

Mapy intenzity dotace podzemní vody a zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro ČR

Jiří Bruthans^{1,2}, Jiří Grundloch¹, Renáta Kadlecová¹, Tuna Karatas^{1,2}, Kateřina Šabatová^{1,2}, Radek Vlnas³

- 1) Česká geologická služba, Klárov 6, Praha 1, 118 00; email: bruthans@natur.cuni.cz
- 2) Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, Praha 2, 12800
- 3) Oddělení podzemních vod, ČHMÚ úsek hydrologie Na Šabatce 17 143 06 Praha 4 - Komořany

1. Úvod

Nacházíme se v období klimatické změny, která se projevuje častějšími extrémními výkyvy počasí. V nedávném období 2015-2020 probíhalo neobvykle dlouhé období hydrologického sucha, které se na velké části území České republiky (ČR) projevilo zaklesnutím hladin podzemní vody a nedostatkem zdrojů vody pro obyvatele zejména menších sídel. Sucho se na stavu podzemních vod projevuje s velkou setrvačností. Území ČR je téměř ze $\frac{3}{4}$ tvořeno horninami, které mají nízkou schopnost akumulovat větší zásoby podzemní vody na víceletá období. Většina podzemní vody z území ČR průběžně odtéká.



Obr. 1 Zásoby podzemní vody

Zásoby podzemních vod tvoří objem podzemní vody v hydrogeologickém kolektoru daný jeho efektivní porozitou a pružnými vlastnostmi hornin kolektoru a vody v souladu s vyhláškou č. 369/2004 Sb., o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, ve znění pozdějších předpisů.

- Jednak jde o množství vody protékající v daném čase (měsíci, roku) kolektorem podzemní vody, tzv. přírodní zdroje podzemní vody vyjadřované v objemových jednotkách za jednotku času – obvykle l/s. Velikost těchto přírodních zdrojů kolísá v závislosti na dotaci převážně infiltrací atmosférických srážek, místně i influkcí z povrchových toků. Přírodní zdroje podzemní vody jsou obvykle považovány za rovné základnímu odtoku.
- A dále jako objem vody, který vyplňuje póry, dutiny a trhliny v kolektoru, tzv. statické zásoby podzemní vody, tedy objem gravitační vody ve zvodněné části kolektoru, vyjadřovaný

v objemových jednotkách (m³). Statické zásoby jsou ale jen objemem vody vyplňujícím horninové prostředí.

Jediným doplňujícím se členem jsou přírodní zdroje. Míra poklesu základního odtoku v suchém období (přírodních zdrojů podzemní vody) do určité míry odráží i část statických zásob, protože velikost statických zásob a rychlost uvolňování vody z nich určuje základní odtok v období, kdy potenciální evapotranspirace převládá nad srážkami. Vztah zásob podzemní vody, dotace a drenáže lze vyjádřit graficky na obrázku č. 1.

Cílem příspěvku je představení nových map pro celou rozlohu ČR:

-průměrného základního odtoku

-základního odtoku v suchém období

-mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu

Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu v měřítku 1:50 000 ukazuje, které oblasti budou mít problém s dostatkem zdrojů podzemní vody v období sucha (období sucha je definováno v kapitole 3.1.4).

Pro tvorbu mapy hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu byl použit program ArcMap (produkt ESRI). V jednotlivých postupech se využívaly extenze výše uvedeného programu Spatial Analyst, 3D analyst, Geostatistical analyst, program Q GIS - freeware alternativa programu do ESRI a pro kontrolu výpočtů MS Excel.

Sestavení účelové Mapy hydrogeologické zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu si nevystačí s informacemi o velikosti zdrojů podzemní vody, ale mapa musí zároveň obsahovat informace o velikosti odběrů podzemní vody. V České republice jsou hydrogeologické rajony (HGR) s nejvyššími zdroji podzemní vody často z velké míry využity pro zásobování obyvatel pitnou vodou, takže neplatí, že čím vyšší jsou zdroje podzemní vody, tím nižší je zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu. Neplatí ani opačné tvrzení. Vždy záleží na rozdílu mezi zdroji podzemní vody a mírou jejich využití a do toho se promítá i různá variabilita doplňování zásob podzemní vody v čase a také množství podzemní vody ve statických zásobách, které se projeví na rychlosti poklesu základního odtoku v suchém období. Míst odběrů a vypouštění podzemní vody, které podléhají evidenci ve smyslu vyhláška č. 252/2013 Sb., obsahuje HEIS spravovaný VÚV T.G.M., v.v.i. tisíce. Dále existuje přes 1000 obcí, závislých na individuálním zásobování obyvatel pitnou vodou, kde odběry podzemní vody nepodléhají evidenci, a přitom právě v těchto obcích jsou často problémy se zajištěním zásob podzemní vody v suchých obdobích. Aby všechny tyto informace bylo možné účelně využít, je třeba srovnat zdroje podzemní vody a jejich variabilitu v čase s odběry podzemní vody ze stejného území. V oblasti mimo hlavní kolektory a kvartérní kolektory, které není účelné dělit na menší jednotky, vyžaduje v ideálním případě použití jako základní jednotku povodí 4. řádu, kterých je v ČR 8750. Z výše uvedeného je zjevné, že se jedná o časově velmi náročnou činnost, kdy informace z tisíců registrovaných odběrů podzemní vody bylo třeba porovnat s dotací podzemní vody v téměř 10 tisících elementech pokrývajících celou ČR.

Účelová mapa je zpracována v měřítku 1:50 000 a je postavena na objektivních režimních datech z databáze ČHMÚ (průtoky, srážky), evidovaných odběrech podzemní a povrchové vody a vypouštění z databáze HEIS, na informacích o obcích a jejich částech, které nemají připojení na vodovod dle dostupných Plánů rozvoje vodovodů a kanalizací (PRVKUK) pro každý kraj, evidenci obyvatel v obcích atd.

2. Základní typy prostředí

Pro potřeby Mapy hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu bylo území ČR rozděleno do 4 základních prostředí, které mají z hlediska zásob a dotace podzemní vody velmi odlišné vlastnosti:

- A) pánevní a kvartérní kolektory, tedy zvodně s plošně rozsáhlými proudovými systémy obvykle nerespektujícími orografické rozvodnice;
- B) prostředí hydrogeologického masivu, tedy prostředí tvrdých hornin a silně cementovaných sedimentů, kde je využitelný kolektor především v zóně přípovrchového rozpukání a zvětrání hornin a proudění podzemní vody kopíruje spád terénu;
- C) nivy řek a menších toků, kde je potenciál indukovaných zdrojů, a tedy zdrojů podzemní vody z povrchového toku, a tedy z rozsáhlých orografických povodí výše proti proudu, resp. zázemí;
- D) osídlené části obcí s převažujícím individuálním zásobováním podzemní vodou, kde jsou relativně vysoké odběry podzemní vody na jednotku plochy pro potřeby obyvatel.

A) Pánevní a kvartérní kolektory byly zpracovány pouze pro vrstvu hydrogeologických rajonů základní vrstvy. Důvodem je, že bazální křídový kolektor A (sedimenty cenomanu) vyskytující se ve vrstvě hlubinných rajonů v podloží základní vrstvy rajonů je oproti kolektorům v základní vrstvě méně citlivý na suchu. Pánevní struktury tvoří obvykle ucelený proudový systém, a proto bylo s hydrogeologickými rajony zacházeno, jako s elementárními jednotkami, tj. výpočet bilance zdrojů podzemní vody byl prováděn pro jednotku jako celek (celý rajon) a celá jednotka má jednotnou zranitelnost. Pod prostředí A patří propustné části české křídové pánve, jihočeské pánve a kvartérní rajony.

B) Do prostředí přípovrchových kolektorů tvrdých hornin a jejich ekvivalentu (hydrogeologický masiv) spadají všechny ostatní oblasti, tj. oblasti v základní vrstvě hydrogeologických rajonů, kde není přítomen vodohospodářsky významný kolektor. Spadají sem oblasti vyvěřelých, metamorfovaných a zvrásněných sedimentárních hornin, ty části české křídové pánve, kde převažují izolátory (propustné jen v přípovrchové zóně) a permokarbon, tj. velká většina území ČR. Jedná se o oblasti, které mají omezené statické zásoby podzemní vody a které jsou závislé na každoroční dotaci ze srážek. Na rozdíl od prostředí A, se zde nevyskytují rozsáhlejší zvodně, kde by se depresní kužel šířil laterálně do vzdálenosti stovek a více metrů. V těchto oblastech bylo území rozděleno na jednotlivá povodí 4. řádu.

C) Nivy řek se od jiných prostředí liší tím, že zdroje podzemní vody na jednotku plochy jsou zde obecně řádově vyšší než v okolních horninách. Prostředí je v hydraulickém kontaktu s povrchovým tokem a zároveň se zde přes fluviální sedimenty do toku odvodňuje podzemní voda ze základních hydrogeologických rajonů, proto v nivách lze získávat obvykle řádově vyšší množství podzemní vody než v okolním prostředí základních rajonů. Tohoto faktu se v ČR široce využívá. Velké množství jímacích objektů se právě z výše uvedeného důvodu nachází v prostoru říčních či potočních niv.

Plochy niv byly extrahovány z geologických map „GeoČR50“ z vrstvy kvartér a to polygony s atributem ve sloupci geneze fluviální nečleněné + sedimenty vodních nádrží. Kontinuální plocha niv získaná tímto způsobem se rozdělila na úseky, ve kterých je možné počítat bilanci. V každém z povodí 2. řádu je páteřní tok, který má přítoky z pravé a levé strany. Plocha niv pravostranných a levostranných přítoků byla od nivy páteřního toku oddělena manuálně. Nivy levostranných a pravostranných přítoků byly vymezeny jen v případě, že délka jejich toku přesahovala 9,5 km (kratší segmenty se už svým povodím blížily povodí 4. řádu). Kratší přítoky byly ořezány buffrem 250 m. Následovalo sjednocení jednotlivých ploch niv podle povodí 2. řádu – zvláště hlavní tok v rámci povodí 2. řádu a jeho pravo – a levostranné přítoky (niva hlavního toku a nivy každého jednotlivého přítoku tvoří segmenty). Větší řeky protékající několik povodí 2. řádu (např. Sázava, Vltava) mají nivu kontinuální od pramene až po ústí do většího toku. Menší toky nepřekračující povodí 2. řádu jsou tvořeny též jediným segmentem nivy. Poté byla určena plocha všech segmentů niv a ke každému segmentu nivy se stanovila celková plocha jeho orografického

povodí. Ke každému vymezenému segmentu nivy jsou k dispozici dva údaje - plocha segmentu nivy a plocha jeho orografického povodí.

D) Obce s individuálním zásobováním vodou. Osídlené části obcí s převahou individuálního zásobování se vymeziply následovně. Byly vybrány obce, které nemají vodovod na základě aktuálních podkladů PRVKUK a digitalizované vrstvy průběhu vodovodů. Na základě překryvu vrstvy obcí pak byly vybrány ty obce, které neprotínaly průběh vodovodů. Poté probíhala kontrola získaného výběru obcí podle tabulek z PRVKUKů. Ve výsledku vznikla vrstva obsahující přes 1726 částí obcí bez hromadného zásobování (celkem z 1035 obcí). U těchto obcí byla určena plocha zastavěné části každé obce. Výchozím podkladem je mapa bloků budov (mapa ČR 1:50 000) získaná pomocí ortofotomapy aktualizované manuálním doplněním zastavěné plochy výše vybraných obcí pomocí polygonu v GIS. Následovala kontrola a ověření správnosti rozsahu polygonů a jejich příslušnosti k jednotlivým obcím. Poté se pro jednotlivé obce (pokud se obce sestávala z více částí, pracuje se všemi částmi dané obce dohromady) stanovila plocha zastavěných částí z vytyčených polygonů. Je vhodné poznamenat, že veřejně dostupné PRVKUKy pro jednotlivé kraje (dostupné na webových stránkách příslušných krajů, případně MZe) v době zpracování vrstvy hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu pochází převážně z roku 2007 a poskytují informace o existenci vodovodů ve výhledu roku 2015.

Výpočetní plošné elementy v prostředích A až D:

- u prostředí A (hydrogeologické pánve a kvartérní HGR) je elementem celý hydrogeologický rajon s výjimkou nivy
- u prostředí B s přípovrchovým kolektorem je elementem povodí 4. řádu s výjimkou nivy
- u prostředí C, t.j. niv menších toků je elementem celá niva
- u prostředí D, t.j. obcí je elementem zastavěná oblast dané části obce.

3. Jednotlivé informační vrstvy a určení základního odtoku

Podklad pro Mapu hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu sestává z následujících GIS vrstev:

- 1) dynamické zdroje podzemní vody odpovídající základnímu odtoku v období sucha (l/s/km²)
- 2) registrované odběry podzemní a povrchové vody (l/s)

Pro všechny typy plošných elementů až na nivy (tj. A, B, D) je za zdroj podzemní vody považován základní odtok, jen pro nivy, které mají potenciál pro influkci, je zdroj podzemní vody na jednotku plochy nivy vyšší (viz dále).

3.1. Vrstva dotace podzemní vody ze srážek

3.1.1. Dlouhodobý základní odtok / přírodní zdroje podzemní vody separací z hydrogramu

Dotace podzemní vody odpovídá úhrnu srážek očištěného o evapotranspiraci a dočasně zachycenou vodu v půdě a nenasycené zóně. Protože skutečnou evapotranspiraci ani zachycené množství vody v nenasycené zóně nelze efektivně určovat na větších plochách (extrémně finančně nákladná instrumentace a hodnoty platné jen pro dané místo), stanovuje se průměrná hodnota dotace podzemní vody ze základního odtoku. Veškerá voda, která se stala podzemní vodou (dotace) musí totiž dříve nebo později podzemí opustit ve formě základního odtoku. Dále je tedy pracováno se základním odtokem, který na základě zákona zachování hmoty musí nutně odpovídat dotaci podzemní vody za určité časové období. Rovnítko mezi dotací podzemní vody a základním odtokem je nicméně platné pouze přes delší časová období (vyšší roky a lépe desetiletí), když už se změna zásob stane vůči dotaci a odtoku zanedbatelnou.

Pro určení základního odtoku je v ČR používána řada různých metod. Jednou z hlavních, která stále zůstává jakýmsi etalonem pro srovnání s výsledky ostatních metod je Killeho metoda (Kille 1970). Vychází z nejnižších hodnot průměrných denních průtoků na povrchových tocích v jednotlivých měsících z minimálně 10leté časové řady. Výhodou je snadné určení, nevýhodou obdržení jediné

průměrné hodnoty základního odtoku za dlouhé období. Toto omezení je nepříjemné zejména v současnosti, kdy se odtok může vlivem klimatické změny poměrně výrazně měnit oproti situaci panující před klimatickou změnou. Na základě Killeho metody byla vytvořena i první mapa podzemního (správněji základního) odtoku z ČR (Krásný et al. 1982).

