

Stanovení místních směrodatných limitů pro vodní zdroje k přípravě plánů pro zvládnání sucha a stavu nedostatku vody

Pracovní pomůcka pro zpracovatele plánů pro zvládnání sucha a stavu nedostatku vody podle § 87b až § 87d zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů, v platném znění (dále jen “vodní zákon”)

Obsah

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod | 2 |
| Složení pracovní skupiny, která stanovení MSL zajišťuje | 3 |
| Čtyři kroky ke stanovení MSL vodního zdroje | 3 |
| 1. Výběr vhodné veličiny | 3 |
| 2. Stanovení úrovně vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limitu pro upravitelnost vody) | 3 |
| 3. Odhad délky časového předstihu MSL | 4 |
| 4. Odvození výsledné úrovně MSL | 4 |
| Příklad 1: Stanovení MSL pro odběr podzemní vody z jímacího území Litá – hydrogeologický rajon Podorlická křída v povodí Orlice | 6 |
| Příklad 2: Stanovení MSL pro odběr vody z Orlice pro úpravnu vody v Hradci Králové | 11 |
| Příklad 3: Stanovení MSL pro víceúčelovou nádrž Vranov pro úpravnu vody Štítary | 17 |
| Příklad 4: Stanovení MSL pro odběr vody z vodárenské nádrže Vír | 20 |
| Návod pro práci s makrem pro modelování řídicí výtokové čáry | 23 |
| 1. Generování řídicí výtokové čáry pro pozorování hladiny podzemní vody | 23 |
| 2. Generování řídicí výtokové čáry pro řadu průměrných denních průtoků | 24 |
| Literatura | 26 |

Úvod

Předložený dokument doplňuje Metodiku k přípravě plánů pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody, která byla vydána Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem životního prostředí v roce 2021 (dále jen Metodika pro suché plány). Pořízení plánů pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody (dále jen "plánů pro sucho") kraje ukládá § 87c vodního zákona krajským úřadům, a to ve spolupráci s příslušnými správci povodí a Českým hydrometeorologickým ústavem. Pro potřeby rozhodování o vyhlášení *stavu nedostatku vody* je potřeba stanovit tzv. *místní směrodatný limit* (dále jen "MSL") vodního zdroje (nebo klíčových vodních zdrojů) *uživatelů vody významných pro území kraje*.

MSL je dosažen v okamžiku, kdy nastává vysoká pravděpodobnost nedostatečné vydatnosti nebo jakosti vodního zdroje v souvislosti s probíhajícím suchem a zároveň ještě existuje dostatečně dlouhé časové období, než nastane stav, kdy již vodní zdroj není schopen zabezpečit požadavky na užívání v potřebném rozsahu. MSL představuje analogii ke stupňům povodňové aktivity, které slouží pro operativní zvládnutí povodní. MSL může mít stanoveno více hodnot během roku v souladu s hydrologickým cyklem a v souladu s proměnnými požadavky na vodní zdroje během roku. Pro jeho odvození je třeba znát okamžik, kdy již nastává zásadní porušení funkce vodního zdroje v souvislosti se suchem. Toto porušení funkce může souviset s nedostatečným množstvím vody nebo s nevyhovující jakostí vody.

MSL slouží pro doplnění (upřesnění) informace o nebezpečí vzniku sucha, kterou vydává Český hydrometeorologický ústav v rámci *předpovědní služby pro sucho*. MSL představuje místní informaci o tom, jak daný vodní zdroj reaguje na probíhající nepříznivou hydrologickou situaci.

Základní přístup pro stanovení MSL je popsán v Metodice pro suché plány. Tento doplňující dokument obsahuje příklady stanovení MSL pro různé typy vodních zdrojů s různou úrovní podrobnosti dostupných vstupních dat. **Cílem tohoto dokumentu je nastínit možné přístupy a inspirovat zpracovatele plánu pro sucho k vlastní úvaze při řešení nastavení MSL strategických vodních zdrojů kraje.** Není zde možné postihnout všechny skutečnosti, které v realitě nastávají.



Obrázek 1 Hladový kámen v Děčíně na Labi odhalený v roce 2015 a stín smutného pozorovatele s nejistou budoucností

Složení pracovní skupiny, která stanovení MSL zajišťuje

Stanovení MSL vodního zdroje uživatele významného pro území kraje probíhá v rámci konzultačního týmu, kde jsou zastoupeni provozovatelé a uživatelé vody z daného vodního zdroje (např. pracovník dispečinku vodárenské společnosti, hydrogeolog, technolog úpravy vody, průmyslový uživatel vody apod.), pracovník správy povodí (zpravidla pracovník vodohospodářského dispečinku podniku Povodí), zaměstnanci příslušného krajského úřadu zapojení do procesu přípravy plánu pro sucho, zpracovatelé plánu pro sucho a případně další subjekty ve vztahu k vodnímu zdroji (např. využívání energetického potenciálu).

Čtyři kroky ke stanovení MSL vodního zdroje

- 1) Výběr vhodné veličiny nebo veličin, jejichž hodnoty jsou rozhodující pro fungování vodního zdroje v období dlouhotrvajícího sucha a existuje jejich systematický monitoring (nebo se zainteresované strany dohodnou na jeho zajištění).
- 2) Stanovení úrovně této veličiny, která udává mezní stav - stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limit pro upravitelnost vody) v souvislosti s probíhajícím suchem, tzn. není možné zajistit všechny požadavky na vodu včetně environmentálních požadavků (minimální zůstatkový průtok podle § 36 vodního zákona, minimální hladina podzemní vody podle § 37 vodního zákona, minimální průtok pod nádrží daný platným manipulačním řádem).
- 3) Návrh časového předstihu MSL, tj. délky období mezi stavem vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limitem pro upravitelnost vody) a dosažením MSL.
- 4) Odvození úrovně vybrané veličiny, která s tímto časovým předstihem předchází vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limitu pro upravitelnost vody).

1. Výběr vhodné veličiny

Výběr veličiny, která bude sloužit jako ukazatel MSL daného vodního zdroje, je dán následujícími požadavky:

- vybraná veličina (nebo veličiny) popisují parametr (nebo parametry) vodního zdroje, které jsou za sucha limitující pro jeho využití
- existuje systematické měření vybrané veličiny, které je využitelné pro stanovení MSL
- provozovatel měření nebo uživatel vody je ochoten předávat informaci o dosažení MSL krajskému úřadu nebo jsou hodnoty vybrané veličiny veřejně dostupné.

V případě uplatnění několika parametrů pro stanovení MSL je třeba do karty MSL v plánu pro sucho uvést, zda nepříznivá situace nastává už při překročení MSL u jednoho parametru nebo až po překročení parametrů všech. Více parametrů bude pravděpodobně třeba sledovat v případě vzájemně zastupitelných vodních zdrojů.

2. Stanovení úrovně vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limitu pro upravitelnost vody)

Za stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo dosažení limitu pro upravitelnost vody) je možno považovat následující nepříznivé situace, které vznikají jako následek dlouhotrvajícího sucha:

- omezení nakládání s vodami vyplývá z důvodů daných technicky nebo technologicky (vodu nelze odebírat nebo upravit z důvodů jejího nedostatečného množství nebo jakosti)
- omezení je dáno parametry povolení k nakládání s vodami včetně podmínek pro dodržení minimálního zůstatkového průtoku nebo minimální hladiny podzemní vody ve stanoveném profilu nebo objektu
- dochází ke střetům zájmů mezi uživateli vody s povoleným nakládáním s vodami
- dochází k závažným dopadům nakládání s vodami na množství nebo jakost povrchových nebo podzemních vod (hodnoceno v bilančních profilech státní sítě)

- surová voda odebíraná pro úpravu na vodu pitnou nesplňuje požadavky uvedené ve vyhlášce 428/2001 Sb., příloha č. 13)

Zkušenosti s fungováním vodního zdroje během sucha mají především provozovatelé vodního zdroje (pracovníci dispečinku, technologové výroby atd.) a jejich spolupracující odborníci (např. hydrogeologové). V rámci procesu stanovení MSL je nutné je oslovit a požádat o informace o technických a technologických limitech odběrných objektů a technologie úpravy vody.

Pro stanovení úrovně vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo limitu pro upravitelnost vody) může být využitelná metoda regresní analýzy, která umožňuje odvozování modelových vztahů mezi veličinami popisující množství dostupné vody a její jakosti nebo pokud potřebujeme odvodit závažnost hydrologického sucha na objektu (nebo profilu) s kratší řadou pozorování z objektu (nebo profilu) s dlouhou řadou pozorování. Regresní analýza byla uplatněna v příkladu 1 a v příkladu 3.

3. Odhad délky časového předstihu MSL

Délku časového předstihu uvažovaného pro odvození MSL vodního zdroje zvolí zpracovatel plánu s ohledem na požadavky krajského úřadu. Při volbě délky časového předstihu je nutné zohlednit, jak rychle zpravidla klesá vydatnost vodního zdroje nebo disponibilní objem vody v období sucha. Zvolený časový předstih by měl být dostatečný pro informování hejtmana o zaznamenaných dopadech probíhajícího sucha (dosažení MSL na vodních zdrojích), rozhodnutí hejtmana o svolání komise pro sucho a její následné svolání, rozhodnutí komise o vyhlášení stavu nedostatku vody, rozhodnutí o vydání potřebných operativních opatření a zahájení efektu těchto opatření. Tento předstih by však neměl být příliš dlouhý, aby často nedocházelo k planým výstrahám. Délka zvoleného časového předstihu se uvede do karty MSL v plánu pro sucho a může být následně přehodnocena s ohledem na nové zkušenosti s procesem zvládáním sucha a stavu nedostatku vody.

4. Odvození výsledné úrovně MSL

Volba metody pro odvození úrovně MSL, která předchází vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji (nebo dosažení limitu pro upravitelnost vody), odpovídá dostupným datovým podkladům, které jsou k dispozici a ze kterých je možné odvodit charakteristické chování vodního zdroje v období hydrologického sucha. Dále uvádíme hydrologické metody využitelné pro základní tři typy vodních zdrojů.

4.1. Vodohospodářské řešení pro odběry povrchových vod z nádrží

Vodohospodářské řešení nádrží je základní metoda pro modelování chování vodních nádrží v různých hydrologických podmínkách včetně období hydrologického sucha. V případě stanovení potřebné úrovně MSL se jedná o úlohu, kdy volíme scénář přítoku do nádrže a hledáme potřebný disponibilní objem vody v nádrži, který vystačí na zvolené časové období, a z čáry zatopených objemů odvozujeme výšku hladiny v nádrži, která potřebnému objemu vody v dané části nádrže odpovídá (viz příklady 3 a 4).

Potřebné vstupy:

- aktuální manipulační řád nádrže s tabulkou zatopených objemů
- kvalifikovaný odhad očekávaných odběrů všech uživatelů vody v období sucha
- scénář přítoků do nádrže v období hydrologického sucha
- odhad výparu z vodní nádrže v období sucha

4.2. Modelování řídicí výtokové čáry pro odběry podzemních vod

Pro odvození úrovně hladiny podzemní vody, která s daným časovým předstihem předchází úrovní vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji, je možné uplatnit hydrologickou metodu modelování řídicí výtokové čáry (master recession curve). Rovnice řídicí výtokové čáry popisuje charakteristický průběh hladiny podzemní vody v její poklesové fázi. Na obrázku 4 na straně 10 je zachyceno pozorování hladiny podzemní vody v hlubokém kolektoru v ročním chodu. Z obrázku je patrný charakteristický průběh poklesových úseků řady. Modelování řídicí výtokové čáry je založeno na grafické metodě, kdy jsou z denní řady průměrné hladiny podzemní vody vybrány souvislé poklesové úseky a jsou zakresleny do jednoho grafu tak, aby na sebe plynule navazovaly v čase. Pro takto připravená data je následně hledán vhodný matematický model (lineární, logaritmický, polynomický aj.).

Pro odvození řídicí výtokové čáry pro účely přípravy plánů pro sucho je možné bezplatně poskytnout makro pro Microsoft Excel vyvinuté na univerzitě v Záhřebu (Posavec et al., 2006)¹. Uplatnění metody modelování řídicí výtokové čáry je zdokumentováno v příkladu 1 dále v této metodice.

Potřebné vstupy:

- časová řada průměrné denní hladiny podzemní vody v řešeném objektu zahrnující historická období sucha (alespoň období 2015–2020)

4.3. Separace základního odtoku pro odběry povrchových vod z vodních toků

Pro odběry povrchových vod přímo z toků bude nejčastěji limitující hodnota minimálního zůstatkového průtoku daná povolením k nakládání s vodami. Pro stanovení MSL bude rozhodující charakteristické chování vodního toku v období, které předchází poklesu průtoků na tuto úroveň. Analogicky jako v případě podzemních vod, lze i pro vybraný profil vodního toku hledat modelové chování zdroje povrchových vod v období sucha popsané řídicí výtokovou čarou. V případě povrchových vod je však nutné počítat s větší nepřesností takového modelu, neboť průtoky jsou závislé na celé řadě náhodných jevů.

Modelování řídicí výtokové čáry povrchových vod je opět možné realizovat pomocí výše uvedeného makra v MS Excel. Pro hledání modelu řídicí výtokové čáry pro povrchové vody doporučujeme rozdělit hydrogram průtoků na dvě části – pomocí hodnoty mediánu základního odtoku² na část přímého odtoku a část základního odtoku. Aplikace uvedeného postupu je popsána v příkladu 2.

