

Aplikace charakterizačního faktoru nedostatku vody ve studiích LCA v podmínkách České republiky

LIBOR ANSORGE

Klíčová slova: vodní stopa – posuzování dopadů životního cyklu – ISO 14046 – charakterizační faktor – nedostatek vody – elektrárna – teplárna

SOUHRN

V předloženém článku jsou shrnuty výsledky testování metody charakterizace užívání vody v systému posuzování životního cyklu v podmínkách České republiky. Zvolená metoda umožňuje robustní vyjádření užívání vody v ekvivalentních hodnotách referenčního systému. Metoda je postavena na potenciálu obnovitelnosti vodních zdrojů. Pro aplikaci metody v České republice byly odvozeny hodnoty charakterizačního faktoru pro jednotlivá hydrologická povodí III. řádu v České republice. Takto získané hodnoty byly porovnány s hodnotami spočítanými pro konkrétní profily Českého hydrometeorologického ústavu. Dále bylo provedeno stanovení vodní stopy pomocí testované metody procesu výroby elektrické energie ve vybraných elektrárnách a teplárnách ČR. Vzhledem k tomu, že zvolená metoda nepokrývá problematiku dopadů na lidské zdraví či ekosystémy, tak zjištěné hodnoty představují (pouze) „vodní stopu nedostatku vody procesu výroby elektrické a tepelné energie v elektrárnách a teplárnách“.

ÚVOD

Vodní stopa je odborný výraz, který se ve vodohospodářské praxi začal objevovat od 90. let minulého století. Vodní stopa byla definována jako celkové množství vody, které je použito přímo či nepřímo pro produkci se zahrnutím množství spotřebované a znečištěné vody [1]. Tento koncept prošel určitou formou kritiky, která poukazovala na skutečnost, že takto definovaná vodní stopa nijak nevyovídá o dopadech, které užívání vody přináší. Komunita zabývající se posuzováním životního cyklu přišla s vlastním chápáním pojmu vodní stopy a Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO) vyvinula a vydala normu zařazující vodní stopu do kategorie posuzování životního cyklu [2]. V rámci inventarizace životního cyklu (LCI – Life Cycle Inventory) jsou shromážděny veškeré informace o vstupech a výstupech během celého životního cyklu posuzovaného produktového systému. Ve vztahu k vodní stopě je to pak zjištění množství vody užité či spotřebované během životního cyklu. Následně je pak během fáze analýzy dopadů (LCIA – Life Cycle Impact Analyses) zjištěné množství použité či spotřebované vody převedeno pomocí tzv. charakterizačních faktorů na

Application of the water unavailability factor for characterisation of water use in LCA studies in the Czech Republic

LIBOR ANSORGE

Keywords: water footprint – life cycle impact assessment – ISO 14046 – characterisation factor – water scarcity – power plant – heat plant

SUMMARY

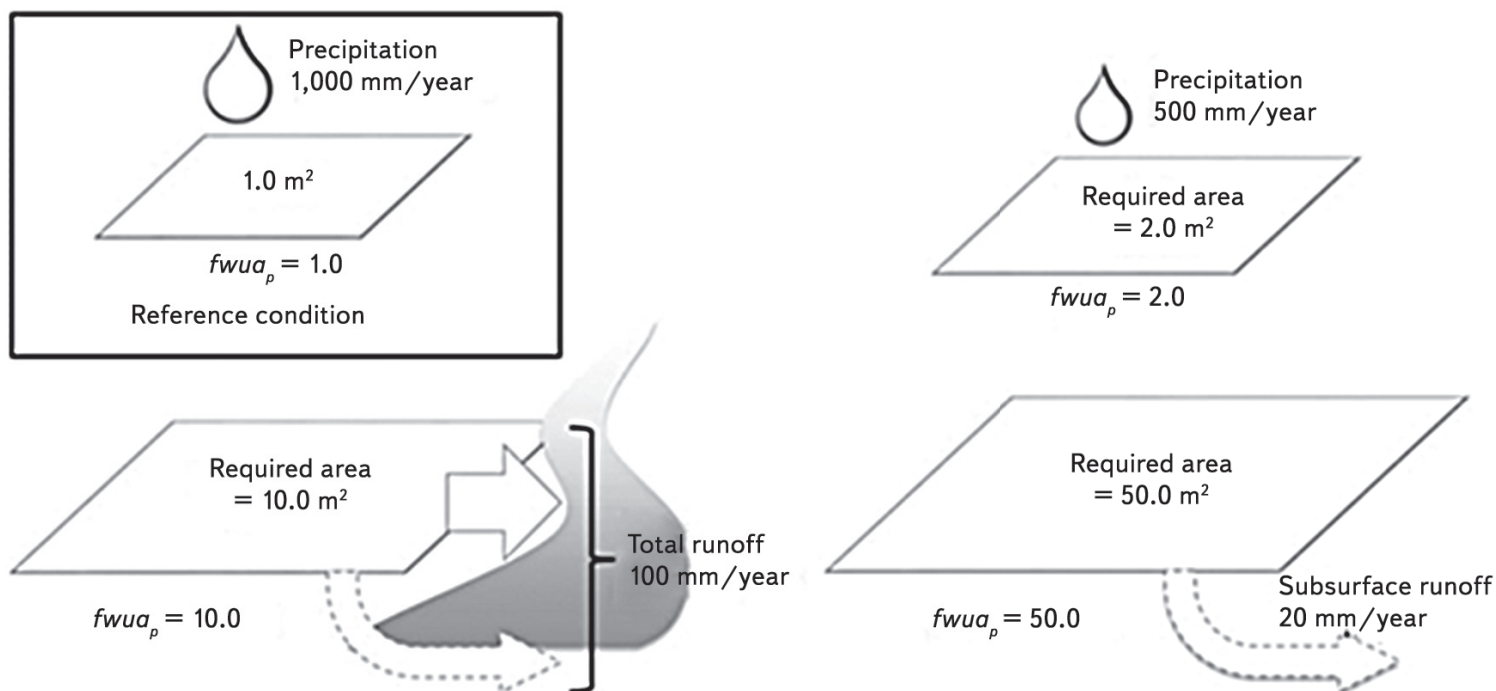
The following article summarises the results of testing a method for the characterisation of water use in the system of life cycle assessment in the Czech Republic. The chosen method allows for robust expression of water use in the equivalent values of the reference system. The method is based on the potential renewability of water resources. To apply the method in the Czech Republic, characterisation factor values were derived for individual hydrological third-order catchments in the Czech Republic. These values were compared with values calculated for specific profiles from the Czech Hydrometeorological Institute. In addition, water footprint of electricity production process in selected power plants and heat plants in the Czech Republic was determined by using a tested method. Given the fact that the chosen method does not cover the issue of impacts on human health and ecosystems, the identified values represent (only) the “water scarcity footprint of electricity and heat production processes in power plants and heat plants.”