V minulosti byla často používána i metoda Kliner-Kněžek (1974). Ta graficky odvozuje základní odtok z měřených dvojic hladiny podzemní vody ve vrtu a průtoků toku vykreslených do společného grafu. Její výhodou je uvažování kolísání hladiny podzemní vody, a tedy ukazatele skutečné oscilace zásob podzemní vody. Nevýhodou je naopak značná citlivost výsledků na vybranou dvojici vrtu a profilu na vodním toku. V mnohých oblastech často není vhodný vrt s režimními záměry hladiny podzemní vody odpovídající hodnocené zvodni k dispozici.

V současnosti se pro určení základního odtoku nejvíce používají dva přístupy, oba založené na separaci hydrogramu. První je separace pomocí Eckhardtova filtru (Eckhardt 2008). Tento přístup je široce využíván v zahraničí a využívá ho i ČHMÚ pro stanovení přírodních zdrojů podzemních vod v hydrogeologických rajonech a pro stanovení základního odtoku v bilančních povodích a oblastech v rámci hydrologické bilance. Metoda je odvozena z Boussinesqovy rovnice. Eckhardtův filtr denních celkových průtoků má 2 parametry: recesní koeficient poklesu průtoků v čase a Base Flow Index (poměr průměrného základního odtoku a průměrného celkového odtoku). Odvození parametrů je časově i metodicky náročné.

Druhým přístupem je separace základního odtoku metodou klouzavých minim (Kašpárek a Datel et al 2015). Na data celkového průtoků v denním kroku je aplikováno klouzavé 31denní minimum a získaná řada je poté vyhlazena 31denním klouzavým průměrem. Jediným parametrem je v tomto případě velikost klouzavého okna. Tento postup je inspirován metodou, která se využívá ve Velké Británii (UKIH, viz např. Aksoy et al. 2009). Jeho výhodou je jednoduchost, a tedy menší časová náročnost.

Základní odtok získaný metodou Eckhardtova filtru představuje v průměru 70–80 % základního odtoku metodou klouzavých minim.

Pro účely Mapy hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu (mapa zranitelnosti k suchu) byl proto základní odtok jednotně separován metodou klouzavých minim z dostupných dat denních průtoků 518 vodoměrných stanic ČHMÚ v období 1981–2019. Na rozdíl od dříve a hojně používané Killeho metody (Krásný 1982) umožňuje tento způsob separace stanovit proměnlivou hodnotu základního odtoku v čase s měsíčním rozlišením (výsledná data jsou sice v denním kroku ale jsou zpracována klouzavým minimem a průměrem o délce 30 dní, tj. 1 měsíc). To je cenné zejména v současnosti, kdy se odtok může vlivem klimatických změn poměrně výrazně měnit.

3.1.2. Base Flow Index

U každé stanice ČHMÚ byl získán base flow index (BFI) jako podíl průměrného základního odtoku (z metody klouzavých minim) ku průměrnému celkovému odtoku. Base flow index tedy znamená, jaký podíl z celkového odtoku tvoří v dlouhodobém průměru základní odtok.

Tabulka č. 1 ukazuje base flow index pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. Je zřejmé, že zdaleka nejnižší base flow index mají rajony ve flyši a karpatské předhlubni (index 0,3, tj. jen 30 % z celkového odtoku tvoří v dlouhodobém průměru základní odtok, zbytek je rychlý, tj. povrchový a podpovrchový odtok). Velká většina rajonů v ČR spadá base flow indexem mezi hodnoty 0,4 a 0,5 a základní odtok zde tvoří tedy 40-50 % celkového odtoku. Jedná se především o horniny krystalinika, kulmu, části permokarbonu a těch částí křídových rajonů, kde převládají na povrchu izolátory. Následují přechodné oblasti s base flow indexem 0,55-0,65 (křída, permokarbon a výjimečně krystalinikum). Několik křídových rajonů má base flow index 0,7-0,75, což dokumentuje značnou schopnost vyrovnávat odtok. Extrém pak představuje pás rajonů podél toku Jizery a pravostranných přítoků Labe (povodí Zábrdky, Bělé, Skalského potoka, Košáteckého potoka, Pšovky, Liběchovky, Obrtky), tvořený silně propustnými vápnitými pískovci a písčitymi vápenci, místy až s krasovou propustností (Kůrková et al. 2019), které mají extrémní vyrovnávací schopnost zřejmě díky střídání kvádrových a vápnitých pískovců, kde base flow index dosahuje anomálně vysokých hodnot 0,75-0,9 (základní odtok zde tvoří 75-90 % celkového odtoku

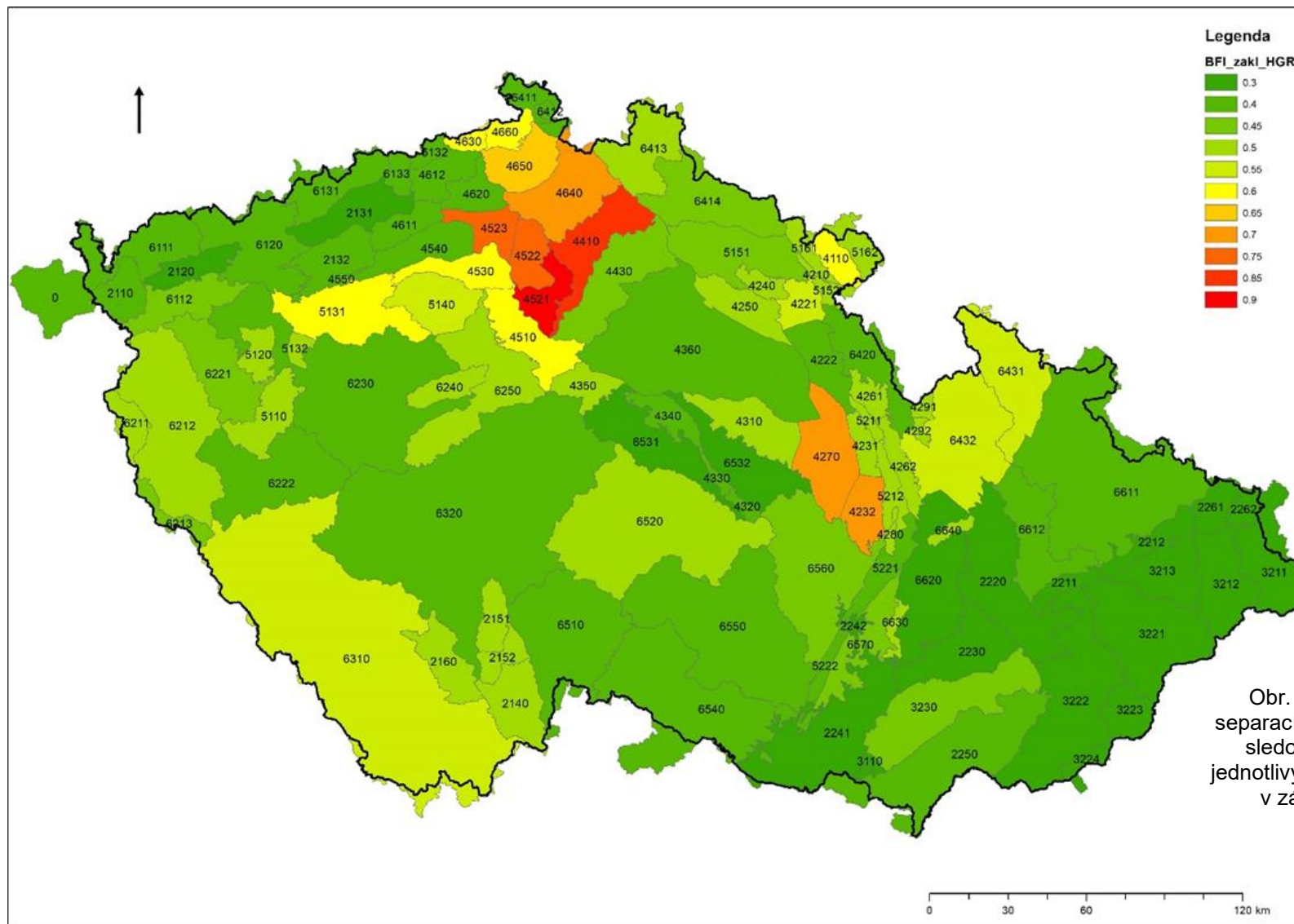
a rychlý odtok je tedy nevýznamný). U kvartérních fluviálních štěrkopísků byl base flow index pouze kvalifikovaně odhadnut na 0,7 v případě většiny kvartérních rajonů a 0,5 v případě fluviálních štěrkopísků pokrytých sprašemi. Tento odhad je postaven na skutečnosti, že z kvartérních štěrkopísků nenastává povrchový odtok, nicméně průběhy hladin podzemní vody na vrtech v kvartérních štěrkopiscích naznačují přítomnost i rychlého odtoku. Skutečnost může být vyšší až cca 0,9. Nicméně při použité hodnotě 0,7 zůstávají údaje z mapy zranitelnosti k suchu na zabezpečené straně nejistoty a nižší hodnota je tak při nejistotě žádoucí.

Rajony s nejnižším base flow indexem jsou, jak vyplývá z výše uvedeného, tvořeny horninami s velmi nízkou propustností. Naproti tomu rajony s nejvyšším base flow indexem reprezentují horniny s vysokou propustností a značnou vyrovnávací schopností. Zcela nezávislé zpracování base flow indexů uvádí práce Kašpárka et al. (2017), kde jsou uvedeny průměrné hodnoty BFI pro několik skupin hornin a též BFI pro vodoměrné stanice na říční síti.

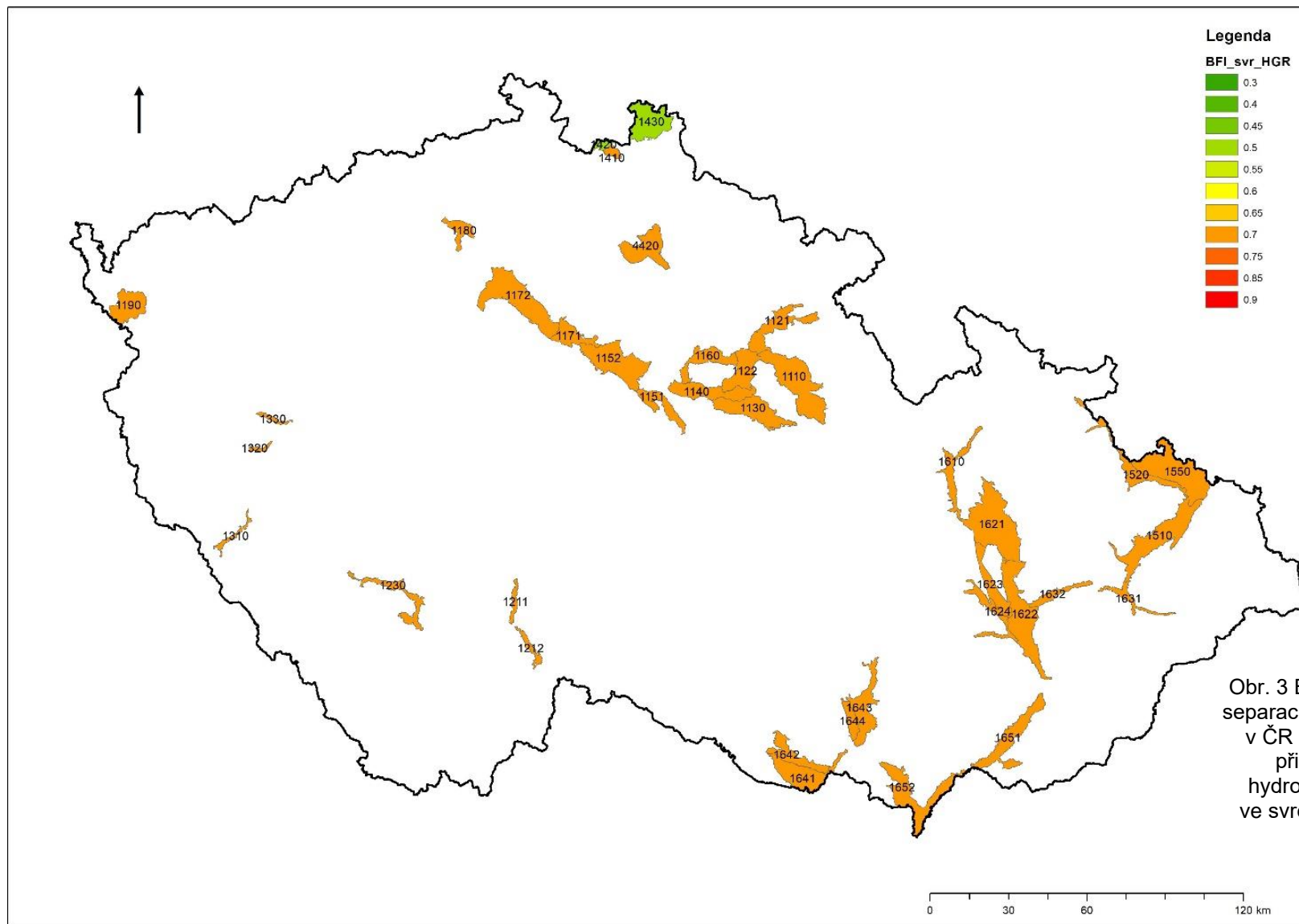
Tab. 1 Hodnoty base flow indexu (BFI) odvozené ze separace profilů na vodních tocích v různých rajonech (HGR).

BFI	HGR	litologie
0,3	2120-2132, 2211-2242, 2261-3224, 6531-6532, 6620	zejména flyš a předhlubeň, podkrušnohorské pánve, výjimečně krystalinikum a kulm
0,4	2250, 4222, 4320-4340, 4360, 4540-4620, 5221-6111, 6120-6133, 6222-6230, 6320-6412, 6420, 6510, 6540-6550, 6611-6612	zejména krystalinikum, permokarbon, kulm a křída s pokryvem izolátorů
0,45	3230, 4430, 5151, 6112, 6213-6221, 6414, 6560-6570	zejména krystalinikum a permokarbon
0,5	1420-1430, 1623, 2140-2160, 4210, 4231, 4240-4262, 4280-4310, 4350, 4420, 5110-5120, 5132, 5152-5212, 6211-6212, 6240-6250, 6413, 6520, 6630-6640	jihočeské pánve, kvartér se sprašemi*, křída, krystalinikum, kras
0,55	4221, 5140, 6310, 6431-6432	křída, permokarbon, krystalinikum
0,6	4110, 4510, 4530, 4630, 4660, 5131	zejména křídové kolektory, výjimečně permokarbon
0,65	4650	křída
0,7	1110-1410, 1510-1622, 1624-1652, 4232, 4270, 4640	kvartér* a křídové kolektory s vysokou vyrovnávací schopností
0,75	4522-4523	křídové kolektory s vysokou vyrovnávací schopností
0,85	4410	křídové kolektory s výjimečně vysokou vyrovnávací schopností
0,9	4521	křídové kolektory s výjimečně vysokou vyrovnávací schopností

Vysvětlivky: *pouze odhadováno, separace hydrogramu v kvartérních rajonech není možná, neb chybí vodoměrné profily. Rajony jsou seřazeny podle jejich čísel, pomlčka mezi čísly znamená rozsah všech rajonů mezi uvedenými čísly; z důvodu přehlednosti úplné názvy hydrogeologických rajonů tabulka neobsahuje, ale uvádí je vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod, ve znění pozdějších předpisů.