Potřebné vstupy:

- časová řada průměrných denních průtoků v řešeném profilu zahrnující historická období sucha (alespoň období 2015-2020)

Postup výpočtu mediánu základního odtoku metodou klouzavých minimálních průtoků:

- Z průměrných denních průtoků v řešeném profilu se vypočte řada klouzavých minim z intervalu předcházejících 30 dní (minimum za předcházejících 30 dní stanovené pro každý následující den v řadě).
- Touto řadou minimálních průtoků se proloží klouzavé průměry s dobou průměrování 30 dní – získá se odhad základního odtoku, který se podílí na celkovém povrchovém odtoku.
- Medián základního odtoku je možné uplatnit pro rozdělení hydrogramu na část přímého odtoku a část základního odtoku při modelování řídicí výtokové čáry

Pokud nejsou pro výše uvedené metody potřebná data dostupná, je možné pro stanovení úrovně MSL vycházet z expertní znalosti provozovatele vodního zdroje a ze zkušeností s provozem vodního zdroje v posledních suchých letech 2014–2019 (2020).

Uvedené příklady stanovení MSL byly projednávány s provozovatelem vodního zdroje, ale nemusí být ve shodě s výsledným MSL uvedeným v plánu pro sucho daného kraje, neboť v době přípravy těchto příkladů nebyl znám zpracovatel plánu pro sucho. Zpracovatel plánu pro sucho daného kraje může přistoupit ke stanovení MSL v těchto vodních zdrojích jiným způsobem, případně může výslednou hodnotu MSL ovlivnit závěrečné projednávání plánu mezi sousedními kraji atd.

Všem členům konzultačních týmů patří poděkování za spolupráci, která umožnila vznik tohoto dokumentu.

¹ Makro pro výpočet řídicí výtokové čáry pro MS Excel je možno poskytnout bezplatně na vyžádání ve VÚV TGM, v. v. i. nebo přímo u jeho autora. Jeho využití se řídí autorskými právy popsanými v dokumentu.

² Tento bod zlomu se do makra zadává prostřednictvím hodnoty pravděpodobnosti překročení odpovídající požadovanému průtoku.

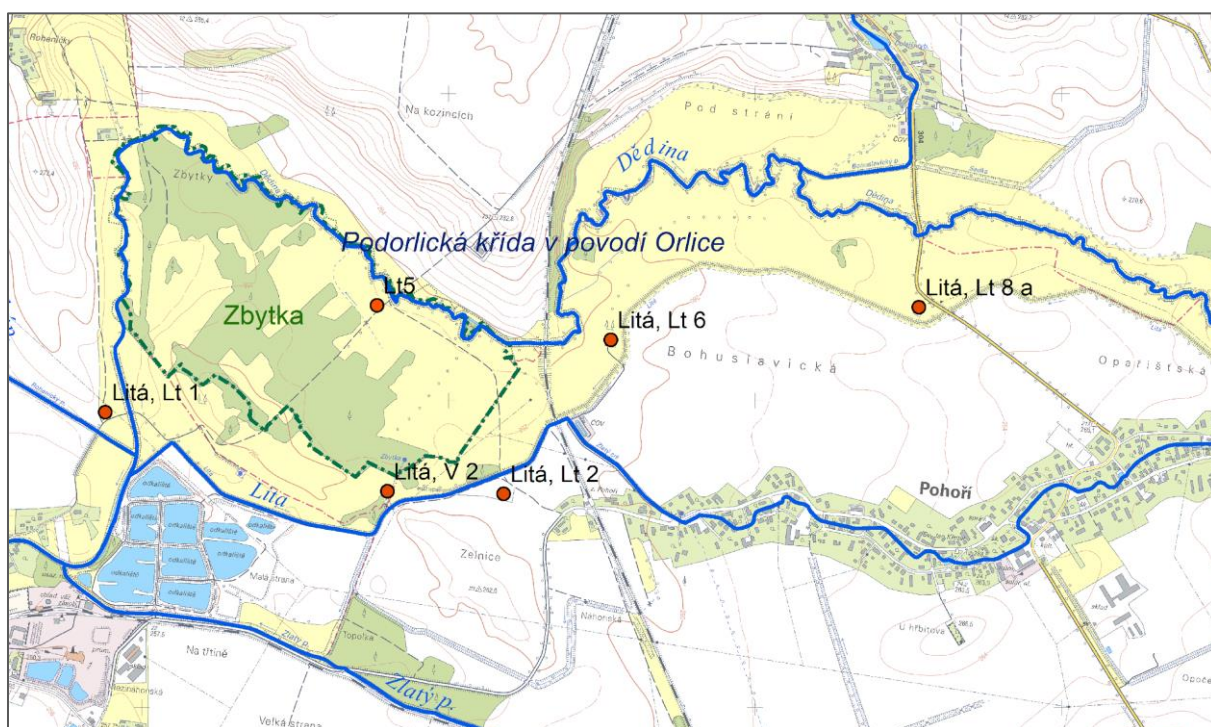
Příklad 1: Stanovení MSL pro odběr podzemní vody z jímacího území Litá – hydrogeologický rajon Podorlická křída v povodí Orlice

Jímací území Litá se nachází v povodí Dědina v hydrogeologickém rajonu Podorlická křída. Jedná se o pánevní strukturu, podzemní voda je odebírána z kolektoru bělohorského souvrství (kolektor B). Odběry vody slouží pro vodárenské účely pro zásobování obyvatel Hradce Králové a okolí pitnou vodou. Vodní zdroj je zapojen do tzv. Vodárenské soustavy východní Čechy, která zajišťuje propojení vodárenské sítě od Náchodska, přes Hradecko, Pardubicko až na Chrudimsko – tudíž přesahuje hranice Královéhradeckého kraje a Pardubického kraje. Dá se předpokládat, že společnost Královéhradecká provozní, a.s., která provozuje odběry surové vody z tohoto území, bude vybrána mezi *uživatele významné pro území kraje* z hlediska připravovaného plánu pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody Královéhradeckého kraje.

Použitá data

Pro řešení úlohy bylo zvoleno období let 2016–2020, které představuje jedno z nejzávažnějších období hydrologického sucha v pozorované historii v povodí Labe.

- denní data o čerpaném množství vody v období od 1. 1. 2016 do 31. 12. 2020 z vrtů Lt1, Lt2, Lt6, Lt8 a V2 v blízkosti monitorovacího vrtu Lt5, poskytnuta vodárenskou společností
- denní pozorování minimální hladiny podzemní vody v objektu Lt5 za období 2016–2020, poskytnuta vodárenskou společností
- průměrné denní průtoky ve stanici ČHMÚ Mitrov na Dědině
- pozorování stavů hladiny podzemní vody ve vrtu VP7222 ze státní sítě ČHMÚ, který monitoruje čerpanou zvedeň (nachází se asi 16,5 km daleko od vlastního jímacího území)



Obrázek 2 Situace řešené části jímacího území Litá v blízkosti lokality Natura 2000 Zbytka v povodí Dědina, hydrogeologický rajon Podorlická křída v povodí Orlice – pozorovací vrt Lt5 a jímací vrt Lt1, V2, Lt2, Lt6, Lt8

Krok 1 Výběr vhodné veličiny pro stanovení MSL

V rozhodnutí o povolení k nakládání s vodami byla pro jímací území Litá stanovena minimální hladina podzemní vody podle § 37 vodního zákona ve vrtu Lt5, která limituje množství odebrané vody z jímacího území z důvodů ochrany životního prostředí (lokality Natura 2000 Zbytka) po jarní část roku. Ve vrtu probíhá kontinuální měření úrovně hladiny podzemní vody. Měření zajišťuje Královéhradecká provozní,

a.s. Minimální úroveň hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu Lt5 je tedy vhodná veličina pro stanovení MSL pro potřeby plánu pro zvládání sucha.

Krok 2 Stanovení hodnoty vybrané veličiny, která představuje vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji

Úroveň minimální hladiny podzemní vody ve vrtu Lt5 stanovená v povolení k odběru vody z jímacího území představuje stav, kdy dochází k významnému omezení čerpaného množství a požadavky na vodu musí být uspokojovány z jiných zdrojů. To je tedy úroveň, kdy hovoříme o vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji, od které se bude odvozovat úroveň MSL. Omezení odběrů dané tímto environmentálním limitem platí v období od 21. 3. do 15. 7.

⇒ ***Lt5 (stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji pro období 21. 3. – 15. 7.) = 257,50 m n. m.***

Pro ostatní dny v roce je možné odvodit stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji z následujících skutečností:

- z dalších omezení daných v povolení k nakládání s vodami pro jednotlivé jímací objekty (minimální hladina uvedená v hydrogeologickém posudku daného jímacího objektu, maximální odběr z jednotlivých objektů apod.),
- z technických parametrů jímacích objektů (úroveň vypnutí čerpadla z důvodů nedostatku vody),
- ze zkušeností s dopady historických období sucha v území hydrologicky přímo ovlivněným probíhajícím odběrem.

Následně je uveden příklad stanovení výchozí úrovně MSL pro tuto třetí možnost.

Pro odvození stavu vyčerpání disponibilního množství vody v jímacím území Litá byly využity zkušenosti a pozorování z poslední periody sucha v letech 2016-2019. V daném období nebylo čerpání podzemní vody ohroženo z technických důvodů. Čerpadla jsou umístěna ve vrtech hlubokých 30 až téměř 150 m. Proběhlo dotazování u uživatelů vody, kteří realizují svá povolená nakládání ze stejného kolektoru v blízkém okolí jímacího území Litá. Z výsledků vyplynulo, že během tohoto období nedošlo k ohrožení vydatnosti jejich zdrojů podzemních vody. Došlo však k omezení odběrů povrchových vod v důsledku sucha.

Významný dopad sucha a všech realizovaných nakládání s vodami na množství povrchových vod v povodí Dědina byl v těchto suchých letech zaznamenán ve výsledcích hodnocení vodohospodářské bilance, kterou každoročně zpracovává Povodí Labe, s. p. Pro kontrolní bilanční profil Mitrov na Dědině platí, že mezi roky 2016 a 2020 bylo zaznamenáno celkem 12 měsíců s hodnocením bilančního stavu BS5 (průměrný měsíční měřený průtok je nižší než minimální zůstatkový průtok stanovený v daném bilančním profilu). Vodní tok Dědina protéká jímacím územím a jsou do něj drénovány podzemní vody z jímaného kolektoru. Hledaná úroveň hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu Lt5 by tak měla odpovídat situaci, kdy již dochází k závažným dopadům sucha a nakládání s vodami na množství povrchových vod v bilančním profilu Mitrov na Dědině.

Pro odvození úrovně hladiny podzemní vody ve vrtu Lt5, která již odpovídá závažnému hydrologickému suchu v jímaném kolektoru, bylo využito pozorování podzemních vod ze sítě ČHMÚ - objekt VP7222 Byzhradec. Tento objekt monitoruje jímaný kolektor, ale není přímo jímáním ovlivněn. Existuje zde pozorování od roku 1991, které zahrnuje historická období hydrologického sucha. Hladina podzemní vody ve vrtu VP7222 poměrně dobře koreluje s hladinou ve vrtu Lt5 (viz obrázek 3). Dále byl zohledněn vliv množství čerpané surové vody z nejbližších pěti jímacích vrtů na úroveň hladiny v pozorovacím vrtu Lt5. Byla odvozena lineární regresní rovnice³, kdy pro výpočet modelované hladiny ve vrtu Lt5 je

³ Pro výpočet parametrů lineární regresní rovnice s uplatněním více nezávisle proměnných veličin je možné uplatnit nástroj Regrese v Analytických nástrojích, které jsou doplňkem Microsoft Excel. Analytický nástroj Regrese provede lineární regresi tak, že pomocí metody nejmenších čtverců proloží přímkou sadou pozorování. Regrese umožňuje analyzovat, jakým způsobem ovlivňují hodnoty jedné nebo více nezávislých proměnných hodnotu jedné závislé proměnné.

uplatněna hladina ve vrtu VP7222 a velikost denního čerpaného množství vody z těchto pěti nejbližších vrtů (vyhlazeno 14denním klouzavým průměrem).

Výsledek analýzy uvádí Rovnice 1. Z obrázku 3 je patrné, že lineární regresní model poměrně dobře reprezentuje pozorování. V některých letech však podhodnocuje zaklesnutí hladiny podzemní vody na konci období sucha. Pro odvození úrovně ve vrtu Lt5, která odpovídá vyčerpání disponibilního množství vody v jímacím území, byla uplatněna hladina ve vrtu VP7222 s pravděpodobností překročení 95 % (283,3 m n. m. odvozená z denních dat 1991–2020). Tato úroveň (a nižší) byla zaznamenána v letech 1993, 1994, 2004, 2009, 2017, 2018 a 2019, což odpovídá známým periodám závažného hydrologického sucha. Velikost denního čerpaného množství vody byla uvažována na úrovni 11000 m³/den. Zvolená hodnota odpovídá průměrnému čerpanému množství v měsíci srpnu (v měsíci srpnu jsou dosahovány nejvyšší průměrné denní odběry v posledních pěti letech).

