

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Fakulta humanitních studií
Sociální a kulturní ekologie



Vodní stopa.

Výpočet vodní stopy pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat v České republice

Diplomová práce

Bc. Lucie Landová

Vedoucí práce: PaedDr. Tomáš Hák, Ph.D.

PRAHA 2011

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a v seznamu literatury a pramenů uvedla veškeré informační zdroje, které jsem použila.

V Praze dne 14. 9. 2011

Vlastnoruční podpis:

Poděkování:

Za odborné konzultace, vedení, hodnotné rady a připomínky při vypracování diplomové práce bych ráda poděkovala zejména PaedDr. Tomáši Hákoví, Ph.D. Za podporu během celého studia děkuji PhDr. Ivanu Ryndovi. Za revizi textu a pomoc s grafickými úpravami patří mé díky Ing. Michalu Strejčkovi. A samozřejmě děkuji celé své rodině za její podporu a trpělivost během mých studií.

Abstrakt:

Sladká voda je zdrojem obnovitelným, ale její celkové množství je omezené. Po celém světě již nyní můžeme najít mnoho známek toho, že naše současná spotřeba vody není udržitelná. Mezi nejzřetelnější ukazatele patří drancování rezervoárů podzemní vody, narušení režimu vodních toků či zhoršující se úroveň znečištění. Abychom uspokojili rostoucí poptávku po potravinách, vodě a spotřebních statcích a přitom mohli chránit ekosystémy tak, aby byly nadále schopny poskytovat své ekosystémové služby, potřebujeme najít nový způsob nakládání s vodními zdroji. Až do nedávné doby se příliš nebral ohled na to, že objem vody potřebný k výrobě finálního spotřebního statku je velmi silně ovlivňován způsobem organizace výroby, jejími charakteristikami a dodavatelským řetězcem. Odhalení skrytých vazeb, které stojí mezi naší spotřebou a užitím vody, může být základem pro vytvoření nových způsobů a strategií regulace využívání vodních zdrojů. V této diplomové práci se proto zabýváme představením indikátoru, který zkoumá nejen přímé užití vody výrobcí či spotřebiteli, ale který se zaměřuje rovněž na nepřímou spotřebu vody – je to indikátor *vodní stopy*. Jelikož má v celosvětovém měřítku největší spotřebu vody zemědělská výroba, zvolili jsme si pro výpočet vodní stopy v podmínkách České republiky právě zemědělské plodiny. Díky výsledkům našeho výpočtu jsme mohli zhodnotit, jaká je vodní stopa plodin pěstovaných v České republice, která se řadí mezi oblasti s mírným vodním stresem, a jak se na ni můžeme dívat v mezinárodních souvislostech.

Abstract:

Fresh water is a renewable resource but it is also finite. Around the world, there are now numerous signs that human water use exceeds sustainable levels. Groundwater depletion, low or nonexistent river flows, and worsening pollution levels are among the more obvious indicators of water stress. Satisfying the increased demands for food, water, and material goods of a growing population while at the same time protecting the ecological services provided by natural water ecosystems requires new approaches to using and managing fresh water. There has been little attention to the fact that the organization and characteristics of a production and supply chain does actually strongly influence the volumes of water consumption and pollution that can be associated with a final consumer product. Uncovering hidden link between consumption and water use can form the basis for the formulation of new strategies of water governance. That is why in this diploma thesis we focus on introducing the indicator of freshwater use that looks not only at direct water use of a consumer or producer, but also at the indirect water use – *water footprint*. At a global scale, most of the water use occurs in agricultural production. That is the reason why we have chosen water-intensive goods like crops to show how water footprint accounting can work in conditions of the Czech Republic. Concerning the results we could have discussed the water footprint of crop production in water stress region like the Czech Republic in the context of the global situation.

1. ÚVOD	1
1.1. Hlavní problematické oblasti hrozící vodní krize	2
1.1.1. Vodní a potravinová bezpečnost.....	3
1.1.2. Zdraví sladkovodních ekosystémů a zachování jejich ekologických funkcí	4
1.1.3. Regionální konflikty a politická nestabilita.....	5
1.2. Řešení vodní krize a role vhodných indikátorů	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1. Koncept vodní stopy	8
2.1.1. Virtuální voda.....	9
2.1.2. Vodní stopa	9
2.1.3. Vymezení účelu a rozsahu výpočtu vodní stopy.....	11
2.2. Výpočet vodní stopy	12
2.2.1. Vodní stopa procesního kroku.....	13
2.2.1.1. Modrá vodní stopa	14
2.2.1.2. Zelená vodní stopa	15
2.2.1.3. Šedá vodní stopa	16
2.2.2. Vodní stopa výrobku.....	18
2.2.2.1. Součet procesních kroků.....	19
2.2.2.2. Přístup postupné akumulace	19
2.2.3. Vodní stopa spotřebitele a skupiny spotřebitelů	20
2.2.3.1. Přístup postupné akumulace	21
2.2.4. Vodní stopa v rámci státu.....	22
2.2.5. Vodní stopa národní spotřeby.....	23
2.2.5.1. Přístup „top-down“	23
2.2.5.2. Přístup „bottom-up“	24
2.2.5.3. Národní vodní soběstačnost a závislost na importu virtuální vody	25
2.2.6. Vodní stopa podniku.....	26
2.3. Hodnocení udržitelnosti pomocí indikátoru vodní stopy	26
2.3.1. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na místní úrovni.....	27
2.3.2. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na úrovni povodí	27
2.3.3. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na globální úrovni.....	28
2.3.4. Environmentální hledisko	28
2.3.5. Sociální hledisko	32
2.3.6. Ekonomické hledisko.....	32
2.4. Spektrum odpovědí na vodní stopu	34
2.4.1. Spotřebitelé	35

2.4.2.	Podniky	35
2.4.3.	Investoři	36
2.4.4.	Vládní politika.....	36
2.5.	Výpočet modré, zelené a šedé vodní stopy zemědělské plodiny	37
2.6.	Evapotranspirace.....	39
2.6.1.	Klimatické podmínky	39
2.6.2.	Charakteristiky plodiny.....	40
2.6.3.	Zemědělské postupy a environmentální faktory (vlastnosti půdy)	42
3.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
3.1.	Předmět a cíle výzkumu.....	44
3.2.	Metodika práce	46
3.2.1.	Výpočet zelené a modré vody pomocí počítačového modelu CROPWAT	46
3.2.1.1.	Penman-Monteithova rovnice	46
3.2.1.2.	Modul „nároky plodiny na vodu“	48
3.2.1.3.	Modul „zavlažovací plán“	50
3.2.2.	Datové zdroje nezbytné pro kalkulaci vodní stopy procesu pěstování zemědělských plodin.....	51
3.2.2.1.	Klimatické údaje	52
3.2.2.2.	Parametry plodiny	53
3.2.2.3.	Zemědělské výnosy	53
3.2.2.4.	Půda.....	53
3.2.2.5.	Použití hnojiv	54
3.2.2.6.	Použití pesticidů.....	54
3.2.2.7.	Podíl vyluhování	54
3.2.2.8.	Místní standardy kvality vody.....	54
3.3.	Výpočet vodní stopy procesu pěstování zemědělských plodin: Příklad výpočtu pro pšenici, kukuřici, cukrovou řepu a rajčata pěstované v České republice	55
3.3.1.	Datová základna nezbytná pro výpočet modré, zelené a šedé vodní stopy – konkrétní databáze a zdroje dat pro Českou republiku.....	55
3.3.2.	Výpočet zelené a modré vody v modulu „nároky plodiny na vodu“	57
3.3.2.1.	Zelená a modrá vodní stopa pšenice v modulu „nároky plodiny na vodu“	59
3.3.2.2.	Zelená a modrá vodní stopa kukuřice v modulu „nároky plodiny na vodu“	64
3.3.2.3.	Zelená a modrá vodní stopa cukrové řepy v modulu „nároky plodiny na vodu“	65
3.3.2.4.	Zelená a modrá vodní stopa rajčat v modulu „nároky plodiny na vodu“	66
3.3.3.	Výpočet zelené a modré vody v modulu „zavlažovací plán“	67
3.3.3.1.	Zelená a modrá vodní stopa pšenice v modulu „zavlažovací plán“	69
3.3.3.2.	Zelená a modrá vodní stopa kukuřice v modulu „zavlažovací plán“	70
3.3.3.3.	Zelená a modrá vodní stopa cukrové řepy v modulu „zavlažovací plán“	71

3.3.3.4.	Zelená a modrá vodní stopa rajčat v modulu „zavlažovací plán“	72
3.3.4.	Porovnání zelené a modré vodní stopy vybraných zemědělských plodin vypočítaných v obou modulech programu CROPWAT 8.0.....	72
3.3.5.	Výpočet šedé vodní stopy	74
3.4.	Celková vodní stopa vybraných zemědělských plodin a její zasazení do mezinárodního kontextu	76
3.5.	Zhodnocení tří komponentů celkové vodní stopy zkoumaných zemědělských plodin.....	83
4.	ZÁVĚR.....	86
5.	BIBLIOGRAFIE.....	89
6.	SLOVNÍK ZÁKLADNÍCH POJMŮ	96
7.	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

1. ÚVOD

Voda je základní složkou životního prostředí a rovněž jedním z nejdůležitějších přírodních zdrojů. A ačkoliv je sladká voda přírodním zdrojem obnovitelným, její množství, které máme na naší planetě k dispozici, je omezené. Lidé byli na vodě a jejích službách od nepaměti závislí. Voda nám totiž neslouží jen jako přírodní zdroj nezbytný k produkci potravin a dalších statků a služeb. Vodní ekosystémy a prvky hydrosféry (moře, oceány, řeky a jezera) mají tu nejzákladnější podpůrnou funkci – díky globálnímu hydrologickému cyklu, který zajišťuje neustálý oběh vody a vytváří prostředí pro koloběh živin, umožňují existenci a fungování široké škály ekosystémů v celé jejich různorodosti. A rovněž jejich regulační funkce je významná nejen pro nás, ale též pro ekosystémy a jejich zdraví, fungování a rozmanitost – ovlivňují velikost a časové rozložení srážek a záplav, pomáhají asimilovat odpady nejrůznějšího typu a v neposlední řadě též stabilizovat klima¹.

V posledních letech se zejména v určitých částech světa setkáváme s rostoucí a stále zřetelnější vzácností vody. Obě její základní role – tedy za prvé role vody jako prvotní podmínky existence života (podpůrná a regulační funkce) a za druhé její role ekonomického statku – se stále častěji dostávají vzájemně do konfliktu. V mnohých oblastech využívá zejména zemědělský sektor tolik vody, že narušuje zdraví nejen vodních ekosystémů a života v nich, ale též těch ekosystémů, jež jsou s jejich hydrologickým režimem provázány (Postel, Daily et al., 1996: 787). Pakliže budeme předpokládat, že lidská populace v příštích desetiletích stále poroste, stane se pravděpodobně uspokojení poptávky po vodních zdrojích společně s ochranou jejich ekologických funkcí klíčovou otázkou jednadvacátého století.

