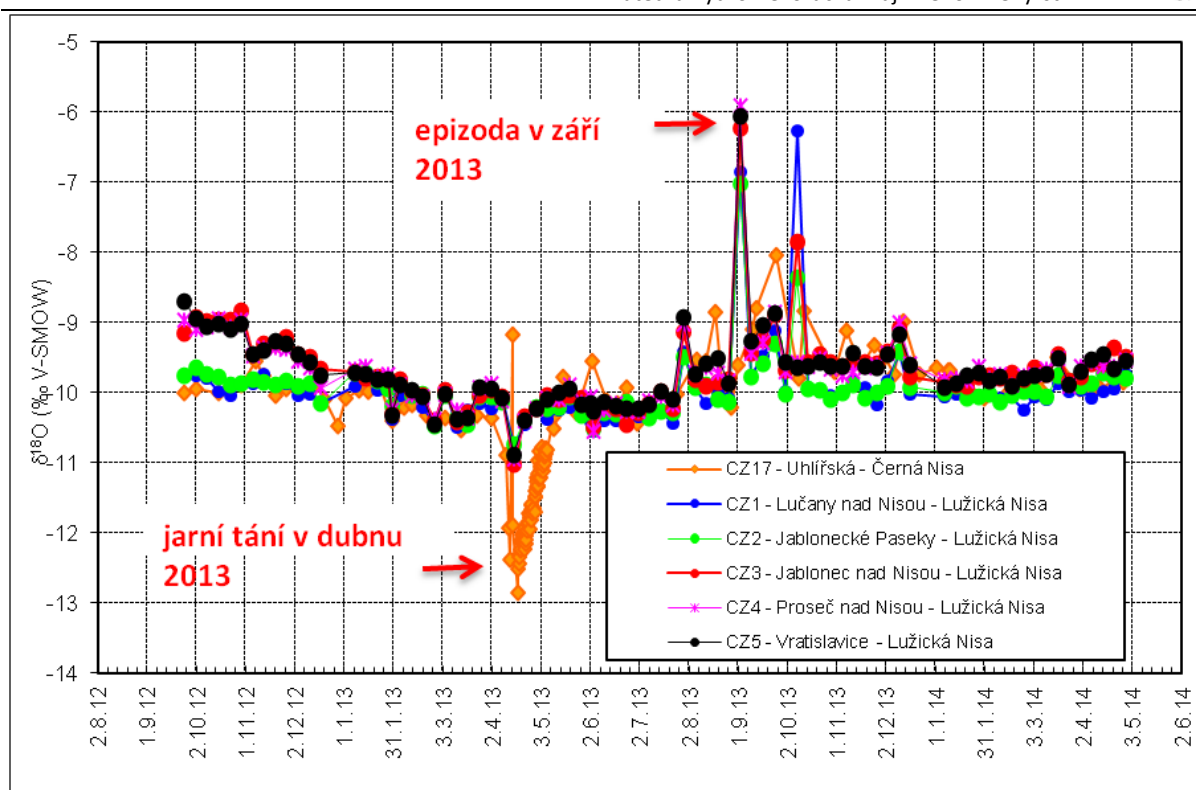
6 Průběh koncentrace izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ ve vodách

Následující grafy zobrazují běžný průběh měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ na příkladech ve vybraných odběrných profilech. Tvar časového rozložení běžných hodnot relativní koncentrace izotopu vodíku $\delta^2\text{H}$ má obdobný průběh jako $\delta^{18}\text{O}$.

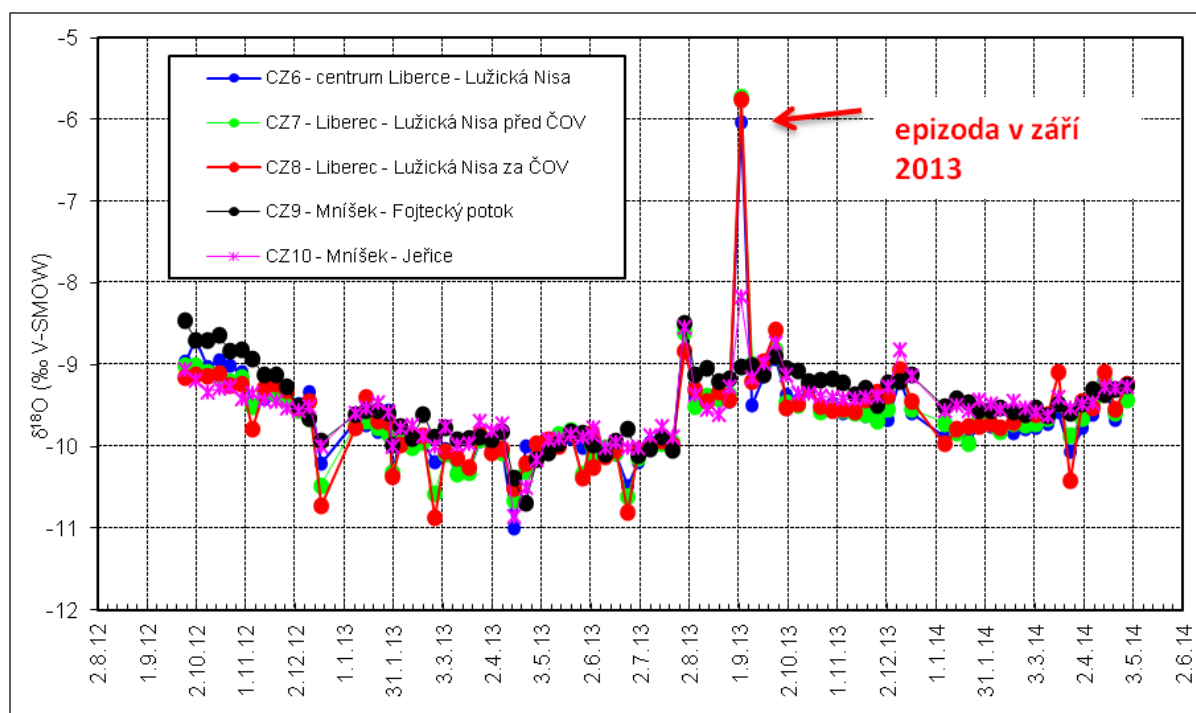
6.1 Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v povrchových odtocích

Následující graf (viz *Obrázek 34*) zobrazuje tvar časového rozložení běžných hodnot relativní koncentrace izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku CZ1 – CZ5 na Lužické Nise a v profilu CZ17 na Černé Nise. Na grafu lze vidět izotopově velmi odlišnou epizodu v září 2013, která byla využita pro výpočet objemového podílu staré vody v odtoku (viz kapitola 9 a 9.1). Dále lze pozorovat izotopově lehčí složení v dubnu 2014 způsobené táním sněhu v okolí profilu CZ17, který leží ve vysoké nadmořské výšce (792 m n. m.). Hodnot v tomto období je více, protože byly vzorky odebrány v šestihodinových intervalech.

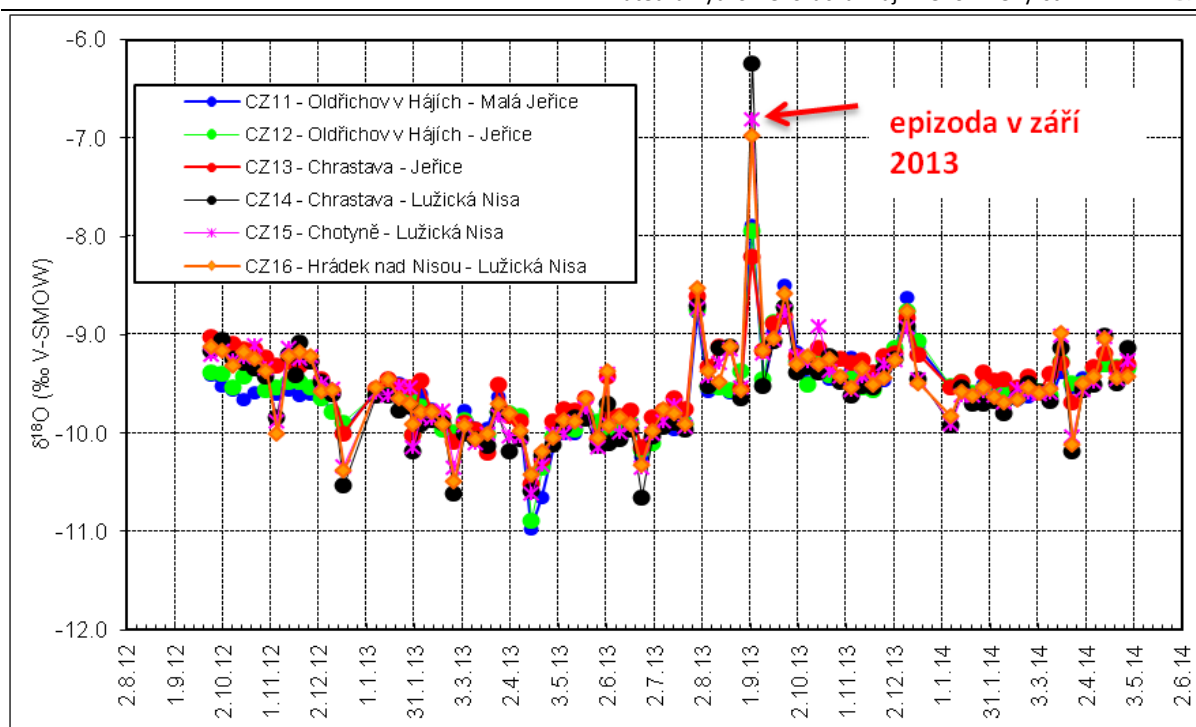
Na níže uvedených grafech (viz *Obrázek 34*, *Obrázek 35*, *Obrázek 36* a *Obrázek 37*) běžných průběhů relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v povrchových odtocích, lze ve všech profilech sledovat periodické chování, které je vyhodnocováno v kapitole 11 a také lze ve všech případech vidět neobvyklé hodnoty v září 2013, nejednalo se tedy o záležitost lokální, nýbrž o plošně rozsáhlou vyskytující se v celém řešeném území, a sice na české (např. *Obrázek 34*, *Obrázek 35* nebo *Obrázek 36*) i německé straně (např. *Obrázek 37*).



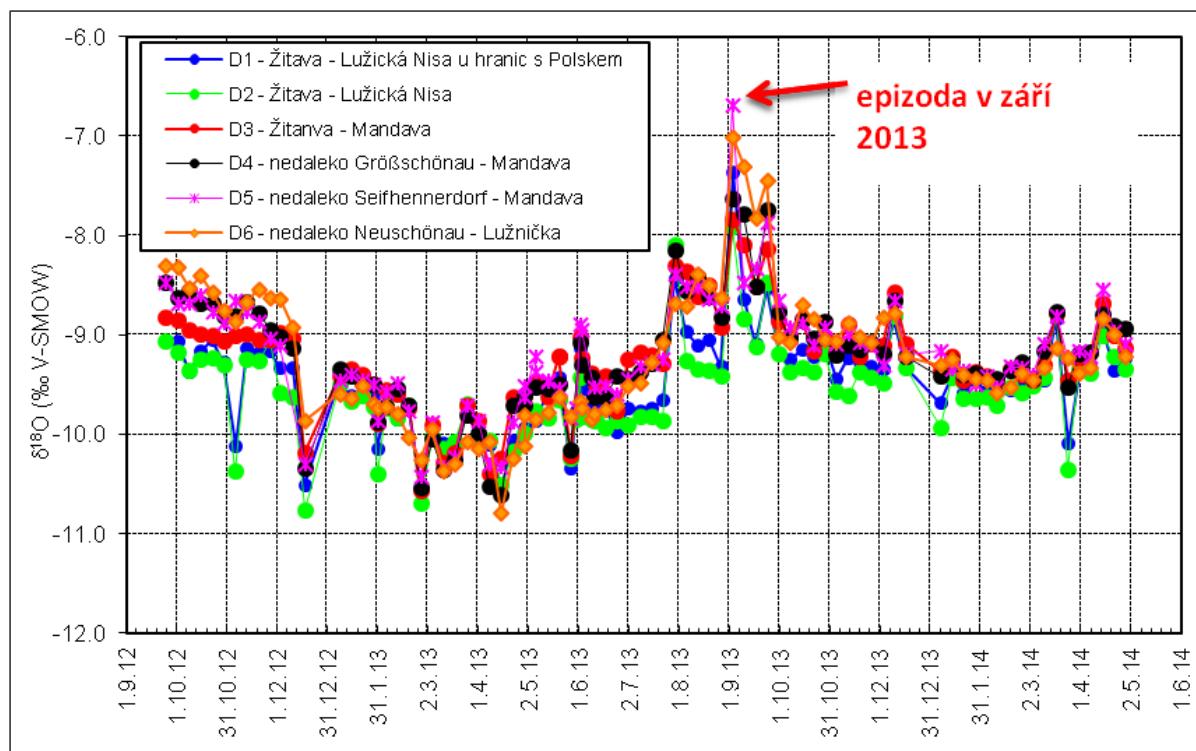
Obrázek 34 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku CZ1-CZ5 na Lužické Nise a CZ17 na Černé Nise



Obrázek 35 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku CZ6 - CZ10



Obrázek 36 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku CZ11 - CZ16

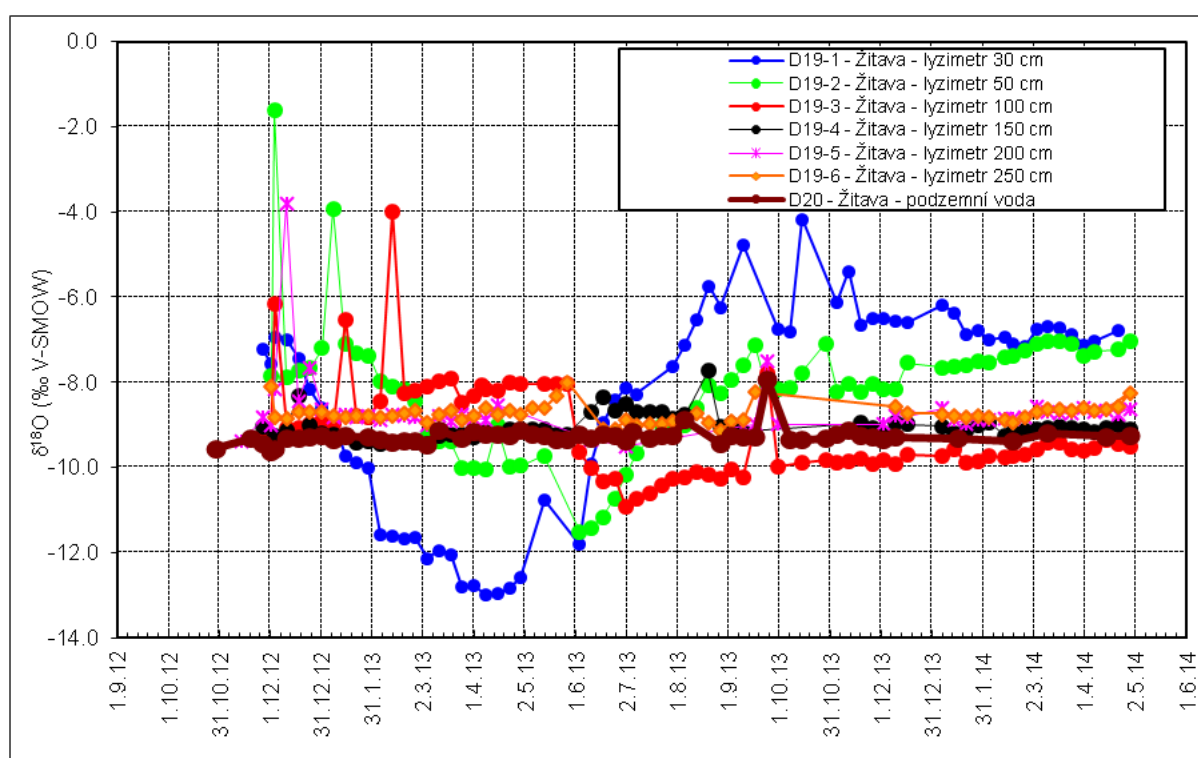


Obrázek 37 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku D1 - D6

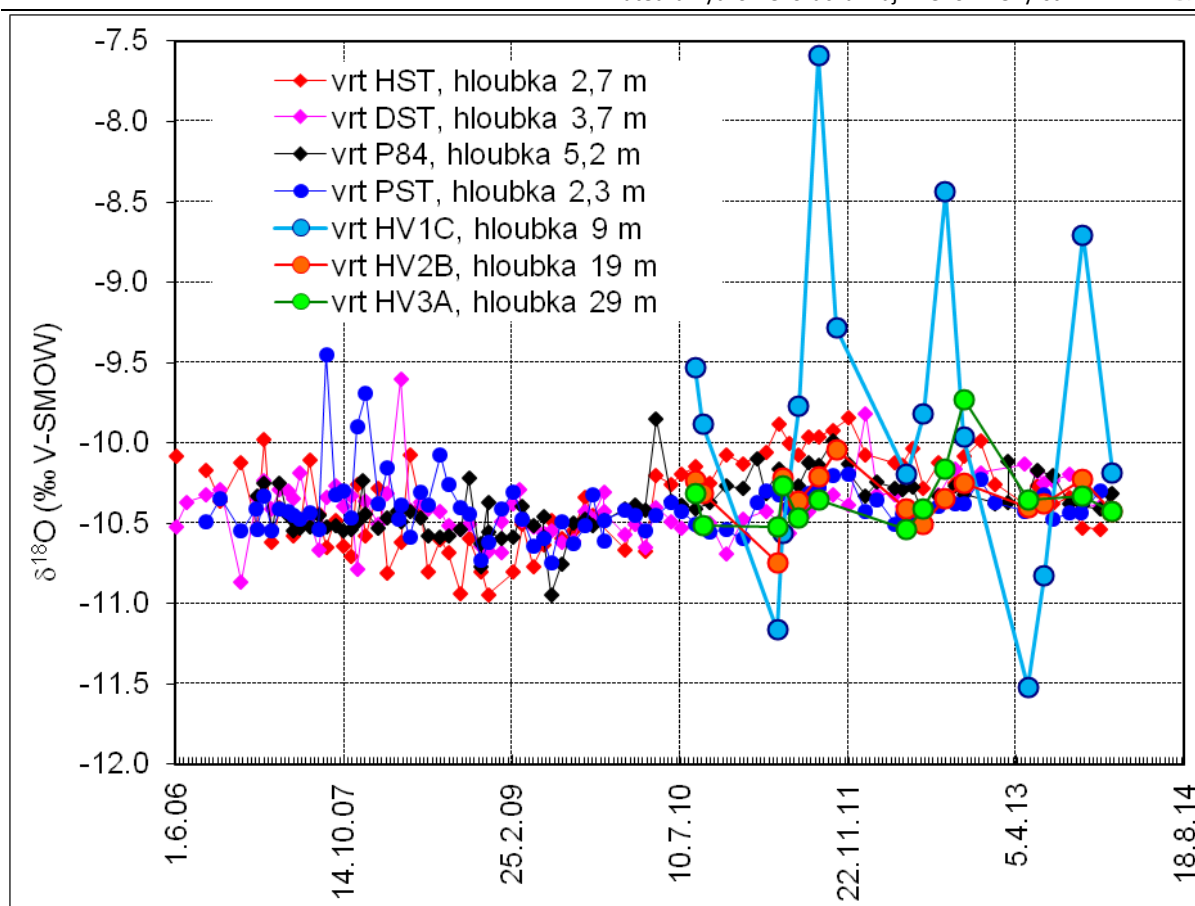


6.2 Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdní a podzemní vodě

Níže uvedený graf zobrazuje průběhy měřených hodnot relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdní vodě odebírané z lyzimetru a podzemní vodě získané z vrtu v Žitavské ekologické výzkumné stanici (viz *Obrázek 38*) a podzemní vody získané z mělkých a hlubokých vrtů v povodí Uhlířská (viz *Obrázek 39*). Na těchto grafech lze pozorovat rovněž periodické chování, ale s větší dobou opakování než je tomu u povrchových odtoků. Dále lze vidět větší rozkolísanost hodnot v menších hloubkách a časový posun extrémních hodnot s rostoucí hloubkou. Na grafu zobrazující průběh $\delta^{18}\text{O}$ v podzemní vodě v Uhlířské lze vidět odlišnost vrtu HV1C, který komunikuje s povrchovým odtokem a vymyká se tak vlastnostem typickým pro podzemní vodu.



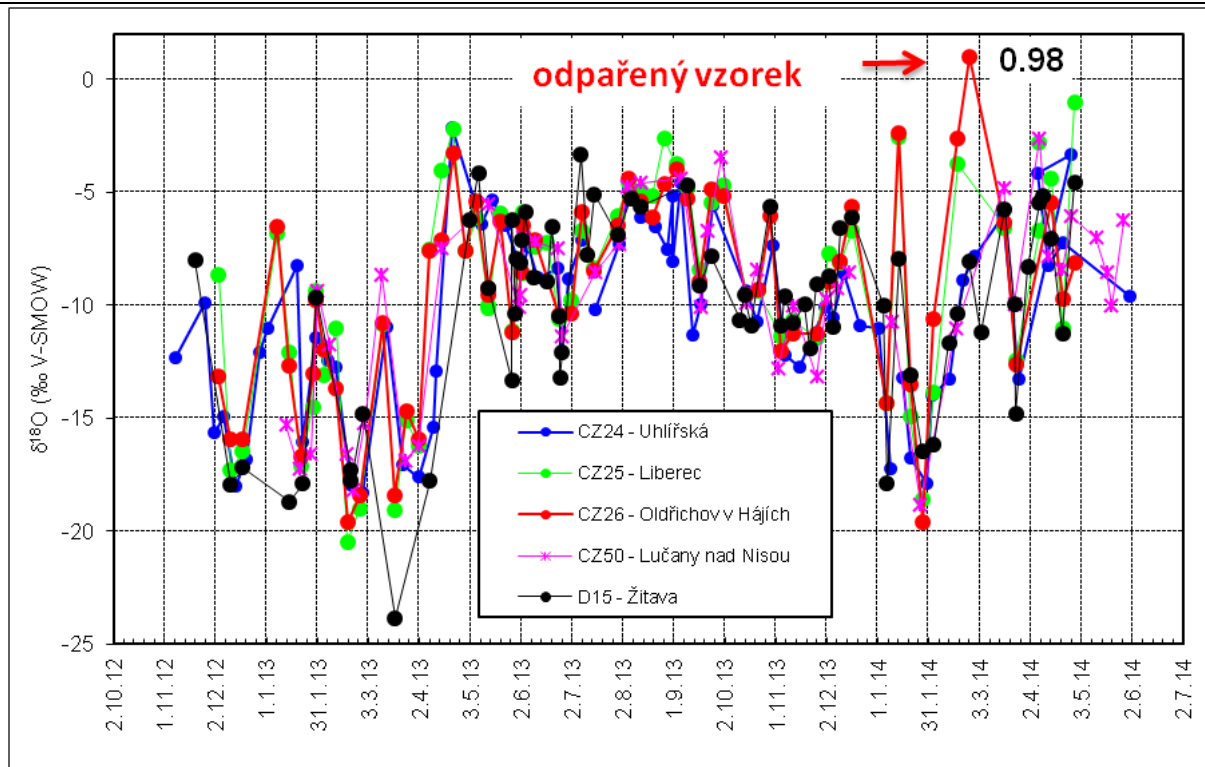
Obrázek 38 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech půdní vody D19-1 až D19-6 a podzemní vody D20



Obrázek 39 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech podzemní vody v povodí Uhřetřeben

6.3 Časový průběh relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ ve srážkách

Níže uvedený graf (viz Obrázek 38) znázorňuje časový průběh měřených hodnot relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ ve všech srážkoměrných profilech. Je možné opět vidět periodický charakter a větší rozkolísanost oproti povrchovým odtokům, půdním a podzemním vodám. Jelikož je graf tvořený z původních hodnot, lze pozorovat i na první pohled chybné hodnoty, jako je například naměřená hodnota $\delta^{18}\text{O}$, jež je rovna 0,98 ‰ V-SMOW a byla naměřena v profilu CZ26 v Oldřichově z 25. 2. 2014. Deuteriový přebytek dosahuje hodnoty -26,94.

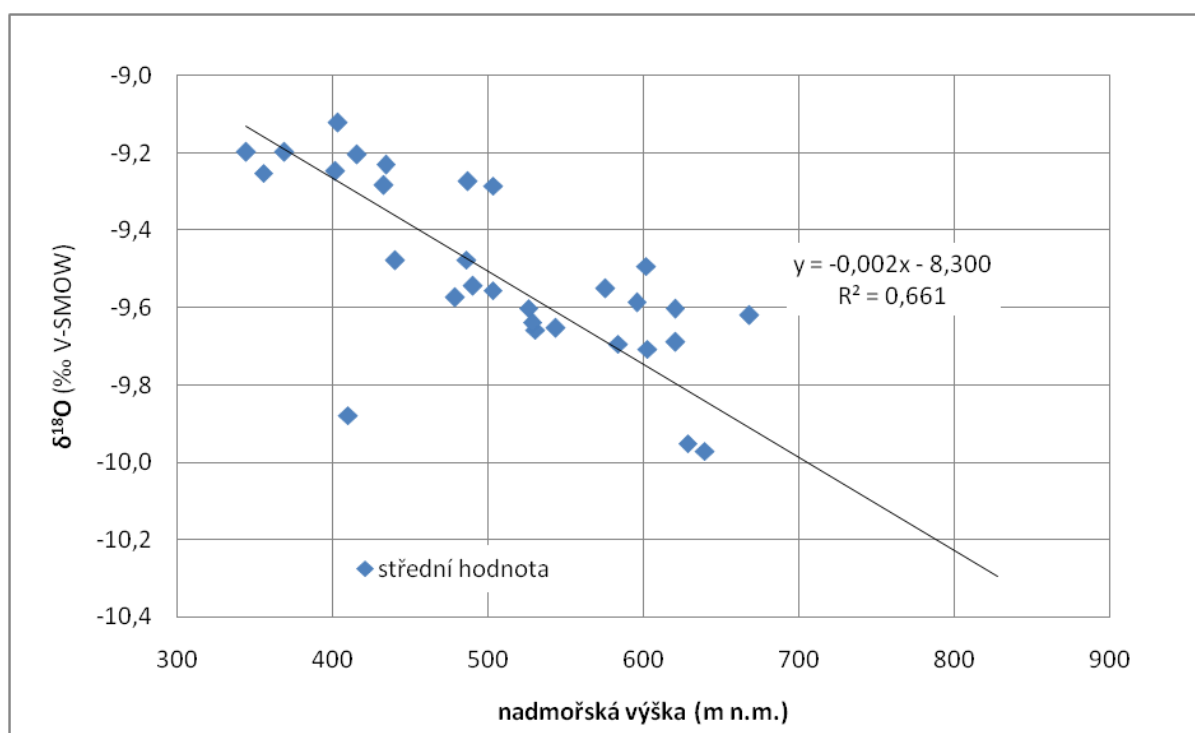


Obrázek 40 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku ve srážkoměrných profilech CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15

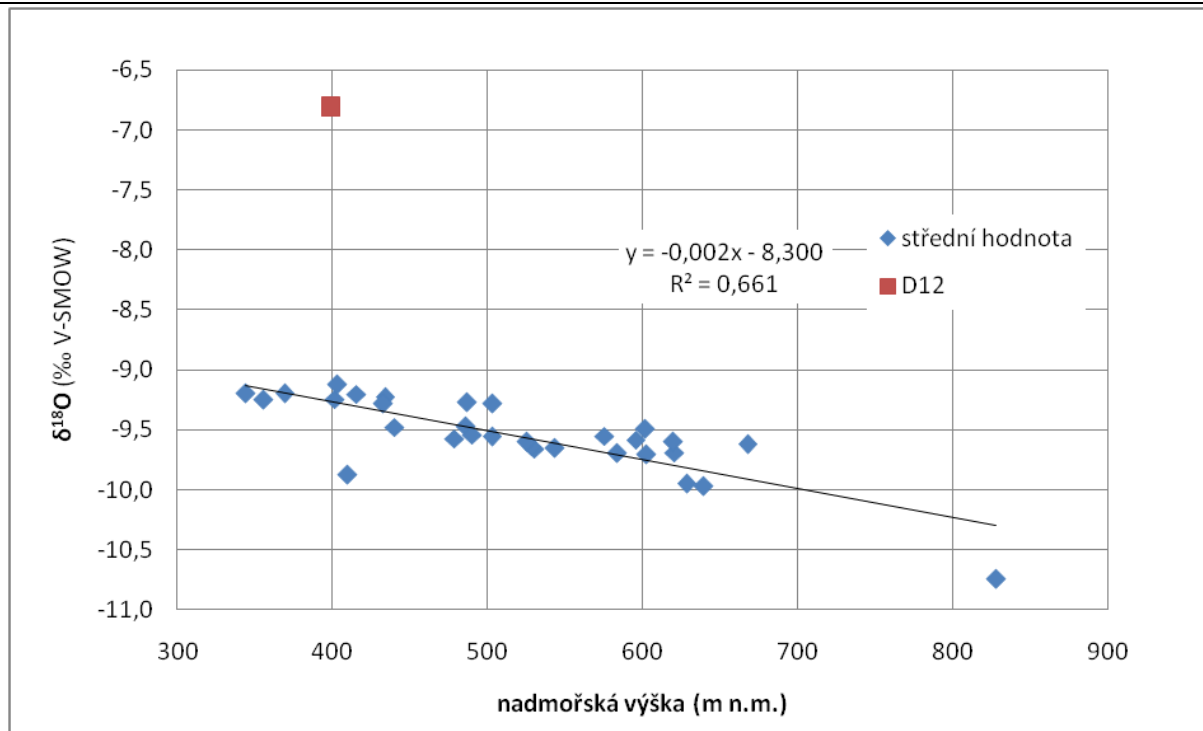


7 Vliv nadmořské výšky na střední hodnotu $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$

S rostoucí nadmořskou výškou obecně klesá dlouhodobá průměrná hodnota $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ v povrchovém odtoku v důsledku poklesu těchto hodnot ve srážkách. V případě povodí Nisy se jedná o pokles $\delta^{18}\text{O}$ o 0,24 ‰ na každých 100 výškových metrů (viz *Obrázek 41*). Výjimkou je červeně označený bod (viz *Obrázek 42*), který znázorňuje hodnoty v profilu D12, kde se voda vypařuje z velké plochy, je tedy izotopově těžší než nevypařované vzorky v povrchovém odtoku, a hodnota koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ byla proto ze závislosti na nadmořské výšce vyřazena.



