Budou průtoky ve vodních tocích v létě k horizontu roku 2060 o polovinu menší?

Zvýšení potenciální evapotranspirace vlivem oteplování je dosti často používáno jako ukazatel probíhajících a předpokládaných změn hydrologické bilance. Bez posouzení jejího působení v povodích s rozdílným režimem srážek není správné změnu potenciální evapotranspirace považovat za zvýšení reálné evapotranspirace nebo zmenšení odtoku.

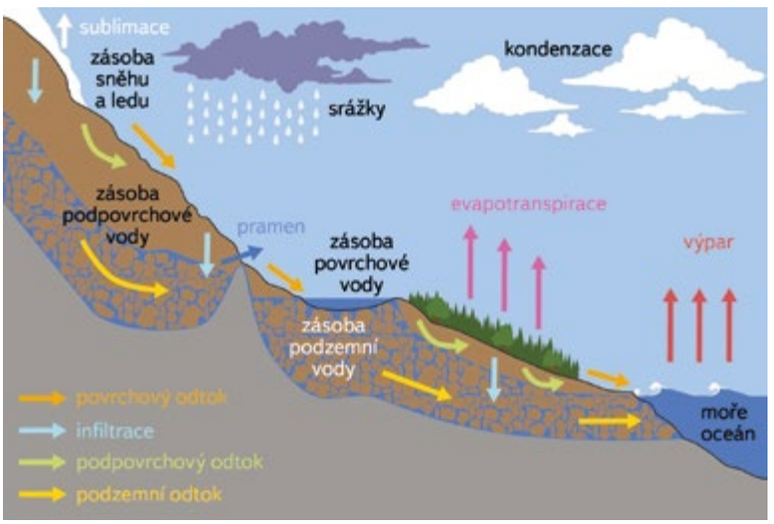
Pro lepší porozumění zopakujme definice základních složek hydrologické bilance, jež použijeme v následujících úvahách a výpočtech.

- SRÁŽKY ve formě deště, sněhu, krup, rosy, jinovatky, námrazy apod. jsou jediným vstupem hydrologické bilance.
- EVAPOTRANSPIRACE zahrnuje evaporaci (výpar z vodní hladiny, půdy a povrchu vlhkých rostlin) a transpiraci rostlin.
  - POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE je teoretická horní hranice výparu z plochy v daných přírodních a meteorologických podmínkách. Vyjadřuje schopnost vzdušného prostředí odnímat vodu z povrchu – odpovídá přibližně výparu z volné vodní hladiny nebo evapotranspiraci z trávníku s optimální vlhkostí. Je závislá především na teplotě vzduchu.
  - SKUTEČNÁ EVAPOTRANSPIRACE závisí na teplotě vzduchu, resp. potenciální evapotranspiraci, a je omezena množstvím vody, které je pro výpar a transpiraci k dispozici. Bývá také označována termínem územní výpar.
- POVRCHOVÝ ODTOK nastává ve dvou situacích – pokud intenzita srážek překračuje rychlost vsakování, nebo pokud je svrchní půdní profil zcela nasycen vodou. Do nejbližšího vodního toku se dostane rychle, v řádu minut až hodin.
- HYPODERMICKÝ (PODPOVRCHOVÝ) ODTOK probíhá preferenčními cestami ve svrchní vrstvě půdy a podloží bez kontaktu s hladinou podzemní vody. Do vodního toku se dostane během několika dnů po dešti nebo tání sněhu.
- ZÁKLADNÍ (PODZEMNÍ) ODTOK je vyvěrání ze zásob podzemní vody v podobě pramenů nebo skrytě pod hladinou do vodních toků a nádrží. Ve vodním toku se projevuje během týdnů až měsíců po dešti či tání sněhu.
- ZÁSOBA VODY se nachází v kolektorech podzemní vody, v půdě, mokřadech, ve vodních nádržích nebo ve sněhu a ledu, zpravidla na dočasnou dobu. Pokud se budeme zabývat průměry z dostatečně dlouhého víceletého období, lze vliv zásob zanedbat, ale již při posuzování bilance jednotlivých let či kratších období jsou podstatné.