V globálním hydrologickém cyklu je ročně k dispozici ve formě tzv. stabilního ročního odtoku asi 40 000 km³ sladké vody, tedy několikrát více, než kolik si jí přivlastňuje současná, téměř sedmimiliardová populace. Většina z tohoto množství však není pro lidskou potřebu dostupná – z množství, které koloběhem vody za rok projde, máme možnost kontrolovat zhruba 31%, jelikož největší podíl odteče z pevniny v podobě přívalových vod. S lepšími technologiemi bychom snad mohli být během 20-30 příštích let schopni získat k dispozici až o 10% vody navíc, populace by však měla tou dobou vzrůst o

¹ Stabilizace uhlíkového cyklu a disipace (distribuce) sluneční energie

30-35% (Postel, 2000: 941). I kdyby se díky technologickému pokroku a stavbě přehrad lidstvu podařilo přivlastnit si ještě větší podíl stabilního ročního odtoku globálního hydrologického cyklu, byly by nevyhnutelně narušeny služby vodních ekosystémů, zdecimovány populace ryb a pravděpodobně by došlo k řetězové reakci narušení ostatních ekosystémových služeb a poklesu biodiverzity (Naiman, Magnusson et al., 1995).

Důkazů o tom, že v některých regionech lidé překročili hranice udržitelného využívání vodních zdrojů, můžeme najít mnoho již dnes. Nejzřetelnějším ukazatelem je permanentní přetěžování zdrojů podzemní vody, zejména v okolí měst a v zemědělských oblastech. S tímto problémem se potýká například Čína (Liu and Orr, 2010), Kalifornie nebo severní Afrika (Postel, 1999). Indie devastuje své podzemní zdroje vody v zemědělských oblastech, aby uspokojila vysoké nároky na zavlažování (Postel, 2000). Ale též v Evropě dochází k ohrožení vodních ekosystémů vlivem zemědělské produkce – typickým příkladem je Španělsko (Aldaya, Martínez-Santos et al., 2010). Globální krize vodních zdrojů však neplní titulky novin – stejně jako hladomor je momentálně spíše krizí rozvojových států a i zde se dotýká především obyvatel chudinských čtvrtí. Přesto má v těchto místech nedostatečný přístup ke zdravotně nezávadné vodě a neexistující kanalizační systém na svědomí více lidských životů, než mnohá válka².

1.1. HLAVNÍ PROBLEMATICKÉ OBLASTI HROZÍCÍ VODNÍ KRIZE

Jelikož je růst populace a tedy i jejích nároků na dostupnost vody v příštích desetiletích nevyhnutelný, budeme muset v souvislosti s rostoucím tlakem na vodní zdroje čelit třem hlavním problémům a výzvám: základní otázkou bude zajištění bezpečných dodávek pitné vody a potravin, potýkat se budeme s nutností zachovat za daných podmínek zdravé vodní ekosystémy a v neposlední řadě musíme počítat s nebezpečím politických půtek o přístup ke zdrojům vody z mezinárodních povodí (Postel, 2000).

² Ročně doplatí na špatnou kvalitu vody asi 1,8 milionu dětí, které podlehnou nejrůznějším infekcím a střevním onemocněním (UNDP 2006:12).

1.1.1. Vodní a potravinová bezpečnost

Zemědělská produkce potravin je oblastí, která je na zdroje vody extrémně náročná – spotřeba vody zemědělského sektoru tvoří plných 86% celkové vodní stopy³ lidstva (Hoekstra and Chapagain, 2008: 7). Kupříkladu na produkci jednoho kilogramu obilí potřebujeme jednu až dvě tuny vody (Hoekstra and Hung, 2005: 46). Přibližně 40% světové produkce potravin pochází ze 17% zemědělské půdy, která je zavlažovaná (Postel, 2000: 942). A předpokládá se, že naše závislost na produkci potravin ze závlahového zemědělství v budoucnu poroste, jelikož možnosti zvyšování produkce v zemědělských oblastech spoléhajících se pouze na srážkovou vodu jsou omezené.

Až do poměrně nedávné doby zemědělství příliš nebralo v potaz omezené množství vodních zdrojů a na mnoha místech docházelo k jejich drancování – důsledky však na sebe nechaly chvíli čekat. Díky tomu byly odhady možností budoucího zásobování stále rostoucí lidské populace optimistické. Dnes jsme ale svědky toho, že se oblasti vodního stresu – tedy oblasti, kde je na hlavu k dispozici méně než 1700 m³ vody z obnovujících se zdrojů – neustále rozšiřují. Zároveň (a to hlavně) jsou to však většinou oblasti s nejvyšším populačním růstem. Do roku 2025 by se populace žijící v těchto regionech měla oproti roku 1998 zvýšit více než šestkrát – na téměř 3 miliardy lidí (Postel, 2000: 942). Přitom již dnes jsou tyto státy dovozci virtuální vody, jelikož samy nemají dostatečné množství vodních zdrojů k zabezpečení spotřeby vlastních obyvatel. Vedle zvýšené poptávky po dovozu virtuální vody bude pravděpodobně problémem těchto států neuspokojivá finanční situace, jelikož se ve většině případů jedná o chudé rozvojové státy Afriky či jižní Asie. To souvisí s další komplikací – nedostatek vody zde není pocíťován všemi. Zejména rozvojové státy totiž trpí neustále se zvětšující propastí mezi bohatými a chudými. Například bohatí indiští velkofarmáři mohou zavlažovat svá pole bez omezení, zatímco chudí rolníci musí spoléhat na omezené dešťové srážky (UNDP, 2006: 10).

Rovněž vodní spotřeba měst se neustále zvyšuje. Jelikož některé odhady mluví o tom, že mezi lety 2009 a 2050 vzroste světová populace žijící ve městech tak, že bude čítat zhruba 6,3 miliard lidí (UN, 2010: 1) budou města hned po zemědělství druhým nejvýznamnějším spotřebitelem vody. K problematice optimální alokace vodních zdrojů mezi poptávkou zemědělské produkce a měst se přidává ještě otázka rovného přístupu

³ Vodní stopě se budeme věnovat dále – prozatím postačí, budeme-li vědět, že je to indikátor využití sladké vody a svým konceptem se podobá ekologické stopě.

městských obyvatel k pitné vodě – již nyní totiž nemá více než miliarda obyvatel rozvojových zemí dostatečný přístup k vodě a více než dvě a půl miliardy lidí postrádají základní hygienická zařízení (UNDP, 2006: 10).. Přístup k čisté vodě, čištění odpadních vod a zavádění kanalizace a základních hygienických zařízení je přitom jednou ze základních podmínek lidského pokroku – i toho udržitelného. Podle UNDP (UNDP, 2006: 10) je dokonce hrozící globální vodní krize zakořeněna právě zde, v chudobě, v nerovném přístupu k vodním zdrojům a v nezájmu těch, kteří v rukou třímají politickou moc i lepší technologie. Pro zajištění vodní bezpečnosti by se tedy mělo stát prioritou zajištění spolehlivého přístupu k dostatečně bezpečné vodě za dostupnou cenu, samozřejmě s ohledem na zachování fungujících ekosystémů, které vodu poskytují a které na ní závisí. Nerovná práva a příležitosti v přístupu k vodě totiž porušují základní principy sociální spravedlnosti: musí-li například někdo (a v dotčených státech to jsou většinou ženy) trávit hodiny denně sháněním vody, nebo trpí-li někdo permanentními zdravotními obtížemi způsobenými špatnou kvalitou vody, jsou omezena jeho občanská práva, jelikož nemá příležitost jich efektivně využívat. Je tím narušeno i jeho právo na rovnost příležitostí, neboť nemusí mít díky nutnosti obstarávat vodu možnost vzdělávat se. Všichni občané by též měli mít přístup k základním zdrojům, jež jim zabezpečí důstojný život. Toto právo by mělo zahrnovat též možnost využívat alespoň 20 litrů čisté vody na osobu a den.

1.1.2. Zdraví sladkovodních ekosystémů a zachování jejich ekologických funkcí

Od poloviny dvacátého století se poptávka po vodě trojnásobně zvýšila – nejen díky růstu populace a vyšším nárokům na zemědělskou produkci, ale také díky rostoucímu odběru vody městským obyvatelstvem, zavádění kanalizace, ochraně před záplavami a stavbě stále populárnějších vodních elektráren. Aby mohly být postupně rostoucí nároky na vodu plně uspokojeny, začaly se stavět přehrady, měnit toky řek a vrtat studny v dříve naprosto nebývalém rozsahu. Došlo k tomu však na úkor základních ekologických funkcí řek a vodních ekosystémů, které byly silně narušeny. A ačkoliv tržně jsou ekosystémové služby neocenené, jejich skutečná hodnota pro podporu života na Zemi je zcela zásadní.

Přehrady, hráze a ochranné násypy ničí vodní habitaty a narušují ekologické funkce vodních těles. Nejen že ovlivňují režim vodních toků, ale infrastruktura budovaná na tocích často také zvyšuje teplotu vody, dochází ke snížení obsahu kyslíku ve vodě a naopak k

nárůstu množství živin a jiných znečišťujících látek apod. (Postel, 2000: 943). Všechny tyto změny nepříznivě ovlivňují také ekosystémy, které jsou s narušeným vodním tělesem provázány – a to nejen ekosystémy vodní, jako například mořské pobřežní ekosystémy trpící zejména acidifikací a eutrofizací, ale též suchozemské ekosystémy, které na režimu vodního tělesa závisí⁴. Ztráta přirozených habitatů a jejich znečištění jsou hlavními důvody, proč dochází ke snižování biodiverzity – například plných 61% všech známých druhů obojživelníků je ohroženo právě ztrátou habitatu, 19% pak znečištěním svého životního prostředí. Ohroženo je rovněž necelých 28% všech druhů mořských ptáků, 35% mořských savců⁵ a 27% všech druhů korálů (Vié, Hilton-Taylor et al., 2009). Zvláště biodiverzita sladkovodních ekosystémů je však kriticky ohrožena – počet druhů sladkovodních živočichů, kteří se ocitli na *Červeném seznamu ohrožených druhů IUCN*, stoupl během let 2000 – 2008 o 4000, tedy ze zhruba 2000 druhů v roce 2000 na více než 6000 v roce 2008 (Vié, Hilton-Taylor et al., 2009: 46).

1.1.3. Regionální konflikty a politická nestabilita

Třetím, nikoli nejméně podstatným problémem, který se může objevit při růstu vzácnosti sladkovodních zdrojů, jsou regionální konflikty a politická nestabilita. Přibližně 260 světových říčních toků protéká dvěma a více státy (Postel, 2000: 943). A mnoho zemí je na vodě, která přitéká z teritoria jiného státu, závislá. V případě většiny těchto povodí nejsou mezi jednotlivými zainteresovanými státy uzavřeny žádné mezinárodní dohody, které by upravovaly přístup zúčastněných stran k tomuto vodnímu zdroji. Pokud bychom tedy předpokládali, že populace a nároky na vodní zdroje budou narůstat, museli bychom počítat i s možností vzniku nejrůznějších konfliktů v těchto dotčených oblastech. Na několika místech světa už dokonce panují neshody o přístupu k vodním zdrojům nyní. To se týká například Aralského jezera a jeho okolí – neuvážené zemědělství v oblastech převážně pouštního charakteru, které bylo zaměřené na pěstování plodin náročných na přísun vláhy (bavlník, pšenice, rýže), vedlo k zásadnímu poklesu hladiny jezera. Znečištění vody a půdy a s ním související nedostatek pitné vody i vody vhodné k zavlažování zde má závažné důsledky pro desítky milionů obyvatel Střední Asie – povodí dvou hlavních

⁴ Vážně ohroženy jsou zejména mokřady, lužní lesy, mangrovové porosty atd., nicméně narušíme-li negativně režim povodí, můžeme ohrozit též funkce a biodiverzitu klasických suchozemských ekosystémů.