Obrázek 41 - vliv nadmořské výšky na střední hodnotu $\delta^{18}\text{O}$ v povrchovém odtoku



Obrázek 42 - anomálie vzniklá výparem z vodní plochy v profilu D12

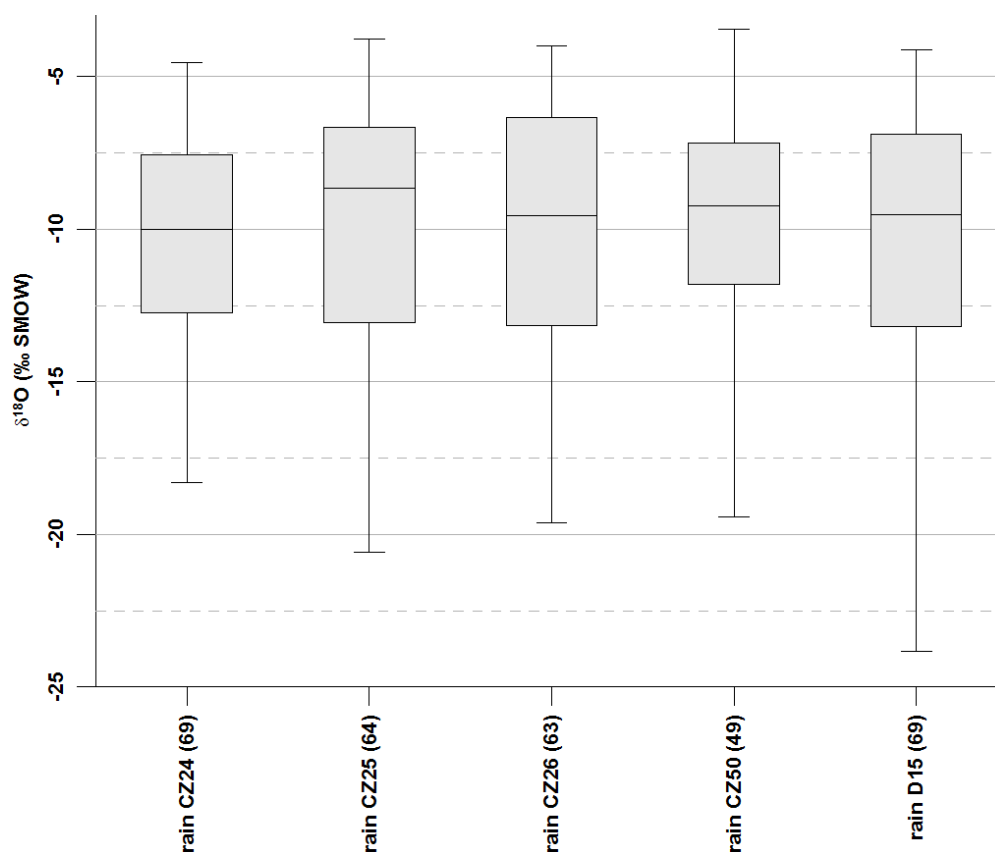


8 Box ploty v jednotlivých odběrných profilech

Naměřená data v odběrných profilech byla statisticky vyhodnocena pomocí box plotu. Za náhodný výběr byl považován soubor měřených dat v jednotlivých profilech. Níže uvedené box ploty byly vytvořeny v programu Grapher6 ze souboru dat po vyloučení a nahrazení nepůvodních hodnot $\delta^{18}\text{O}$ na základě deuteriového přebytku (viz odst. 10).

8.1 Srážky v povodí Uhlířská CZ24, v Liberci CZ25, v Oldřichově v Hájích CZ26, v Lučanech nad Nisou CZ50 a v Žitavě D15

V profilech CZ24, 25, 26, 50 a D15 byly odebrány vzorky srážkové vody v týdenních intervalech. Všechny box ploty (viz *Obrázek 43*) mají podobné pravděpodobnostní rozdělení. Mají větší mezikvartilové rozpětí než hodnoty naměřené u povrchových odtoků, hodnoty jsou tedy rozloženy nerovnoměrněji a vyskytuje se více extrémních hodnot.



Obrázek 43 - box ploty v profilech CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15 (v závorce je počet hodnot k analýze)

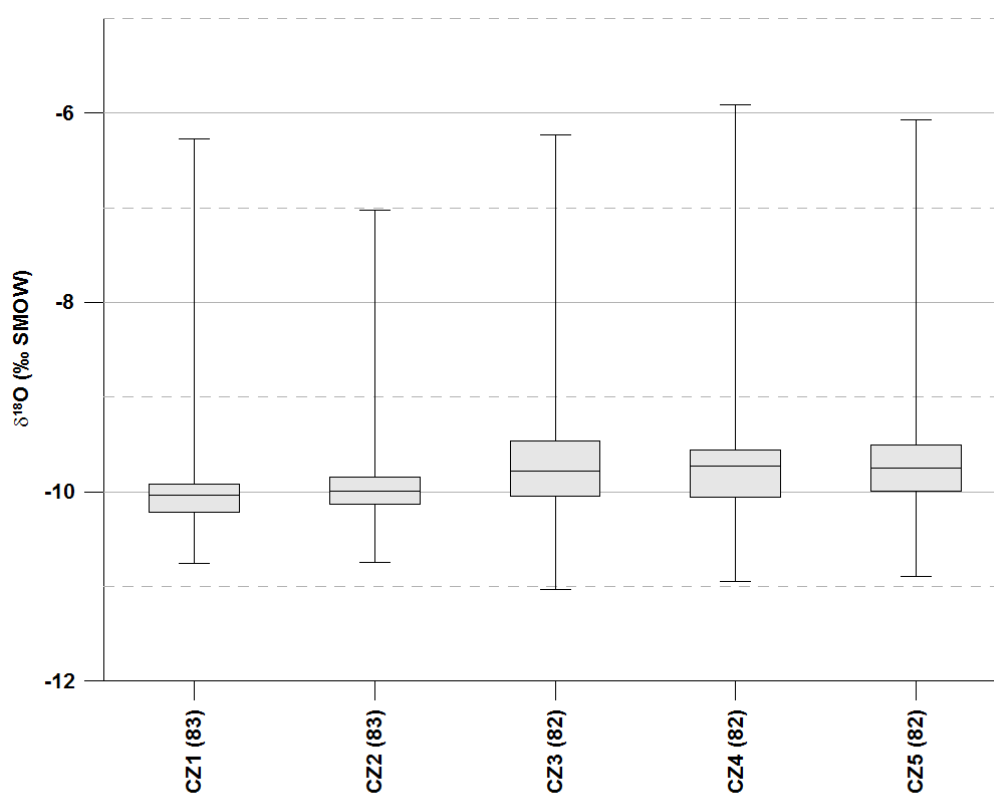


8.2 Lužická Nisa v regionu Jablonce nad Nisou CZ1-CZ5

Profily CZ1 - CZ5 jsou využity pro stanovení průběhu koncentrace izotopu kyslíku na horním toku Lužické Nisy od soutoku Lužické a Lučanské Nisy, přes Jablonecké Paseky, odtok z Jablonce nad Nisou, Proseč až po Vratislavice. Jedná se o profily s nadmořskou výškou v rozmezí 565 - 361 m n. m.

Z pravděpodobnostního rozložení lze pozorovat značnou shodu ve všech profilech. Hodnoty mediánu v profilech CZ1 a CZ2 jsou nižší než hodnoty mediánu v profilech CZ3 až CZ5, to může být způsobeno přítokem z nádrže Mšeno, ve které se kvůli velkému výparu vyskytuje izotopově těžší voda. Ta přitéká do Lužické Nisy a ovlivňuje tak izotopové složení vody v toku za Jabloncem nad Nisou, tedy v profilech CZ3 až CZ5.

Navíc lze opět pozorovat rostoucí hodnotu mediánu s klesající nadmořskou výškou (viz Obrázek 44).



Obrázek 44 - box ploty v profilech CZ1-CZ5 (v závorce je počet hodnot k analýze)

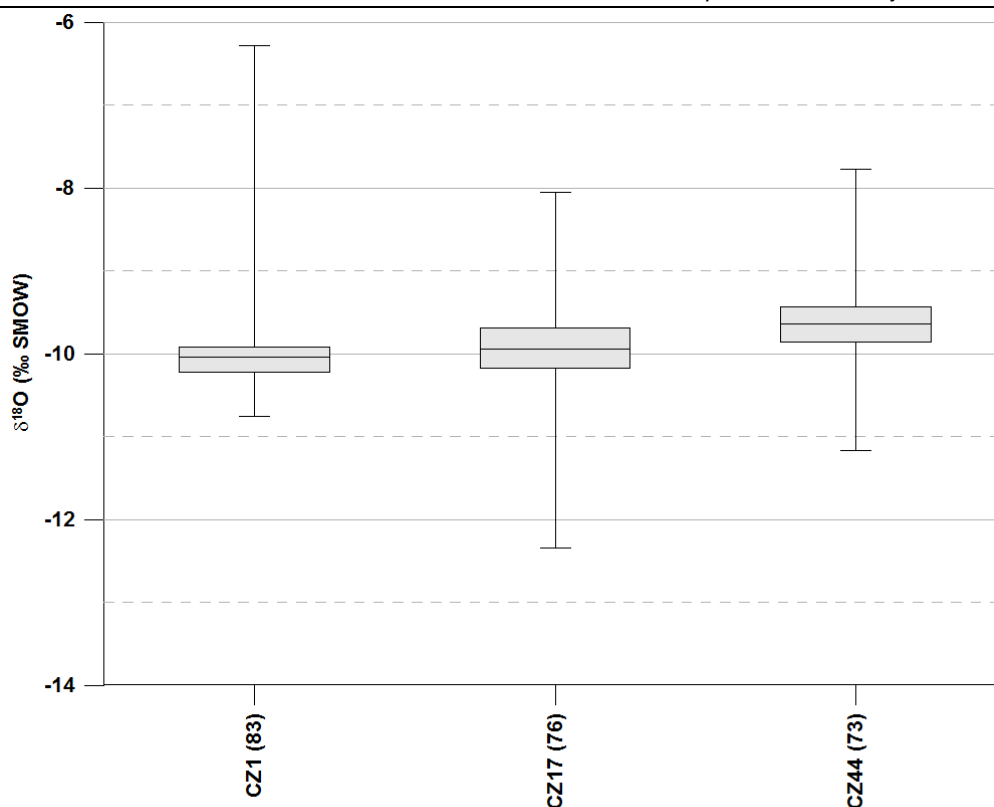


8.3 Horní tok Lužické Nisy v Lučanech nad Nisou CZ1, Černá Nisa u památníku Porscheho smrt v povodí Uhlířská CZ17 a Malá Jeřice v Betlémě CZ44

V tomto box-plotu jsou porovnávány profily nejbližší k pramenům Lužické Nisy (CZ1), Černé Nisy (CZ17) a Malé Jeřice (CZ44). Profil CZ17 monitoruje odtok v nadmořské výšce 792 m n. m. na řece Černá Nisa, přibližně 1 km od pramene.

Rozložení dat je u všech tří profilů velmi podobné, mediány mají nižší hodnotu než profily měřené v nižších nadmořských výškách, mezikvartilová rozpětí jsou úzká. Odlišuje se pouze profil CZ1, a to poměrem extrémních hodnot - větším množstvím izotopově těžké vody a menším množstvím izotopově lehké vody. To je zřejmě způsobeno využitím území. Lužická Nisa je v okolí profilu CZ1 osídlena, zatímco profily CZ17 a CZ44 se vyskytují v oblasti, kde je půda využívána převážně pro louky, pastviny a lesy. Proto v profilu CZ1 pozorujeme netransformovanou vodu z letních dešťů, která má menší možnost infiltrovat a mísit se se starou půdní a podzemní vodou (viz *Obrázek 45*), ale zároveň dlouhodobý odtok z tohoto profilu poukazuje nižšími hodnotami mezikvartilového rozpětí na dlouhodobě vyšší podíl podzemní vody na odtoku v tomto dílčím povodí.

V profilu CZ17 je více zřetelný vliv zimních srážek, kvůli velké nadmořské výšce a přetrvávající sněhové pokrývce v zimním období. Do odtoku se dostává větší množství zimní srážky v profilu CZ17, protože sníh ve vyšších nadmořských výškách taje pomaleji a je zde menší výpar ze sněhu než v údolí, kde sníh roztaje rychleji a dostane se do odtoku dříve a v kratším časovém intervalu.



Obrázek 45 - box ploty v profilech CZ1, CZ17 a CZ44 (v závorce je počet hodnot k analýze)

8.4 Lužická Nisa v Liberci v blízkosti ČOV CZ6, CZ7, CZ8-1, CZ-1a, CZ8-2 a CZ8-3 a její přítoky Františkovský potok CZ7-1 a Jizerský potok CZ7-2

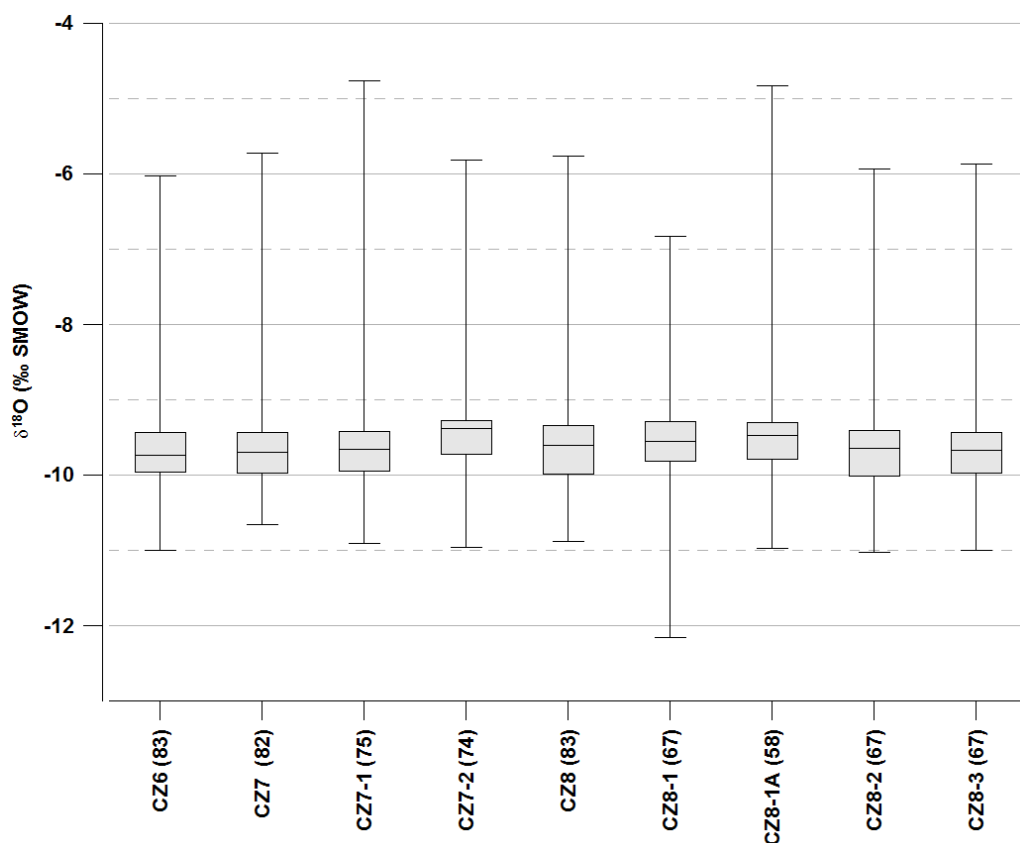
Profil CZ6 leží na Lužické Nise v centru Liberce, profil CZ7-1 se nachází na Františkovském potoce, profil CZ7-2 na Jizerském potoce, oba jsou přítokem Lužické Nisy v Liberci. Profily CZ8-1 až CZ8-3 leží na Lužické Nise v okolí ČOV (profil CZ8-1 zaznamenává koncentraci $\delta^{18}\text{O}$ u výpusti, CZ8-1a u přepadu, tj. nečištěnou odpadní vodu, CZ8-2 je 20 m za výpustí a CZ8-3 je 50 m za výpustí).

Měření ze všech těchto profilů zaznamenalo podobné pravděpodobnostní rozložení, přičemž mezikvartilové rozpětí je malé, zatímco rozdíly minimálních a maximálních hodnot jsou relativně velké. To může být opět důsledkem okamžitého velkého povrchového odtoku z nepropustných ploch městské aglomerace.

V profilu CZ7-2 lze vidět výrazný nárůst mediánu, to může být důsledkem průtoku Jizerského potoka Labutím jezírkem, kde se vyskytuje izotopově těžší voda než v toku.



V profilu CZ8-2 a CZ8-3 za výpustí z ČOV je zaznamenán pokles mediánu (viz Obrázek 46), vyskytuje se zde izotopově lehčí voda, která pochází nejspíše z horských vodních nádrží Souš a Josefův Důl, které zásobují vodou Liberec a Jablonec nad Nisou. Tyto nádrže leží ve vyšší nadmořské výšce než zásobovaná města, proto se v nich vyskytuje voda s nižšími hodnotami $\delta^{18}\text{O}$.



Obrázek 46 - box ploty v profilech CZ6, CZ7, CZ7-1, CZ7-1, CZ8, CZ8-1, CZ8-1a, CZ8-2 a CZ8-3 (v závorce je počet hodnot k analýze)

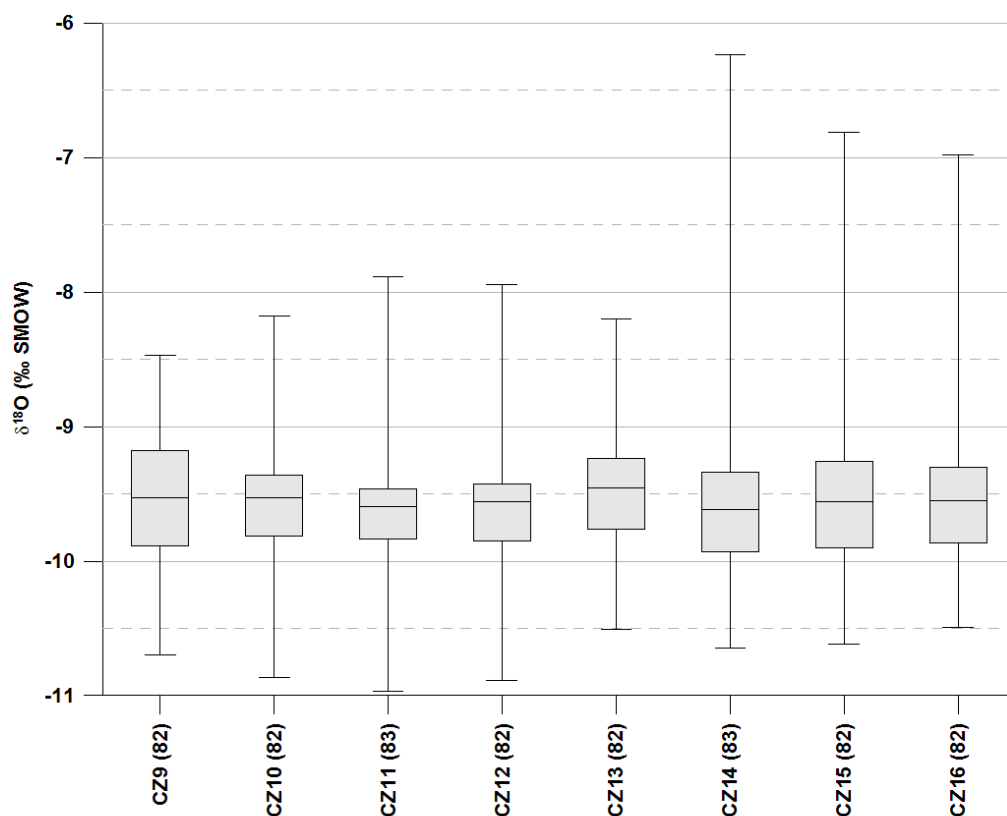
8.5 Povodí Jeřice CZ9-CZ16

Profil CZ9 se nachází na potoce vytékajícím z nádrže Fojtka a profil CZ10 je na toku Jeřice v Mníšku včetně soutoku s potokem Fojtka. Profil CZ11 se nachází v Oldřichově na Malé Jeřici, CZ12 v Oldřichově na Jeřici, CZ13 v Chrastavě na Jeřici, CZ14 v Chrastavě na Lužické Nise, CZ15 v Chotyni na Lužické Nise a CZ16 v Hrádku nad Nisou na řece Lužická Nisa.

V grafu lze pozorovat značný rozdíl mezi maximálními hodnotami v profilech CZ11 až CZ13 a CZ14 až 16. Profily CZ11 - 13 se vyskytují na Malé jeřici a Jeřici, která protéká méně urbanizovaným územím, je tedy schopná větší transformace než Lužická Nisa



ovlivněná zástavbou. Lužická Nisa po soutoku s Jeřicí postupně po toku protéká méně zastavěnou oblastí a vtékají do ní další podzemní vody v nižších partiích povodí (oblast Chrastavy, Chotyně a Hrádku nad Nisou), tím se zmenšují extrémní hodnoty, řeka tak prokazuje schopnost transformací. Medián se v profilech CZ11 - 13 zvyšuje s klesající nadmořskou výškou (viz Obrázek 47).



Obrázek 47 - box ploty v profilech CZ9-CZ16 (v závorce je počet hodnot k analýze)

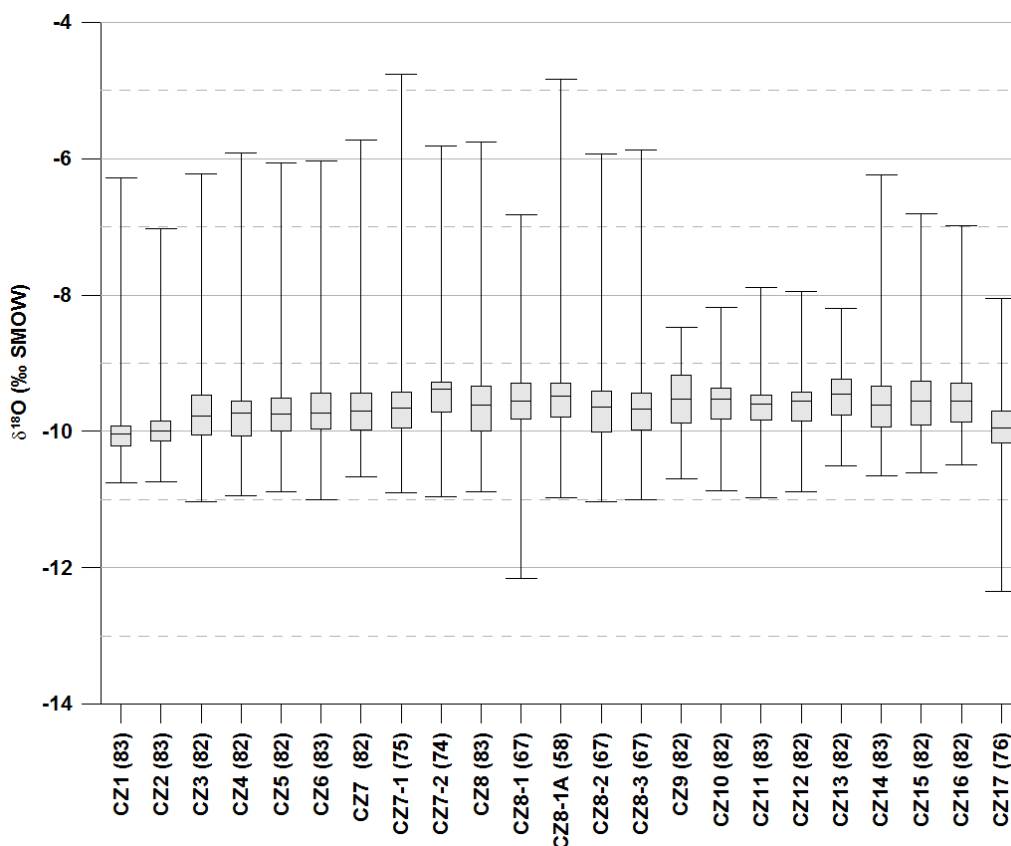
8.6 Celkový přehled box plotů v profilech povrchového odtoku na české straně

Na níže uvedeném box plotu lze vidět přehled statistických charakteristik koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získaných ze všech profilů na české straně. Podobnost vykazují dílčí povodí. Povodí Lužické Nisy, tedy profily CZ1-8 a CZ14-16, je obecně více ovlivněno letními srážkami, což může být způsobeno jednak nižší nadmořskou výškou, jednak vlivem zástavby a pomalejší transformace. Naproti tomu povodí Jeřice, tj. profily CZ9-CZ13, vykazují větší vyrovnanost z hlediska extrémních hodnot koncentrace $\delta^{18}\text{O}$.

Extrémně lehký izotopový odtok byl naměřen 26. 2. 2013 v datech získaných z profilu CZ8-1, a to s hodnotou koncentrace $\delta^{18}\text{O} = -12,16 \text{ ‰}$. Tato jediná hodnota ovlivnila rozsah box plotu v tomto profilu.



Povrchový odtok je nejvíce ovlivněn zimními srážkami v profilu CZ17, který se nachází v nadmořské výšce 792 m n. m., a je výrazně ovlivňován infiltrací vody ze sněhové pokrývky.



Obrázek 48 - box ploty v profilech CZ1-CZ17 (v závorce je počet hodnot k analýze)

8.7 Půdní voda v povodí Uhlířská

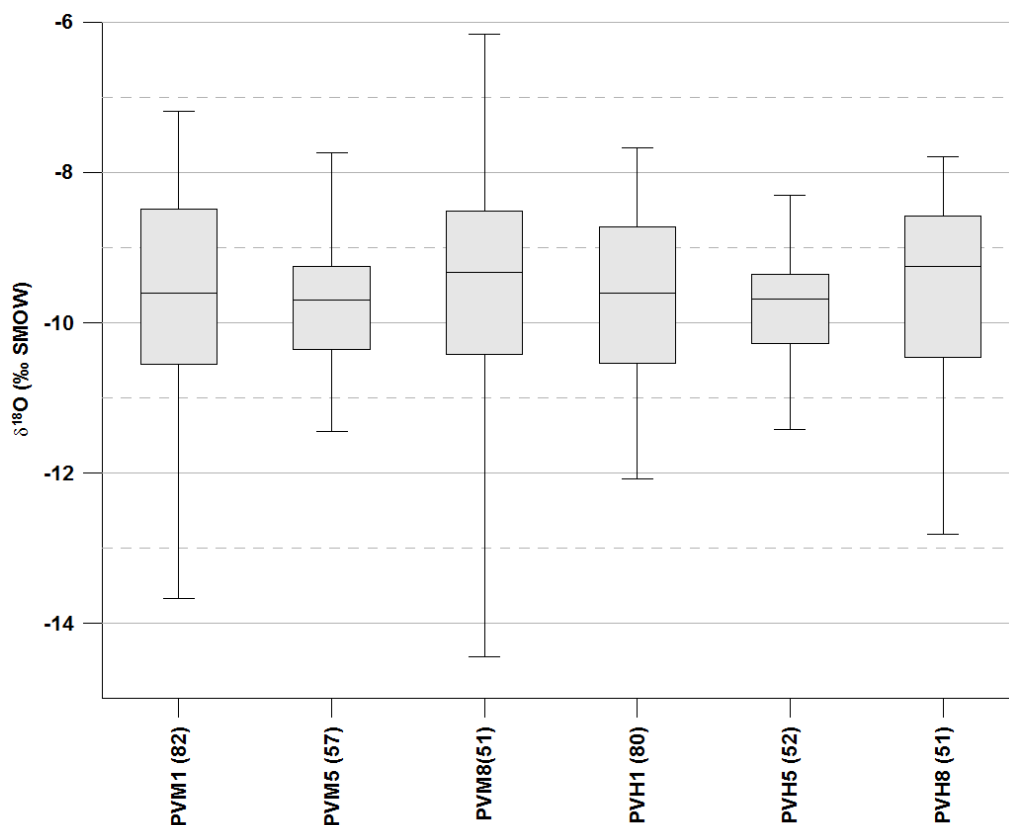
Půdní voda se odebírala vždy ve dvou hloubkách, a sice ve 30 cm (značení PVM) a v 60 cm (značení PVH). Vzorky půdní vody značené čísly 1, 5 a 8 byly odebírány ve svahu a vzorky značené čísly 3 a 7 v rašelině.

