

Srovnání různých metod stanovení vodní stopy výroby elektrické energie ve vodní elektrárně Orlik – případová studie

LIBOR ANSORGE

Klíčová slova: vodní stopa – vodní nádrž – vodní elektrárna – hydroenergetika

SOUHRN

Velká část světové populace nemá přístup ke kvalitním vodním zdrojům v dostatečném množství. Proto se v posledních letech rozvíjí metody pro komplexní hodnocení užívání vod. Jednou z nich je i vodní stopa, která umožňuje vyjádřit celkové množství vody spotřebované na produkci nějakého výrobku nebo služby. V současnosti se používají tři přístupy ke stanovení potřeb vody na produkci elektrické energie ve vodních elektrárnách. V této studii jsou použity jednotlivé přístupy (hrubá spotřeba, čistá spotřeba, čistá bilance) pro stanovení vodní stopy ve vodní elektrárně a shrnuty závěry z jejich použití.

Vodní stopa byla spočítána v měsíčním kroku všemi třemi přístupy pro provozní fázi výroby elektrické energie v největší české vodní elektrárně Orlik. Fáze výstavby vodní nádrže a vodní elektrárny byla stanovena orientačně s využitím údajů převzatých z literatury. Fáze likvidace vodní elektrárny nebyla uvažována. Alokace užívání na jednotlivé služby, které poskytuje vodní nádrž, nebyla uvažována. Metoda „hrubé spotřeby“ uvažuje pouze se ztrátami výparem. Metoda „čisté spotřeby“ je založena na předpokladu, že i před vybudováním přehrady probíhal z daného území výpar, takže skutečné ztráty jsou vyjádřeny jako rozdíl mezi výparem z nádrže a teoretickým výparem z území před výstavbou. Metoda „čisté bilance“ přistupuje k nádrži jako k systému a předpokládá, že ztráty výparem z nádrže jsou redukovány srážkami, které dopadnou na hladinu nádrže. Stanovená modrá vodní stopa provozní fáze byla přepočtena na LCA vodní stopy podle ČSN ISO 14046 pomocí regionalizovaných charakterizačních modelů *fwua* a *AWARE*.

Vodní stopa provozní fáze stanovená přístupem „hrubé spotřeby“ má jasný sezonní charakter a dosahuje hodnot přesahujících v letním období i $200 \text{ m}^3\text{-MWh}^{-1}$. Metoda „čisté spotřeby“ výrazně snižuje hodnoty vodní stopy v porovnání s metodou „hrubé spotřeby“ a to až do záporných hodnot. To je podmíněno zejména způsobem výpočtu výparu z území před výstavbou vodní nádrže. Vodní stopa stanovená metodou „čisté bilance“ se pohybuje kolem nulových hodnot, protože výpar z vodní nádrže je prakticky vyrovnán srážkami. Hodnota vodní stopy fáze výstavby vodní nádrže i při uvažované životnosti 100 let vychází orientačně na úrovni od $0,26$ do $3,09 \text{ m}^3\text{-MWh}^{-1}$.

Jednotlivé metody dávají velmi rozdílné výsledky. Použití metody „čisté spotřeby“ naráží na metodické problémy. Fázi výstavby vodní nádrže v případě metody „čisté bilance“ i metody „čisté spotřeby“ nelze zanedbat. Přepočet

Comparing various methods for determining the water footprint of electricity generation at Orlik hydroelectric power station – case study

LIBOR ANSORGE

Keywords: water footprint – reservoir – hydro power station – hydroelectricity

SUMMARY

A large part of the world's population does not have access to quality water resources in sufficient quantities. Therefore, comprehensive methods for assessing water use have been developed in recent years. One is the water footprint, which allows expression of the total amount of water consumed to produce a product or service. Three approaches are currently being used to determine the water needs for hydroelectric power generation. This paper compares three different approaches (gross consumption, net consumption, and net balance) for calculation of the blue water footprint of Orlik HPS.

The blue water footprint of Orlik HPS was calculated. Three different approaches were used for the calculation of water use. The water footprint in the building stage of the reservoir was calculated approximately with data from the literature. The stage of the HPS decommissioning was neglected. Allocation of water use for different services produced by the reservoir was neglected too. The “gross consumption” approach only contains losses by evaporation. The “net consumption” approach is calculated such as the evapotranspiration prior to the establishment of the reservoir is subtracted from the evaporation from the reservoir surface. The “net balance” approach regards the reservoir as a system and sees evaporation as an output from the system and rainfall as an input. The LCA water scarcity footprint of the operational stage according to ISO 14046 was calculated from the blue water footprint by multiplying by the regionalized characterization factor. Two characterization models were used. The first was *fwua* model, the second was *AWARE* model.

The blue water footprint of the produce stage of the HPS life cycle calculated by the “gross consumption” approach has typical seasonal peaks in summer. The blue water footprint calculated by this approach overreached $200 \text{ m}^3\text{-MWh}^{-1}$ in summer. The “net consumption” approach importantly reduced the blue water footprint in comparison with the “gross consumption” approach, and in some parts of year this approach produces negative values for the blue water footprint. The values of the blue water footprint in this methods are determined by the calculation of evapotranspiration from the area before the reservoir were built. The “net balance” approach produces water footprint values around zero; this is because precipitation is at a similar level to evaporation from the reservoir. The approximate value of the blue water footprint of the reservoir building stage cannot be neglected when the “net consumption” and “net balance” approaches are applied for water footprint calculation.

modré vodní stopy na LCA vodní stopu nedostatku vody pomocí regionalizovaných hodnot charakterizačních faktorů snížil poměr mezi maximálními a minimálními hodnotami vodní stopy. Jen v případě charakterizačního modelu *fwua* a použití přístupu ke stanovení užívání vody pomocí metody „čistě bilance“ tyto poměry zvýšil.

ÚVOD

Elektrická energie vyrobená ve vodních elektrárnách je obecně považována za čistou, obnovitelnou energii. Přesto není tato výroba zcela bez spotřeby přírodních zdrojů, resp. vody, a bez dopadu na životní prostředí. Výroba elektrické energie ve vodních elektrárnách je přímo závislá na lokální dostupnosti vodních zdrojů [1]. Spotřeba vody a dalších přírodních zdrojů potřebná na výrobu elektrické energie ve vodní elektrárně je spojena se třemi fázemi životního cyklu vodní elektrárny:

Výstavba vodní elektrárny – jedná se o spotřebu zdrojů, jež jsou potřeba pro výrobu surovin nutných pro výstavbu vodní elektrárny a všech souvisejících provozů, jako je vodní nádrž, distribuční soustava apod. Obvykle se předpokládá, že spotřeba přírodních zdrojů a vody ve fázi výstavby vodní nádrže a vodní elektrárny je v celém životním cyklu zanedbatelná [2]. Tento předpoklad lze považovat za platný zejména u velkých hydroenergetických projektů s dlouhou dobou životnosti a velkou produkcí elektrické energie. U menších projektů a i v některých případech u větších projektů nelze tuto fázi životního cyklu elektrárny zanedbat [3].

Provoz vodní elektrárny – v průběhu provozu se ve vodní elektrárně prakticky žádná voda ani přírodní zdroje přímo nespotebouvávají. Nepřímou spotřebu představuje voda odpařená z vodní plochy nádrže či jezové zdrže elektrárny [4]. V případě posuzování dopadů spojených s užíváním vody u derivační hydroelektrárny nebo u vodních elektráren s převodem vody je třeba též zvážit rozdílné dopady v místě odběru a vypouštění. Ačkoliv se v souvislosti s popularizací vodní stopy v uplynulých letech soustředí pozornost zejména na ztráty vody výparem, je výroba elektrické energie ve vodních elektrárnách spojena se ztrátami vody průsakem a dopady na ekosystémy v souvislosti se změnami charakteru říčního toku a omezení migrační průchodnosti [5].

Likvidace vodní elektrárny – obdobně jako v případě výstavby vodní elektrárny se jedná o vodu a jiné přírodní zdroje spotřebované při likvidaci vodního díla a samotné vodní elektrárny. Zatímco však potřebou vody na fázi výstavby vodní elektrárny se již zabývalo několik autorů, tak fáze likvidace dosud nebyla uvažována v žádné známé studii.

Pro hodnocení nepřímého užívání vody pro výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách se používá tzv. bilanční (v angličtině označovaná jako „volumetric“) vodní stopa [6]. Pro posuzování dopadů spojených s produkcí elektrické energie je pak vhodnější využití posuzování životního cyklu (LCA) a na této metodologii založená LCA vodní stopa [7].

Bilanční vodní stopa se skládá ze tří složek: modré vodní stopy (voda spotřebovaná z vodních zdrojů), zelené vodní stopy (obvykle dešťové srážky a voda v půdě) a šedé vodní stopy (voda potřebná k naředění znečištění na neškodnou úroveň). Zelená vodní stopa je při výrobě elektrické energie ve vodních elektrárnách nulová. Šedá vodní stopa je spojena s případným znečištěním, které je ale v případě produkční fáze výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách prakticky zanedbatelné. V případě výstavby a likvidace vodní elektrárny tomu tak není, ale tyto fáze jsou v existujících studiích obvykle zanedbány. Veškeré užívání vody je tak přiřazeno k modré vodní

Each method of water use calculation produces different blue water values. The “gross consumption” approach has methodical problems and it seems inappropriate for the water footprint of product calculation. The water footprint of the reservoir building stage cannot be neglected when the “net consumption” and “net balance” approaches are used for water footprint calculation of the produce stage. Application of the regionalized characterization factor in the water scarcity footprint only decreases the ratio between minimum and maximum values in the blue water footprint. Only the *fwua* characterisation factor in combination with the “net balance” approach decreases this ratio.