V hydrologické bilanci povodí, jež se dá vyjádřit následující rovnicí, je obsažena reálná, nikoli potenciální evapotranspirace:

SRÁŽKY = EVAPOTRANSPIRACE + POVRCHOVÝ ODTOK + PODPOVRCHOVÝ ODTOK + PODZEMNÍ ODTOK ± ZMĚNA ZÁSOBY VODY (*obr. 1*)

Hydrologickou bilanci povodí lze popsat jako soupeření dvou složek výstupu – výparu z plochy povodí a odtoku vody z povodí o podíl ze složky vstupní, kterou jsou atmosférické srážky. Pod pojem odtok v tomto případě zahrnujeme celkový odtok, vytvořený v časově proměnných poměrech složkou povrchového odtoku, podpovrchového odtoku a základního odtoku, soustředěný v průtoku závěrovým profilem toku.

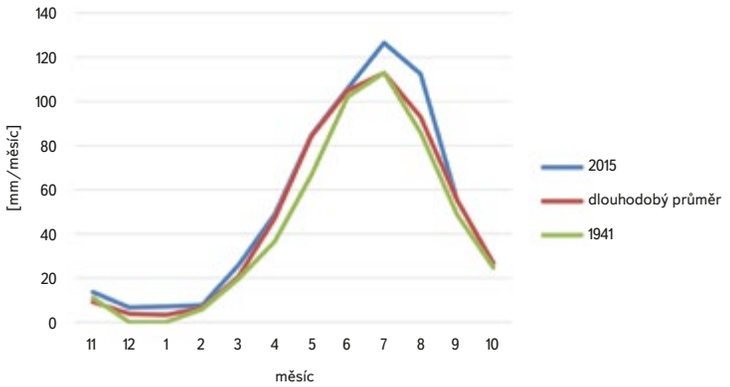


Obr. 1. Schéma hydrologického cyklu [2]

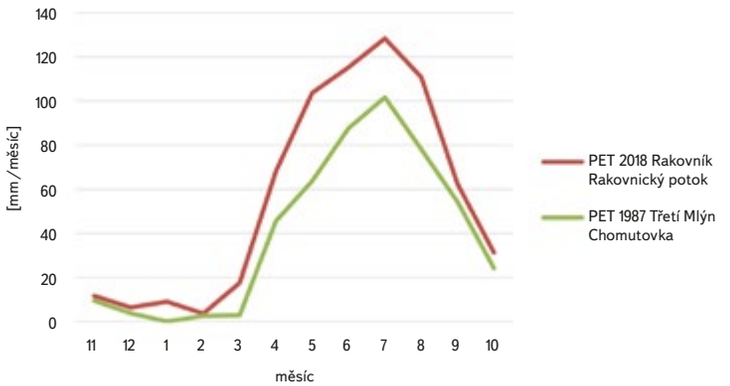
Dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek činí v ČR 680 mm, skutečná evapotranspirace je 490 mm, celkový odtok 190 mm, tj. pouze 28 % srážek, zatímco 72 % srážek se vypaří. V našich klimatických podmínkách s výjimkou povrchového odtoku z přívalových dešťů, který v dlouhodobém průměru tvoří cca 2 % až 6 % srážek, ovlivňuje rozhodující část bilance skutečná evapotranspirace, závislá na potenciální evapotranspiraci, ale omezovaná velikostí srážek a dostupným množstvím vody v povrchové vrstvě půdy, jež je výsledkem bilance předcházejícího období.

Potenciální evapotranspirace

Pro stanovení potenciální evapotranspirace existuje několik metod výpočtu. V oblasti hydrologického modelování se osvědčil relativně jednoduchý postup podle článku [1], ve kterém je její průběh určován podle teploty vzduchu. Potenciální evapotranspirace je uváděna ve stejných jednotkách jako srážky, tj. ve výšce vody spadlé či vypařené za rok nebo měsíc. Potenciální evapotranspirace má vzhledem k závislosti na teplotě vzduchu v roce typický průběh, znázorněný na *obr. 2*. Na něm jsou vyneseny dlouhodobé průměrné měsíční výšky potenciální evapotranspirace v průběhu hydrologického roku na povodí Labe v Děčíně. Jako ukázka její proměnlivosti v jednotlivých letech jsou zobrazeny hodnoty pro extrémně chladný rok 1941 a velmi teplý rok 2015. Největší rozdíl mezi hodnotami z let 2015 a 1941 je v srpnu – činí 26,5 mm a odpovídá 30,8 % hodnoty roku 1941. Větší rozdíly potenciální evapotranspirace ukazuje *obr. 3*, zachycující její průběh v povodí Rakovnického potoka ve středních Čechách v extrémně teplém roce 2018 a průběh v horském povodí Chomutovky po Třetí Mlýn v relativně chladném roce 1987. Největší rozdíl zobrazených průběhů je patrný v červenci: 36,9 mm, tedy 38,5 % hodnoty z Rakovníku.