Obr. 2 Base flow index získaný separací hydrogramů z 518 toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým hydrogeologickým rajonům v základní vrstvě (viz tab. 1).



Obr. 3 Base flow index získaný separací hydrogramů z 518 toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým hydrogeologickým rajonům ve svrchní vrstvě (viz tab. 1).

3.1.3. Dlouhodobý základní odtok / přírodní zdroje podzemní vody v období sucha

Přírodní zdroje podzemní vody pro období sucha byly stanoveny jako průměrný roční základní odtok v nejsušším zaznamenaném roce za desetiletí 2010-2019 na profilu ČHMÚ, pod který dané povodí spadá. Základní odtok získaný tímto způsobem se může zdát nadhodnocený, protože je známo že průtoky řady povrchových toků v letních obdobích někdy výrazně klesají.

Definování přírodních zdrojů na základě minimálních průtoků z letního období se ale nejeví jako vhodné, protože studie z posledních let ukazují, že za tropických letních teplot dochází i k úplné ztrátě vodnosti povrchových toků nikoli z důvodu extrémního poklesu základního odtoku, ale kvůli extrémnímu výparu vody vegetací z nivy a výparu z vodních ploch (Bruthans et al. 2020). Ztráta vodnosti se přitom projevuje pouze v letním období a případně v období podzimu (pokud došlo ke snížení hladiny podzemní vody v nivě pod vyschlým korytem toku a trvalo určitou dobu, než byla tato retenční kapacita obnovena a následně obnovena povrchová vodoteč v daném úseku). Pokud by tyto silně výparem ovlivněné průtoky byly brány jako hodnoty typické pro sucho, pak by na řadě vodotečí v nižších polohách (např. ČHMÚ sledované poměrně rozsáhlá povodí Brziny, Loděnice, Bakovského potoka, Klenice, Žehrovky) neexistovaly doslova žádné zásoby podzemní vody (odtok např. pouhých 0,07 l/s/km²) a sebemenší odběr podzemní vody z těchto rozsáhlých povodí by vedl ke zkrácení, že povodí mají extrémní zranitelnost a jsou přečerpávána. Přitom z průtoků pramenů v těchto povodích je zjevné, že v době, kdy za letních tropických teplot vzduchu drasticky klesají průtoky povrchových toků, se průtoky pramenů ze stejných povodí nijak nesnižují (Bruthans et al. 2021).



Obr. 4 Příklady extrémně nízkých průtoků na povrchových tocích s povodím okolo 100 km². Odtok byl přechodně drasticky snížen v důsledku masivní evapotranspirace podzemní vody z říční nivy v suchých a horkých letních obdobích a) Brzina (Sedlčansko) 10.7.2019; průtok 0 l/s; povodí 133 km², b) Žehrovka (Březina) 9.7.2019, měřený průtok 20 l/s; povodí 90 km².

V důsledku probíhající klimatické změny, již totiž pro vodní toky v nižších polohách ČR bohužel neplatí představa, že výpar z nivy toku lze zanedbat, ačkoli je plocha nivy vůči ploše povodí toku velmi malá. V letním bezesrážkovém období tedy neplatí, že průtok toku na profilech ČHMÚ odpovídá základnímu odtoku. Naopak, na výše jmenovaných tocích a zřejmě i mnoha dalších jsou ztráty výparem z nivy toku a vodních ploch tak výrazné (200-250 l/s na plochu povodí toků), že mnohonásobně přesahují zbytkový naměřený odtok z povodí ČHMÚ na uzávěrových profilech toků

Brziny, Loděnice, Bakovského potoka a Klenice (0-20 l/s). Velká většina základního odtoku se tak vypařuje a neodtéká. Celkový průtok na profilech ČHMÚ byl tak v suchých letních obdobích 2018 a 2019 i o 2 řády nižší než základní odtok ze stejných povodí před jeho spotřebováním výparem počínající vegetací (Bruthans et al. 2020; obr. 4). Tento fenomén je dobře známý z aridních oblastí, kde také voda z toků masivně výparem mizí, až potoky úplně vyschnou. Na řadě toků v nižších polohách ČR jsou tak i bez odběrů vody v letních obdobích zůstatkové průtoky podkročeny, a to čistě vlivem environmentálních jevů (extrémní teploty, a tedy extrémní výpar). Souhrnná aktualizovaná zpráva o dopadu klimatické změny (Tolasz a kol. 2019) potvrzuje podstatně větší vliv evapotranspirace (větší spotřebu vody vegetací i v důsledku prodloužení vegetačního období) v důsledku probíhající klimatické změny.

Určitý vliv na výsledky by teoreticky mohlo mít vypouštění z čistíren odpadních vod, které výrazně nadlepšuje průtoky v podmínkách dlouhodobého sucha (Fuchsa 2020). Nicméně k výraznému nadlepšení průtoků dochází v době extrémní evapotranspirace z nivy, kdy je velká část základního odtoku pohlcena evapotranspirací v nivě, což naopak vede k extrémnímu podcenění základního odtoku. Efekt těchto procesů na základní odtok je tedy protichůdný s tím, že efekt snížení průtoku evapotranspirací v nivě je obvykle výrazně vyšší.

3.1.4. M Index

U každé vodoměrné stanice ČHMÚ se poté stanovil index M jako podíl průměrného základního odtoku v nejsušším zaznamenaném roce za desetiletí 2010-2019 ku průměrnému dlouhodobému základnímu odtoku. Index M tedy znamená, jaký podíl z průměrného základního odtoku tvoří základní odtok v nejsušším roce.

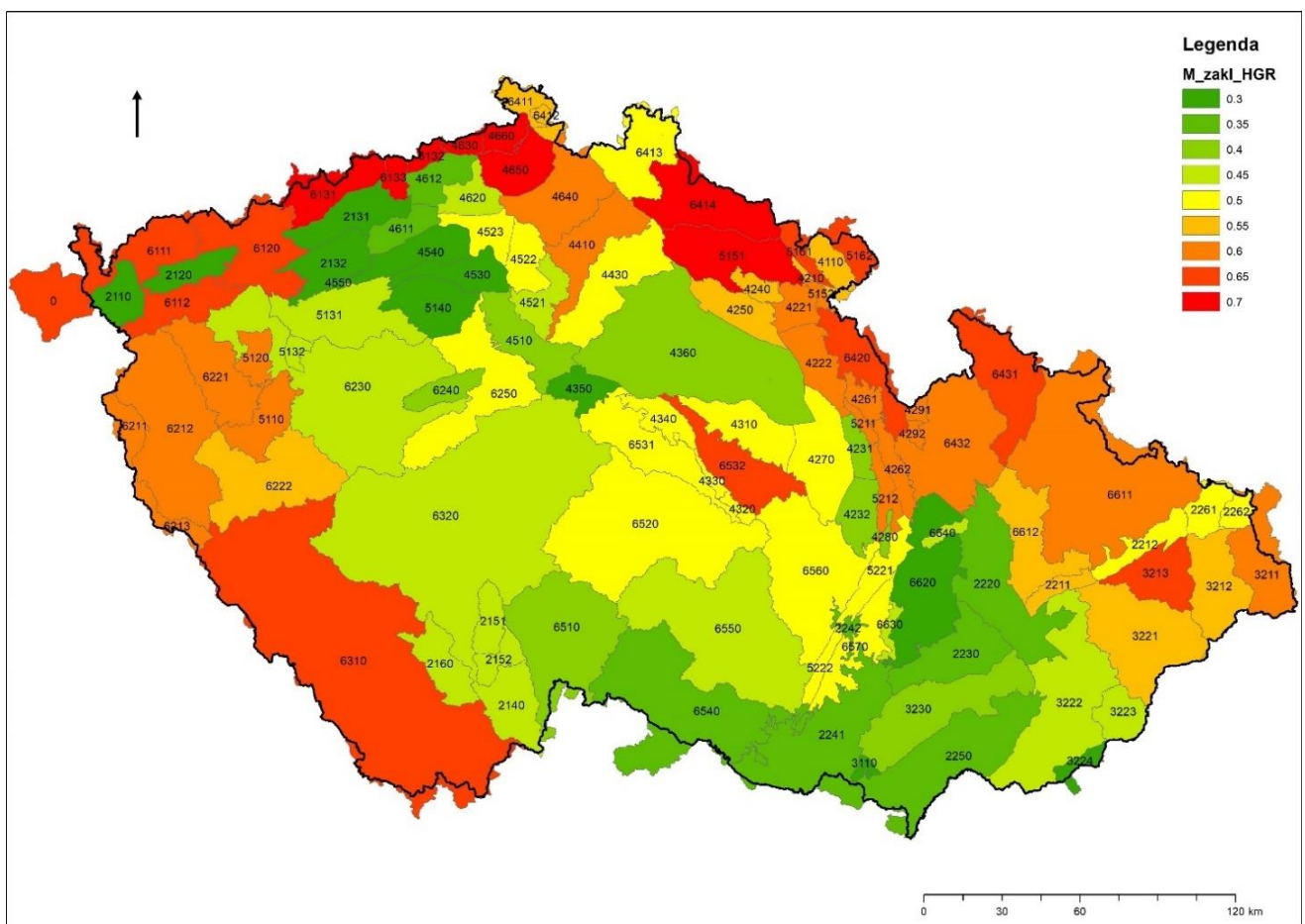
Tab. 2 Hodnoty indexu M (poměr mezi základním odtokem v nejsušším roce desetiletí ku průměrnému základnímu odtoku) odvozené ze separace profilů na vodních tocích v různých rajonech (HGR).

M	HGR	litologie
0,3	1651-1652, 2120-2132, 3110, 3224, 4350, 4530-4550, 5140, 6620	podkrušnohorské pánve, nízko položené oblasti ve flyši, křídě, permokarbonu a kulmu
0,35	1623-1644, 2220-2250, 4611-4612, 6540	nízko položené oblasti ve flyši, křídě a krystaliniku, kvartér*
0,4	1110-1622, 3230, 4231-4232, 4280, 4360, 4510, 6240, 6510	nízko položené oblasti v křídě, kvartér*
0,45	2140-2160, 3222-3223, 4521, 4620, 5131-5132, 6230, 6320, 6550, 6630-6640	jihomočeské křídové pánve, nízko položené oblasti křídý, permokarbonu a krasu
0,5	2212, 2261-2262, 4270, 4310-4340, 4430, 4522-4523, 5221-5222, 6250, 6413, 6520-6531, 6560-6570	nižší a střední polohy křídý, permokarbonu a krystalinika
0,55	2211, 3112, 3221, 4410-4210, 4240-4250, 6222, 6411-6412, 6612	flyš a střední polohy křídý a krystalinika
0,6	2110, 3211, 4221-4222, 4261-4262, 4291-4292, 4410-4420, 4640, 5110, 5120, 5152, 5211-5212, 6211-6221, 6432, 6611	střední polohy křídý, permokarbonu a krystalinika
0,65	3213, 5161-5162, 6111-6120, 6310, 6420-6431, 6532	vyšší polohy permokarbonu a krystalinika, výjimečně flyš
0,7	4630, 4650-4660, 5151, 6131-6133, 6414	nejvyšší polohy křídý, vyšší polohy permokarbonu a krystalinika

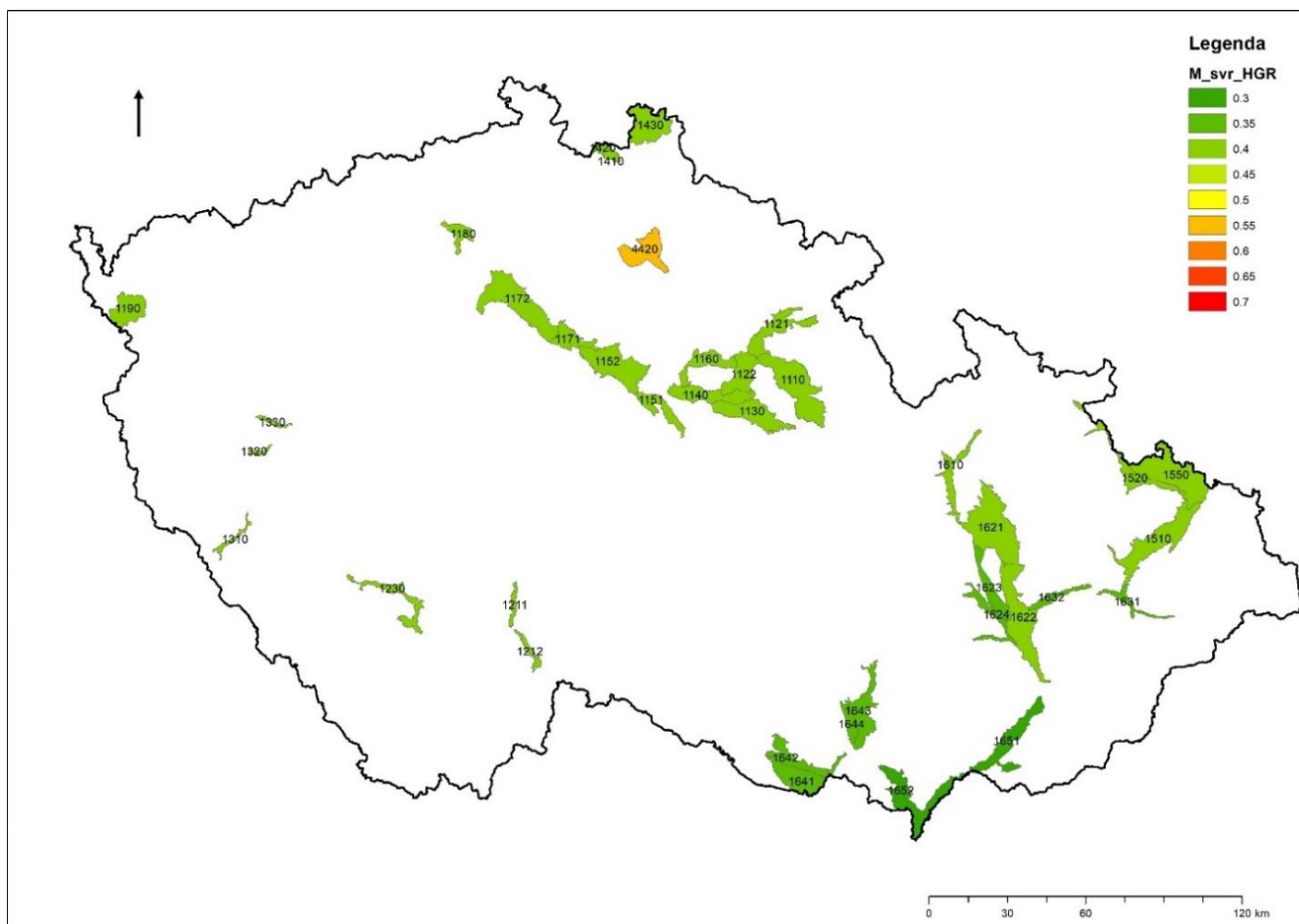
Vysvětlivky: *pouze odhadováno, separace hydrogramu v kvartérech rajonech není možná, neb chybí vodoměrné profily. Rajony byly seřazeny podle jejich čísel, pomlčka mezi čísly znamená rozsah všech rajonů mezi uvedenými čísly; z důvodu přehlednosti úplné názvy hydrogeologických rajonů obsahuje vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod, ve znění pozdějších předpisů.