INTRODUCTION

“Water footprint” is a technical term which started to appear in water management practice from the 1990s. Water footprint was defined as the total amount of water used directly or indirectly for production, including consumed and polluted water [1]. This concept received some criticism, which pointed to the fact that such a defined water footprint tells us nothing about the impacts that water use brings. The community involved in life cycle impact assessment came up with its own understanding of the concept of water footprint and the International Organization for Standardization (ISO) developed and issued a norm classifying water footprint in the category of life cycle impact assessment [2]. In Life Cycle Inventory (LCI), all information regarding inputs and outputs is collected throughout the life cycle of the examined product system. In relation to the water footprint, it then finds the amount of water used or consumed during the life cycle. Subsequently, during the Life Cycle Impact Analyses (LCIA) phase, the determined quantity of used or consumed water is transferred via the so-called characterisation factors to the units expressing

Tabulka 1. Ukázkový příklad výpočtu vodní stopy „nedostatku vody“ (převzato z: [7])
 Table 1. Example of water scarcity footprint calculation (source: [7])

	Charakterizační faktor		LCI	LCIA
	Hydrologické charakteristiky Hydrological characteristics [mm/rok]	Faktor nedostupnosti vody Water unavailability factor (fwua)	Inventarizace užívání vody Water use inventory [m ³]	Vodní stopa Water scarcity footprint [m ³ H ₂ O _{ekv.}]
Dešťové srážky Precipitation	500	2,0	2,0	4,0
Povrchová vody Surface runoff	100	10,0	1,5	15,0
Podzemní vody Subsurface runoff	20	50,0	0,5	25,0
CELKEM TOTAL	-	-	4,0	44,0



Obr. 1. Konceptuální diagram faktoru nedostupnosti vody vyjádřený pomocí potřebné plochy území (převzato se svolením autorů z: [7])

Fig. 1. Conceptual diagram of the water unavailability factor in terms of the required land area (reproduced with permission from: [7])

This figure is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

jednotky vyjadřující tzv. „midpointové“ kategorie dopadu [3]. Jedním z charakterizačních faktorů, který je běžně využíván pro charakterizaci „spotřeby vody“ je Water Stress Index (WSI) [4]. Existuje ovšem i řada dalších charakterizačních faktorů [5]. Koncept Water Stress Indexu je sice běžně zahrnut do nejrozšířenějších LCA databází, ale je mu vytýkáno [6], že se jedná o syntetický ukazatel stanovený na základě výsledků hydrologických modelů s problematickým fyzikálním vyjádřením, který nerozlišuje mezi zdroji vody (srážky, podzemní vody, povrchové vody).

V reakci na některé nedostatky Water Stress Indexu byla v roce 2015 publikovaná metoda [7], která je založena na posouzení obnovitelnosti vodních zdrojů v řešeném území. Na rozdíl od Water Stress Indexu (a jemu podobných charakterizačních metod) nevyužívá tato metoda pro konstrukci charakterizačního faktoru hodnotu užívání vod v řešeném území, takže nemohou nastat situace, kdy je užívání vody započítáno „dvakrát“ [6]. Mezi další výhody metody patří schopnost prostorové a časové diferenciaci i rozlišení jednotlivých typů zdrojů.

METODIKA

Popis testované metody

Myšlenka charakterizačního faktoru postaveného na obnovitelnosti vodních zdrojů vychází z předpokladu, že dopad užití jednotkového množství vody je nepřímo úměrný schopnosti zdroje toto množství dodat/nahradit. Prakticky jediným zdrojem vody jsou dešťové srážky. V povodí s nedostatkem vody/srážek musí být k dispozici větší plocha nebo delší čas k vytvoření požadovaného množství vody. Jinými slovy potenciální dopad může být vyjádřen jako plocha povodí nebo doba potřebná k získání jednotkového množství vody v každém zdroji. Charakterizační faktor je definován rovnicí 1.

$$fwua_{x,l} = \frac{A_{x,l}}{A_{ref}} = \frac{T_{x,l}}{T_{ref}} \quad (1)$$

kde $fwua_{x,l}$ je charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ pro zdroj x v místě l ,

$A_{x,l}$	množství vody v definovaném čase ve zdroji x v místě l ,
A_{ref}	plocha potřebná k získání jednotkového množství vody v definovaném čase za referenčních podmínek,
$T_{x,l}$	čas potřebný k získání jednotkového množství vody z definované plochy ve zdroji x v místě l ,
T_{ref}	čas potřebný k získání jednotkového množství vody z definované plochy za referenčních podmínek.

Hodnoty $A_{x,l}$ a $T_{x,l}$ jsou definovány rovnicemi 2 a 3.

$$A_{x,l} = \frac{Q_{A,ref}}{P_{x,l}} \quad (2)$$

$$T_{x,l} = \frac{Q_{T,ref}}{P_{x,l}} \quad (3)$$

kde $Q_{A,ref}$ je referenční množství vody na jednotku času [m^3/rok],
 $Q_{T,ref}$ referenční množství vody na jednotku plochy [m^3/m^2],
 $P_{x,l}$ roční schopnost vodního cyklu obnovit zdroj x v místě l [m/rok].

the so-called “midpoint” impact categories [3]. One of the factors commonly used for “water consumption” characterisation is the Water Stress Index (WSI) [4]. However, there are many other characterisation factors [5]. Although the concept of Water Stress Index is commonly incorporated into leading LCA databases, it is criticised [6] in that it is a synthetic measure based on the results of hydrological models with problematic physical expression, which do not differentiate between water sources (precipitation, groundwater, surface water).

In response to some of the deficits of the Water Stress Index, a method was published in 2015 [7] which is based on the assessment of water sources renewability in the selected area. Unlike Water Stress Index (and other similar characterisation methods), this method does not use the value of water use in the selected area for constructing the characterisation factor, so situations cannot occur where water use is calculated “twice” [6]. Other advantages of the method include the ability for spatial and temporal differentiation, as well as differentiation of various types of sources.

METHODOLOGY

Description of the tested method

The idea of a characterisation factor built on the renewability of water sources is based on the assumption that the impact of the use of the unit amount of water is inversely proportional to the ability of the source to supply or substitute this amount. Precipitation is virtually the only water source. In a catchment with water or precipitation scarcity, a larger area or a longer time must be available to create the desired amount of water. In other words, the potential impact can be expressed as a catchment area or the time required to obtain a unit amount of water from each water source. The characterisation factor is defined by equation 1.

where $fwua_{x,l}$ is the characterisation factor of “water unavailability” for a source x in a location l ,

$A_{x,l}$	the area required to obtain the unit amount of water at a defined time from a source x in a location l ,
A_{ref}	the area required to obtain the unit amount of water at a defined time under reference conditions,
$T_{x,l}$	the time required to obtain the unit amount of water from a defined area from a source x in a location l ,
T_{ref}	the time required to obtain the unit amount of water from a defined area under reference conditions.

Factors $A_{x,l}$ and $T_{x,l}$ are defined by equations 2 and 3.

where $Q_{A,ref}$ is the reference water quantity per unit of time [$m^3/year$],
 $Q_{T,ref}$ the reference water quantity per unit of area [m^3/m^2],
 $P_{x,l}$ the annual capacity of a water cycle to restore a source x in a location l [$m/year$].

Referenční množství vody může mít libovolnou hodnotu. Autoři metody při stanovení referenční hodnoty [7] vychází z přibližného průměru celosvětových srážek na 1 m² plochy zemského povrchu, který činí přibližně 1 000 mm. Tuto hodnotu používají pro vyjádření charakterizačního faktoru jak pro srážky, tak pro zdroje povrchových a podzemních vod s vysvětlením, že veškeré zdroje sladké vody pocházejí ze srážek. Globální průměrnou hodnotu srážek tak považují za vhodný ukazatel pro vážení obnovitelnosti vodních zdrojů (za obnovitelné zdroje nejsou v tomto smyslu považovány podzemní vody bez možnosti doplňování ze srážek, které se stejně v ČR nevyskytují). Výsledná vodní stopa, stanovená touto metodou, se vyjadřuje v m³ H₂O_{ekv.}, což lze fyzikálně interpretovat jako množství referenčních srážek. V případě použití referenčních hodnot navržených autory metody pak jako množství průměrných srážek na Zemi.

Celkový odtok lze považovat za odpovídající přirozené schopnosti obnovy podzemních vod ze srážek. Celkový odtok se skládá z přímého a základního odtoku. Přímý odtok je tvořen ze srážek a základním odtokem se rozumí ta část celkového odtoku, která pochází z podzemních zdrojů. Množství přímého i základního odtoku je vymezeno hydrologickým cyklem a je možno jej považovat za teoretické maximální množství využitelné společností (poznámka: tento předpoklad zanedbává požadavek na zachování ekologických průtoků, ať již budou definovány jakkoliv; zároveň však není principiálně v rozporu s myšlenkou šedé vodní stopy [1]).