Obr. 2. Průběh potenciální evapotranspirace na povodí Labe po Děčín v teplém roce 2015, v extrémně chladném roce 1941 a v dlouhodobém průměru



Obr. 3. Průběh potenciální evapotranspirace (PET) v teplém roce 2018 na povodí Rakovnického potoka a chladném roce 1987 na povodí Chomutovky

Reálná evapotranspirace

Při zkoumání regresních vztahů pro odhad ročních výšek evapotranspirace bylo prokázáno, že vztah evapotranspirace a srážek je u většiny povodí podstatně těsnější než vztah evapotranspirace a potenciální evapotranspirace. Při regionálním odhadu dlouhodobých průměrů reálné evapotranspirace, tj. také dlouhodobých průměrů odtoku, bývají aplikovány vztahy používající jako vysvětlující proměnné srážky i teploty. Pro velikost reálné evapotranspirace, doplňování zásoby vody v půdě a tvorbu odtoku jsou rozhodujícím činitelem relace mezi potenciální evapotranspirací a srážkami v časovém průběhu. Pro popis hydrologické bilance volíme měsíční krok, ve kterém je zásobními složkami bilance vyrovnáno detailnější kolísání bilančních veličin. V průběhu bilančního procesu nastávají dvě odlišné situace:

- Při zanedbání rozložení srážek v měsíci lze použít předpoklad, že pokud srážky v daném měsíci převyšují potenciální evapotranspiraci, je jejich část spotřebována na reálnou evapotranspiraci shodnou s potenciální evapotranspirací a zbývající část infiltruje do půdy. Je-li půda plně nasycena, prosákne část srážky půdou, generuje podpovrchový odtok a doplňuje zásoby podzemní vody.
- Pokud jsou srážky v daném měsíci menší než potenciální evapotranspirace a půda je nasycená, spotřebují se celé na reálný výpar. Jestliže půda není zcela nasycená, část srážek zvětší zásobu vody v půdě, část přispěje k výparu, ale skutečný výpar je menší než potenciální evapotranspirace.

Při uvažování o důsledcích probíhajícího oteplování je tedy třeba nezanedbávat, že zvýšení teploty vzduchu, resp. zvětšení potenciální evapotranspirace, se projevuje zvětšením reálné evapotranspirace, jen když je pro výpar a transpiraci dostupná voda ze srážek a z půdní zásoby. Výskyt takových podmínek je pravděpodobnější v povodích s vyšší nadmořskou výškou, kde jsou větší srážky. Vlivem nižších teplot je ve výše položených povodích menší potenciální evapotranspirace, takže popsaná podmínka je snadněji splněna.

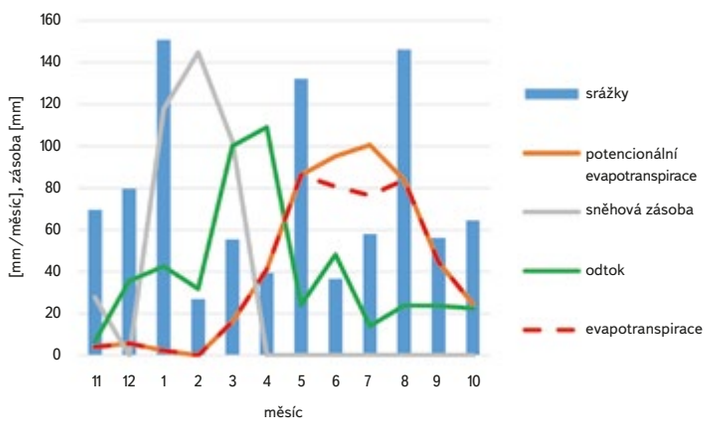
Příklady průběhů bilančních veličin ve vztahu k potenciální evapotranspiraci