INTRODUCTION

Electricity generated by hydroelectric power stations (HPS) is generally considered to be clean renewable energy. Yet this production is not entirely independent of consumption of natural resources/water; it also cannot be considered to lack any environmental impact. Electricity generation in HPS is directly dependent on local availability of water resources [1]. Consumption of water and other natural resources needed to generate electricity at an HPS is linked to three stages of the life cycle of the facility:

Construction stage – this involves consumption of resources needed to produce the raw materials necessary for the construction of the station and all related operations, such as a reservoir and distribution grid. Normally, it is assumed that consumption of natural resources and water during the construction stage of the reservoir and the HPS is negligible throughout its life cycle [2]. This assumption can be considered valid in particular for large, long-life hydropower projects with extensive electricity generation. However, for smaller projects and in some other cases as well, this power station life cycle stage cannot be ignored [3].

Operation of the station – during the operation stage, no water/natural resources are consumed directly at the hydroelectric power station. Indirect consumption involves water evaporated from the water surface of the reservoir or weir pool of the power station [4]. When assessing a water use related impact for a derivative type of HPS or HPS with water transfers, differences should also be considered in this regard between the point of abstraction and the point of discharge. Although, in the context of the popularization of water footprint in recent years, the focus has been mainly on the loss of water through evaporation, power generation in an HPS is associated with the loss of water through seepage and the impact on ecosystems due to changes in the nature of river flow and restrictions in migration passability [5].

Decommissioning of the station – like the construction stage, this involves consumption of water and other natural resources as part of the decommissioning of the hydraulic structure and the HPS as such. However, while several authors have already addressed water consumption at the construction stage of an HPS, the decommissioning stage has not yet been considered in any known study.

To assess indirect water use for generating electricity in an HPS, “volumetric water footprint” is the established terminology [6]. When assessing impacts linked to electricity generation, the use of life-cycle assessment (LCA) and LCA water footprint based on the methodology is a more appropriate approach [7].

Volumetric water footprint consists of three components: blue water footprint – water consumed from water sources; green water footprint – usually rainfall and water in the soil; and grey water footprint, i.e., water needed to dilute pollution to a harmless level. The grey water footprint is zero in the electricity generation process in an HPS. Grey water footprint is associated with potential pollution which is, however, almost negligible in the case of the production stage in an HPS. This is not the case of the construction and decommissioning stages; these two are, however, usually ignored in existing studies.

stopě. Obecně jsou rozlišovány tři přístupy ke stanovení užívání vody, resp. ztrát vody, při výrobě elektrické energie ve vodní elektrárně [8] ve fázi provozu vodní elektrárny:

1. hrubá spotřeba – vyjádřená jako ztráty vody výparem z hladiny vodní nádrže,
2. čistá spotřeba – vyjádřená jako rozdíl mezi výparem z vodní hladiny a evapotranspirací z povrchu před vybudováním vodní nádrže,
3. čistá vodní bilance – vyjádřená jako rozdíl mezi výparem z vodní hladiny a srážkami, které dopadnou na hladinu.

Pro vyjádření dopadů spojených s užíváním vody, tj. v LCA vodní stopě, se množství užívané vody vynásobí charakterizačním faktorem podle zvoleného charakterizačního modelu.

Cílem této studie je: (i) otestování různých přístupů ke stanovení vodní stopy výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách, (ii) srovnání jejich výsledků na příkladu největší české vodní elektrárny Orlík, (iii) diskuse jejich kladů a záporů a (iv) definování možných omezení současných přístupů ke stanovení vodní stopy.

DATA A METODY

Pilotní studie – vodní elektrárna Orlík

Vodní nádrž Orlík leží na řece Vltavě v Jihočeském kraji na říčním km 144,650. Jedná se o největší vodní dílo v České republice s délkou zátopy 68 km a objemem zásobního prostoru 716,5 mil. m³. Zatopená plocha nádrže se pohybuje v rozmezí 1 172,0 až 2 468,2 ha, při maximálním nadržení pak 2 732,7 ha. Přehrada je tvořena betonovou tížnou hrází o výšce 81,5 m a o délce v koruně 450 m. Kubatura hráze přesahuje 1 mil. m³. Dlouhodobý průměrný průtok činí $Q_a = 83,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hlavními účely vodní nádrže Orlík jsou akumulace vody pro nadlepšení průtoků na spodní části Vltavy a Labe, částečná ochrana před velkými vodami a výroba elektrické energie. Vedlejšími účely jsou pak rekreace, vodní sporty, rybí hospodářství a plavba v nádrži.

Vodní elektrárna je situována na levém břehu. Vybavena je čtyřmi kaplanovými turbínami 4 × 91 MW, které pracují se spádem v rozmezí 44,0–70,5 m. Vodní elektrárna Orlík je největší vodní elektrárna v České republice produkující přibližně pětinu elektrické energie vyrobenou ve vodních elektrárnách, mimo přečerpávací vodní elektrárny.

Hlavními přítoky do nádrže Orlík jsou Vltava, Otava a Lužnice. Celková plocha povodí vodní nádrže Orlík činí 12 106 km², z toho plocha povodí Lužnice tvoří 4 226 km² a povodí Otavy 3 840 km². Vodní nádrž Orlík tvoří uzávěrový profil bilanční oblasti ČHMÚ 3 – Horní Vltava. Hydrologické charakteristiky bilanční oblasti uvádí každoroční Zpráva o hydrologické bilanci České republiky [9]. Charakteristiky zahrnují údaje o srážkách a odtocích. Zpráva za rok 2016 byla rozšířena o průměrné teploty a podrobnější informace o 3 dílčích povodích (Horní Vltava, Lužnice, Otava) tvořících bilanční oblast 3 – Horní Vltava. Pro řešení této studie byla data o srážkách a teplotách pro bilanční oblast 3 získána z ČHMÚ.

Thus, all water use is allocated to the blue water footprint. In general, there are three approaches to determining the use/loss of water in electricity generation at an HPS [8] in the operation stage:

1. Gross consumption – expressed as the loss of water through evaporation from the surface of the reservoir,
2. Net consumption – expressed as the difference between evaporation from the water surface and evapotranspiration from the surface before the reservoir was built,
3. Net balance – expressed as the difference between evaporation from the water surface and precipitation that reaches the water surface.

In order to express the impacts associated with the use of water (i.e., LCA water footprint), the amount of water used is multiplied by a characterization factor according to the chosen characterization model.

The aim of this study is to: (i) test different approaches to determining the water footprint of electricity generation in an HPS; (ii) compare their results using the example of Orlík, the largest Czech HPS; (iii) discuss the pros and cons of the methods; and (iv) define possible limitations of current approaches to determining water footprint.

DATA AND METHODS

Pilot study – Orlík hydroelectric power station

Orlík reservoir is situated on the River Vltava in the South Bohemian Region, river kilometre 144.650. It is the largest hydraulic structure in the Czech Republic, with the length of the flooded area being 68 km and a storage capacity of 716.5 million square metres. The surface area of the flooded area of the reservoir ranges between 1,172.0 and 2,468.2 ha; for maximum damming, the figure is 2,732.7 ha. Orlík has a concrete gravity dam that is 81.5 m high; its crest is 450 m long. The volume of the dam exceeds 1 million m³. Long-term average flow rate is $Q_a = 83.5 \text{ m}^3$ per second. The primary purpose of the reservoir is to: accumulate water for improved flow rates in the lower segments of the River Vltava and the River Elbe; flood protection (to some extent); and generate electricity. Secondary purposes are recreation, water sports, fish farming, and navigation on the reservoir.

The power station is situated on the left bank. There are four 91 MW Kaplan turbines which operate within a gradient of 44.0 to 70.5 m. Orlík HPS is the largest in the Czech Republic, generating approximately one-fifth of the electricity produced by hydroelectric power, with the exception of pumped-storage power stations.

The Vltava, Otava, and Lužnice are the main feed rivers for the reservoir. The total surface area of the Orlík reservoir drainage basin is 12,106 km², of which the surface areas of the basins of the River Lužnice and the River Otava form 4,226 km² and 3,840 km², respectively. Orlík reservoir forms the final profile of balance region 3 – Upper Vltava River, according to the Czech Hydrometeorological Institute. The hydrological characteristics of the balance area are set out in annual reports on the hydrological balance of the Czech Republic [9]. The characteristics include precipitation and discharge data. The 2016 report was extended to include average temperatures and more detailed information on the 3 level sub-basins (Upper Vltava, Lužnice, Otava) which comprise balance region 3 – Upper Vltava River. In order to deliver this study, precipitation and temperature data for balance region 3 were obtained from the Czech Hydrometeorological Institute.

Výpočet vodní stopy

Fáze výstavby a likvidace vodní elektrárny a vodního díla Orlík byla pro nedostatek údajů a s ohledem na životnost obou celků zanedbána. Pro stanovení spotřeby vody ve fázi provozu vodní elektrárny Orlík byly využity všechny tři přístupy popsáné v úvodu. Výpočet bilanční vodní stopy byl proveden podle rovnice (1). Užívání vody pro metodu „hrubé spotřeby“ podle rovnice (2), pro metodu „čisté spotřeby“ podle rovnice (3) a pro metodu „čisté bilance“ podle rovnice (4):

$$VS_i = \frac{U_i \times A_{VD}}{P} \quad (1)$$

$$U_{\text{hrubá spotřeba}} = V \quad (2)$$

$$U_{\text{čistá spotřeba}} = (V-ET) \quad (3)$$

$$U_{\text{čistá bilance}} = (V-S) \quad (4)$$

kde VS_i je bilanční vodní stopa pro $i = \{\text{hrubá spotřeba, čistá spotřeba, čistá bilance}\}$,
 U_i užívání vody stanovené podle rovnice (2–4),
 V výpar stanovený podle rovnice (8),
 ET evapotranspirace stanovená jako potenciální evapotranspirace podle rovnice (9),
 S srážky získané z ČHMÚ.

