

# Metodika tvorby Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro Českou republiku

JIŘÍ BRUTHANS, JIŘÍ GRUNDLOCH, RENÁTA KADLECOVÁ, TUNA KARATAS, KATEŘINA ŠABATOVÁ, RADEK VLNAS

**Klíčová slova:** podzemní voda – sucho – zranitelnost – zásoby – specializovaná mapa

## ABSTRAKT

Sucho ovlivňující stav podzemní vody je doposud většinou chápáno jako podmnožina sucha hydrologického. Dopad hydrologického sucha se u podzemní vody projevuje se zpožděním a závisí na jeho délce. V rámci projektu TA ČR „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ byla sestavena *Mapa zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu*. Odborná interaktivní mapa je vytvořena na základě použití srážkového normálu a regresních vztahů mezi srážkami a celkovým a základním odtokem s použitím indexu BFI a poměru BFI v nejsušším roce za dekádu 2010–2019 k dlouhodobému (index M). Tento přístup zaručuje jednotné zpracování pro celou Českou republiku v měřítku 1 : 50 000 a objektivní porovnání zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu v rámci celé republiky. 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. Mapa je sestavena na bilanci přírodních zdrojů a odběrů podzemní vody. Obsahuje šest kategorií a ukazuje, které regiony a oblasti budou mít problém s dostatkem zdrojů podzemní vody v období dlouhodobého sucha. Syntetizuje všechna dostupná režimní a další data k roku 2020 a je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.

Mapa, dostupná na [www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu](http://www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu), umožňuje přípravu, návrh a realizaci opatření, která zajistí dostatek zdrojů zejména pitné vody pro obyvatele i v obdobích dlouhodobého sucha.

## ÚVOD

Nacházíme se v období klimatické změny, pro kterou jsou typické častější extrémní výkyvy počasí. V letech 2015–2020 probíhalo neobvykle dlouhé období hydrologického sucha v České republice (ČR), jež na velké části jejího území způsobilo pokles hladin podzemní vody a nedostatek zdrojů vody pro obyvatele zejména v menších sídlech. Sucho se na stavu podzemních vod projevuje s velkou setrvačností. Území ČR je téměř ze tří čtvrtin tvořeno horninami, které mají nízkou schopnost akumulovat větší zásoby podzemní vody na víceletá období, a tak většina vody z našeho území odtéká. Zásoby podzemní vody jsou v těchto oblastech závislé na jejich pravidelném každoročním doplňování ze srážek, k čemuž však nedochází vždy ve stejném množství. Mezi hlavní priority státu patří zajištění dostatku zdrojů podzemní vody pro zásobování obyvatel ČR, a to i v období dlouhodobého sucha.

Jedním z cílů projektu ISTA TA ČR SS01010208 „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ byla proto metodika a tvorba *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* pro systém operativního řízení Ministerstva životního prostředí.

Obr. 1. Zásoby podzemní vody

Fig. 1. Groundwater resources

Zásoby podzemní vody tvoří objem a tok podzemní vody v hydrogeologickém kolektoru v souladu s vyhláškou č. 369/2004 Sb., o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, ve znění pozdějších předpisů.

Zásoby podzemní vody zahrnují:

- Množství vody protékající v daném čase (měsíci, roku) kolektorem podzemní vody, tj. 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

influxí z povrchových vodních toků. Přírodní zdroje podzemní vody jsou obvykle v dlouhodobějším průměru považovány za rovné základnímu odtoku.

- Objem vody, který vyplňuje póry, dutiny a trhliny v kolektoru, tj. statické zásoby podzemní vody, tedy objem gravitační vody ve zvodněné části kolektoru, vyjadřovaný v objemových jednotkách ( $m^3$ ). 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 je graficky vyjádřen na *obr. 1*.

## METODIKA

Sestavení *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* (dále jen *Mapy zranitelnosti 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 ČR 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, jež se projeví na rychlosti poklesu základního odtoku v suchém období. Místa odběrů (4 693 lokalit s odběry podzemní vody a 941 s odběry povrchové vody) a vypouštění vody (5 092 lokalit s vypouštěním povrchové vody a 28 lokalit s vypouštěním do podzemní vody), jež podléhají evidenci ve smyslu vyhlášky č. 252/2013 Sb., obsahuje informační systém HEIS (<https://heis.vuv.cz/data/webmap/>) spravovaný VÚV TGM (data k roku 2020). Dále existuje přes 1 000 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 dostatku podzemní vody v suchých obdobích. Aby všechny tyto informace bylo možné účelně využít, bylo 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, byla použita jako základní jednotka povodí 4. řádu, jichž je v ČR 8 750.

Účelová mapa je zpracována v měřítku 1 : 50 000. Je založena na objektivních režimních datech z databáze (průtoky a srážky) Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), dostupné na <https://www.chmi.cz/historicka-data>, na údajích o evidovaných odběrech podzemní a povrchové vody a vypouštění z databáze HEIS a na informacích o obcích a jejich částech, které nemají připojení na vodovod dle dostupných *Plánů rozvoje vodovodů a kanalizací* (PRVKUK) pro každý kraj nacházejících se na webových stránkách Ministerstva zemědělství <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/voda/vodovody-a-kanalizace/plany-rozvoje-vodovodu-a-kanalizaci> (z roku 2007), evidenci obyvatel v obcích atd.