Rovnice 1 odvozená z výsledků regresní analýzy pro odhad úrovně Lt5 na základě známé hodnoty odběru vody z jímacího území a známé hodnoty hladiny podzemní vody ve vrtu VP7222

$$Lt5 = -0,00018Abs + 0,297VP7222 + 174,24 \quad \text{Hodnota } R^2 = 0,899$$

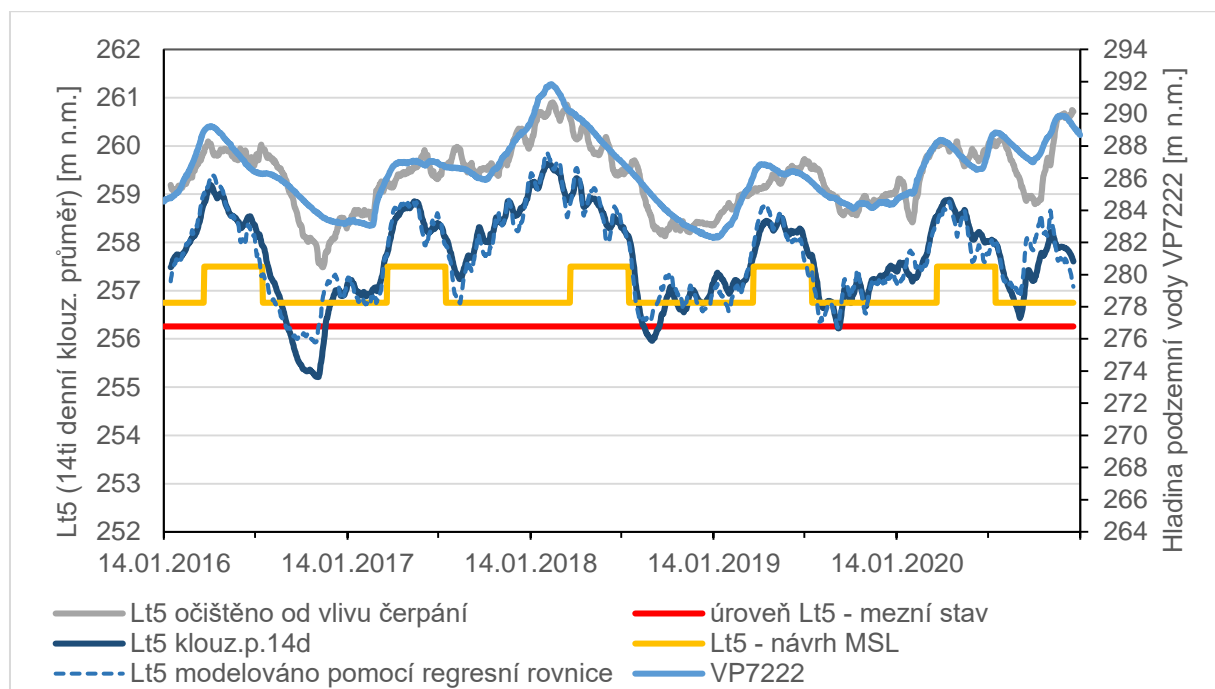
Abs – celkové čerpané množství vody za den (vrty Lt1, Lt2, Lt6, Lt8 a V2 – 14d klouzavý průměr) [m³]

VP7222 – úroveň hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu VP7222 [m n. m.]

Lt5 – modelovaná úroveň hladiny ve vrtu Lt5 [m n. m.] – 14denní klouzavý průměr [m n. m.]

Pro VP7222 = 283,3 m n. m. a Abs=11 000 m³/den

⇒ **Lt5 (stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji 16. 7. – 20. 3.) = 256,40 m n. m.**



Obrázek 3 Průběh hladiny podzemní vody ve vrtu Lt5 – tmavě modře pozorování, čárkovaně modelováno pomocí regresní rovnice, šedě očištěno od vlivu čerpání, porovnáno s průběhem hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu VP7222 (na vedlejší ose), žlutě – výsledný návrh MSL proměnný v roce, zdroj dat: ČHMÚ, Královéhradecká provozní, a.s.

Krok 3 Odhad délky časového období, které bude potřeba pro aktivaci opatření z plánu pro zvládnutí sucha a zahájení jejich působení

Vzhledem ke skutečnosti, že institut minimální hladiny podzemní vody omezuje režim odběrů podzemní vody z jímacího území Litá téměř každoročně, je vodárenská infrastruktura na tento stav již upravena. Ze zkušenosti s chováním vodního zdroje je známo, že změnou režimu odběrů podzemních vod

z jímacího území a zvýšením odběrů vody z jiných zdrojů napojených na vodárenskou síť lze v řádu dnů ovlivnit hladinu v pozorovacím vrtu Lt5 tak, aby omezení dané povolením k nakládání bylo dodrženo. Z tohoto důvodu je možné nenavrhnout časový předstih pro stanovení MSL a úroveň hladiny Lt5 v období od 21. 3. do 15. 7. daná institutem minimální hladiny podzemních vod může přímo plnit funkci hledaného místního směrodatného limitu v tomto období v roce. Jedná se však o specifikum tohoto konkrétního vodního zdroje. V období omezení odběrů vody z jímacího území Litá je třeba se zvýšenou pozorností sledovat stav ostatních vodních zdrojů, které jeho funkci v daném období doplňují.

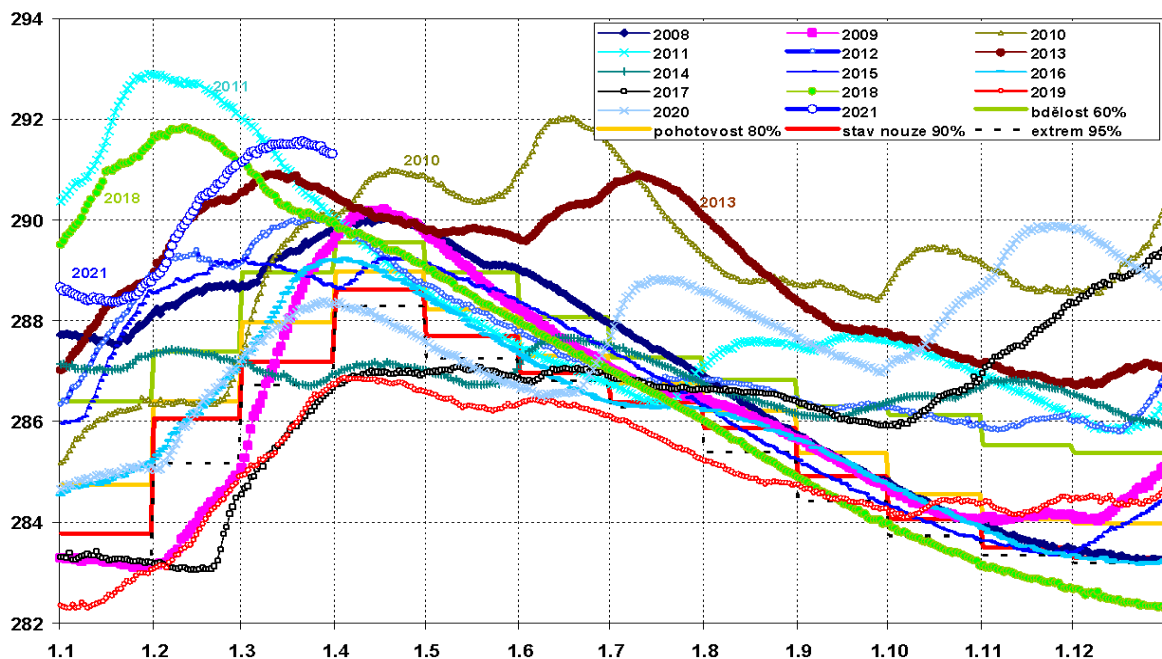
⇒ ***Lt5 MSL (21. 3. – 15. 7.) = 257,50 m n. m.***

Pro ostatní dny v roce byl navržen časový předstih 14 dní, než bude úroveň vyčerpání disponibilního množství vody v jímacím území dosažena. Časový předstih byl takto navržen opět s ohledem na skutečnost, že v případě sucha je možno operativně využít další vodní zdroje propojené v rámci Vodárenské soustavy Východní Čechy. Bude se však jednat o mimořádnou situaci, která pravděpodobně bude vyžadovat spolupráci mezi propojenými vodárenskými společnostmi. Při volbě délky časového předstihu je rovněž potřeba přihlídnout k výsledné frekvenci případného varování v souvislosti s dosažením MSL na daném vodním zdroji. Navržený MSL by měl indikovat skutečně závažná období sucha (obrázek 3 znázorňuje období extrémního hydrologického sucha, může se tedy zdát, že úroveň MSL je dosažena téměř každý rok, což by ale v dlouhodobém horizontu nemělo platit).

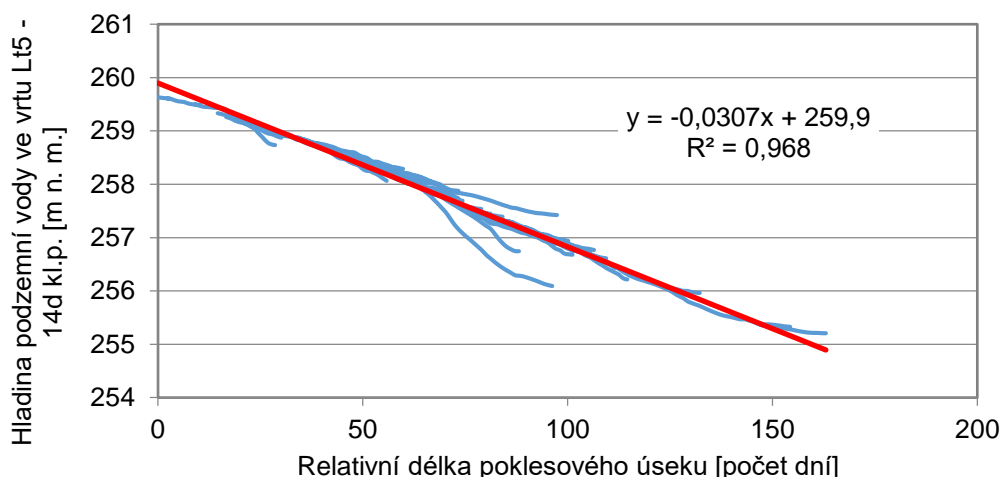
Krok 4 Odvození výsledné úrovně MSL pomocí modelu řídicí výtokové čáry

Jak je patrné z obrázku 4, hladina podzemní vody v jímané struktuře zaklesává charakteristickým způsobem, který lze popsat rovnicí tzv. řídicí výtokové čáry. Pro odvození řídicí výtokové čáry ve vrtu Lt5 bylo uplatněno makro pro Microsoft Excel vyvinuté na univerzitě v Záhřebu (Posavec et al., 2006). Vzhledem k poměrně značným výkyvům v hladině podzemní vody v pozorovacím vrtu Lt5 bylo nutné před vlastní analýzou řídicí výtokové čáry pozorování vyhladit 14denním klouzavým průměrem. Výsledek modelování lineární rovnice řídicí výtokové čáry je zachycen na obrázku 5. Z výsledné rovnice vyplývá, že hladina podzemní vody ve vrtu Lt5 klesá rychlostí přibližně 1 m za 33 dní, za 14 dní to činí přibližně 43 cm. Navržená úroveň MSL od 16. 7. do 20. 3. odpovídá součtu této hodnoty a hodnoty odvozené v kroku 2.

⇒ ***Lt5 MSL (16. 7. – 20. 3.) = 256,40 + 0,43 = 256,83 m n. m. zaokrouhleno na 256,80 m n. m.***

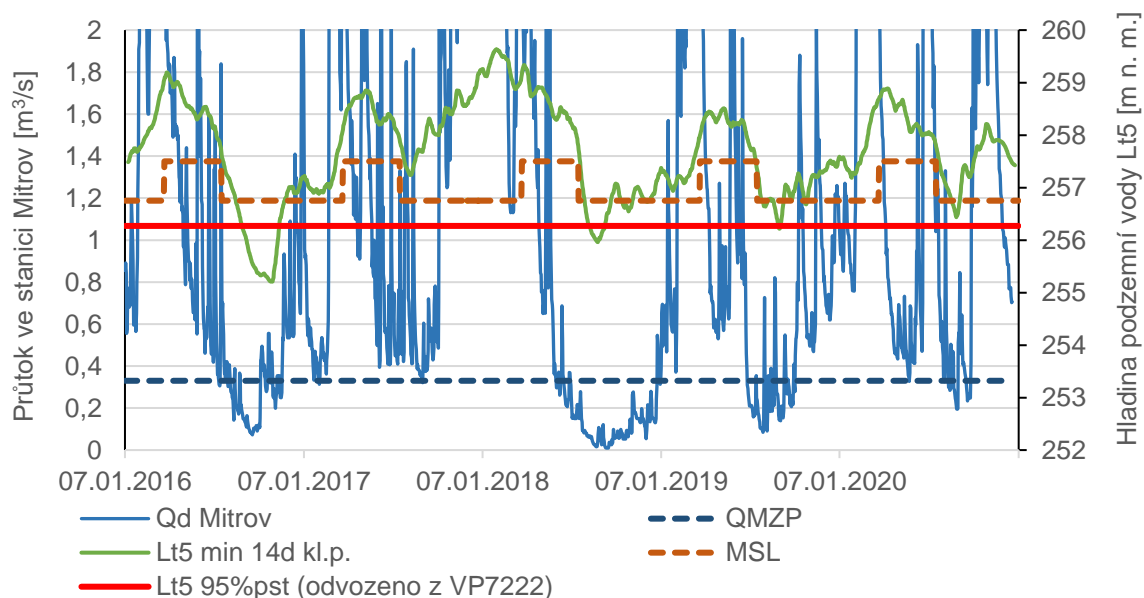


Obrázek 4 Hladina podzemní vody v objektu VP7222 pro jednotlivé roky 2008–2021 v ročním chodu. Na obrázku je patrný určitý charakteristický sklon poklesových úseků, který je možné popsat modelem tzv. řídicí výtokové čáry, zdroj obrázku: Královéhradecká provozní, a.s.



Obrázek 5 Výsledek modelování řídicí výtokové čáry pro vrt Lt5 (pozorování vyhlazeno 14denním klouzavým průměrem) – lineární model pro poklesové úseky a hledaná rovnice, zdroj dat: Královéhradecká provozní, a.s.

Výsledný návrh MSL ve vztahu k pozorovaným průtokům v profilu Mitrov na Dědině je zachycen na obrázku 6. Graf pro řešené období let 2016–2020 indikuje poměrně dobrou časovou shodu mezi obdobími, kdy je dosažen nebo překročen navržený MSL pro Lt5 a kdy dochází k podkročení minimálních zůstatkových průtoků v profilu Mitrov na Dědině. Z grafu je ale patrné, že hydrologické sucho na povrchových vodách předchází hydrologickému suchu ve sledované podzemní zvodni. Případná operativní opatření tak směřují ke zmírnění již probíhajících nepříznivých dopadů realizovaných nakládání s vodami na množství povrchových vod v dolní části povodí Dědiny.