Výpočet LCA vodní stopy byl proveden podle rovnice (5). Pro stanovení dopadů spojených s výrobou elektrické energie byly použity dva charakterizační modely: japonský charakterizační model *fwua* [10] a model *AWARE* [11]. Tyto dva modely vodní stopy nedostatku vody byly zvoleny na základě možnosti jejich regionalizace [12] na profil vodní nádrže Orlík. Regionalizace modelu *fwua* byla provedena podle rovnice (6) [13], modelu *AWARE* pak podle rovnice (7) [14]:

$$VS_{i,j} = CF_j \times \frac{U_i \times A_{VD}}{P} \quad (5)$$

$$CF_{fwua} = \frac{Q_{ref}}{\frac{Q}{A_p}} \quad (6)$$

$$CF_{AWARE} = \frac{AMD_{world\ avg}}{Q-k \times Q_a} ; CF_{AWARE} \in \langle 0,1; 100 \rangle \quad (7)$$

kde $VS_{i,j}$ je bilanční vodní stopa [$m^3 \cdot MWh^{-1}$] pro $i = \{\text{hrubá spotřeba, čistá spotřeba, čistá bilance}\}$ a $j = \{\text{fwua, AWARE}\}$,
 A_{VD} plocha vodní nádrže [m^2],
 P výroba elektrické energie [MWh],
 CF_j charakterizační faktor,
 Q_{ref} referenční hodnota 1/12 [$m^3 \cdot m^{-2} \cdot \text{měsíc}^{-1}$] [10],
 Q odtok v profilu VD Orlík [$m^3 \cdot \text{měsíc}^{-1}$],
 A_p plocha povodí [m^2],
 $AMD_{world\ avg}$ referenční hodnota 0,0136 [$m^3 \cdot m^{-2} \cdot \text{měsíc}^{-1}$] [11],
 k koeficient vyjadřující požadavky ekosystémů: $k = 0,3$ [14],
 Q_a dlouhodobý průměrný průtok [$m^3 \cdot \text{měsíc}^{-1}$].

Calculating grey water footprint calculation

The construction and decommissioning stages of Orlík HPS and hydraulic structure were ignored due to a lack of data and considering the lifetime of both units. All three approaches described in the introduction were used to determine water consumption during the operation stage of Orlík HPS. The calculation of volumetric water footprint was made as per Equation (1), while the use of water was detected using Equation (2) for the “gross consumption” method, Equation (3) for the “net consumption” method, and Equation (4) for the “net consumption” method:

where VS_i is volumetric water footprint for $i = \{\text{gross consumption, net consumption, net balance}\}$,
 U_i the use of water determined as per Equation (2–4),
 V the evaporation determined as per Equation (8),
 ET the evapotranspiration determined as potential evapotranspiration as per Equation (9),
 S the precipitation information received from CMI.

Calculation of the LCA water footprint was conducted as per Equation (5). Two characterization models were used to determine the impacts associated with power generation – the Japanese characterization model *wfua* [10] and the *AWARE* model [11]. The two models of water scarcity footprint were selected based on the possibility of regionalizing them [12] to fit the profile of Orlík reservoir. The regionalization was made as per Equation (6) for the *fwua* model [13] and as per Equation (7) for the *AWARE* model [14]:

where $VS_{i,j}$ is the volumetric water footprint [$m^3 \cdot MWh^{-1}$] for $i = \{\text{gross consumption, net consumption, net balance}\}$ and $j = \{\text{fwua, AWARE}\}$,
 A_{VD} the surface area of the reservoir [m^2],
 P the generation of electricity [MWh],
 CF_j a characterization factor,
 Q_{ref} the reference value of 1/12 [$m^3 \cdot m^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$] [10],
 Q the outflow in Orlík WW profile [$m^3 \cdot \text{month}^{-1}$],
 A_p the drainage basin surface area [m^2],
 $AMD_{world\ avg}$ the reference value of 0.0136 [$m^3 \cdot m^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$] [11],
 k the coefficient expressing the requirements of ecosystems: $k = 0.3$ [14],
 Q_a the long-term average flow rate [$m^3 \cdot \text{month}^{-1}$].

Výpočet výparu z vodní hladiny a evapotranspirace

Výpar z vodní hladiny je závislý na mnoha faktorech, jako je teplota a tlak vzduchu, teplota vody, zastínění hladiny či pokrytí vodními rostlinami, rychlost a směr větru apod. Pro stanovení výparu z volné hladiny lze použít množství metod nebo přímá měření. S ohledem na dostupnost dat byl v rámci této studie uvažován model využívající pouze teplotu vzduchu. Zvolený model tak představuje sice velmi jednoduchý postup pro stanovení výparu, ale zároveň postihuje nejméně možných vlivů a může tak být nepřesný.

V 50. letech bylo v Československu provozováno několik výparoměrných stanic, ze kterých byla odvozena rovnice (8) pro výpočet výparu na základě teploty [15]. V současnosti je v České republice provozována Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v. v. i., výparoměrná stanice v obci Hlasivo na Táborsku. Analýzou dat z této výparoměrné stanice byly odvozeny další rovnice [16, 17]. Výsledky rovnic využívající jako popisnou proměnnou pouze teplotu vzduchu byly porovnány na datech ze stanice Hlasivo z období květen až říjen v letech 1957 až 2012, přičemž tato analýza [18] ukázala, že i tyto rovnice využívající jako nezávislou proměnnou pouze teploty vzduchu vykazují dostatečnou přesnost výsledných hodnot. Jednotlivé rovnice dosahují lepších výsledků při různých rozpětích teplot. Zatímco na celé sadě dat dosahovaly relativně stejných výsledků rovnice Šermera a Mrkvičkové, tak rovnice Šermera dosahovala nejlepších výsledků při teplotách nižších jak +15 °C, kdy dosáhla nejmenšího rozdílu mezi modelovanou a měřenou hodnotou ve více jak 53 % případů. S ohledem na typické teploty v bilanční oblasti 3 – Horní Vltava byl pro výpočet zvolen model Šermera podle rovnice (8). V posuzovaném období 2006 až 2011 dosahovaly průměrné měsíční teploty v bilanční oblasti 3 – Horní Vltava hodnot od -6,241 °C do +20,309 °C, přičemž 41 měsíců mělo průměrnou teplotu do +10 °C, 12 měsíců mělo průměrnou teplotu mezi +10 a +14 °C, 5 měsíců pak mezi +14 a +16 °C a ve 14 případech překročila průměrná měsíční teplota hodnotu +16 °C. Pro výpočet výparu byla použita rovnice (8):

$$V = 10^{0,0452 \times t - 0,204} \quad (8)$$

kde V je průměrná hodnota výparu [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$],
 t průměrná měsíční teplota vzduchu v meteorologické budce 2 m nad zemí [°C].

S ohledem na nejistoty spojené se stanovením hodnoty výparu z nádrže nebylo uvažováno s kolísáním hladiny v nádrži. Pro výpočet objemu vypařené vody byla uvažována hodnota plochy hladiny na úrovni zásobního prostoru 2468,2 ha.

Pro uvažování evapotranspirace z území před výstavbou vodní nádrže Orlík, byl pro nedostatek podrobných informací zvolen předpoklad, že evapotranspirace odpovídá potenciální evapotranspiraci na základě úvahy, že v údolní nivě byl dostatek infiltrované vody z řeky k evapotranspiraci. Pro výpočet potenciální evapotranspirace, která je použita v metodě „čisté spotřeby“, byla použita Thornthwaiteova rovnice [19] (9):

$$PET = 16 \times \left(\frac{10 \times t}{I} \right)^{\alpha} \times \frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \quad (9)$$

kde PET je potenciální evapotranspirace [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$],
 t průměrná měsíční teplota vzduchu [°C],
 I roční index tepla vypočtený podle rovnice (10):

Calculation of evaporation and evapotranspiration

Evaporation is dependent on many factors, such as air temperature and pressure, water temperature, water surface shading or aquatic plant cover, and wind speed and direction. Many methods or direct measurements can be used to determine evaporation from the open water surface. In view of the availability of data, a model using only air temperature was considered in this study, making the chosen model a very simple procedure for determining evaporation. However, as it also covers the least number of possible impacts, it can be deemed inaccurate.

In the 1950's, several evaporation measuring stations operated in Czechoslovakia; Equation (8) was derived from these to calculate evaporation on the basis of temperature [15]. Currently, such a type of measuring station is operated by the TGM Water Research Institute, p.r.i., in the municipality of Hlasivo, Tábor region. By analyzing data from this station, more equations were derived [16, 17]. The results of equations using only air temperature as a descriptive variable were compared with the data sourced from Hlasivo station in May to October for the period 1957–2012; these showed [18] that even these equations, using only air temperature as an independent variable, show sufficient accuracy of the resulting values. Each of the equations performs better at different temperature ranges. While the results obtained through the Šermer and Mrkvičková equations were about the same across the data set, the Šermer equations achieved the best results at temperatures below +15°C, achieving the least difference between the modelled and measured values in more than 53% of cases. In view of the temperatures typical of balance region 3 – Upper Vltava, the model by Šermer (i.e., using Equation (8)) was chosen for the calculation. During the period under review (i.e., 2006 to 2011), the average monthly temperatures in balance region 3 – Upper Vltava ranged between -6.241 °C and +20.309 °C, with 41 months having an average temperature below +10 °C, 12 months having an average temperature between +10 and +14 °C, and 5 months having an average temperature between +14 and +16 °C; in 14 cases, the average monthly temperature exceeded +16 °C. Equation (8) was used to calculate the evaporation:

where V is the average evaporation value [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$],
 t the average monthly air temperature at the weather box situated 2 m above the ground [°C].