Při srážkách 1 000 mm/rok je třeba 1 m² a doby 1 rok k dosažení referenční hodnoty 1 m³. Faktor nedostupnosti vodních zdrojů $fwua = 1,0$. Pro vysvětlení aplikace metody uvažujeme povodí o ploše 1 km² se srážkami 500 mm/rok, odtokem povrchových vod o velikosti 100 000 m³/rok a základním odtokem 50 000 m³/rok. V tomto povodí se srážkami 500 mm/rok je potřeba k dosažení referenčního objemu 1 m³ buďto plocha 2 m² nebo doba 2 let. Charakterizační faktor srážek (precipitation – p) $fwua_p = 1000/500 = 2$. Pokud odtoková výška z povodí činí 100 mm/rok (např. z povodí o ploše 1 km² = 1 mil. m² odtěče za rok 100 000 m³), pak je charakterizační faktor odtoku povrchových vod (surface water – sw) $fwua_{sw} = 1000/100 = 10$. Obdobně charakterizační faktor podzemních vod (ground water – gw) $fwua_{gw} = 1000/50 = 20$.

Potenciální dopad užívání vody v povodí pak může být vypočítán pro jednotlivé zdroje vynásobením součtu užívání každého zdroje jeho charakterizačním faktorem podle rovnice 4.

$$WSF = \sum fwua_{x,l} \times WI_{x,l} \quad (4)$$

kde $fwua_{x,l}$ je charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ pro zdroj x v místě l ,
 WSF vodní stopa nedostatku vody (water scarcity footprint) založená na potenciálním dopadu [m³ H₂O_{ekv.}],
 $WI_{x,l}$ výsledek inventarizační analýzy užívání vody vycházející ze spotřeby vody ve zdroji x v místě l [m³].

Pokud v popisovaném povodí je pro nějaký produkt, službu, instituci či proces spotřebováno 2,0 m³ dešťových srážek, 1,5 m³ povrchových vod a 0,5 m³ podzemních vod, je vodní stopa „nedostatku vody“ 44,0 m³ H₂O_{ekv.} (viz obr. 1 a tabulku 1).

Hodnoty charakterizačního faktoru pro povodí III. řádu

Hodnotu charakterizačního faktoru $fwua_{sw}$ lze snadno získat z dat poskytovaných Českým hydrometeorologickým ústavem podle rovnice 5. V případě studií LCA však často dochází k situaci, kdy v rámci posuzovaného životního cyklu je využíváno velké množství různých zdrojů vody a získání potřebných dat od

Reference water quantity may have any value. To determine the reference value [7] the authors of the method proceed from the approximate global precipitation average per 1 m² of the Earth's surface, which is approximately 1000 mm. They use this value to express the characterisation factor for precipitation as well as surface water and groundwater sources, explaining that all sources of fresh water come from precipitation. Therefore, they consider the global average precipitation value to be an appropriate indicator for weighing renewability of water sources (in this sense, fossil groundwater without the possibility of replenishment from precipitation, which does not occur in the Czech Republic anyway, is not considered a renewable source). The resulting water footprint, determined by this method, is expressed in m³ H₂O_{eq.}, which can be physically interpreted as a reference precipitation amount, and, in the case of using reference values proposed by the authors of the method, as the amount of average precipitation on the Earth.

The total runoff can be considered as corresponding to natural recharge capabilities of groundwater from precipitation. The total runoff is composed of two components: direct and primary runoff. Direct runoff is formed from precipitation and primary runoff means the part of the total runoff which comes from groundwater sources. The amount of direct as well as primary runoff is defined by the hydrological cycle and can be considered as the theoretical maximum amount usable by society (note: this assumption neglects the requirement to maintain ecological flows, whether they are defined in any way; at the same time, however, it is not fundamentally contrary to the idea of grey water footprint [1]).

With a precipitation of 1000 mm/year, 1 m² and 1 year is required to achieve the reference value of 1 m³. The water unavailability factor $fwua = 1.0$. For an explanation of method application, let us consider a catchment area of 1 km², precipitation of 500 mm/year, surface water runoff of 100 000 m³/year and basic runoff 50 000 m³/year. In this catchment with precipitation of 500 mm/year, either an area of 2 m² or a time of 2 years is required to achieve a reference volume of 1 m³. The characterisation factor of precipitation (p) $fwua_p = 1000/500 = 2$. If the runoff level from the catchment is 100 mm/year (e.g. in a catchment area of 1 km² = 1 x 10⁶ m², 100 000 m³ runoff in a year), then the characterisation factor of surface water runoff (sw) $fwua_{sw} = 1000/100 = 10$. Similarly, the characterisation factor of groundwater (gw) $fwua_{gw} = 1000/50 = 20$.

The potential impact of water use in the catchment can then be calculated for each source by multiplying the sum of the usage of each resource by its characterisation factor according to equation 4.

where $fwua_{x,l}$ is the characterisation factor of “water unavailability” for a source x in a location l ,
 WSF the water scarcity footprint based on a potential impact [m³ H₂O_{eq.}],
 $WI_{x,l}$ the result of the inventory analysis of water use based on water consumption in a source x in a location l [m³].

If for any product, service, institution or process at a described catchment, 2.0 m³ of rainfall, 1.5 m³ of surface water and 0.5 m³ of groundwater is consumed, the water scarcity footprint is 44.0 m³ H₂O_{eq.} (see Fig. 1 and Table 1).

Characterisation factor values for third-order catchments

The characterisation factor value $fwua_{sw}$ from equation 5 can be easily obtained from data provided by the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI). However, in the case of LCA studies, it often happens that a large number of different water sources are used within the assessed life cycle, and obtaining data from CHMI would be rather expensive and time consuming. Therefore,

Tabulka 2. Charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ ($fwua$) pro povodí 3. řádu a referenční podmínky $fwua_{ref} = 1,0$
 Table 2. Factor of water unavailability ($fwua$) for watershed 3rd order and reference $fwua_{ref} = 1.0$