⁵ Ti jsou ohroženi nejen ztrátou habitatů a jejich znečištěním, ale též nedostatkem potravy souvisejícím s nadměrným rybolovem, hlukovým znečištěním vojenských a seizmických sonarů a lovem.

přítoků Aralského jezera (Amudarji a Syrdarji) totiž zasahuje na území Kazachstánu, Tádžikistánu, Afghánistánu, Kyrgyzstánu, Turkmenistánu, Uzbekistánu a Íránu (Micklin, 2010). Všechny jmenované státy mají nízkou hustotu zalidnění, přičemž více než polovina jejich obyvatel žije ve vesnicích. Jejich státní ekonomiky jsou silně závislé na zemědělství, například v Kyrgyzstánu tvoří příjmy ze zemědělství 39% HDP, v Uzbekistánu 35% a v Turkmenistánu 25% (Píšková, 2010: 150). Zemědělství je bohužel ve velké míře (v Turkmenistánu dokonce stoprocentně) podmíněno zavlažováním. Přístup k vodě má tedy strategickou důležitost. Snahy o řešení zde nabývají mnoha podob – od politických jednání až po výhrůžky ozbrojeným aktem mezi zainteresovanými státy. K problémům dochází i v povodí Jordánu, z něž Izrael odčerpává vodu na úkor okolních arabských států. Vodní zdroje povodí Tigridu a Eufratu jsou příčinou politických šarvátek mezi Tureckem, Sýrií a Irákem. Prioritou v řešení těchto sporů bude nalézt takovou strategii nakládání se sporným vodním zdrojem, která by přinesla rovný užitek všem zúčastněným státům a neměla pouze jednoho vítěze.

1.2. ŘEŠENÍ VODNÍ KRIZE A ROLE VHODNÝCH INDIKÁTORŮ

Lidstvo je závislé na ekosystémových službách a klade na ně stále větší nároky, které se budou v budoucnu společně s rostoucí populací pravděpodobně zvyšovat. Zároveň však současně díky svému nešetrnému zacházení snižuje schopnost mnohých těchto ekosystémů jejich služby poskytovat. Jak rostou nároky lidské populace na stále větší a větší přísun vodních zdrojů pro uspokojení naší spotřeby, začínají si lidé a ekosystémy o tyto zdroje konkurovat. Ačkoli globální hydrologický cyklus obsahuje několikrát více sladké vody, než kolik si jí lidé v současnosti přivlastňují, na mnoha místech dochází k nešetrnému využívání zdrojů povrchové a podzemní vody, které ovlivňuje fungování nejen vodních ekosystémů, ale též ekosystémů s danými vodními tělesy propojených. Zemědělství a průmysl rovněž vypouštějí do půdy i přímo do vodních rezervoárů množství nebezpečných znečišťujících látek. Veškeré tyto problémy volají po analýze našeho zacházení s vodou.

Abychom mohli správně zhodnotit veškeré důsledky naší spotřeby vody, nestačí nám klasické ukazatele, jako je „spotřeba vody“ (l/os/den) nebo „odběr

podzemních/povrchových vod“ (m³). Jak jsme již zmínili, voda je obnovitelný zdroj – část odebrané vody se opět navrátí do rezervoáru, z něž byla odebrána. Proto nám takový indikátor nepodá žádoucí informace. Budeme potřebovat nový ukazatel, který nám podá mnohem komplexnější informace a s jehož pomocí budeme moci identifikovat hlavní problematické oblasti, které jsou důsledkem naší vysoké vodní spotřeby. Takový ukazatel, který se bude zabývat pouze vodou, která se již do stejného povodí nevrátí, případně se vrátí v takovém časovém horizontu, že nebude dostupná k uspokojení společenské poptávky a k podpoře fungujících ekosystémů. Ukazatel, který bude brát v potaz nejen nerovnoměrnost geografické distribuce vodních zdrojů, ale též jejich nerovnoměrnou dostupnost v čase. Ukazatel, který v co nejširší míře zohlední lokální podmínky (přírodní prostředí, klimatické podmínky, míru vodního stresu, ale též společenskou situaci či tradiční výrobní postupy) a neopomene ani zhodnotit úroveň znečištění vodních zdrojů. Potřebujeme indikátor, jenž nám pomůže identifikovat kritická a citlivá místa naší spotřeby vody, která vedou k negativním a mnohdy až fatálním dopadům nejen na společnost, ale též na ekosystémy a jejich funkce. Pak teprve budeme moci zformulovat efektivní politické a společenské strategie, které povedou k šetrnějšímu, udržitelnému využívání vodních zdrojů – a to i v podmínkách pokračujícího populačního růstu a zvyšování životní úrovně. Takovým indikátorem je právě „*vodní stopa*“.

2. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části se podrobně seznámíme s indikátorem vodní stopy a s konceptem virtuální vody, který stojí v jeho základu. Ukážeme si, jak se liší tři základní složky virtuální vody – modrá, zelená a šedá. Rozdělíme si jednotlivé oblasti, pro něž je možné vodní stopu použít, a v neposlední řadě se seznámíme se základními způsoby jejího výpočtu.

Indikátor vodní stopy nám neslouží pouze k tomu, abychom mohli naši spotřebu vodních zdrojů označit číslem, umístit kamsi na pomyslnou přímku „udržitelné – neudržitelné“ a porovnávat s ostatními státy. Díky rozdělení vodní stopy na modrou, zelenou a šedou můžeme identifikovat „kritická místa vodní stopy“, tedy kritické oblasti, kde vlivem neuvážené spotřeby konkrétního typu vody dochází k nežádoucím vlivům na životní prostředí, společnost či ekonomiku. Srozumitelné, přímé a komplexní hodnocení dopadů vodní stopy je jednou z hlavních výhod tohoto ukazatele, proto se budeme zabývat nejen jím, ale navrhne rovněž základní způsoby, jak na jeho výsledky reagovat.

Jelikož se v praktické části diplomové práce budeme zabývat výpočtem vodní stopy vybraných zemědělských komodit v podmínkách České republiky, je na místě, abychom se v části teoretické seznámili s touto problematikou podrobněji a konkrétněji. Zaměříme se tedy detailně na postup výpočtu vodní stopy procesu pěstování plodin. Nebudeme moci opomenout přiblížit si pojem „evapotranspirace“ – ta je totiž v tomto případě základním procesem ztráty vody.

2.1. KONCEPT VODNÍ STOPY

Koncept vodní stopy byl poprvé představen na *Mezinárodním setkání odborníků o obchodu s virtuální vodou*, které se konalo v roce 2002 v nizozemském Delftu (Liu and Orr, 2010: 73). Autorem vodní stopy, v jejímž základu stojí právě koncept „virtuální vody“ (Allan, 1993), je Arjen Y. Hoekstra. Indikátor vodní stopy se prosadil poměrně rychle po svém představení, zejména díky tomu, že je to účinný nástroj pro obhajování udržitelné vodní politiky a je snadno srozumitelný pro neobornou veřejnost.

2.1.1. Virtuální voda

„*Virtuální voda*“ je termín, jenž byl zaveden J. A. Allanem již v roce 1993. Allana na myšlenku konceptu virtuální vody přivedl Gideon Fishelston, který spolu s týmem izraelských vědců na sklonku 80. let poukázal na nesmyslnost exportování plodin náročných na vodu z Izraele, který se permanentně potýká s nedostatkem sladkovodních zdrojů (WWC, 2004).

Virtuální voda je definována jako objem vody, který byl potřebný k produkci určitého statku (služby, výrobku či zemědělské komodity), a to během celého výrobního procesu (Allan, 1993; Allan, 1998). Obsah virtuální vody v produktu je ovlivňován místem výroby, jelikož odráží místní podmínky a výrobní postupy. Termín „*virtuální*“ voda odkazuje na skutečnost, že většina vody, jež byla na produkci výrobku spotřebována, není v samotném výrobku fyzicky obsažena. Chceme-li tedy zjistit skutečné množství vody, která byla na produkci statku či služby využita, musíme sledovat veškeré procesy, které za jeho výrobou stojí, a to v souvislostech konkrétního místa, kde probíhaly.

Koncept virtuální vody pracuje s předpokladem, že některé světové oblasti mají dostatečné zásoby sladké vody, zatímco jiné mají sladkovodní zdroje omezené. Aby byla alokace sladkovodních zdrojů z globálního hlediska optimální, měly by se státy s omezenými vodními zdroji přeorientovat na vývoz produktů, které nejsou náročné na vodu, a naopak dovážet výrobky, jejichž produkce spotřebovává velké množství sladké vody. Měly by se tedy zaměřit na „*dovoz virtuální vody*“ (Hoekstra and Hung, 2002: 9). Státy, které se nepotýkají s vodním stresem, by pak mohly využít své komparativní výhody a exportovat produkty, jejichž výroba je náročná na vodu. Díváme-li se na problematiku mezinárodního obchodu takto z hlediska obsahu virtuální vody v obchodovaných komoditách, mluvíme o „*obchodu s virtuální vodou*“. Fungující trh s virtuální vodou je jednou z možností, jak efektivněji alokovat sladkovodní zdroje v celosvětovém měřítku a omezit tlaky, jež jsou na ně vyvíjeny.

2.1.2. Vodní stopa

„*Vodní stopa*“ (VS) je mnohorozměrným indikátorem využití sladké vody, který se nezaměřuje pouze na její *přímé* užití, ale který zkoumá též *nepřímou* spotřebu vodních

zdrojů. Je to obsáhlý a komplexní ukazatel, který může vhodně doplňovat klasické ukazatele spotřeby vody.

Výhodou vodní stopy je zejména to, že odhaluje skryté vazby mezi spotřebou (jednotlivce či státu) a skutečným množstvím užití vody, které bylo na uspokojení této spotřeby použito – zkoumá totiž objem virtuální vody, který stojí za produkcí spotřebovávaných statků a služeb. Aby měl indikátor vodní stopy vyšší vypovídací hodnotu, rozlišuje tři kategorie virtuální vody: *modrou, zelenou a šedou* virtuální vodu (Hoekstra, Chapagain et al., 2011). Toto rozdělení nám umožňuje zohlednit různé zdroje spotřebované vody a zahrnout také objem vody, jež byla při produkci znečištěna. Zmíněné tři komponenty vodní stopy jsou vždy geograficky a časově specifikovány, váží se tedy ke konkrétnímu místu a časovému období:

- Modrá vodní stopa
 - Modrá vodní stopa odkazuje na spotřebu zdrojů tzv. *modré vody*, pod níž rozumíme povrchovou a podzemní vodu. „*Spotřeba modré vody*“ v tomto případě znamená ztrátu vody z dostupných podzemních nebo povrchových vodních těles v příslušném povodí, k níž dojde, když se voda vypaří, vrátí se do jiného povodí nebo do moře nebo je vtělena do výrobku.
- Zelená vodní stopa
 - Zelená vodní stopa odkazuje na spotřebu zdrojů tzv. *zelené vody*, jíž se rozumí dešťová voda zachycená v půdě (jako půdní vlhkost).
- Šedá vodní stopa
 - Šedá vodní stopa odkazuje na znečištění vody. Je definována jako objem sladké vody, která je nezbytná k asimilaci znečišťujících látek tak, aby bylo dosaženo místních standardů kvality vody (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 19).

Od běžného ukazatele spotřeby vody, kterým je „odběr vody“, se vodní stopa liší ve třech významných ohledech:

- Neomezuje se pouze na spotřebu podzemní a povrchové (modré) vody, ale zahrnuje též spotřebu vody vázané v půdní vlhkosti (zelené vody) a nezapomíná zohlednit znečištění (šedou vodu).
- Kromě přímého užití vody zahrnuje též její nepřímé užití.
- Modrá voda je do výpočtu zahrnuta pouze tehdy, nevrátí-li se do příslušného vodního tělesa, z něhož byla odebrána.