Due to uncertainties associated with the determination of the value of evaporation from the reservoir, the fluctuation of the reservoir surface was not considered. For calculating the volume of water evaporated, the value of the water surface area at the level of the reservoir area (2,468.2 ha) was considered.

Due to a lack of detailed information, in order to consider evapotranspiration from the surface prior to the construction of Orlík reservoir, the assumption was chosen that evapotranspiration corresponds to potential evapotranspiration on the basis of a consideration that there was enough infiltrated water from the river for evapotranspiration. The Thornthwaite equation [19] was used to calculate the potential evapotranspiration that is used in the “net consumption” method (9):

where PET is potential evapotranspiration [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$],
 t the average monthly air temperature [°C],
 I the annual thermal index calculated as per the following equation (10):

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (10)$$

kde I je měsíční index tepla vypočtený podle rovnice (11):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (11)$$

Koeficient a je vypočítán podle rovnice (12):

$$\alpha = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1792 \times 10^{-5} \times I + 0,49239 \quad (12)$$

kde d je počet dní v daném měsíci,
 N teoretická průměrná doba denního světla v daném měsíci.

where i is the monthly thermal index calculated as per the following equation (11):

Coefficient a is calculated as per equation (12):

where d is the number of days in a given month,
 N the theoretical average period of daylight in a given month.

Doba denního světla v každém dni v roce byla vypočtena pomocí CBM modelu [20] (13):

The daylight time of each day of the year was calculated using the CBM model [20] (13):

$$D = 24 - \frac{24}{\pi} \times \cos^{-1} \left[\frac{\sin \frac{P \times \pi}{180} + \sin \frac{L \times \pi}{180} \times \sin \varphi}{\cos \frac{L \times \pi}{180} \times \cos \varphi} \right] \quad (13)$$

kde P je koeficient uvažovaný na hodnotě 0,8333 [20],
 L zeměpisná šířka (+ pro severní polokouli, - pro jižní polokouli),
 φ vypočteno podle rovnice (14, 15):

where P is the coefficient considered at 0.8333 [20],
 L the latitude (“+” for the northern hemisphere, “-” for the southern hemisphere),
 φ calculated as per the following equation (14, 15):

$$\varphi = \sin^{-1} [0,39795 \times \cos \Theta] \quad (14)$$

$$\Theta = 0,2163108 + 2 \times \tan^{-1} [0,9671396 \times \tan [0,00860 \times (J-186)]] \quad (15)$$

kde J je pořadové číslo dne v roce.

where J is the serial number of the day of the year.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Bilanční vodní stopa

Hodnoty modré vodní stopy se velmi liší podle použitého přístupu ke stanovení spotřeby vody (obr. 1 a 2). Nejvyšší hodnoty dosahuje modrá vodní stopa při uvažování pouze spotřeby vody formou výparu („hrubá spotřeba“). Oba zbývající přístupy výrazně snižují hodnotu vodní stopy, a to až do záporných hodnot. Záporné hodnoty znamenají, že z vodní nádrže odtéká více vody, než do ní přitéká vodními toky. Z obr. 1 je vidět, že při uvažování pouze výparu, má průběh hodnot bilanční vodní stopy charakteristický sezonní průběh s maximy v létě a minimy v zimě. Naopak hodnoty vodní stopy vypočtené s využitím

RESULTS AND DISCUSSION

Volumetric water footprint

Blue water footprint values vary greatly depending on the approach used to determine water consumption (Fig. 1 and 2). The highest value is the blue water footprint when only considering water consumption in the form of evaporation (“gross consumption”). Both remaining approaches significantly reduce the water footprint value, even to negative values. Any negative value indicates that more water is flowing out of the reservoir than is flowing in through watercourses. Figure 1 shows that when considering evaporation only, the behaviour of volumetric water footprint values is characterized by seasonal performance, with

„čisté spotřeby“ (obr. 1) i „čisté bilance“ (obr. 2) sezonnost vodní stopy nevykazují. V případě výpočtu pomocí „čisté spotřeby“ je potřeba si ovšem uvědomit, že v této studii byl proveden jen orientační výpočet evapotranspirace pro ověření principů metody a údaje nejsou úplně přesné. Přesto je u této metody „potlačení“ sezonnosti dáno již samotným principem metody. U výpočtu s využitím „čisté bilance“ je průběh měsíčních hodnot vodní stopy předurčen charakteristickými průběhy srážek a teplot během roku. Jak vyplývá z obr. 2, vodní stopa stanovená pomocí „čisté bilance“ kolísá kolem hodnoty 0, tj. srážky dopadající na hladinu vyrovnávají výpar z hladiny. *Tabulka 1* uvádí hodnoty bilanční vodní stopy v ročním kroku. I zde je patrný značný rozptyl hodnot.

Tabulka 1. Hodnoty bilanční vodní stopy VE Orlík v ročním kroku [m³·MWh⁻¹]

Rok	Výpar	Čistá spotřeba	Čistá bilance
2006	30,7	4,0	-1,9E-07
2007	55,1	5,9	-3,1E-07
2008	55,3	5,5	1,2E-07
2009	35,4	3,7	-3,9E-07
2010	31,5	2,3	-3,8E-07
2011	54,0	4,6	-4,9E-08

Metoda „hrubé spotřeby“ uvažující pouze výpar je nejjednodušší, ale jejím hlavním nedostatkem je potlačení systémového přístupu ke stanovení užívání vod v „systému výroby elektrické energie ve vodní elektrárně“. Díváme-li se na vodní nádrž jako součást technologického systému výroby elektrické energie, tak do systému vstupuje několik vstupů, stejně tak ze systému voda „odchází“ v podobě několika výstupů. Vstupy do systému vodní nádrže představují vodní toky přitékající do nádrže, podpovrchový a případně plošný povrchový přítok z okolí nádrže, prameny v ploše zátopy a srážky na hladinu zátopy. Vnitřní prameny a podpovrchový a plošný povrchový přítok lze obvykle zanedbat z důvodu jejich velikosti a s ohledem na skutečnost, že i bez existence vodní nádrže by tato voda dotekla do vodního toku. Výstupy z nádrže představuje voda odtékající z nádrže, odběry z nádrže a ztráty vody (výparem, průsakem do podloží, případně jiné). Odběry vody z nádrže lze také zanedbat, protože nemají žádnou souvislost s výrobou elektrické energie na vodní elektrárně (tedy pokud není vodní elektrárna umístěna na odběrném potrubí).

Výpočet metodou „čisté spotřeby“ je v současnosti často používaný přístup [1] a vychází z předpokladu, že z plochy zátopy vodní nádrže by docházelo k výparu i bez existence vodní nádrže. Skutečná spotřeba vody je tedy rovná jen rozdílu mezi evapotranspirací z území před výstavbou vodní nádrže a výparem z hladiny nádrže. Aplikace tohoto přístupu naráží na dva hlavní problémy. Jakýkoliv výpočet evapotranspirace bude pouze odhadem této hodnoty. Jednak je to dáno modelovými přístupy ke stanovení skutečné evapotranspirace (každý model je jen více či méně přesným zjednodušením skutečnosti). Především však lze v současnosti jen stěží odhadovat, jaká by byla struktura povrchů v zátopě. Druhý problém je principiální. Zkusme aplikovat princip přístupu „čisté spotřeby“ například na továrnu. Továrna vyrábí nějaký produkt s technologií A, která spotřebuje 5 m³ vody na jednotku produkce. Továrna projde rekonstrukcí a po modernizaci provozu tatáž továrna používá technologii B, která spotřebuje jen 3 m³ vody na jednotku produkce. Z tohoto příkladu lze odvodit tři závěry. Vodní stopa produktu po rekonstrukci továrny jsou 3 m³. Díky rekonstrukci továrny se snížila vodní stopa produktu o 2 m³. Celková vodní stopa produkce v továrně se změnila o (3x počet výrobků produkovaných po rekonstrukci) – (5x počet výrobků produkovaných před rekonstrukcí).

peaks in summer and lows in winter. Conversely, water footprint values calculated using both “net consumption” (Fig. 1) and “net balance” (Fig. 2) do not show such seasonality. However, in the case of “net consumption” calculation, it should be noted that in this study only an indicative calculation of the evapotranspiration has been made to verify the principles of the method and the data are not entirely accurate. Nevertheless, this method of “suppression” of seasonality is already based on the principle of the method itself. For “net balance” calculation, the behaviour of monthly water footprint values is pre-determined by the characteristic behaviour of precipitation and temperature values during the year. As shown in Fig. 2, the water footprint determined through the “net balance” approach varies around 0, i.e. the precipitation reaching the water surface compensates for the evaporation from the surface. Table 1 presents volumetric water footprint values in yearly steps. Here, too, there is considerable variation in the values.