Odlišnost půdních vod můžeme vidět v následujících box-plotech. Obrázek 49 ukazuje statistické rozložení hodnot koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ ve vzorcích svahových půdních vod mělkých (PVM - hloubka 30 cm) a hlubokých (PVH – hloubka 60 cm). Obrázek 50 znázorňuje totéž, ale ve vzorcích půdní vody odebírané v rašelině. Půdní vody svahové mají větší mezikvartilové rozpětí než půdní vody rašelinné, proto lze usuzovat, že půdní voda v rašelině je více dotována podzemní vodou. Ze svahových půdních vod (viz Obrázek 49) svým mezikvartilovým rozpětím vybočuje voda odebíraná v profilu PVM5 i PVH5. Tento profil se

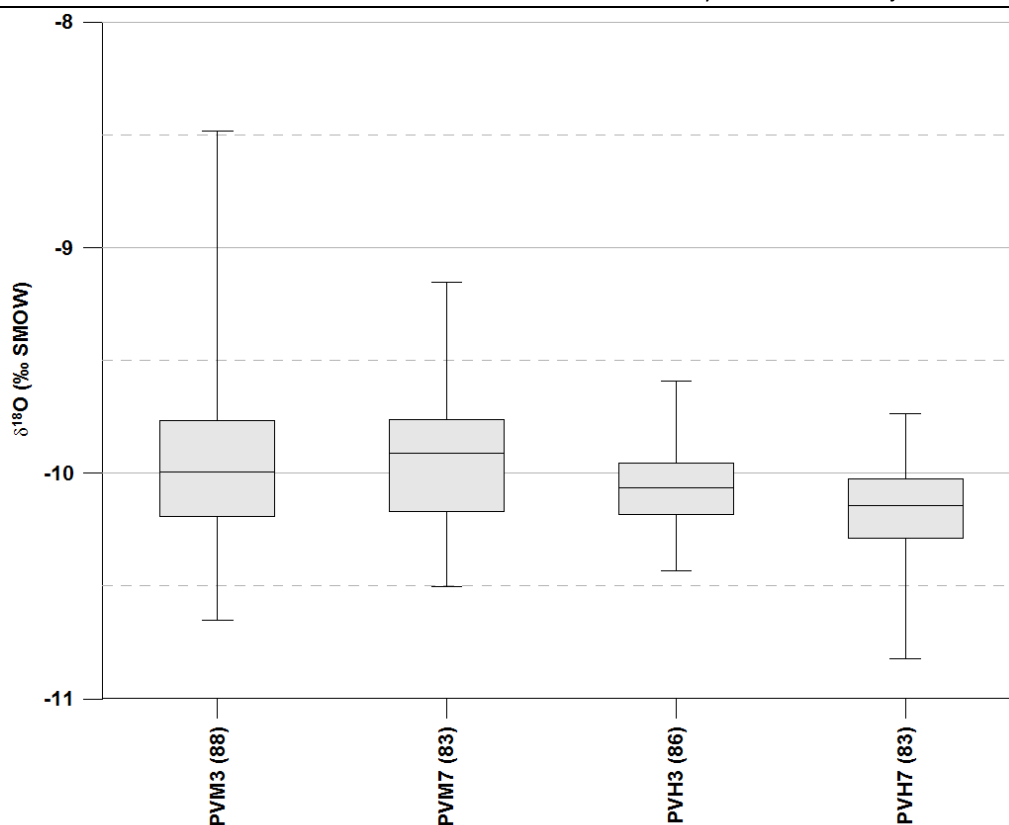


nachází na rozhraní lesa a rašeliny, je přechodem mezi svahovou a rašelinnou půdní vodou, a vykazuje tedy menší mezikvartilové rozpětí než ostatní svahové půdní vody.

V box plotu zobrazujícím rašelinné půdní vody (viz *Obrázek 50*) můžeme vidět i vliv hloubky odběru, kdy vzorky z PVH mají medián i mezikvartilové rozpětí menší než vzorky z PVM.



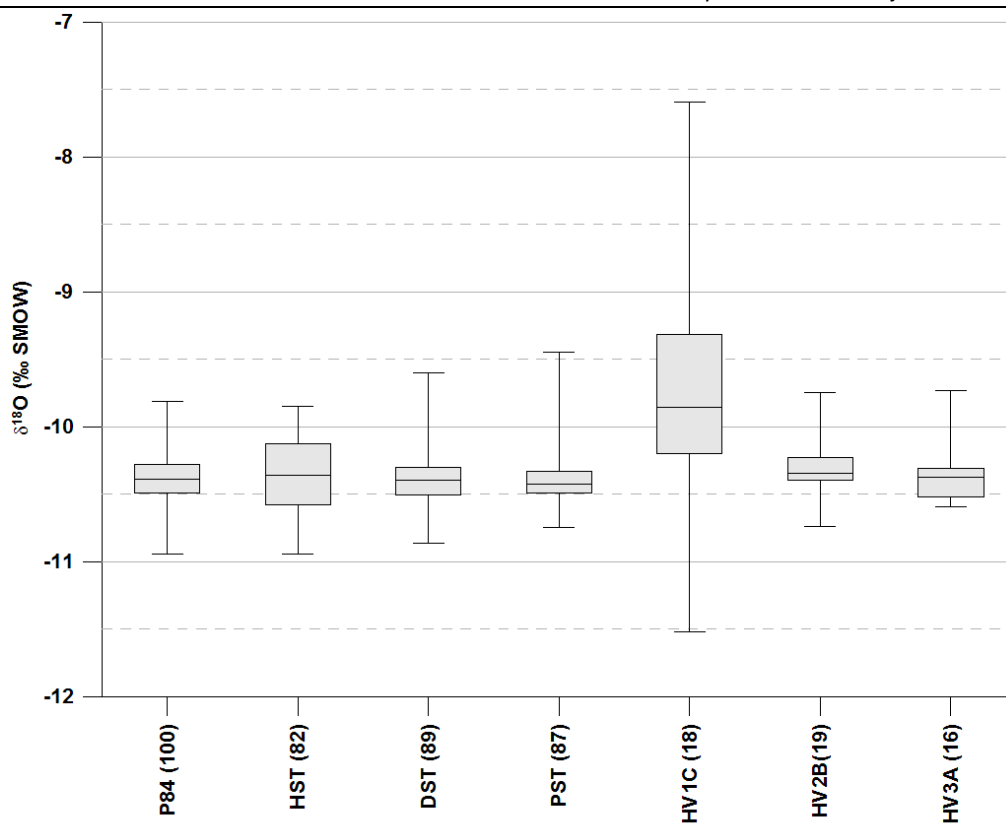
Obrázek 49 - box plot v profilech svahové půdní vody PVM1, 5 a 8 a PVH1, 5 a 8 (v závorce je počet hodnot k analýze)



Obrázek 50 - box plot rašelinné půdní vody v profilech PVM3, 7 a PVH3, 7 (v závorce je počet hodnot k analýze)

8.8 Podzemní voda v povodí Uhlířská

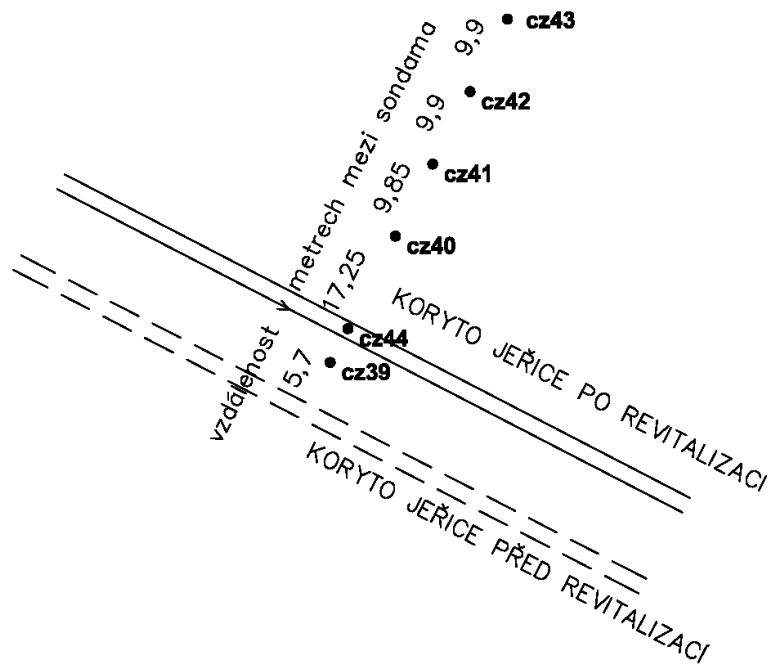
Obrázek 51 znázorňuje box ploty v profilech, ve kterých se pomocí vrtů odebíraly vzorky podzemní vody. Na obrázku je zřejmé, že vrt HV1C (9 m hluboký) se vymyká průběhu izotopu kyslíku v ostatních vrtech, třebaže není nejmělčí (vrty P84, PST, HST, DST dosahují hloubky 2,7 - 5,4 m). Jedná se o vrt v blízkosti toku v říčních sedimentech, kde dochází ke komunikaci s povrchovou vodou. Ostatní vrty vzorkují vodu buď v hlubších sedimentech (HV2B 19 m, HV3A 29 m) anebo se nachází v trase drenáže hlubších podzemních vod pohybujících se na svahu povodí (P84, PST, DST, HST)



Obrázek 51 - box ploty v profilech pro odběr podzemní vody (v závorce je počet hodnot k analýze)

8.9 Půdní voda sbíraná na experimentálním území VÚRV, v.v.i. v Betlémě, povodí Malé Jeřice CZ39 - 43

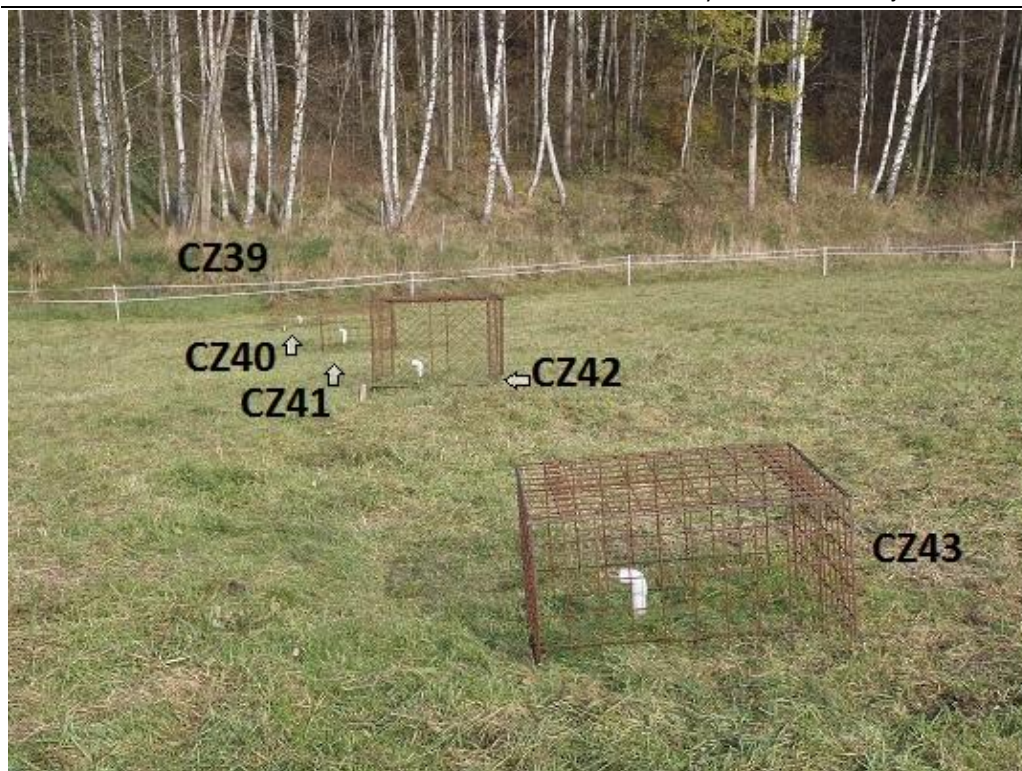
V profilech CZ39 - 43 byly zkoumány hodnoty koncentrace izotopu kyslíku v podzemní vodě v lokalitě Betlém. Z box-plotu lze oproti povrchovému odtoku pozorovat větší mezikvartilové rozpětí, tedy větší vyrovnanost a méně extrémních hodnot. Extrémní hodnoty převažují v oblasti lehčích izotopů, což je důsledek tání sněhu. Z měřených hodnot v těchto profilech se odlišuje mezikvartilové rozpětí v profilu CZ39, které je menší než u zbylých profilů. Vzorky odebírané v profilu CZ39 jsou více ovlivněny podzemní vodou, protože horizontální vzdálenost (5,7 m) této pravobřežní sondy je nejbližší povrchovému odtoku v korytě Malé Jeřice. Vzorky v profilech CZ40 - CZ43 byly odebírány na levém břehu řeky a nejbližší z nich, sonda v profilu CZ40, je od koryta vzdálená 17,25 m, proto se zde již tak výrazně neprojevuje vliv podzemní vody (viz *Obrázek 55*). Půdorysné rozmístění sond pro odběr podzemní vody je znázorněno na níže uvedených obrázcích (viz *Obrázek 52* a *Obrázek 53*).



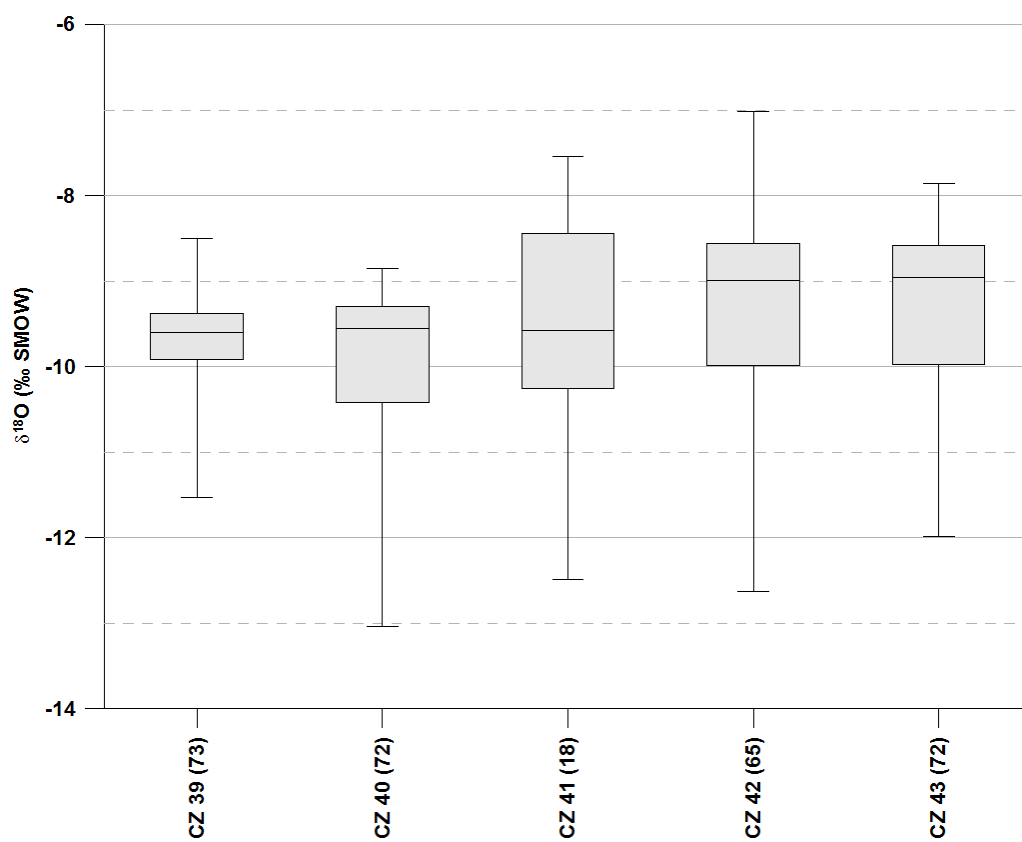
Obrázek 52 - pláněk umístění sond v Betlémě (autor: F. Paška)



Obrázek 53 - letecký snímek umístění sond v Betlémě (autor: F. Paška)



Obrázek 54 - umístění sond podzemních vod v Betlémě



Obrázek 55 - box ploty v profilech podzemní vody (CZ39-43), (v závorce je počet hodnot k analýze)



8.10 Profily na německé straně zájmového území D1-14

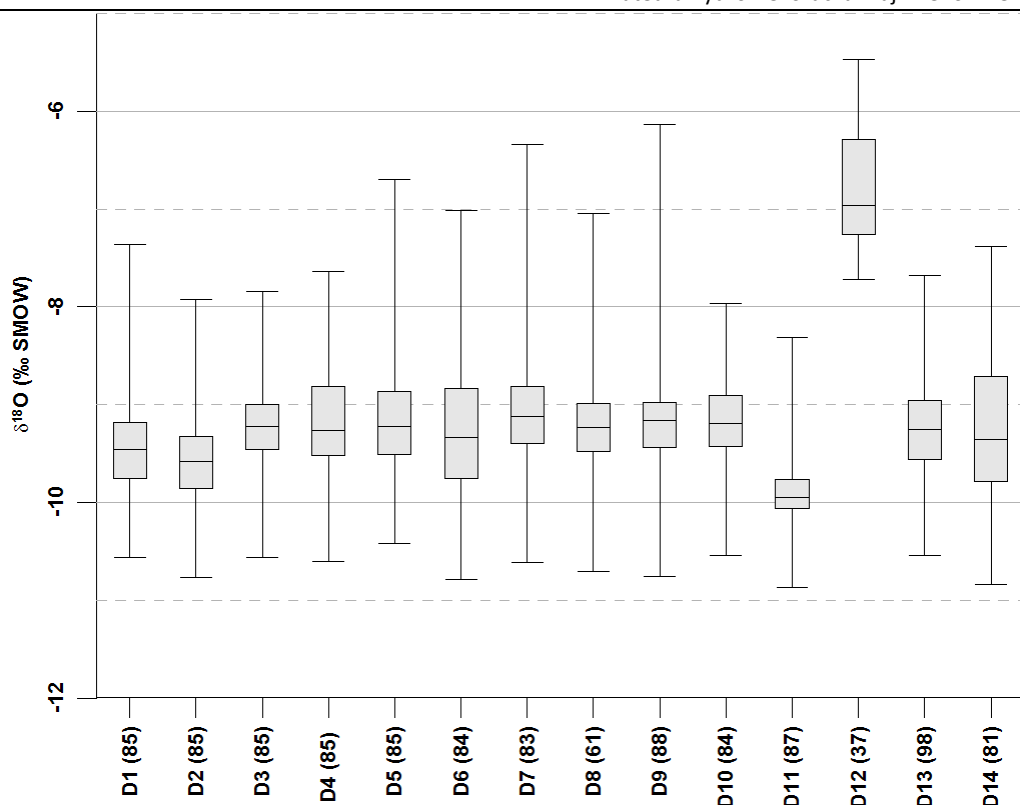
Statistické vyhodnocení hodnot koncentrace izotopu kyslíku získaného v profilech D1 až D14 je zobrazeno na níže uvedeném box-plotu (viz *Obrázek 56*).

Podobné rozdělení vykazují profily D1 a D2, které oba leží na řece Lužická Nisa. Dále lze podobnost pozorovat na box plotech v profilech D3, D4, D5 a D13, které se nachází na Mandavě, přičemž se menší hodnotou mezikvartilového rozpětí odlišuje profil D3, jenž je nejnižší na toku. To může být důsledkem postupného snižování extrémů směrem po toku v důsledku transformační schopnosti řeky a většího množství povrchových přítoků, tedy i přítoků podzemní vody.

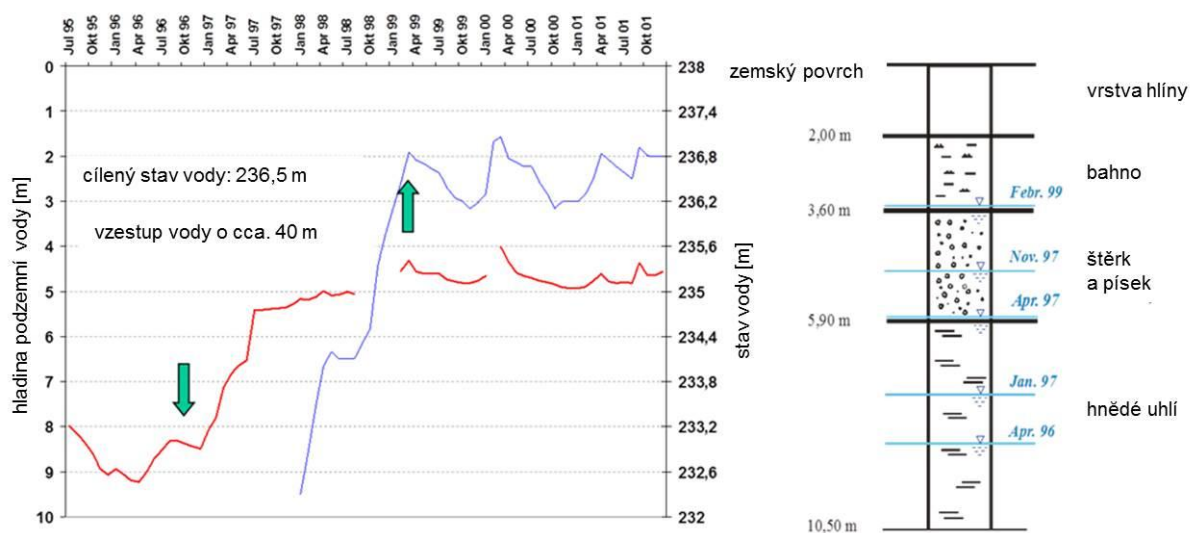
Naopak velkým mezikvartilovým rozpětím se vyznačuje řeka Lužnička (profily D6 a D14). Přitéká z vyšších nadmořských výšek a má malé množství vlastních přítoků. Voda má tak méně příležitostí mísit se v podzemní a půdní vodou a transformovat se.

Výrazně se odlišuje měření v profilu D12, kde hodnota mediánu nabývá mnohem vyšších hodnot než u ostatních profilů. To je způsobeno výparem z velké plochy (60 ha) jezera Olbersdorfer See. Vypařovaná voda má tendenci stávat se izotopově těžší (viz 10).

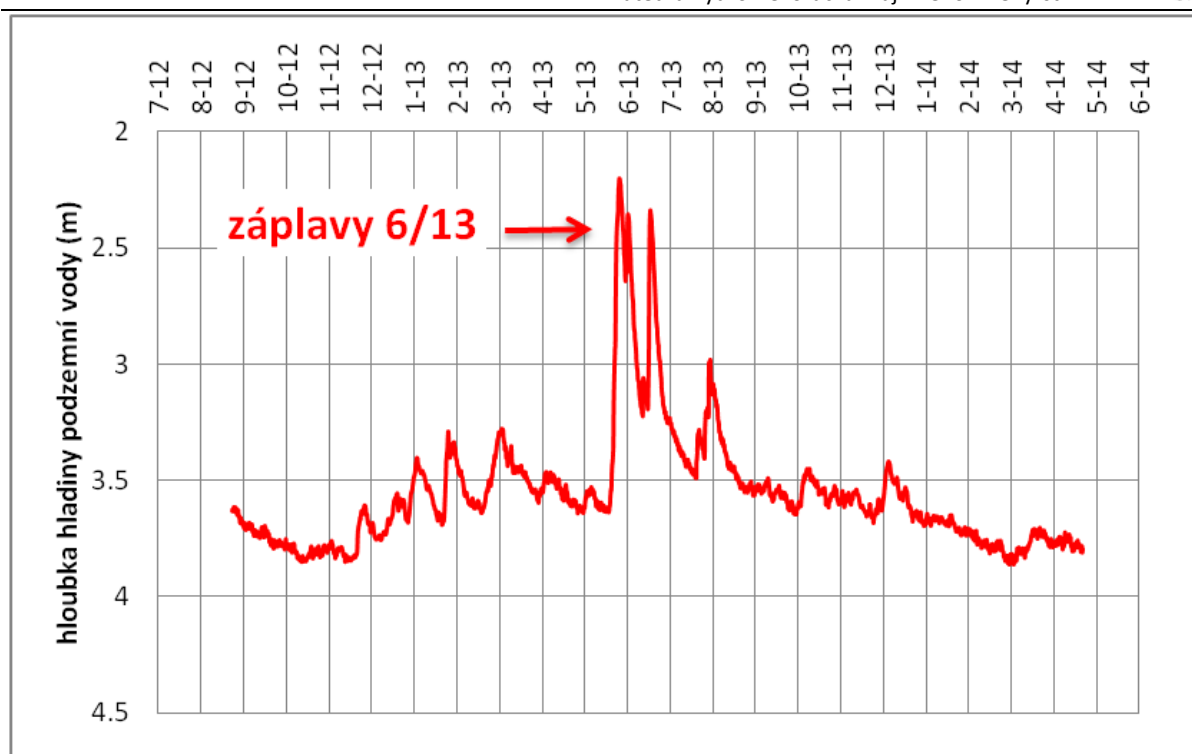
Opačnou tendenci vykazuje měření v profilu D11 na řece Goldbach, která ústí do Mandavy v Žitavě. Asi 200 - 300 m od levého břehu Goldbachu se nachází jezero Olbersdorfer See, jenž vzniklo jako zatopený hnědouhelný lom v rámci revitalizace krajiny po jeho vytěžení. V důsledku zatopení lomu se v jeho okolí zvýšila úroveň hladiny podzemní vody (viz *Obrázek 57*). Vzhledem k těsné blízkosti potoka Goldbach od jezera lze předpokládat značné mísení podzemní vody s vodou v povrchovém odtoku. Tím je možné ve srovnání s ostatními profily vysvětlit náhlý pokles mediánu a mnohem menší rozdíl horního a dolního kvartilu, čímž se vyznačuje podzemní voda. Navíc Goldbach přitéká z hor, které jsou v daném regionu nejvyšší, to může také přispívat k nižší hodnotě mediánu.