ČHP III	Plocha povodí III. řádu (Catchment area)	Srážky (Precipitation)		Celkový odtok (Total runoff)		ČHP III	Plocha povodí III. řádu (Catchment area)	Srážky (Precipitation)		Celkový odtok (Total runoff)	
	km ²	mm	$fwua_p$	mm	$fwua_{sw}$		km ²	mm	$fwua_p$	mm	$fwua_{sw}$
1-01-01	711,59	855	1,16996	412	2,42755	1-14-03	1193,81	731	1,36781	260	3,85189
1-01-02	512,87	822	1,21609	375	2,66352	1-14-04	71,44	602	1,65987	135	7,42777
1-01-03	610,99	777	1,28665	300	3,32993	1-14-05	220,05	731	1,36781	260	3,85189
1-01-04	290,80	788	1,26934	315	3,17697	1-15-01	387,68	731	1,36781	260	3,85189
1-02-01	777,35	817	1,22385	362	2,76225	1-15-02	209,21	602	1,65987	135	7,42777
1-02-02	758,31	778	1,28466	307	3,25486	1-15-03	518,32	705	1,41920	278	3,60204
1-02-03	502,78	788	1,26955	266	3,76372	1-15-04	153,36	705	1,41920	278	3,60204
1-03-01	243,32	749	1,33475	290	3,44249	1-15-05	213,54	705	1,41920	278	3,60204
1-03-02	736,72	698	1,43178	207	4,82225	2-01-01	1616,13	720	1,38858	223	4,49038
1-03-03	867,14	714	1,40073	238	4,20856	2-02-01	944,62	672	1,48863	187	5,35352
1-03-04	650,42	679	1,47264	230	4,34405	2-02-02	900,00	720	1,38948	220	4,55149
1-03-05	591,15	701	1,42715	206	4,84719	2-02-03	242,85	698	1,43361	188	5,33024
1-04-01	607,65	652	1,53485	207	4,83134	2-02-04	40,31	695	1,43810	192	5,19572
1-04-02	645,43	668	1,49747	173	5,76808	2-03-01	826,29	955	1,04670	434	2,30301
1-04-03	379,44	646	1,54734	134	7,46594	2-03-02	150,40	695	1,43810	192	5,19572
1-04-04	172,73	650	1,53912	152	6,59177	2-03-03	1112,18	1026	0,97443	496	2,01615
1-04-05	685,08	615	1,62501	123	8,12581	2-04-01	438,33	695	1,43810	192	5,19572
1-04-06	543,04	672	1,48845	205	4,88243	2-04-02	479,45	695	1,43947	223	4,47679
1-04-07	604,78	672	1,48845	205	4,88243	2-04-03	538,82	753	1,32731	286	3,49911
1-05-01	782,08	1000	0,99953	536	1,86695	2-04-04	773,68	864	1,15758	378	2,64208
1-05-02	1166,03	804	1,24371	331	3,01677	2-04-05	110,22	753	1,32731	286	3,49911
1-05-03	244,07	768	1,30175	289	3,46465	2-04-06	121,11	964	1,03772	490	2,04047
1-05-04	630,33	634	1,57627	167	5,99855	2-04-07	376,92	1003	0,99672	517	1,93278
1-06-01	1862,79	785	1,27329	307	3,25799	2-04-08	190,06	749	1,33586	264	3,78679
1-06-02	978,81	712	1,40505	213	4,68469	2-04-09	111,50	1003	0,99672	517	1,93278
1-06-03	750,19	711	1,40643	226	4,43191	2-04-10	324,10	964	1,03772	490	2,04047
1-07-01	588,63	701	1,42707	188	5,32872	4-01-01	19,20	668	1,49606	194	5,16043
1-07-02	1128,33	692	1,44576	179	5,58062	4-01-02	305,07	668	1,49606	194	5,16043
1-07-03	998,06	709	1,40963	235	4,26204	4-01-03	193,59	736	1,35858	205	4,87432
1-07-04	1519,53	671	1,48957	181	5,52255	4-02-01	106,77	736	1,35858	205	4,87432
1-07-05	326,83	652	1,53281	198	5,04200	4-02-02	160,56	736	1,35858	205	4,87432

ČHP III	Plocha povodí III. řádu (Catchment area)		Srážky (Precipitation)		Celkový odtok (Total runoff)		ČHP III	Plocha povodí III. řádu (Catchment area)		Srážky (Precipitation)		Celkový odtok (Total runoff)	
	km ²	mm	fwua _p	mm	fwua _{sw}	km ²		mm	fwua _p	mm	fwua _{sw}		
1-08-01	1288,71	855	1,17023	372	2,69013	4-03-01	90,95	736	1,35858	205	4,87432		
1-08-02	724,78	758	1,31980	268	3,72792	4-04-01	299,88	736	1,35858	205	4,87432		
1-08-03	981,40	680	1,47133	190	5,25438	4-04-02	153,55	736	1,35858	205	4,87432		
1-08-04	845,39	631	1,58458	152	6,59870	4-04-03	19,45	707	1,41472	224	4,46907		
1-08-05	1325,42	584	1,71271	116	8,61802	4-10-01	821,00	889	1,12518	398	2,51110		
1-09-01	1508,89	710	1,40906	202	4,94132	4-10-02	1319,95	726	1,37818	240	4,17500		
1-09-02	1188,57	705	1,41806	188	5,33174	4-10-03	1436,20	672	1,48920	210	4,75354		
1-09-03	1653,52	665	1,50307	184	5,43022	4-11-01	988,69	899	1,11255	380	2,63063		
1-09-04	171,59	610	1,64028	164	6,11445	4-11-02	631,55	817	1,22374	309	3,23415		
1-10-01	1824,13	648	1,54222	178	5,62989	4-12-01	812,59	600	1,66705	118	8,49815		
1-10-02	1268,35	685	1,45932	190	5,25512	4-12-02	1423,38	626	1,59846	165	6,04434		
1-10-03	915,41	753	1,32884	244	4,10172	4-13-01	1314,56	732	1,36540	214	4,67239		
1-10-04	26,71	595	1,68190	137	7,28644	4-13-02	975,00	656	1,52497	207	4,83836		
1-10-05	755,91	641	1,55989	152	6,57838	4-13-03	760,97	656	1,52497	207	4,83836		
1-11-01	740,88	640	1,56353	162	6,18957	4-14-01	1404,13	666	1,50162	176	5,67712		
1-11-02	1520,85	612	1,63416	153	6,51683	4-14-02	2187,98	609	1,64281	138	7,23578		
1-11-03	603,91	545	1,83517	92	10,86357	4-14-03	1014,94	538	1,85801	76	13,08706		
1-11-04	641,26	592	1,69041	132	7,57473	4-15-01	1730,65	653	1,53228	168	5,94014		
1-11-05	558,13	578	1,72871	132	7,59928	4-15-02	1155,42	628	1,59145	136	7,35675		
1-12-01	429,00	602	1,66192	145	6,90142	4-15-03	1233,11	590	1,69531	100	10,01972		
1-12-02	975,12	533	1,87723	86	11,64605	4-16-01	1206,21	655	1,52564	177	5,64846		
1-12-03	887,24	619	1,61572	171	5,85519	4-16-02	870,08	638	1,56774	176	5,67853		
1-13-01	2471,03	701	1,42755	266	3,75963	4-16-03	583,99	573	1,74395	114	8,78400		
1-13-02	1147,13	735	1,36054	289	3,45541	4-16-04	333,35	584	1,71095	110	9,05780		
1-13-03	1262,68	630	1,58810	155	6,44661	4-17-01	1720,72	581	1,72078	100	9,97182		
1-13-04	725,29	633	1,57880	180	5,55985	4-21-06	269,90	1026	0,97443	496	2,01615		
1-13-05	253,67	608	1,64600	151	6,63501	4-21-07	150,40	770	1,29806	233	4,28717		
1-14-01	1082,64	615	1,62597	169	5,92719	4-21-08	451,94	770	1,29806	233	4,28717		
1-14-02	282,02	602	1,65987	135	7,42777	4-21-09	302,90	744	1,34348	207	4,83429		

ČHMÚ by bylo časově a finančně značně náročné. Proto byl otestován i modelový přístup, kdy pro výpočet charakterizačního faktoru $fwua_{sw}$ byly použity hydrologické charakteristiky povodí 3. řádu odvozené pomocí modelu BILAN. Podrobný postup stanovení hydrologických charakteristik uvádí článek z roku 2015 [8]. Základní charakteristiky vypočítané modelem BILAN a použité pro zpracování charakterizačního faktoru jsou údaje o srážkách a celkovém odtoku vztažené k příslušnému dílčímu povodí 3. řádu. Pro tyto charakteristiky byly spočítány hodnoty charakterizačního faktoru $fwua_p$ a $fwua_{sw}$ (tabulka 2). Za referenční hodnoty pro stanovení charakterizačních faktorů byla použita hodnota srážek 1000 mm/rok na plochu 1 m², tj. stejné hodnoty jako používají autoři testované metodiky [7]. Volba těchto referenčních podmínek umožní přímá srovnání s jinými studii využívajícími stejné „globální“ referenční podmínky.