Tabulka 2 ukazuje index M pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. Je zřejmé, že velikost indexu M (poměru mezi průměrným základním odtokem v nejsušším roce a dlouhodobým průměrným základním odtokem) souvisí s nadmořskou výškou, resp. srážkovým úhrnem. Nejnižších hodnot dosahuje index M v nejnižších polohách ČR, kde k výraznějšímu doplnění podzemní vody dochází typicky po několika suchých letech. To je i důvodem, proč základní odtok v období sucha dokáže poklesnout např. až na 30 % průměrného

základního odtoku na stejné vodoměrné stanici. Naopak v nejvyšších polohách, kde převládá každoroční doplňování nad mnohaletými oscilacemi je přirozeně pokles základního odtoku v období sucha menší a to na 70 % hodnoty průměrného základního odtoku. Na rozdíl od base flow indexu, který velmi výrazně souvisí s litologií, index M je především ovlivněn nadmořskou výškou, vliv litologie je vhodné posoudit v budoucích studiích. Omezený vliv litologie je zřejmý např. u $M=0,45$, který mají, jak horniny flyše, tak i nejpropustnější kolektory v křídě se silnou vyrovnávací schopností. Ukazuje se tak, že vyrovnávací schopnost horninového prostředí má pouze omezený dosah v čase. Například u rajonu 4521 Křída Košáteckého potoka je sice porozita schopna pohltit téměř veškerý rychlý odtok a převést ho na odtok základní (base flow index 0,9), ale tato porozita již není schopná vyrovnat odtok v řádu let, aby odtok mezi suchými a vlhkými lety příliš nekolísal. Mnohem větší vliv na vyrovnanost odtoku v mnohaletých cyklech tak má pravidelná dotace podzemní vody ze srážek. Ve vyšších nadmořských výškách je dotace podzemní vody pravidelnější, protože každý rok se doplní zásoba kapilární vody v půdě a infiltrace tak může pokračovat do větších hloubek a doplnit i podzemní vodu. Naopak v nížinách může deficit půdní vody trvat i několik let a k výraznému doplnění podzemní vody může docházet až po několika letech (např. 7 letech; Slánsko), kdy už základní odtok stačil klesnout na výrazně podprůměrné hodnoty.



Obr. 5 Index M stanovený separací hydrogramů přiřazený hydrogeologickým rajonům v základní vrstvě



Obr. 6 Index M index stanovený separací hydrogramů z 518 povrchových toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým hydrogeologickým rajonům v svrchní vrstvě (viz též tab. 2).

3.1.5. Odvození základního odtoku ze srážek

Za ideální situace by každá oblast v ČR přináležela danému povodí s vodoměrnou stanicí. Separací hydrogramu na daném vodoměrném profilu ČHMÚ by bylo možné přímo určit, jak průměrný základní odtok, tak základní odtok v období sucha. Ve skutečnosti, ale na téměř polovině území ČR tento přístup nelze využít protože:

- 1) Mnoho řek pramení v okrajových pohořích a vodoměrné profily ČHMÚ v nížině umístěné na těchto tocích (např. Labe) neodráží podmínky tvorby základního odtoku v nížině, ale naopak podmínky převládající pro zdrojovou oblast (výrazně vyšší nadmořské výšky, a tedy i vyšší odtok, než má mezipovodí dané vodoměrné stanice).
- 2) Akumulace kvartérních štěrkopísků se až na výjimky odvodňují do velkých vodních toků. Základní odtok ze štěrkopísků nelze určit měřením, protože nárůst průtoku řeky odtokem ze štěrkopísků je mnohem nižší než chyba měření průtoku velkého povrchového toku.

Pro značnou část území ČR tedy nelze základní odtok určit separací hydrogramu na existujících profilech. Bylo proto nutné základní odtok určit nepřímou z parametrů, které jsou k dispozici v celé ploše území ČR. Nejvhodnějším parametrem je dlouhodobý průměrný úhrn srážek, který je k dispozici v rozlišení 1 km² (30letý srážkový normál, ČHMÚ). Dlouhodobý průměrný úhrn srážek se v prostoru mění plynule bez ostrých přechodů. Je dobře znám relativně těsný vztah mezi dlouhodobým průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem (Kašpárek a Datel 2014).

Kašpárek a Datel (2013) popsali existenci těsného vztahu mezi průměrným dlouhodobým úhrnem srážek a celkovým odtokem na základě analýzy 65 povodí ČHMÚ. Průměrný celkový odtok lze z průměrných srážek spočítat podle rovnice:

$$CO_{\text{prům}} = 0,000571 \times (\text{srážky})^2 + 0,132 \times (\text{srážky}) - 170,2 \quad (1)$$

$CO_{\text{prům}}$ je celkový průměrný odtok (mm/rok) a (srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok), oboje dlouholetý průměr

Koeficient determinace byl 0,97, střední kvadratická chyba 7,9 %. Rovnici nelze využít pro srážky nižší než 450 mm/rok, protože rovnice již nereflektuje korektně vztah srážky-odtok.

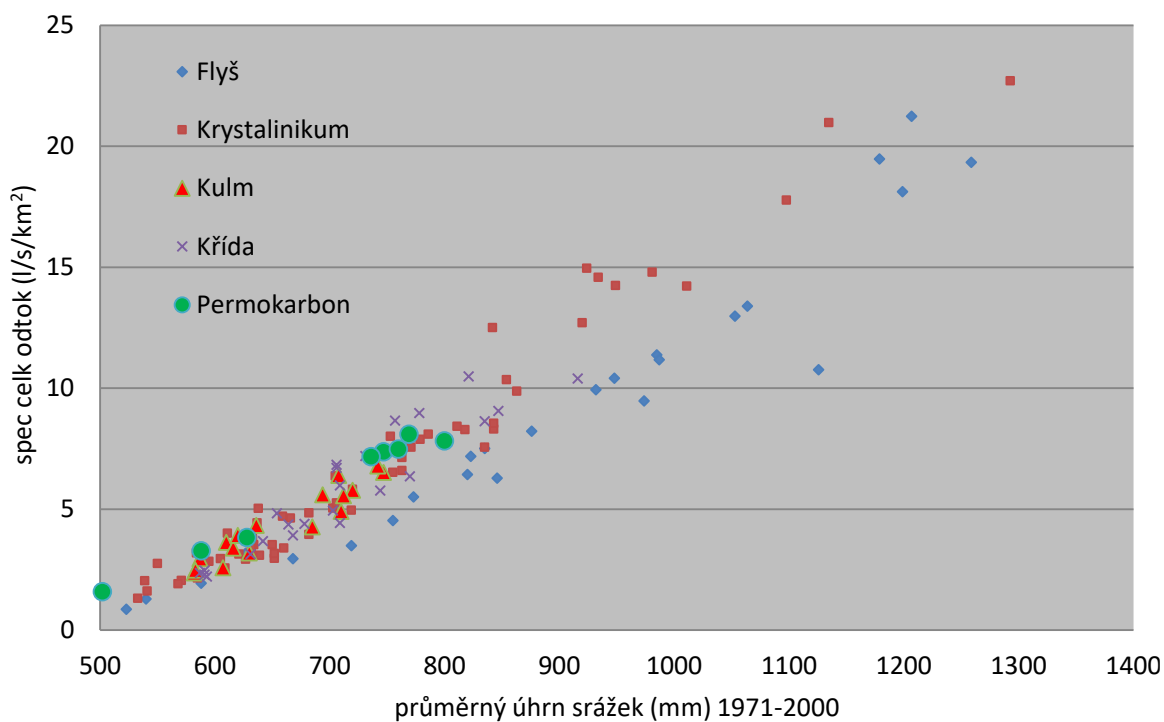
Po převedení na jiné jednotky odtoku má rovnice Kašpárka a Datla (2013) následující tvar:

$$CO_{\text{prům}} = 0,0000181 \times (\text{srážky})^2 + 0,00419 \times (\text{srážky}) - 5,397 \quad (2)$$

$CO_{\text{prům}}$ je celkový průměrný odtok (l/s/km²) a (srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok), oboje dlouholetý průměr.

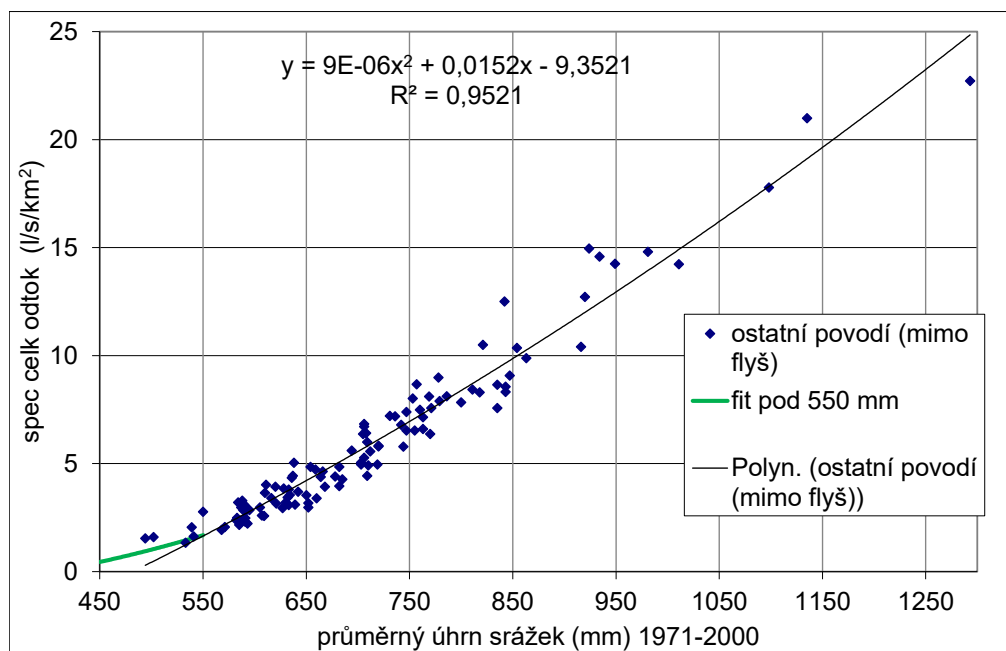
V roce 2011 byl ve spolupráci s R. Vlnasem studován vliv geologie na celkový a základní odtok. Ze sledovaných vodoměrných profilů ČHMÚ byly vyřazeny takové profily, které neměly jednu převládající geologickou jednotku a dále takové, u kterých bylo zjevné přetékání vody z/do jiných povodí. Výsledných 138 povodí bylo rozděleno do následujících 5 skupin podle geologie: krystalinikum, kulm (spodnokarbonské droby na Moravě), permokarbon, křída, flyš (Bruthans a Soukup 2011).

U celkového odtoku se ukázalo že s výjimkou flyše mají všechny povodí stejný vztah s dlouhodobým průměrným úhrnem srážek, který lze tedy vyjádřit jednotnou rovnicí. Pouze horniny flyše vykazují nižší odtok, při stejném srážkovém úhrnu než skupina všech ostatních hornin (obr. 2). Příčina odlišnosti flyše je zřejmě klimatická, nikoli geologická. Horniny flyše se vyskytují pouze v Karpatech na hranici se Slovenskem, zatímco jiné horniny se vyskytují v širším území ČR, tedy s průměrnou polohou až o stovky km jinde. Flyš je v geograficky odlišné oblasti ve více kontinentálních podmínkách než průměr ostatních povodí. Analýza ukázala, že stačí povodí ČR členit pro stanovení celkového odtoku na pouhé dvě skupiny. Pro všechny rajony s výjimkou flyše lze průměrný celkový odtok určit z průměrných dlouhodobých srážek ze vztahu na obrázku č. 8, zatímco pro rajony flyše je vztah uveden na obrázku 9. Porovnání těchto regresních rovnic s rovnicí Kašpárka a Datla (2014) je uveden na obrázku č. 10.

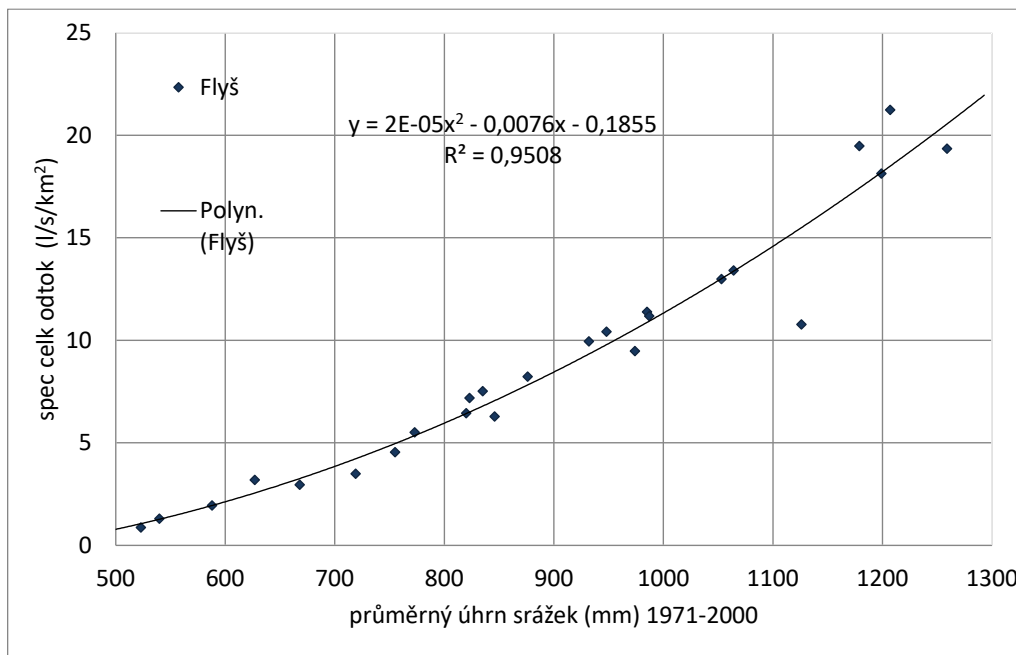


Obr. 7 Vliv srážek a geologie na celkový odtok pro povodí sledované ČHMÚ.