Účetnictví vodní stopy⁶ poskytuje časoprostorově vázané informace o tom, jakým způsobem a k jakým účelům člověk omezené vodní zdroje využívá a odráží tak podmínky místního životního prostředí, hydrologie i výrobních postupů. Komplexní účetnictví vodní stopy nám může pomoci při hodnocení dopadů naší spotřeby vody, a to jak z hlediska environmentálního, tak sociálního a ekonomického⁷. Přehledný a srozumitelný indikátor je rovněž důležitým pomocníkem při tvorbě nových strategií a nových forem vládní politiky v oblasti ochrany sladkovodních zdrojů – dosud se totiž například na nepřímou spotřebu vody nekladl důraz a spotřebitelé a výrobci produktů náročných na vodu neplatili za tyto produkty reálnou cenu, která by odrážela vysokou spotřebu vody či její vzácnost. Pro státy také může být velmi důležitá informace o jejich vodní soběstačnosti, díky níž mohou lépe koncipovat priority zahraničního obchodu. Orgány správy povodí ocení informace o tom, jak vodní stopa ovlivňuje režim vodního toku a jeho okolí, či jakou měrou je voda z daného povodí využívána na pěstování málo výnosných zemědělských plodin.

Podle toho, na jakou problematiku se chceme zaměřit, můžeme zkoumat vodní stopu jednotlivého procesního kroku, vodní stopu výrobku, vodní stopu spotřebitele či skupiny spotřebitelů, vodní stopu geograficky vymezené oblasti (regionu či státu) a vodní stopu podniku (Hoekstra, Chapagain et al., 2009).

2.1.3. Vymezení účelu a rozsahu výpočtu vodní stopy

Účel výzkumu nám pomůže určit rozsah podrobností, které budeme do výpočtu vodní stopy zahrnovat. Je proto nezbytné v první řadě dobře definovat *cíle*, jichž chceme dosáhnout – pokud chceme například pouze zvýšit povědomí o problematice zbytečného drancování vodních zdrojů, nebudeme potřebovat tak detailní data, jako když budeme chtít formulovat nové politické strategie či konkrétní normy pro omezení spotřeby vody. Odtud se mohou odvíjet další úpravy výpočtu vodní stopy.

V určitých případech je možné zcela vyloučit některý ze tří *komponentů* vodní stopy. To, zda můžeme nějaký druh virtuální vody z výpočtu vyloučit, bude záviset vždy na konkrétní situaci. V odborných studiích vodní stopy zejména zemědělských plodin se poměrně často setkáme s vynecháním šedé vody (Bulsink, Hoekstra et al., 2010; Chapagain, Hoekstra et al., 2006; Aldaya, Martínez-Santos et al., 2010). Důvodem pro

⁶ Je používána terminologie, s níž se můžeme setkat i u tzv. „uhlíkové stopy“

⁷ Viz kapitola „Hodnocení udržitelnosti pomocí indikátoru vodní stopy“

vynechání může být předpokládána nízká hodnota vodní stopy daného komponentu, případně nedostatek dat.

Důležitou otázkou bude, jak detailně postupovat ve spotřebním řetězci a jaké *procesy* do výpočtu zahrnout. Jelikož zatím nebyly ustaveny žádné obecné směrnice, základním pravidlem je neopomenout ve výpočtu všechny procesy, které se „významně“ podílejí na celkové vodní stopě (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 12). Co si však představit pod pojmem „významně“ zůstává otevřeno – můžeme například zakomponovat pouze procesy, které se na celkové vodní stopě podílí více než 1 %. Jelikož 85 % celkové vodní stopy lidstva má na svědomí zemědělství (Hoekstra and Chapagain, 2008: 7), je důležité zabývat se důkladně vodní stopou zemědělských komodit a chovu hospodářských zvířat. Průmyslová výroba přispívá k celkové vodní stopě zejména šedou vodní stopou, proto bychom určitě neměli vynechat provozy vyznačující se velkým objemem odpadních vod. Vodní stopu práce nemá smysl započítávat, jelikož bychom se nevyhnuli zdvojenému započítávání vodní spotřeby. Rovněž s vodní stopou dopravy většinou v kalkulacích nepočítáme, jelikož ta není významným spotřebitelem vody. Výjimku zde ovšem tvoří doprava využívající biopaliva, která mají – stejně jako ostatní zemědělské komodity – relativně vysokou vodní stopu (Berndes, 2002; Gerbens-Leenes and Hoekstra, 2009).

Pro jaké *období* budeme vodní stopu počítat je rovněž zásadní otázkou. Zásoby vody během roku kolísají, stejně tak se mění i poptávka po vodě (například díky měnícím se klimatickým podmínkám). Zejména vodní stopu kulturních plodin ovlivňují suché a naopak vlhké roky, proto může být poněkud zavádějící vytvářet časové řady a poukazovat na vývoj vodní stopy během několika let. V některých případech může být vhodnější zkombinovat údaje týkající se produkce a výnosů během konkrétních zkoumaných let s dlouhodobými klimatickými průměry⁸ (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 14).

2.2. VÝPOČET VODNÍ STOPY

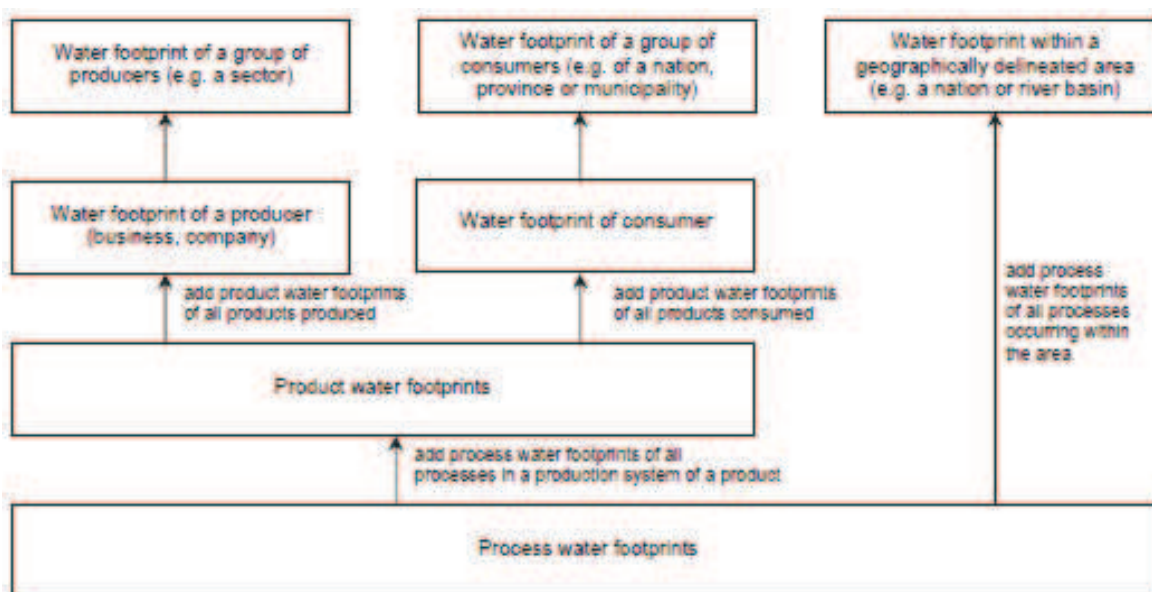
Základním kamenem výpočtu vodní stopy je „*procesní krok*“. Vodní stopa určitého produktu (ať již vstupního či koncového) je součtem jednotlivých procesních kroků jeho výroby. Vodní stopa výrobce je sumou vodních stop jím vyrobených produktů a podobně

⁸ Pro výpočet vodní stopy zemědělských plodin je běžně využívána databáze Organizace OSN pro výživu a zemědělství ClimWat, která obsahuje dlouhodobé průměry za 30 let.

vodní stopa spotřebitele je sumou vodních stop jím spotřebovávaných produktů. Vodní stopu v rámci určitého geograficky vymezeného prostoru získáme součtem vodních stop všech procesů, které v dané oblasti probíhají (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 17).

Vodní stopa je objemová míra vodní spotřeby a vodního znečištění a je proto udávána v jednotkách objemu, většinou za jednotku času. V případě vodní stopy výrobku se setkáme s jednotkovým vyjádřením objemu vody na jednotku výrobku (objem vody na hmotnost výrobku, na peněžní hodnotu, na kus či na jednotku energie). Vodní stopu skupiny spotřebitelů vyjadřujeme v objemu vody za časové období a na hlavu.

Obrázek 1. Vodní stopa procesního kroku jako základní kámen výpočtu vodní stopy



(Zdroj: Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, et al. (2009). Water Footprint Manual. State of Art 2009. Water Footprint Report. Enschede, Water Footprint Network, s. 17)

2.2.1. Vodní stopa procesního kroku

Vodní stopu procesního kroku vypočítáme tak, že sečteme jeho modrou, zelenou a šedou vodní stopu. Vzhledem k lepší vypovídací hodnotě se však mnohdy celková vodní stopa nepočítá a indikátor zůstává rozdělen na tři komponenty.

2.2.1.1. Modrá vodní stopa

Jak jsme již zmínili výše, modrá vodní stopa ukazuje spotřebu povrchové a podzemní vody a zahrnuje vodu, která se vypaří, je vtělena do produktu, nevrátí se do téhož povodí, z něž je odebrána, nebo se nevrátí v určitém časovém období.

Vypařování má za důsledek nejvýznamnější ztrátu vody, proto se ve výzkumech běžně uvažuje pouze tento komponent. Pokud to ale konkrétní podmínky vyžadují (například pokud zkoumáme vodní stopu v oblastech, kde je velký nedostatek vody v suchých obdobích, nebo pokud tvoří vtělená voda významný podíl celkové vody použité na produkci daného statku) a rozsah studie umožňuje, měli bychom zahrnout do výpočtů všechny komponenty. Vzorec pro výpočet modré vodní stopy procesního kroku ($VS_{proc,modrá}$) by pak vypadal zjednodušeně takto:

$$VS_{proc,modrá} = \text{Vypařování modré vody} + \text{Vtělená modrá voda} + \text{Tok "ztráta"} \\ - \text{návrát"}$$

Poslední položka ve vzorečku, tzv. tok „ztráta - návrat“, představuje ten objem vody, který není dostupný pro opětovné využití v rámci stejného povodí a určitého stanoveného období, a to buď proto, že se vrátí do jiné zásobárny vody, nebo se vrátí v jiném časovém horizontu (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 20). Jednotkou modré vodní stopy procesního kroku ($VS_{proc,modrá}$) je objem vody na jednotku času (den, měsíc či rok).

Všechny údaje potřebné pro výpočet modré vodní stopy je možné měřit, je to však poměrně náročné. Databáze, v nichž bychom našli objem vody nezbytný pro jednotlivé kroky výroby, jsou velmi vzácné. A najdeme-li je, obsahují pouze data o objemu vody odebrané z vodního zdroje. Navíc se týkají spíše spotřeby vody v jednotlivých výrobních odvětvích než spotřeby vody během výrobních kroků (například spotřeba vody papíren, textilek atd.). Také data z oblasti zemědělství můžeme získat měřením, většinou se však pro výpočet vodní stopy zemědělských komodit používají počítačové modely, které na základě informací o klimatických datech a zavlažovacích postupech odhadují nároky plodiny na vodu. Pomohou nám tedy vypočítat modrou a zelenou vodní stopu současně⁹.

⁹ Také my budeme pro náš výzkum využívat takový počítačový model – CROPWAT, vyvinutý Organizací OSN pro výživu a zemědělství (FAO).