Table 1. Volumetric water footprint values at Orlík HPS in yearly steps [m³·MWh⁻¹]

Year	Evaporation	Net consumption	Net balance
2006	30.7	4.0	-1.9E-07
2007	55.1	5.9	-3.1E-07
2008	55.3	5.5	1.2E-07
2009	35.4	3.7	-3.9E-07
2010	31.5	2.3	-3.8E-07
2011	54.0	4.6	-4.9E-08

The “gross consumption” method, which only considers evaporation, is the simplest approach; its main shortcoming, however, is suppressing the systemic approach to determining the use of water in what is termed “hydroelectric power generation system”. Looking at the reservoir as a component of the electricity generation system, there are several inputs into this system. Similarly, water “leaves” the system in the form of several outputs. Reservoir system inputs include: water courses flowing into the reservoir; sub-surface and, where appropriate, surface inflow from the reservoir surroundings, springs within the surface area of the flooded area; and precipitation reaching the water surface of the flooded area. Internal springs and the sub-surface/surface tributaries can usually be neglected due to their size and the fact that this water would reach the water course even without the existence of a reservoir. Outputs from a reservoir involve water that flows out of the reservoir, water that is extracted from the reservoir, and the water lost (whether through evaporation, seepage, or other means). Water collected from the reservoir can be neglected too, because it has no connection with the generation of electricity at the HPS (i.e., unless the station is located on a collection pipeline).

The calculation using the “net consumption” method is currently a frequently used approach [1] and assumes that there would be evaporation from the surface area of the reservoir even without the existence of the reservoir. The actual consumption is therefore equal only to the difference between potential evapotranspiration from the surface area of the flooded area of the reservoir and evaporation from its water surface. The application of this approach faces two major issues. First, any calculation of evapotranspiration will only be an estimate of this value. This is due to model approaches to determining actual evapotranspiration since any model is more or less just a precise simplification of reality. Above all, however, it is difficult to estimate at present what the structure of the surfaces in the flooded area would be. The second issue is a fundamental problem. Let us try to apply the principle of the “net consumption” approach to a factory, for example. The factory produces a product using

Lze se na uvedenou situaci podívat i jinak. Před výstavbou vodní nádrže neexistovala v dané lokalitě vodní elektrárna a veškerý výpar z území zátopy současné vodní elektrárny byl přiřazen (alokován) k produktům, které byly v území produkovány. Respektive, i kdyby v daném území existovala například elektrárna na jezu, pak by k ní nebyl alokován výpar z plochy povodí, ale jen ze zdrže jezu. Vybudováním vodní nádrže se způsob využití území změnil a území produkuje jiné produkty (elektrickou energii, surovou vodu, ochranu před povodněmi, rekreaci apod.).

I praktické použití přístupu „čisté spotřeby“ je problematické. Modrá vodní stopa vyjadřuje množství vody, které je „spotřebováno“ při produkci nějakého statku (v tomto případě na výrobu elektrické energie). Pokud by dlouhodobý přítok do nádrže byl např. 1 mil. m³, dlouhodobý výpar 2 mil. m³ a evapotranspirace z původního povrchu před vybudováním nádrže 1,2 mil. m³, vycházela by hodnota vodní stopy 0,8 mil. m³. Pokud by se nádrž nacházela v aridní oblasti skoro bez srážek, pak by reálně byla prázdná a z nádrže by nic neodtékalo, neboť ztráty vody výparem ze systému by byly vyšší, než je vstup do systému ve formě přítoku. Navržený přístup „čisté spotřeby“ je tak spíše příkladem nevhodného či účelového použití, což není bohužel jen problém vodní stopy, ale obecně footprint metodologií [21].

Přístup „čisté bilance“ se zdá metodicky nejvhodnější k řešení studií vodní stopy spojené s užíváním vody ve vodní nádrži. Zahnuje ztráty vody ze systému ve formě výparu i „zisk“ systému, tedy vstup do systému, v podobě srážek. Ovšem ani toto není metodicky úplně čisté. Jak upozorňuje Bakken a kol. [4] podle metodiky vodní stopy [6] se hodnota vodní stopy pohybuje v intervalu od 0 do kladného nekonečna.

Při řešení studií vodní stopy spojených s vodní nádrží není vhodné omezovat vstupy a výstupy pouze na výpar z hladiny a srážky na hladinu, ale je vhodné zevšeobecnit řešení na všechny vstupy a výstupy popsané výše. A to i v případech, kdy v konkrétní situaci mohou být jednotlivé vstupy a výstupy uvažovány s nulovou nebo zanedbatelnou hodnotou. Zejména ztráty podloží a povrchový přítok může hrát za určitých podmínek zanedbatelnou roli v celkové bilanci nádrže. Nemusí se jednat jen o chyby v návrhu nádrže a ztráty vod od podloží, které způsobí nefunkčnost nádrže [22]. Pokud nádrž leží v rovinatém krajině a okolní půda má vysokou propustnost, pak sací síly porostu v okolí nádrže mohou ovlivnit celkové ztráty vody z nádrže vysokou evapotranspirační schopností. Naopak v případě málo propustného podloží a minimálního rostlinného pokryvu v okolí nádrže (typicky skalnaté okolí vodních nádrží) steče většina srážek z tohoto území přímo do nádrže. V obou popsaných případech by bylo vhodné buďto rozšířit rovnice (1) a (5) o členy vyjadřující vliv okolí nádrže nebo uvažovat s jakousi efektivní plochou nádrže. Stanovení takové efektivní plochy nádrže není v současnosti metodicky rozpracováno. Hogeboom a kol. [23] ve své globální studii uvažovali pouze se ztrátami výparem (metoda „hrubé spotřeby“) a z teoretické průměrné naplněnosti nádrže a idealizovaného tvaru údolí navrhli použít pro výpočet ztrát výparem hodnotu plochy nádrže o velikosti 56,25 % maximální plochy nádrže. Pro použití s metodou „čisté bilance“ je tato hodnota spíše podhodnocená.

Robescu a Bondrea [24] spočítaly vodní stopu spojenou s výstavbou hráze vodní elektrárny Vidraru na 19,7 mil. m³ při objemu hráze 480 000 m³, tj. 41 m³ na m³ betonové hráze. Při použití tohoto údaje a kubatury hráze vodního díla Orlík cca 1,1 mil. m³ vychází vodní stopa hráze vodní nádrže Orlík na 45,1 mil. m³, resp. při uvažování 100leté životnosti 0,45 mil. m³ za rok. Spočtený roční výpar z vodní nádrže Orlík činí v jednotlivých letech 15,5 až 17,1 mil. m³. Při přepočítání na jednotku vyrobené elektrické energie to je pak od 0,26 do 3,09 m³·MWh⁻¹ v měsíčním kroku, resp. 0,81 až 1,51 m³·MWh⁻¹ v ročním kroku. Zejména v případě použití metody „čisté bilance“ se jedná o zanedbatelné hodnoty.

V provedené studii byly veškeré vstupy a výstupy ze systému vodní nádrže přiřazeny k výrobě elektrické energie. Vodní nádrž Orlík však neslouží pouze k výrobě elektrické energie, ale jako většina vodních nádrží na světě je víceúčelová [25]. Kromě výroby elektrické energie zajišťuje celospolečensk

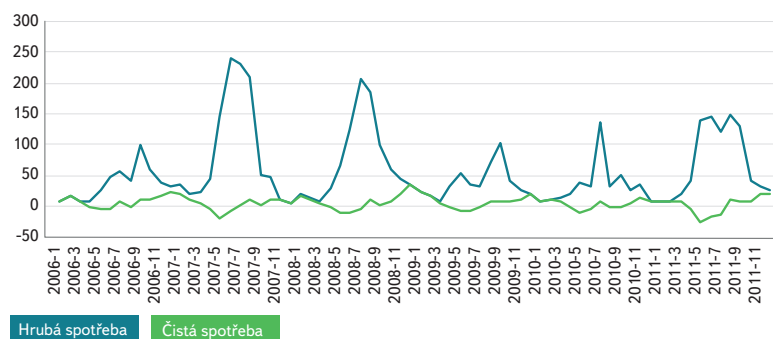
Technology A that consumes 5 m³ per unit of produce. It undergoes a process of refurbishment and, after the modernization of its operations; the same factory is using Technology B that consumes only 3 m³ per unit of produce. Three conclusions can be drawn from this example. The water footprint of the product after factory refurbishment is 3 m³. The process has reduced the water footprint of the product by 2 m³. The total water footprint of factory's produce has changed by (3x the number of products produced after the refurbishment) – (5x the number of products produced before the refurbishment).

It is possible to look at the given situation from another point of view as well. Prior to the construction of the reservoir, there was no HPS at the site, and all the evaporation from the flooded area of the current HPS was attributed (allocated) to the products that were produced in the area. For example, even if there was a power station on a weir in the area, then evaporation allocated to it would not be that from the surface area of the drainage basin, but only that from the weir pool. By building the reservoir, the use of the area has changed and the area produces other goods, such as electricity, raw water, protection from floods, and recreation.

The practical application of the “net consumption” approach is also problematic. Blue water footprint refers to the amount of water that is “consumed” when producing any goods (i.e., generating electricity in this case). Should long-term inflow to the reservoir be, for example, 1 million m³, long-term evaporation 2 million m³, and previous evapotranspiration (from the former surface before the reservoir was built) 1.2 million m³, then the water footprint would be 0.8 million m³. Should the reservoir be located in an arid region almost without precipitation, then it would actually be empty and nothing would be flowing out of it because losses of water from the system through evaporation would be higher than the input into the system in the form of inflowing water. The proposed “net consumption” approach is thus rather an example of inappropriate or special-purpose application, which is unfortunately an issue associated not only with water footprint but, generally with footprint methodologies [21].