### Základní typy prostředí

Pro potřeby *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu* bylo území ČR rozděleno do čtyř základních prostředí, jež 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, tj. prostředí tvrdých hornin a silně cementovaných sedimentů, kde je využitelný kolektor především v zóně přípovrchového rozpukání a zvětrání hornin, proudění podzemní vody kopíruje spád terénu,
  - C) nivy řek a menších vodních toků, kde je potenciál indukovaných zdrojů, tedy zdrojů podzemní vody z povrchového toku, z rozsáhlých orografických povodí výše proti proudu, resp. zázemí,
  - D) osídlené části obcí s převážujícím individuálním zásobováním podzemní vodou, kde jsou relativně vysoké odběry podzemní vody na jednotku plochy pro potřeby obyvatel.
- A) Pánevní a kvartérní kolektory (mimo údolní nivy) byly zpracovány pouze pro vrstvu HGR 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 sucho a až na výjimky je jeho využití nízké. Pánevni struktury tvoří obvykle ucelený proudový systém, a proto bylo s HGR zacházeno jako s elementárními jednotkami, tj. výpočet bilance zdrojů podzemní vody byl prováděn pro jednotku – celý rajon a celá jednotka má jednotnou zranitelnost. Do prostředí A patří propustné části české křídové pánve, jihočeské pánve a kvartérní rajony.

- B) Do prostředí příporchových kolektorů tvrdých hornin a jejich ekvivalentu (hydrogeologický masiv) spadají všechny ostatní oblasti, tj. oblasti v základní vrstvě HGR, kde není přítomen vodohospodářsky významný kolektor. Řadí se sem oblasti vyvřelých, metamorfovaných a zvrásněných sedimentárních hornin a části české křídové pánve, kde převažují izolátory (propustné jen v příporchové zóně) permokarbonu terciér, tj. velká většina území ČR. Jde o oblasti, jež mají omezené statické zásoby podzemní vody, a jsou tedy závislé na každoroční dotaci ze srážek. Na rozdíl od prostředí A se zde obvykle 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 ostatních 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 vodního toku odvodňuje podzemní voda ze základních HGR, proto lze obvykle v nivách získávat řádově vyšší množství podzemní vody než v okolním prostředí základních rajonů. 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, v nichž je možné počítat bilanci. V každém z povodí 2. řádu je páteřní vodní 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 blíží povodí 4. řádu). Kratší přítoky byly ořezány bufferem 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 několika povodími 2. řádu (např. Sázava, Vltava) mají nivu kontinuální od pramene až po ústí do většího toku. Menší vodní 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 všem vymezeným segmentům niv jsou k dispozici dva údaje – plocha segmentu nivy a plocha jeho orografického povodí.
- D) Obce s individuálním zásobováním podzemní vodou.  
Osídlené části obcí s převahou individuálního zásobování se vyzemily následovně. Na základě dostupných plánů PRVKUK a digitalizované vrstvy průběhů vodovodů byly vybrány obce, jež nemají vodovod. Dle překryvu vrstvy obcí pak byly zvoleny ty, které neprotínaly průběh vodovodů. Poté probíhala kontrola získaného výběru obcí podle tabulek a plánů PRVKUK. Ve výsledku vznikla vrstva obsahující přes 1 726 částí obcí bez hromadného zásobování (z celkem 1 035 obcí). U těchto obcí se určila plocha zastavěné části. Výchozím podkladem je mapa bloků budov (mapa ČR 1 : 50 000) získaná pomocí ortofotomapy s manuálním doplněním zastavěné plochy u vybraných obcí pomocí polygonů v GIS. Následovala kontrola a ověření správnosti rozsahu polygonů a jejich příslušnosti k jednotlivým obcím. Poté se pro jednotlivé obce stanovila plocha zastavěných částí z vytyčených polygonů. Pokud obec sestávala z více částí, pracovalo se se všemi částmi dané obce dohromady. Je vhodné poznamenat, že plány PRVKUK pro jednotlivé kraje (veřejně dostupné na webových stránkách příslušných krajů, případně Ministerstva zemědělství) v době zpracování vrstvy zranitelnosti podzemní vody k suchu pocházejí převážně z roku 2007 a poskytují informace o existenci vodovodů ve výhledu k roku 2015.

Výpočetní plošné elementy v prostředích A až D:

- u prostředí A (pánevni a kvartérní HGR) je elementem celý HGR s výjimkou nivy,
- u prostředí B s přípořchovým kolektorem je elementem povodí 4. řádu s výjimkou nivy,
- u prostředí C, tj. niv menších vodních toků, je elementem celá niva,
- u prostředí D, tj. obcí, je elementem zastavěná oblast dané části obce.

### Jednotlivé informační vrstvy a určení základního odtoku

Podklad pro *Mapu 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/km<sup>2</sup>),
- 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).

### Vrstva dotace podzemní vody ze srážek

#### 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. Jelikož skutečnou evapotranspiraci ani zachycené množství vody v nenasycené zóně nelze efektivně určovat na větších plochách, stanovuje se průměrná hodnota dotace podzemní vody ze základního odtoku. Veškerá voda, jež se stala podzemní vodou (dotace), musí totiž dříve nebo později podzemí opustit ve formě základního odtoku. Dále je tedy pracováno se základním odtokem, který odpovídá dotaci podzemní vody za určité časové období. Rovnítko mezi dotací podzemní vody a základním odtokem je nicméně platné pouze pro delší časová období (několik let), kdy 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 [12]. Vychází z nejnižších hodnot průměrných denních průtoků na povrchových tocích v jednotlivých měsících z minimálně 10leté časové řady. Výhodou je snadné stanovení, 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, resp. základního odtoku z ČR [14].

V minulosti byla často používána i metoda Kliner-Kněžek [13]. Ta graficky odvozuje základní odtok z měřených dvojic hladiny podzemní vody ve vrtu a průtoku vodního toku vykreslených do společného grafu. Její výhodou je uvažování kolísání hladiny podzemní vody, 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 [5]. Tento přístup je široce využíván v zahraničí a využívá ho i ČHMÚ pro stanovení přírodních zdrojů podzemní vody v HGR 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 dva parametry: recesní koeficient poklesu průtoku 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 [8]. Na data celkového průtoku 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. [1]). 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 zranitelnosti podzemní vody k suchu* byl základní odtok jednotně separován metodou klouzavých minim z dostupných dat denních průtoků 518 vodoměrných stanic ČHMÚ v období 1981–2019. Na rozdíl od dříve hojně používané Killeho metody [14] umožňuje tento způsob separace stanovit proměnlivou hodnotu základního odtoku v čase s měsíčním rozlišením. To je cenné zejména v současnosti,

kdy se odtok může vlivem klimatické změny poměrně výrazně měnit.