Pokud máme dostupná data, umožňuje nám koncept vodní stopy rozlišit modrou vodní stopu dále na povrchovou vodní stopu, podzemní vodní stopu či fosilní vodní stopu (v tom případě pak mluvíme o tzv. *světle modré*, *tmavě modré* a *černé* vodní stopě) (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 21). Takový výzkum by mohl obohatit naše poznatky například o to, nespotřebováváme-li příliš velké množství podzemní či dokonce fosilní vody, která se již dále neobnovuje. Pro tyto výzkumy však máme velmi málo údajů, proto se tímto rozlišováním zabývá pouze zlomek studií.

2.2.1.2. Zelená vodní stopa

Zelená voda je voda, která dopadá na zem ve formě srážek a zůstává uložená v půdě jako půdní vlhkost nebo je dočasně zachycena na povrchu půdy či rostlin. Zelenou vodní stopu tedy tvoří jednak zelená voda, která se vypaří z půdy či rostlin, a jednak zelená voda, která je vtělena do produktu¹⁰. Jelikož zelená vodní stopa sestává z objemu dešťové vody, která je spotřebována během produkce, je významná hlavně pro výpočet vodní stopy zemědělských komodit. Zelená vodní stopa v procesním kroku je rovna:

$$VS_{proc,zelená} = V_{vypařování\ zelené\ vody} + V_{vtělená\ zelená\ voda}$$

Spotřebu zelené vody zemědělských plodin můžeme měřit pomocí souboru empirických rovnic, nicméně většinou opět používáme počítačové modely jako v případě modré vodní stopy.

Rozdělení vodní stopy na modrou a zelenou je klíčové zejména v případě zemědělské produkce, jelikož dopady na životní prostředí, hydrologický cyklus i na sociální oblast se velmi liší, využíváme-li k zemědělské produkci převážně dostupnou zelenou vodu či naopak podzemní a povrchovou modrou vodu.

¹⁰ Zelená voda vtělená do produktu se na celkové vodní stopě podílí tak zanedbatelnou částí, že se s ní zpravidla vůbec nekalkuluje.

2.2.1.3. Šedá vodní stopa

Šedá vodní stopa procesního kroku poukazuje na úroveň znečištění vody, k němuž dojde během daného procesního kroku. Šedá voda je starším konceptem¹¹ a je definována jako objem sladké vody, který je třeba k asimilaci vypouštěných znečišťujících látek tak, aby bylo dosaženo místních standardů kvality vody (Postel, Daily et al., 1996). Samotný termín „šedá vodní stopa“ však byl poprvé představen až v roce 2008 (Hoekstra and Chapagain, 2008), v původním konceptu vodní stopy tedy nebyl zahrnut.

Šedou vodní stopu vypočítáme tak, že dělíme množství vypouštěných polutantů (P , množství/čas) rozdílem mezi místními standardy kvality vody pro daný polutant (maximální akceptovatelná koncentrace k_{max} , množství/objem) a jeho přirozenou koncentrací v konkrétním vodním tělese (k_{nat} , množství/objem), do něhož je znečišťující látka vypouštěna (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 32):

$$VS_{proc,šedá} = \frac{P}{k_{max} - k_{nat}}$$

Šedá vodní stopa je indikátor asimilační kapacity. Protože asimilační kapacita vodního tělesa, do něhož je znečišťující látka (polutant) vypouštěna, je závislá na rozdílu mezi maximální přípustnou a přirozenou koncentrací dané znečišťující látky, měli bychom jako referenční hodnotu používat právě přirozenou koncentraci znečišťující látky, nikoli koncentraci, která je momentálně v daném vodním tělese aktuální. Nemáme-li k dispozici žádné informace o tom, jaké jsou přirozené koncentrace dané látky¹², můžeme vzít v úvahu nulovou hodnotu ($k_{nat} = 0$) (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 32). Jako maximální přípustnou koncentraci budeme uvažovat místní standardy kvality vody pro danou znečišťující látku.

Pokud jsou znečišťující chemické látky vypouštěny přímo do povrchové zásobárny vody, můžeme jejich množství přímo měřit. Pokud jsou ovšem aplikovány do půdy jako v případě zemědělských hnojiv a pesticidů, dostane se do vodních zdrojů pouze určitá část aplikovaného množství. Podíl látek, které se dostanou z půdy do vodních těles, vyjadřuje

¹¹ Ve starších studiích se nepoužívá termín šedá voda, ale „dilution water requirement“, voda potřebná k rozředění.

¹² Přirozené koncentrace látek je poměrně těžké zjišťovat, jelikož se mohou lišit nejen u různých typů vodních těles, ale též v různých přírodních podmínkách.

bezrozměrný koeficient α ¹³. Množství vypouštěných polutantů P pak bude tvořit pouze určitá frakce z celkového množství užitých znečišťujících látek, kterou zjistíme vynásobením koeficientu α pro daný polutant celkovým množstvím aplikovaného polutantu (AP , množství/čas) (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 37):

$$VS_{proc,šedá} = \frac{P}{k_{max} - k_{nat}} = \frac{\alpha \times AP}{k_{max} - k_{nat}}$$

Jestliže jsou znečišťující látky součástí odpadních vod vypouštěných do vodních zdrojů, můžeme vypočítat množství vypouštěných polutantů P jako objem odpadních vod (OV , množství/čas) vynásobený rozdílem mezi koncentrací polutantu v odpadních vodách (k_{OV} , množství/objem) a jeho přirozenou koncentrací ve vodním tělese, do něhož jsou odpadní vody vypouštěny (k_{nat}):

$$VS_{proc,šedá} = \frac{P}{k_{max} - k_{nat}} = \frac{OV \times (k_{OV} - k_{nat})}{k_{max} - k_{nat}}$$

Pokud budeme uvažovat, že je přirozená koncentrace znečišťující látky ve vodním tělese rovna nule (což je případ zejména uměle vyrobených látek, které se v přírodě přirozeně nevyskytují), pak bude vzoreček následující:

$$VS_{proc,šedá} = \frac{OV \times k_{OV}}{k_{max}}$$

Podobně budeme postupovat i v případě tepelného znečištění. Šedou vodní stopu pro tepelné znečištění vypočítáme jako objem odpadních vod (OV , množství/čas) vynásobený rozdílem mezi teplotou odpadní vody (T_{OV} , °C) a přirozenou teplotou vodního tělesa (T_{nat} , °C), do něhož je vypouštěna. Výsledek dělíme rozdílem maximální přípustné (T_{max} , °C) a přirozené (T_{nat} , °C) teploty vodního tělesa:

$$VS_{proc,šedá} = \frac{OV \times (T_{OV} - T_{nat})}{T_{max} - T_{nat}}$$

¹³ Koeficient α se liší pro jednotlivé polutanty - pro dusíkatá hnojiva například uvažujeme, že $\alpha=0,1$, tedy že do vodních těles se dostane 10% z aplikovaného množství dusíkatých hnojiv.

Maximální přípustná teplota vody přitom závisí na typu vodního tělesa a na místních podmínkách. Pokud nemáme k dispozici žádné místní limity, doporučuje se počítat s maximálním vzrůstem teploty o 3°C, podle směrnice EU¹⁴ (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 24).

Pokud zahrnuje odpadní tok více než jednu znečišťující látku, bere se ve výpočtu v úvahu ta látka, která je pro dané vodní těleso nejkritičtější, tedy ta, která má největší šedou vodní stopu (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 24).

2.2.2. Vodní stopa výrobku

Vodní stopu výrobku definujeme jako celkové množství sladké vody, které je přímo nebo nepřímo použito na produkci určitého statku (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 31). V některých publikacích se můžeme setkat také s termínem „obsah virtuální vody“, „exogenní“ nebo „stínová“ voda (Hoekstra and Chapagain, 2008). Tyto termíny však odkazují pouze na obsah virtuální vody obsažené v produktu, zatímco pojem „vodní stopa“ odkazuje rovněž k jednotlivým „typům“ vody, která byla na výrobu produktu použita (rozděluje tedy využitou vodu na modrou, zelenou a šedou).

V případě zemědělských produktů vyjadřujeme vodní stopu v m³/t či v l/kg, popřípadě v objemu vody na kus. U průmyslových výrobků je vodní stopa vyjadřována běžně v m³/US\$ (případně v m³/eur) či v objemu vody na kus. Můžeme se ovšem setkat i s údaji, které udávají objem vody na kcal (potraviny) či joule (elektřina nebo paliva) (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 31).

Abychom mohli zjistit vodní stopu výrobku, musíme nejprve rozdělit celý výrobní proces do jednotlivých výrobních kroků, které, jak už jsme zmínili výše, tvoří základ pro výpočet vodní stopy. Nesmíme přitom opomenout fakt, že výrobní systém je velmi komplexní a koncových výrobků může být více – například z chovu dobytka získáme mléko, maso a kůži. V úvahu musíme vzít rovněž konkrétní místo, kde je výrobek produkován, jelikož charakteristiky i okolnosti výroby nám mohou ovlivnit velikost jednotlivých složek vodní stopy. Schémata výrobních systémů pro zemědělské produkty můžeme najít v databázích Organizace OSN pro výživu a zemědělství (FAO, 2003) nebo

¹⁴ Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/44/ES ze dne 6. září 2006 o jakosti sladkých vod vyžadujících ochranu nebo zlepšení pro podporu života ryb.

v Chapagain a Hoekstra (Chapagain and Hoekstra, 2004). Po údajích nezbytných k schematizaci výrobního procesu průmyslových výrobků jsme nepátrali, jelikož to nebylo předmětem naší práce – Chapagain a Hoekstra (Hoekstra, Chapagain et al., 2009) ovšem uvádějí, že pro ně existují veřejně přístupné databáze.

Vodní stopu výrobku můžeme počítat dvěma způsoby: jednak součtem vodních stop jednotlivých procesních kroků ve výrobním řetězci, nebo využijeme tzv. přístup postupné akumulace (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 49).

2.2.2.1. Součet procesních kroků

První způsob můžeme použít pouze v případě, že je výstupem výrobního procesu a tedy i jednotlivých procesních kroků, z nichž se výrobní proces skládá, pouze jeden produkt.

Vodní stopa výrobku v ($VS_{vyrobaek}[v]$, objem vody/množství) se v tomto případě rovná sumě vodních stop procesů nutných k výrobě daného výrobku, děleno vyprodukovaným množstvím výrobku v :

$$VS_{vyrobaek}[v] = \frac{\sum_{s=1}^k VS_{proc}[s]}{V[v]}$$

kde $VS_{proc}[s]$ je vodní stopa procesního kroku s (objem/čas) a $V[v]$ je vyprodukované množství výrobku v . V praxi se s takovýmto případem setkáme výjimečně.

2.2.2.2. Přístup postupné akumulace

Druhý způsob, tedy přístup postupné akumulace, zahrnuje výpočet vodní stopy výrobku na základě vodních stop vstupních produktů, které byly během posledního procesního kroku potřebné k výrobě konečného výrobku. Předpokládáme zde, že během výrobní fáze můžeme získat z jednoho vstupního produktu hned několik výstupních produktů. Vzorec pro výpočet vodní stopy výrobku v proto bude v tomto případě poněkud složitější:

$$VS_{vyrobek}[v] = \left(VS_{proc}[v] + \sum_{i=1}^y \frac{VS_{vyrobek}[i]}{f_v[v, i]} \right) \times f_h[v]$$

$VS_{vyrobek}[v]$ je vodní stopa konečného výrobku v (objem/množství), $VS_{vyrobek}[i]$ je vodní stopa vstupního výrobku i a $VS_{proc}[v]$ je vodní stopa procesního kroku, během něhož je množství y vstupních produktů přeměněno na množství z výstupních produktů. Parametr $f_v[v, i]$ je tzv. „výrobní frakce“ a $f_h[v]$ tzv. „hodnotová frakce“. Výrobní frakce je definována jako množství konečného produktu, které získáme z určitého množství vstupního produktu. Hodnotová frakce je podílem tržní ceny jednoho konkrétního konečného produktu a sumy tržních cen všech konečných produktů (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 50).