Příklady průběhu srážek, potenciální evapotranspirace, evapotranspirace a odtoku v chladném roce 1986 a v teplém roce 2015 z horského povodí Chomutovky (plocha 43,6 km^2) jsou uvedeny na *obr. 4* a *5* a z povodí Rakovnického potoka (plocha 302 km^2) na *obr. 6* a *7*. *Tab. 1* a *2* obsahují roční hydrologické charakteristiky bilančních veličin. Hodnoty roční evapotranspirace odpovídají zobrazeným měsíčním modelovaným průběhům a od rozdílů (srážky minus odtok) se liší o zmenšování nebo doplňování zásob vody v povodí (k největšímu poklesu o 46,7 mm došlo v roce 2015 v povodí Rakovnického potoka). V *tab. 3* je analogická sestava dat pro povodí Labe v Děčíně, uvedená bez odpovídajících obrázků.

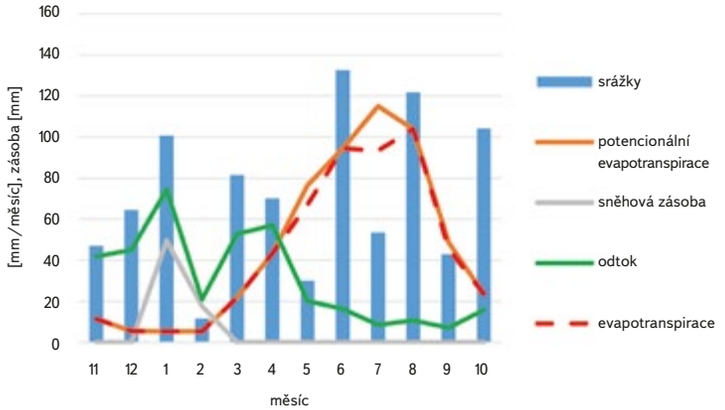
Tab. 1. Charakteristiky hydrologických let 1986 a 2015 – povodí Chomutovky po Třetí Mlýn

Charakteristika	rok 1986	rok 2015	rozdíl 2015–1986
Teplota vzduchu [° C]	5,45	7,46	2,01
Srážka [mm/rok]	916	861	-55
Odtok [mm/rok]	482	370	-112
Odtok (% ze srážky)	53	43	-10
Potenciální evapotranspirace [mm/rok]	505	554	49
Evapotranspirace [mm/rok]	466	521	55
Evapotranspirace (% z potenciální evapotranspirace)	92	94	-2

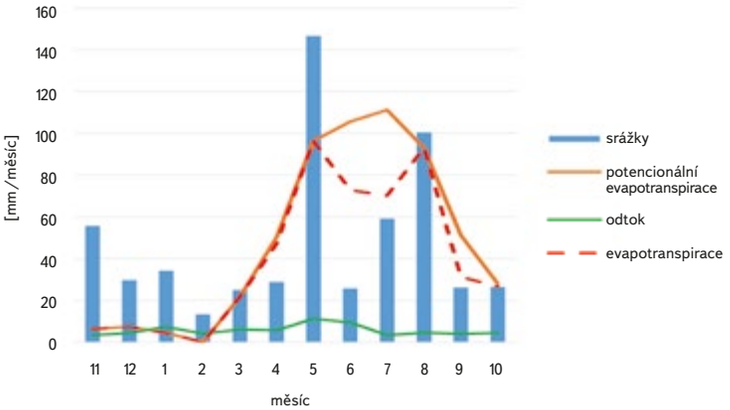
V povodí Chomutovky v chladném roce 1986 potenciální evapotranspirace pouze ve dvou měsících převyšovala srážky, takže evapotranspirace byla jen o 8 % menší; i v teplém roce 2015 byla jen o 6 % menší. Zvětšení evapotranspirace v roce 2015 oproti roku 1986 je obdobné zvětšení potenciální evapotranspirace. Pokles odtoku je větší, podílí se na něm pokles srážky i evapotranspirace.