Obrázek 56 - box ploty v profilech D1-D14 (v závorce je počet hodnot k analýze)



Obrázek 57 - Zvýšení hladiny podzemní vody v důsledku zatopení vytěženého lomu [26]

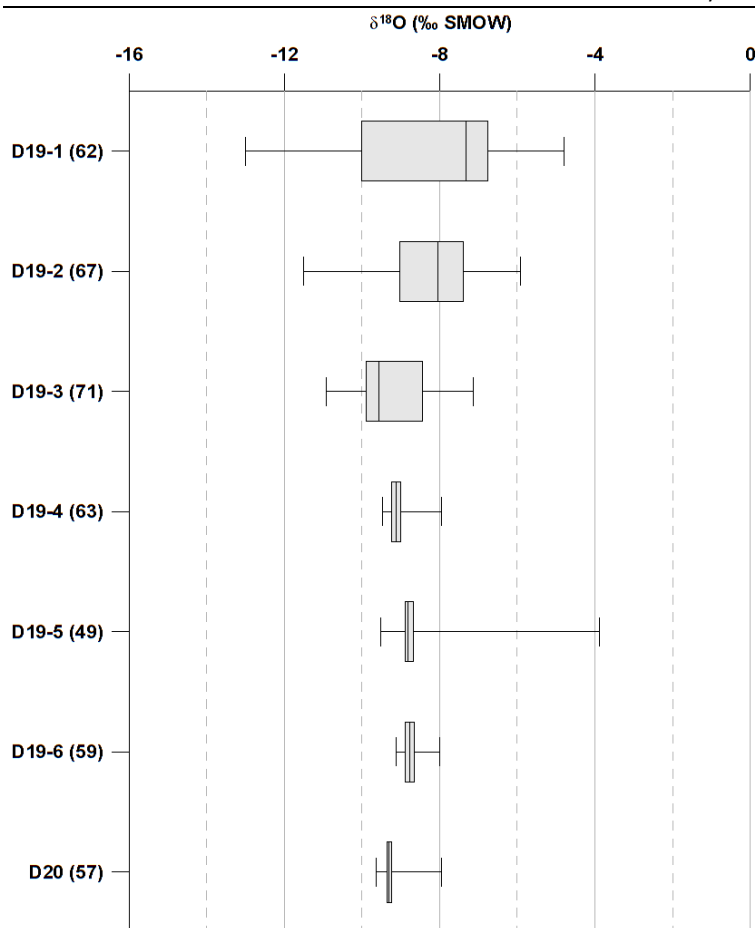


Obrázek 58 - průběh hloubky hladiny podzemní vody ve vrtu D20 v období 9/12 - 4/14

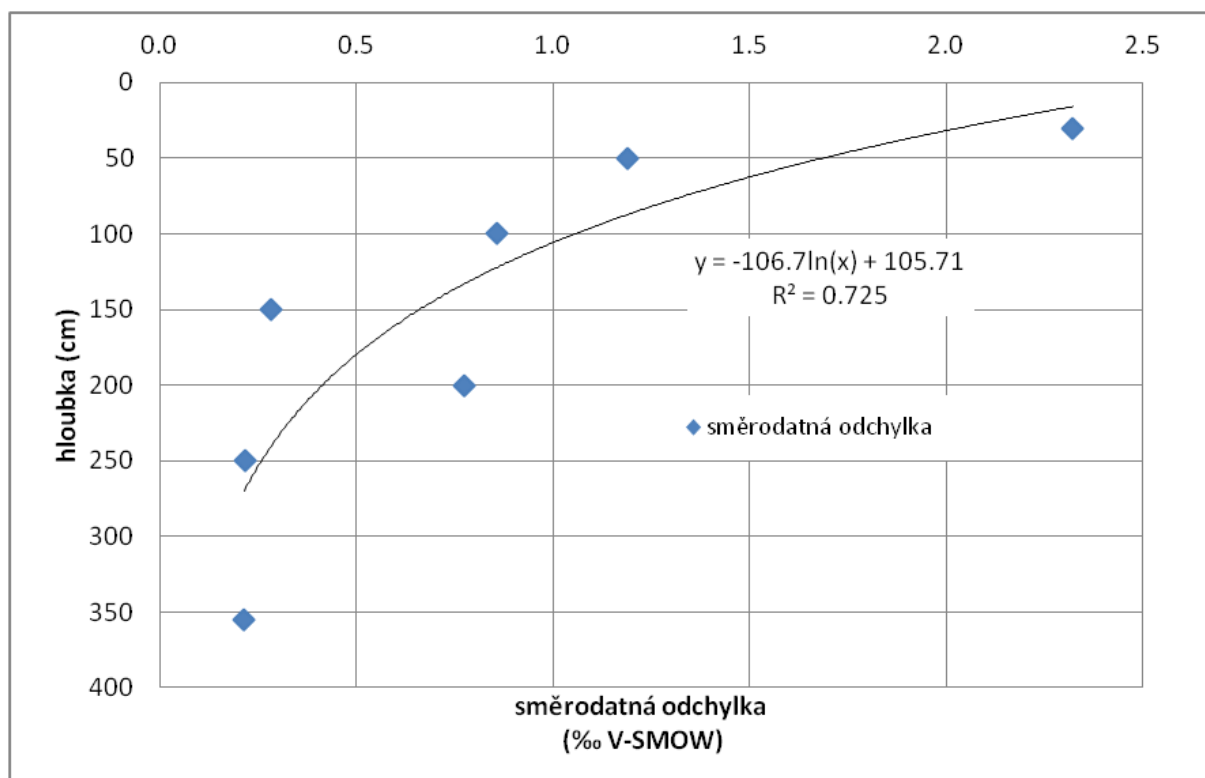
Výše uvedený obrázek (viz *Obrázek 58*) znázorňuje kolísání hladiny podzemní vody ve vrtu v profilu D20. Z obrázku je patrný vliv záplav z června roku 2013, kdy došlo k zatopení Žitavské výzkumné ekologické stanice a tím i k výraznému vzestupu HPV. Při porovnání obou obrázků (viz *Obrázek 57* a *Obrázek 58*) je zřejmé, že zatímco v letech 1996 až 2001 při napouštění zatopeného lomu hladina podzemní vody ve vrtu stoupá k hodnotě přibližně 4,5 m pod zemským povrchem (viz *Obrázek 57*), v letech 2012 až 2014 již pomalu stagnuje kolem hodnoty 3,6 m pod zemským povrchem.

8.11 Půdní voda sbíraná v žitavském lyzimetru D19-1 až D19-6, a podzemní voda z vrtu v Žitavské ekologické výzkumné stanici D20

Box plot (viz *Obrázek 59*) ukazuje rozložení naměřených hodnot $\delta^{18}\text{O}$ v profilech půdní vody D19-1, D19-2, D19-3, D19-4, D19-5, D19-6 a v profilu D20, v němž byla vzorkována podzemní voda. Profily jsou seřazeny podle hloubky odběru vzorků vody sestupně od 30 cm do 356 cm. Mezikvartilové rozpětí se s hloubkou snižuje, zmenšuje se tedy výskyt extrémních hodnot, a tím i směrodatná odchylka (viz *Obrázek 60*). V tomto případě lze pozorovat řádové snížení mezikvartilového rozpětí svrchních a spodních horizontů. Střední hodnota nevykazuje žádný systematický trend. U profilu D19-5 lze vidět chybu při opravě odpařovaných hodnot (viz 10.1.1).



Obrázek 59 - box ploty v profilech D19-1 až D19-6 a D20 (v závorce je počet hodnot k analýze)

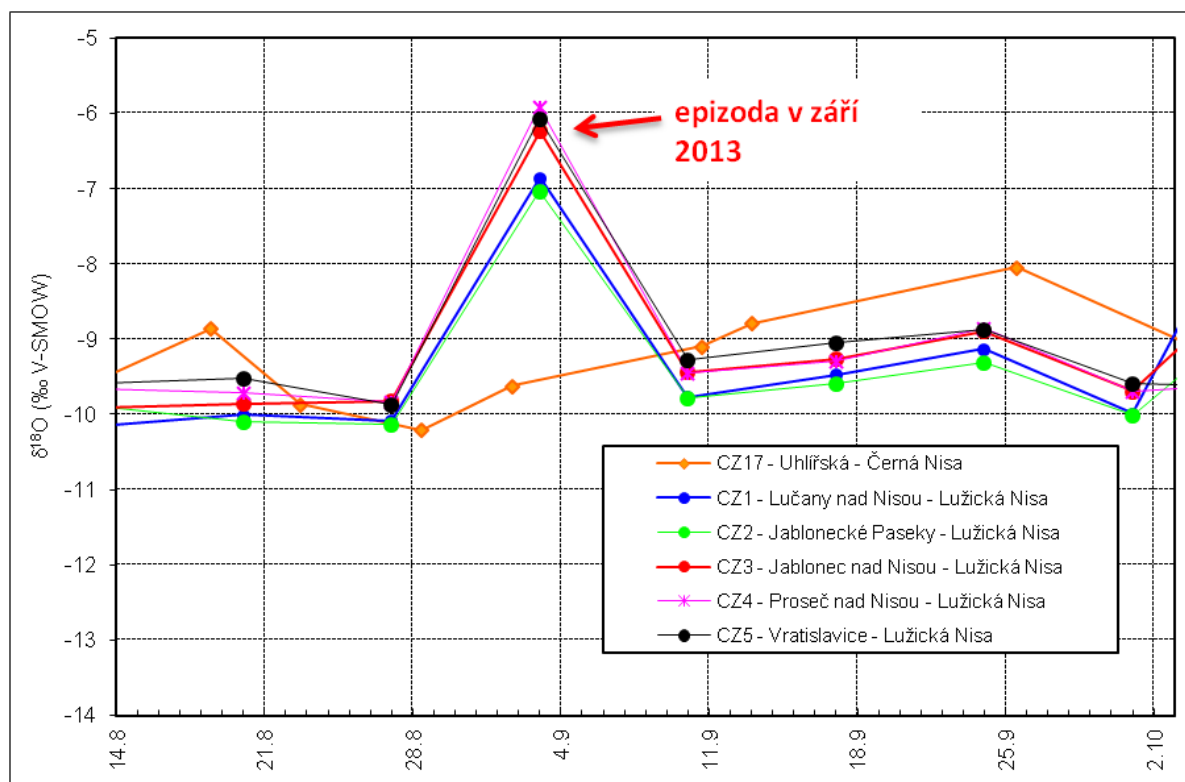


Obrázek 60 - směrodatná odchylka hodnot $\delta^{18}\text{O}$ v závislosti na hloubce odběru vzorku

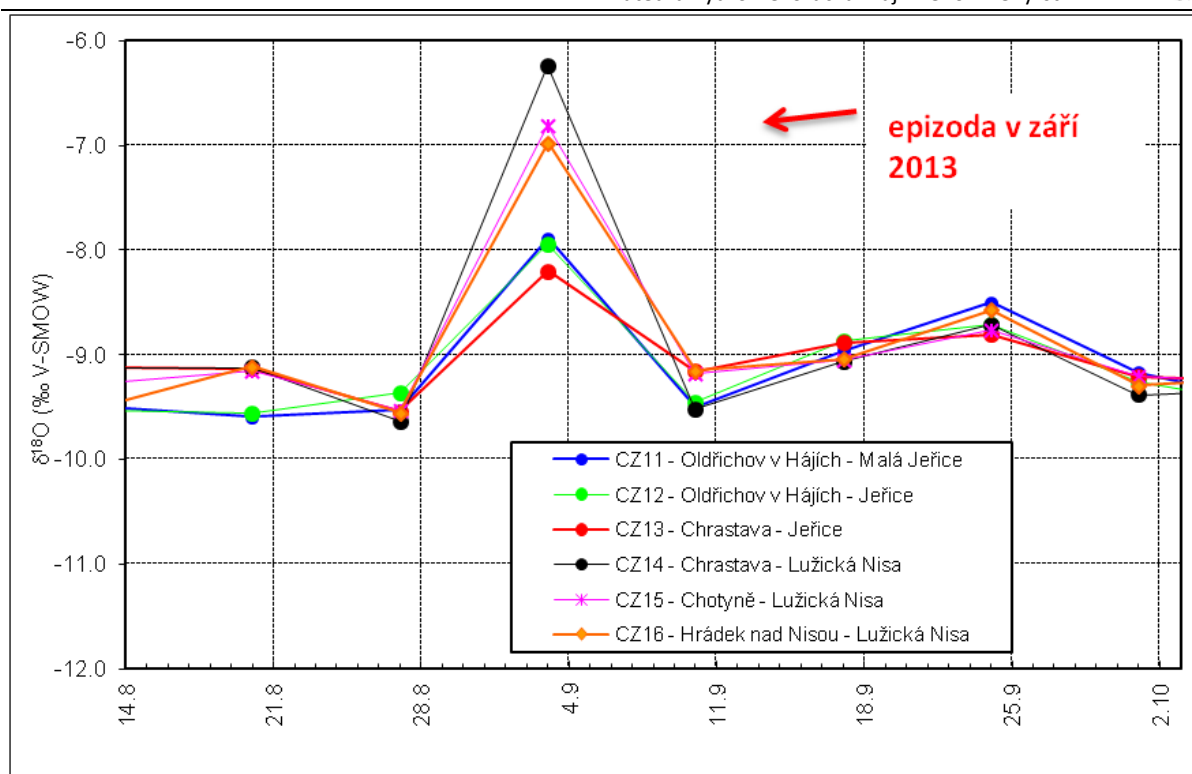


9 Aplikace výpočtu objemového podílu předrážkové (staré) vody v povrchovém odtoku ve všech profilech

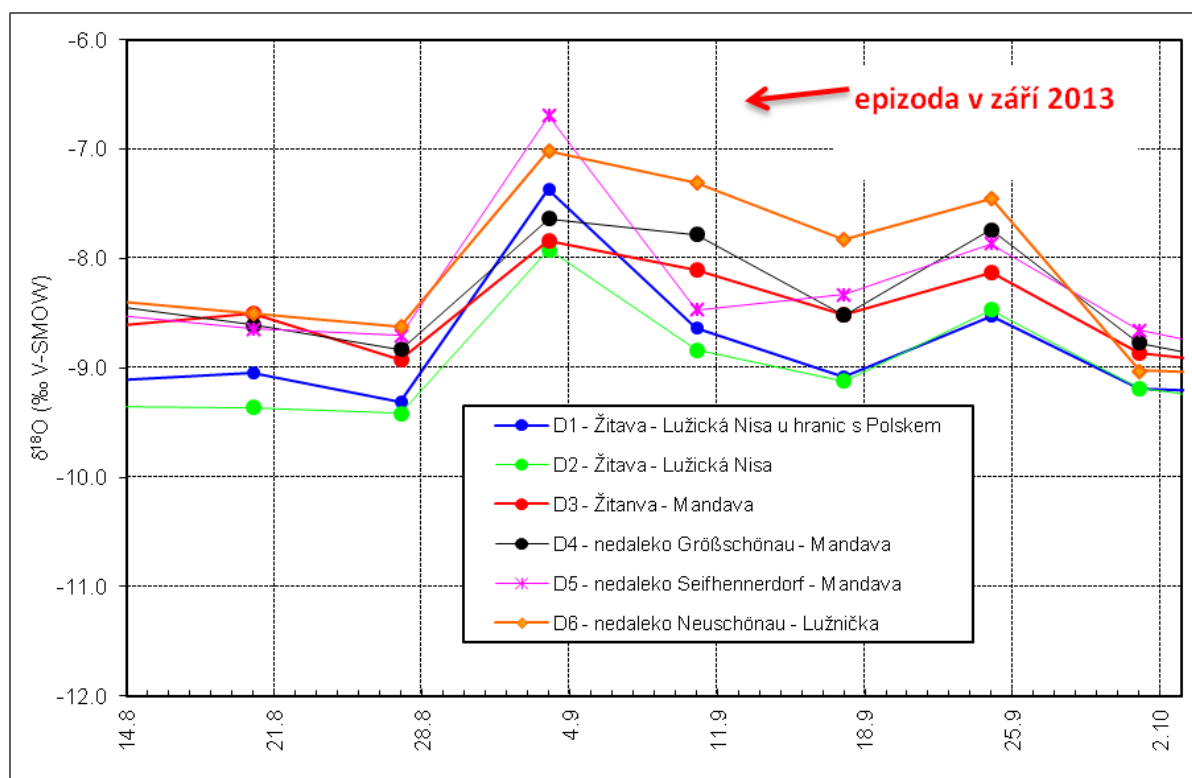
V září 2013 se vyskytla srážková epizoda, která vyvolala zvýšené průtoky (viz *Obrázek 64*, *Obrázek 65* a *Obrázek 66*) a zároveň se projevila i ve změně izotopového složení (viz *Obrázek 61*, *Obrázek 62* a *Obrázek 63*). Daná epizoda byla hlavním důvodem, aby bylo toto období vybráno pro výpočet objemového podílu staré vody v povodí, pro jehož stanovení je nezbytné, aby stará a nová voda v povodí měla rozdílné izotopové složení (viz kapitola 9 a 9.1).



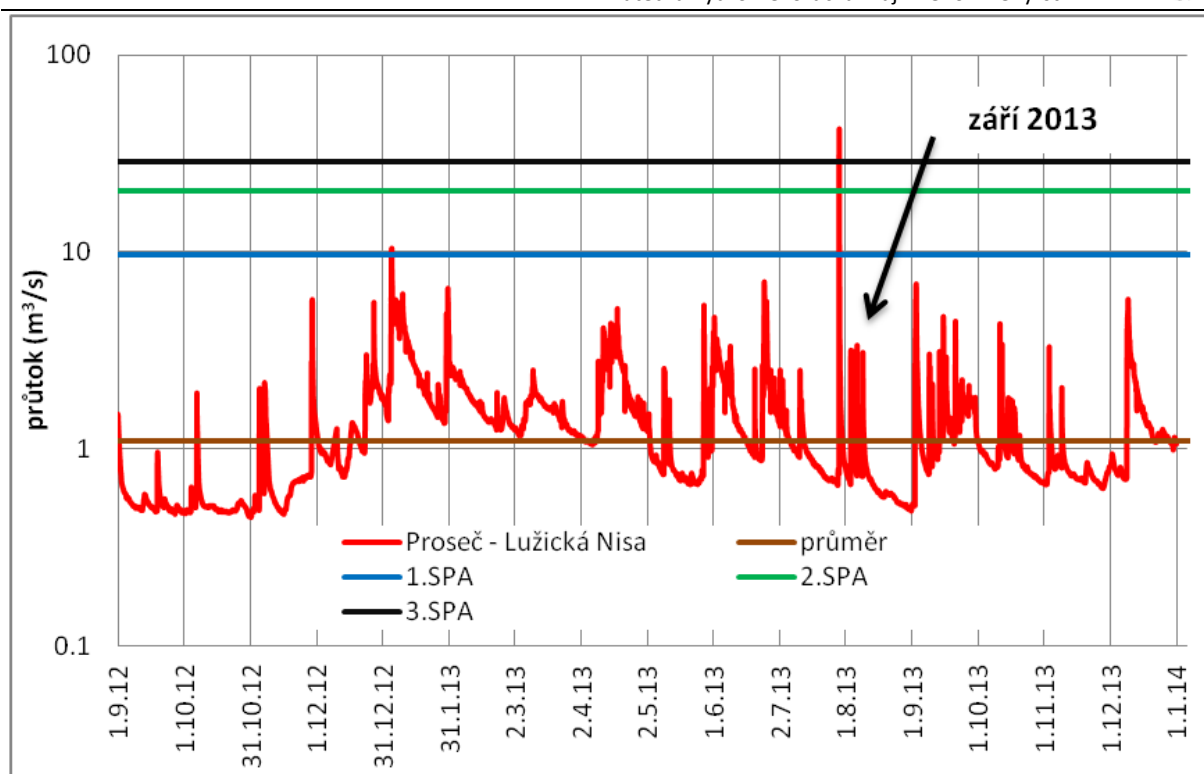
Obrázek 61 - izotopová epizoda v září 2013 na horním toku Lužické Nisy a na Černé Nise



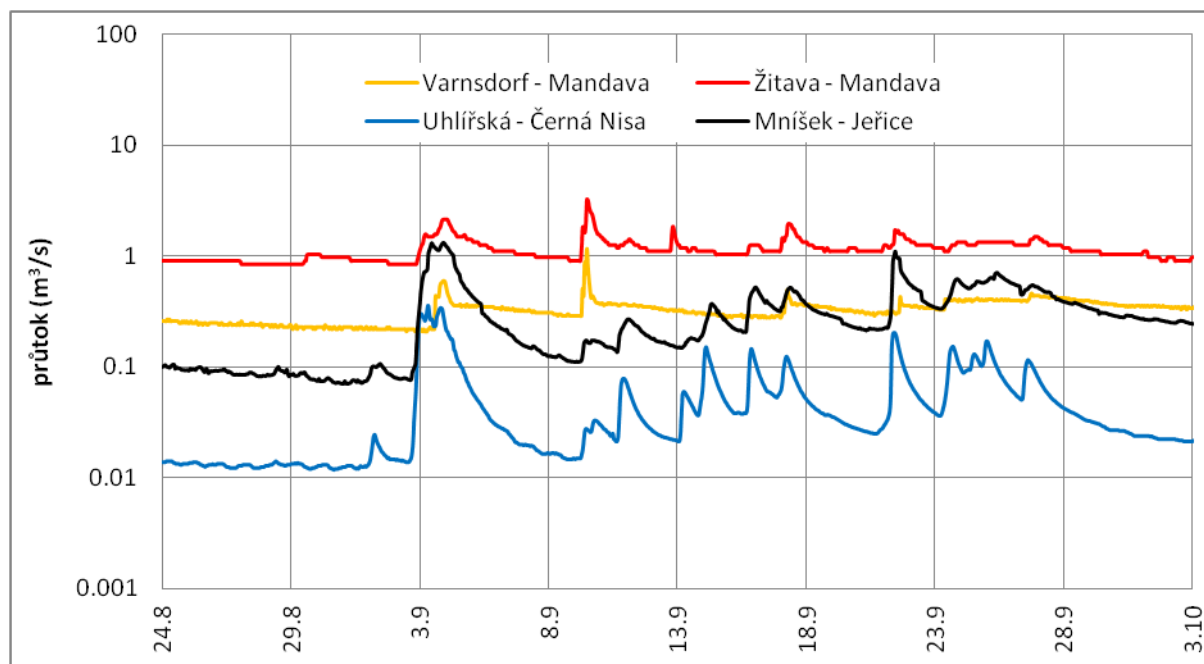
Obrázek 62 - izotopová epizoda v září 2013 na Jeřici, Malé Jeřici a Lužické Nise



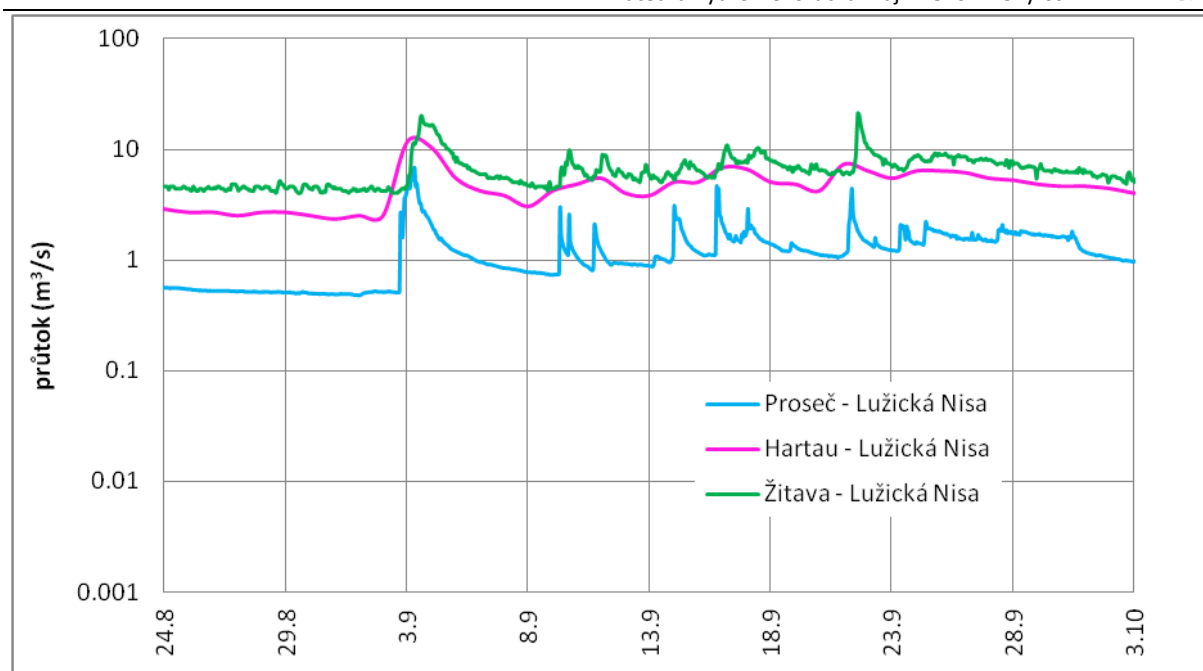
Obrázek 63 - izotopová epizoda v září 2013 na dolním toku Lužické Nisy, Mandavě a Lužičce



Obrázek 64 - průtoková epizoda v září 2013 v Proseči nad Nisou s vyznačenými SPA a průměrným ročním průtokem



Obrázek 65 - průtoková epizoda na přítocích Lužické Nisy v září 2013



Obrázek 66 - průtoková epizoda na Lužické Nise v září 2013

Podíl předsrážkové (staré) vody v odtoku byl stanovován v období 3. 9. 2013 – 24. 9. 2013, protože v tomto letním období izotopově těžkých srážek, byla ve všech srážkoměrných stanicích naměřena izotopově těžší srážka, která způsobila hydrologicky významný odtok z celého povodí Lužické Nisy, a to v celém regionu od malých horských přítoků po větší toky jako je Mandava nebo samotná Lužická Nisa (viz *Obrázek 65* a *Obrázek 66*).

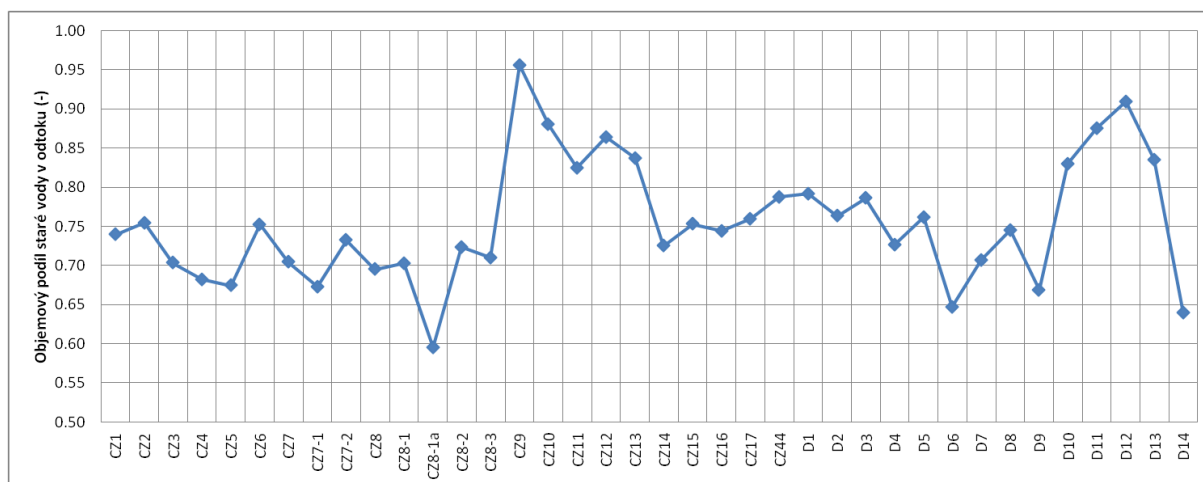
Izotopově odlišná srážka od dlouhodobých hodnot v odtoku je základním předpokladem pro separaci odtoku. Pro všechny výpočty R_s (viz rovnice 10, kapitola 2.4.4) byla jako výchozí srážka zvolena reprezentativní data naměřená v profilu CZ26 v Oldřichově, protože v této stanici jsou k dispozici úplná data. Obsah izotopu ve staré vodě byl uvažován jako povrchový odtok v daném profilu před srážkovou epizodou, tedy odtok zaznamenaný dne 27. 8. 2013. Pro zjednodušení byl obsah izotopu ve staré vodě po celý zkoumaný interval uvažován konstantní, neuvažoval se časový posun, tedy změna hodnoty obsahu izotopu ve staré vodě.

V každém profilu byly vypočteny podíly R_s pro jednotlivé dny měření. V profilech, u nichž chyběla některá z hodnot, byla tato hodnota dopočtena lineární interpolací. Ve všech profilech byla vyloučena hodnota koncentrace izotopu kyslíku ze dne 17. 9. 2013, protože srážka byla izotopově podobná povrchovému odtoku a nebylo tedy možné spolehlivě určit hodnotu R_s . Pro každý odběrný profil byl výsledně uvažován prostý průměr hodnot R_s , jelikož



jednotlivé srážkové úhrny v posuzovaných týdnech k odběrům vzorků jsou řádově srovnatelné.

9.1 Objemový podíl staré vody v odtoku v profilech CZ1-CZ17, CZ44 a D1-D14



Obrázek 67 - hodnoty objemového podílu staré vody v odtoku ve všech profilech povrchových vod

Objemový podíl staré vody v odtoku v profilech CZ1 a CZ2 nabývá podobných hodnot, protože oba profily leží na Lužické Nise blízko jejího pramene, ve vyšší nadmořské výšce a s malým procentem zastavěné plochy. Postupně po toku (profily CZ3, CZ4 a CZ5) klesá nadmořská výška a roste procento zastavěné oblasti, zřejmě proto se podíl staré vody v povrchovém odtoku snižuje.

V profilu CZ6 na Lužické Nise v centru Liberce došlo ke zvýšení R_s , v důsledku přítoku staré vody z nádrže Starý Harcov a přírodního zázemí tohoto přítoku. Podíl staré vody v odtoku v profilech CZ7, CZ8 a CZ8-1a (před ČOV v Liberci, za ní a nečištěná voda z ČOV) nabývá podobných hodnot a je nižší, protože se jedná o aktuální vodu, která se do toku dostává odtokem ze zastavěné plochy Liberce. V profilu CZ8-1 umístěném na výpusti z čistírny je podíl staré vody větší, zřejmě vlivem zásobování Liberce a Jablonce vodou z nádrží Josefův Důl a Souš. Hodnota R_s v korytě řeky po 20 a 50 metrech od výpusti z ČOV se zvýší v důsledku smíchání vody z předchozích profilů.

Povrchový odtok v profilech CZ7-1 a CZ7-2 vykazuje větší podíl staré vody v odtoku, protože se jedná o přítoky Lužické Nisy, a sice Františkovský a Jizerský potok, které mají přírodnější charakter.



Nejvyšší hodnoty R_s dosahují vzorky odebírané v profilu CZ9 na potoce vytékajícím z nádrže Fojtka, kde dochází k akumulaci aktuální vody a vypouštění vody starší.

Výrazně menším objemovým podílem staré vody v povrchovém odtoku se vyznačuje profil CZ8-1a, kde se do toku dostává nečištěná odpadní vody z odlehčovací komory, ve které se vyskytuje aktuální srážka.