### Base Flow Index

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

*Tab. 1* uvádí BFI pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. Je zřejmé, že zdaleka nejnižší BFI 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 má BFI mezi hodnotami 0,4 a 0,5, základní odtok zde tedy tvoří 40–50 % celkového odtoku. Jde především o horniny krystalinika, kulmu, části permokarbonu a těch částí křídových rajonů, kde na povrchu převládají izolátory. Následují přechodné oblasti s BFI mezi 0,55–0,65 s horninami křídovými, permokarbonskými a výjimečně krystalinickými. Několik křídových rajonů má BFI 0,7–0,75, což dokumentuje značnou schopnost vyrovnávat odtok.

Extrém pak představuje pás rajonů podél toku Jizery a pravostranných přítoků Labe (povodí Zábřdky, Bělé, Skalského potoka, Košateckého potoka, Pšovky, Liběchovky, Obrtky), tvořený silně propustnými vápnatými pískovci a písčitymi vápenci, místy až s krasovou propustností [15], jež mají extrémní vyrovnávací schopnost zřejmě díky střídání kvádrových a vápnatých pískovců, kde BFI dosahuje anomálně vysokých hodnot 0,75–0,9. Základní odtok zde tvoří 75–90 % celkového odtoku, a rychlý odtok je tedy nevýznamný.

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

*Tab. 1. Base flow index (BFI) values derived from the separation of hydrograms on watercourses in different zones (HGR)*

U kvartérních fluvialních štěrkopísků byl BFI pouze kvalifikovaně odhadnut na 0,7 v případě většiny kvartérních rajonů a na 0,5 v případě fluvialních štěrkopísků pokrytých sprašemi. Tento odhad je postaven na skutečnosti, že z kvartérních štěrkopísků nenastává povrchový odtok. Ovšem průběhy hladin podzemní vody na vrtech dokumentujících zvodeň kvartérních štěrkopísků naznačují přítomnost i rychlého odtoku. Skutečný BFI může být vyšší až na hodnotu cca 0,9. Nicméně při použité hodnotě 0,7 zůstávají údaje z *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu* na bezpečné straně nejistoty, a nižší hodnota je tak při nejistotě žádoucí.

Rajony s nejnižším BFI jsou, jak vyplývá z výše uvedeného, tvořeny horninami s velmi nízkou propustností. Naproti tomu rajony s nejvyšším BFI reprezentují horniny s vysokou propustností a značnou vyrovnávací schopností při deficitu dotace podzemní vody.

Nezávislé zpracování BFI uvádí práce [11], kde jsou uvedeny průměrné hodnoty BFI pro několik skupin hornin a též BFI pro vodoměrné stanice na říční síti.

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

*Fig. 2. Base flow index obtained by separating hydrograms from 518 streams in the Czech Republic monitored by the CHMI and assigned to individual HGR in the base layer (Tab. 1)*

*Obr. 3. Base flow index získaný separací hydrogramů vodních toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým HGR ve svrchní vrstvě (tab. 1)*

*Fig. 3. Base flow index obtained by separating hydrograms of streams in the Czech Republic monitored by the CHMI and assigned to individual HGR in the upper layer (Tab. 1)*

### 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, neboť je známo, že průtoky řady povrchových toků v letních obdobích někdy výrazně klesají.

Definování přírodních zdrojů na základě minimálních průtoků z letního období se však 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, nýbrž z důvodu extrémního výparu vody vegetací z nivy a výparu z vodních ploch [2].

Ztráta vodnosti se přitom projevuje pouze v letním období a případně na podzim kvůli poklesu hladiny vody pod dno koryta. Pokud by tyto silně výparem ovlivněné průtoky byly brány jako hodnoty typické pro sucho, pak by na řadě vodotečí v nižších polohách neexistovaly doslova žádné zásoby podzemní vody (odtok např. pouhých 0,07 l/s/km<sup>2</sup>) a sebemenší odběr podzemní vody z těchto rozsáhlých povodí by vedl ke zkrácení, že povodí mají extrémní zranitelnost a jsou přečerpávána. Z průtoků pramenů v těchto povodích je však zjevné, že v době, kdy za letních tropických teplot vzduchu drasticky klesají průtoky povrchových toků, se průtoky pramenů ze stejných povodí nijak nesnižují [3].

Obr. 4. Příklady extrémně nízkých průtoků na povrchových tocích s povodím okolo 100 km<sup>2</sup>. Odtok byl přechodně drasticky snížen v důsledku vysoké evapotranspirace podzemní vody z říční nivy v suchých a horkých letních obdobích; a) Brzina (Sedlčansko) 10. červenec 2019, průtok 0 l/s, povodí 133 km<sup>2</sup>; b) Žehrovka (Březina) 9. červenec 2019, měřený průtok 20 l/s, povodí 90 km<sup>2</sup>

Fig. 4. Examples of extremely low flows on surface streams with catchments of about 100 km<sup>2</sup>. Runoff was temporarily drastically reduced as a result of massive evapotranspiration of groundwater from the river floodplain in dry and hot summer periods a) Brzina (Sedlčansko) 10. July 2019, flow rate 0 l/s, river basin 133 km<sup>2</sup>; b) Žehrovka (Březina) 9. July 2019, measured flow 20 l/s, basin 90 km<sup>2</sup>

V důsledku probíhající klimatické změny již totiž pro vodní toky v nižších polohách ČR neplatí představa, že výpar z nivy toku lze zanedbat, protože 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 tocích Brziny, Loděnice, na Bakovském potoce a Klenici a zřejmě i na mnoha dalších jsou ztráty výparem z nivy toku a vodních ploch tak výrazné (200–250 l/s na plochu povodí vodních 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 dva řády nižší než základní odtok ze stejných povodí před jeho spotřebou výparem porostní vegetací [2] (obr. 4). Tento fenomén je dobře známý z aridních oblastí, kde také voda z vodních toků masivně výparem mizí, až potoky úplně vyschnou. Na řadě vodních 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 [17] 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 [6]. 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. Vliv těchto procesů na základní odtok je tedy protichůdný s tím, že efekt snížení průtoků evapotranspirací v nivě je obvykle výrazně vyšší.