Pro řešení větších povodí, skládajících se z několika hydrologických povodí 3. řádu, se vypočítá hodnota průměrného charakterizačního faktoru celého povodí \overline{fwua}_{sw} podle rovnice 6. Pro porovnání dosažených výsledků bylo vybráno 34 profilů s uveřejněnými hydrologickými údaji [9]. Z dostupných údajů ČHMÚ pak byla stanovena hodnota charakterizačního faktoru $fwua_{sw-CHMU}$ podle rovnice 5 a porovnána s vypočítaným charakterizačním faktorem $fwua_{sw}$ v případě složených povodí nebo $fwua_{sw}$.

$$fwua_{sw-CHMU} = \frac{Q_{A,ref}}{365 \times 86400 \times Q_A} \times A \quad (5)$$

kde $fwua_{sw-CHMU}$ je průměrný charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ stanovený na základě údajů ČHMÚ,
 Q_A průměrný průtok stanic ČHMÚ [m³/s],
 A plocha povodí [km²].

a model approach was also tested to calculate characterisation factor $fwua_{sw}$ using hydrological characteristics of third-order catchments derived by the BILAN model. Detailed procedures of hydrological characteristic determination is stated in a 2015 article [8]. Basic characteristics calculated using the BILAN model and used for processing the characterisation factor are the data on precipitation and total runoff related to the respective third-order sub-basin. For these characteristics, characterisation factor values $fwua_p$ and $fwua_{sw}$ were calculated (Table 2). As reference values for determining characterisation factors, a precipitation value of 1000 mm/year per area of 1 m² was used, i.e. the same values as the authors of the tested methodology used [7]. The choice of these reference values will allow direct comparisons with other studies using the same “global” reference values.

When dealing with larger catchments, consisting of several third-order hydrological catchments, the value of the average characterization factor of the entire catchment \overline{fwua}_{sw} is calculated according to equation 6. To compare the results obtained, 34 profiles with published hydrological data were selected [9]. The characterisation factor value $fwua_{sw-CHMU}$ from equation 5 was then determined from the available data of CHMI and compared with the calculated characterisation factor \overline{fwua}_{sw} in the case of a composite catchment, or $fwua_{sw}$.

where $fwua_{sw-CHMU}$ is the average characterisation factor of “water unavailability” determined from CHMI data,
 Q_A the average flow through a CHMI station [m³/s],
 A the catchment area [km²].

$$\overline{fwua}_{sw-CHMU} = \frac{\sum_l (fwua_{sw} \times Q_l)}{\sum_l Q_l} = \frac{\sum_l \left(\frac{Q_{A,ref}}{P_l \times A_{ref}} \times L_l \times P_l \right)}{\sum_l (L_l \times P_l)} = \frac{\sum_l (L_l \times P_{ref})}{\sum_l (L_l \times Q_{ref})} = \frac{\overline{A}_{p,l}}{\overline{A}_{ref}} \quad (6)$$

kde \overline{fwua}_{sw} je průměrný charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ povrchových vod,
 $fwua_{sw}$ charakterizační faktor „nedostupnosti vody“ povrchových vod v povodí l ,
 Q_l roční odtok z povodí l [m³],
 P_l roční odtoková výška z povodí l [m],
 L_l plocha povodí l [m²],
 P_{ref} roční srážky v referenčních podmínkách [m/rok].

where \overline{fwua}_{sw} is the average characterisation factor of “water unavailability” of surface water,
 $fwua_{sw}$ the characterisation factor of “water unavailability” of surface water in catchment l ,
 Q_l the annual runoff from catchment l [m³],
 P_l the annual runoff level from catchment l [m],
 L_l the catchment area l [m²],
 P_{ref} annual precipitation in reference conditions [m/year].

Výběr energetických provozů

Testování metody v podmínkách České republiky proběhlo na údajích o operační spotřebě vody ve vybraných energetických provozech České republiky. Pro každý energetický provoz byla analýzou povolení podle zákona č. 76/2002 Sb. (o integrované prevenci a omezení znečištění) identifikována dotčená povodí III. řádu, která tvoří povodí energetického provozu (viz tabulku 3). Pro každé povodí energetického provozu, které je tvořeno dvěma a více povodími III. řádu, pak byla stanovena „průměrná“ hodnota charakterizačního faktoru \overline{fwua}_{sw} podle rovnice 6.

Power plant selection

Testing the method in the Czech Republic was based on information on the operational water consumption of selected Czech power plants. By permit analysis under Act no. 76/2002 Coll. (Integrated Pollution Prevention and Control), the third-order catchments, which form a catchment of a power plant, were identified for each power plant (see Table 3). For each catchment of the power plant which is formed by two and more third-order catchments, an “average” characterisation factor value \overline{fwua}_{sw} was determined according to equation 6.

Tabulka 3. Vodní stopa energetických provozů (pouze proces generování energie v provozu bez upstream a downstream procesu)
 Table 3. Water scarcity footprint of Energy units (only power generation proces without downstream and upstream processes)

Energetický provoz (Power plant)	Systém chlazení (Cooling system)	Výroba energie brutto (Energy production)	Spotřeba vody (Water consum.)	Hydrologické povodí III. řádu (Catchment No.)	Char. faktor (Char. factor)	Vodní stopa (Water scarcity footprint)	
		[MWh/rok]	[m ³ /MWh]		$fwua_{sw}$	[m ³ H ₂ O _{ekv.} /rok]	[m ³ H ₂ O _{ekv.} /MWh]
Tep. Písek	Recirk.	155 836	0,372	1-08-03 až 1-08-01	3,48142	542 531	1,30
El. Opatovice	Prūt.	3514978	0,503	1-03-01 až 1-01-01	2,97966	10 473 434	1,50
El. Hodonín	Prūt.	607 782	0,424	4-13-02 až 4-10-01	4,17235	2 535 882	1,77
Tep. Olomouc	Prūt. + Suché	832 410	0,388	4-10-03	4,75354	3 956 894	1,84
Tep. Strakonice	Prūt.	365 548	0,625	1-08-02 a 1-08-01	2,98972	1 092 886	1,87
Tep. Liberec	Recirk.	280 130	0,992	2-04-07	1,93278	541 430	1,92
Tep. Kolín	Prūt.	415 099	0,616	1-04-01 až 1-01-01	3,51626	1 459 595	2,17
Tep. Vřesová (+PPC)	Recirk.	7 057 527	0,581	1-13-01	3,75963	26 533 713	2,18
El. Poříčí	Recirk.	1 098 995	0,93	1-01-02	2,66352	2 927 193	2,48
El. Dětmarovice	Recirk.	2 646 007	1,346	2-03-03	2,01615	5 334 741	2,71
El. Tisová	Recirk.	1 869 319	0,841	1-13-01	3,75963	7 027 954	3,16
Tep. Otrokovice	Recirk.	780 256	0,914	4-12-02 až 4-10-01	4,02356	3 139 406	3,68
Tep. Zlín	Recirk.	683 066	0,918	4-13-01	4,67239	3 191 553	4,29
Alpiq Kladno	Recirk.	2 188 569	1,011	1-12-02 až 1-01-01	4,55282	9 964 160	4,60
Energetika Třinec	Recirk.	2 166 807	2,622	2-03-03	2,01615	4 368 603	5,29
Tep. Č. Budějovice	Recirk.	1 024 075	1,175	1-06-02	4,68469	4 797 478	5,50
Tep. Dvůr Králové	Prūt.	154 163	2,399	1-01-01	2,42755	374 238	5,82
El. Tušimice II	Recirk.	4 021 132	1,674	1-13-02 a 1-13-01	3,65754	14 707 447	6,12
Tep. Trmice (+PPC)	Recirk.	1 439 117	1,411	1-14-01 až 1-01-01	4,56612	6 571 187	6,44
El. a tep. Komořany	Recirk.	1 520 382	1,106	1-14-01	5,92719	9 011 598	6,56
El. Pruněšov I a II	Recirk.	8 803 992	1,841	1-13-02 a 1-13-01	3,65754	32 200 943	6,73
El. Chvaletice	Recirk.	3 125 041	2,104	1-03-04 až 1-01-01	3,35140	10 473 271	7,05
El. Mělník I až III	Prūt. + Recirk.	7 637 173	1,602	1-12-03 až 1-01-01	4,57396	34 932 112	7,33
El. Temelín	Recirk.	13 295 602	1,979	1-06-03 až 1-06-01	3,78096	50 270 131	7,48
Tep. Ostrov	Recirk.	123 615	2,086	1-13-02 a 1-13-01	3,65754	452 127	7,63
Tep. Plzeň	Recirk.	1 576 252	1,402	1-10-01 a 1-10-04	5,64842	8 903 338	7,92
El. Ledvice 2 a 3	Recirk.	2 338 291	1,352	1-14-01	5,92719	13 859 503	8,01
Tep. Varnsdorf	Recirk.	74 440	2,156	2-04-08	3,78679	281 889	8,16
El. Počeradý	Recirk.	6 699 537	1,934	1-14-01 a 1-13-03 až 1-13-01	4,36004	29 210 269	8,43
Tep. Přerov	Recirk.	672 558	3,031	4-11-02 a 4-11-01	2,83699	1 908 040	8,60
El. Dukovany	Recirk.	14 426 350	2,079	1-16-01	5,64846	81 486 677	11,74
Tep. Planá n. Lužnicí	Recirk.	337 921	2,486	1-07-04 až 1-07-01	5,15168	1 740 860	12,81