Obrázek 6 Porovnání období, kdy je hladina v Lt5 nižší než navržený MSL (případně než úroveň odpovídající závažnému hydrologickému suchu), s epizodami hydrologického sucha v Dědině v profilu Mitrov - výsledek indikuje poměrně dobrou časovou shodu v období 2016–2020, zdroj dat: ČHMÚ, Královéhradecká provozní, a.s.

Příklad 2: Stanovení MSL pro odběr vody z Orlice pro úpravnu vody v Hradci Králové

Provozovatelem úpravny vody v Hradci Králové je Královéhradecká provozní, a.s. Vodní zdroj je podobně jako jímací území Litá zapojen do Vodárenské soustavy východní Čechy. V době platnosti omezení odběrů vody z jímacího území Litá jsou požadavky na vodu uspokojovány především z úpravny vody v Hradci Králové. Nepříznivé dopady dlouhotrvajícího sucha na jímací území Litá a rovněž na vlastní tok Orlice v Hradci Králové by mohly pro vodárenskou společnost znamenat významné komplikace při zajišťování zásobování obyvatelstva pitnou vodou.

Použitá data

- průměrné denní průtoky v Orlici v profilu VD Moravský jez v Hradci Králové – data z dispečinku Povodí Labe, s. p., bez validace 4/2000–11/2021
- průměrné denní průtoky v Orlici v profilu Týniště nad Orlicí, v Dědině v profilu Mitrov, v náhonu Alba – data z databáze ČHMÚ za stejné období
- průměrné průtoky v Bělečském potoce (krátkodobé pozorování VÚV v rámci projektu Rebilance zásob podzemní vody v ČR)
- výsledky rozborů jakosti surové vody odebírané pro úpravnu vody v Hradci Králové z let 2017-2021 – ukazatele CHSK-Mn, Fe, absorpance, zákal, pH, koliformní bakterie, počet organismů a teplota vody

Krok 1 Výběr vhodné veličiny pro stanovení MSL

Pro úpravnu vody v Hradci Králové byly navrženy dva parametry pro stanovení MSL. První veličinou, která limituje provoz úpravny je průtok v řece Orlici v profilu Hradec Králové Orlice (VD Moravský jez). Pro tento profil je v povolení k nakládání s vodami stanoven minimální zůstatkový průtok na úrovni 2 m³/s. Průtok zde monitoruje Povodí Labe, s. p. a data jsou veřejně dostupná na jeho webových stránkách. Pokud jsou průtoky v Orlici po dobu pěti kalendářních dní za sebou menší než stanovená hodnota, je provozovatel vodního zdroje povinen přerušit odběr.

Z diskuze se zástupci vodárenské společnosti vyplynulo, že v období sucha může být provoz úpravny vody ohrožen nejen z důvodů nedostatečného průtoku v řece Orlici, ale rovněž z důvodů nevyhovujících parametrů jakosti surové vody. Limitujícím parametrem jakosti ve vazbě na suchu může být v případě tohoto vodního zdroje zejména množství živých organismů na 1 ml vody. Další veličinou, která bude sloužit jako MSL je tedy počet organismů v 1 ml surové vody.

Krok 2 Stanovení hodnot vybraných veličin, které představují stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji a limit pro upravitelnost vody

Minimální zůstatkový průtok v řece Orlici stanovený v povolení k nakládání s vodami činí 2 m³/s. To je úroveň odpovídající stavu vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji.

$$\Rightarrow Q_d \text{ Orlice VD Moravský jez (stav vyčerpání disponibilního množství vody)} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ze zkušeností s provozem úpravny vody je známo, že limitující hodnota počtu organismů na 1 ml surové vody pro technologii úpravny vody je 20 000 org./ml.

$$\Rightarrow \text{Počet organismů v 1 ml (limit pro upravitelnost vody)} = 20\,000$$

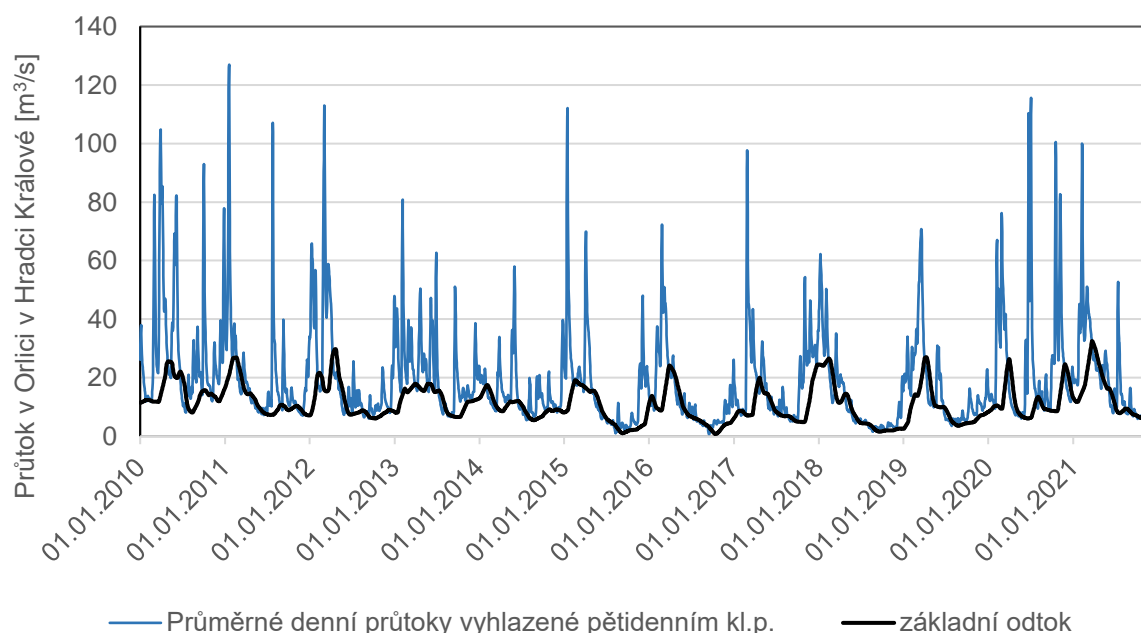
Krok 3 Odhad délky časového období, které bude potřeba pro aktivaci opatření z plánu pro zvládnutí sucha a zahájení jejich působení

Vzhledem k rychlé reakci povrchových vod na změnu hydrologických poměrů byl zvolen časový předstih 14 dní, než dojde k vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji.

Krok 4 Odvození výsledné úrovně MSL

Pro odhad chování průtoků v Orlici v profilu VD Moravský jez v období minimálních průtoků bylo provedeno modelování řídicí výtokové čáry z průměrných denních průtoků pomocí makra pro MS Excel (Posavec, K. a kol. 2010). Vzhledem k rozkolísanosti měřených průtoků ve vyhodnocovaném profilu byly pozorované průtoky před vlastní analýzou vyhlazeny pětidenním klouzavým průměrem. Vyhlazení pozorování je v souladu s podmínkami v povolení k nakládání s vodami.

Nejprve proběhla separace základního odtoku metodou průměrných klouzavých minim. Výsledek separace základního odtoku je zachycen na obrázku 7. Následně byl z těchto hodnot stanoven medián základního odtoku v daném profilu, který je roven $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Z čáry pravděpodobnosti překročení průměrných denních průtoků vyhlazených pomocí pětidenního klouzavého průtoků byla odvozena pravděpodobnost překročení této hodnoty průtoku – 69 %. Hodnota pravděpodobnosti překročení pak následně posloužila při modelování parametrů řídicí výtokové čáry pro rozdělení hydrogramu na přímý odtok a odtok za normálních podmínek nebo za sucha (viz obrázek 8). Pro modelování řídicí výtokové čáry byly uplatněny průtoky v Orlici pozorované v profilu Moravský jez za období 2000–2021.



Obrázek 7 Výsledek separace základního odtoku metodou průměrných klouzavých minimálních průtoků v Orlici v Hradci Králové, zdroj dat: Povodí Labe, s. p.

Pro průtoky nižší než medián základního odtoku byla pomocí makra v Excelu odvozena rovnice 2. Z této rovnice byla odhadnuta hodnota relativní délky poklesového úseku při průtoku na úrovni $2 \text{ m}^3/\text{s}$ - hodnota x . Pro $(x-14)$ byl pomocí rovnice 3 vypočten odhadovaný průtok, který předchází o 14 dní hodnotu $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Návrhová hodnota průtoků v Orlici, který odpovídá MSL činí $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rovnice 2 Rovnice řídící výtokové čáry průtoků v Orlici v profilu VD Moravský jez – pro průtoky nižší než medián základního odtoku 9,6 m³/s (odvozeno z dat za období 2014–2021)

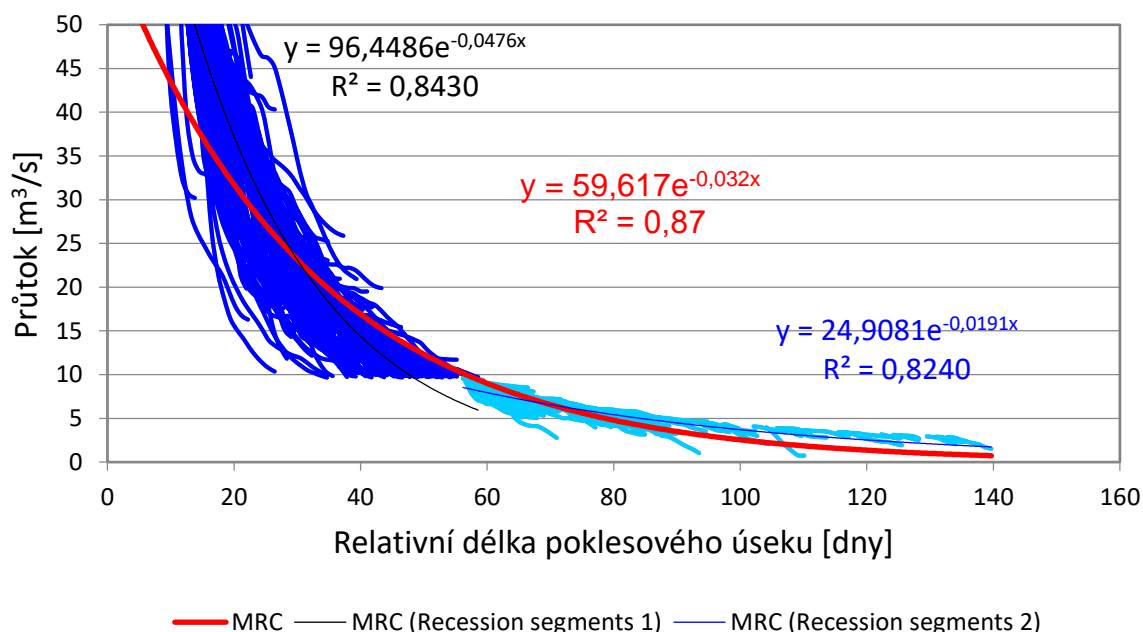
$$Q = 24,91 \cdot e^{-0,019x} \quad R^2 = 0,82$$

Q – průměrný denní průtok v Orlici vyhlazený pětidenním klouzavým průměrem [m³/s]
x – relativní délka trvání poklesové větve hydrogramu [dny]

Tabulka 1 Výpočet průtoku, který předchází hodnotě 2 m³/s o 14 dní

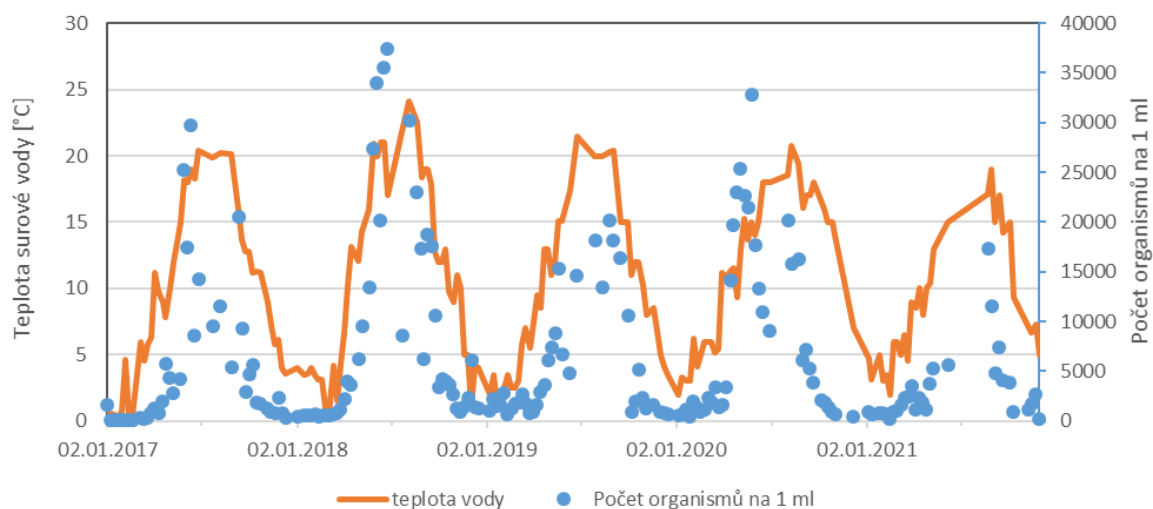
| MCR 24,91e(-0.019*x) | | |
|-----------------------|---------|-------|
| y [m ³ /s] | x [dny] | delta |
| 2.0 | 132 | |
| 2.6 | 118 | 0.6 |