### M Index

U každé vodoměrné stanice ČHMÚ se stanovil index M jako podíl průměrného základního odtoku v nejsušším zaznamenaném roce za desetiletí 2010–2019 ku průměrnému dlouhodobému základnímu odtoku. Index M tedy udává, jaký podíl z průměrného základního odtoku tvoří základní odtok v nejsušším roce (tab. 2).

*Tab. 2. Hodnoty indexu M*

*Tab. 2. Values of the M index*

Tab. 2 ukazuje index M pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. 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 BFI, který výrazně souvisí s litologií, je index M ovlivněn především nadmořskou výškou. Vliv litologie je vhodné posoudit v budoucích studiích. Omezený vliv litologie je zřejmý např. u M = 0,45, který mají jak velmi málo propustné 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. Např. u HGR 4521 Křída Košáteckého potoka je sice porozita schopna pohltit téměř veškerý rychlý odtok a převést ho na odtok základní (BFI 0,9), ale tato porozita již není schopna vyrovnat odtok v řádu několika let, aby odtok mezi suchými a vlhkými lety příliš nekolísal. Mnohem větší vliv na vyrovnání odtoku v mnohaletých cyklech tak má pravidelná dotace podzemní vody ze srážek. Ve vyšších nadmořských výškách je dotace podzemní vody pravidelnější, jelikož 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 letech (např. po sedmi letech v případě Slánska), kdy už základní odtok stačil klesnout na výrazně podprůměrné hodnoty.

Obr. 5. Index M stanovený separací hydrogramů 518 povrchových vodních toků přiřazený HGR v základní vrstvě

Fig. 5. Index M determined by hydrogram separation from 518 surface streams assigned to HGR in the base layer

Obr. 6. Index M – index stanovený separací hydrogramů povrchových vodních toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým HGR ve svrchní vrstvě (tab. 2)

Fig. 6. Index M – index determined by separation of hydrograms surface streams in the Czech Republic monitored by the Czech Hydrometeorological Institute and assigned to individual HGR in the upper layer (Tab. 2)

#### 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 však 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) neodrážejí podmínky tvorby základního odtoku v nížině, ale naopak podmínky převládající ve zdrojové oblasti (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 vodního 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, jež jsou k dispozici v celé ploše území ČR. Nejvhodnějším parametrem je dlouhodobý průměrný úhrn srážek, který je dostupný v rozlišení 1 km<sup>2</sup> (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 [9].

Těsný vztah mezi průměrným dlouhodobým úhrnem srážek a celkovým odtokem na základě analýzy 65 povodí ČHMÚ je popsán v publikaci [7]. Průměrný celkový odtok lze z průměrných srážek vypočítat podle rovnice:

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

kde:

$CO_{prům}$  je celkový průměrný odtok (mm/rok)  
(srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok), přičemž v obou případech jde o 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:

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

kde:

$CO_{prům}$  je celkový průměrný odtok (l/s/km<sup>2</sup>)  
(srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok), opět v dlouholetém průměru

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 nichž bylo zjevné přetékaní vody z/do jiných povodí. Výsledných 138 povodí bylo rozděleno do následujících pěti skupin podle geologie: krystalinikum, kulm (spodnokarbonské droby na Moravě), permokarbon, křída, flyš [4].

U celkového odtoku se ukázalo, že s výjimkou flyše mají všechna povodí stejný vztah k dlouhodobému průměrnému úhrnu srážek, který tak lze vyjádřit jednotnou rovnicí. Pouze horniny flyše vykazují nižší odtok při stejném srážkovém úhrnu než skupina všech ostatních hornin (*obr. 7*). Příčina odlišnosti flyše je zřejmě klimatická, nikoli geologická. Horniny flyše se nacházejí jen v Karpatech na hranici se Slovenskem, zatímco jiné horniny se vyskytují v širším území ČR, tedy s průměrnou polohou až o stovky kilometrů jinde. Flyš je v geograficky odlišné oblasti ve více kontinentálních podmínkách než průměr ostatních povodí. Analýza ukázala, že povodí ČR pro stanovení celkového odtoku stačí členit na pouhé dvě skupiny. Pro všechny rajony s výjimkou flyše lze průměrný celkový odtok určit z průměrných dlouhodobých srážek ze vztahu na *obr. 8*, zatímco pro rajony flyše je vztah uveden na *obr. 9*. Porovnání těchto regresních rovnic s rovnicí [9] je uvedeno na *obr. 10*.

Obr. 7. Vliv srážek a geologie na celkový odtok v povodích sledovaných ČHMÚ [4]

Fig. 7. Influence of precipitation and geology on total flow for catchments monitored by CHMI [4]

Je zřejmé, že srážky velmi dobře determinují celkový odtok. Na geologii nezáleží s výjimkou flyše, jehož povodí vykazují nižší celkový odtok než ostatní povodí [4].