In terms of methodology, the “net balance” approach appears to be the one most appropriate to address water footprint studies associated with the use of water in a reservoir. It includes losses of water from the system through evaporation as well as system “gain”, i.e., the input entering the system in the form of precipitation. However, even this is not completely clean in a methodical way. As Bakken et al. [4] point out, according to water footprint methodology [6], the water footprint value ranges from 0 to positive infinity.

When conducting water footprint studies associated with a reservoir, it is not appropriate to limit the inputs and outputs to only evaporation from the water surface and precipitation reaching the water surface; rather, it is appropriate to generalize the solution to apply to all inputs and outputs described above, even if, in a particular situation, individual input and output values can be considered as zero or negligible. In particular, losses via subsoil and surface inflow can both play a significant role in the overall reservoir balance under certain conditions. Factors that can cause a reservoir to stop working may not only involve errors when designing the reservoir and loss of water to the subsoil [22]. If a reservoir is situated in a level landscape and the surrounding soil has high permeability, the suction forces of the forest stands around the reservoir can affect the total losses of water from the reservoir with a high evapotranspiration capacity. In contrast, if there is very little permeable subsoil and minimum plant cover around the reservoir (which typically involves rocky surroundings of reservoirs), most precipitation from this area will flow directly into the reservoir. In both cases described above, it would be appropriate either to extend equations (1) and (5) to include terms expressing the influence of the surrounding area of the reservoir, or to consider some sort of an effective area of the reservoir. Any determination of such an effective area of the reservoir is not methodically developed at the moment. Hogeboom et al. [23], in their global study, only considered losses through evaporation (the “gross consumption” method); based on the theoretical average degree to which the reservoir



Obr. 1. Modrá vodní stopa elektrické energie VE Orlík – metoda hrubé spotřeby a čisté spotřeby

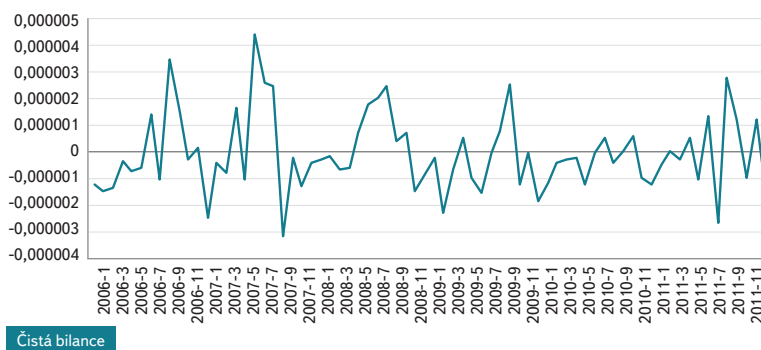
Fig. 1. Blue water footprint of Orlík HPS electricity – the methods of gross consumption and net consumption

funkce (nadlepšování průtoků), protipovodňovou ochranu, odběry vody, lodní dopravu, rybářství, sport a rekreaci. Celkové užívání vody by tedy mělo být přerozděleno (alokováno) ke všem těmto užíváním, což sníží hodnoty stanovené vodní stopy na výrobu elektrické energie. Výzkum metod alokace na jednotlivé užívání vody je však dosud velmi omezený a i studie, které alokaci na různé užití zahrnují do výpočtů vodní stopy, používají rozdílné metody [1, 26]. V podmínkách České republiky lze použít různé metody alokace, asi nejuniverzálnější je vyjádření pomocí ekonomické hodnoty jednotlivých užívání poskytovaných vodní nádrží. Zatímco vyjádření ekonomické hodnoty vyrobené elektrické energie i odebrané surové vody je díky existenci ceny poměrně snadné, vyjádření hodnoty ostatních užívání je úlohou vhodnou pro ekonomy. Je vhodné též zmínit, že výzkum ve světě (zejména v oblastech s omezenými vodními zdroji) se zabývá i opačnou úlohou, tj. jak využít vodní stopu k co nejefektivnější alokaci vody ve vodní nádrži na jednotlivé užívání tak, aby byly dosaženy maximální přínosy [27].

LCA vodní stopa

Výpočet regionalizovaných hodnot charakterizačních faktorů pro oba zvolené modely je v principu shodný a liší se pouze v rozdílné referenční hodnotě, zahrnutí potřeb vody pro ekosystémy v modelu *AWARE* a omezením hodnot CF_{AWARE} na interval $\langle 0,1; 100 \rangle$. Charakterizační faktory pro oba modely mají v jednotlivých měsících relativně podobný průběh, i když variabilita hodnot je značně velká (obr. 3). Hodnoty charakterizačního faktoru CF_{FWUA} se pohybují od 0,9 do 12,9 při průměru 5,9. Hodnoty charakterizačního faktoru CF_{AWARE} se pohybují dokonce od 0,16 do 15,8 při průměru 2,3.

Z pohledu terminologického představuje vodní stopa stanovená těmito dvěma modely hodnotu „vodní stopy nedostatku vody – water scarcity footprint“. Obrázky 4 až 6 zobrazují průběh LCA vodní stopy v měsíčním kroku podle obou charakterizačních modelů a srovnání s průběhem bilanční vodní stopy. Obecně lze konstatovat, že v případě VE Orlík oba použité LCA modely snižují rozptyl hodnot oproti bilanční vodní stopě. Toto konstatování neplatí pouze v případě charakterizačního modelu *fwua* aplikovaném na užívání vody stanoveném pomocí „čisté bilance“, kde naopak spíše zvýrazňuje maximální hodnoty (obr. 6). Z grafů je vidět, že rozptyl měsíčních hodnot je velmi vysoký. Tabulka 2 uvádí hodnoty v ročním kroku a i zde je vidět značná rozkolísanost hodnot vodní stopy.



Obr. 2. Modrá vodní stopa elektrické energie VE Orlík – metoda čisté bilance

Fig. 2. Blue water footprint of Orlík HPS electricity – the net balance method

can be filled and an idealized valley shape, this suggests using 56.25% of the maximum reservoir surface area as a reservoir surface area value for calculating losses through evaporation. For use with the “net balance” method, this value is rather underestimated.

Robescu and Bondrea [24] calculated the water footprint associated with the construction of the dam for the Vidraru HPS to be 19.7 million m^3 , with the dam volume being 480,000 m^3 (i.e., 41 m^3 per m^3 of the concrete dam). Using this information and the volume of Orlík hydraulic structure of about 1.1 million m^3 , the water footprint of Orlík dam is 45.1 million m^3 , or (considering 100 years of service life) 4.51 million m^3 per year. The calculated annual evaporation from Orlík reservoir is 15.5 to 17.1 m^3 in individual years. Subsequently, converting it to a unit of electricity generated, it is 0.26 to 3.09 $m^3 \cdot MWh^{-1}$ in monthly steps, and 0.81 to 1.51 $m^3 \cdot MWh^{-1}$ in yearly steps. These are not negligible values, particularly when the “net balance” method is applied.

In the completed study, all inputs and outputs of the reservoir system were allocated to electricity generation. Orlík reservoir, however, is not just for generating power, but (like most of the reservoirs around the world) it is a multi-purpose facility [25]. In addition to electricity generation, it provides environmental functions (improved flow), flood protection, water collection, navigation, fishing, sport, and recreation. Therefore, the total water use should be redistributed (allocated) to all these uses, which will reduce the values of the water footprint determined for electricity generation. However, research on allocation methods for individual water uses is still very limited, and even studies that have included allocations for different uses in water footprint calculations use different methods [1, 26]. Different allocation methods can be used in the settings of the Czech Republic; specification through the economic value of individual uses provided by reservoirs is perhaps the most universal way. While expressing the economic value of both the electricity generated and the raw water collected is relatively easy due to the existence of a price, expressing the value of other uses is a task suitable for economists. It should also be noted that global research (especially in areas with limited water resources) also addresses the opposite role, i.e. how to use the water footprint to allocate water found in the reservoir as efficiently as possible for each use in order to achieve maximum benefits [27].

LCA water footprint

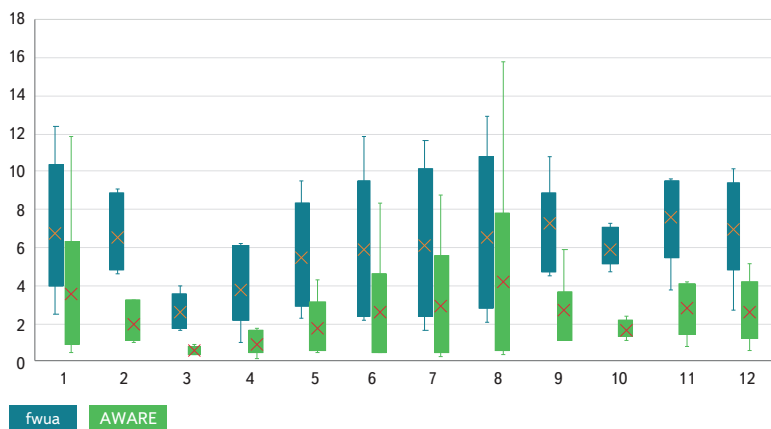
Calculation of regionalized values of the characterization factors for both models selected is identical, in principle; it differs only in different reference values, including the water needed for the ecosystems in the *AWARE* model and limiting the CF_{AWARE} values to an interval $\langle 0,1; 100 \rangle$. The characterization factors for both models have a relatively similar behaviour in individual months, although

Tabulka 2. Hodnoty LCA vodní stopy VE Orlík v ročním kroku [m³-MWh⁻¹]