⇒ *Q_d* Orlice VD Moravský jez MSL = 2,6 m³/s

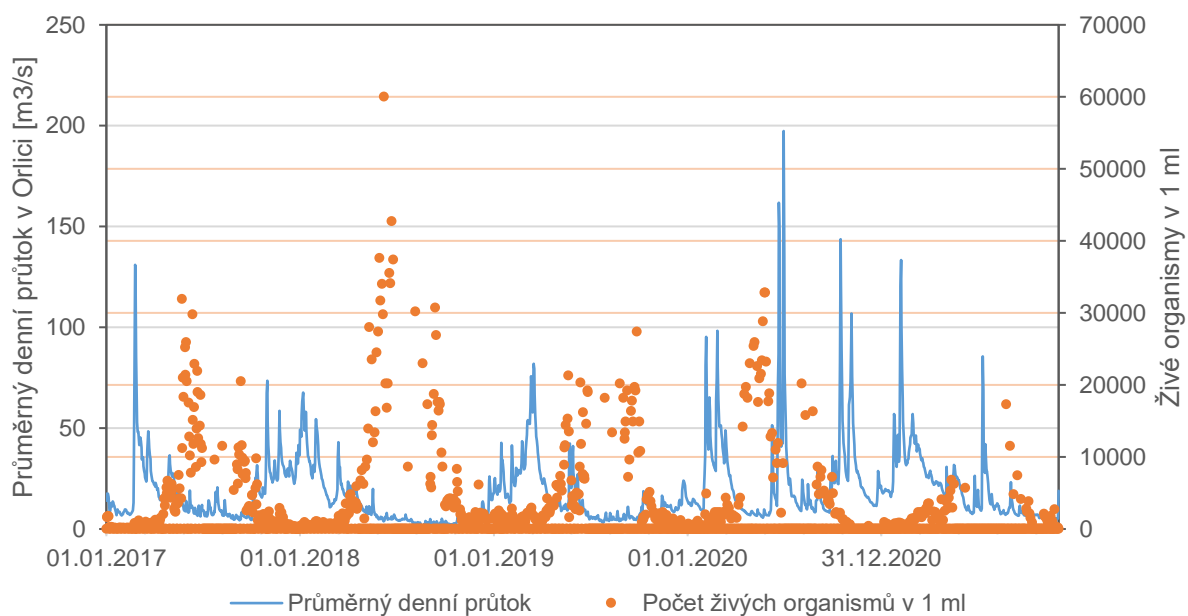


Obrázek 8 Výsledek separace řídící výtokové čáry při uplatnění mediánu základního odtoku – 9,6 m³/s jako dělicí hodnoty pro odhad modelové rovnice v dané části hydrogramu z průměrných denních průtoků (vyhlazeno 5denním klouzavým průměrem) v Orlici v profilu VD Moravský jez 2000–2021, zdroj dat: Povodí Labe, s. p.

Pro odvození MSL pro ukazatel jakosti – počet organismů v surové vodě byla provedena následující regresní analýza. Z dostupných dat bylo možné ověřit, že množství organismů do jisté míry koreluje s teplotou surové vody a s velikostí průtoků (viz grafy na obrázcích 9 a 10). Pro odhad počtu organismů v 1 ml surové vody (závisle proměnná veličina *y*) byly uvažovány dvě nezávisle proměnné veličiny teplota surové vody a průměrný denní průtok v Orlici v den laboratorního rozboru surové vody. Před vlastní regresní analýzou byla vstupní data přepočtena následujícím způsobem – počet organismů byl přepočten na přirozený logaritmus pozorované hodnoty a hodnota průměrného denního průtoků byla nejprve standardizována pomocí střední hodnoty a směrodatné odchylky, z výpočetních důvodů byla přičtena 1 a výsledná hodnota byla rovněž přepočtena na přirozený logaritmus.



Obrázek 9 Teplota surové vody a počet živých organismů na 1 ml vody v letech 2017–2021 - úpravna vody v Hradci Králové, zdroj dat: Královéhradecká provozní, a.s. Rovnice 2 Rovnice pro odhad počtu organismů v 1 ml surové vody při známé teplotě surové vody a známém průtoku v Orlici (odvozeno pro období 2017–2021)



Obrázek 10 Průměrný denní průtok v Orlici a počet živých organismů v 1 ml surové vody v letech 2017–2021 - úpravna vody v Hradci Králové, zdroj dat: Královéhradecká provozní, a.s., Povodí Labe, s. p.

Rovnice 3 představuje výsledný model pro odhad počtu organismů v 1 ml surové vody na základě známé hodnoty teploty surové vody a velikosti průtoků. Model je zatížen poměrně značnou nejistotou, výsledný násobný koeficient determinace činí 0,67.

Rovnice 3 Odhad počtu organismů v 1 ml surové vody na základě známé teploty vody a průtoku v Orlici

$$\ln(\text{počet org.}) = 0,18 \cdot T - 0,1185 \cdot \ln\left(\left(\frac{Q-\mu}{\sigma}\right) + 1\right) + 6 \quad \text{Hodnota } R^2 = 0,67$$

T - teplota surové vody [°C]

Q - průměrný denní průtok v Orlici [m³/s]

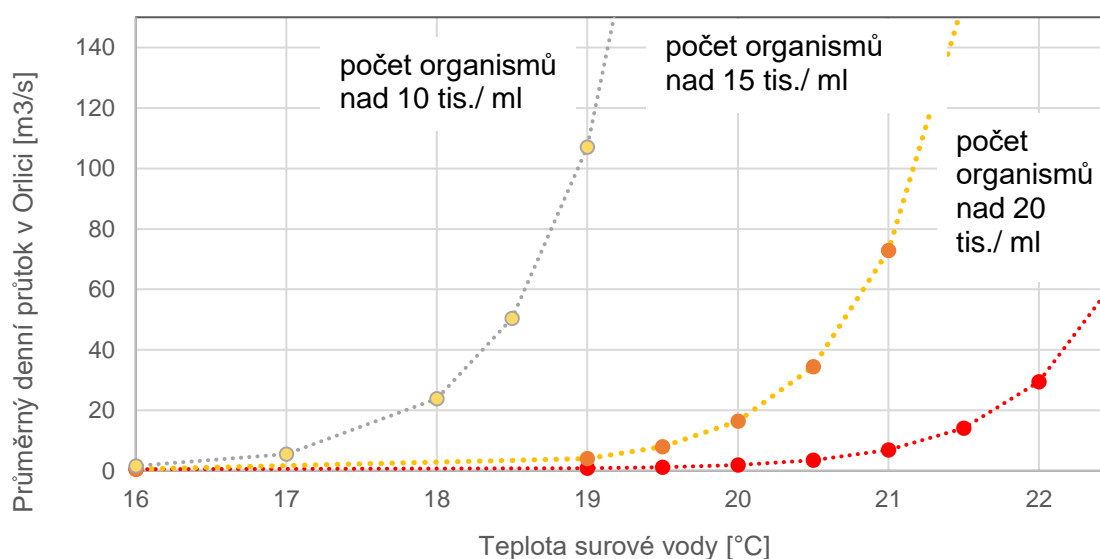
μ – střední hodnota průtoku - $\mu = 18,63 \text{ m}^3/\text{s}$ (stanoveno pro všechny průměrné denní průtoky v období 2017–2021)

σ – směrodatná odchylka průtoku - $\sigma = 18,102 \text{ m}^3/\text{s}$ (stanoveno pro všechny průměrné denní průtoky v období 2017–2021)

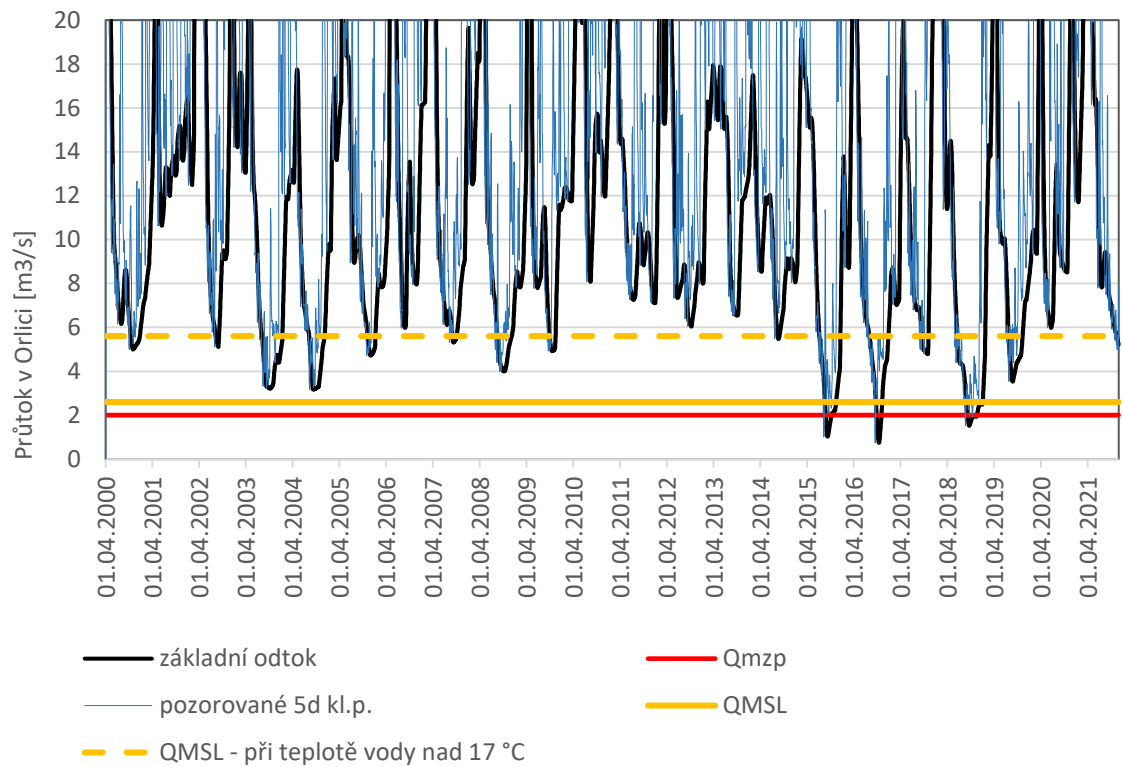
Rovnice byla uplatněna pro hledání kritické kombinace teploty surové vody a průtoku, při které nastává vysoká pravděpodobnost výskytu velkého počtu živých organismů. Výsledek uvádí graf na obrázku 11. Výsledná kombinace, která již představuje závažné riziko výskytu velkého počtu živých organismů nastává v okamžiku, kdy teplota surové vody přesahuje $17 \text{ }^\circ\text{C}$ a průtok klesá pod hodnotu $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Podle modelu za takových podmínek činí počet živých organismů 10 000 v 1 ml vody, což je limitní hodnota ukazatele mikroskopického obrazu surové vody odebrané z povrchových vod podle přílohy č. 13 vyhlášky 428/2001 Sb.

Pro rozhodování o ohrožení daného vodního zdroje dopady sucha je tedy potřeba přihlížet nejen k velikosti průtoku, ale rovněž k hodnotě teploty surové vody. V případě, že jsou dosahovány průtoky pod hodnotou $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ a zároveň je surová voda teplejší než $17 \text{ }^\circ\text{C}$, existuje vysoká pravděpodobnost výpadku vodního zdroje z důvodů nedostatečné jakosti surové vody. Frekvence překročení MSL v časové řadě průměrných denních průtoků v období 2010–2021 je zobrazena na obrázku 12.

⇒ **Počet organismů MSL - teplota surové vody větší než $17 \text{ }^\circ\text{C}$ a zároveň průtok v Orlici menší než $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$**



Obrázek 11 Podmínky (průtok a teplota vody) pro vývoj živých organismů v surové vodě v Orlici – kritické podmínky, při kterých je vysoká pravděpodobnost výskytu velkého počtu živých organismů, zdroj dat: Královéhradecká provozní, a.s., Povodí Labe, s. p.



Obrázek 12 Výsledný návrh MSL pro veličinu průtok v Orlici v profilu VD Moravský jez pro úpravnu vody v Hradci Králové, zdroj dat: Povodí Labe, s. p.

Příklad 3: Stanovení MSL pro víceúčelovou nádrž Vranov pro úpravnu vody Štítary

Provozovatelem vodního díla Vranov je Povodí Moravy, s. p. Nádrž zajišťuje celou řadu funkcí včetně provozu špičkové vodní elektrárny, odběrů surové vody pro úpravnu vody Štítary, nadlepšování do Dyje pod nádrží pro potřeby zemědělských závlah, pro Národní park Podyjí, pro Dyjsko-mlýnský náhon dané dohodou s Rakouskem atd. Dá se předpokládat, že společnost Vodárenská akciová společnost, a.s., divize Třebíč, která provozuje odběry surové vody z nádrže pro skupinový vodovod Znojmo a skupinový vodovod Vranov – Moravské Budějovice – Dukovany, bude vybrána mezi uživatele významné pro území kraje z hlediska připravovaného Plánu pro zvládnutí sucha a stavu nedostatku vody Jihomoravského kraje.



Obrázek 13 Plovoucí čerpací stanice na nádrži Vranov, která odebírá surovou vodu pro úpravnu vody Štítary.

Použitá data

- denní stavy hladiny v nádrži v období 1/2013 až 11/2021
- denní průměrné průtoky ve stanicích Podhradí nad Dyjí, Vysočany (přítoky do nádrže) a Hamry nad Dyjí (odtok z nádrže)
- schválený manipulační řád nádrže

Krok 1 Výběr vhodné veličiny pro stanovení MSL

Pro účely podpory rozhodování o vyhlášení stavu nedostatku vody je v případě nádrže Vranov rozhodující úroveň hladiny v nádrži.

Krok 2 Stanovení hodnoty vybrané veličiny, která představuje stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji

Konzultační tým zahrnoval zástupce odboru životního prostředí Jihomoravského kraje, zástupce provozovatele vodního díla – vedoucího dispečinku Povodí Moravy, s. p., zástupce vodárenské společnosti a zástupce společnosti provozující energetická zařízení. Bylo dohodnuto, že stav vyčerpání disponibilního množství vody bude odvozen od technického limitu čerpací stanice úpravy vody. Čerpací stanice je technologicky jedinečná, neboť zajišťuje odběr vody z plovoucího pontonu přímo z hladiny nádrže (viz obrázek 13). V minulosti se však ukázalo, že při poklesu hladiny vody v nádrži více

než 12 m pod úroveň max. hladiny zásobního objemu, která činí 349 m n. m., může dojít k poškození tohoto odběrného objektu.