V jednodušším případě, máme-li pouze jeden vstupní produkt, z něhož získáme pouze jeden výstupní produkt, nebudeme pracovat s hodnotovou frakcí:

$$VS_{vyrobek}[v] = VS_{proc}[v] + \frac{VS_{vyrobek}[i]}{f_v[v, i]}$$

Abychom vypočítali správně vodní stopu finálního, konečného produktu, měli bychom začít s výpočtem vodní stopy výchozích surovin a poté krok po kroku postupně počítat vodní stopy polotovarů, dokud se nedostaneme až k poslednímu konečnému produktu.

2.2.3. Vodní stopa spotřebitele a skupiny spotřebitelů

Vodní stopa spotřebitele je celkové množství sladké vody, které bylo spotřebováno a znečištěno během výroby zboží a služeb zkonsumovaných spotřebitelem (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 36). Vodní stopu skupiny spotřebitelů tvoří suma vodních stop jednotlivých spotřebitelů.

Vodní stopu spotřebitele (VS_{spot}) spočítáme jako součet jeho přímé a nepřímé vodní stopy:

$$VS_{spot} = VS_{spot, přímá} + VS_{spot, nepřímá}$$

Pod pojmem přímá vodní stopa spotřebitele rozumíme vodu spotřebovanou nebo znečištěnou v domácnosti či na zahradě, nepřímou vodní stopou spotřebitele pak rozumíme sladkou vodu, která byla spotřebována či znečištěna během výroby statků a služeb, které spotřebitel zkonsumoval (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 36). Nepřímou vodní stopu spotřebitele můžeme spočítat vynásobením celkového množství spotřebovaných výrobků jejich vodní stopou:

$$VS_{spot,nepřímá} = \sum_v (S[v] \times VS_{vyrobek}[v])$$

kde $S[v]$ je spotřeba výrobku v (objem/čas) a $VS_{vyrobek}[v]$ je vodní stopa výrobku v (objem/výrobní jednotka).

V reálném případě se situace bude dále komplikovat tím, že spotřebovávaný výrobek (například víno) bude pocházet z různých oblastí x a bude mít tedy i různou vodní stopu. V úvahu bychom proto měli vzít průměrnou vodní stopu daného výrobku (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 52):

$$VS_{vyrobek}[v] = \frac{\sum_x (C[x, v] \times VS_{vyrobek}[x, v])}{\sum_x C[x, v]}$$

kde $C[x, v]$ (výrobní jednotka/čas) vyjadřuje spotřebované množství výrobku v pocházejícího z místa x a $VS_{vyrobek}[x, v]$ (objem/výrobní jednotka) je vodní stopa výrobku v pocházejícího z místa x .

Pokud nemáme možnost zjišťovat vodní stopu u všech spotřebovávaných výrobků jednoho druhu, můžeme využít světové nebo národní odhady průměrné vodní stopy daného výrobku.

2.2.3.1. Přístup postupné akumulace

Vodní stopa geograficky vymezené oblasti je definována jako spotřeba a znečištění sladké vody v rámci hranic určité oblasti (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 37). Pro tento případ je zásadní přesně si vymezit hranice území, pro které budeme vodní stopu počítat. Danou oblastí může být například povodí, region či stát. Výsledek bude odpovídat sumě

vodních stop veškerých procesů probíhajících v definované oblasti, během nichž je spotřebována či znečišťována sladká voda:

$$VS_{oblast} = \sum_q VS_{proc}[q]$$

kde $VS_{proc}[q]$ je vodní stopa procesu q , který v rámci vymezeného prostoru probíhá.

Vodní stopa geograficky vymezené oblasti je důležitá zejména z hlediska ochrany vodních zdrojů v této oblasti, zvláště pokud jsou zde vodní zdroje vzácné. V tom případě bychom se měli zaměřit na to, jaká je zde „rovnováha virtuální vody“, tedy jaký je poměr vývozu a dovozu virtuální vody – kolik vody v dané oblasti je využito na výrobu zboží určeného na export a naopak kolik virtuální vody je do oblasti importováno v podobě dovezených výrobků. Rovnováha virtuální vody v oblasti během určitého časového období je definována jako čistý (netto) dovoz (import) virtuální vody ($V_{i,netto}$) během uvažovaného období. Čistý dovoz virtuální vody ($V_{i,netto}$) je roven rozdílu virtuální vody importované do oblasti (V_i) a virtuální vody z oblasti exportované (V_e) (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 38). Vzorec pro výpočet je tedy následující:

$$V_{i,netto} = V_i - V_e$$

2.2.4. Vodní stopa v rámci státu

Pod vodní stopou v rámci státu (VS_{stat}) rozumíme celkovou spotřebu a znečištění sladké vody v rámci teritoria daného státu. Vodní stopu v rámci státu můžeme vypočítat podle výše zmíněného vzorce pro výpočet vodní stopy geograficky vymezeného území, tedy jako sumu vodních stop veškerých procesů probíhajících na území státu:

$$VS_{stat} = \sum_q VS_{proc}[q]$$

2.2.5. Vodní stopa národní spotřeby

Vodní stopa národní spotřeby ($VS_{nar,spot}$) má dva komponenty: interní vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar,spot,int}$) a externí vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar,spot,ext}$).

$$VS_{nar,spot} = VS_{nar,spot,int} + VS_{nar,spot,ext}$$

Interní vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar,spot,int}$) tvoří objem vody z domácích zdrojů, která byla využita na produkci zboží a služeb spotřebovaných obyvateli státu (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 38). Interní vodní stopu vypočítáme jako rozdíl vodní stopy v rámci státu (VS_{stat}) a objemu exportované virtuální vody (V_e):

$$VS_{spot,int} = VS_{stat} - V_e$$

Externí vodní stopa národní spotřeby ($VS_{nar,spot,ext}$) je definována jako objem vody, který byl využit v jiných státech k vyprodukování zboží a služeb, jež jsou spotřebovány obyvateli toho státu, jehož vodní stopu národní spotřeby počítáme (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: tamtéž). Externí vodní stopu národní spotřeby spočítáme jako rozdíl mezi importem virtuální vody (V_i) a objemem virtuální vody, která byla do státu importována a poté znovu exportována („reexportovaná“ virtuální voda, $V_{e,r}$):

$$VS_{spot,ext} = V_i - V_{e,r}$$

K výpočtu vodní stopy národní spotřeby přitom můžeme přistupovat dvěma způsoby: volíme přístup tzv. „top-down“ (přístup „odshora dolů“) či naopak „bottom-up“ (přístup „zdola nahoru“ (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 40).

2.2.5.1. Přístup „top-down“

Pokud zvolíme přístup „top-down“, spočítáme vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar,spot}$, objem/čas) jako vodní stopu v rámci státu (VS_{stat}), k níž přičteme rozdíl mezi dovozem (V_i) a vývozem (V_e) virtuální vody:

$$VS_{nar,spot} = VS_{stat} + V_i - V_e$$

Hrubý dovoz virtuální vody V_i vypočítáme jako:

$$V_i = \sum_{s_e} \sum_v (M_i[s_e, v] \times VS_{vyrobek}[s_e, v])$$

kde $M_i[s_e, v]$ značí importované (dovezené) množství výrobku v z exportujícího státu s_e (výrobní jednotka/čas) a $VS_{vyrobek}[s_e, v]$ označuje vodní stopu výrobku v , jakou má v rámci exportujícího státu s_e (objem/výrobní jednotka). Pokud je daný výrobek skutečně vyráběn v zemi, z níž je exportován, použijeme průměrnou hodnotu vodní stopy daného výrobku v exportující zemi. Pokud je výrobek dovezen ze země, jež není jeho výrobcem, a pokud o místě jeho výroby nemáme informace, můžeme využít světové průměrné hodnoty vodní stopy tohoto výrobku.

Hrubý vývoz virtuální vody V_e vypočítáme:

$$V_e = \sum_v M_e[v] \times VS_{vyrobek}[v]$$

kde $M_e[v]$ vyjadřuje množství výrobku v , který byl exportován ze zkoumaného státu (výrobní jednotka/čas), a $VS_{vyrobek}[v]$ je průměrná vodní stopa exportovaného výrobku v (objem/výrobní jednotka).

2.2.5.2. Přístup „bottom-up“

Přístup „bottom-up“ je založen na výpočtu vodní stopy skupiny spotřebitelů. Sčítáme přímou a nepřímou vodní stopu spotřebitelů v rámci národa:

$$VS_{nar,spot} = VS_{nar,spot,přímá} + VS_{nar,spot,nepřímá}$$

Přímá vodní stopa národní spotřeby ($VS_{nar,spot,přímá}$) odkazuje na přímou spotřebu a znečištění vody spotřebiteli v domácnostech nebo na zahradách. Nepřímá vodní stopa národní spotřeby ($VS_{nar,spot,nepřímá}$) odkazuje na množství vody, které bylo použito nebo znečištěno během výroby statků a služeb, které skupina spotřebitelů spotřebovává.

Nepřímá vodní stopa je tedy sumou vodních stop veškerých produktů konzumovaných obyvateli státu:

$$VS_{nar.spot,nepřímá} = \sum_v (S[v] \times VS_{vyrobek}[v])$$

kde $S[v]$ je spotřeba výrobku v spotřebiteli v rámci státu (výrobní jednotka/čas) a $VS_{vyrobek}[v]$ je vodní stopa tohoto výrobku (objem/výrobní jednotka). Většinou počítáme opět s průměrnými hodnotami vodní stopy daného výrobku v jako v případě přístupu „top-down“¹⁵.

Ačkoliv by se teoreticky měly výsledky obou přístupů shodovat, budou se většinou mírně lišit, zejména vzhledem k rozdílným vstupním datům (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 59). Přístup „bottom-up“ totiž spoléhá na data o spotřebě, zatímco přístup „top-down“ závisí na údajích mezinárodního obchodu.

2.2.5.3. Národní vodní soběstačnost a závislost na importu virtuální vody

Vodní stopa národní spotřeby nám může pomoci určit, zda je stát soběstačný, co se týče vodního hospodářství. Národní vodní soběstačnost (NVS, %) totiž zjistíme, vydělíme-li interní vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar.spot,int}$) celkovou vodní stopu národní spotřeby ($VS_{nar,spot}$) a pro převod na % vynásobíme 100:

$$NVS = \frac{VS_{nar.spot,int}}{VS_{nar,spot}} \times 100$$

Národní vodní soběstačnost je 100%, pokud je veškerá potřebná voda dostupná přímo na vlastním území státu.

Závislost na importu virtuální vody (ZIV, %) definujeme jako podíl externí ($VS_{nar.spot,ext}$) a celkové ($VS_{nar,spot}$) vodní stopy národní spotřeby:

$$ZIV = \frac{VS_{nar.spot,ext}}{VS_{nar,spot}} \times 100$$

¹⁵ Viz výše

2.2.6. Vodní stopa podniku

Vodní stopu podniku definujeme jako celkové množství sladké vody, která byla přímo nebo nepřímo využita pro chod a podporu podniku (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 45). Můžeme se rovněž setkat s termíny „firemní vodní stopa“ či „vodní stopa organizace“.