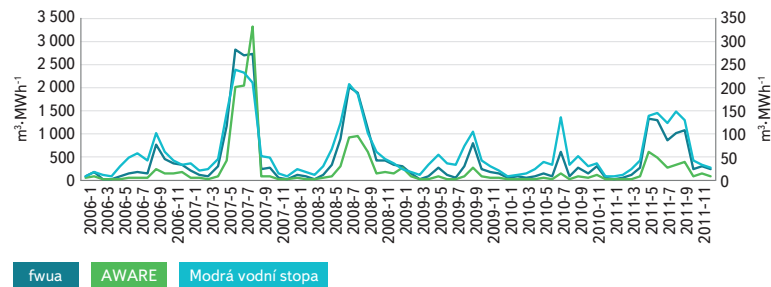
Rok	fwua			AWARE		
	Hrubá spotřeba	Čistá spotřeba	Čistá bilance	Hrubá spotřeba	Čistá spotřeba	Čistá bilance
2006	95,8	12,6	-5,9E-07	19,7	2,6	-1,2E-07
2007	292,5	31,2	-1,6E-06	73,4	7,8	-4,1E-07
2008	307,4	30,5	6,8E-07	79,2	7,9	1,7E-07
2009	130,9	13,8	-1,4E-06	28,2	3,0	-3,1E-07
2010	114,2	8,3	-1,4E-06	24,5	1,8	-3,0E-07
2011	311,6	26,8	-2,8E-07	82,0	7,0	-7,5E-08

Table 2. LCA water footprint values of Orlík HPS in yearly steps [m³-MWh⁻¹]

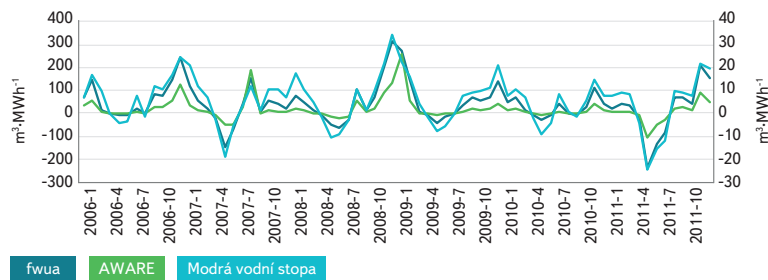
Year	fwua			AWARE		
	Gross Consumption	Net consumption	Net balance	Gross Consumption	Net consumption	Net balance
2006	95.8	12.6	-5.9E-07	19.7	2.6	-1.2E-07
2007	292.5	31.2	-1.6E-06	73.4	7.8	-4.1E-07
2008	307.4	30.5	6.8E-07	79.2	7.9	1.7E-07
2009	130.9	13.8	-1.4E-06	28.2	3.0	-3.1E-07
2010	114.2	8.3	-1.4E-06	24.5	1.8	-3.0E-07
2011	311.6	26.8	-2.8E-07	82.0	7.0	-7.5E-08



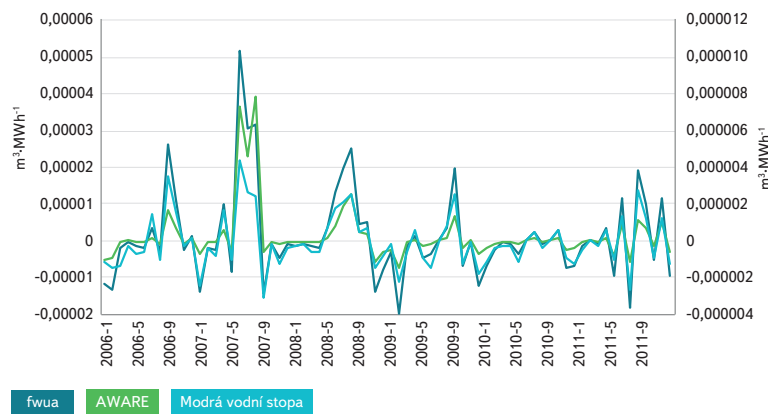
Obr. 3. Hodnoty regionalizovaných charakterizačních faktorů
Fig. 3. The values of regionalized characterization factors



Obr. 4. LCA a bilanční vodní stopa – hrubá spotřeba
Fig. 4. LCA and volumetric water footprint – gross consumption



Obr. 5. LCA a bilanční vodní stopa – čistá spotřeba
Fig. 5. LCA and volumetric water footprint – net consumption



Obr. 6. LCA a bilanční vodní stopa – čistá bilance
Fig. 6. LCA and volumetric water footprint – net balance

Studie LCA jsou vzájemně problematicky porovnatelné, protože obvykle vycházejí z rozdílných předpokladů a aplikace zjednodušení i charakterizačních modelů. Pomocí charakterizačního modelu *fwua* a při použití stejné metody regionalizace byla stanovena LCA vodní stopa 32 tepláren a uhelných elektráren, přičemž nebyly uvažovány jiné procesy než samotná výroba elektrické energie v těchto provozech. Hodnota LCA vodní stopy těchto provozů se pohybovala mezi 1,3 až 12,8 m³·MWh⁻¹ [13]. Další studii LCA vodní stopy představuje studie jaderných elektráren Temelín a Dukovany, kde byl použit regionalizovaný charakterizační model *fwua* a pro stanovení ztrát z vodních nádrží byl uvažován pouze výpar [28]. Hodnoty LCA vodní stopy v ročním kroku pro JE Temelín se pohybovaly mezi 6,1 až 7,7 m³·MWh⁻¹ a pro JE Dukovany mezi 15,0 až 16,5 m³·MWh⁻¹. Na tyto dvě jaderné elektrárny byl aplikován i model *AWARE* opět s uvažováním pouze výparu [29] a hodnoty LCA vodní stopy v ročním kroku pro JE Temelín se pohybovaly mezi 1,3 až 1,6 m³·MWh⁻¹ a pro JE Dukovany mezi 3,2 až 3,5 m³·MWh⁻¹.

ZÁVĚR

Studie vodní stopy vodní elektrárny Orlík prokázala několik významných skutečností, které je třeba mít na paměti při realizaci dalších studií vodní stopy. Jako nejvýznamnější je jednoznačně volba způsobu výpočtu užívání vody. Metoda „hrubé spotřeby“ uvažuje pouze výpar z nádrže a má tedy jasnou závislost na průběhu meteorologických veličin během roku. Zároveň vykazuje nejvyšší hodnoty vodní stopy. Metoda „čisté spotřeby“ odečítá od výparu z hladiny hodnotu výparu z plochy povodí před výstavbou nádrže. Ačkoliv je tato metoda v posledních letech hojně využívána pro výpočet vodní stopy hydroelektráren, je její správnost diskutabilní. Jako vhodnou metodu lze doporučit metodu „čisté bilance“.

Dalším významným aspektem, který ovlivňuje hodnotu vodní stopy vztahovou na produkovanou jednotku elektrické energie, je otázka alokace. V České republice prakticky všechny vodní nádrže poskytují několik užitků, vztahovat tedy veškeré užívání vody jen k jednomu užitku (např. k výrobě elektrické energie) je metodicky nesprávné. Postupy alokace užívání vody na jednotlivé užitky poskytované vodní nádrží však nejsou dosud standardizovány.

Posledním významným aspektem je otázka zanedbání fáze výstavby a likvidace vodního díla. Ačkoliv jsou tyto fáze životního cyklu vodní elektrárny v globálních studiích obvykle zanedbány s odůvodněním, že se „rozpusť“ během životního cyklu do zanedbatelných hodnot, orientační výpočet na základě literárních údajů ukázal, že pro vodní elektrárnu Orlík se nemusí jednat o zanedbatelná čísla, zvláště při použití metody „čisté bilance“ a částečně i při použití metody „čisté spotřeby“.

Literatura

- [1] BAKKEN, T.H., KILLINGTVEIT, Å., and ALFREDSEN, K. The water footprint of hydropower production – State of the art and methodological challenges. *Global Challenges* [online], 2017, 1(5), 1600018 [vid. 2020-02-15]. ISSN 2056-6646. Dostupné z: doi:10.1002/gch2.201600018
- [2] PFISTER, S., SANER, D., and KOEHLER, A. The environmental relevance of freshwater consumption in global power production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online], 2011, 16(6), p. 580–591 [vid. 2020-04-08]. ISSN 1614-7502. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-011-0284-8
- [3] BAKKEN, T.H., MODAHL, I.S., ENGLAND, K., RAADAL, H.L., and RNØY, S. The life-cycle water footprint of two hydropower projects in Norway. *Journal of Cleaner Production* [online], 2016, 113, p. 241–250. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.036
- [4] BAKKEN, T.H., KILLINGTVEIT, Å., ENGLAND, K., ALFREDSEN, K., and HARBØY, A. Water consumption from hydropower plants – review of published estimates and an assessment of the concept. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [online], 2013, 17(10), p. 3983–4000 [vid. 2017-12-19]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-17-3983-2013
- [5] GLEICK, P.H. Water and Energy. *Annual Review of Energy and the Environment* [online], 1994, 19(1), p. 267–299 [vid. 2017-07-28]. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.eg.19.110194.001411

the variability of the values is very large (Fig. 3). The values of the characterization factor of CF_{fwua} range between 0.9 and 12.9, with 5.9 being the average. The values of the characterization factor of CF_{AWARE} even range between 0.16 and 15.8, with 2.3 being the average.

From the terminological aspect, the water footprint established by these two models represents a value of water scarcity footprint. Figures 4 to 6 show LCA water footprint behaviour in monthly steps by both characterization models, and comparison with the behaviour of the volumetric water footprint. In general, in the case of Orlík HPS, the two LCA models reduce the variance of values compared with volumetric water footprint. This statement does not apply only to the *fwua* characterization model applied to the use of water established through the “net balance” approach, where it rather highlights the maximum values (Fig. 6). The graphs charts show that the variance of the monthly values is very large. Table 2 shows the values in yearly steps and here, too, there is a significant variation in the water footprint values.