⇒ ***Vranov hl. vody v nádrži (stav vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji) = 337 m n. m.***

Krok 3 Odhad délky časového období, které bude potřeba pro aktivaci opatření z plánu pro zvládnání sucha a zahájení jejich působení

Z diskuze konzultačního týmu vyplynulo, že bude dobré, aby na přijetí operativních opatření bylo nejméně 30 dní, raději však více s ohledem na složitost situace pod nádrží, která ovlivňuje i sousední stát.

Krok 4 Odvození výsledné úrovně MSL

Pro odvození úrovně MSL je možné použít metodu zjednodušeného vodohospodářského řešení, kdy hledáme potřebný disponibilní objem vody v nádrži, který v podmínkách hydrologického sucha zajistí požadavky na vodní zdroj minimálně na požadovanou dobu stanovenou výše. Tyto požadavky vycházejí z údajů o nakládání uvedených ve schváleném manipulačním řádu nádrže. V odůvodněných případech mohou být požadavky na vodní zdroj stanoveny s ohledem na reálnou zkušenost s fungováním vodního zdroje během období sucha (zejména pokud povolené a v manipulačním řádu uvedené hodnoty významně převyšují reálné odběry i v období sucha).

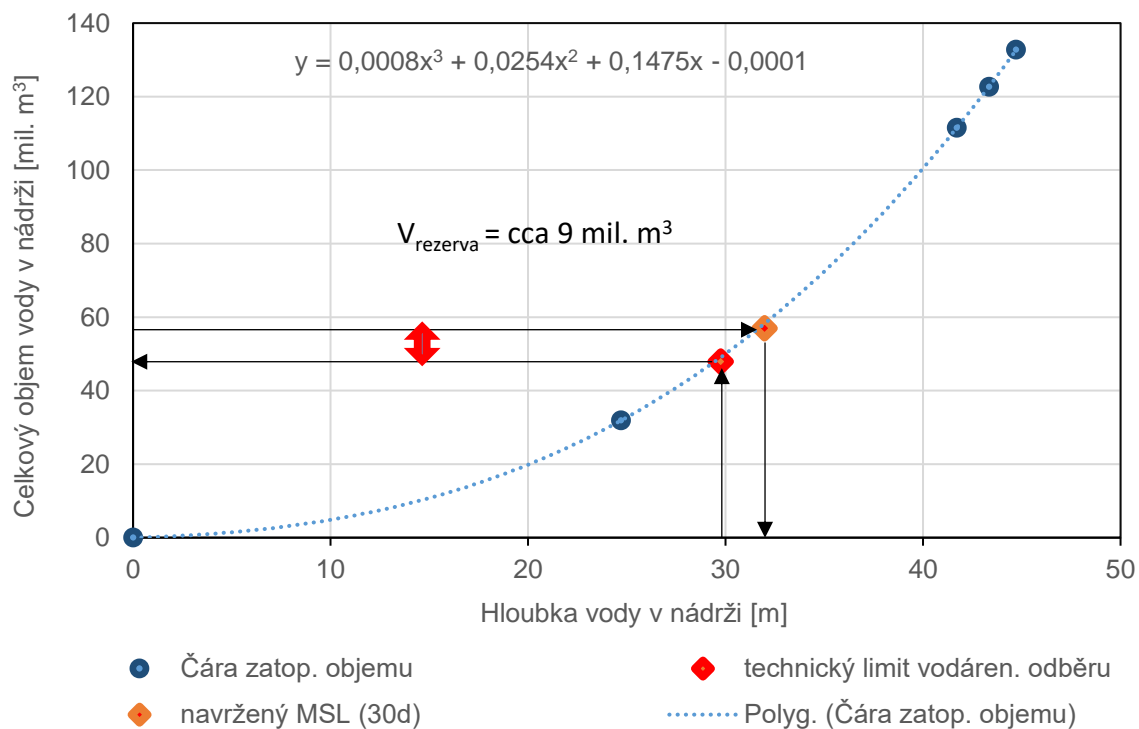
Pro odvození MSL byla uplatněna hydrologická data pro poslední suché období 2014–2019, které představovalo jednu z nejzávažnějších period hydrologického sucha v ČR. Hledáme potřebný disponibilní objem vody v nádrži, který pokryje požadavky na vodu dle platného manipulačního řádu na dobu stanovenou v kroku 3 – tedy na 30 dní pro nejvíce nepříznivé období v roce. Navržené řešení uvažuje s hypotetickým scénářem přítoků do nádrže v letním období na úrovni průměru přítoků do nádrže v letech 2014–2019.

- 1) Pro vývoj hladiny vody v nádrži je kritické období letních měsíců červenec až září.
- 2) Byl stanoven průměrný přítok do nádrže pro měsíce červenec, srpen a září v letech 2014–2019 $Q_{\text{přítok}} = 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (průměr ze součtu pozorování stanic 430000 Podhradí nad Dyjí a 432000 Vysočany), s připočtením přítoku z vlastního povodí vodní nádrže (5 % plochy povodí) $1,7 \cdot 1,05 = 1,79 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 3) Hladina vody v nádrži před zaklesnutím na úroveň 337 m n. m. se dle platného manipulačního řádu vyskytuje v regulačním stupni 4 (do kóty 339,45 m n. m.) nebo stupni 5. Odtok z nádrže dle manipulačního řádu v regulačním stupni 4 činí v měsících červenec až září průměrně $5,16 \text{ m}^3/\text{s}$, v regulačním stupni 5 činí $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ včetně přímých odběrů z nádrže pro vodárenské účely a včetně výparu z hladiny. (Pro porovnání v letech 2014–2019 činil průměrný odtok z nádrže v měsících červenec až září podle pozorování stanice 434000 Hamry nad Dyjí $4,66 \text{ m}^3/\text{s}$, s připočtením vodárenského odběru $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a výparu z vodní hladiny $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (dle MŘ) lze odhadovat celkovou ztrátu vody z nádrže přibližně $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$.)
- 4) Rozdíl průměrného přítoku $1,79 \text{ m}^3/\text{s}$ a požadavků na vodní zdroj dle platného manipulačního řádu $5,16 \text{ m}^3/\text{s}$ tedy během sucha činil přibližně $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$, což za 30 dní odpovídá objemu vody $8,813 \text{ mil m}^3$ vody (možno zaokrouhlit na 9 mil m^3).
- 5) Z rovnice čáry zatopených objemů lze odvodit, že danému objemu odpovídá výška vodního sloupce $2,2 \text{ m}$ (viz obrázek 14).

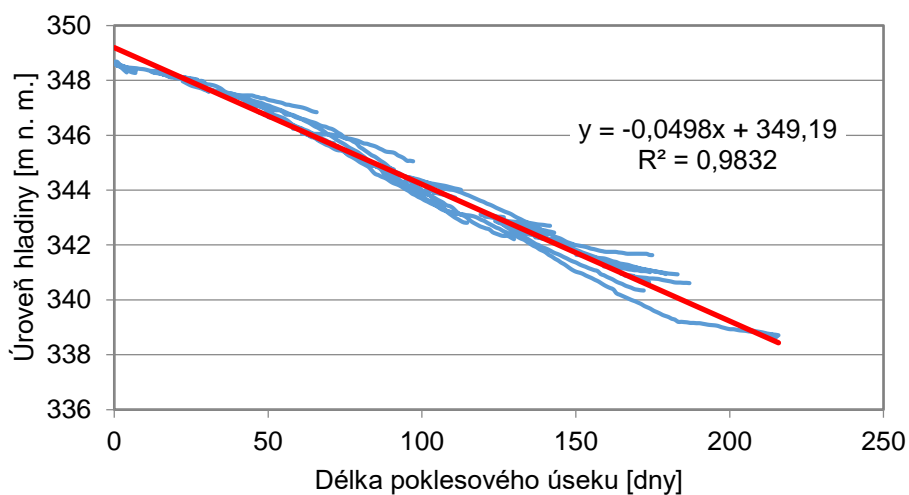
⇒ ***Vranov hl. vody v nádrži MSL = 337,0 + 2,2 = 339,2 m n. m.***

Další možností, jak odhadnout výšku vodního sloupce nad úrovní vyčerpání disponibilního množství vody, je modelování řídicí výtokové čáry. Podobně jako podzemní zvodeň, i vodní nádrž se chová do určité míry deterministicky. Na obrázku 15 je výsledný graf poklesových úseků hladiny vody v nádrži a odhad lineární rovnice spojnice trendu řídicí výtokové čáry. Modelování proběhlo pro období 1. 3. 2015 – 1. 7. 2020 a výsledná odhadovaná rychlost poklesu hladiny v tomto období činila přibližně 5 cm za den. Z tohoto výsledku vyplývá, že by pro 30 dní časového předstihu stačilo $1,5 \text{ m}$ vodního sloupce nad

úrovní 337 m n. m.. Rezerva 2,2 m odvozená v předchozí části by tak mohla vystačit na přibližně 44 dní.



Obrázek 14 Čára zatopených objemů odvozená z údajů uvedených v manipulačním řádu nádrže, červeně vyznačen technický limit vodárenského objemu, oranžově navržený MSL pro časový předstih 30 dní, zdroj dat: manipulační řád nádrže Vranov – Povodí Moravy, s. p.



Obrázek 15 Lineární model řídicí výtokové čáry pro souvislé poklesové úseky hladiny vody v nádrži Vranov v období 1.3.2015–1.7.2020 – odhad poklesu hladiny odpovídá 5 cm vodního sloupce za den (vyhodnoceno pomocí makra K. Posavce v MS Excel), zdroj dat: Povodí Moravy, s. p.

Příklad 4: Stanovení MSL pro odběr vody z vodárenské nádrže Vír

Provozovatelem vodního díla Vír je Povodí Moravy, s. p. VD Vír je vodárenskou nádrží, představuje zdroj vody pro úpravnu vody Vír a skupinový vodovod Žďársko (provozovatelem je VAS, a.s., divize Žďár nad Sázavou) a pro úpravnu vody Švařec a Vírský oblastní vodovod (Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.). Nádrž je zdrojem pitné vody pro část kraje Vysočina a pro Brno – tj. Jihomoravský kraj. Způsob hospodaření s vodou v období sucha a během stavu nedostatku vody tedy musí vycházet ze vzájemné dohody mezi oběma kraji (respektive příslušnými orgány pro sucho).

Použitá data:

- měsíční průměrná úroveň hladiny v nádrži 1/2002 až 12/2019 (data z databáze vodohospodářské bilance VÚV TGM, v. v. i.)
- průměrné denní přítoky do nádrže 1/1981-12/2020 (ČHMÚ)

Krok 1 Výběr vhodné veličiny pro stanovení MSL

Pro VD Vír je veličinou rozhodující pro vyhlášení stavu nedostatku vody úroveň hladiny vody v nádrži.

Krok 2 Stanovení hodnoty vybrané veličiny, která představuje mezní stav

Z výsledků projednání návrhu MSL pro VD Vír v rámci konzultačního týmu vyplynulo, že úroveň hladiny vody v nádrži, která představuje mezní stav je hladina, která odpovídá třetímu regulačnímu stupni dle dispečerského grafu schváleného manipulačního řádu VD Vír. Při této úrovni činí nadlepšený průtok pod nádrží 0,63 m³/s. Takový průtok však představuje nepříznivý stav pro úsek Svratky pod nádrží, kde jsou realizována další povolená nakládání s vodami. Ze zkušeností z posledních suchých let je známo, že při průtocích v profilu pod nádrží pod 1 m³/s se projevují problémy např. na rybím hospodářství v Ujčově.

⇒ *Úroveň hladiny VN Vír (mezní stav) = 450 m n. m.*

Krok 3 Odhad délky časového období, které bude potřeba pro aktivaci opatření z plánu pro zvládnutí sucha a zahájení jejich působení

Vzhledem k tomu, že VD představuje zdroj pitné vody pro Kraj Vysočina a pro Jihomoravský kraj, v případě vyhlášení stavu nedostatku vody bude potřeba koordinace orgánů pro sucho z obou krajů. Navrhuje se časový předstih 6 týdnů před tím, než nastane mezní stav.

Krok 4 Odvození výsledné úrovně MSL

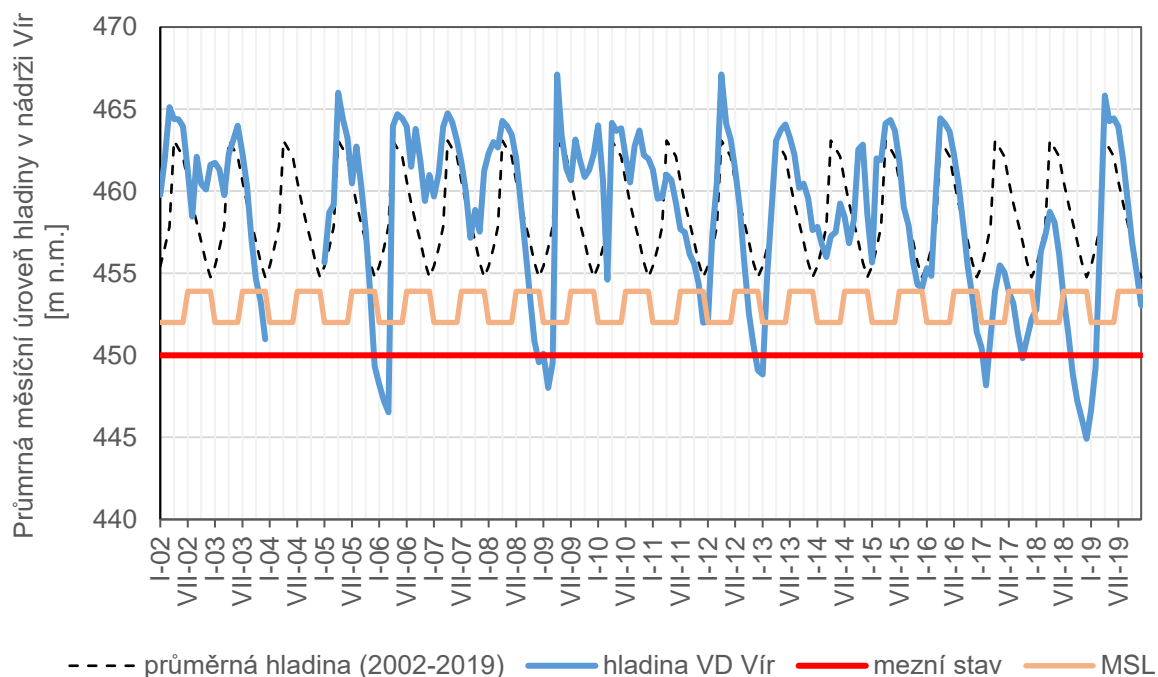
Pro odvození úrovně MSL, která v případě dlouhotrvajícího sucha bude předcházet meznímu stavu o 6 týdnů, se vycházelo z pravidel manipulace v zásobním prostoru uvedených v platném manipulačním řádu. Hledaná úroveň hladiny vody v nádrži se nachází ve druhém regulačním stupni, který uvažuje s hodnotou nadlepšeného průtoku v profilu pod nádrží na úrovni 1,3 m³/s a s odběry vody pro vodárenské účely dohromady na úrovni 0,85 m³/s.