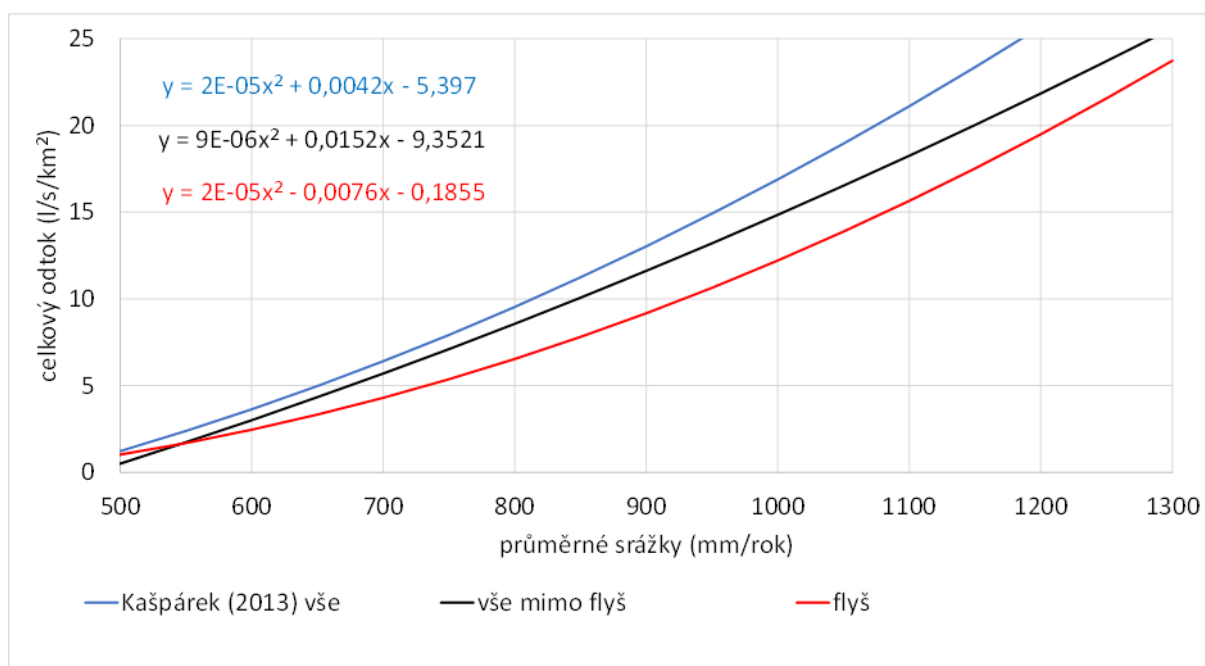
Je zřejmé že srážky velmi dobře determinují celkový odtok. Na geologii nezáleží s výjimkou flyše, jehož povodí vykazují nižší celkový odtok než ostatní povodí (Bruthans a Soukup 2011).



Obr. 8 Vztah mezi průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem pro všechny geologické typy povodí mimo flyš. Proložený polynom podceňuje odtok pro srážky pod 550 mm/rok, a proto je nižší srážkový úhrn nahrazen polynomem pro flyš (zelená čára).



Obr. 9 Vztah mezi průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem pro flyš.



Obr. 10 Porovnání vztahů pro určení celkového odtoku ze srážek. Je zřejmé, že celkový odtok z flyšových povodí je výrazně nižší, než je tomu u ostatních povodí. Regresní rovnice v obrázku 10 uvádí parametry a, b, c ve formě $ax^2 + bx + c$.

Průměrný základní odtok byl na základě těsných regresních vztahů se srážkami vypočten z následující rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (a \times (\text{srážky})^2 + b \times (\text{srážky}) - c) \times \text{BFI} \quad (3)$$

$ZO_{\text{prům}}$ (l/s/km²) je průměrný základní odtok, (srážky) jsou dlouhodobý průměrný úhrn srážek (mm/rok), BFI je base flow index (bezrozměrné); a, b, c (bezrozměrné) jsou parametry rovnic (obr. 8, 9).

BFI je pro všechny rajony uveden v tab. 1 a parametry (a, b, c) uvádí obrázek 10 ve formě regresních rovnic. Podobný postup, a tedy získání celkového odtoku ze srážek a poté získání základního odtoku přenásobením BFI použili Kašpárek a kol. (2022).

Pro flyš je tedy pro získání základního odtoku užitá vždy rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (2 \cdot 10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3a)$$

Pro ostatní rajony v oblasti s normálem srážek nad 550 mm/rok je pro získání základního odtoku užitá rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (9 \cdot 10^{-6} \times (\text{srážky})^2 + 0,0152 \times (\text{srážky}) - 9,3521) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3b)$$

Pro ostatní rajony v oblasti s normálem srážek pod 550 mm/rok je pro získání základního odtoku užitá rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (2 \cdot 10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3c)$$

Výslednou mapu základního odtoku ukazuje obrázek 11. Hodnoty jsou mírně nižší, než v mapě podzemního (základního) odtoku Krásného et al. (1982), která byla konstruována z dat z 60.–70. let minulého století (10leté až 12leté řady z 250 vodoměrných stanic), ještě před snížením základního odtoku v důsledku klimatické změny.

Dlouhodobý průměrný základní odtok (obr. 11) je vypočten z dlouhodobého průměrného úhrnu srážek, z rovnice 3 (variant 3a, 3b, 3c) a parametrů z obrázků 2, 3 a tabulky 1 (l/s/km²). Je dobře patrné, že v kvartérních rajonech je základní odtok vyšší než v řadě okolních rajonů díky vyššímu base flow indexu.

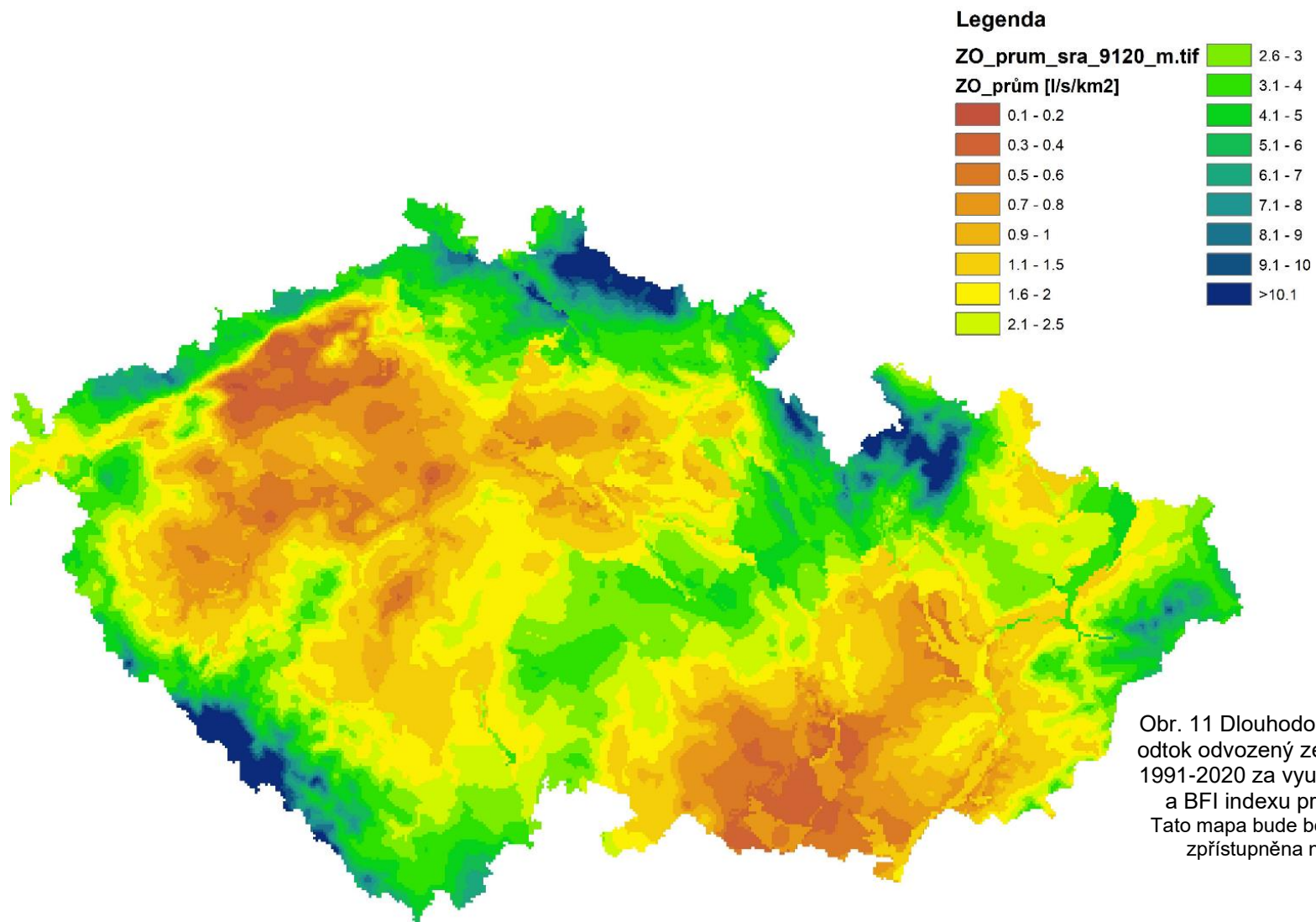
3.1.6. Odvození základního odtoku v období sucha ze srážek

Základní odtok v období sucha byl vypočten podle vzorce:

$$ZO_{\text{sucho}} = ZO_{\text{prům}} \times M \quad (4)$$

M je index minimálního základního odtoku (bezrozměrné).

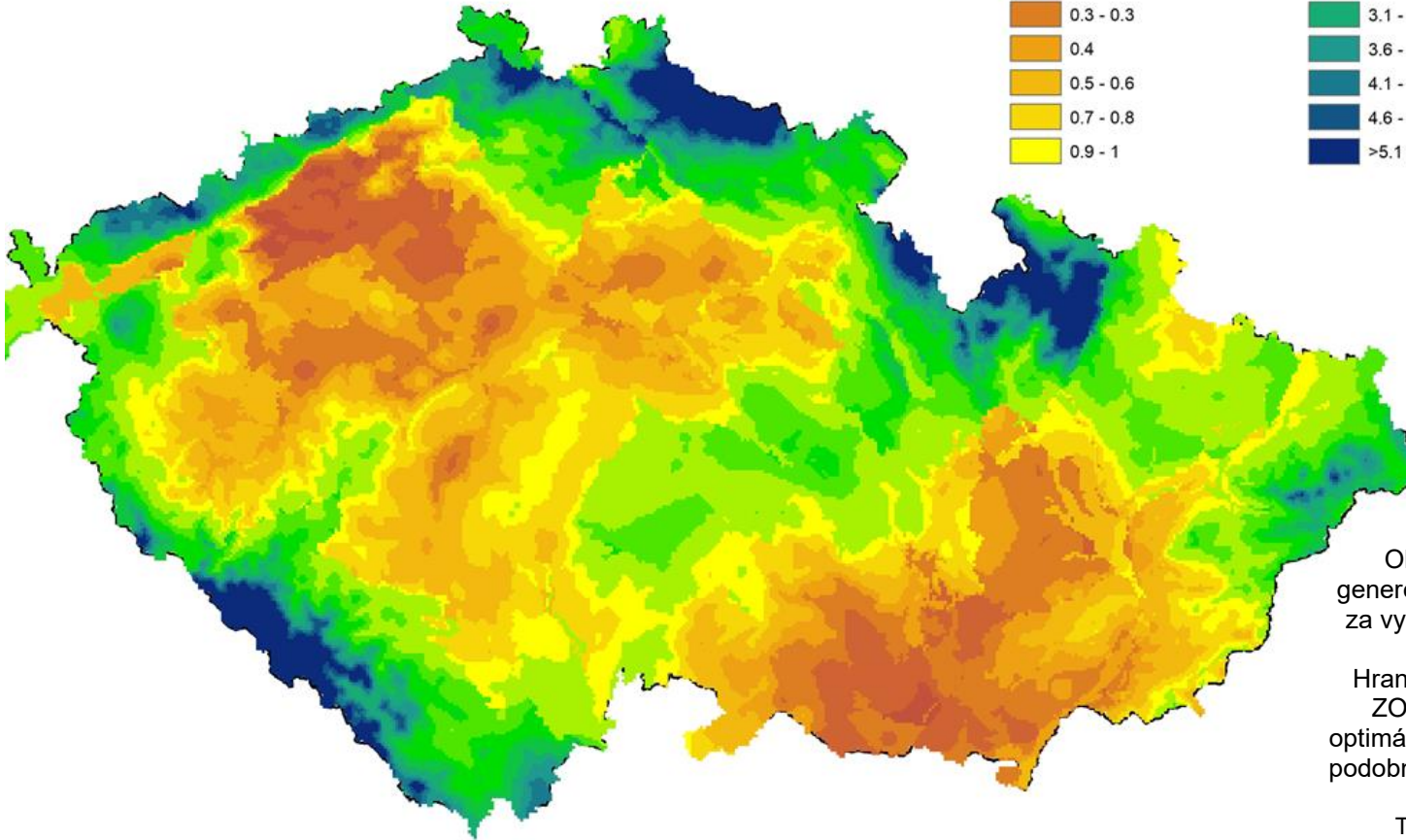
Index M je pro všechny rajony uveden v tabulce 2 (viz obr.5 a 6).