Tabulka 4. Porovnání hodnot charakterizačních faktorů pro profily ČHMÚ a stanovených z hydrologických charakteristik profilů a z hydrologických charakteristik povodí III. řádu
 Table 4. Comparison of values of characterisation factor of Czech Hydromet. Institute profiles computed from characteristics of profiles and characteristics of catchment

Tok (River)	Stanice (Station)	„Dotčená“ povodí III. řádu („Affected“ catchments)	$fwua_{sw-CHMU}$	$fwua_{sw-CHP3}$	Rozdíl faktoru $fwua$ (Difference of $fwua$)	Rozdíl plochy povodí (Difference of catchment area)
Úslava	Koterov	1-10-05	6,568137	6,578385	-0,16 %	-3,09 %
Ploučnice	Benešov nad Ploučnicí	1-14-03	3,941965	3,851889	2,29 %	-3,20 %
Sázava	Zruč nad Sázavou	1-09-01	4,818125	4,941318	-2,56 %	-6,21 %
Ohře	Louny I.	1-13-01 až 1-13-03	4,230260	4,118502	2,64 %	1,99 %
Bečva	Dluhonice	4-11-02 a 4-11-01	2,919574	2,836989	2,83 %	-1,72 %
Malše	Roudné	1-16-02	4,827766	4,684694	2,96 %	-1,73 %
Morava	Olomouc-Nové Sady tok	4-10-01 až 4-10-03	3,992059	3,784396	5,20 %	-7,63 %
Opava	Děhylov	2-02-01 až 2-02-03	4,716079	4,973169	-5,45 %	-2,45 %
Vltava	České Budějovice	1-16-02 a 1-16-01	3,446637	3,639814	-5,60 %	0,22 %
Lužická Nisa	Hrádek nad Nisou	2-04-07	2,063779	1,932781	6,35 %	-6,09 %
Vltava	Březí-Kamenný Újezd	1-16-01	3,062730	3,257993	-6,38 %	-2,04 %
Otava	Katovice	1-08-01	2,514099	2,690126	-7,00 %	-13,67 %
Labe	Nymburk	1-04-05	4,183141	3,883723	7,16 %	-0,22 %
Otava	Písek	1-08-01 až 1-08-03	3,786591	3,481423	8,06 %	-2,79 %
Tichá Orlice	Čermná nad Orlicí	1-02-02	2,995150	3,254861	-8,67 %	-9,38 %
Olše	Věřňovice	2-03-03	2,214723	2,016148	8,97 %	-3,40 %
Odra	Svinov	2-01-01	4,061118	4,490377	-10,57 %	-0,15 %
Ostravice	Ostrava	2-03-01	2,080213	2,303008	-10,71 %	-0,76 %
Labe	Děčín	1-01-01 až 1-14-03	5,146080	4,556079	11,47 %	0,00 %
Svitava	Bílovice nad Svitavou	4-15-02	8,328877	7,356751	11,67 %	-3,16 %
Labe	Jaroměř	1-01-01 a 1-01-02	2,256742	2,521097	-11,71 %	-0,03 %
Labe	Ústí nad Labem	1-01-01 až 1-13-05	5,202176	4,542868	12,67 %	0,00 %
Svratka	Židlochovice	4-15-01 až 4-15-03	8,269998	7,208014	12,84 %	-4,60 %
Odra	Bohumín	2-01-01 až 2-03-02	3,554957	4,017024	-13,00 %	-1,22 %
Opava	Opava	2-02-01	4,593418	5,353521	-16,55 %	-1,73 %
Berounka	Beroun	1-10-01 až 1-11-04	7,101476	5,924886	16,57 %	-0,13 %
Úhlava	Štěnovice	1-10-03	4,923786	4,101719	16,70 %	-2,53 %
Sázava	Kácov	1-09-01 a 1-09-02	6,284836	5,106066	18,76 %	4,16 %
Berounka	Bílá Hora	1-10-01 až 1-10-04	6,401649	5,092866	20,44 %	-0,43 %
Metuje	Jaroměř	1-01-03	2,746833	3,329925	-21,23 %	-0,04 %
Jihlava	Ivančice	4-16-01 až 4-16-04	8,171308	6,368676	22,06 %	-11,70 %
Oslava	Oslavany	4-16-02	7,875908	5,678529	27,90 %	-0,95 %
Rokytná	Moravský Krumlov	4-16-03	12,919672	8,784002	32,01 %	-3,86 %
Bílina	Trmice	1-14-01	4,044422	5,927193	-46,55 %	-17,27 %
Želivka	Nesměřice	1-09-02	12,340132	5,331740	56,79 %	-0,80 %

Pro vyhodnocení vodní stopy energetických provozů byly použity údaje o výrobě elektrické energie a tepla ve vybraných energetických provozech, pro které byly k dispozici údaje o spotřebě vody na výrobu elektrické energie a tepla za období 2004–2013 (viz *tabulku 3*). Podrobná informace o způsobu zpracování dat je obsažena v článku z roku 2016 [10].

VÝSLEDKY

V první části řešení byly porovnány hodnoty spočtených charakterizačních faktorů pro hydrologická povodí 3. řádu s hodnotami spočtenými přímo z dat pro konkrétní profily ČHMÚ. Jak vyplývá z *tabulky 4*, tak u 16 ze 35 profilů (46 %) byly rozdíly mezi stanovenými charakterizačními faktory do ± 10 %. U dalších osmi profilů (23 %) se rozdíl hodnot faktorů pohybuje mezi ± 10 % až ± 15 %. Bohužel, ve čtyřech případech (11 %) je rozdíl vyšší než 25 %.

Cílem tohoto článku však není testování výsledků hydrologického modelu, ale popis možností aplikace charakterizačního faktoru v rámci LCA studií. Nezbyvá proto než upozornit budoucí zpracovatele studií LCA, že použití modelových výstupů v rámci komplexních hodnocení typu LCA je v obecné rovině možné (a někdy dokonce nezbytné), ale vždy je třeba provádět verifikaci a validaci jak používaných dat, tak dosažených výsledků. Pravděpodobně vysvětlení vysokých rozdílů u některých povodí je v nejistotách s užíváním vod, neboť modelované hodnoty odpovídají „přirozenému“ stavu, zatímco hodnoty ČHMÚ vycházejí z měřených hodnot, a tudíž jsou ovlivněny současným užíváním vod.