Podíl staré vody v povrchovém odtoku na řece Malá Jeřice (CZ11) a Jeřice (CZ10, CZ12 a CZ13) je vyšší než v profilech umístěných na Lužické Nise (CZ14, CZ15 a CZ16), jež mají větší procento zastavěné plochy v povodí, vyskytují se v nižší nadmořské výšce a nemají tolik přírodní charakter.

Celkový průměrný objemový podíl staré vody v povrchovém odtoku v profilech CZ1 až CZ17 a CZ44 je 77 %. To znamená, že z aktuální srážky se do odtoku dostává jen 23 % vody. Z toho vyplývá, že i v povodňové situaci se do toku dostává především podzemní a půdní voda, která byla v povodí před srážkoodtokovou událostí a ovlivňuje tak kvalitu vody.

Podobnou hodnotu nižšího objemového podílu staré vody v odtoku vykazují profily D6 a D14, které se nachází na řece Lužnička, jež je pravostranným přítokem Mandavy. Lužnička je poměrně krátká a nemá téměř žádné vlastní přítoky, tudíž nemá možnost se výrazně mísit se starou podzemní vodou. Profil D14 se nachází v Dolním Podluží, tedy na horním toku řeky, jehož okolí je tvořeno zamokřenými, místy silně podmáčenými loukami. Z geologického hlediska se jedná o žulový masiv s vysokou hladinou podzemní vody a pravděpodobně mělkou zvodní.

Profily D8 a D9 leží na řece Landwasser, profil D9 sice leží ve větší nadmořské výšce než profil D8, ale je více ovlivněný zástavbou, proto se zřejmě do toku dostává aktuální vody, a podíl staré vody v odtoku je tak menší než v profilu D8.

Velké zastoupení staré vody v odtoku lze pozorovat v profilu D11, který se nachází na řece Goldbach, jež pramení v horách, a je tedy ovlivněna podzemní vodou. Největší objemový podíl staré vody se vyskytuje v profilu D12, kde se projevuje vliv akumulované vody vytékající z jezera Olbersdorfer See. Vysoký podíl staré vody v odtoku vykazuje také povrchový odtok v profilu D13, který leží na horním toku Mandavy, ještě před vtokem do zastavěné oblasti Rumburka, proto je ještě více ovlivněn podzemní vodou než odtokem ze zastavěné plochy města.

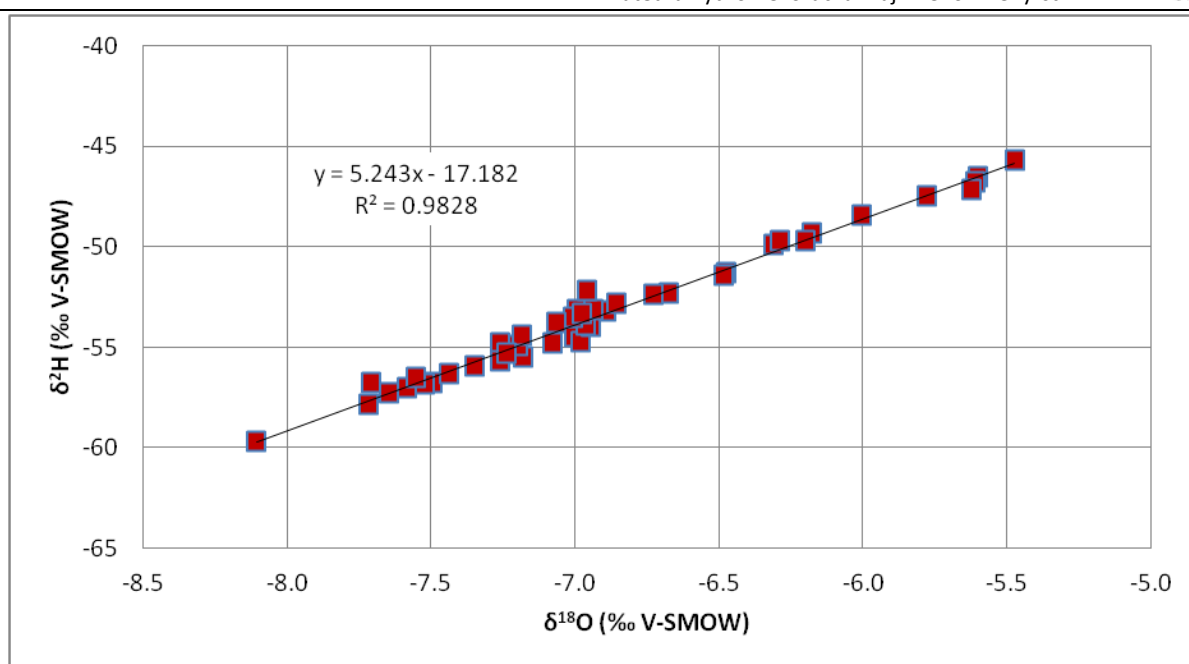


10 Aplikace globální a lokální meteorické čáry vody

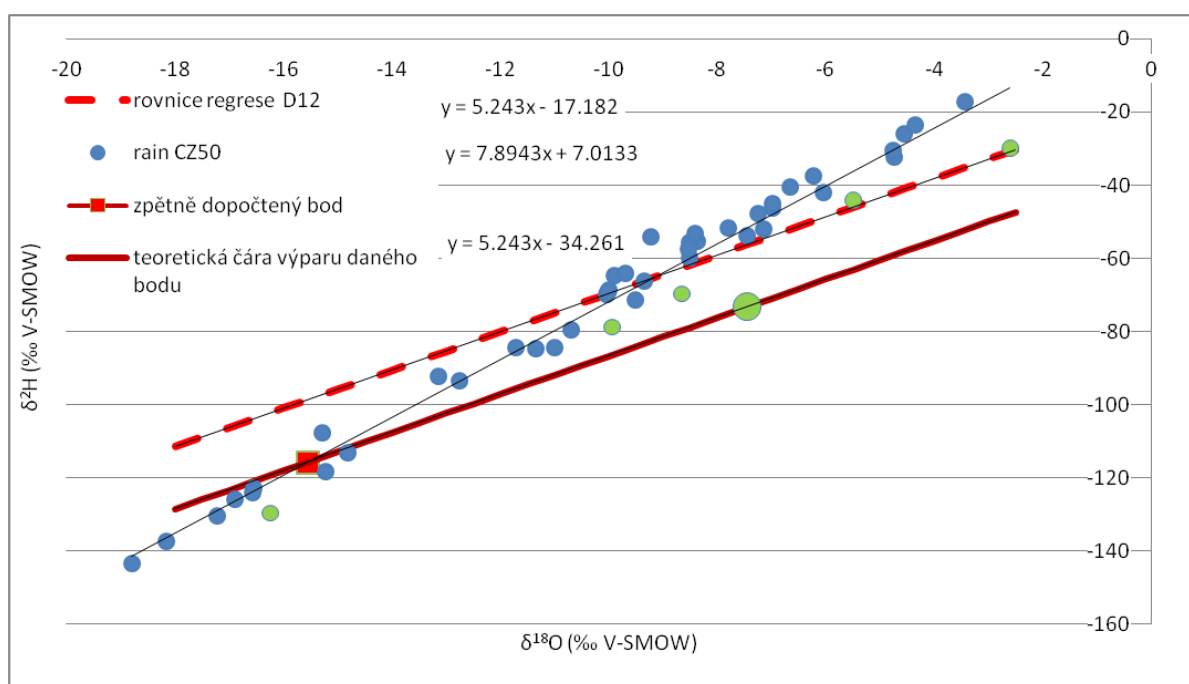
10.1 Doplnění hodnot vypařovaných vzorků

Při odpařování vody dochází v nepatrně větší míře k evaporaci lehčích molekul vody, proto v kapalném stavu zdroje vody (např. nádoba, nádrž), narůstá podíl těžších molekul. Koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ roste, nikoliv však podle globální meteorické čáry. Koncentrace se kvůli větší atomové hmotnosti ve větší míře zvyšuje u molekul vody s ^{18}O než u molekul vody s ^2H , tudíž klesá hodnota deuteriového přebytku. Proto byla u všech dat meteorické vody, tj. srážek vyloučena ta měření, při nichž hodnota deuteriového přebytku nepřesáhla hodnotu vyšší než 3, jako dostatečně zřejmá hodnota, kdy jsou srážky ovlivněny druhotným výparem, tj. nesprávným uchováním před jejich sběrem. U těchto vzorků se předpokládá odpařování a tudíž nepůvodní hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$.

Vyloučené hodnoty byly následně nahrazeny dopočtenou hodnotou. Ta byla stanovena pomocí rovnice lokální meteorické čáry v profilu D12 ($y = 5.243x - 17.182$; viz *Obrázek 68*), kde se nachází jezero Olbersdorfer See a předpokládá se zde výpar. Při náhradě se jedná o přibližně podobný proces výparu v regionu Nisy. U ostatních vzorků s vyloučenými hodnotami byly rovněž určeny lokální meteorické čáry a chybějící hodnoty byly dopočteny jako průsečík této lokální meteorické čáry a čáry výparu, na které se pravděpodobně vypařovaný vzorek „vyskytuje“. Vzhledem ke vzdálenosti od referenčního místa výparu (D12) a různým nadmořským výškám profilů, v nichž jsou data dopočítávána, je zřejmé, že se jedná pouze o přibližné nahrazení dat a zjednodušenou metodu nezohledňující ostatní faktory. Data byla doplněna, aby se využilo všech měření. Vyloučená (odpařená) data byla v grafech odlišena zelenou barvou (viz *Obrázek 69*). Na tomto grafu lze vidět příklad dopočtení nepůvodních hodnot, kde velký zelený bod značí konkrétní odpařený vzorek a velký červený bod značí jeho dopočtený průmět do původních dat.



Obrázek 68 - lokální meteorická čára vody v profilu D12



Obrázek 69 – průmět vypařeného vzorku do původních dat (př. profil D12 a rainD50)

10.1.1 Vliv použití přibližné náhrady dat na jejich statistické rozložení v box plotu na příkladu půdní vody z žitavského lyzimetru v profilu D19

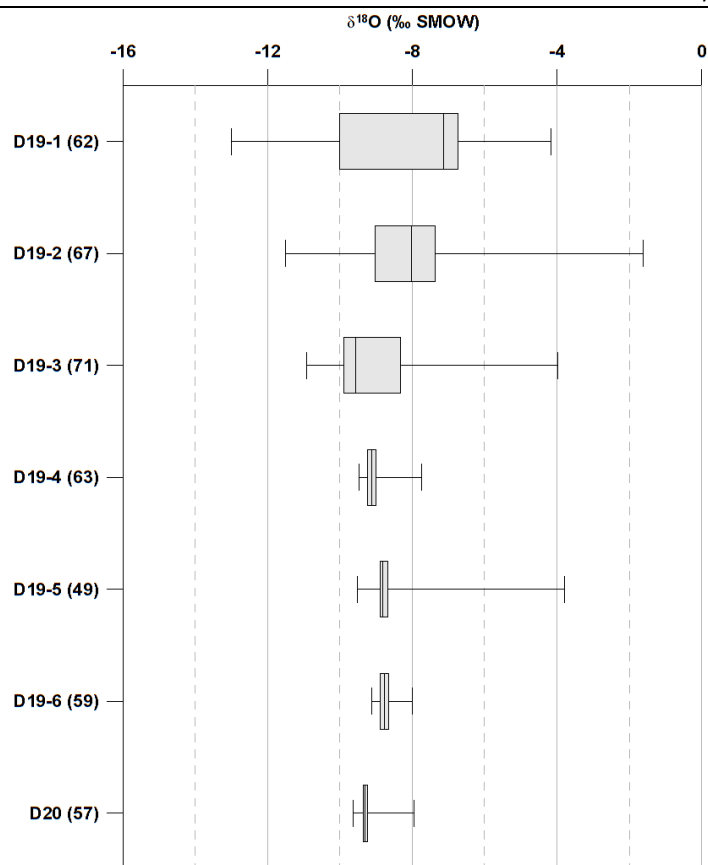
Metoda náhrady odpařených vzorků pomocí lokální meteorické čáry vody je pouze metoda přibližná. Z hodnot deuteriového přebytku lze přibližně stanovit hranici mezi odpařenými a neodpařenými vzorky. Pro porovnání, zda je lepší hodnoty relativní



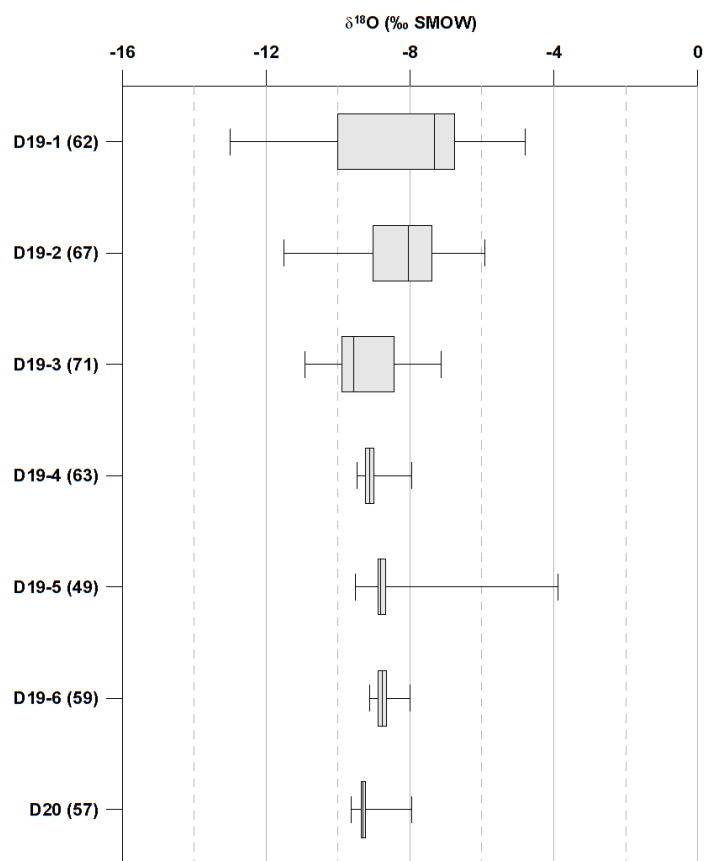
koncentrace izotopu vodíku a kyslíku u odpařených vzorků z následujících výpočtů vyloučit nebo přibližně nahradit, slouží následující box ploty (viz *Obrázek 70*, *Obrázek 71* a *Obrázek 72*). Ty byly vytvořeny pro půdní vodu odebíranou v žitavském lyzimetru (profily D19) a pro doplnění je znázorněna i neodpařovaná podzemní voda (profil D20). Deuteriový přebytek ve vzorcích odebíraných v lyzimetru nabývá záporných hodnot, a to především ve vzorcích z hloubek 50 cm (D19-2), 100 cm (D19-3) a 200 cm (D19-5).

Jestliže data pouze odstraníme, odstraníme tím extrémní hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, ale vzhledem k tomu, že je odstraníme ze souboru dat, narušíme tím i statistické rozložení. V uvedeném případě se například u profilu D19-1 zvětší mezikvartilové rozpětí téměř o dvě jednotky (viz *Obrázek 72*). Extrémní hodnota je pak nahrazena nejbližší hodnotou ze zbylých dat v souboru, přičemž se tyto hodnoty mohou výrazně lišit. Například data $\delta^{18}\text{O}$ pro profil D19-2 má v původních datech izotopově nejtěžší vzorek hodnotu $\delta^{18}\text{O} = -1,62 \text{ ‰}$, při náhradě pomocí LMWL se koncentrace zmenší na $-5,92 \text{ ‰}$, ale při pouhém vyloučení dat dojde ke zmenšení koncentrace až na $-7,02 \text{ ‰}$.

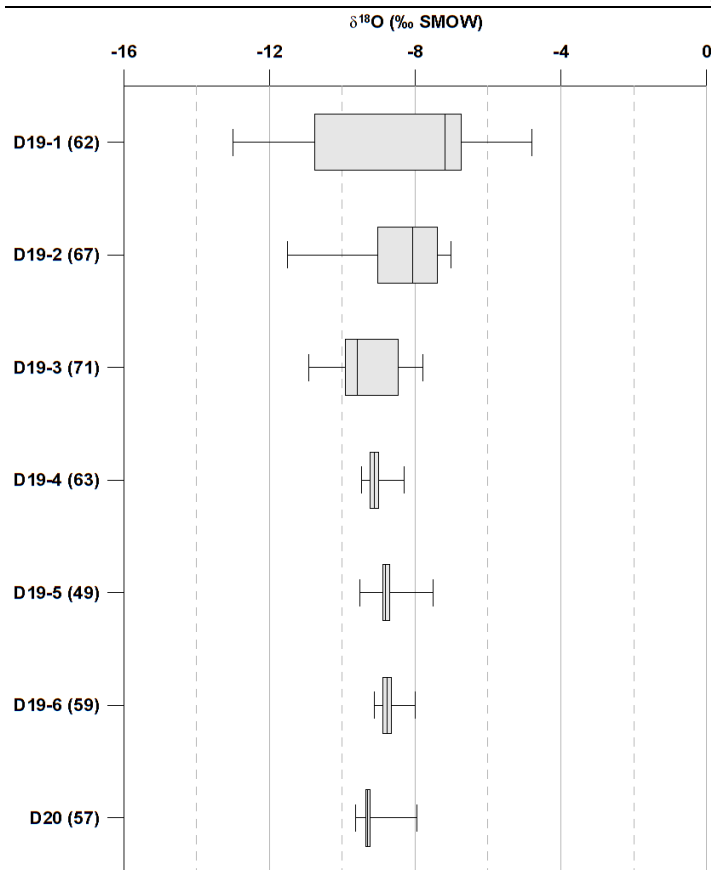
Na druhou stranu je nutné brát v úvahu, že i při použití náhrady pomocí LMWL, pomocí níž zůstává plný soubor dat pro analýzu, se jedná jen o matematickou operaci, která může mít z fyzikálního hlediska nedostatky. Takový případ lze vidět na box plotu, který vykresluje data, v nichž byly hodnoty odpařených vzorků nahrazeny (viz *Obrázek 71*). Konkrétně se jedná o profil D19-5, kde se při dopočítání $\delta^{18}\text{O}$ hodnota zmenšila jen o $0,08 \text{ ‰}$, protože LMWL v tomto profilu má téměř shodnou sklonitost jako LMWL v profilu D20, který se používá pro dopočet. Zde je patrné, že by hodnota relativní koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ měla být výrazně nižší, protože s postupující hloubkou by se mělo mezikvartilové rozpětí zmenšovat vlivem mísení vod z různých sezón, tj. maxima koncentrace by se měly snižovat, nikoliv zvyšovat.



Obrázek 70 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - naměřené hodnoty



Obrázek 71 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - opravené hodnoty



Obrázek 72 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - vyloučené hodnoty

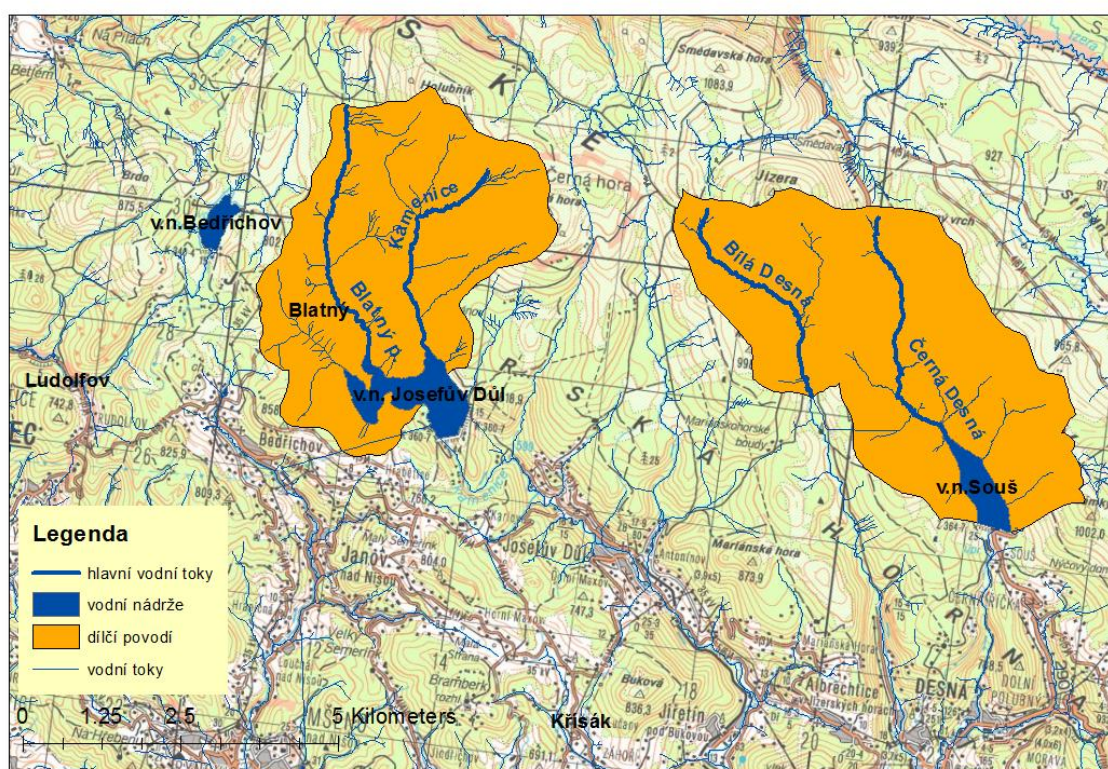
10.2 Sklonitost lokální meteorické čáry vody

U všech profilů povrchových vod byla stanovena rovnice lokální meteorické čáry vody v podobě $y = a \cdot x + b$, přičemž hodnoty a a b byly vyneseny do následujících grafů (viz Obrázek 74 – Lužická Nisa a Obrázek 75 – ostatní přítoky v povodí Lužické Nisy). Koeficient a ovlivňuje sklon lokální meteorické čáry vody a koeficient b ji posouvá ve směru osy y .

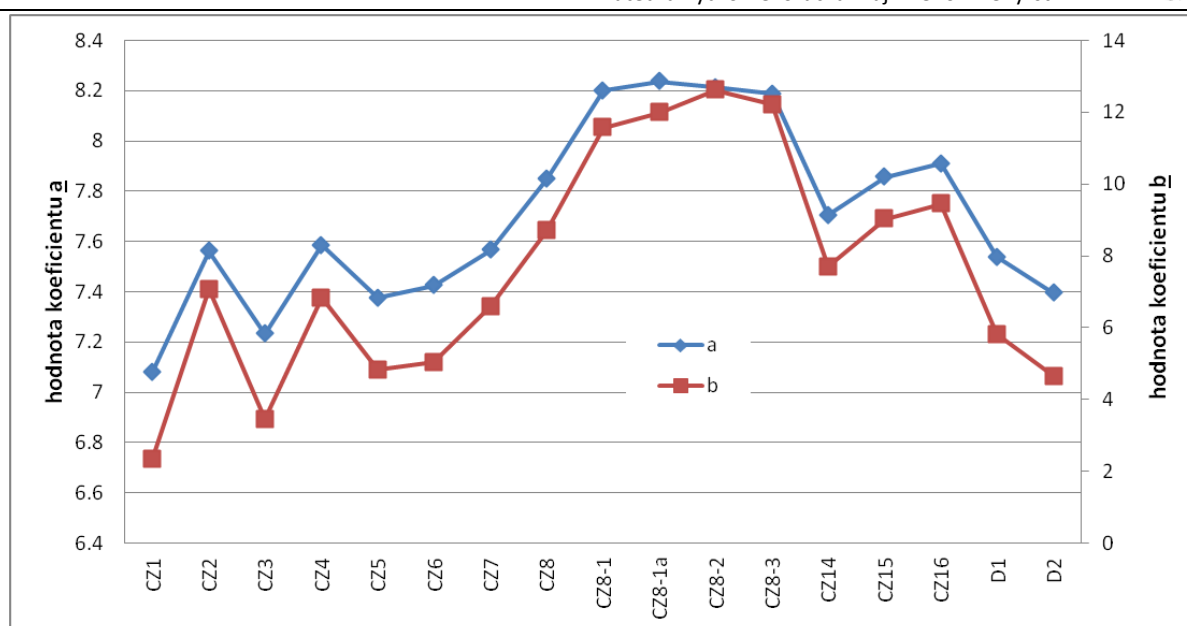
Čím vyšších hodnot koeficient a dosahuje, tím větší svírá úhel s osou x a dochází tedy ke kondenzaci ve vyšších nadmořských výškách, eventuálně dochází k menšímu výparu vypadlých srážek. Obrázek 74 ukazuje, že nejvyšších sklonů dosahuje voda v centru Liberce vytékající z ČOV, kde se do toku dostává voda z nádrže Josefův Důl a Souš, které slouží pro zásobování vodou Liberce a Jablonce nad Nisou. Tyto nádrže spadají do povodí Labe a voda v nich pochází z větších nadmořských výšek (Černá Hora – 1085 m n. m., Holubník – 1071 m n. m., Ptačí kupy – 1013 m n. m., Jizera – 1122 m n. m.), než voda pramenící v povodí Nisy. Dílčí povodí jsou zobrazena na níže uvedeném obrázku (viz Obrázek 73). Povodí, která přísluší k vodní nádrži Souš, jsou povodí Černé Desné a Bílé Desné, částečně převáděné do nádrže Souš s celkovou plochou povodí 19,78 km² a průměrnou nadmořskou výškou povodí



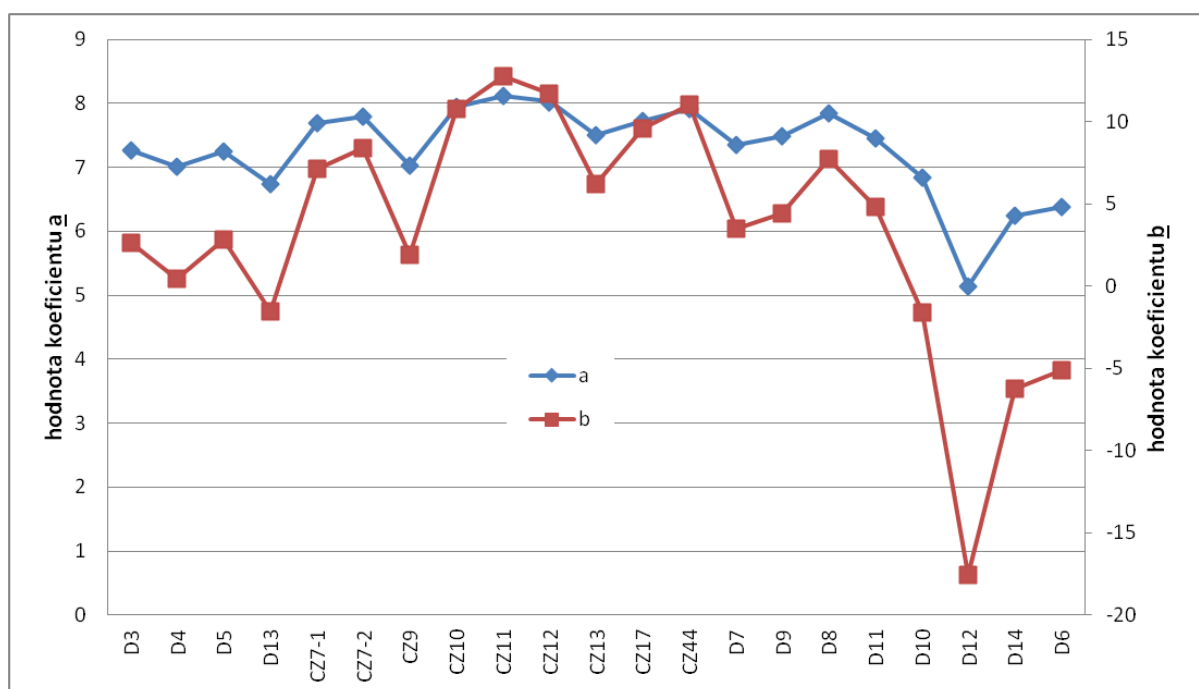
886,5 m n. m. Povrchová voda tekoucí do Josefova Dolu zahrnuje povodí Blatného potoka a horního toku řeky Kamenice, tato dvě povodí čítají plochu 17,03 km² a průměrnou nadmořskou výšku 836,4 m n. m. Při porovnání těchto hodnot s průměrnou nadmořskou výškou dílčí povodí Lužické Nisy za ČOV, která dosahuje hodnoty 528,3 m n. m., je patrný značný výškový rozdíl těchto povodí, a proto zde lze pozorovat i změnu ve sklonitosti LMWL. Naopak malý sklon vykazuje zejména profil D12, který se nachází na výtoku z jezera Olbersdorfer See, kde dochází k velkému výparu. Stejný jev lze v menší míře pozorovat i v profilu CZ9, který vytéká z nádrže Fojtka (viz *Obrázek 75*).