LCA studies are mutually problematic for comparison because they are usually based on different assumptions and applications of simplification as well as characterization models. Using the *fwua* characterization model and using the same regionalization method, an LCA water footprint was established for 32 heat-generating plants and coal-fired power stations, while no processes other than the electricity generation itself were considered in these operations. The LCA water footprint of these operations ranged between 1.3 and 12.8 m³·MWh⁻¹ [13]. Another LCA water footprint study is one conducted for Temelín and Dukovany nuclear power stations (NPS), where a regionalized *fwua* characterization model was used and only evaporation was considered to determine the loss from reservoirs [28]. LCA water footprint values in yearly steps ranged from 6.1 to 7.7 m³·MWh⁻¹ for Temelín NPS and between 15.0 and 16.5 m³·MWh⁻¹ for Dukovany NPS. The *AWARE* model was also applied to these two power stations; again, considering only evaporation [29], and LCA water footprint values in yearly steps were between 1.3 and 1.6 m³·MWh⁻¹ for Temelín NPS, and between 3.2 and 3.5 m³·MWh⁻¹ for Dukovany NPS.

CONCLUSION

The water footprint study for Orlík HPS has shown some important facts to bear in mind when carrying out future water footprint studies. Of these, the choice of how water use is calculated is clearly the most important. The “gross consumption” method only considers evaporation from the reservoir, and is therefore clearly dependent on the course of meteorological variables during the year. At the same time, it also exhibits the highest water footprint values. The “net consumption” method subtracts the value of drainage basin surface area evaporation (before construction of the reservoir) from water surface evaporation. Although this method has been widely used in recent years to calculate an HPS water footprint, its accuracy is debatable. The “net balance” method can be recommended as an appropriate approach.

The issue of allocation is another important aspect that affects the water footprint value relative to the unit of electricity generated. In the Czech Republic, virtually all reservoirs provide multiple benefits, so applying all of the water use to only one benefit (e.g. electricity generation) is methodically incorrect. However, the procedures of allocating the use of water to individual benefits provided by the reservoir are not yet standardized.

The last important aspect is the question of neglecting the construction and decommissioning stages of a hydraulic structure. Although these stages of the life cycle of an HPS are usually neglected in global studies, on the grounds that they become “dissolved” to negligible values over the life cycle, an indicative calculation based on literature data has shown that, for Orlík HPS, these may not be negligible numbers, especially when using the “net balance” method and, to some extent, even when using the “net consumption” method.

- [6] HOEKSTRA, A.Y., CHAPAGAIN, A.K., ALDAYA, M.M., and MEKONNEN, M.M. *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. London, Washington, DC: Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.
- [7] ISO. *Environmental management – Water footprint – Principles, requirements and guidelines*. 14046:2014. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [8] HERATH, I., DEURER, M., HORNE, D., SINGH, R., and CLOTHIER, B. The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. *Journal of Cleaner Production* [online], 2011, 19(14), p. 1582–1589 [vid. 2014-06-09]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2011.05.007
- [9] ČHMÚ. *Hydrologická bilance množství a jakosti vody ČR* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2002–2018. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/bilance.htm>
- [10] YANO, S., HANASAKI, N., ITSUBO, N., and OKI, T. Water Scarcity Footprints by Considering the Differences in Water Sources. *Sustainability* [online], 2015, 7(8), p. 9753–9772 [vid. 2016-07-28]. Dostupné z: doi:10.3390/su7089753
- [11] BOULAY, A.M., BARE, J., BENINI, L., BERGER, M., LATHUILLIÈRE, M.J., MANZARDO, A., MARGNI, M., MOTOSHITA, M., NÚÑEZ, M., PASTOR, A.V., RIDOUTT, B., OKI, T., WORBE, S., and PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online], 2018, 23(2), p. 368–378. ISSN 0948-3349, 1614-7502. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-017-1333-8
- [12] ANSORGE, L., DLABAL, J., PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VOLOŠINOVÁ, D. a BERÁNKOVÁ, T. *Metodika sestavení vodní stopy v souladu s ISO 14046*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2017. Výzkum pro praxi, Sešit 66. ISBN 978-80-87402-59-7.
- [13] ANSORGE, L. Aplikace charakterizačního faktoru nedostatku vody ve studiích LCA v podmínkách České republiky – Application of the water unavailability factor for characterisation of water use in LCA studies in the Czech Republic. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online], 2016, 58(6), s. 41–52. ISSN 0322–8916. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/2016/12/aplikace-charakterizacniho-faktoru-nedostatku-vody-ve-studiich-lca-v-podminkach-ceske-republiky/>
- [14] ANSORGE, L. and BERÁNKOVÁ, T. LCA Water Footprint AWARE characterization factor based on local specific conditions. *European Journal of Sustainable Development* [online], 2017, 6(4), p. 13–20. ISSN 2239-5938. Dostupné z: doi:10.14207/ejsd.2017v6n4p13
- [15] ŠERMER, A. Experimentálné vzorce pre stanovenie strát vody výparom z vodných nádrží. *Vodní hospodářství*, 1961, 11(12), s. 544–547. ISSN 1211-0760.
- [16] MRKVIČKOVÁ, M. Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online], 2007, 49(2), s. 9–11. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/archiv/>
- [17] BERAN, A. a VIZINA, A. Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online], 2013, 55(4), s. 4–8. ISSN 0322-8916. Dostupné z: http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/08/vtei_2013_4.pdf
- [18] ANSORGE, L. and BERAN, A. Performance of simple temperature-based evaporation methods compared with a time series of pan evaporation measures from a standard 20 m² tank. *Journal of Water and Land Development* [online], 2019, 41(2), p. 1–11. ISSN 1429-7426. Dostupné z: doi:10.2478/jwld-2019-0021
- [19] THORNTHWAITE, C.W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* [online], 1948, 38(1), p. 55–94 [vid. 2017-12-21]. ISSN 0016-7428. Dostupné z: doi:10.2307/210739
- [20] FORSYTHE, W.C., RYKIEL, E.J., STAHL, R.S., WU, H., and SCHOOLFIELD, R.M. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling* [online], 1995, 80(1), p. 87–95 [vid. 2017-12-20]. ISSN 0304-3800. Dostupné z: doi:10.1016/0304-3800(94)00034-F
- [21] LAURENT, A. and OWSIANIAK, M. Potentials and limitations of footprints for gauging environmental sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability* [online], 2017, 25, Sustainability challenges, p. 20–27 [vid. 2019-09-09]. ISSN 1877-3435. Dostupné z: doi:10.1016/j.cosust.2017.04.003
- [22] BONACCI, O. and RUBINIĆ, J. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljuncica reservoir (Istria, Croatia). *Environmental Geology* [online], 2009, 58(2), p. 339–345 [vid. 2020-04-11]. ISSN 1432-0495. Dostupné z: doi:10.1007/s00254-008-1599-z
- [23] HOGEBROOM, R.J., KNOOK, L. and HOEKSTRA, A.Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources* [online], 2018, 113, p. 285–294 [vid. 2018-11-13]. ISSN 0309-1708. Dostupné z: doi:10.1016/j.advwatres.2018.01.028
- [24] ROBESCU, L.D. and BONDREA, D.A. The water footprint from hydroelectricity: a case study for a hydropower plant in Romania. *E3S Web of Conferences* [online], 2019, 85, 06012 [vid. 2019-02-27]. ISSN 2267-1242. Dostupné z: doi:10.1051/e3sconf/20198506012
- [25] BAKKEN, T.H., KJOSAVIK, F., KILLINGTVEIT, Å., and ALFREDSEN, K. Are Reservoirs Water Consumers or Water Collectors? Reflections on the Water Footprint Concept Applied on Reservoirs. *Water Resources Management* [online], 2015, 29(14), p. 4919–4926 [vid. 2019-03-13]. ISSN 1573-1650. Dostupné z: doi:10.1007/s11269-015-1104-x
- [26] ZHANG, J., LEI, X., CHEN, B., and SONG, Y. Analysis of blue water footprint of hydropower considering allocation coefficients for multi-purpose reservoirs. *Energy* [online], 2019, 188, 116086 [vid. 2019-09-16]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.116086
- [27] XUE, Y., CHEN, Y., CUI, D., XIE, Y., ZENG, W. and ZHANG, J. Monthly Allocation of Water Resources and Pollutant Loads in a Basin Based on the Water Footprint and Fallback Bargaining. *Sustainability* [online], 2019, 11(23), p. 6836 [vid. 2020-04-12]. Dostupné z: doi:10.3390/su11236836
- [28] ANSORGE, L. and DLABAL, J. Comparative water scarcity footprint study of two nuclear power plants. *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences* [online], 2017, 26(4), p. 489–497. ISSN 1732-9353. Dostupné z: doi:10.22630/PNIKS.2017.26.4.47
- [29] ANSORGE, L. and DLABAL, J. Srovnání vlivu volby prostorového měřítka charakterizačního faktoru AWARE na příkladu JE Dukovany a Temelín. *ENTECHO* [online], 2018, 1(2), s. 1–6 [vid. 2018-12-29]. ISSN 2571-1040. Dostupné z: doi:10.3260/ENTECHO.2018.11.001

Autor

Ing. Libor Ansoerge, Ph.D.

✉ libor.ansorge@vuvv.cz

ORCID: 0000-0003-3963-8290

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2020.04.002