Byly sestaveny tři scénáře hypotetického přítoku do nádrže v období sucha. Pro sestavení scénářů přítoků do nádrže v suchých letech byly vybrány roky, kdy hladina vody v nádrži (průměrná měsíční) klesla pod úroveň 450 m n. m. Jedná se o roky 2003, 2005, 2008, 2012, 2016 a 2018 (vybráno z časové řady 2002–2019 průměrné měsíční hladiny vody v nádrži). Následně byly spočteny statistické charakteristiky průtoků pro každý jednotlivý den v roce v těchto vybraných letech (průměr, medián a zaznamenané minimum) – tři scénáře přítoku do nádrže. Hledáme potřebný disponibilní objem pro pokrytí rozdílu mezi přítokem a požadavky na vodu dané manipulačním řádem na 42 dní. Potřebný rezervní objem na pokrytí ztráty v daném měsíci vycházel z průměru ztráty v daném měsíci a v měsíci předcházejícím (např. pro leden z hodnot v lednu a v prosinci). Výsledky pro scénáře je možno porovnat se výsledky získanými pro přítoky do nádrže pozorované v roce 2018.

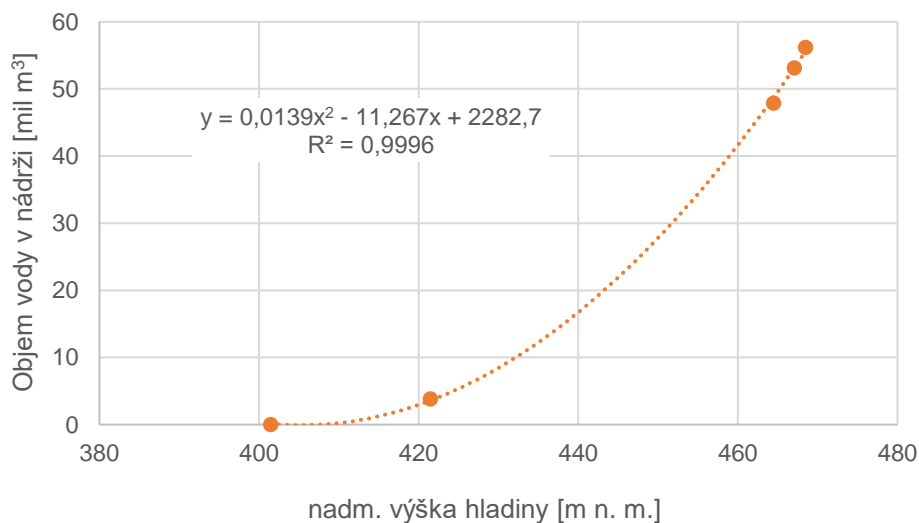
Výsledné objemy pro tyto tři scénáře zachycují nejistotu související s variabilitou přítoků v období let 2002–2019. Z těchto výsledků byl odvozen návrh MSL pro měsíce leden až červen na úrovni

452 m n. m. (rezervní objem 2,5 mil m³) a pro měsíce červenec až prosinec na úrovni 453,9 m n. m. (5 mil. m³). Výsledný návrh ve vztahu k průměrným měsíčním hladinám za období 2002–2019 je zachycen na obrázku 16. Výpočtové hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Převod hodnoty potřebného objemu vody v nádrži na úroveň hladiny proběhl pomocí rovnice odvozené z grafu zatopených objemů (údaje převzaty z manipulačního řádu VD Vír) – viz obrázek 17.

- ⇒ **Úroveň hladiny VN Vír MSL (měsíce 1-6) = 452 m n. m.**
- ⇒ **Úroveň hladiny VN Vír MSL (měsíce 7-12) = 453,9 m n. m.**



Obrázek 16 Průměrné měsíční hladiny v nádrži Vír v letech 2002–2019, mezní stav na úrovni 3. regulačního stupně a návrh MSL proměnného v roce – od ledna do června na úrovni 452 m n. m. a od července do prosince na úrovni 453.9 m n. m., zdroj dat: VÚV TGM, v. v. i.



Obrázek 17 Čára zatopených objemů a rovnice spojnice trendu, zdroj dat: manipulační řád nádrže Vír – Povodí Moravy, s. p.

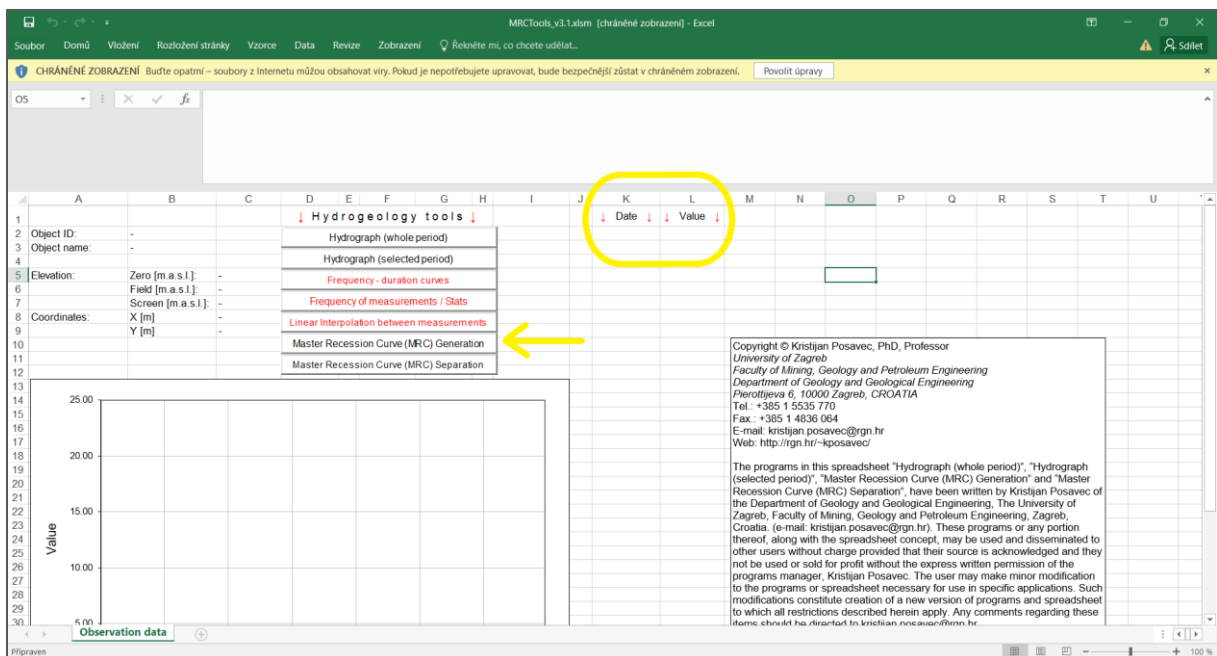
Tabulka 2 Výpočet objemu vody v nádrži Víř, který odpovídá MSL – scénáře přítoku do nádrže v jednotlivých měsících v roce, požadavky na vodu stanovené manipulačním řádem pro 2. regulační stupeň, výsledná ztráta vody z nádrže a odpovídající objem vody pro 42 dní (ve výpočtu je uvažována ztráta jako průměr daného a předcházejícího měsíce) a výsledný návrh rezervního objemu pro MSL a odpovídající úroveň hladiny vody v nádrži.

| Měs. | přítok suché roky [m3/s] | | | 2018 prům. | Q | | | rozdíl přítok-odtok | | | | rezervní objem 42 dní mil m3 | | | | objem MSL návrh mil m3 | hladina MSL m n.m. |
|------|-----------------------------|------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|-------|-------|-------|------------------------------|------|------|------|---------------------------------|--------------------------|
| | průměr | med. | min | | výpar m3/s | Qnadl m3/s | odběr m3/s | prům. | Med. | min | 2018 | prům. | med. | min | 2018 | | |
| 1 | 4.55 | 4.09 | 1.62 | 2.64 | 0.004 | 1.30 | 0.85 | 2.40 | 1.93 | -0.53 | 0.48 | --- | --- | 3.21 | 0.45 | 27.3+2.5 =29.8 | 452.0 |
| 2 | 4.27 | 3.21 | 1.82 | 1.91 | 0.009 | 1.30 | 0.85 | 2.11 | 1.05 | -0.34 | -0.25 | --- | --- | 1.58 | --- | | |
| 3 | 6.69 | 5.24 | 2.22 | 2.71 | 0.024 | 1.30 | 0.85 | 4.51 | 3.07 | 0.05 | 0.53 | --- | --- | 0.52 | --- | | |
| 4 | 2.87 | 2.46 | 1.69 | 1.80 | 0.037 | 1.30 | 0.85 | 0.68 | 0.27 | -0.49 | -0.38 | --- | --- | 0.80 | --- | | |
| 5 | 2.30 | 1.65 | 0.85 | 0.95 | 0.048 | 1.30 | 0.85 | 0.10 | -0.55 | -1.35 | -1.25 | --- | 0.51 | 3.34 | 2.96 | | |
| 6 | 1.25 | 1.14 | 0.66 | 0.74 | 0.058 | 1.30 | 0.85 | -0.96 | -1.06 | -1.55 | -1.47 | 1.56 | 2.93 | 5.25 | 4.94 | | |
| 7 | 1.42 | 1.00 | 0.56 | 0.57 | 0.064 | 1.30 | 0.85 | -0.80 | -1.21 | -1.66 | -1.64 | 3.18 | 4.13 | 5.81 | 5.65 | 27.3+5 =32.3 | 453.9 |
| 8 | 0.85 | 0.66 | 0.27 | 0.27 | 0.060 | 1.30 | 0.85 | -1.36 | -1.55 | -1.94 | -1.94 | 3.90 | 5.02 | 6.52 | 6.49 | | |
| 9 | 0.88 | 0.80 | 0.34 | 0.37 | 0.045 | 1.30 | 0.85 | -1.32 | -1.40 | -1.85 | -1.83 | 4.85 | 5.35 | 6.88 | 6.83 | | |
| 10 | 1.02 | 0.95 | 0.63 | 0.67 | 0.028 | 1.30 | 0.85 | -1.15 | -1.23 | -1.55 | -1.51 | 4.49 | 4.76 | 6.18 | 6.06 | | |
| 11 | 1.07 | 0.95 | 0.56 | 0.62 | 0.021 | 1.30 | 0.85 | -1.10 | -1.22 | -1.61 | -1.55 | 4.09 | 4.44 | 5.74 | 5.55 | | |
| 12 | 2.16 | 1.88 | 0.92 | 1.43 | 0.008 | 1.30 | 0.85 | 0.00 | -0.27 | -1.24 | -0.73 | 2.00 | 2.71 | 5.18 | 4.14 | | |

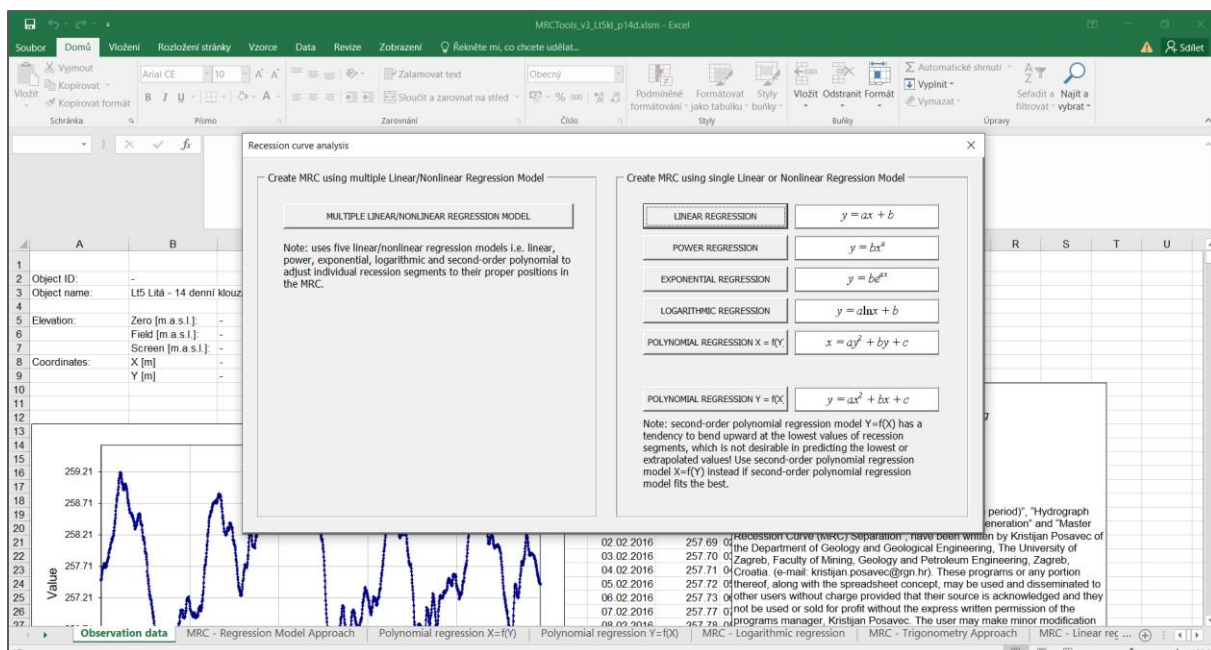
Návod pro práci s makrem pro modelování řídicí výtokové čáry