Obrázek 73 - dílčí povodí patřící k vodní nádrži Josefov Důl a Souš



Obrázek 74 - koeficienty a a b v rovnici LMWL na řece Lužická Nisa

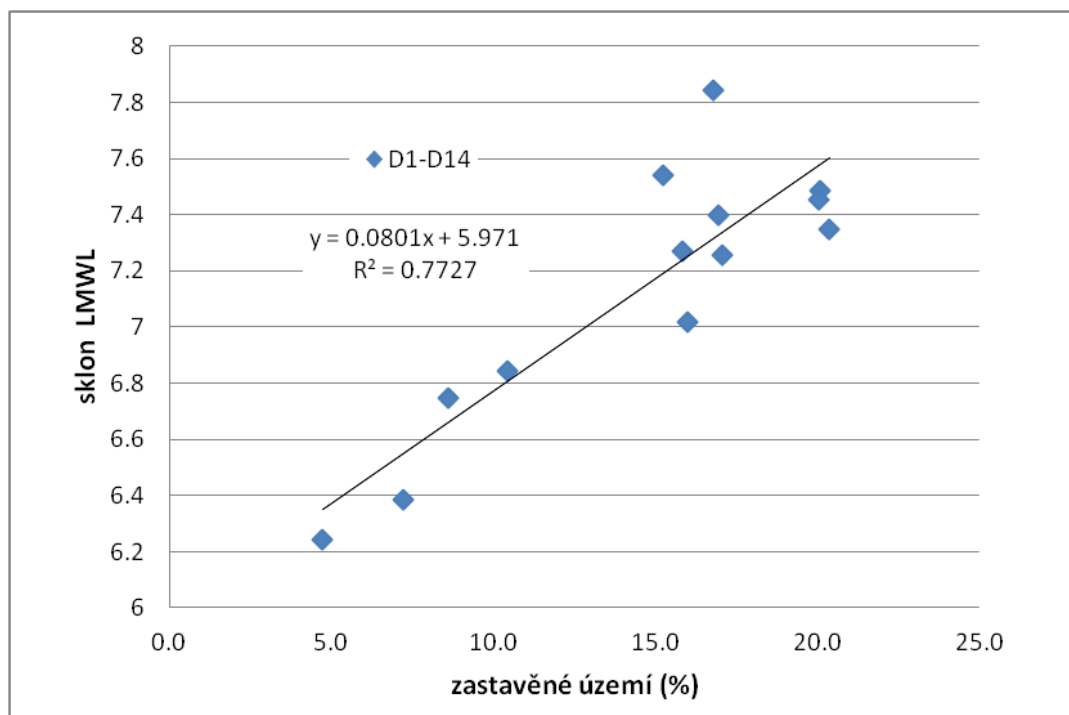


Obrázek 75 - koeficienty a a b v rovnici LMWL ostatních přítoků v povodí Lužické Nisy

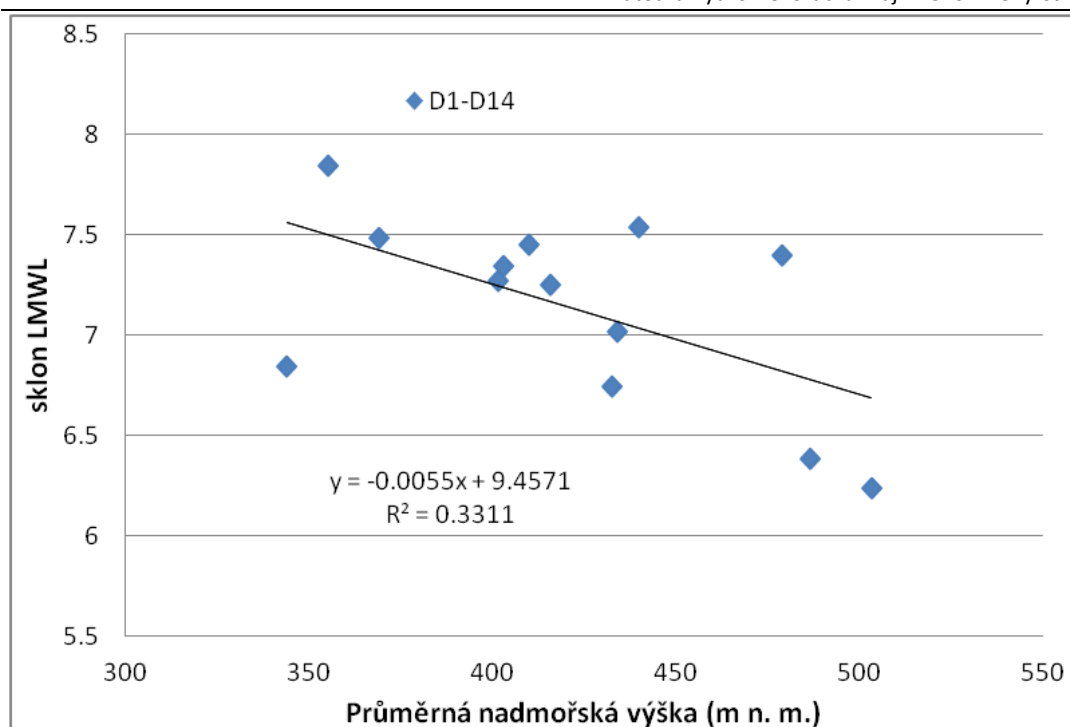
Obecná zákonitost mezi sklonem lokální meteorické čáry vody a ostatními parametry nebyla zjištěna, avšak na německé straně zájmového území se objevila relativně vysoká míra závislosti (s hodnotou koeficientu determinace $R^2 = 0,77$) mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území, kdy s rostoucím podílem zastavěného území roste i sklon LMWL (viz Obrázek 76). Rovněž byla zjištěna velmi nízká závislost sklonu LMWL na průměrné nadmořské výšce povodí (viz Obrázek 77). Na německé straně je pravděpodobně závislost



patrná, protože má jednotnější nadmořskou výšku, a sice v rozmezí 344,134 až 486,847 m n. m. Na rozdíl od české strany, kde se hodnoty průměrné nadmořské výšky dílčího povodí pohybují od 456,033 m n. m. do 828,153 m n. m (resp. až 1122 m n. m. uvažujeme-li i převáděné vody z nádrží Josefův Důl a Souš). Směrodatná odchylka průměrné nadmořské výšky dílčích povodí v Německu je rovna 42,6 m n. m., a je tedy téměř poloviční než na české straně zájmového území, kde směrodatná odchylka nabývá hodnoty 86,4 m n. m (bez vodárenských nádrží).

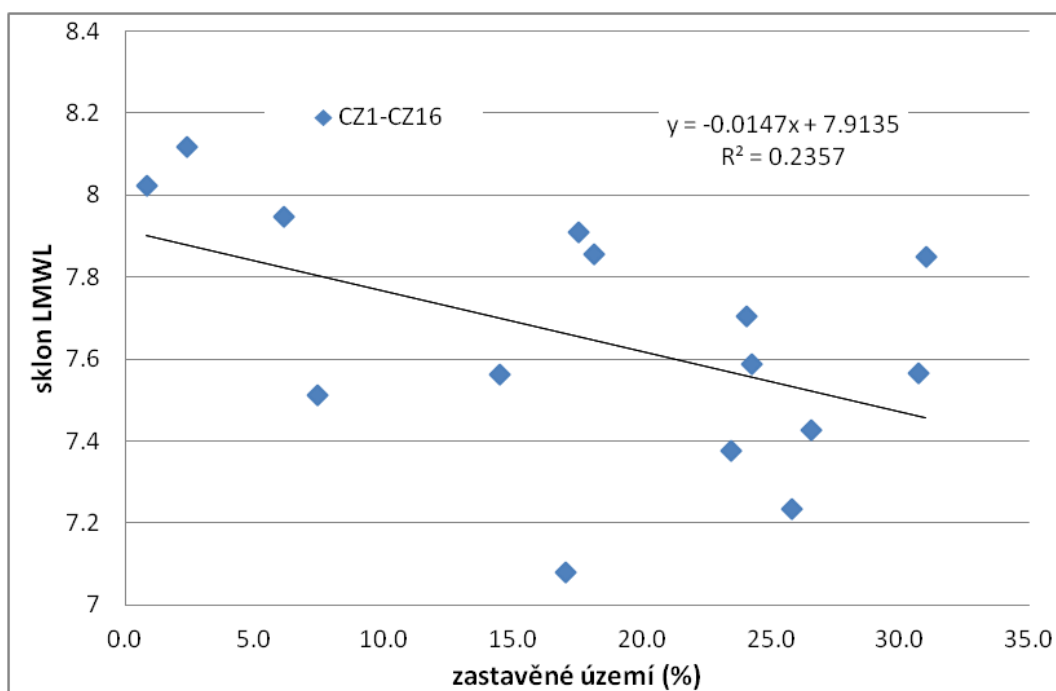


Obrázek 76 - vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území na německé straně

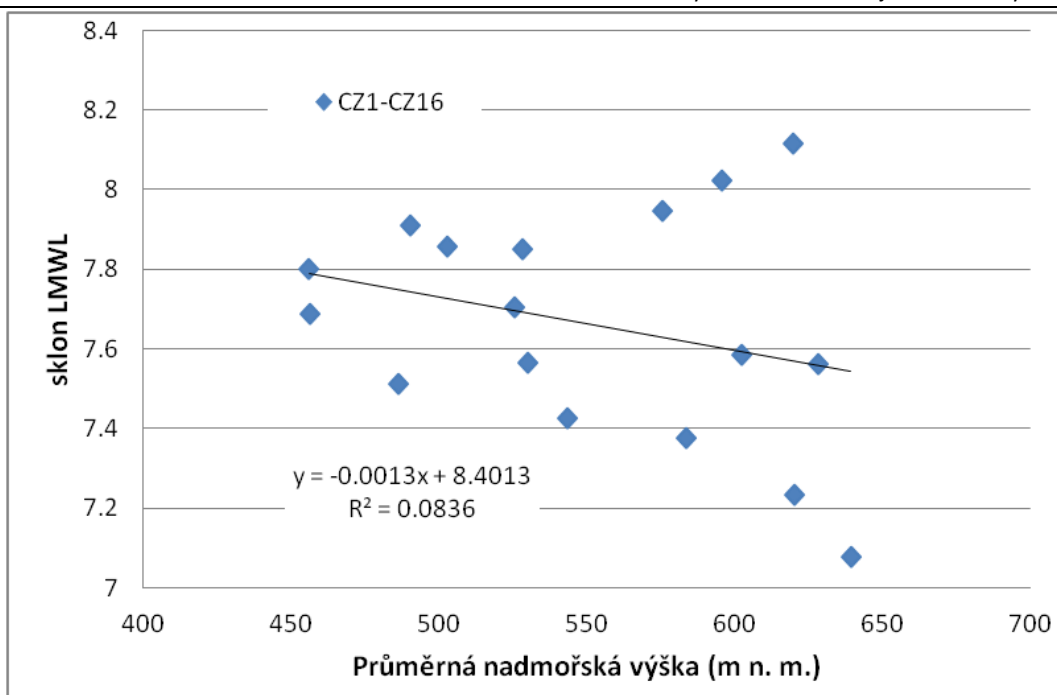


Obrázek 77 - vztah mezi sklonem LMWL a průměrnou nadmořskou výškou na německé straně

Na české straně byl zjištěn vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území, ovšem s velmi malým koeficientem determinace a na rozdíl od německé strany se jedná o nepřímou úměru (viz Obrázek 78). Vztah mezi sklonem LMWL a průměrnou nadmořskou výškou povodí byl na české straně vyloučen (viz Obrázek 79).



Obrázek 78 - vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území na české straně



Obrázek 79 - vztah mezi sklonem LMWL a průměrnou nadmořskou výškou na české straně

Vzhledem k relativně velké míře koeficientu determinace, kterou vykazuje regresní rovnice vyjadřující vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území na německé straně, není vyloučeno, že zde nějaký vztah vyskytuje, avšak zřejmě závisí na více faktorech a byla by pro další závěry potřeba multikriteriální analýza.



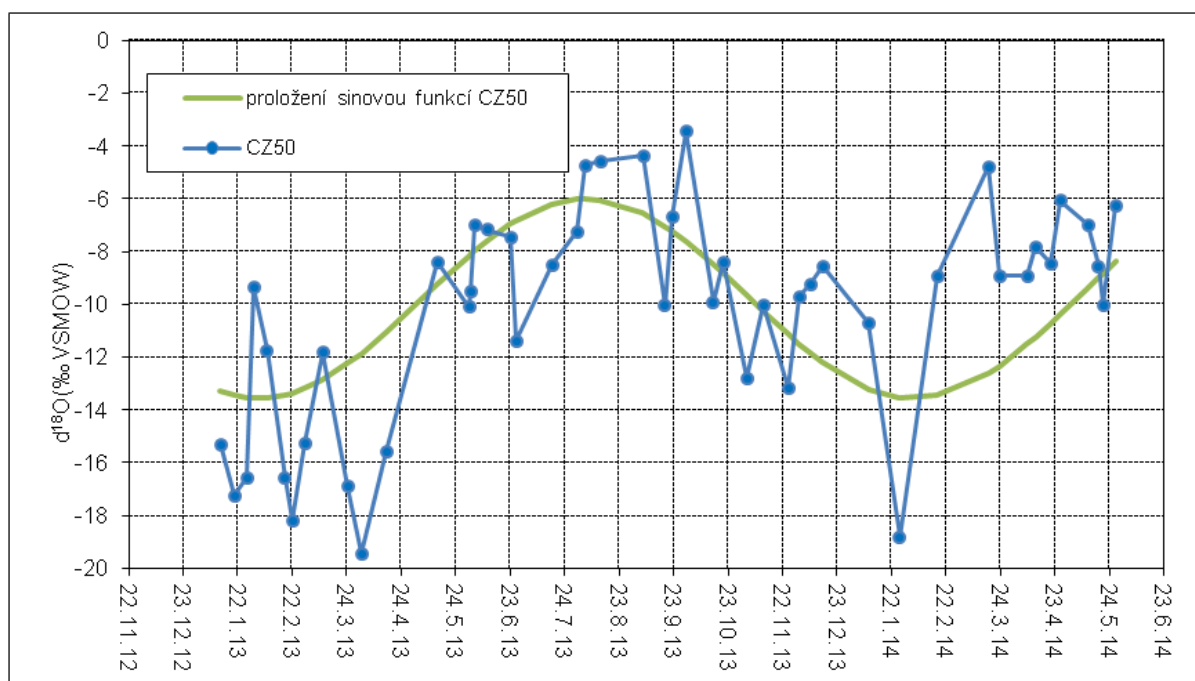
11 Prokládání dat sinovou funkcí – stanovení průměrné doby zdržení vody v povodí

Všemi měřenými daty v jednotlivých profilech byla proložena sinová funkce metodou nejmenších čtverců, tzn., že byly hledány takové hodnoty koeficientů sinové funkce, aby součet čtverců, tedy rozdílů od měřených hodnot, byl co nejmenší. Proložení dat sinovou funkcí ukazuje, že sledované procesy vykazují určité periodické opakování. Z výsledného předpisu funkce je možné získat velikost výchylky, tedy střední hodnoty, amplitudy a fáze.

11.1 Srážky a povrchové odtoky

Srážky byly měřené v týdenních intervalech v pěti odběrných místech (CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15). Po vyloučení a nahrazení nepřesných měření byla data proložena sinovou funkcí.

Proložení naměřených hodnot koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ sinovou funkcí u všech srážkoměrných profilů potvrzuje, že v létě přichází pravidelně srážka izotopově těžší, naopak v zimě izotopově lehčí, viz *Obrázek 80*, kde je tento jev uveden na příkladu dat z profilu CZ50.

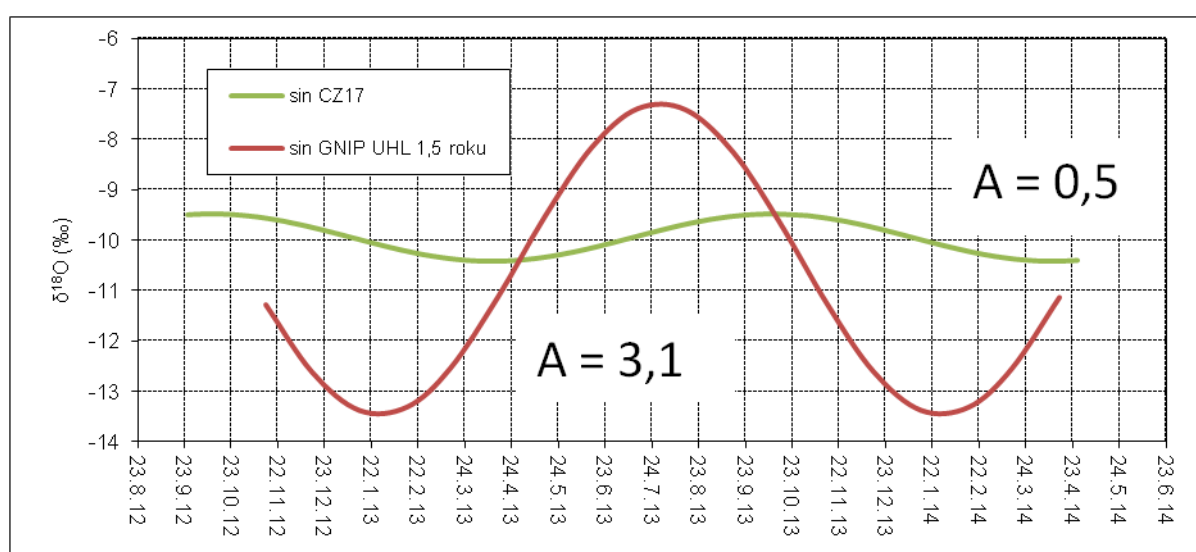


Obrázek 80 - proložení srážek v profilu CZ50 sinovou funkcí

Nejpatrnější odlišnost lze pozorovat v útlumu amplitudy proložené sinové funkce mezi srážkami a povrchovými odtoky. Střední hodnota koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ se u srážkové vody i vody



v povrchovém odtoku pohybuje řádově v podobných hodnotách (průměrná hodnota $\delta^{18}\text{O}$ srážek měřených v profilech CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15 je $\delta^{18}\text{O} = -9,87 \text{ ‰}$ a odtoku měřeného v profilech CZ1 - CZ17, CZ44 a D1 - D14 je $\delta^{18}\text{O} = -9,43 \text{ ‰}$). Velký rozdíl je ale v amplitudách proložených sinových funkcí, které jsou u srážek až desetinásobně větší než u povrchového odtoku (průměrná hodnota amplitudy proložené sinové funkce ve výše zmíněných profilech je u srážek je $3,17 \text{ ‰}$ a u odtoku $0,43 \text{ ‰}$). Rozdílnou velikost amplitud proložených sinových funkcí lze vidět na níže uvedeném obrázku (viz *Obrázek 81*), kde jsou porovnávány amplitudy sinových funkcí proložených hodnotami $\delta^{18}\text{O}$ získanými ze srážek v profilu GNIP UHL a povrchového odtoku v profilu CZ17.

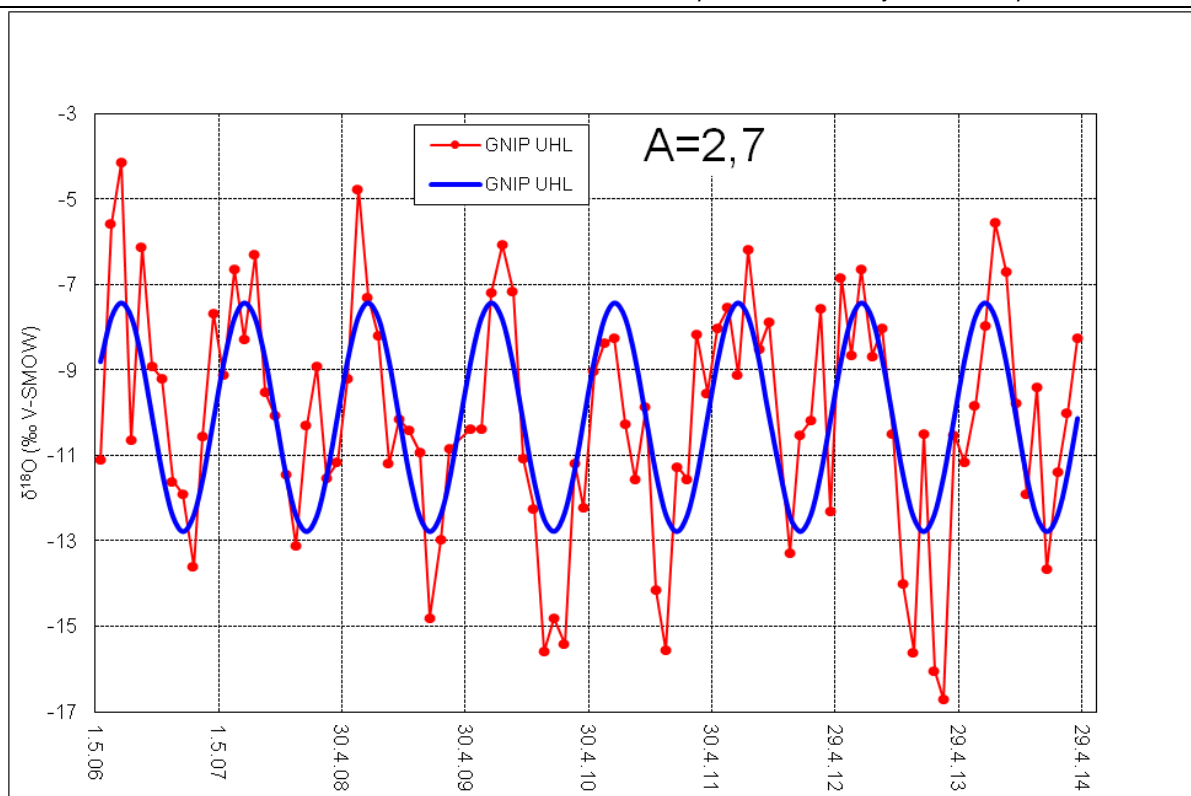


Obrázek 81 - Porovnání velikosti amplitud srážek (GNIP UHL) a povrchového odtoku (CZ17)

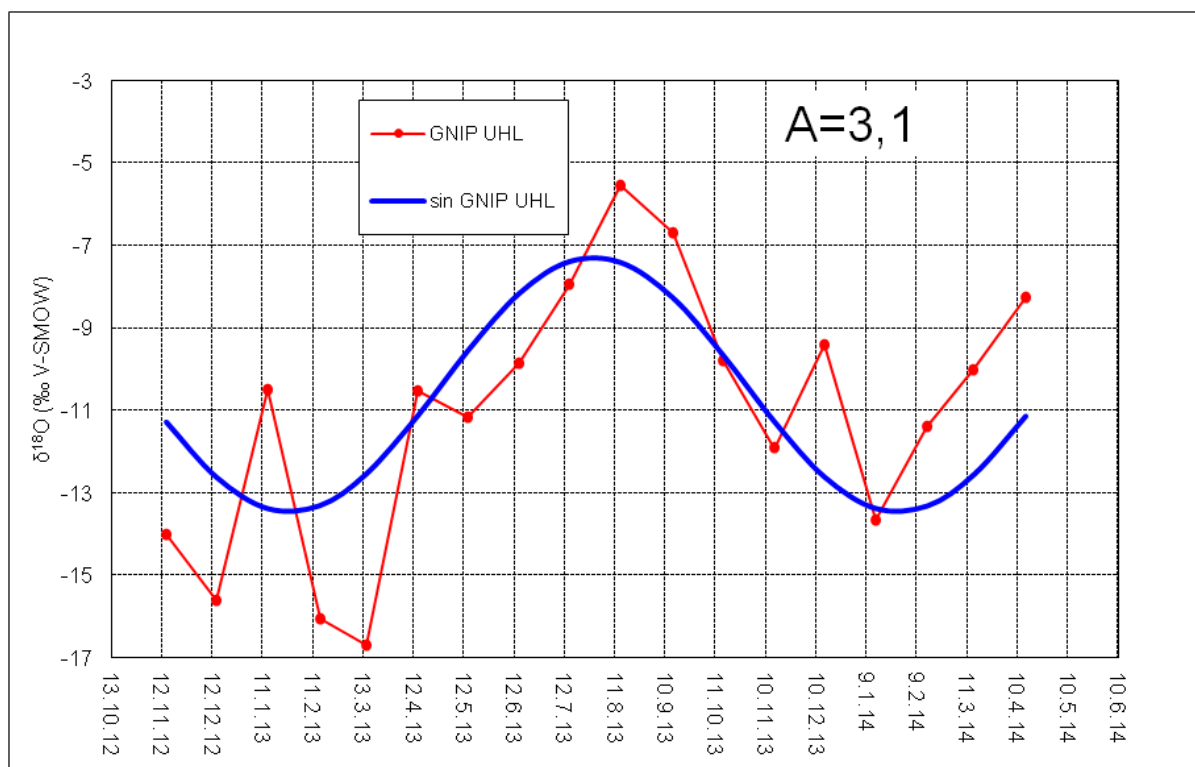
11.1.1 Vliv doby měření

Na výsledné hodnoty sinové funkce má vliv také délka období odebrání vzorků. Prokládá-li se sinová funkce stejnými hodnotami za různý časový interval, dostáváme rozdílné výsledky.

Například vzorky srážek GNIP UHL byly odebrány v měsíčních intervalech. Sinová funkce byla proložena jednak hodnotami měřenými v průběhu osmi let (15. 5. 2006 - 15. 4. 2014), jednak v krátkodobém intervalu 1,5 roku (15. 11. 2012 - 15. 4. 2014). Periodicitu lze sledovat krátkodobou i dlouhodobou, liší se velikostí amplitud, přičemž při intervalu 1,5 roku je amplituda větší, protože je více ovlivněna časově lokálními extrémy (viz *Obrázek 82* a *Obrázek 83*).



Obrázek 82 - sinová funkce a její amplituda proložená daty za 8 let (GNIP UHL)



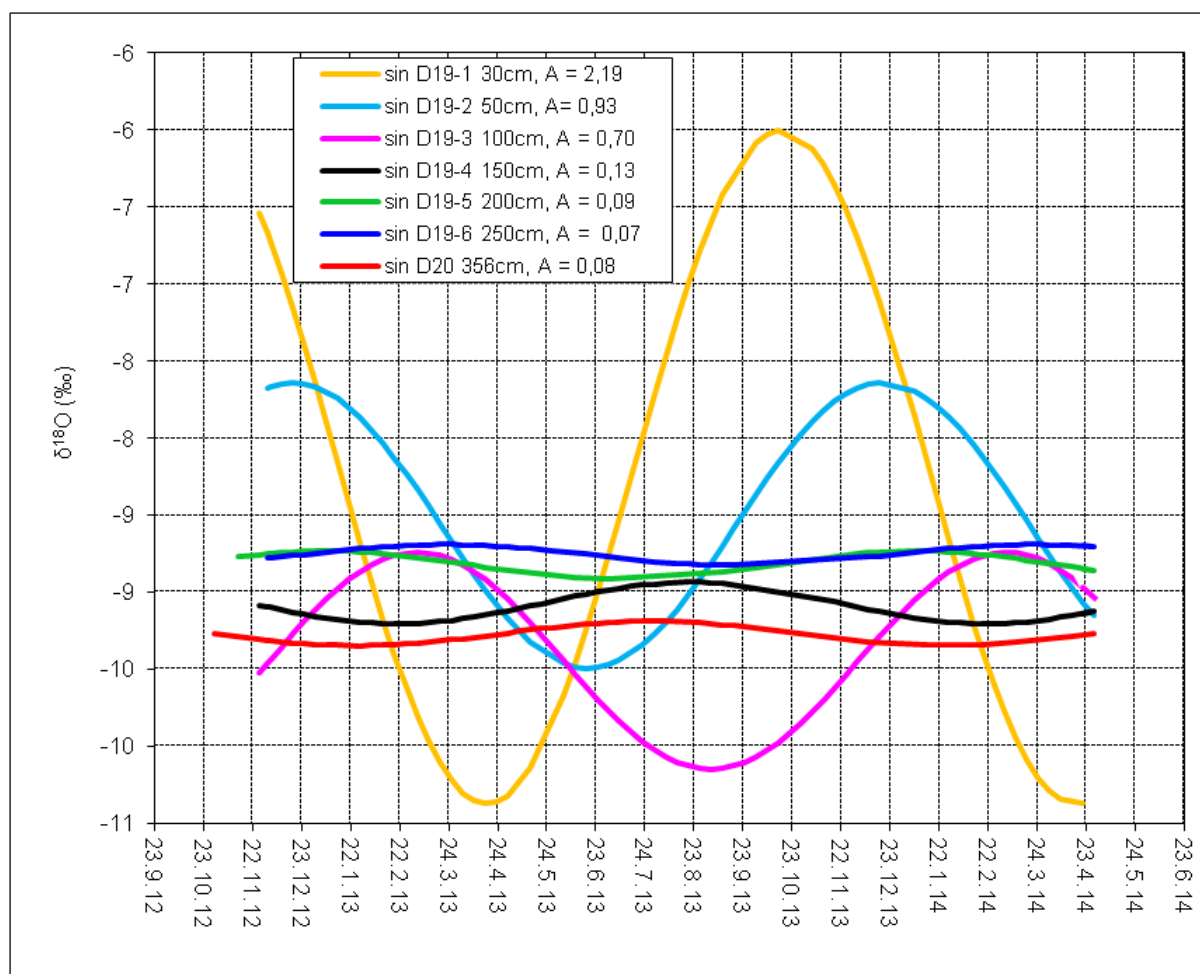
Obrázek 83 - sinová funkce a její amplituda proložená daty za 1,5 roku



11.2 Půdní a podzemní voda

11.2.1 Vliv hloubky odběru vzorku na sinovou funkci

V hloubkových úrovních lyzimetru D19-1 až D19-6 a podzemní vodě D20 byla odebrána půdní voda v hloubce od 30 cm do 356 cm. S rostoucí hloubkou se snižují extrémní hodnoty $\delta^{18}\text{O}$. Čím je voda v hlubších horizontech, tím méně je ovlivňována srážkovou vodou, která je typická velkými výkyvy $\delta^{18}\text{O}$. Tento jev lze pozorovat na postupném utlumování amplitudy sinové funkce (viz *Obrázek 84*).