Obr. 11 Dlouhodobý průměrný základní odtok odvozený ze srážkového normálu 1991-2020 za využití regresních vztahů a BFI indexu pro jednotlivé rajony. Tato mapa bude během cca června 2023 zpřístupněna na www.geology.cz

Legenda

ZO_sucho_sra_9120_m.tif	1.1 - 1.5
<VALUE>	1.6 - 2
0 - 0.1	2.1 - 2.5
0.2	2.6 - 3
0.3 - 0.3	3.1 - 3.5
0.4	3.6 - 4
0.5 - 0.6	4.1 - 4.5
0.7 - 0.8	4.6 - 5
0.9 - 1	>5.1



Obr. 12 Základní odtok v období sucha generovaný ze srážkového normálu 1991-2020 za využití regresních vztahů a BFI a M indexů pro jednotlivé rajony.

Hranice kategorií barevné škály jsou v mapě ZO_{sucho} jiné než v mapě $ZO_{\text{prům}}$ (z důvodu optimálního rozlišení hodnot). Mapy jsou si proto podobné. Zobrazené hodnoty v obou mapách se značně liší (srov. obr. 11 a 12).

Tato mapa bude během cca června 2023 zpřístupněna na www.geology.cz

Hodnoty základního odtoku v období sucha jsou výrazně nižší než průměrný základní odtok, zejména v nižších polohách.

Indexy BFI a M se spolu násobí a jejich násobek s celkovým odtokem udává základní odtok v období sucha, lze proto očekávat nejnižší základní odtok v období sucha v málo propustných horninách v nejnižších nadmořských výškách (např. flyš). Zde může základní odtok v období sucha dosahovat i jen pouhých 10 % průměrného celkového odtoku.

3.2. Odběry a vypouštění podzemní a povrchové vody

Registrované odběry a vypouštění povrchové a podzemní vody (v ročním průměru) byly převzaty z bodové databáze HEIS a následně přepočteny na l/s. Každý bodový údaj je přiřazen danému elementu území. Například pod jednotlivá povodí 4. řádu, nebo pod nivu a pro každý takový element bylo z rozdílu sumy všech odběrů a vypouštění vody spočteno, kolik vody se z daného elementu celkem odebírá či se do něj vypouští.

Zatímco pro prostředí A a B (rajony a povodí 4. řádu) byly uvažovány jen odběry a vypouštění podzemní vody, pro prostředí C (nivu) byly vedle odběrů a vypouštění podzemní vody uvažovány i odběry a vypouštění povrchové vody. Pro prostředí D (osídlené části obcí s převažujícím individuálním zásobováním) byl uvažován pouze odběr vody podzemní vody na úrovni počtu obyvatel a průměrné spotřeby na obyvatele v ČR. Jednotlivé odběry a vypouštění vody byly ve výsledné mapě zranitelnosti zobrazeny, jako bodové objekty s různým průměrem bodu podle velikosti odběru vody, aby bylo zřejmé, kde přesně v daném elementu dochází k registrovanému odběru nebo vypouštění vody.

4. Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu

Výsledná Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu byla generována překryvem a kombinováním několika samostatných vrstev informací. Hlavní výhodou tohoto postupu je skutečnost, že daná existující síť elementů umožňuje aktualizovat data např. o změně dotace nebo naopak změně odběrů a vypouštění vody, což vede ke změně hodnot elementů v mapě zranitelnosti. V budoucnu tak bude možné mapu zranitelnosti aktualizovat. Pro jednotlivé typy prostředí byly dostupné zdroje podzemní vody po odečtení odběrů podzemní vody určeny následujícími způsoby:

4.1. Určení zranitelnosti pro povodí 4. řádu a rajony

Pro prostředí A a B (povodí 4. řádu) a hydrogeologických rajonů) byla zranitelnost určena podle vzorce:

$$B_p \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * S_p - O_p + V_p) / S_p$$

kde

ZO_{sucho} je základní odtok v období sucha (l/s/km²)

O_p je odběr podzemní vody (l/s),

V_p je vypouštění do podzemní vody (l/s) (velmi výjimečné)

S_p je plocha daného povodí 4. řádu nebo hydrogeologického rajonu (km²)

Základní odtok v období sucha (ZO_{sucho}) byl vypočten z rovnice 4 v rozlišení 1 km².

Tam, kde proudění podzemní vody v rajonu tvoří ucelený systém (silně propustné zvodně např. české křídové pánve a jihočeské pánve, javoříčko-mladečský kras) byla bilance počítána pro celý hydrogeologický rajon, protože dělení na části hydrogeologických rajonů by bylo značně subjektivní. Všude jinde byla bilance počítána v povodí 4. řádu.

4.2. Určení zranitelnosti pro nivy

Pro prostředí C (nivy) byla zranitelnost určena podle vzorce:

$$B_n \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * S_p * K - O + V) / S_n$$

kde

ZO_{sucho} je základní odtok v období sucha (l/s/km²)

K je koeficient vytížení (bezrozměrný), který byl nastaven na hodnotu 0,5

O je odběr jak povrchové, tak podzemní vody (l/s),

V je vypouštění jak povrchové, tak podzemní vody (l/s)

S_n je plocha segmentu nivy (km²)

S_p je plocha celého orografického povodí jehož voda nivním segmentem protéká (km²)

Základní odtok za sucha byl vypočten jako průměrná hodnota ze základního odtoku za sucha z povodí 4. řádu a hydrogeologických rajonů v podloží nivy. Protože niva je v kontaktu s povrchovým tokem jsou v tomto případě brány v potaz nejen odběry podzemní vody ale i odběry a vypouštění povrchové vody. Odběry a vypouštění vody byly uvažovány z celé plochy nivy a též v pásu 250 m okolo (použití bufferu).

Výpočet tedy uvažuje, že v nivě toku je k dispozici 50 % (koeficient vytížení) veškerého základního odtoku v období sucha vytvářeného v celé ploše orografického povodí daného toku pro indukované zdroje. Protože niva tvoří typicky jen několik málo procent plochy toku (cca v průměru 2-5 %) jsou potenciální indukované zdroje z celého povodí na jednotku plochy nivy asi 20násobné než u jiných elementů, než je niva. Hranice kategorií jsou u nivy proto nastaveny odlišně. Pokud by byl nastaven koeficient vytížení K na 100 %, pak by se uvažovala spotřeba veškerého základního odtoku z celého povodí pouze v daném segmentu nivy. Orografické povodí ale připadá i segmentům niv dále po proudu, které jsou bilancovány samostatně a takový postup by mohl vést k přecenění zdrojů podzemní vody.

4.3 Určení zranitelnosti pro obce s převažujícím individuálním zásobováním

Odběry podzemní vody pro individuální zásobování nejsou registrovány, ale lze je odvodit z počtu obyvatel dané obce, protože denní průměrná spotřeba vody v ČR se pohybuje podle dostupných údajů okolo 100 l/osobu/den. Individuální odběry podzemní vody v obcích jsou podle zkušeností z let 2015–2020 (hydrologické sucho) zároveň jedny z nejvíce ohrožených suchem. Individuální zdroje vody pro zásobování bývají velmi často mělké a využívají svrchní část přípovrchového kolektoru, který má tu typickou vlastnost, že podzemní vodu lze získat jen z relativně blízkého okolí jímacího objektu. Zejména v zastavěných územích, kde jednotlivé pozemky spolu přímo sousedí a hustota obyvatel je natolik vysoká, že nelze zaručit, že se v dané oblasti vytvoří dostatečná zásoba podzemní vody ze srážek na jednotku plochy. Což lze demonstrovat jednoduchým výpočtem na příkladu spotřeby vody pro zásobování. Typický základní odtok v nižších polohách ČR, kde žije většina obyvatel a kde je většina obcí, nepřesahuje 1–2 l/s/km² (Krásný a kol. 1982). Základní odtok přitom odpovídá průměrné dotaci podzemní vody. Na 1000 m² pozemku tedy dotace nepřesahuje 1–2 ml/s, což odpovídá 90–180 l/den. Průměrná spotřeba je 100 l/osoba/den, takže poměrně rozsáhlý pozemek o ploše 1000 m² je schopen zásobovat v průměru max. 1–2 osoby vodou. Přitom je zjevné, že pozemky jsou často i výrazně menší a žije na nich zpravidla více než 1–2 osoby. Uvedený výpočet vychází z průměrné dlouhodobé dotace ze srážek, nikoli dotace v období sucha, kdy dotace klesá v nižších nadmořských výškách na polovinu průměrné hodnoty i méně. Z výše uvedeného výpočtu je zcela zjevné, že vysychání studní v letním období je v řadě obcí zákonitě v důsledku probíhající klimatické změny.

Pro prostředí D (obce s převažujícím individuálním zásobováním) byla zranitelnost určena podle vzorce:

$$B_o \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * S_o - O * N) / S_o$$

kde ZO_{sucho} je základní odtok v období sucha získaný z povodí 4. řádu nebo z hydrogeologického rajonu, na kterém obec leží (l/s/km²),

S_0 je plocha zastavěné části obce (km^2), viz kapitola 2

O je průměrná spotřeba vody na obyvatele ($0,0011 \text{ l/s}$ což odpovídá 100 l/os/den , a tedy průměrné spotřebě vody na obyvatele v ČR)

N je počet obyvatel dané obce

Počet obyvatel obce byl převzat z vrstvy Arc ČR (sčítání obyvatel). Případně byla dohledána data na webu statistického úřadu.

V bilanci se tedy předpokládá, že zdrojem podzemní vody pro danou obec je jen voda, která spadne v zastavěné části obce a že do obce nepřitéká voda z širšího okolí. Dále se předpokládá, že množství podzemní vody, které se v obci tvoří je stejné, jako je množství podzemní vody, které se tvoří v průměrné krajině v okolí obce. Oba tyto předpoklady jsou v zásadě nejhorší možnou variantou. Řada obcí má infiltrační zázemí i v širším okolí a podzemní voda do nich přitéká z větší plochy. Nicméně jsou i obce, kde orografické povodí se shoduje s plochou zástavby. V obcích se evidentně tvoří více podzemní vody než v okolní krajině (Teuling et al. 2019), a to díky mnohem nižší hustotě vegetace a vyššímu podílu nepropustných povrchů, které jsou z významné části drénovány do podzemí (v zástavbě rodinnými domy zpravidla platí povinnost zasakování srážkových vod na vlastním pozemku a voda z významné části nepropustných povrchů se vsakuje). Výsledná bilance proto představuje nejčernější scénář, takže výsledek je na straně bezpečnosti. Skutečná dotace podzemní vody v intravilánu obcí nebyla měřena a jde o jednu z nejdůležitějších neznámých, které by si zasluhovaly další studium.

5. Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu

5.1. Kategorie mapy zranitelnosti

Výsledná mapa zranitelnosti k suchu je dostupná k prohlížení na www.suchovkrajine.cz, na <https://vuv.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7cab3c632ca64bdfa6fc4c9bec3661d1>.

Území výše uvedené účelové mapa je rozděleno na plochy v 6 kategoriích a to kvantitativně podle bilance (zdroje-odběry podzemní vody)/plocha území), tj. bilance normalizovaná na jednotku plochy:

- kritická (červeně)
- velmi vysoká (oranžově)
- vysoká (žlutě)
- střední (hnědě)
- nízká (zeleně)
- velmi nízká (modře)

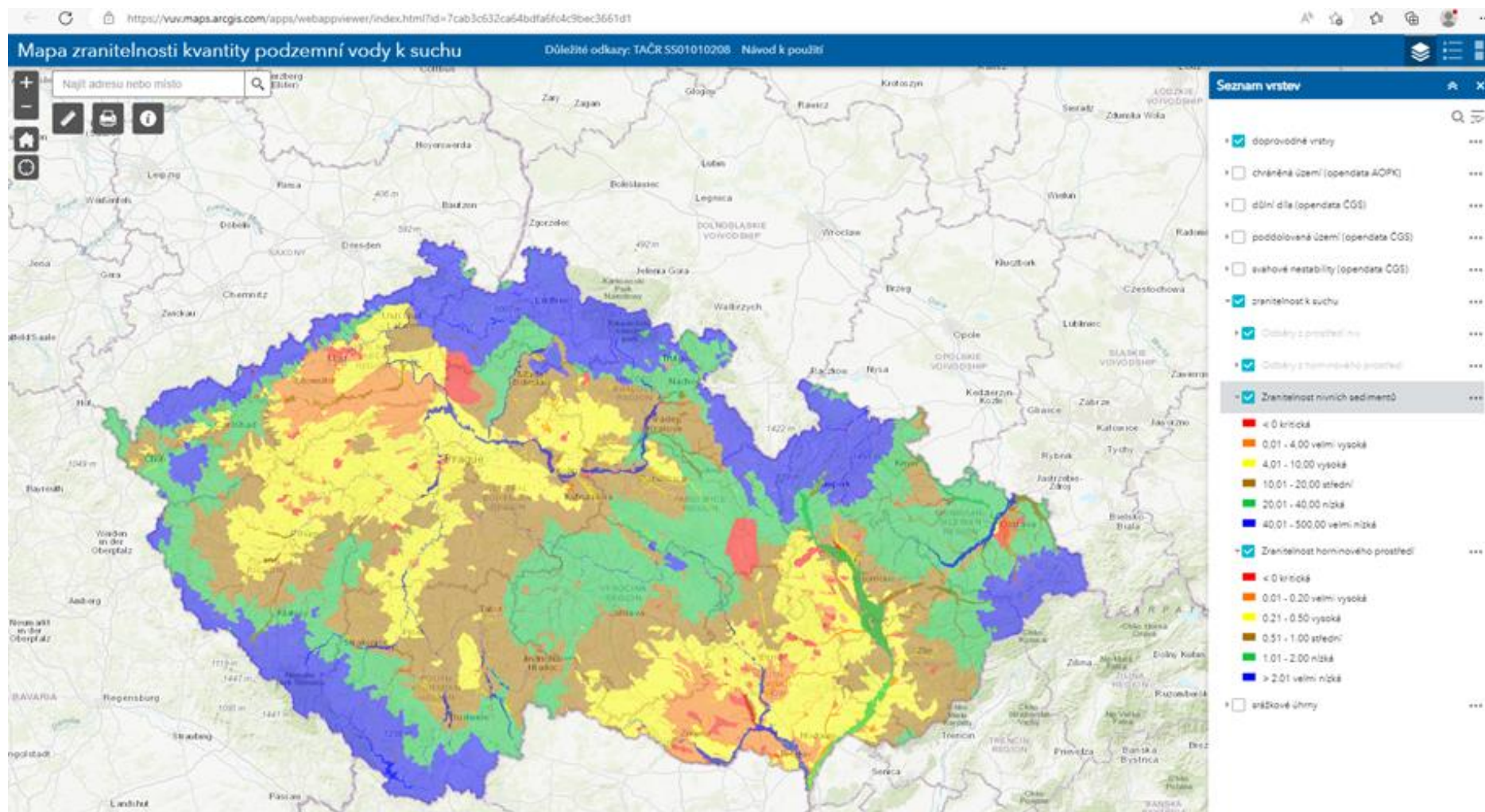
Pro povodí 4. řádu, hydrogeologické rajony i zastavěné části obcí platí následující hranice kategorií:

- Kritická zranitelnost (červená barva) má bilanci zápornou, což znamená, že v daném elementu území se spotřebovává v období sucha více podzemní vody, než jsou přírodní zdroje. Přírodní zdroje jsou tedy v období sucha přečerpávány.
- Velmi vysoká zranitelnost (oranžová barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává velmi nízký základní odtok na úrovni nižší než $0,2 \text{ l/s/km}^2$.
- Vysoká zranitelnost (žlutá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává nízký základní odtok mezi $0,21-0,5 \text{ l/s/km}^2$.
- Střední zranitelnost (hnědá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů v období sucha zůstává základní odtok mezi $0,51-1 \text{ l/s/km}^2$,
- Nízká zranitelnost (zelená barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývá $1,01-2 \text{ l/s/km}^2$.