Druhá část řešení se zabývala stanovením vodní stopy samotného procesu produkce energie ve vybraných energetických provozech (viz *tabulku 3*). Potvrdily se očekávané výsledky, že vodní stopa energetických provozů s průtočným chlazením je obecně nižší než vodní stopa provozů s recirkulačním chlazením. Situace u obou jaderných elektráren pak již naznačuje smysl LCA. Ačkoliv je specifická spotřeba obou jaderných elektráren podobná (1,979, resp. 2,079), tak dopad výroby elektrické energie v obou elektrárnách je již výrazně odlišný (7,48, resp. $11,74 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{ekv.}}/\text{MWh}$). Zjednodušeně lze prohlásit, že na proces výroby 1 MWh energie v elektrárně Dukovany je potřeba $11,74 \text{ m}^3$ referenčního množství vody, které bylo stanoveno jako „průměrné celosvětové srážky“, zatímco v elektrárně Temelín pouze $7,48 \text{ m}^3$.

Je to dáno tím, že jaderná elektrárna Dukovany leží na méně vodném toku s menším povodím a nižší odtokovou výškou. Proto, ačkoliv její specifická spotřeba vody na výrobu 1 MWh energie činí jen 105 % specifické potřeby jaderné elektrárny Temelín, tak vodní stopa procesu produkce 1 MWh elektrické a tepelné energie je o 57,0 % vyšší než vodní stopa procesu produkce elektrické a tepelné energie v jaderné elektrárně Temelín. Je třeba si ale uvědomit, že tyto poměrové ukazatele platí pouze pro samotný dílčí proces výroby elektrické a tepelné energie v energetickém provozu. Vzhledem k tomu, že v rámci testování metody nebyla stanovena vodní stopa ostatních procesů v rámci životního cyklu (těžba primárních surovin, jejich úprava, doprava, nakládání s vyhořelým palivem, distribuce vyrobené energie atd.), nelze tyto stanovené poměry vztahovat k celému životnímu cyklu obou elektráren.

Vodní stopa testovaných provozů se pak odvíjí od množství produkované energie a je vyjádřena v $\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{ekv.}}/\text{rok}$. Takto získaná hodnota pak laicky řečeno představuje množství „průměrných celosvětových srážek“, které jsou „spotřebovány“ v energetickém provozu za rok. Je třeba upozornit, že se jedná pouze o jednu dílčí část vodní stopy, která je vztažena pouze k samotnému procesu výroby energie v elektrárně/teplárně, tj. není to hodnota vodní stopy celého životního cyklu produkce elektrické a tepelné energie v těchto provozech.

To evaluate the water footprint of power plants, the data on electricity and heat production in selected power plants were used, for which data were available on water consumption for electricity and heat production between 2004 and 2013 (see *Table 3*). Detailed information on the method of data processing can be found in a 2016 article [10].

RESULTS

In the first part of our analysis, the values of calculated characterisation factors for third-order catchments were compared with the values calculated directly from the data for specific profiles of CHMI. As indicated in *Table 4*, in 16 out of 35 profiles (46%) the differences between determined characterisation factors were up to ± 10 %. In other 8 profiles (23%), the difference of factor values ranges between ± 10 % and ± 15 %. Unfortunately, in four cases (11%) the difference is bigger than 25%.

However, the aim of this article is not testing the results of the hydrological model, but the description of possible applications of characterisation factor for assessment in the context of LCA studies. It can only be pointed out to future processors of LCA studies that using model outputs within the comprehensive evaluation of the LCA type is generally possible (and sometimes even necessary), but it is always vital to both verify and validate the data used and the results achieved. A probable explanation for high differences in some catchments lies in uncertainties with water use, because the modelled values correspond to the “natural” state, while the CHMI values are based on measured values and are therefore influenced by current water use.

The second part of our analysis dealt with the determination of the water footprint of selected power plants (see *Table 3*). The expected results were confirmed: the water footprint of power plants with once-through cooling is generally lower than the water footprint of operations with recirculation cooling. The situation in both nuclear power plants suggests the importance of LCA evaluation. Although the specific consumption of both nuclear power plants is similar (1.979 or 2.079), the impact of electricity production in both plants is significantly different (7.48 or $11.74 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{eq.}}/\text{MWh}$). Simply put, we can say that in the process of 1 MWh of power production in the Dukovany power plant, 11.74 m^3 of reference quantity of water is needed, which was determined as “global average precipitation”, while at the Temelín power plant it is only 7.48 m^3 .

This is due to the fact that the Dukovany nuclear power plant lies on less water flow with a smaller catchment and lower runoff level. Therefore, although its specific water consumption for production of 1 MWh of power is only 105% of Temelín’s specific consumption, the water footprint of the process of 1 MWh of electricity and heat production is about 57.0% higher than the water footprint of the process of electricity and heat production in the Temelín nuclear power plant. It is important to realize, however, that these ratios apply only to the electricity and heat production sub-process itself in a power plant. In regard to the fact that when testing the method, the water footprint of other processes within the life cycle was not determined (extraction of primary raw materials, their processing, transport, spent fuel management, distribution of produced power, etc.), these ratios cannot be related to the whole life cycle of both power plants.

The water footprint of the tested plants is then based on the amount of power produced and is expressed in $\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{eq.}}/\text{year}$. The value thus obtained is, in layman’s terms, the amount of “global average precipitation” which are “consumed” in power plants per year. Again, it should be noted that this is only a one sub-part of water footprint, which is related only to the process of energy production itself in a power / heat plant, i.e. it is not the value of the water footprint of the entire life cycle of electricity and heat production in these power plants.

DISKUSE

Testovaná metoda se ukázala jako snadno použitelná. Pro lokální studie LCA je možné jako referenční množství použít průměrné srážky v České republice namísto „globálních“ srážek. Použití průměrných srážek v České republice lze doporučit zejména pro aplikace s kratším časovým krokem, tj. např. pro řešení po měsících, kdy je možno jako referenční uvažovat reálné měsíční srážky, zatímco v případě „globálních“ srážek lze použít 1/12 z ročních globálních srážek.

Autoři metody také předpokládají, že veškerá voda je dostupná pro užití, což samozřejmě je pouze teoretický předpoklad. V reálných podmínkách není možno využít ani veškeré srážky, ani veškerý odtok z povodí. Z pohledu aplikačního využití není zásadní problém např. u povrchového odtoku odečíst „minimální zůstatkový průtok“ či jinak definovaný „ekologický průtok“. V případě podzemních vod a srážek však tato konstrukce již není tak jednoznačná. Navíc se tímto rozšířením ztrácí určitá elegance navrženého konceptu a nezávislost konceptu na subjektivním rozhodování, neboť rozhodnutí o tom, co „se bude odečítat“, je subjektivní rozhodnutí řešitele studie.

Z principu metody vyplývá, že metoda není úplně vhodná pro některé aplikace například typu rozhodování o dopadech na dostupnost lokálních vodních zdrojů v různých lokalitách. Neboť výsledky charakterizačního modelu mají jen nepřímou vazbu na skutečnou dostupnost vody v místě posuzování.

V prezentovaných údajích nejsou také zahrnuty ztráty vody výparem z nádrží, které jsou součástí vodního hospodářství jednotlivých elektráren. V případě jaderné elektrárny Temelín představuje ztráta výparem z nádrže Hněvkovice přibližně 7 % rozdílu mezi odběrem a vypouštěním pro jadernou elektrárnu Temelín. V případě jaderné elektrárny Dukovany tvoří výpar z VD Dalešice-Mohelno dokonce okolo 14 %. Dále nejsou v této testovací aplikaci uvažována rozdílná místa odběrů a vypouštění, které mohou hrát při aplikaci metody značnou roli, např. elektrárna Temelín odebírá vodu z povodí 1-06-03, ale vypouští odpadní vody do povodí 1-07-05, korektní výpočet vodní stopy by měl veškeré odběry pro elektrárnu Temelín v povodí 1-06-03 uvažovat jako ztráty a naopak vypouštění v povodí 1-07-05 jako zisk vody s rozdílnými hodnotami charakterizačního faktoru.