Obrázek 84 - vliv hloubky na průběh sinové funkce (D19-1 až D19-6, D20)

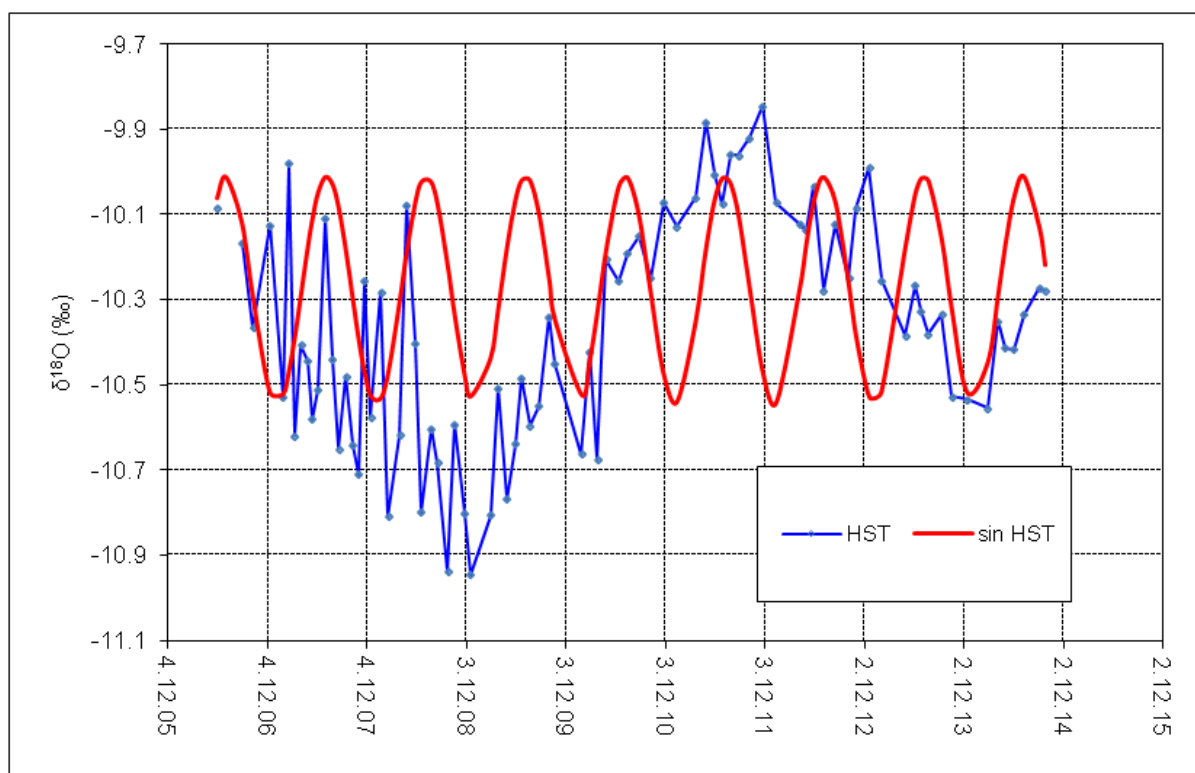
11.2.2 Podzemní a půdní voda

Hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ měřené ve vzorcích odebrané podzemní i půdní vody lze proložit sinovou funkcí stejně jako ve vzorcích srážkové vody nebo povrchového odtoku. V získaných datech se objevuje rovněž periodicita, ale s dobou opakování větší než je jeden rok. Vliv velikosti periody lze vidět na následujících grafech (viz *Obrázek 85* a *Obrázek 86*),

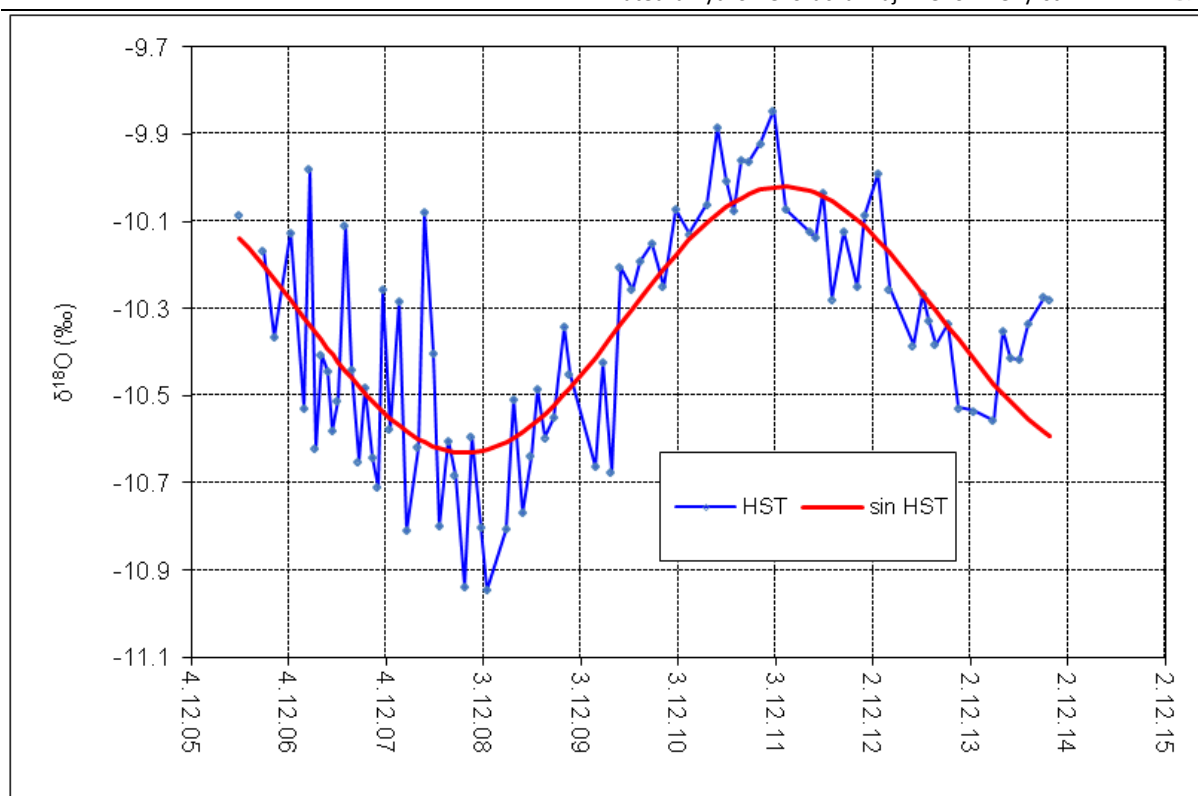


kdy je sinová funkce prokládána hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získanými z profilu HST, přičemž *Obrázek 85* znázorňuje sinovou funkci s periodou 1 rok a *Obrázek 86* sinovou funkci proloženou stejnými daty, ale s periodou 6,5 let. V tomto případě je použita sinová funkce jen jako tvarově vhodné vyjádření víceletého průběhu pro tento konkrétní případ. Nejedná se o použití funkce pro stanovení doby zdržení.

Na těchto grafech můžeme také vidět, že data získaná do prosince roku 2008 jsou více rozkolísaná než data následující. To je způsobeno změnou měřicího přístroje.



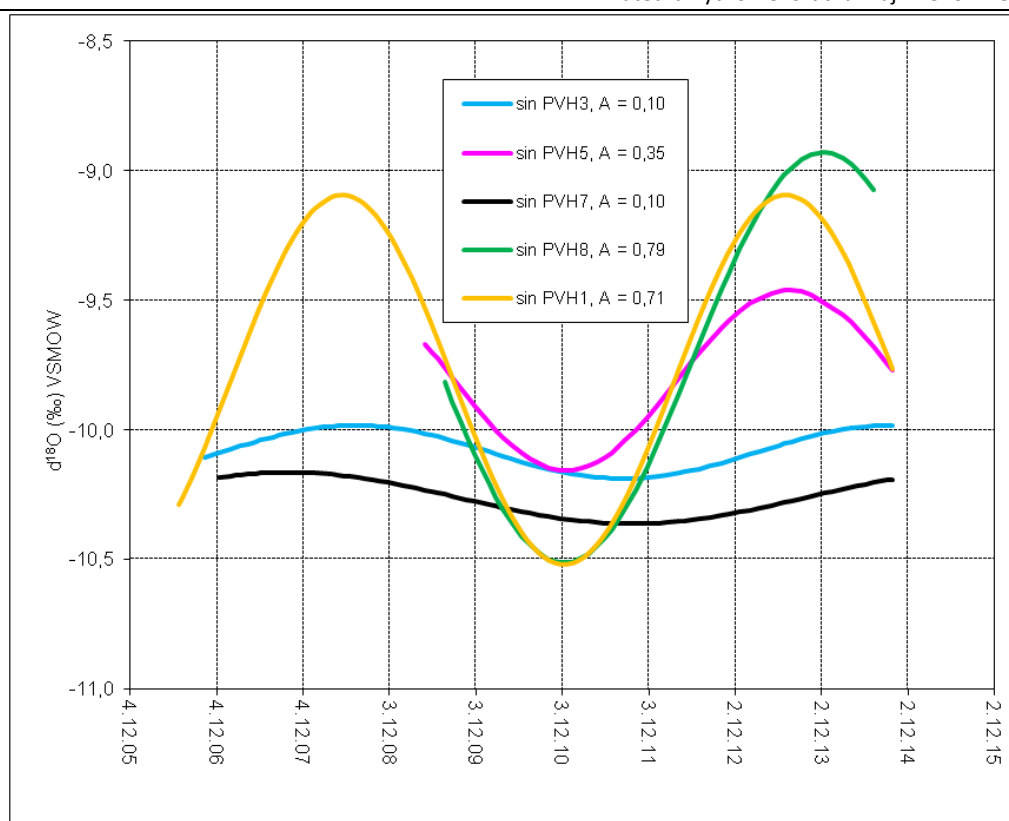
Obrázek 85 - sinová funkce s periodou 1 rok proložená hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získanými z podzemní vody v profilu HST



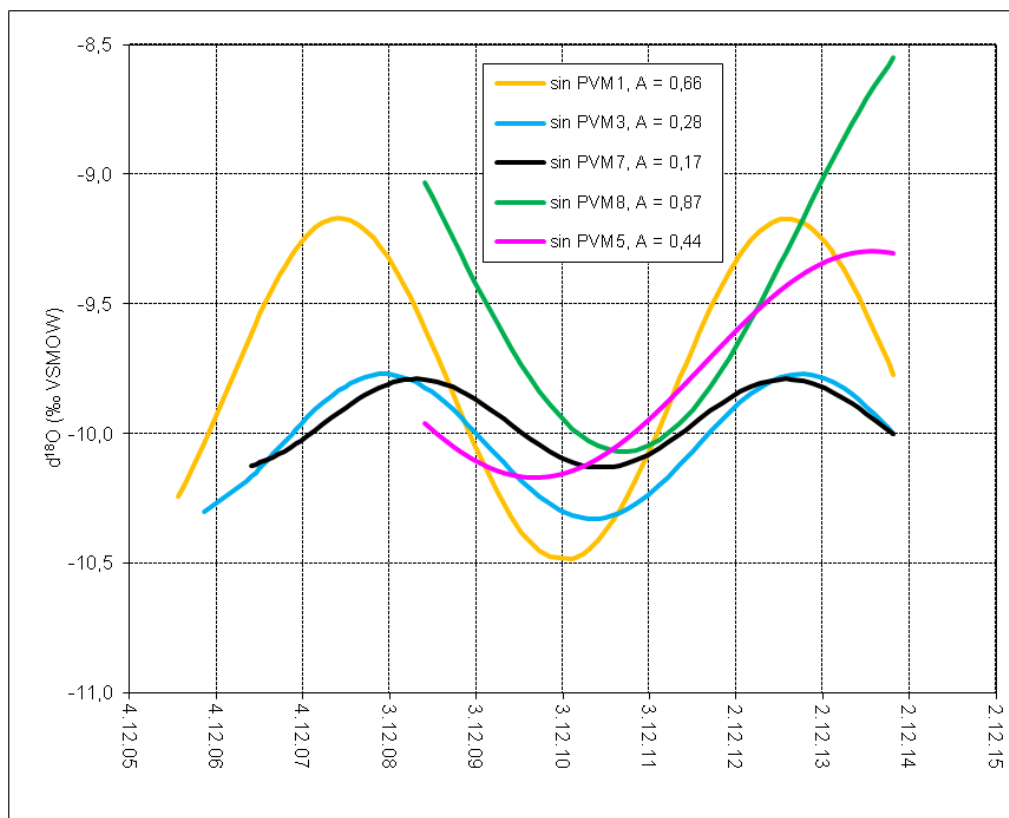
Obrázek 86 - sinová funkce s periodou 6,5 let proložená hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získanými z podzemní vody v profilu HST

11.2.3 Půdní voda rašelinná a svahová

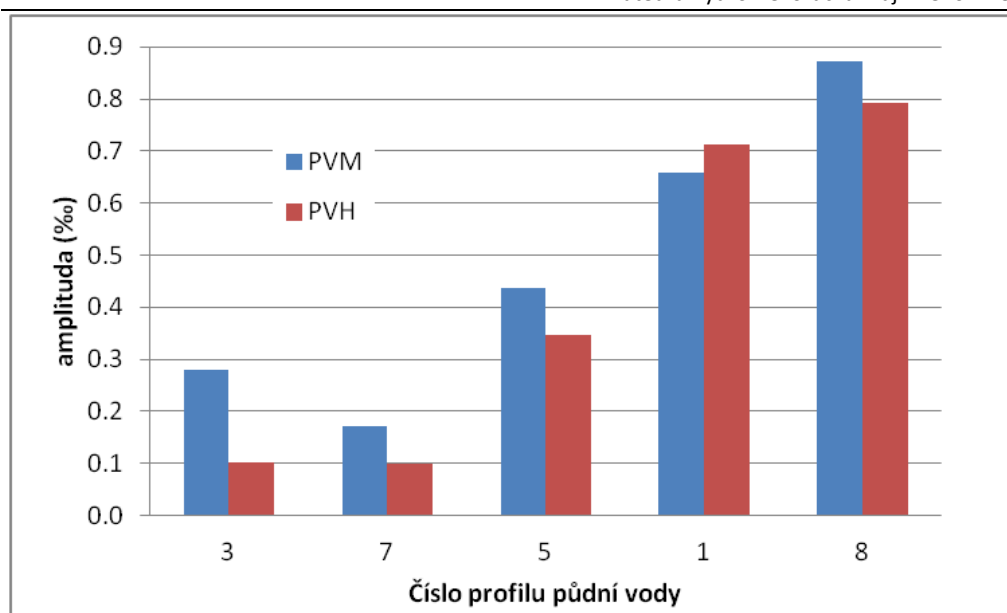
Na následujícím grafu (viz *Obrázek 87*) lze pozorovat rozdíl mezi sinovou funkcí proloženou daty vyhodnocenými v rašelinné (PVH3 a PVH7) a svahové (PVH1, PVH5 a PVH8) půdní vodě v hloubce 60 cm. Sinová funkce proložená hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdní vodě rašelinné má mnohem menší amplitudu než sinová funkce v půdní vodě svahové, protože rašelina je dotována podzemní vodou, která se rovněž vyznačuje malými amplitudami. Stejný jev se vyskytuje i v porovnání amplitud sinové funkce proložené daty svahové a rašelinné půdní vody odebírané v hloubce 30 cm (viz *Obrázek 88*).



Obrázek 87 - sinová funkce proložená hodnotami koncentrace izotopu kyslíku v půdní vodě rašelinné a svahové odebrané v hloubce 60 cm



Obrázek 88 - sinová funkce proložená hodnotami koncentrace izotopu kyslíku v půdní vodě rašelinné a svahové odebrané v hloubce 30 cm

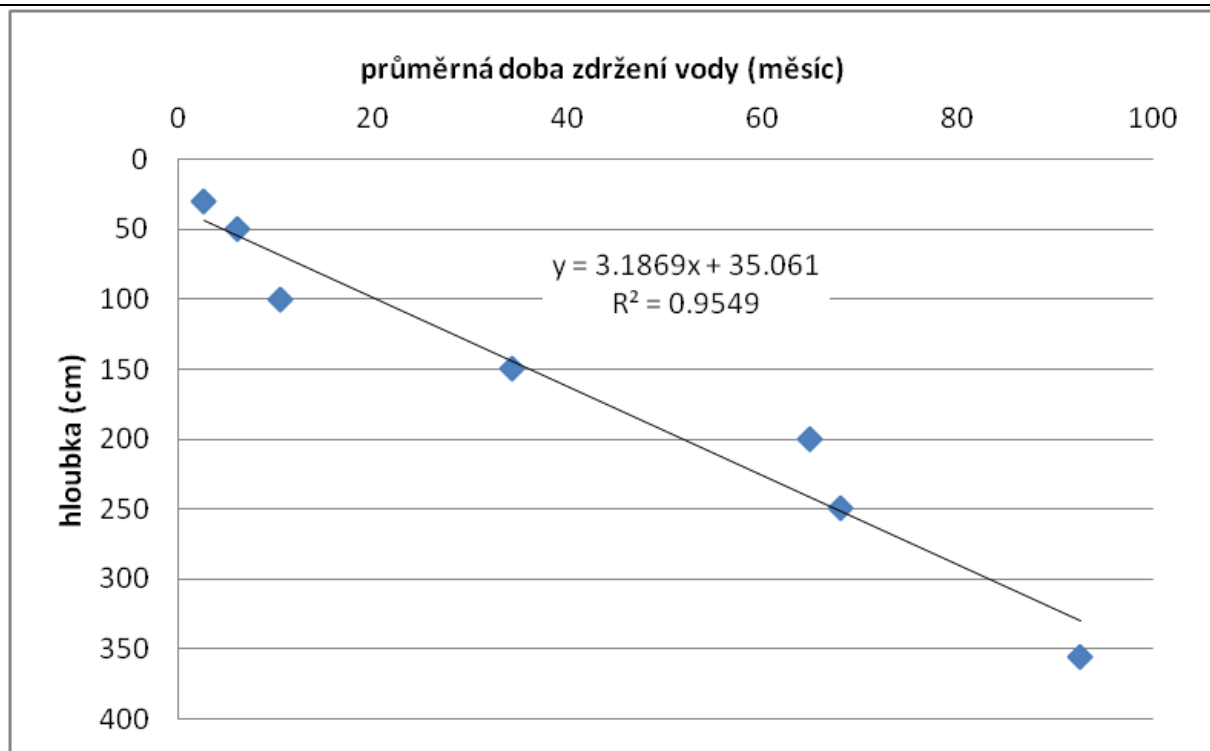


Obrázek 89 - porovnání velikosti amplitud sinových funkcí rašelinné a svahové půdní vody v různých hloubkách

Výše uvedený graf (viz *Obrázek 89*) zobrazuje velikosti amplitud sinových funkcí proložených hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdní vodě. Amplituda sinové funkce proložená profily číslo 3 a 7, které se nachází v rašelině, je v obou hloubkách (30 a 60 cm) mnohem menší než amplituda proložená daty odebranými na svahu. Přejdem mezi nimi je amplituda v profilu číslo 5, který leží na rozhraní paty svahu a rašeliny. U všech profilů, s výjimkou profilu číslo 1, je amplituda vždy větší v mělčím odběrném místě.

11.3 Průměrná doba zdržení vody v povodí - vliv hloubky odběrného místa

Vliv hloubky odběru vzorku na koncentraci $\delta^{18}\text{O}$ lze názorně ukázat na odběru půdní vody v profilech D19-1 až D19-6 a D20. V níže uvedeném grafu lze pozorovat závislost průměrné doby zdržení vody v povodí na hloubce profilu. Čím hlouběji je vzorek odebírán, tím se průměrná doba zdržení zvětšuje (viz *Obrázek 90*).



Obrázek 90 - závislost průměrné doby zdržení vody na hloubce odběru vzorku v lyzimetru Žitava



12 Závěr

Cílem práce bylo vyhodnotit odtok v povodí Nisy pomocí sady dat stabilních izotopů vodíku a kyslíku. Úvodní kapitoly této práce pojednávají o teoretické problematice stabilních izotopů se zaměřením na hydrologii. Následuje aplikace jednotlivých metod analýzy stabilních izotopů, pomocí nichž byl vyhodnocováno chování vody povodí Nisy. Následující odstavce shrnují zjištěné závislosti a trendy v průběhu měřených dat.

Vyhodnocení statistického rozložení koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ bylo provedeno pomocí krabicových grafů. V hodnotách koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ v půdních a podzemních vodách byla zjištěna závislost směrodatné odchylky, určující rozkolísanost hodnot, na hloubce odběru vzorku. Bylo prokázáno, že srážky mají výrazně větší mezikvartilové rozpětí, tedy větší variabilitu hodnot, než voda v povrchovém odtoku nebo půdní a pozemní voda. V grafech vykreslujících jednotlivé části toků v povodí Nisy jsou hodnoceny možné závislosti na nadmořské výšce či využití území.

Objemový podíl staré vody v povrchovém odtoku závisí na původu vody, zejména je ovlivňován akumulací vody v rybnících nebo nádržích, odkud vytéká starší voda a dostává se tak do povrchového odtoku. Dále bylo potvrzeno, že a aktuální srážky se v povodí Nisy do odtoku dostává 23 % a zbylých 77 % v odtoku tvoří voda půdní a podzemní, která je srážkou vytlačena. Hodnota objemového podílu staré vody v odtoku může být rovněž ovlivněna charakterem toku, tj. nadmořskou výškou, využitím krajiny, geologickým podložím apod.

Dále bylo zhodnoceno použití globální a lokální meteorické čáry vody k doplnění chybných dat a bylo potvrzeno, že dochází ke zmenšení sklonu LMWL při vypařování vody ze špatně uchovávaných vzorků nebo z velkých vodních ploch. Při porovnávání sklonu LMWL byla zjištěna možná závislost na nadmořské výšce nebo využití území, zejména procentuálnímu zastoupení zastavěných oblastí. Zároveň se potvrdil obecně platný jev, a sice pokles dlouhodobé průměrné hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ s rostoucí nadmořskou výškou.

Prokládání dat sinovou funkcí prokázalo, že izotopové složení veškerých vod vykazuje periodické chování, avšak s různou periodou a amplitudou. Největší periody vykazují podzemní a půdní vody, jejich perioda nabývá hodnot řádově v jednotkách roků, kdežto srážkové a povrchové vody mají periodu v rámci jednoho roku. Největších amplitud dosahují srážkové vody, následují povrchové, půdní a nakonec podzemní. U půdních a podzemních



vod se amplituda snižuje s hloubkou odběru vzorků. Na základě získaných hodnot amplitud sinových funkcí byla zjišťována průměrná doba zdržení vody v povodí. Tato doba se u půdních vod zvyšuje s hloubkou. U povrchových odtoků nebyla zjištěna jednoznačná závislost.



13 Zdroje

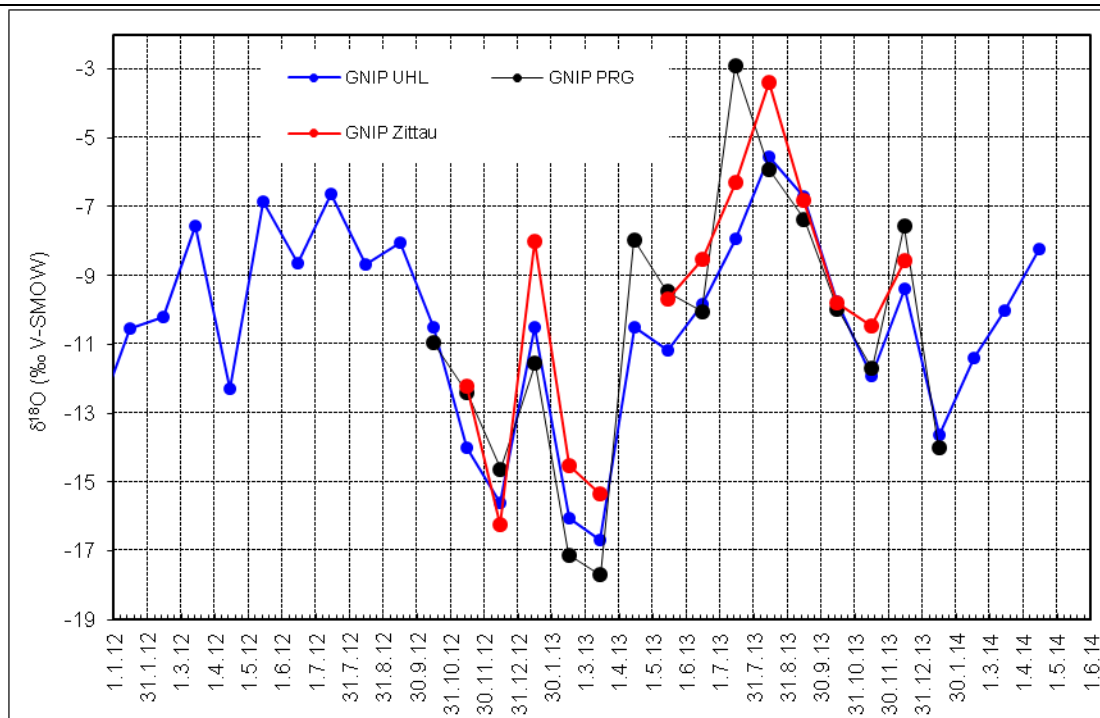
- [1] BERKA, Karel. *Ksicht: Seriál o detektivní chemii – Chemické nástroje detektivů* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://ksicht.natur.cuni.cz/serialy/detektivni-chemie/2>
- [2] CABICAR, Josef. *Stabilní izotopy*. 1. vyd. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1983.
- [3] ČEZ: *Jaderná syntéza* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/synteza_9.html
- [4] Euroregion Nisa. [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: <http://www.ern.cz/index.php?D=245>
- [5] HOLČAPEK, Michal. *Hmotnostní spektrometrie v organické analýze: Úvod do hmotnostní spektrometrie* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: http://holcapek.upce.cz/teaching/01_Uvod.pdf
- [6] IAEA: *International Atomic Energy Agency* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_programme_ihl.html
- [7] IAEA: *Reference Materials for Trade and Development: Quality and comparability* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC52/GC52InfDocuments/English/gc52inf-3-att3_en.pdf
- [8] JAROSLAV REICHL, Martin Všetická. *Multimediální Encyklopedie Fyziky (MEF)* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/711-slozeni-jadra>
- [9] JAROSLAV REICHL, Martin Všetická. *Multimediální Encyklopedie Fyziky (MEF)* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/802-radioaktivita>
- [10] JARUŠKOVÁ, Daniela. *Pravděpodobnost a matematická statistika 12*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [11] Jefferson Lab: *Glossary*. [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://education.jlab.org/glossary/isotope.html>
- [12] KOZÁK, Josef. *Soil atlas of the Czech Republic*. Prague: Czech University of Life Sciences, 2010. ISBN 978-80-213-2028-4.