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)

Fig. 8. Relationship between average precipitation and total flow for all geological types of catchments other than flysch; the fitted polynomial underestimates flow for precipitation below 550 mm/year, and therefore for the lower precipitation total it is replaced by a polynomial for flysch (green line)

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

Fig. 9. Relationship between average precipitation and total flow for flysch

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

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

kde:



$ZO_{prům}$  je průměrný základní odtok (l/s/km<sup>2</sup>)  
 (srážky) jsou dlouhodobý průměrný úhrn srážek (mm/rok)  
 BFI je base flow index (bezrozměrný)  
 a, b, c jsou parametry rovnic (bezrozměrné) (obr. 8, 9)

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

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 na *obr. 10* uvádí parametry a, b, c ve formě  $a \times x^2 + b \times x + c$

Fig. 10. Comparison of relations for determination of total flow from precipitation. It is clear that the total flow from flysch catchments is significantly lower than that of other catchments. The regression equation in *Fig. 10* shows the parameters a, b, c in the form  $a \times x^2 + b \times x + c$

Pro flyš je tedy k výpočtu základního odtoku vždy užitá rovnice:

$$ZO_{prům} = (2.10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3a)$$

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

$$ZO_{prům} = (9.10^{-6} \times (\text{srážky})^2 + 0,0152 \times (\text{srážky}) - 9,3521) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3b)$$

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

$$ZO_{prům} = (2.10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3c)$$

Výslednou mapu základního odtoku ukazuje *obr. 11*. Hodnoty jsou mírně nižší než v mapě podzemního (základního) odtoku Krásného et al. (1982), která byla konstruována z dat z šedesátých a sedmdesátých 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 *obr. 5 a tab. 1* (l/s/km<sup>2</sup>). Je dobře patrné, že v kvartérních rajonech je základní odtok vyšší než v řadě okolních rajonů díky vyššímu BFI.

#### Odvození základního odtoku v období sucha ze srážek

Základní odtok v období sucha byl vypočten podle vzorce:

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

kde:

M je index minimálního základního odtoku (bezrozměrný) a je pro všechny rajony uveden v *tab. 2* (*obr. 5 a 6*).

Hranice kategorií barevné škály jsou v mapě  $ZO_{sucho}$  jiné než v mapě  $ZO_{prům}$  z důvodu optimálního rozlišení hodnot. Mapy jsou si proto podobné. Zobrazené hodnoty v obou mapách se však značně liší (srov. *obr. 11 a 12*). 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 součin s celkovým odtokem udává základní odtok v období sucha. Lze proto očekávat nejnižší základní odtok během sucha v málo propustných horninách v nejnižších nadmořských výškách (např. flyš). Zde může základní odtok v období sucha dosahovat i pouhých 10 % průměrného celkového odtoku dané oblasti.

Obr. 11. Dlouhodobý průměrný základní odtok odvozený ze srážkového normálu 1991–2020 za využití regresních vztahů a BFI indexu pro jednotlivé rajony

Fig. 11. Long-term average base flow derived from precipitation normal 1991–2020 using regression relationships and BFI index for individual zones

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

Fig. 12. Base flow in the dry season generated from precipitation normal 1991–2020 using regression relationships and BFI and M indices for individual zones

### Odběry a vypouštění podzemní a povrchové vody

Evidované 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. Např. pod jednotlivá povodí 4. řádu nebo pod nivu a pro každý takový element bylo z rozdílu sumy všech odběrů a vypouštění vody vypočteno, kolik vody se z daného elementu celkem odebírá či se do něj vypouští.

Zatímco pro prostředí A i 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 převládajícím individuálním zásobováním) byl uvažován pouze odběr 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.

### Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu

Výsledná *Mapa zranitelnosti 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 o 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:

### Určení zranitelnosti pro povodí 4. řádu a rajony

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

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

kde:

$Z_{O_{\text{sucho}}}$  je základní odtok v období sucha (l/s/km<sup>2</sup>)

$O_p$  odběr podzemní vody (l/s)

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

$S_p$  plocha daného povodí 4. řádu nebo HGR (km<sup>2</sup>)

$B_p$  symbol pro zranitelnost území povodí 4. řádu a rajonu

Základní odtok v období sucha ( $Z_{O_{\text{sucho}}}$ ) byl vypočten z rovnice 4 v rozlišení 1 km<sup>2</sup>. Tam, kde proudění podzemní vody v rajonu tvoří ucelený systém (silně propustné zvodně, např. české křídové pánve a jihočeské pánve, javoříčsko-mladečský kras), byla bilance počítána pro celý HGR, protože dělení na části HGR by bylo značně subjektivní. Všude jinde byla bilance počítána v povodí 4. řádu.

### Určení zranitelnosti pro nivu

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

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

kde:

ZO <sub>sucho</sub>	je základní odtok v období sucha (l/s/km <sup>2</sup> )
K	koeficient vytižení (bezrozměrný), který byl nastaven na hodnotu 0,5
O	odběr jak povrchové, tak podzemní vody (l/s)
V	vypouštění jak povrchové, tak podzemní vody (l/s);
Sn	plocha segmentu nivy (km <sup>2</sup> )
Sp	plocha celého orografického povodí, jehož voda nivním segmentem protéká (km <sup>2</sup> )
Bn	symbol pro zranitelnost prostředí nivy

Základní odtok byl vypočten jako průměrná hodnota ze základního odtoku z povodí 4. řádu a HGR v podloží nivy. Jelikož 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 vodního toku je k dispozici 50 % (koeficient vytižení) 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 vodního toku (cca v průměru 2–5 %), jsou potenciální indukované zdroje z celého povodí na jednotku plochy nivy asi 20násobné než u jiných elementů. Hranice kategorií jsou u nivy proto nastaveny odlišně. Pokud by byl koeficient vytižení K na 100 %, pak by se uvažovala spotřeba veškerého základního odtoku z celého povodí pouze v daném segmentu nivy. Orografické povodí však připadá i segmentům niv dále po proudu, které jsou bilancovány samostatně, a takový postup by mohl vést k přecenění zdrojů podzemní vody.