ZÁVĚR

Charakterizační model postavený na obnovitelnosti vodních zdrojů se ukázal jako snadno použitelný nástroj umožňující použít jak data získaná měřeními (či z nich odvozená), tak výsledky matematických modelů. Pro usnadnění aplikace metody v praxi byla připravena tabulka charakterizačních faktorů srážek a celkového odtoku pro jednotlivá povodí III. řádu. Testování ukázalo, že v případě vstupních dat z matematických modelů je důležitá validace a verifikace použitých dat, protože pro některá povodí jsou výsledky zatíženy chybou přesahující ±10–15 %. Konkrétní aplikace na 32 vybraných elektrárnách a teplárnách ukázala, že vodní stopa ve smyslu posuzování životního cyklu je nižší v provozech s průtočným chlazením oproti provozům s cirkulačním chlazením.

Testovaná metoda neřeší míru současného užívání vodních zdrojů a předpokládá, že veškerý odtok je dostupný uživatelům. Testovaná metoda také nijak neřeší problematiku degradace vod, vliv na ekosystémy a člověka. Pro tato posuzování životního cyklu je třeba použít jiné charakterizační metody. Výsledky zjištěné pomocí testované metody je možno označit pouze za vodní stopu nedostatku vody (Water scarcity footprint).

DISCUSSION

The tested method proved easy to use. For local LCA studies, it is possible to use average precipitation in the Czech Republic as a reference quantity instead of “global” precipitation. Using the average precipitation in the Czech Republic is recommended, especially for applications with a shorter time step, in monthly steps for example, when it is possible to consider real monthly precipitation as a reference, while in the case of “global” precipitation, 1/12 of the annual global precipitation can be used.

The authors of the method also assume that all water is available for use, which of course is only a theoretical assumption. In real conditions, it is not possible to use either all precipitation or the entire runoff from a catchment. From the perspective of application use, it is not a major problem, for example for surface runoff to subtract “minimal residual flow” or otherwise defined “ecological flow”. In the case of groundwater and precipitation, however, this construction is not so clear. Moreover, by such extension a certain elegance of the proposed concept and the independence of the concept on subjective decision-making is lost, since the decision about “what will be subtracted” is a subjective decision by the study investigator.

The principle of the method shows that the method is not entirely suitable for some applications, for example deciding on the impact on the availability of local water sources in different locations, since the results of the characterisation model are only linked indirectly to the actual water availability at the assessed location.

The data presented also do not include water loss by evaporation from reservoirs which are a part of water management of the individual power plants. In the case of Temelín nuclear power plant, the loss by evaporation from Hněvkovice reservoir is approximately 7% of the difference between withdrawal and discharge for the power plant. In the case of Dukovany nuclear power plant, evaporation from Dalešice - Mohelno reservoir is even around 14%. The different localisation of withdrawals and discharges was neglected for this testing purpose. It can play important role in real application of tested method. For example, nuclear power plant Temelín draws water from catchment 1-06-03 but discharges waste water to the catchment 1-07-05. These two catchments have the different hydrological condition and (of course) different value of characterization factor. In real study have to be withdrawals from catchment 1-06-03 calculated as losses and discharges to catchment 1-07-05 as gains with different values of characterization factor.

CONCLUSION

A characterization model based on the renewability of water sources has proved to be a readily usable tool, enabling the use both of data obtained by measuring (or derived from it) and the results of mathematical models. To facilitate the application of the method in practice, a table of characterisation factors of precipitation and total runoff for individual third-order catchments was prepared. The testing showed that in the case of the input data from mathematical models, validation and verification of this data is important since for some catchments the results have an error exceeding ±10–15 %. Specific applications in selected 32 power and heat plants showed that the water footprint in terms of life cycle assessment is lower in plants with once-through cooling as compared to plants with recirculation cooling.

The tested method does not address current use of water sources and assumes that the entire runoff is available to users. The tested method also does not address the issue of water degradation, the effect on ecosystems and on humans. For such life cycle impact assessment, it is necessary to use other characterisation methods. The results obtained using the tested method can be described only as water scarcity footprint.

Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu QJ1520322 *Postupy sestavení a ověření vodní stopy v souladu s mezinárodními standardy řešeného s finanční podporou Ministerstva zemědělství v rámci Programu zemědělského aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje Komplexní udržitelné systémy v zemědělství 2012–2018 „KUS“*. Charakteristiky povodí III. řádu spočítané modelem BILAN vznikly v rámci projektu *Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice, který je spolufinancován Evropskou unií – Evropským fondem pro regionální rozvoj, Státním fondem životního prostředí ČR a Ministerstvem životního prostředí ČR v rámci Operačního programu Životní prostředí*. Údaje o operativní spotřebě vody v tepelných elektrárnách a teplárnách byla připravena v rámci projektu TD020113 *Dopady socio-ekonomických změn ve společnosti na spotřebu vody řešeného s finanční podporou Technologické agentury České republiky*.

Autor

Ing. Libor Ansoerge

✉ libor_ansorge@vuv.cz

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

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Literatura

[1] HOEKSTRA, A.Y., CHAPAGAIN, A.K., ALDAYA, M.M., et. al. *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. London; Washington, DC: Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.

[2] ISO. *ISO 14046:2014 Water Footprint*. ICS:13.020.60;13.020. 10. Geneva: International Organization for Standardization. 2014.

[3] ISO. *ČSN EN ISO 14044:2006 Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice*. ICS:13.020.10;13.020. 60. Praha: Český normalizační institut. 2006.

[4] PFISTER, S., KOEHLER, A., and HELLWEG, S. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology* [online]. 2009, vol. 43, no. 11, p. 4098–4104 [vid. 6. květen 2015]. ISSN 0013-936X, 1520-5851. Dostupné z: doi:10.1021/es802423e

[5] KOUNINA, A., MARGNI, M., BAYART, J.B., et. al. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2012, vol. 18, no. 3, p. 707–721 [vid. 6. květen 2015]. ISSN 0948-3349, 1614-7502. doi:10.1007/s11367-012-0519-3

[6] HOEKSTRA, A.Y. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological Indicators* [online]. 2016, vol. 66, p. 564–573 [vid. 24. červenec 2016]. ISSN 1470-160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2016.02.026

[7] YANO, S., HANASAKI, N., ITSUBO, N., et. al. Water Scarcity Footprints by Considering the Differences in Water Sources. *Sustainability* [online]. 2015, vol. 7, no. 8, p. 9753–9772 [vid. 28. červenec 2016]. Dostupné z: doi:10.3390/su7089753

[8] BERAN, A. a HANEL, M. Definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území České republiky. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online]. 2015, roč. 57, č. 4–5, s. 23–26. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <http://www.vtei.cz/2015/08/definovani-zranitelnych-oblasti-z-hlediska-nedostatku-vody-na-uzemi-ceske-republiky/>

[9] ČHMÚ. *M-denní průtoky za období 1981-2010* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav. 2016. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opv/doc/qm.pdf>

[10] ANSORGE, L. a ZEMAN, M. Model of Water Needs for Energy Production. *Statistika*. 2016, vol. 96, no. 3, p. 5–16. ISSN 1804-8765 (Online) 0322-788x (Print).

Acknowledgements

The article was written within the project QJ1520322 *“Procedures for compilation and verification of a water footprint in accordance with international standards”* addressed with financial support from the Ministry of Agriculture (Program zemědělského aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje Komplexní udržitelné systémy v zemědělství 2012–2018 “KUS” / Programme of agricultural applied research and experimental development Complex sustainable systems in agriculture 2012–2018). Characteristics of the third-order catchments calculated by the BILAN model generated under the project *Strategy for protection against negative impacts of floods and erosion phenomena of nature-friendly measures in the Czech Republic, which is co-financed by the European Union – the European Regional Development Fund, the State Environmental Fund and the Czech Ministry of Environment under the Operational Programme Environment*. The data on the operational water consumption in thermal power plants and heat plants were prepared within the project TD020113 *“Impacts of socio-economic changes in society on water consumption”* addressed with financial support from the Technology Agency of the Czech Republic within the programme.