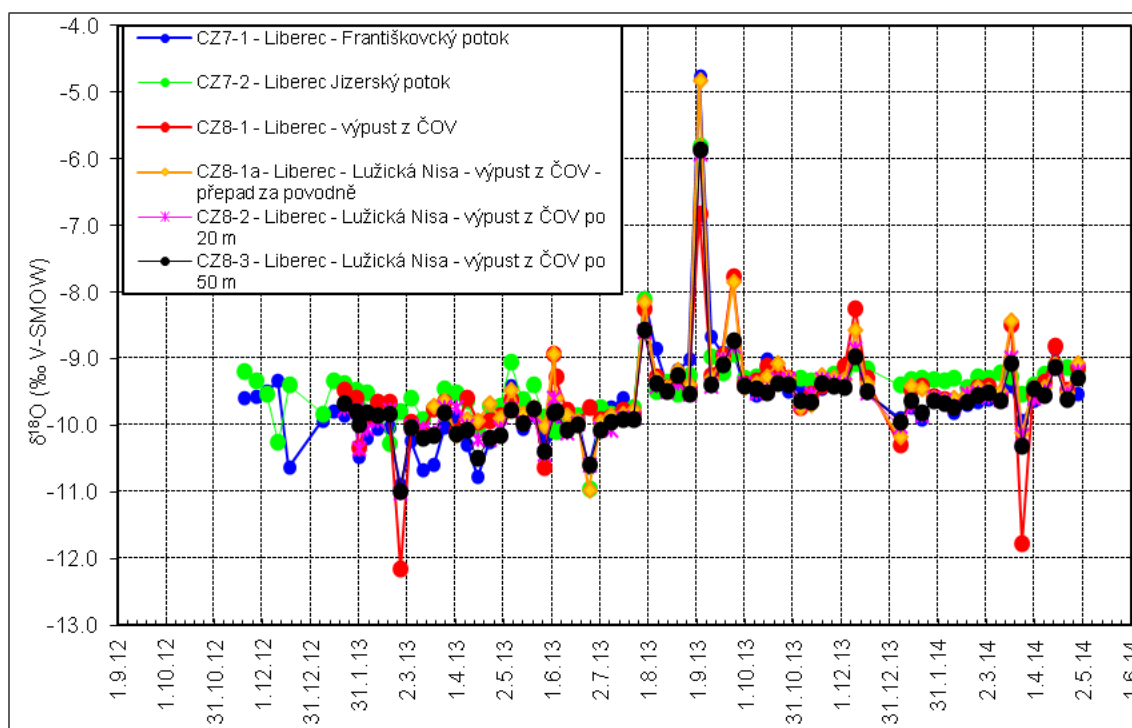
- [13] PAVEL POSPÍŠIL, Jozef Hulla a Štefan Šáro. *Využitie nuklidov v hydrogeológii*. 1. vyd. Bratislava: SNTL - Nakladateľství technické literatury, 1981.
- [14] *Prvky.com* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>
- [15] *SAHRA - Isotopes and Hydrology: Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas* [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/isotopes/oxygen.html>
- [16] ŠANDA, Martin. *Enviromental tracers in experimental hydrology (Přirozené stopovače v experimentální hydrologii)*. Praha: ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04817-7.
- [17] ŠANDA, Martin. *Laserová spektroskopie v hydrologiustabilních izotopů: inženýrské pronikání mezi jaderné analytiky* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/hype/Sanda-Akademon.pdf
- [18] *TROLAS group at IUP, University of Bremen: Laser absorption spectroscopy* [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.iup.uni-bremen.de/troposphere/research/laserabsorptionspectroscopy/>
- [19] VÚV T.G.Masaryka: Dibavod, Charakteristiky povodí a toků ČR, Mandava. [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/data/download/char_mandava1.pdf
- [20] WAGNER, Vladimír. ÚJF AVČR ŘEŽ A FJFI ČVUT PRAHA. *Jaderné zdroje pro vesmírnou kolonizaci* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/sondy/jadernezdroje.html>
- [21] Wikipedia. [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Global_meteoritic_water_line
- [22] Wikipedia: Černá Nisa. [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cern%C3%A1_Nisa
- [23] Wikipedia: Jeřice (řeka). [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Je%C5%99ice_%28%C5%99eka%29
- [24] Wikipedia: Lužická Nisa. [online]. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lu%C5%BEick%C3%A1_Nisa
- [25] *Wikipedia: Světový oceán* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btov%C3%BD_oce%C3%A1n
- [26] Závěrečná zpráva AquaNisa. In: *Http://aquanisa.ihl-zittau.de* [online]. [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://aquanisa.ihl-zittau.de/outcomes.html>



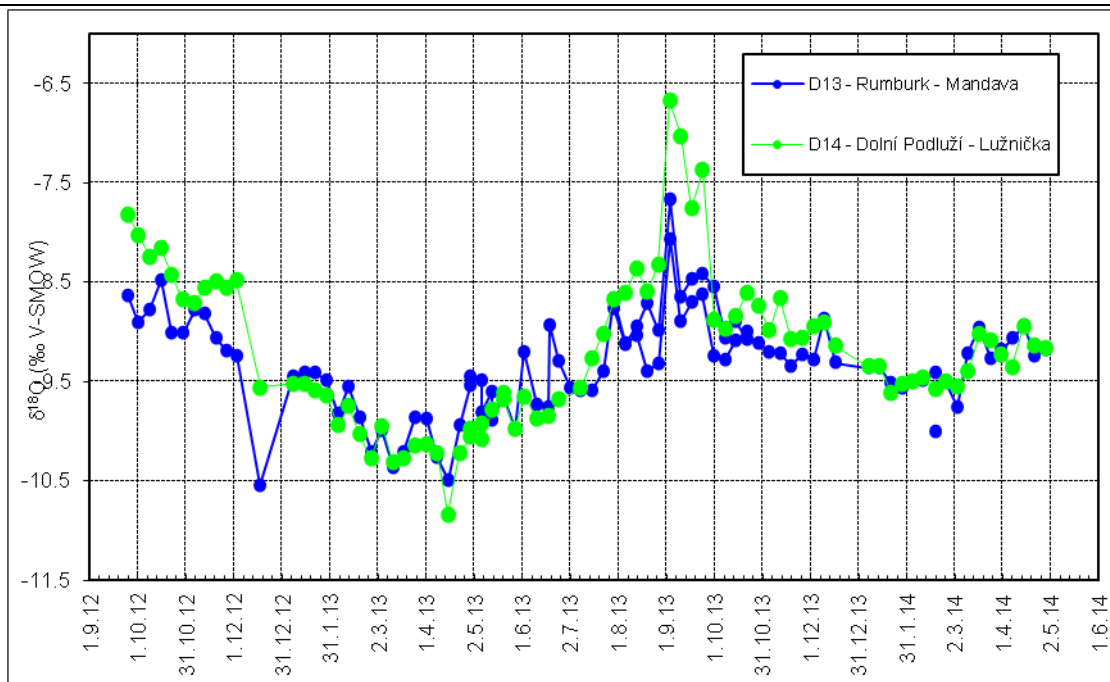
14 Přílohová část



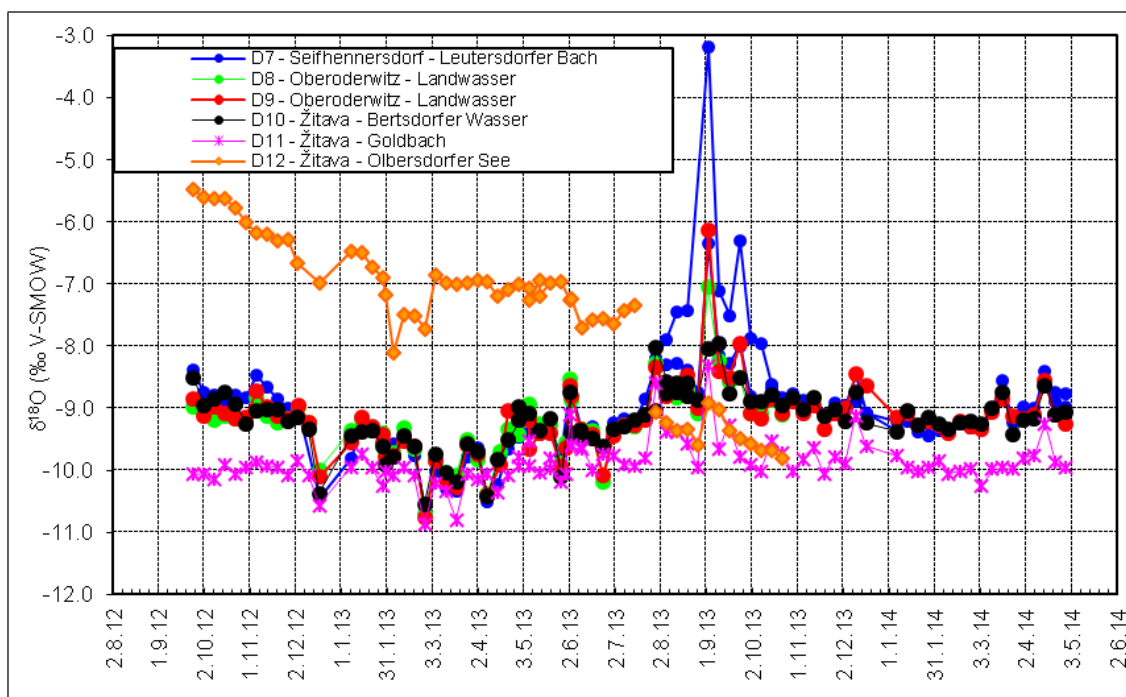
Obrázek 91 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ ve měsíčních srážkách v Uhlířské, Žitavě a Praze



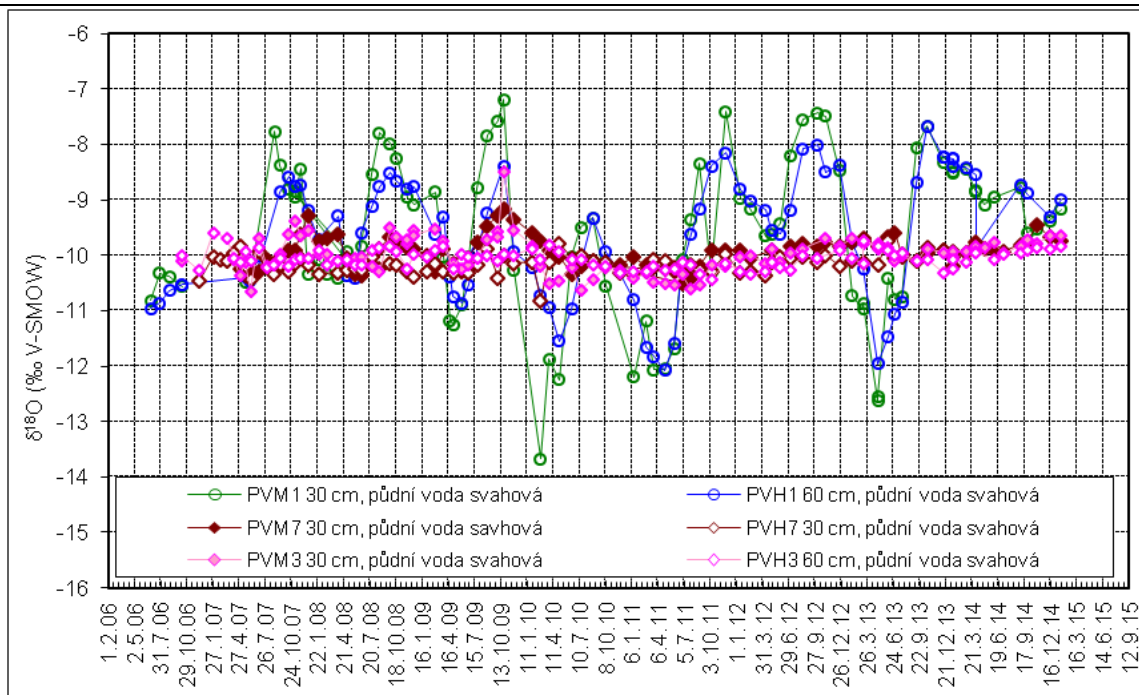
Obrázek 92 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ v Liberci na Lužické Nise u ČOV, Jizerském a Františovském potoce



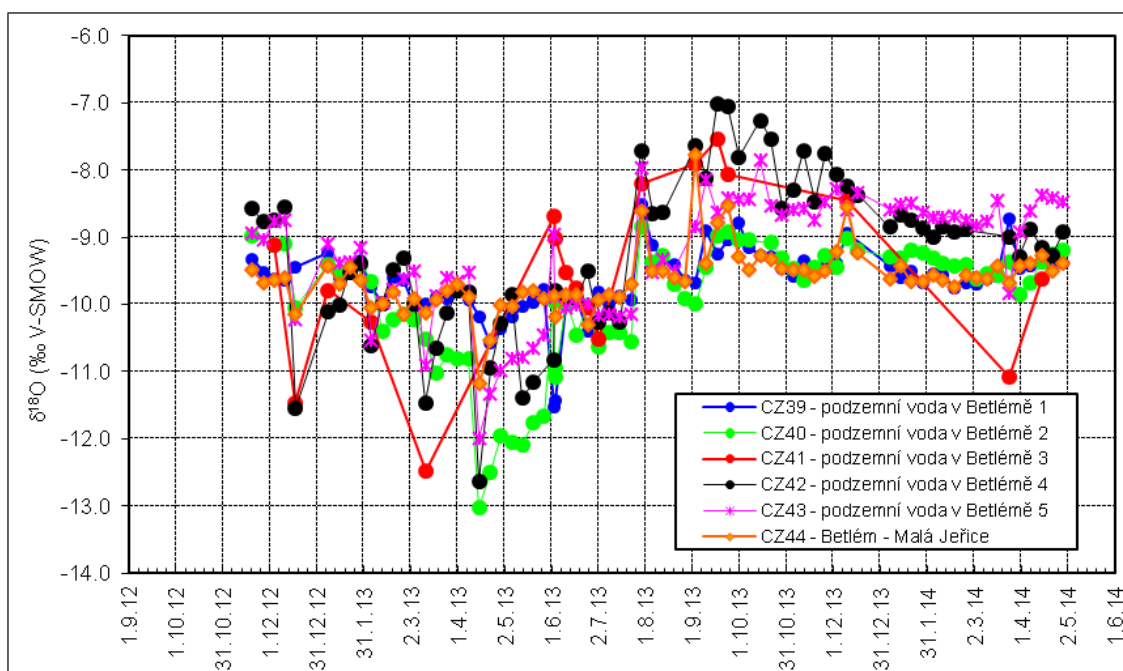
Obrázek 93 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ na horním toku Mandavy a na Lužničky



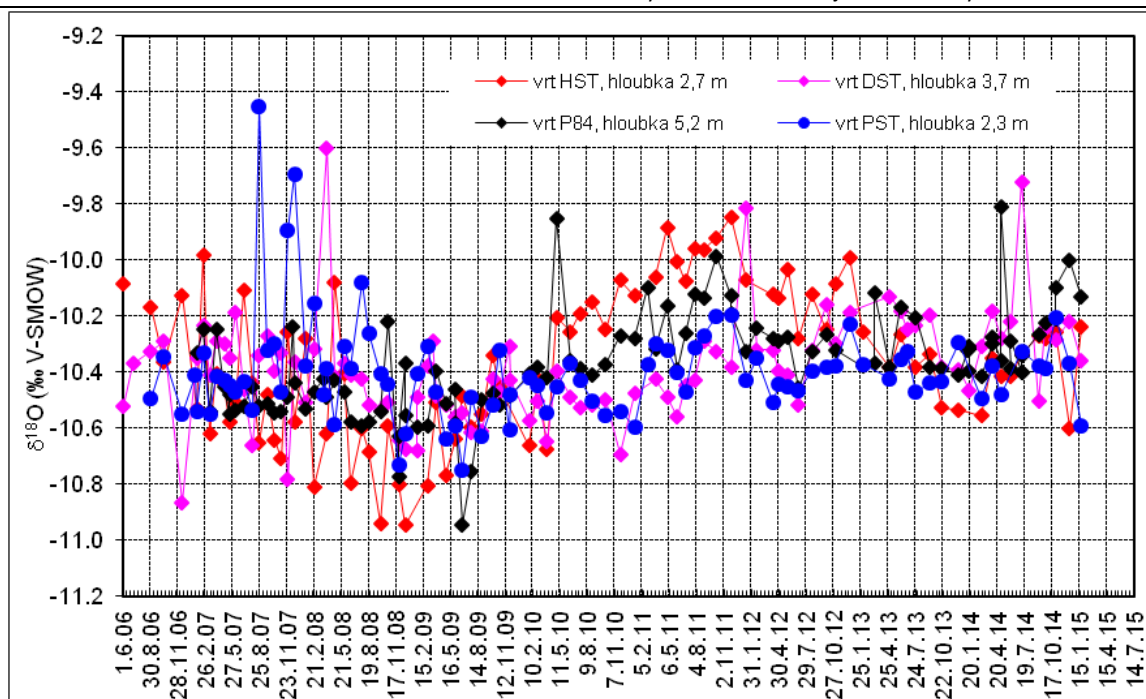
Obrázek 94 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ v přítocích Mandavy



Obrázek 95 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ v půdní svahové vodě v Uhřetiské



Obrázek 96 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}O$ v Betlémeň v podzemní vodě CZ39 - CZ43 a v povrchovém odtoku CZ44



Obrázek 97 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v Betlémě v podzemní vodě v Uhlířské



15 Fotodokumentace



Obrázek 98 - profil CZ17 - Černá Nisa



Obrázek 99 - automatický vzorkovač srážek v Uhlířské



Obrázek 100 - sběr kumulovaných srážek GNIP Uhlířská



Obrázek 101 - sběr srážek v profilu CZ26 - Oldřichov v Hájích



Obrázek 102 - profil CZ8 - Lužická Nisa v Liberci za výpustí z ČOV



Obrázek 103 - profil CZ9 - Fojtecký potok



Obrázek 104 - profil CZ10 - Jeřice – Mníšek



Obrázek 105 - profil CZ16 - Lužická Nisa - Hrádek nad Nisou



Obrázek 106 - profil CZ44 - Malá Jeřice - Betlém



Obrázek 107 - profil D2 - Lužická Nisa – Žitava



Obrázek 108 - profil D11 - Goldbach – Žitava



Obrázek 109 - profil D4 - Mandava nad Großschönau



Obrázek 110 - profil D6 - Lužnička - Neuschönaalen Busch



Obrázek 111 - profil D13 - Mandava – Rumburk



Obrázek 112 - profil D8 - Landwasser – Oberoderwitz



Obrázek 113 - profil D1 - Lužická Nisa – Žitava



Obrázek 114 - profil D3 - Mandava - Žitava



16 Seznam obrázků

Obrázek 1 - úbytek poměru nerozpadnutých radionuklidů a jejich počátečního množství v závislosti na poločasu rozpadu [19]	10
Obrázek 2 - izotopy vodíku [14]	11
Obrázek 3 - spektrogram znázorňující útlum vlnové délky (prostým H a O je nahrazen ^1H a ^{16}O) [16]	15
Obrázek 4 - jednoduchá absorpční spektroskopie [17]	16
Obrázek 5 - absorpční spektroskopie s prodlouženou absorpční délkou dráhy [16]	16
Obrázek 6 - globální meteorická čára vody [7]	19
Obrázek 7 - změna deficitu izotopu vodíku a kyslíku v závislosti na výparu a kondenzaci [7]	20
Obrázek 8 - vliv kontinentality na velikost deficitu izotopu vodíku ve srážce na příkladu Severní Ameriky [7]	21
Obrázek 9 - souhrnné schéma procesů, které ovlivňují izotopové složení vody [7]	22
Obrázek 10 - ztráta těžších izotopů výparem v závislosti na klimatu [7]	22
Obrázek 11 - řešení území povodí Lužické Nisy	24
Obrázek 12 - významné vodní toky na české straně zájmového území	25
Obrázek 13 - významné vodní toky na německé straně zájmového území	26
Obrázek 14 - odběrná místa vzorků povrchového odtoku na české straně zájmového území	30
Obrázek 15 - odběrná místa vzorků povrchového odtoku na německé straně zájmového území	30
Obrázek 16 - půdorys lyzimetru (vlevo) a vstupní šachta k lyzimetru (vpravo) v Žitavské výzkumné ekologické stanici	31
Obrázek 17 - podzemní část lyzimetru s měřícím zařízením	32
Obrázek 18 - srážkoměrné stanice v Mlýnici, Bedřichově, Chřibské, Liberci a Žitavě	33
Obrázek 19 - závislost množství srážek na nadmořské výšce v hydrologickém roce 2013	34
Obrázek 20 - měsíční srážkové výšky v celém období 9/12 - 4/14	34
Obrázek 21 - měsíční srážkové výšky v období hydrologického roku 11/12 - 10/13	35
Obrázek 22 - srážková epizoda v září 2013	35
Obrázek 23 - denní srážkové výšky v září 2013 v Liberci	36
Obrázek 24 - denní srážkové výšky v září 2013 v Chřibské	36
Obrázek 25 - denní srážkové výšky v září 2013 v Mlýnici	37
Obrázek 26 - denní srážkové výšky v září 2013 v Bedřichově	37
Obrázek 27 - denní srážkové výšky v září 2013 v Žitavě	38
Obrázek 28 - průměrný roční průtok v jednotlivých profílech v období 11/12 - 10/13	39
Obrázek 29 - průměrné roční průtoky měřené v období 11/12 - 10/13 v porovnání s dlouhodobými průměrnými ročními průtoky dle ČHMÚ	39
Obrázek 30 - závislost průměrného ročního průtoku na ploše povodí	40
Obrázek 31 - specifický průtok v jednotlivých profílech v období 11/12 - 10/13	41
Obrázek 32 - rozložení průtoků v jednotlivých limnigrafických profílech na přítocích Lužické Nisy v rámci hydrologického roku 1. 11. 2012 - 31. 10. 2013	42
Obrázek 33 - rozložení průtoků v čase v limnigrafických profílech na Lužické Nise v rámci hydrologického roku 1. 11. 2012 - 31. 10. 2013	42
Obrázek 34 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profílech povrchového odtoku CZ1-CZ5 na Lužické Nise a CZ17 na Černé Nise	44
Obrázek 35 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profílech povrchového odtoku CZ6 - CZ10	44
Obrázek 36 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profílech povrchového odtoku CZ11 - CZ16	45



Obrázek 37 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech povrchového odtoku D1 - D6	45
Obrázek 38 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech půdní vody D19-1 až D19-6 a podzemní vody D20.....	46
Obrázek 39 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku v profilech podzemní vody v povodí Uhlířská.....	47
Obrázek 40 - časové rozložení měřených relativních koncentrací izotopu kyslíku ve srážkoměrných profilech CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15	48
Obrázek 41 - vliv nadmořské výšky na střední hodnotu $\delta^{18}O$ v povrchovém odtoku.....	49
Obrázek 42 - anomálie vzniklá výparem z vodní plochy v profilu D12.....	50
Obrázek 43 - box ploty v profilech CZ24, CZ25, CZ26, CZ50 a D15 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	51
Obrázek 44 - box ploty v profilech CZ1-CZ5 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	52
Obrázek 45 - box ploty v profilech CZ1, CZ17 a CZ44 (v závorce je počet hodnot k analýze)	54
Obrázek 46 - box ploty v profilech CZ6, CZ7, CZ7-1, CZ7-1, CZ8, CZ8-1, CZ8-1a, CZ8-2 a CZ8-3 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	55
Obrázek 47 - box ploty v profilech CZ9-CZ16 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	56
Obrázek 48 - box ploty v profilech CZ1-CZ17 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	57
Obrázek 49 - box plot v profilech svahové půdní vody PVM1, 5 a 8 a PVH1, 5 a 8 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	58
Obrázek 50 - box plot rašelinné půdní vody v profilech PVM3, 7 a PVH3, 7 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	59
Obrázek 51 - box ploty v profilech pro odběr podzemní vody (v závorce je počet hodnot k analýze) ..	60
Obrázek 52 - plánec umístění sond v Betlémě (autor: F. Paška)	61
Obrázek 53 - letecký snímek umístění sond v Betlémě (autor: F. Paška)	61
Obrázek 54 - umístění sond podzemních vod v Betlémě.....	62
Obrázek 55 - box ploty v profilech podzemní vody (CZ39-43), (v závorce je počet hodnot k analýze) 62	
Obrázek 56 - box ploty v profilech D1-D14 (v závorce je počet hodnot k analýze).....	64
Obrázek 57 - Zvýšení hladiny podzemní vody v důsledku zatopení vytěženého lomu [25]	64
Obrázek 58 - průběh hloubky hladiny podzemní vody ve vrtu D20 v období 9/12 - 4/14	65
Obrázek 59 - box ploty v profilech D19-1 až D19-6 a D20 (v závorce je počet hodnot k analýze)	66
Obrázek 60 - směrodatná odchylka hodnot $\delta^{18}O$ v závislosti na hloubce odběru vzorku	66
Obrázek 61 - izotopová epizoda v září 2013 na horním toku Lužické Nisy a na Černé Nise	67
Obrázek 62 - izotopová epizoda v září 2013 na Jeřici, Malé Jeřici a Lužické Nise.....	68
Obrázek 63 - izotopová epizoda v září 2013 na dolním toku Lužické Nisy, Mandavě a Lužničce	68
Obrázek 64 - průtoková epizoda v září 2013 v Proseči nad Nisou s vyznačenými SPA a průměrným ročním průtokem.....	69
Obrázek 65 - průtoková epizoda na přítocích Lužické Nisy v září 2013	69
Obrázek 66 - průtoková epizoda na Lužické Nise v září 2013	70
Obrázek 67 - hodnoty objemového podílu staré vody v odtoku ve všech profilech povrchových vod... 71	
Obrázek 68 - lokální meteorická čára vody v profilu D12	74
Obrázek 69 - průmět vypařeného vzorku do původních dat (př. profil D12 a rainD50)	74
Obrázek 70 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - naměřené hodnoty	76
Obrázek 71 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - opravené hodnoty	76
Obrázek 72 - box plot půdní (D19) a podzemní vody (D20) - vyloučené hodnoty	77
Obrázek 73 - dílčí povodí patřící k vodní nádrži Josefův Důl a Souš	78
Obrázek 74 - koeficienty a a b v rovnici LMWL na řece Lužická Nisa	79
Obrázek 75 - koeficienty a a b v rovnici LMWL ostatních přítoků v povodí Lužické Nisy.....	79



Obrázek 76 - vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území na německé straně	80
Obrázek 77 - vztah mezi sklonem LMWL a průměrnou nadmořskou výškou na německé straně	81
Obrázek 78 - vztah mezi sklonem LMWL a procentem zastavěného území na české straně	81
Obrázek 79 - vztah mezi sklonem LMWL a průměrnou nadmořskou výškou na české straně	82
Obrázek 80 - proložení srážek v profilu CZ50 sinovou funkcí	83
Obrázek 81 - Porovnání velikosti amplitud srážek (GNIP UHL) a povrchového odtoku (CZ17)	84
Obrázek 82 - sinová funkce a její amplituda proložená daty za 8 let (GNIP UHL)	85
Obrázek 83 - sinová funkce a její amplituda proložená daty za 1,5 roku	85
Obrázek 84 - vliv hloubky na průběh sinové funkce (D19-1 až D19-6, D20)	86
Obrázek 85 - sinová funkce s periodou 1 rok proložená hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získanými z podzemní vody v profilu HST	87
Obrázek 86 - sinová funkce s periodou 6,5 let proložená hodnotami koncentrace $\delta^{18}\text{O}$ získanými z podzemní vody v profilu HST	88
Obrázek 87 - sinová funkce proložená hodnotami koncentrace izotopu kyslíku v půdní vodě rašelinné a svahové odebírané v hloubce 60 cm	89
Obrázek 88 - sinová funkce proložená hodnotami koncentrace izotopu kyslíku v půdní vodě rašelinné a svahové odebírané v hloubce 30 cm	89
Obrázek 89 - porovnání velikosti amplitud sinových funkcí rašelinné a svahové půdní vody v různých hloubkách	90
Obrázek 90 - závislost průměrné doby zdržení vody na hloubce odběru vzorku v lyzimetru Žitava	91
Obrázek 91 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ ve měsíčních srážkách v Uhlířské, Žitavě a Praze	97
Obrázek 92 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v Liberci na Lužické Nise u ČOV, Jizerském a Františkovském potoce	97
Obrázek 93 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ na horním toku Mandavy a na Lužničky	98
Obrázek 94 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v přítocích Mandavy	98
Obrázek 95 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v půdní svahové vodě v Uhlířské	99
Obrázek 96 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v Betlémě v podzemní vodě CZ39 - CZ43 a v povrchovém odtoku CZ44	99
Obrázek 97 - průběh izotopu kyslíku $\delta^{18}\text{O}$ v Betlémě v podzemní vodě v Uhlířské	100
Obrázek 98 - profil CZ17 - Černá Nisa	102
Obrázek 99 - automatický vzorkovač srážek v Uhlířské	102
Obrázek 100 - sběr kumulovaných srážek GNIP Uhlířská	103
Obrázek 101 - sběr srážek v profilu CZ26 - Oldřichov v Hájích	103
Obrázek 102 - profil CZ8 - Lužická Nisa v Liberci za výpustí z ČOV	104
Obrázek 103 - profil CZ9 - Fojtecký potok	104
Obrázek 104 - profil CZ10 - Jeřice – Mníšek	105
Obrázek 105 - profil CZ16 - Lužická Nisa - Hrádek nad Nisou	105
Obrázek 106 - profil CZ44 - Malá Jeřice - Betlém	106
Obrázek 107 - profil D2 - Lužická Nisa – Žitava	106
Obrázek 108 - profil D11 - Goldbach – Žitava	107
Obrázek 109 - profil D4 - Mandava nad Großschönau	107
Obrázek 110 - profil D6 - Lužnička - Neuschönaalen Busch	108
Obrázek 111 - profil D13 - Mandava – Rumburk	108
Obrázek 112 - profil D8 - Landwasser – Oberoderwitz	109
Obrázek 113 - profil D1 - Lužická Nisa – Žitava	109
Obrázek 114 - profil D3 - Mandava - Žitava	110