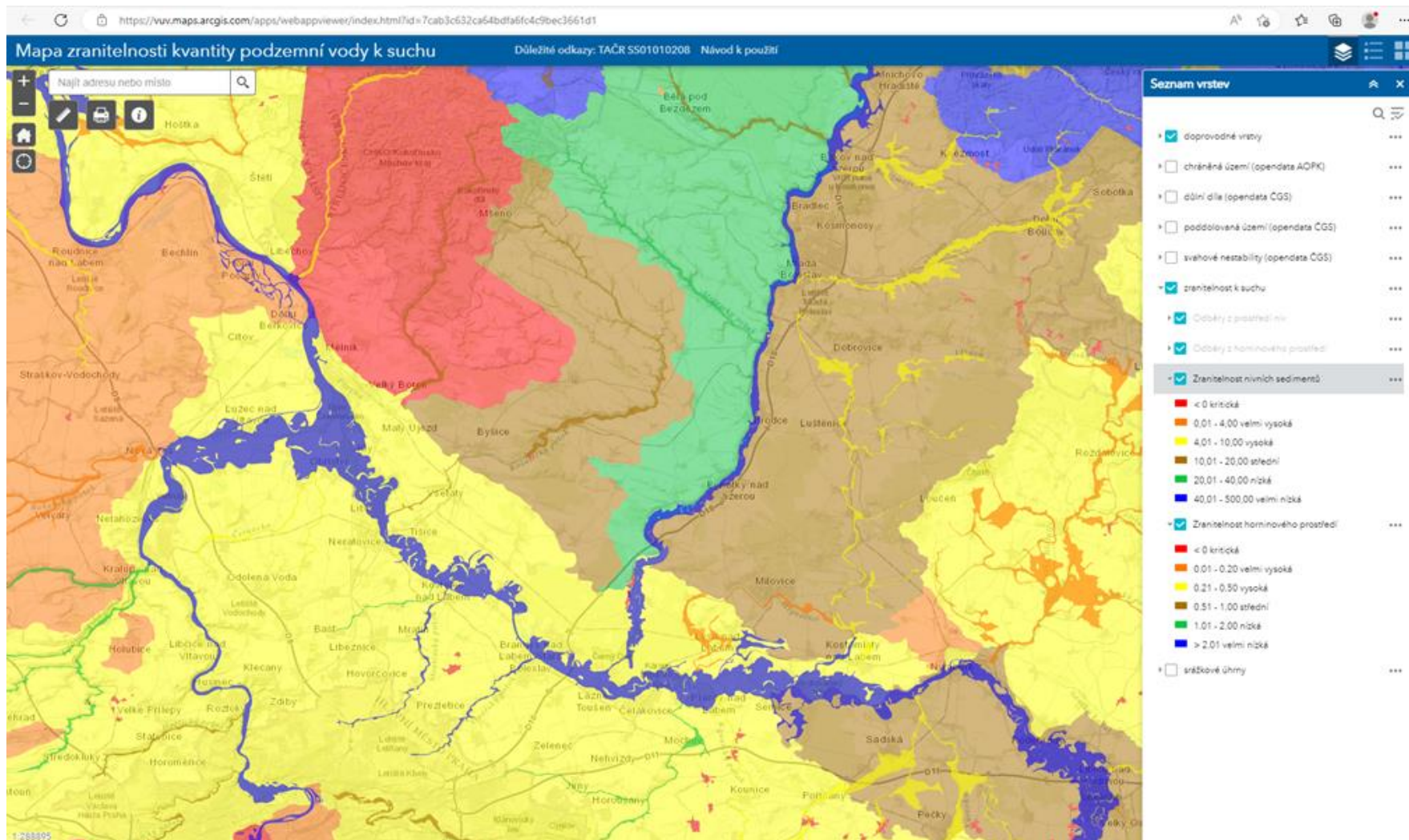
- Velmi nízká zranitelnost platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývá přes 2 l/s/km².

Pro nivy, jejichž malé ploše přispívá přitékající podzemní voda z širokého okolí vlastního povodí, případně z orografického povodí vodního toku (indukované zdroje) jsou hranice kategorií 20krát vyšší, tj.:

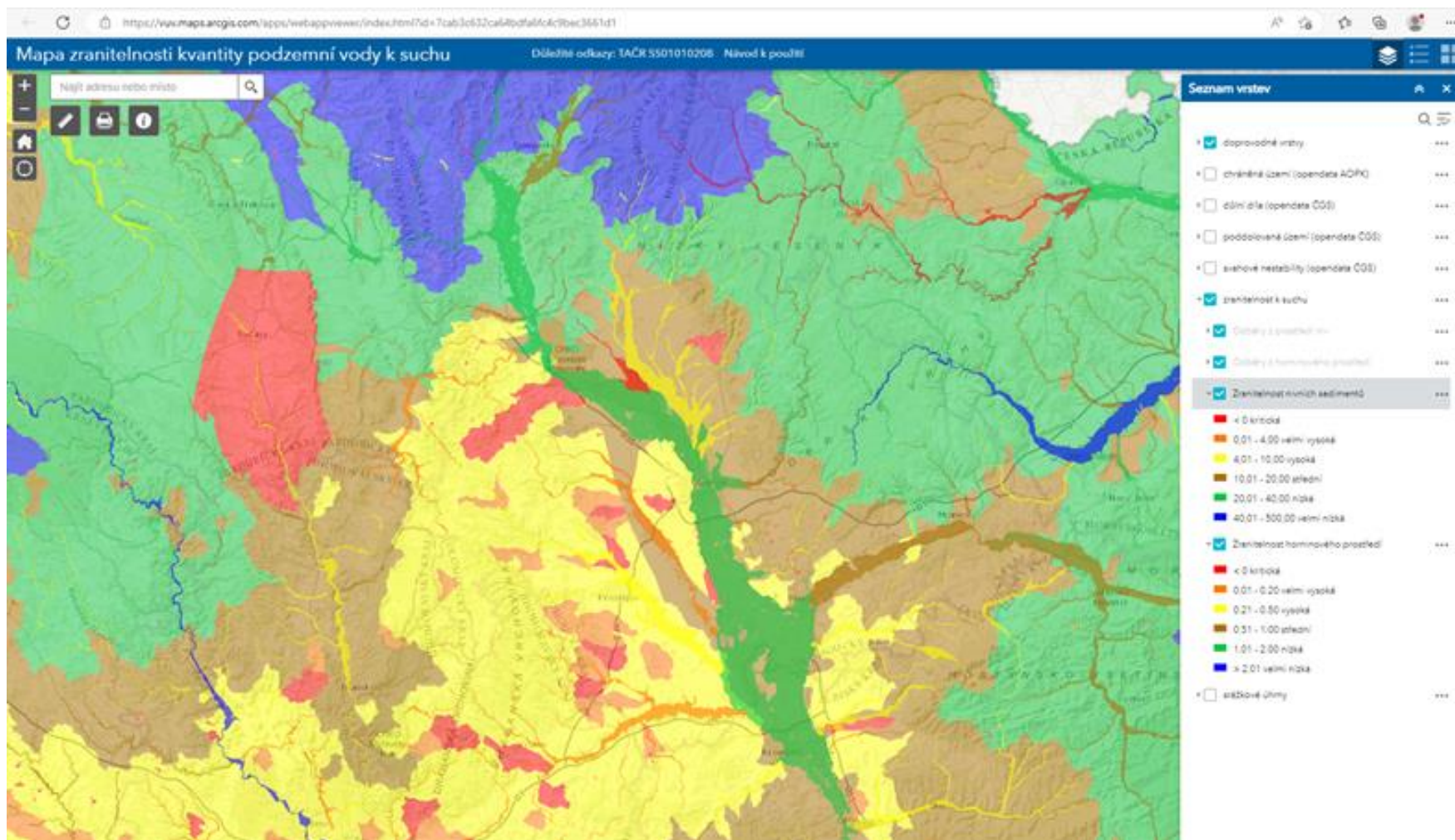
- Kritická zranitelnost (červená barva) má bilanci zápornou, což znamená, že v daném elementu území se spotřebovává v období sucha více podzemní vody, než jsou přírodní zdroje. Přírodní zdroje jsou tedy v suchém období přečerpávány.
- Velmi vysoká zranitelnost (oranžová barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývají velmi nízké potenciální zdroje pro infilukci na úrovni nižší než 4 l/s/km².
- Vysoká zranitelnost (žlutá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývají nízké potenciální zdroje pro infilukci mezi 4,01-10 l/s/km².
- Střední zranitelnost (hnědá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývají potenciální zdroje podzemní vody pro infilukci mezi 10,01-20 l/s/km²,
- Nízká zranitelnost (zelená barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývají potenciální zdroje podzemní vody pro infilukci mezi 20,01-40 l/s/km².
- Velmi nízká zranitelnost platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývají potenciální zdroje pro infilukci přes 40 l/s/km².



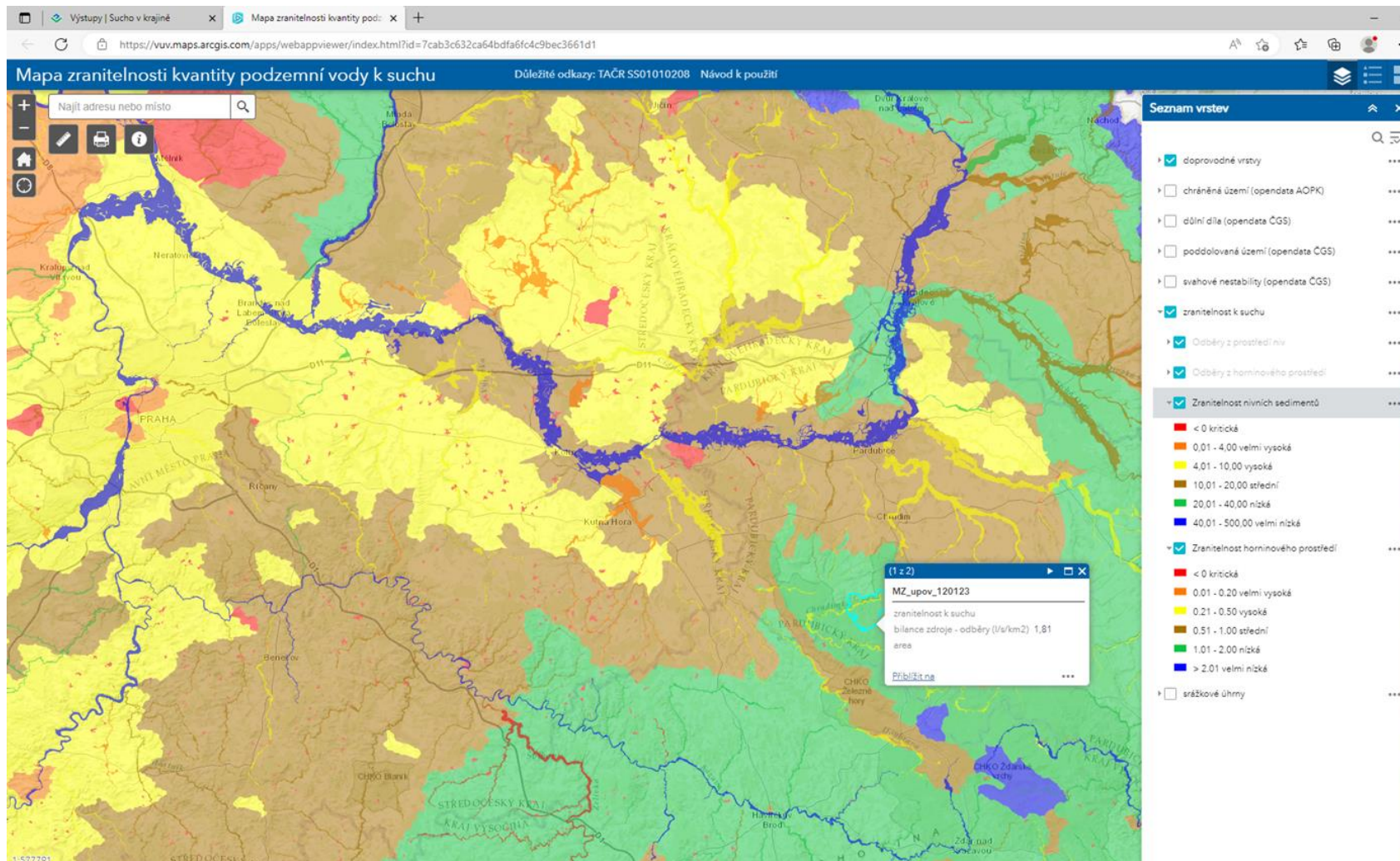
Obr. 13 Výsledná mapa hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu - celá ČR. Kategorie zranitelnosti slovně, na základě čísel vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů (l/s/km²). Pro nivy hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infiltrace (l/s/km²).



Obr. 14 Výřez z mapy hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu -oblast soutoku Labe a Jizery a okolí. Kategorie zranitelnosti slovně, na základě číslem vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů ($l/s/km^2$). Pro nivy hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infilukce ($l/s/km^2$)



Obr. 15 Výřez z mapy hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu - oblast ústecké synklinály a Olomoucko. Kategorie zranitelnosti slovně, na základě čísel vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů ($l/s/km^2$). Pro nivy hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infilukce ($l/s/km^2$).



Obr. 16 Detailní výřez z mapy hydrogeologické zranitelnosti podzemní vody k suchu, okolí Kolína. Kategorie zranitelnosti slovně, na základě číslem vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů (l/s/km²). Pro nivy hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infilukce (l/s/km²). Malé červené oblasti jsou obce s individuálním vodovodním zásobováním

5.2. Zastoupení jednotlivých kategorií zranitelnosti

Závěrem byl proveden výpočet zastoupení kategorií kritické a vysoké zranitelnosti. Pro povodí 4. řádu a hydrogeologické rajony je zastoupení vyjádřeno jako podíl plochy daných elementů spadajících do dané kategorie ku ploše ČR (78870 km²).