Obr. 4. Průběh bilančních hydrologických veličin v roce 1986 – povodí Chomutovky



Obr. 5. Průběh bilančních hydrologických veličin v roce 2015 – povodí Chomutovky



Obr. 6. Průběh bilančních hydrologických veličin v roce 1986 – povodí Rakovnického potoka

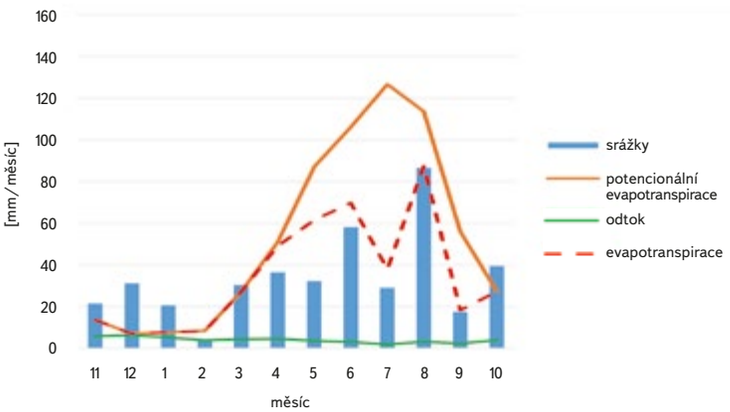
Tab. 2. Charakteristiky hydrologických let 1986 a 2015 – povodí Rakovnického potoka po Rakovník

Charakteristika	rok 1986	rok 2015	rozdíl 2015–1986
Teplota vzduchu [°C]	7,36	9,66	2,3
Srážka [mm/rok]	571	423	-148
Odtok [mm/rok]	67,9	50,7	-17,2
Odtok (% ze srážky)	11,8	12	0,2
Potenciální evapotranspirace [mm/rok]	575	637	62
Evapotranspirace [mm/rok]	477	419	-58
Evapotranspirace (% z potenciální evapotranspirace)	83	66	-17

V povodí Rakovnického potoka i v chladném roce 1986, zejména v červnu a červenci, potenciální evapotranspirace výrazně převyšovala srážky, evapotranspirace byla o 17 % menší. V teplém a suchém roce 2015 byla menší o 34 %. Zvětšení potenciální evapotranspirace v roce 2015 oproti roku 1986 se neuplatnilo, následkem poklesu srážek o 148 mm reálná evapotranspirace poklesla. Pokles odtoku je v porovnání se zvětšením potenciální evapotranspirace i vzhledem k poklesu srážky malý. Očividně byl odtok, blížící se vyschnutí toku, tvořen výtokem zbytku dynamických zásob podzemní vody a ze srážek byl dotován jen do ledna. Na *obr. 7* je patrné, že i kdyby v roce 2015 byly od května do července srážky podstatně větší, neprojevily by se podstatným zvětšením odtoku, spotřebovala by je evapotranspirace.

Tab. 3. Charakteristiky hydrologických let 1986 a 2015 – povodí Labe po Děčín

Charakteristika	rok 1986	rok 2015	rozdíl 2015–1986
Teplota vzduchu [°C]	7,04	9,19	2,15
Srážka [mm/rok]	733	496	-237
Odtok [mm/rok]	205	118	-87
Odtok (% ze srážky)	28	23,7	-4,2
Potenciální evapotranspirace [mm/rok]	562	622	60
Evapotranspirace [mm/rok]	509	416	-93
Evapotranspirace (% z potenciální evapotranspirace)	90,4	66,9	-23,5