Sestává ze dvou hlavních složek: z přímé vodní stopy podniku ($VS_{pod,přímá}$), což je množství vody spotřebované či znečištěné během provozu podniku a výroby konečných výrobků, a z nepřímé vodní stopy ($VS_{pod,nepřímá}$), která odkazuje na množství vody využitá a znečištěné během výroby statků a služeb, které jsou vstupními surovinami daného podniku:

$$VS_{pod} = VS_{pod,přímá} + VS_{pod,nepřímá}$$

Hodnocení vodní stopy podniku nabízí nové možnosti pro uvědomělé podnikání a obchodní politiku, která může vytvářet zásadní tlaky na státní politiku a zákonodárství (Liu and Orr, 2010). Může se stát proto pomocníkem při transformaci k udržitelnému rozvoji. Bližší vysvětlování výpočtu vodní stopy podniku se však svou náročností míjí s účely naší práce.

2.3. HODNOCENÍ UDRŽITELNOSTI POMOCÍ INDIKÁTORU VODNÍ STOPY

Zda je vodní stopa procesu, výrobku, spotřebitele nebo výrobce udržitelná, závisí na několika faktorech, kterými jsou:

charakteristiky vodní stopy – velikost, časové souvislosti, barva vodní stopy (modrá, zelená, šedá)

místní podmínky v oblasti, v níž vodní stopu zkoumáme.

Udržitelnost vodní stopy můžeme posuzovat z hlediska perspektivy environmentální, sociální i ekonomické. Rovněž se můžeme pohybovat v různých měřítkách, od udržitelnosti vodního hospodaření v úzce vymezené oblasti, přes vliv vodní stopy na povodí a ekologické nároky jeho okolí, až po diskusi udržitelnosti vodní stopy na

globální úrovni. Může se nám tak stát, že zhodnotíme vodní stopu určitého procesu probíhajícího v konkrétní lokalitě jako udržitelnou, v globálním měřítku však bude situace diametrálně odlišná.

Pro to, abychom si problematiku hodnocení udržitelnosti vodní stopy poněkud zjednodušili a zpřehlednili, rozdělíme si oblasti hodnocení na tři úrovně: na úroveň místní, úroveň povodí a úroveň globální, jež sahá za hranice povodí¹⁶. Pro každou z těchto tří úrovní si pak můžeme klást specifické otázky, které nám pomohou diskutovat udržitelnost vodní stopy v daném měřítku a v perspektivě environmentální, sociální i ekonomické.

2.3.1. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na místní úrovni

Abychom mohli hodnotit udržitelnost vodní stopy na místní úrovni z hlediska environmentálního, musíme si položit zejména tyto otázky: Nepodporuje zelená vodní stopa výrobu (produkci) za cenu přírodní vegetace a biodiverzity? Neovlivňuje modrá vodní stopa v jakémkoli ročním období negativním způsobem režim vodního toku a okolního prostředí (množství, kvalitu či dostupnost vody v určitém časovém období, které jsou nezbytné pro zachování ekosystémových funkcí)? Nemá šedá vodní stopa negativní vliv na místní standardy kvality vody?

Chceme-li zohlednit sociální perspektivu na místní úrovni, musíme se ptát, zda vodní stopa neznevýhodňuje ostatní spotřebitele vody v dané lokalitě. Z ekonomického hlediska se pak ptáme, zda je výnosnost při dané vodní stopě optimální, zda by nebylo možné ušetřit vodu, aniž by byla omezena výroba, zda nedochází k neefektivnímu využívání vody díky její nízké ceně, která neodráží její reálnou ekonomickou hodnotu, či zda vzácnost vodních zdrojů vstupuje jako faktor do rozhodování o spotřebě vody.

2.3.2. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na úrovni povodí

Na úrovni říčního povodí se musíme tázat komplexněji a zkoumat, nevede-li modrá a zelená stopa k takovým změnám odtoku, které negativně ovlivňují režim vodního toku a ekologické nároky okolního prostředí po celé délce řečiště. Stejně tak se musíme zaměřit na to, zda nemá šedá vodní stopa vliv na překročení standardů kvality vody v některé části

¹⁶ Zmíněné rozdělení na tři úrovně doporučuje Hoekstra a Chapagain (Hoekstra, Chapagain et al. 2009; Hoekstra, Chapagain et al. 2011)

celého řečiště. Z hlediska sociálního se musíme ptát, jaký je vliv vodní stopy na přístup obyvatel v okolí řečiště ke kvalitní sladké vodě, případně zda jsou jejich ztráty nějakým způsobem kompenzovány. Z ekonomického hlediska je otázkou nejen efektivní alokace vody v čase a prostoru mezi její různé uživatele, ale též náklady obětované příležitosti, pokud by se původce vodní stopy rozhodl vodu nespotřebovat. Problematická je též otázka internalizace negativních externalit, které trpí obyvatelé žijící v oblasti daného povodí.

2.3.3. Hodnocení udržitelnosti vodní stopy na globální úrovni

Globální rovina je pro hodnocení udržitelnosti vodní stopy nejsložitější, jelikož se na problém musíme dívat co nejkompexněji. Z hlediska environmentálního musíme brát v potaz omezené zdroje sladké vody na planetě a jejich nerovnoměrnou alokaci. Co tedy může být v prostředí, jež netrpí vodním stresem, udržitelné, může se stát v globálním měřítku neudržitelným. Z hlediska společenského je nezbytné klást si otázku po sociální spravedlnosti – je fér, abychom měli takovou vodní stopu (a konkrétně z dané aktivity), vezmeme-li v úvahu omezenou dostupnost vodních zdrojů a soupeřící (mnohdy důležitější) poptávky po vodě? Z ekonomického hlediska je důležité, zda jsou výrobky náročné na vodu produkovány efektivně v oblastech, které mají dostatečnou zásobu sladké vody, a zda jsou následně alokovány do oblastí s vysokým vodním stresem. Velký význam zde má výzkum mezinárodního obchodu s virtuální vodou.

2.3.4. Environmentální hledisko

Místní dopady jsou většinou důsledkem drancování nebo znečištění povrchových či podzemních vodních zdrojů, nebo za nimi stojí přerozdělení toku vypařované zelené vody z přírodní vegetace na pěstované plodiny za cenu ztráty biodiverzity (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 54). K negativním změnám v celém povodí dochází většinou díky hromadění mnoha menších zásahů (odběry vody, vypouštění odpadní vody, tepelné znečištění), které pak ohrožují vodní i suchozemské ekosystémy spojené s vodním režimem daného povodí, a to zejména na dolním toku. Globální situace je důsledkem součtu všech vodních stop. Na mnoha místech světa dochází k zbytečnému drancování vodních zdrojů, zatímco na jiných místech je voda vzácností. Je tedy třeba zkoumat, jakou částí se vodní stopa jakéhokoli

procesu, výrobku, spotřebitele či státu podílí na celosvětové situaci a zda a do jaké míry může být tento podíl redukován. Relevantní je též otázka, jak by měla být alokována výroba produktů intenzivních na vodu, aby byl trh s virtuální vodou co nejefektivnější.

Při posuzování environmentálních dopadů vodní stopy pracujeme ideálně s rozdělením vodní stopy na zelenou, modrou a šedou vodní stopu¹⁷. Díky tomuto rozdělení můžeme identifikovat kritická místa posuzované vodní stopy. Kritickým místem zelené vodní stopy bude přerozdělení toku vypařované vody mezi přírodní vegetací a kulturními plodinami, pokud dojde ke ztrátě biodiverzity za určitou tolerovatelnou hranici. To je problém například Indonésie, kde plantáže na produkci palmového oleje vytlačují původní tropickou vegetaci (Bulsink, Hoekstra et al., 2010). Palmový olej sám o sobě přitom vysokou vodní stopu (v porovnání s ostatními plodinami v Indonésii pěstovanými) nemá¹⁸. Kritickým místem modré vodní stopy je narušení režimu vodního toku, jeho ekologických funkcí a ekologických funkcí prostředí, které je s ním spojeno. To je případ španělského regionu Mancha, jenž se zaměřoval na pěstování a export plodin náročných na vodu – to zde postupně vedlo k vysychání mezinárodně známých močálů, které byly chráněné Ramsarskou úmluvou (Aldaya, Martínez-Santos et al., 2010). Pro šedou vodní stopu je kritickým bodem překročení standardů kvality vody, které závisí na schopnosti povodí asimilovat odpadní látky. Dochází k němu tedy v případě, je-li překročena asimilační kapacita povodí (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 86).

Máme-li identifikovat kritická místa vodní stopy, můžeme se řídit podle následujících kritérií (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 55):

vodní stopa výrobku, spotřebitele nebo výrobce je pro danou oblast v určitém časovém období významná

v dané oblasti se v určitém časovém období objevují problémy s nedostatkem vody nebo s jejím znečištěním.

Obě zmíněná kritéria by měla být měřitelná. Je tedy třeba definovat, jak velkou vodní stopu budeme považovat za „významnou“ – například pokud se vodní stopa výrobku, spotřebitele či výrobce podílí více než 1% na celkové vodní stopě daného povodí. Stejně tak musí být jasně řečeno, co považujeme za „nedostatek vody“ či „znečištění“.

¹⁷ Ačkoliv zdaleka ne všechny výzkumy pracují s tímto rozdělením – zejména šedá vodní stopa je ignorována z důvodu nedostatku dat (Mekonnen and Hoekstra 2010)

¹⁸ Vodní stopa indonéského palmového oleje je 853 m³/t, zatímco například vodní stopa kávy je 22907 m³, kaka 9414 m³ a rýže 3473 m³

Nedostatek zelené vody ($NV_{zelená}$) v povodí vypočítáme jako podíl zelené vodní stopy ($VS_{zelená}$) povodí x a dostupné zelené vody ($DV_{zelená}$):

$$NV_{zelená}[x, t] = \frac{VS_{zelená}[x, t]}{DV_{zelená}[x, t]}$$

Dostupnou zelenou vodu vypočítáme, odečteme-li od celkové evapotranspirace dešťové vody¹⁹ ($ET_{zelená}$) evapotranspiraci ze země pokryté přírodní vegetací ($ET_{přír}$) a evapotranspiraci ze země, která je neproduktivní (ET_{neprod}) (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 56):

$$DV_{zelená}[x, t] = ET_{zelená}[x, t] - ET_{přír}[x, t] - ET_{neprod}[x, t]$$

Můžeme se zaměřit i na zkoumání tzv. „čisté zelené vodní stopy“, kterou tvoří rozdíl mezi evapotranspirací země pokryté kulturními plodinami a země pokryté přírodní vegetací. To může ovlivňovat odtok v povodí a v souvislosti s tím též ekologické funkce ekosystémů po celé délce povodí. Tato terminologie nicméně není plně v souladu s konceptem vodní stopy jako indikátoru přivlastňování si sladké vody, který zkoumá celek. Hoekstra (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 82) proto doporučuje mluvit spíše o *změně odtoku* jako důsledku zelené vodní stopy. Pro hodnocení udržitelnosti zelené vodní stopy je však každopádně třeba mít na zřeteli již zmíněné ekologické funkce okolních ekosystémů, jež tvoří hranici, kterou bychom záměnou přírodní vegetace za kulturní plodiny neměli narušit (Richter, 2009).