Hydrogeologické rajony zaujmají 16,7 % plochy. U niv jde o plochu niv v dané kategorii ku celkové ploše niv (celková plocha 5584 km²). U obcí jde o počet obcí v dané kategorii ku celkovému počtu obcí s převažujícím individuálním zásobováním (celkem 1726 obcí).

U hydrogeologických rajonů a povodí 4. řádu spadá do kritické zranitelnosti 2 % území, do velmi vysoké zranitelnosti 5 % území a do vysoké zranitelnosti 22 % plochy území ČR (tab. 3).

U niv spadá do kritické zranitelnosti 3 % území niv, do velmi vysoké zranitelnosti 13 % území niv, do vysoké zranitelnosti pak dalších 17 % území niv.

Nejhorší je situace v obcích s převažujícím individuálním zásobováním, kde pod kritickou zranitelnost spadá 93 % území obcí, dalších 5 % obcí spadá pod velmi vysokou zranitelnost a 2 % pod vysokou zranitelnost.

Tab. 3 Zastoupení kategorií na Mapě zranitelnosti zdrojů podzemní vody k suchu v ČR

zranitelnost	HGR a povodí 4. řádu zastoupení plochy (%)	nivy zastoupení plochy (%)	obce zastoupení počtu (%)
kritická	2	3	93
velmi vysoká	5	13	5
vysoká	22	17	2
střední	27	25	0
nízká	25	19	0
velmi nízká	19	23	0
	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>

5.3. Účel Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu a její omezení

Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu je tvořena na základě použití srážkového normálu a regresních vztahů mezi srážkami a celkovým a základním odtokem za použití indexů BFI a M, což zaručuje jednotné zpracování pro celou ČR v měřítku 1:50 000. Účelem výše uvedené mapy je umožnit objektivní porovnání zranitelnosti v rámci celé republiky.

Mapa dále vychází z evidovaných odběrů podzemní vody a v případě obcí s individuálním zásobováním je odběr vypočítán z počtu obyvatel a celostátní průměrné spotřeby pitné vody na obyvatele. Odběry podzemní vody v mapě zranitelnosti k suchu jsou přiřazeny tomu prostředí kam pozicí spadají, i když často je podzemní voda odebírána z více prostředí v neznámém poměru (niva, resp. kvartérní fluvialní sedimenty vs. horninové prostředí).

V celorepublikové účelové mapě zranitelnosti k suchu mohou být v rámci detailu nepřesnosti, případně i chyby vyplývající z kvality dostupných informací např. o počtech obyvatel, existenci vodovodů, či odběrech podzemní vody apod. a i měřítko 1:50 000.

Mapa zranitelnosti k suchu je jednotně zpracovaným podkladem nicméně nepostihujícím detaily a specifika jednotlivých oblastí, které nebylo možné ze současných podkladů určit. Proto by měla být používána jako informační dokument s vědomím, že je potřebná detailní studie upřesňující zdroje podzemní vody pro konkrétní lokalitu včetně nezbytných terénních měření.

5.4. Návod k praktickému použití mapy zranitelnosti

Při otevření mapového prohlížeče na www.suchovkrajine.cz, konkrétně na <https://vuv.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7cab3c632ca64bdfa6fc4c9bec3661d1> je vždy zapnutá hlavní vrstva – mapa zranitelnosti k suchu se standardním topografickým podkladem, a v pravé části se seznamem dostupných vrstev. Mapu lze tlačítky + a – v levém horním rohu přibližovat a oddalovat. Bílý vyhledávací rámeček vlevo nahoře umožňuje zadat název obce, města apod., a mapa se přiblíží na vybrané území. V pravé části obrazovky je seznam dostupných vrstev, který si uživatel může rozbalovat (šipkami na kraji řádků) a zobrazovat (zaškrtnutím čtvercových políček). Pozor, k zobrazení v mapě musí být zaškrtnuta všechna políčka zobrazující cestu v daném stromu. Tzn., že např. pro zobrazení ochranných pásem vodních zdrojů je třeba mít nejen zaškrtnuté políčko u této volby, ale i u nadřazených skupin Ochranná pásma a Doprovodné údaje. Není účelné současně zobrazovat mnoho vrstev, protože pak se mapa stává nepřehlednou a nečitelnou. Je vhodné prohlížet jednu vrstvu za druhou. Tři ikony v horní modré liště vpravo nahoře znamenají odleva Seznam vrstev (volba nastavená při otevření mapy), Legenda (zobrazení legendy aktivních vrstev), a Galerie podkladových map. V ikoně i umístěné v levém horním rohu obrazovky jsou odkazy na monitorovací síť ČHMÚ (Jakost povrchových vod, Průtoky povrchových vod), na horní liště jsou i informace o projektu TAČR (TAČRSS01010208), a odkaz na tuto zprávu. V levé horní části je ještě nástroj na měření vzdáleností a ploch a pro tisk vybraného výřezu mapy. Vrstva evidovaných odběrů podzemní vody se stává aktivní až při dostatečném přiblížení mapy (nelze ji tedy zobrazit v celostátním měřítku, kdy jsou v seznamu vrstev zobrazovány šedě), kvůli množství symbolů a ikon, které by zcela zaplnily mapu.

Mapy průměrného základního odtoku (obr. 11) a základního odtoku za sucha (obr. 12) budou v plném rozlišení zpřístupněny cca v červnu 2023 na www.geology.cz

6. Shrnutí

Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu určuje nejen velikost přírodních zdrojů podzemní vody ale i jejich současné využívání, protože v hydrogeologických rajonech s největšími zdroji podzemní vody jsou často i největší odběry podzemní vody.

Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu byla sestavena ve formě bilance přírodních zdrojů a odběrů podzemní vody. U rozsáhlých kolektorů, kde je bilance v celé oblasti vzájemně provázána a nelze oblast smysluplně rozdělit, byl základní jednotkou hydrogeologický rajon, naopak tam, kde jsou rozptýlené zdroje využívající kolektor přípovrchové zóny rozpuštění hornin a kde nejvíce hrozí lokální přečerpání zdrojů podzemní vody byly základním elementem povodí 4. řádu. Zvláště jsou bilancovány říční a potoční nivy, kde je zdrojem i infiltrace vody toků z rozsáhlých orografických povodí, pod které prostředí nivy spadá.

Celkový dlouhodobý průměrný odtok v ČR těsně koreluje s dlouhodobým průměrným úhrnem srážek (s nimiž je korelována evapotranspirace a zřejmě i další podstatné parametry odtok ovlivňující). Z dlouhodobého průměrného úhrnu srážek lze proto průměrný celkový odtok poměrně přesně stanovit pro jakékoli místo v ČR.

Naopak vliv geologie na celkový odtok se ukazuje jako zanedbatelný.

Naproti tomu pro určení základního odtoku je již vliv geologie velmi zásadní a je nutné uvažovat rozdílné hodnoty base flow indexu pro jednotlivé hydrogeologické rajony.

Proto byl zvolen následující postup: nejprve se z dlouhodobého průměru srážek pro dané místo (v rozlišení 1 km²) určil dlouhodobý průměrný celkový odtok pomocí polynomu 2 stupně odděleně pro dva typy povodí v ČR: a) hydrogeologické rajony flyše, b) ostatní povodí. Poté byl vynásoben celkový odtok s base flow indexem, který je udán pro každý rajon v ČR v tabulka 1 (získáno ze separatace hydrogramů pro 518 povodí ČHMÚ) a tím byl získán dlouhodobý průměrný základní odtok (průměrné přírodní zdroje podzemní vody). Poté byl průměrný základní odtok násoben indexem M (poměr základního odtoku v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019 ku dlouhodobému průměru základního

odtoku), který je pro všechny rajony uveden v tabulce 2 a tím byl získán základní odtok v období sucha (přírodní zdroje podzemní vody v období sucha).

Na základě bilance se od základního odtoku v období sucha odečetly odběry podzemní vody a podle výsledného zbývajícího odtoku byla kvantitativně určena zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu. Tento postup uvažuje i uvolňování vody ze statických zásob, protože odtok z oblastí s vyšším storativitou bývá více vyrovnaný, a proto odtok v obdobích sucha klesá méně.

Poprvé jsou k dispozici rámcové informace o zdrojích podzemní vody z influkce, která zatím nebyla v rozsahu ČR podchycena. Při výpočtech se stanovila i zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody v zastavěné části obcí s individuálním zásobováním podzemní vodou, a to podle počtu obyvatel a zastavěné plochy obce.

7. Závěr

- Mapa hydrogeologické zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu je k dispozici, vč. bodových odběrů podzemní vody.
- Mapa vychází z objektivních dostupných dat pozorovací sítě ČHMÚ, platných PRVKUKů pro jednotlivé kraje, databáze HEIS a evidence obyvatel.
- Zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu byla rozdělena do 6 kategorií. Nejzákladnější je kritická zranitelnost, která znamená dočasné přečerpávání zdrojů v období sucha, kdy dotace podzemní vody je nižší než v současnosti využívané množství podzemní vody v daném plošném elementu. Takovým územím by měla být věnována zvýšená pozornost. Kategorie velmi vysoké zranitelnosti a vysoké zranitelnosti vymezují oblasti s jen malými rezervami základního odtoku, kde mohou nastat problémy při prohlubování klimatické změny, resp. v období víceletého hydrologického sucha.
- Výsledná mapa zranitelnosti k suchu ukazuje, že nejohroženější území suchem jsou zastavěné plochy obcí s individuálním zásobováním podzemní vodou, kde pod kritickou zranitelnost spadá 93 % těchto obcí a dalších 5 % spadá pod velmi vysokou zranitelnost. U území niv je kritická zranitelnost jen u 3 % ploch těchto území a velmi vysoká u 13 % ploch těchto území. U území hydrogeologických rajonů a povodí 4. řádu dosahují oblasti kritické zranitelnosti 2 % ploch a vysoké zranitelnosti 5 % plochy ČR a zasahují tedy zatím malou část ČR.
- Výsledná mapa zranitelnosti je dostupná k prohlížení na www.suchovkrajine.cz, konkrétně na <https://vuv.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7cab3c632ca64bdfa6fc4c9bec3661d1>
- Mapy průměrného základního odtoku (obr. 11) a základního odtoku za sucha (obr. 12) budou v plném rozlišení zpřístupněny cca v červnu 2023 na www.geology.cz

Poděkování: Mapy vznikly v rámci projektu „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ s ID číslem SS01010208-V8 financovaném ISTA TA ČR v rámci programu Prostředí pro život.

Za pomoc se zdroji dat vděčíme Ing. A. Vizinovi, Ph.D. a ing. M. Zrzaveckému a za cenné připomínky k předběžné verzi mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu a metodice děkujeme Ing. M. Kašpárkovi CSc., RNDr. M. Milickému PhD. a RNDr. Z. Hermanovi.

8. Použitá literatura

- Aksoy H., Kurt I., Eris E. (2009): Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology* 372: 94-101.
- Bruthans J., Kadlecová R., Slavík M., Králová M., Fryč T., Čurda J. (2020): Příčina prudkého snížení průtoků některých vodních toků ve středních Čechách v léte 2019 a extrémně nízkých specifických odtoků: vliv evapotranspirace z příbřežní zóny toku a ploch s mělkou hladinou podzemní vody. *Geoscience Research Report* 53: 47-54.
- Bruthans J., Kadlecová R., Nol O., Grundloch J. (2021): Vývoj základního odtoku v různých hydrogeologických strukturách v ČR za suchých a vlhkých období aneb jak nestavět na ovlivněných datech. *Sborník semináře: Podzemní voda ve vodoprávním řízení XVI - ohlédnutí za hydrologickým suchem*. ČSVTS, z.s.
- Bruthans, J. a Soukup, J. (2011): Vyhodnocení některých parametrů, návrh úprav regionalizace základního odtoku a poznámky k metodice stanovení přírodních zdrojů. – MS Čes. geol. služba.
- Eckhardt, K., (2008): A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods, *Journal of Hydrology*, 352, 168-173.
- Fuchsa J. K. (2020): Sucho a vliv čistíren odpadních vod na řeky. *Vodní hospodářství* 70.4: 4-7
- Kašpárek L., Datel J. V. (2013): Rebilance zásob podzemních vod: metodiky stanovení průměrné hodnoty přírodních zdrojů podzemních vod kvartérních hydrogeologických rajonů. *VUV TGM* 21 str.
- Kašpárek M., Datel J. V. et al. (2015): Metodiky výpočtu přírodních zdrojů. *MS Česká geologická služba* 26 str.
- Kašpárek M. a Datel J. V. et al. (2014): Rebilance zásob podzemních vod: Základní výchozí data pro zjednodušené stanovení velikost přírodních zdrojů podzemní vody v 55 hydrogeologických rajonech. *MS VÚV TGM* 33 str.
- Kašpárek M., Kožíň R., Datel J. V., Peláková M. (2022): Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981-2019. *VTEI* 2022/5.
- Kašpárek L., Vlnas R., Hanel M., Pelíková M. (2017): Vztahy mezi základním a celkovým odtokem z povodí v závislosti na hydrogeologickém typu horninového prostředí. *Vodní hospodářství* 7: 5-11.
- Kille K. (1970): Das verfahren MoNQ, Beitrag zur Berechnung der mittleren langjahrinhgen Grundwasserneubildung mit Hilfe den monatlichen Niedrigwasserabflusse. *Z. Dtsch. Geol. Gesell. (Hannover)* 89-95.
- Kliner K., Kněžek M. (1974): Metoda separace základního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. *Vodohospodářský čas.* 22 (5): 457-466.
- Krásný J., Kněžek M., Šubová A., Daňková H., Matuška M., Hanzel V. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. *Český hydrometeorologický ústav*. Praha
- Kůrková I., Bruthans J., Balák F., Slavík M., Schweigstillová J., Bruthansová J., Mikuš P., Grundloch J. (2019): Factors controlling evolution of karst conduits in sandy limestone and calcareous sandstone (Turnov area, Czech Republic). *Journal of Hydrology*: 574: 1062-1073
- Teuling A. J., de Badts E.A.G., Jansen F. A., Fuchs R., Buitink J., Hoek van Dijke A. J., Sterling S. M. (2019): Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe. *Hydrol. Earth. Syst. Sci* 23: 3631-3652
- Tolasz R., Daňhelka J., Kinkor J., Kodeš V., Kubát J., Trnka M., Štěpánek P., Žalud Z. a kol. (2019): Aktualizace Komplexní studie dopadů zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR z roku 2015. *MS Český hydrometeorologický ústav*. 379 str.