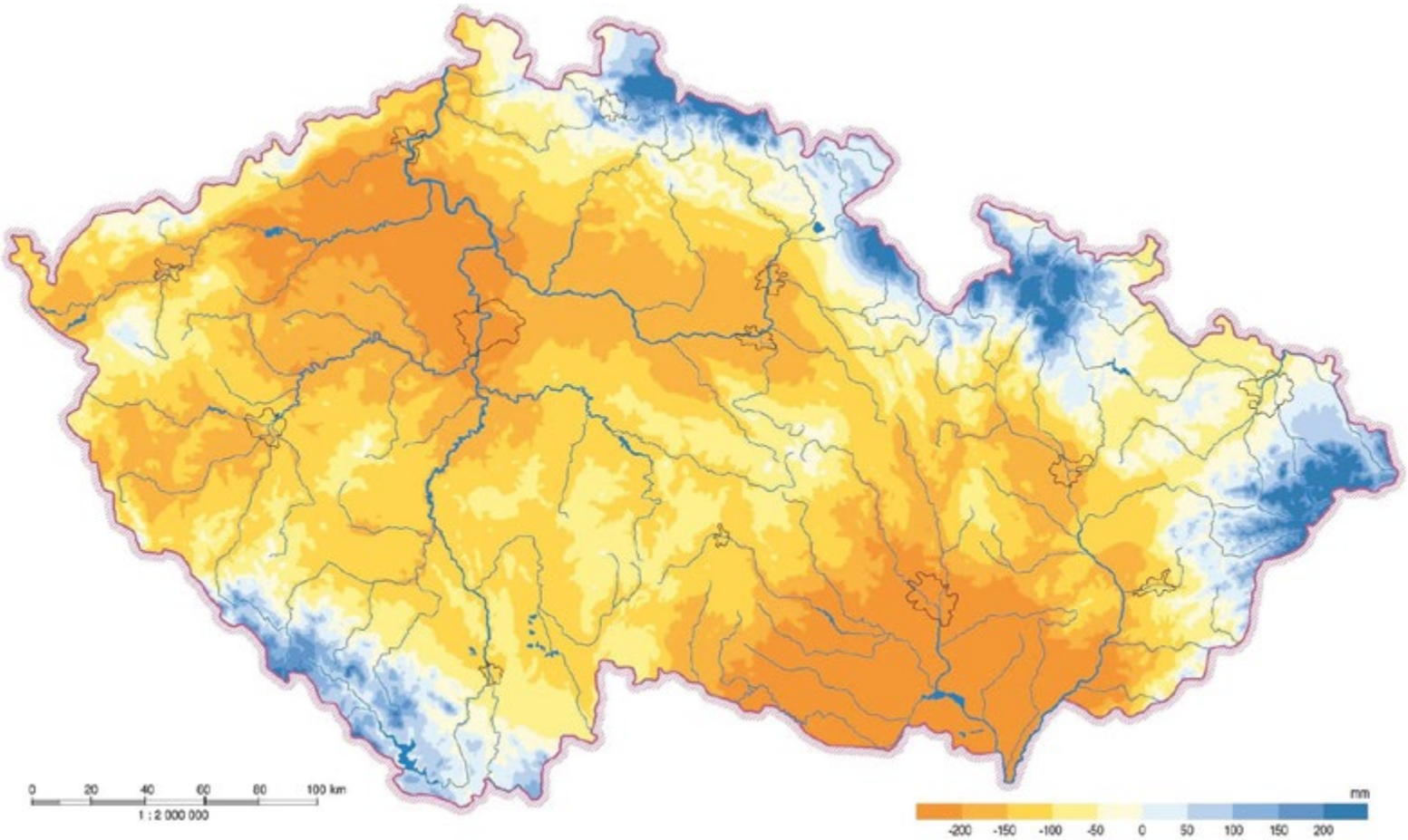
Obr. 7. Průběh bilančních hydrologických veličin v roce 2015 – povodí Rakovnického potoka

Na povodí Labe byla i v chladném roce 1986 evapotranspirace o 9,4 % menší než potenciální evapotranspirace, v roce 2015 pak o 33,1 %, přičemž se zde projevuje omezení evapotranspirace velikostí srážek. Na poklesu odtoku se podílí pokles srážek i zvětšení potenciální evapotranspirace.

Uvedené příklady průběhu hydrologické bilance v povodích s rozdílným režimem srážek ukazují, že údaj o zvětšení potenciální evapotranspirace může bez posouzení vlivu srážek, i když se nezmění, charakterizovat vliv oteplení jen v povodích s relativně velkými srážkami. Na většině území ČR je dlouhodobý průměr potenciální evapotranspirace větší než dlouhodobý průměr srážek, zejména v letním pololetí (*obr. 8*). V této převažující části území nelze bez další analýzy hydrologické bilance ztotožňovat změnu skutečné evapotranspirace, resp. odtoku, se změnou potenciální evapotranspirace.

Důsledky rozdílů hydrologické bilance v letním a zimním pololetí pro pokles průtoků vlivem oteplování

Na celém území ČR jsou podstatně rozdílné relace mezi srážkami a potenciální evapotranspirací v chladné části roku. V zimním pololetí srážky převyšují potenciální evapotranspiraci, takže při kladných teplotách vzduchu se půdní profil v průběhu zimy nasytí, při záporných teplotách se vytváří sněhová zásoba. Při obou typech zimního režimu jsou dotovány zásoby podzemní vody. Pro další časový vývoj odtoku je příznivější, když většina vody na jaře prosákne půdou později. Při rychlém tání sněhu však může být dotace podzemních vod ochuzena povrchovým a intenzivním podpovrchovým odtokem.