### 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. Platí to 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. Lze to demonstrovat jednoduchým výpočtem na příkladu spotřeby vody pro zásobování. Typický základní odtok v nižších polohách ČR, kde žije většina obyvatel a kde se nachází většina obcí, nepřesahuje 1–2 l/s/km<sup>2</sup> [14]. Základní odtok přitom odpovídá průměrné dotaci podzemní vody. Na 1 000 m<sup>2</sup> 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 1 000 m<sup>2</sup> je schopen zásobovat vodou v průměru max. 1–2 osoby. 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 z dotace v období sucha, kdy 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:

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

kde:

ZO<sub>sucho</sub> je základní odtok v období sucha získaný z povodí 4. řádu nebo z hydrogeologického rajonu, na kterém obec leží (l/s/km<sup>2</sup>);

So plocha zastavěné části obce (km<sup>2</sup>)

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

N počet obyvatel dané obce, symbol pro zranitelnost plochy obce

Počet obyvatel obce byl převzat z vrstvy <https://csu.gov.cz/vysledky> (sčítání obyvatel k roku 2020). 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, jež 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 se orografické povodí shoduje s plochou zástavby. V obcích se evidentně tvoří více podzemní vody než v okolní krajině, 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, jež by si zasluhovaly další studium.

## VÝSLEDKY – MAPA ZRANITELNOSTI PODZEMNÍ VODY K SUCHU

### Kategorie mapy zranitelnosti

Výsledná *Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu* je dostupná na [www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu](http://www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu)

Území výše uvedené účelové mapy je rozděleno na plochy v šesti 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, HGR 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 obsahují 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) je pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává nízký základní odtok mezi  $0,21\text{--}0,5 \text{ l/s/km}^2$ .
- Střední zranitelnost (hnědá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů v období sucha zůstává základní odtok mezi  $0,51\text{--}1 \text{ l/s/km}^2$ .
- Nízká zranitelnost (zelená barva) je pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývá  $1,01\text{--}2 \text{ l/s/km}^2$ .
- Velmi nízká zranitelnost platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zbývá přes  $2 \text{ l/s/km}^2$ .

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.

Obr. 13. *Výsledná Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu*. Kategorie zranitelnosti jsou stanoveny na základě číslem vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů ( $\text{l/s/km}^2$ ). Pro nivy jsou to hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infilukce ( $\text{l/s/km}^2$ )

Fig. 13. The resulting *Map of the Vulnerability of Natural Groundwater Resources to Drought*. Vulnerability categories are determined on the basis of the numbers of the remaining groundwater resources in the dry season after subtraction of groundwater abstractions ( $\text{l/s/km}^2$ ). For floodplains, these are the values of potential remaining recharge from streams ( $\text{l/s/km}^2$ )

Obr. 14. Výřez z *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* – oblast soutoku Labe a Jizery a okolí. Kategorie zranitelnosti jsou stanoveny na základě číslem vyjádřených zbývajících zdrojů

podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů ( $l/s/km^2$ ). Pro nivy jsou to hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infilukce ( $l/s/km^2$ )

Fig. 14. A cut-out from the *Map of Vulnerability of the Quantity of Natural Groundwater Resources to Drought* – the area of the confluence of the Elbe and Jizera rivers and their surroundings. Vulnerability categories are determined on the basis of the numbers of the remaining groundwater resources in the dry season after subtraction of groundwater abstractions ( $l/s/km^2$ ). For floodplains, these are values of potential remaining recharge from streams ( $l/s/km^2$ )

### Zastoupení jednotlivých kategorií zranitelnosti

Závěrem byl proveden výpočet zastoupení kategorií kritické a vysoké zranitelnosti. Pro povodí 4. řádu a HGR je zastoupení vyjádřeno jako podíl plochy daných elementů spadajících do dané kategorie ku ploše ČR ( $78\,870\ km^2$ ).

HGR zaujímají 16,7 % plochy. U niv jde o plochu niv v dané kategorii ku jejich celkové ploše (činí  $5\,584\ km^2$ ). U obcí jde o počet obcí v dané kategorii k jejich celkovému počtu s převažujícím individuálním zásobováním (celkem 1 726 obcí).

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

U niv patří 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 % pod velmi vysokou zranitelnost a 2 % pod vysokou zranitelnost.

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

Tab. 3. Representation of categories on the Map of Drought Vulnerability of Groundwater Resources in the Czech Republic

### SHRNUTÍ A DISKUZE

Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu určuje nejen velikost přírodních zdrojů podzemní vody, ale i míru jejich současného využívání, protože v HGR s největšími zdroji podzemní vody jsou často i největší odběry podzemní vody. Účelem *Mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* je objektivní porovnání zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody v rámci celého území ČR. Tato mapa je sestavena ve formě bilance přírodních zdrojů a odběrů podzemní vody vycházející z celkového a základního odtoku, základního odtoku v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019, údajů HEIS, PRVKUK k roku 2019, počtu obyvatel, srážkových úhrnů za období 1991–2020 atd. Autoři účelové mapy jsou si vědomi, že některé informace z veřejně dostupných zdrojů, např. z PRVKUK, jež se aktualizují ve víceletém časovém horizontu a podle potřeb příslušného kraje, nemusejí odpovídat aktuální situaci. Mapa je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.

U rozsáhlých kolektorů, kde je bilance v celé oblasti vzájemně provázána a nelze oblast smysluplně rozdělit, byl základní jednotkou HGR. Tam, kde jsou rozptýlené zdroje podzemní vody využívající kolektor přípovrchové zóny rozpukání hornin a kde nejvíce hrozí lokální přečerpání zdrojů podzemní vody, byla základním elementem povodí 4. řádu. Zvláště jsou bilancovány říční a potoční nivy, kde je zdrojem i infilukce vody z vodních toků z rozsáhlých orografických povodí, pod které prostředí nivy spadá.