1. Generování řídicí výtokové čáry pro pozorování hladiny podzemní vody

- 1) Denní data v podobě datum a průměrná denní hodnota uložte do buněk nadepsaných „Date“ a „Value“, datum ve formátu DD.MM.YYYY (obrázek 18).
- 2) Stiskněte tlačítko „Master Recession Curve (MRC) **Generation**“
- 3) Následně zvolte první možnost – tlačítko „Create Master Recession Curve (MRC) using Linear/Nonlinear Regression Model Approach,“
- 4) V dalším kroku je možno zvolit buď tlačítko na levé straně dialogového okna a nechat vygenerovat model řídicí výtokové čáry s nejvyšší hodnotou R^2 bez možnosti výběru typu regresního modelu, anebo postupně generovat modely pro řídicí výtokovou čáru s uplatněním nabídky vpravo a následně hledat model, který nejlépe vystihuje pozorované poklesové větve zejména v jejich nejnižší části. Před každým výpočtem je nutno zvolit časové období, které má být do analýzy uplatněno. Data se vkládají ve formátu dd/mm/yyyy (viz obrázek 19).
- 5) Na novém listu se zobrazí výsledek analýzy i s grafem poklesových úseků a výslednou rovnicí řídicí výtokové čáry. V případě, že model dobře vystihuje zejména konce suchých období, je možno výslednou rovnici dále využít pro predikci chování vodního zdroje v období sucha.



Obrázek 18 Vložení dat do listu „Observation data“ a spuštění analýzy řídicí výtokové čáry



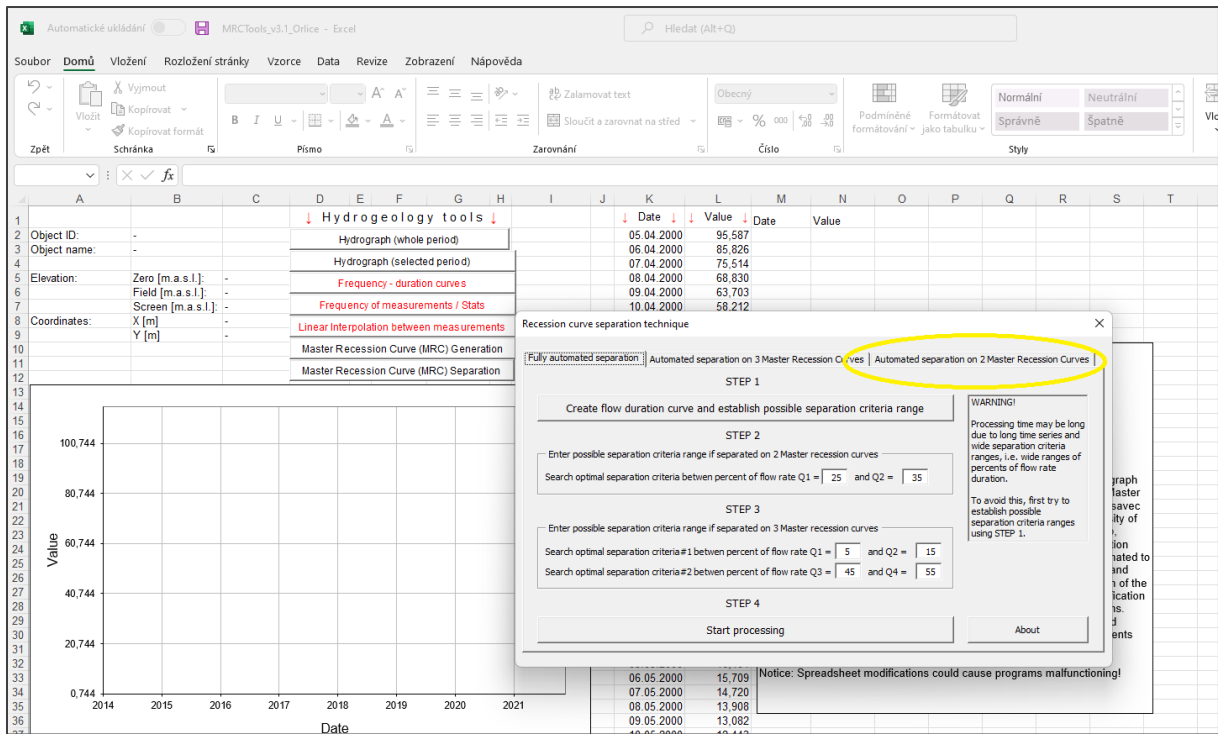
Obrázek 19 Dialogové okno pro analýzu řídicí výtokové čáry – volba typu regresního modelu

2. Generování řídicí výtokové čáry pro řadu průměrných denních průtoků

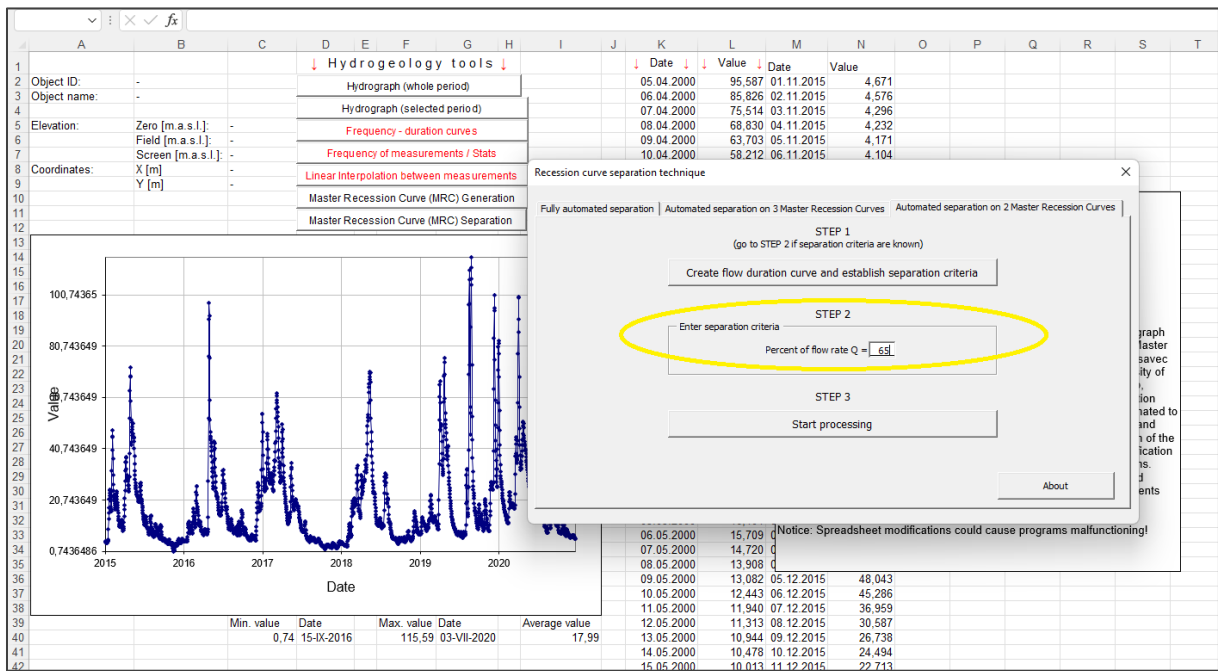
- 1) Před vlastní analýzou řídicí výtokové čáry je třeba stanovit hodnotu průtoků, pro který se rozdělí poklesové větve na samostatné úseky a budou hledány rovnice pro takto rozdělené poklesové úseky zvlášť – tzv. separační kritérium. Doporučujeme jako hodnotu separačního kritéria zvolit medián základního odtoku odvozený metodou 30denních klouzavých minim.
- 2) Denní data v podobě datum a průměrná denní hodnota průtoků uložte do buněk nadepsaných „Date“ a „Value“, datum ve formátu DD.MM.YYYY.
- 3) Stiskněte tlačítko „Master Recession Curve (MCR) Separation“.
- 4) V následujícím dialogovém okně zvolte třetí záložku „Automated separation on 2 Master Recession Curves“ (viz obrázek 20) a spusťte STEP 1 „Create flow duration curve and establish possible separation criteria range“. Výpočet vyžaduje určení začátku a konce období vybraného pro analýzu. Na novém listu s názvem „Flow Duration Curve“ se vygeneruje čára pravděpodobnosti překročení a ze seřazených průtoků je možno odečíst hodnotu pravděpodobnosti překročení průtoků, který bude sloužit jako separační kritérium.
- 5) Vraťte se do listu „Observation data“, znovu stiskněte tlačítko „Master Recession Curve (MCR) Separation“ a v nastavení kroku 2 uveďte hodnotu pravděpodobnosti překročení průtoků, který slouží jako separační kritérium (obrázek 21).
- 6) Spusťte analýzu krokem 3, která rovněž vyžaduje volbu období zvoleného pro analýzu.
- 7) Pro další analýzu chování vodního zdroje v období sucha doporučujeme uplatnit rovnici odvozenou pro spodní část hydrogramu – viz obrázek 22.

V případě modelování řídicí výtokové čáry pro povrchové vody doporučujeme provést **několik variant** nastavení separačního kritéria (kolem hodnoty mediánu základního odtoku) a provést analýzu pro různě zvolená časová období. Z výsledků modelování je třeba vybrat takový model, který dobře vystihuje sklon poklesových úseků v dolní části hydrogramu.

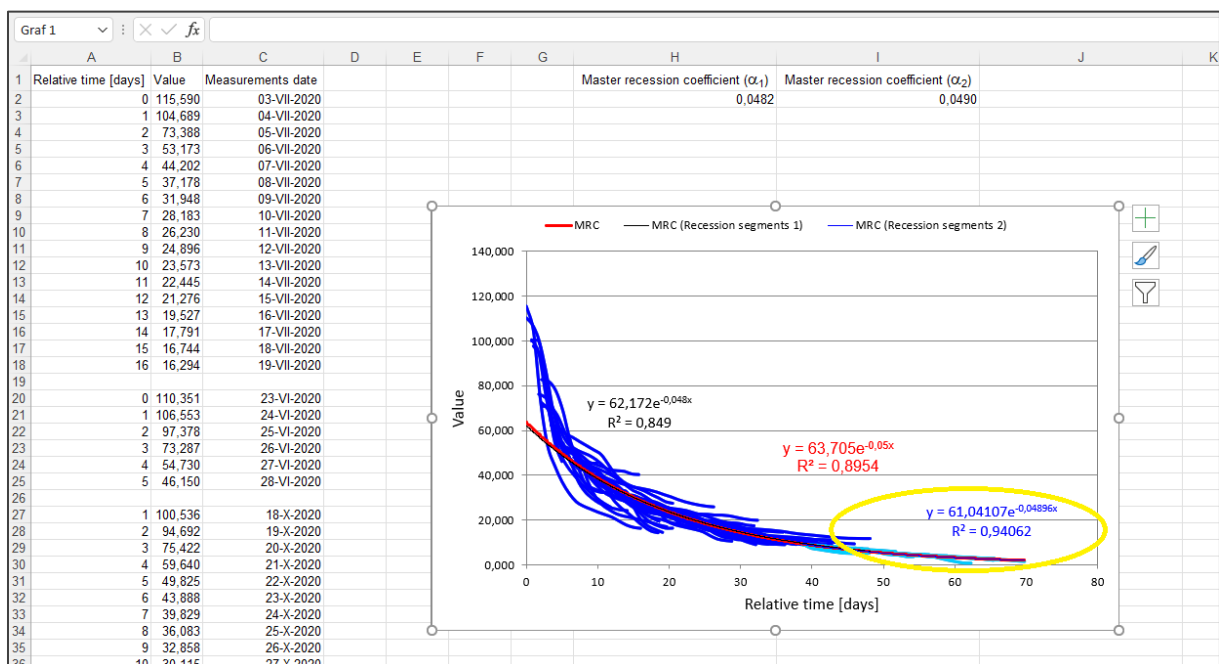
Makro je možné poskytnout z VÚV TGM, v.v.i. oddělení hydrologie a je možné ho uplatnit pro stanovení místních směrodatných limitů v souladu s podmínkami uvedenými přímo v dokumentu.



Obrázek 20 Dialogové okno pro funkci Master Recession Curve Separation – STEP 1



Obrázek 21 Dialogové okno pro nastavení hodnoty separačního kritéria pro funkci Master Recession Curve Separation – STEP 2



Obrázek 22 Výsledný graf poklesových úseků a odvozených řídicích výtokových čar pro jednotlivé úseky a rovněž pro všechna data, pro modelování chování vodního zdroje za sucha je rozhodující rovnice pro dolní část hydrogramu.

Literatura

MŽP ČR. 2021. Společná metodika k přípravě plánů pro zvládnání sucha a stavu nedostatku vody. [Online] 2021. https://www.mzp.cz/cz/zvladani_sucha_metodika.

Posavec, K., Bačani, A. a Nakić, Z. 2006. A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis. *Ground Water*. 2006, Sv. Vol. 44, No. 5.

Posavec, K., Parlov, J. a Nakić, Z. 2010. Fully automated objective-based method for master recession curve separation. *Ground Water*. 2010, Sv. Vol. 48, No. 4.