Obr. 8. Rozdíl mezi úhrnem srážek a potenciální evapotranspirací v letním půlroce (květen až říjen) na území ČR podle [3]

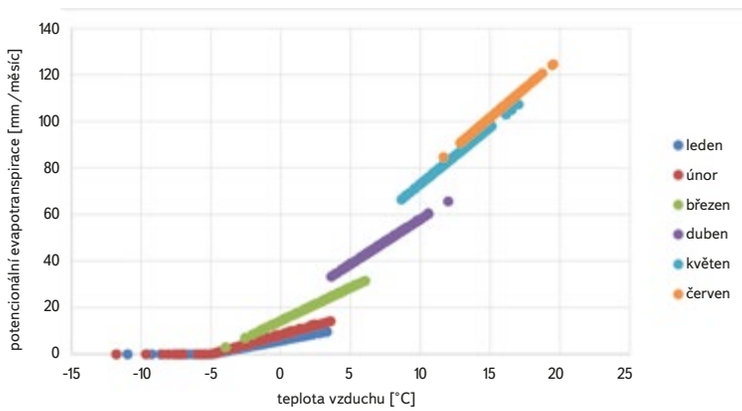
Pro posouzení rozdílů hydrologické bilance v zimním pololetí (listopad až duben) a v letním pololetí (květen až říjen) jsme použili data z povodí Labe v Děčíně. V *tab. 4* jsou uvedeny dlouhodobé průměrné hodnoty bilančních veličin.

Tab. 4. Dlouhodobé průměry srážek a odtoků pro povodí Labe v Děčíně pro zimní a letní pololetí, veličiny kromě poměrů jsou v jednotkách [mm/pololetí]

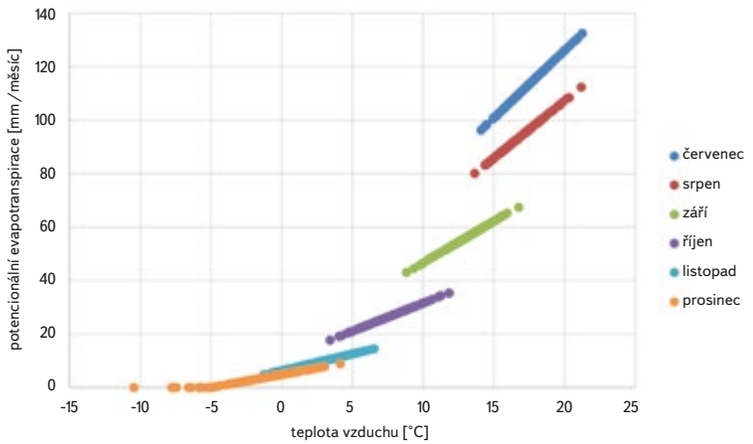
Pololetí	Srážky P	Odtok R	R/P	Potenciální evapotranspirace PET	P-PET	PET/P
zimní	259	102	0,39	91	168	0,35
letní	410	72	0,18	478	- 68	1,17

V zimním pololetí tvoří srážky 63 % srážek letních, ale potenciální evapotranspirace jen 19 % hodnoty letní. Srážky převažují nad potenciální evapotranspirací. Zimní odtok je 1,42krát větší než odtok letní.

Z hlediska předpokládaného dalšího oteplování je podstatné, že nejen velikost potenciální evapotranspirace, ale i gradient jejího zvětšování vlivem nárůstu teploty vzduchu je v zimních měsících podstatně menší než v měsících vegetačního období (*obr. 9* a *10*). Na nich zobrazené gradienty byly odvozeny metodou výpočtu potenciální evapotranspirace podle [1]. Nejen z výsledků hydrologických pozorování, ale i z teoretického zdůvodnění je zřejmé, že letní odtoky budou při pokračujícím oteplování klesat podstatně více než odtoky zimní.