Celkový dlouhodobý průměrný odtok v ČR těsně koreluje s dlouhodobým průměrným úhrnem srážek. Z dlouhodobého průměrného úhrnu srážek lze proto průměrný celkový odtok poměrně přesně stanovit pro jakékoli místo v ČR. 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 BFI pro jednotlivé HGR (viz tab. 1). Poté byl průměrný základní odtok násoben indexem M – tedy poměrem základního odtoku v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019 ku dlouhodobému průměru základního odtoku, který je stanoven pro všechny rajony (tab. 2). Tím byl získán základní odtok v období sucha (přírodní zdroje podzemní vody v období sucha). Na základě vodohospodářské 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 vyšší storativitou bývá více vyrovnaný, a tak odtok v obdobích sucha klesá méně.

K dispozici jsou rámcové informace o zdrojích podzemní vody z influkce, jež 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.

*Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu* je jednotně zpracovaným podkladem, který nepostihuje detaily a specifika konkrétních lokalit, jež nebylo možné ze současných dostupných podkladů určit. Měla by proto být používána jako informační dokument s vědomím, že je potřebná detailní studie upřesňující zdroje podzemní vody pro konkrétní lokalitu včetně nezbytných terénních měření.

V roce 2022 byl prezentován příspěvek *Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny* [16], který uvádí možný dopad klimatické změny na možnosti odběru podzemní vody pro pitné účely k časové úrovni 2041–2060 a zpracování bilance množství podzemních vod současného stavu, resp. pro 3. cyklus plánů povodí, tedy na základě dat za období 2013–2018

(<https://www.vtei.cz/2022/10/bilance-zdroju-podzemni-vody-a-potreb-pro-pitne-ucely-v-podminkach-klimaticke-zmeny/>). Metodické řešení vychází z postupů vodohospodářské bilance a hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod v souladu s vyhláškou č. 5/2011 Sb., ve znění pozdějších předpisů, s tím, že článek obsahuje tři kategorie – vyhovující, podmíněčně vyhovující a nevyhovující. Při srovnání obr. 1 v dokumentu [16] s *Mapou zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* některé oblasti odpovídající HGR nebo jejich částem spadají do kategorie kritické až vysoké zranitelnosti horninového prostředí k suchu. Rozdílný metodický postup při hodnocení nivních sedimentů je patrný zejména u svrchních rajonů 1510 Kvartér Odry, 1622 Pliopleistocén Hornomoravského rajonu, 1623 Pliopleistocén Blaty a 1652 kvartér soutokové oblasti Moravy a Dyje, jež oproti dokumentu [16] náleží k nízké zranitelnosti nivních sedimentů.

Uváděná metodika tvorby interaktivní *Mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* ve srovnání s příspěvkem [16] nepoužívá metodiku hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod a ani predikci množství přírodních zdrojů podzemní vody na území ČR. Vypočítává dlouhodobý základní odtok ze srážek za období 1991–2020, počítá s BFI v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019, s povodími 4. řádu, zohledňuje odběry pro individuální zásobování v lokalitách, kde nejsou vodovody, a uvádí bilanci, resp. hodnoty zbývajících specifických přírodních zdrojů v l/s/km<sup>2</sup> v nejsušším roce pětiletého hydrologického sucha. Škála hodnocení má šest stupňů. Celkově lze konstatovat, že nově vytvořená *Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* poskytuje podrobnější hodnocení stávajícího stavu a konkrétní údaje o zbytkových přírodních zdrojích podzemní vody oproti dokumentu [16].

## ZÁVĚRY

- *Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* vychází z objektivních dostupných dat pozorovací sítě ČHMÚ, platných PRVKUK pro jednotlivé kraje k roku 2020, z databáze HEIS a evidence obyvatel.
- Zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu byla rozdělena do šesti kategorií. Nejzásadnější 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.
- Výše uvedená mapa 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 % pod velmi vysokou zranitelnost. U území niv je kritická zranitelnost jen u 3 % ploch a velmi vysoká u 13 % ploch. 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.
- Mapa je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.
- Mapa poskytuje zásadní informace pro plánování v oblasti zásobování obyvatel pitnou vodou, cílení dotačních programů zajišťujících zdroje a dalších eliminačních opatření.

➤ Mapa je dostupná na [www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu](http://www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu)

### Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu SS01010208 „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ financovaného z programu prostředí pro život Technologické agentury ČR. Za pomoc se zdroji dat děkujeme 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. L. Kašpárkovi, CSc., RNDr. M. Milickému a RNDr. Z. Herrmannovi.

### Literatura

- [1] AKSOY, H., KURT, I., ERIS, E. Filtered Smoothed Minima Baseflow Separation Method. *Journal of Hydrology*. 2009, 372, s. 94–101.
- [2] BRUTHANS, J., KADLECOVÁ, R., SLAVÍK, M., KRÁLOVÁ, M., FRYČ, T., ČURDA, J. Příčina prudkého snížení průtoků některých vodních toků ve středních Čechách v létě 2019 a extrémně nízkých specifických odtoků: vliv evapotranspirace z příbřežní zóny toku a ploch s mělkou hladinou podzemní vody. *Geoscience Research Reporst*. 2020, 53.
- [3] BRUTHANS, J., KADLECOVÁ, R., NOL, O., GRUNDLOCH, J. Vývoj základního odtoku v různých hydrogeologických strukturách v ČR za suchých a vlhkých období aneb jak nestavět na ovlivněných datech. In: *Sborník semináře Podzemní voda ve vodoprávním řízení XVI – ohlédnutí za hydrologickým suchem*. ČSVTS, z. s., 2021. ISBN 978-80-02-02954-0.
- [4] BRUTHANS, J., SOUKUP, J. *Vyhodnocení některých parametrů, návrh úprav regionalizace základního odtoku a poznámky k metodice stanovení přírodních zdrojů*. Česká geologická služba, 2011.
- [5] ECKHARDT, K. A Comparison of Baseflow Indices, Which Were Calculated with Seven Different Baseflow Separation Methods. *Journal of Hydrology*. 2008, 352, s. 168–173.
- [6] FUKSA, J. K. Sucho a vliv čistění odpadních vod na řeky. *Vodní hospodářství*. 2020, 70(4), s. 4–7.
- [7] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. *Rebilance zásob podzemních vod: metodiky stanovení průměrné hodnoty přírodních zdrojů podzemních vod kvartérních hydrogeologických rajonů*. Praha: VÚV TGM, 2013, 21 s.
- [8] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. et al. *Metodiky výpočtu přírodních zdrojů*. Česká geologická služba, 2015, s. 26.
- [9] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. et al. *Rebilance zásob podzemních vod: Základní výchozí data pro zjednodušené stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemní vody v 55 hydrogeologických rajonech*. Praha: VÚV TGM, 2014. 33 s.
- [10] KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R., DATEL, J. V., PELÁKOVÁ, M. Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(5), s. 4–13.
- [11] KAŠPÁREK, L., VLNAS, R., HANEL, M., PELÁKOVÁ, M. Vztahy mezi základním a celkovým odtokem z povodí v závislosti na hydrogeologickém typu horninového prostředí. *Vodní hospodářství*. 2017, 7, s. 5–11.
- [12] KILLE, K. Das verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe den monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Hannover: Z. Dtsch. Geol. Gesell, 1970, s. 89–95.
- [13] KLINER, K., KNĚŽEK, M. Metoda separace základního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. *Vodohospodářský čas*. 1974, 22(5), s. 457–466.
- [14] KRÁSNÝ, J., KNĚŽEK, M., ŠUBOVÁ, A., DAŇKOVÁ, H., MATUŠKA, M., HANZEL, V. *Odtok podzemní vody na území Československa*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 1982.
- [15] KŮRKOVÁ, I., BRUTHANS, J., BALÁK, F., SLAVÍK, M., SCHWEIGSTILLOVÁ, J., BRUTHANSOVÁ, J., MIKUŠ, P., GRUNDLOCH, J. Factors Controlling Evolution of Karst Conduits in Sandy Limestone and Calcareous Sandstone (Turnov Area, Czech Republic). *Journal of Hydrology*. 2019, 574, s. 1 062–1 073.
- [16] PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., NOVÁKOVÁ, H. Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(5), s. 22–31.
- [17] TOLASZ, R., DAŇHELKA, J., KINKOR, J., KODEŠ, V., KUBÁT, J., TRNKA, M., ŠTĚPÁNEK, P., ŽALUD, Z. et al. *Aktualizace Komplexní studie dopadů zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR z roku 2015*. [Praha]: Český hydrometeorologický ústav, 2019. 379 s.

## Autoři

### Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.<sup>1</sup>

jiri.bruthans@natur.cuni.cz

ORCID: 0000-0002-4749-0583

### Mgr. Jiří Grundloch<sup>2</sup>

jiri.grundloch@dekonta.cz

### RNDr. Renáta Kadlecová<sup>3</sup>

renata.kadlecova@geology.cz

ORCID: 0009-0003-8986-1455

### Mgr. Tuna Karatas<sup>1</sup>

tuna.karatas@natur.cuni.cz

ORCID: 0000-0002-4046-119X

### Mgr. Kateřina Šabatová<sup>1</sup>

katerina.sabatova@geology.cz

### Ing. Radek Vlnas<sup>4</sup>

radek.vlnas@chmi.cz

ORCID: 0009-0008-1196-6261

<sup>1</sup>Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

<sup>2</sup>DEKONTA, a. s.

<sup>3</sup>Aplikovaná geologie, Česká geologická služba, Praha

<sup>4</sup>Český hydrometeorologický ústav, Praha

## METHODOLOGY OF THE MAP OF THE VULNERABILITY OF THE QUANTITY OF NATURAL GROUNDWATER RESOURCES TO DROUGHT FOR THE CZECH REPUBLIC

JIŘÍ BRUTHANS, J.<sup>1</sup>; GRUNDLOCH, J.<sup>2</sup>; KADLECOVÁ, R.<sup>3</sup>; KARATAS, T.<sup>1</sup>; ŠABATOVÁ, K.<sup>1</sup>; VLNAS, R.<sup>4</sup>

**Keywords:** groundwater – expert map – vulnerability – groundwater resources – drought

<sup>1</sup>Charles University, Faculty of Science, Geology, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics and Czech Geological

<sup>2</sup>DEKONTA, a. s.

<sup>3</sup>Applied Geology, Czech Geological Survey

<sup>4</sup> Czech Hydrometeorological Institute

The expert interactive Map of the vulnerability of the quantity of natural groundwater resources to drought for the territory of the Czech Republic was created as part of the TA CR project SS01010208 – Controlled Groundwater Recharge as a Tool to Reduce the Impacts of Drought in the Czech Republic. Groundwater



drought is still mostly understood as a subset of hydrological drought. The causes, course and appropriate adaptation measures to hydrogeological drought are different. The presented vulnerability map is created on the basis of the use of precipitation normal and regression relationships between precipitation and total and base runoff using the base flow index (BFI) and ratio of BFI in the driest year for the decade 2010–2019 to the long-term average of BFI (M) indices, which guarantees uniform processing for the entire Czech Republic at a scale of 1 : 50,000 and an objective comparison of the vulnerability of natural groundwater resources to drought throughout the country. It is also based on recorded groundwater abstraction and in the case of municipalities with individual supply, the abstraction is calculated from the number of inhabitants and the national average consumption of drinking water per capita. It contains six categories and shows which regions and areas will struggle to have sufficient groundwater resources during periods of prolonged drought. It synthesizes all available regime and other data for 2020 and is designed so that the layers with variable information can be updated in the future. This map is publicly available [www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu](http://www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu) and enables the preparation, design and implementation of measures that will ensure sufficient water resources, especially of drinking water, for the population even in periods of long-term drought. It shows where it is appropriate to direct potential subsidy programs. The following text describes in detail the methodology of creating this map.