Obr. 9. Vztah mezi teplotou a potenciální evapotranspirací v jednotlivých měsících 1. pololetí



Obr. 10. Vztah mezi teplotou a potenciální evapotranspirací v jednotlivých měsících 2. pololetí

Pro odhad důsledků oteplování jsme posoudili, jak se na povodí Labe změnily bilanční veličiny v období 1991–2019 oproti odpovídajícím hodnotám z období 1961–1980. Rok 1980 je v průběhu dlouhodobého kolísání teplot vzduchu blízko počátku intenzivního vzestupu teplot. V *tab. 5.* jsou průměry bilančních veličin z obou období a jejich rozdíly (data 1991 až 2019 minus data 1961 až 1980). Srážky velmi mírně vzrostly v obou pololetích. V zimním pololetí velice malý vzestup srážek převážil vliv zvětšené potenciální evapotranspirace a i při oteplení o 1,1 °C odtok nepatrně vzrostl.

Při vzestupu potenciální evapotranspirace o 33 mm v letním pololetí při zvýšení teploty o 1,2 °C se projevil pokles odtoku o 18,5 mm, tedy o 22,3 %. Když odhadneme účinek odpovídající zvýšení srážky o 11 mm podle odtokového koeficientu o hodnotě 0,18 . 11 = 2,0 mm, získáme odhad poklesu odtoku vlivem oteplení 18,5 + 2,0 = 20,5 mm/rok při zvýšení teploty o 1,2 °C. Při redukci na změnu teploty o 1 °C odhadneme gradient poklesu průměru odtoku v letním pololetí při oteplení o 1 °C 17 mm.

Z uvedených výsledků je zřejmé, že riziko poklesu průtoků vlivem oteplování je podstatně větší v letním pololetí, kdy se navíc teploty zvyšují více než v ročním průměru. Při pokračujícím oteplování bude ve stále větší míře ubývat odtoku v letním pololetí, prodlouží a prohloubí se hydrologická sucha a pro odběry vody i zachování ekologických průtoků bude třeba v letním pololetí využívat více vodu převedenou z pololetí zimního. To nelze zajistit jinak než pomocí zásobních nádrží. Je proto nezbytné posoudit, do jaké míry při předpokládané intenzitě oteplování postačí tuto funkci stávající nádrže zajistit. Vzhledem k dlouhé době potřebné pro vybudování nádrží, počínaje záměrem až po jejich fyzickou realizaci, je třeba tuto úlohu řešit v dostatečném předstihu.

Při předpokladu vzestupu teploty o 1 °C za 30 let a rovnoměrného poklesu odtoku s uvedeným gradientem 17 mm/1 °C by průměrný dlouhodobý letní odtok z povodí Labe v Děčíně na úrovni roku 2060 byl cca 30 mm. Pro srovnání minimální průměrný letní odtok dosud pozorovaný v jednotlivém roce (2018) za 169 let byl 22 mm.

Tab. 5. Charakteristiky hydrologické bilance povodí Labe v Děčíně – zimní a letní pololetí

Pololetí	**Zimní**				**Letní**			
Období	1961–1980	1991–2019	rozdíl	rozdíl [%]	1961–1980	1991–2019	rozdíl	rozdíl [%]
Teplota [°C]	1,1	2,2	1,1		13,2	14,4	1,2	
Srážky [mm/pololetí]	251,7	260	8,3	3,3	406,3	417,3	11	2,7
Odtok [mm/pololetí]	112,3	114,6	2,3	2,0	82,9	64,4	-18,5	-22,3
Potenciální evapotranspirace [mm/pololetí]	89,4	102,3	12,9	14,4	462,2	495,5	33,3	7,2

Literatura

[1] OUDIN, L., LAETITIA, M., HOCINE, B., PIERRE, R. Estimating Potential Evapotranspiration without Continuous Daily Data: Possible Errors and Impact on Water Balance Simulations. *Hydrological Sciences Journal*. 2010, 55(2), s. 209. Dostupné z: doi: 10.1080/02626660903546118

[2] PELÁKOVÁ, M. a kol. *Město a voda.* Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2020. 45 s. ISBN 978-80-87402-82-5.

[3] TOLASZ, R. *Atlas podnebí Česka*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.

Autoři

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc.
✉ ladislav.kasparek@vuv.cz

Ing. Martina Peláková
✉ martina.pelakova@vuv.cz

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

ISSN 0322–8916/© 2023 Autoři. Tuto práci je kdokoliv oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0.

Foto: J. Unucka