Jelikož se modrá vodní stopa i dostupnost modré vody během roku značně mění, bude kolísat též nedostatek vody. Proto bychom měli nedostatek modré vody počítat po jednotlivých měsících. Nejběžnějším indikátorem nedostatku vody je podíl ročního odběru vody v určité oblasti a celkového ročního odtoku v této oblasti. Tento indikátor bývá nazýván různě, ať už „úroveň spotřebování vody“ (Falkenmark, 1989), „podíl odběrodtok“ (Alcamo and Henrichs, 2002) či „podíl užití-zdroje“ (Raskin, Hansen et al., 1996). Není však nejvhodnější, jelikož část odebrané vody se opět vrací zpátky do povodí. Rovněž počítá s ročními hodnotami, což (jak jsme výše zmínili) neodpovídá plně reálné

¹⁹ Evapotranspirace je kombinací dvou procesů: evaporace (vypařování vody z půdního povrchu) a transpirace (vypařování vody z povrchu rostlin). Viz níže kapitola „Evapotranspirace“

situaci. Proto je nejvhodnějším indikátorem „nedostatek modré vody“. Nedostatek modré vody ($NV_{modrá}$) v povodí x je podílem celkové modré vodní stopy daného povodí ($VS_{modrá}$) a dostupné modré vody ($DV_{modrá}$). Počítat ho budeme pro jednotlivé měsíce v roce:

$$NV_{modrá}[x, t] = \frac{VS_{modrá}[x, t]}{DV_{modrá}[x, t]}$$

Dostupná modrá voda ($DV_{modrá}$) v povodí x je definována jako odtok (O), od něž odečteme nároky prostředí na toky vody (NTV):

$$DV_{modrá}[x, t] = O[x, t] - NTV[x, t]$$

Dopad šedé vodní stopy v povodí závisí na odtoku daného povodí, který je k dispozici pro asimilaci odpadu. Úroveň znečištění (UZ) v daném povodí x měříme jako podíl šedé vodní stopy povodí ($VS_{šedá}$) k odtoku z tohoto povodí (O):

$$UZ[x, t] = \frac{VS_{šedá}[x, t]}{O[x, t]}$$

Indikátory dostupné modré a zelené vody a úrovně znečištění je možné agregovat do „*indexů dopadu*“. Index dopadu zelené vodní stopy, index dopadu modré vodní stopy a index dopadu šedé vodní stopy je agregovaný odhad dopadu vodní stopy na přírodní prostředí. Tyto indexy jsou počítány jako suma součinu vodní stopy (zelené, modré nebo šedé) a nedostatku vody (NV pro zelenou a modrou vodu – pro šedou vodu počítáme s úrovní znečištění UZ). Velkou nevýhodou takovéto agregace ovšem je, že se v podstatě překryjí veškeré důležité informace a zbude pouhý „syrový dojem dopadu vodní stopy na místní přírodní prostředí“ (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 60). Proto se takováto agregace příliš nedoporučuje²⁰.

²⁰ Nejnovější verze manuálu pro výpočet vodní stopy (Hoekstra, Chapagain et al. 2011) už tyto indexy ani nezmiňuje.

2.3.5. Sociální hledisko

Ze sociálního hlediska budeme udržitelnost vodní stopy posuzovat vzhledem k takovým problémům, jako jsou rovný přístup ke zdrojům vody, externality, zaměstnanost či lidské zdraví. Problém rovného přístupu ke zdrojům vody vyvstává, pokud se v místě vyskytuje nějaký velký spotřebitel vody. Ten může omezovat ostatní spotřebitele jak v dané lokalitě, tak i v celém povodí. V globálním měřítku je otázka rovného přístupu ke zdrojům relevantní v případě, má-li jeden subjekt vodní stopu několikrát vyšší, než subjekt jiný. Neměli bychom mít přitom na zřeteli pouze rovnost, jejíž problém vyvstává aktuálně, ale též rovnost mezigenerační. Velmi důležitý zde může být také problém externích efektů – například není-li omezení dostupných vodních zdrojů a znečištění vody na dolních tocích obyvatelům těchto toků nijak kompenzováno. Palčivou otázkou se může stát rovněž zaměstnanost, což je většinou případ zemědělské produkce – pokud je drancování vodních zdrojů zemědělskou činností omezeno, například kvůli ochraně životního prostředí, dostává se tato politika snadno do konfliktu s místními obyvateli, kteří na zemědělské produkci profitovali²¹.

2.3.6. Ekonomické hledisko

Dodávky vody jsou často vysoce subvencovány, voda není alokována na místa, kde by měla nejvyšší sociální přínos, a nedostatek vody, její znečištění a jiné externality nejsou ve většině případů internalizovány do cen, které by měl uživatel vody platit. Důsledkem toho je fakt, že spotřební vzorce užívání vody jsou neefektivní a vzdálené ekonomickému optimu (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 61).

Existují dva základní důvody, proč trh s vodou nepracuje efektivně. Prvním z nich je charakter vody jako veřejného statku. Vzhledem k tomu, že voda většinou není soukromým statkem, neexistuje pro vodu trh, který by odrážel nabídku a poptávku a zároveň vzácnost vody. Druhý důvod je částečně důsledkem prvního – částka, kterou uživatelé platí za vodu, je většinou hluboko pod její ekonomickou hodnotou.

²¹ Viz výše příklad regionu Mancha ve Španělsku – proti omezení zemědělské produkce se zde zvedla vlna nevole mezi místními farmáři, kteří omezeními na ochranu mokřadů přišli o část svých zisků.

Ekonomický dopad vodní stopy proto souvisí s neefektivním užíváním vody. Efektivitu vody přitom můžeme zkoumat opět na třech úrovních (Hoekstra, Chapagain et al., 2009).

Otázkou, kterou si můžeme klást na místní úrovni, je, zda by mohl producent (původce vodní stopy) dosáhnout stejného výnosu, pokud by použil méně vody. Tuto „výrobní efektivitu“ můžeme vyjádřit v jednotkách vyprodukovaného množství na objem vody (t/m^3). Můžeme ji zvýšit podporováním rozvoje technologií šetřících vodu a zaváděním řady ekonomických nástrojů, například účtováním plných cen za vodu, dotováním lepších technologií a naopak zdaněním technologií, které vodou plýtvají apod.

Na úrovni povodí zkoumáme, jakým způsobem jsou přerozdělovány omezené zdroje vody mezi soupeřící uživatele. Efektivitu využití vody na této úrovni nazýváme „alokační efektivitou“ a vyjadřujeme ji v peněžní hodnotě získané z jednotky vody ($euro/m^3$).

Na globální úrovni se zabýváme tím, jaké světové oblasti mají komparativní výhodu v produkování výrobků intenzivních na vodu a jaké regiony mají naopak komparativní nevýhodu. To samozřejmě ovlivňují regionální klimatické podmínky, dostupnost vodních zdrojů, produktivita půdy i práce a úroveň technologické vyspělosti. Efektivita využití vody v globálním měřítku by měla být snadno zvýšena, pokud by státy jednoduše využily své komparativní výhody a nevýhody k produkci či naopak k importu produktů náročných na vodu.

Na místní úrovni můžeme dospět k hrubému odhadu ekonomického dopadu jednoduše tím, uvážíme-li, zda byly využity nejlepší dostupné technologie. Můžeme získat hodnotu ekonomické ztráty na jednotku vody, pokud vynásobíme peněžní hodnotu výrobku (např. $euro/t$) rozdílem mezi potenciální vodní produktivitou a nynější vodní produktivitou (t/m^3). Tato rovnice je samozřejmě velmi zjednodušená, už jen díky tomu, že předpokládá, že potenciální vodní produktivity může být dosaženo za stejnou cenu jako vodní produktivity nynější (Hoekstra, Chapagain et al., 2009). Na úrovni celého povodí by pak rovnice vypadala jako rozdíl potencionální „ekonomické vodní produktivity“ a nynější „ekonomické vodní produktivity“, přičemž ekonomickou vodní produktivitou rozumíme vodní produktivitu (v jednotkách t/m^3) vynásobenou peněžní hodnotou výrobku ($euro/m^3$).

2.4. SPEKTRUM ODPOVĚDÍ NA VODNÍ STOPU

Všichni máme odpovědnost za svou spotřebu vůči naší planetě, která by měla sloužit nejen nám, ale i generacím budoucím. Proto by se měl každý spotřebitel zasazovat o to, aby byla jeho vodní stopa udržitelná. Pokud budou spotřebitelé uvědoměli, budou výrobci tlačeni k uzpůsobení své nabídky poptávce po udržitelných statcích a službách. Rovněž investoři by měli brát při svém rozhodování o investicích v úvahu udržitelné využívání vody. A konečně nesmíme zapomenout na vládu, která by vzhledem k veřejnému charakteru vody měla převzít zodpovědnost za úpravu legislativy týkající se nakládání s vodními zdroji.

Z technického hlediska je možné redukovat spotřebu modré i šedé vody v průmyslu i v domácnostech na nulu. V uzavřeném cyklu by nemuselo docházet ani ke ztrátě vody vypařováním (samozřejmě s určitými výjimkami, například v případech, kdy se s vodou z nezbytných důvodů pracuje ve venkovních prostorech a vypařování tak nejde zabránit), ani ke vzniku odpadních vod (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 100). V zemědělství můžeme snížit šedou vodní stopu na nulu tím, že nebudeme aplikovat žádné chemikálie. Zelená a modrá vodní stopa v zemědělství může být redukována zvyšováním vodní produktivity.

Základním návodem by se mělo stát schéma *vyhnout se – snížit – kompenzovat* (Hoekstra, Chapagain et al., 2009). *Vyhnout se* – to znamená například zavést výše zmíněné uzavřené cykly výroby v průmyslu či nepoužívat chemické látky v zemědělství. Snižování spotřeby vody je záležitostí zejména těch zemí, které mají dostatečné zásoby vody. Vodní produktivita je zde často velmi nízká, což se v širších souvislostech jeví jako plýtvání, které je v globálním měřítku neudržitelné. Pokud tyto země zvýší svou vodní produktivitu, budou moci zvýšit i svou celkovou produkci, která bude moci pokrýt poptávku sušších regionů po produktech intenzivních na vodu. Koncept kompenzace negativních dopadů vodní stopy zatím není propracován a naráží na mnoho překážek, například na to, jak měřit dopady vodní stopy či jaká úroveň kompenzace je vhodná. Proto se zatím doporučuje klást důraz ne na kompenzaci, nýbrž na stanovení kvantitativních cílů pro snižování vodní stopy (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 103).

Blízko ke schématu *vyhnout se – snížit – kompenzovat* má koncept „vodní neutrality“. Vodní neutralita znamená, že je vodní stopa určité aktivity redukována natolik, nakolik je to jen možné, a negativní externality způsobené takto sníženou vodní stopou

jsou kompenzovány (Hoekstra and Chapagain, 2008). V určitých případech (např. v případě uzavřeného cyklu v průmyslové výrobě) může „vodní neutralita“ znamenat vodní stopu rovnou nule. Tento koncept má ovšem nevýhodu v tom, že má tendenci více zdůrazňovat možnost kompenzace negativních dopadů, čímž může odsouvat redukování vodní stopy poněkud do pozadí.

2.4.1. Spotřebitelé

Vodní stopa spotřebitele je udržitelná tehdy, pokud:

- celková vodní stopa spotřebitele nepřesahuje jeho spravedlivý podíl na světových zdrojích zelené a modré vody
- žádný z komponentů celkové vodní stopy se nepodílí na narušování režimu vodního toku, na poškození ekosystémových funkcí okolního prostředí nebo na překračování standardů kvality vody.

Vzhledem k tomu, že nepřímá vodní stopa spotřebitele je většinou mnohem větší než jeho přímá vodní stopa, spočívá jeho vhodná odpověď ve dvojí změně spotřebních vzorců: může se přeorientovat na spotřebu takových produktů, které mají malou vodní stopu (například přejít na bezmasou stravu, pít vodu místo kávy...), nebo si vybírat takové produkty, které pocházejí z oblastí, kde voda není tolik vzácná. Zde ovšem spotřebitel často naráží na nedostatek informací.

2.4.2. Podniky

Podniky by měly analyzovat způsob svého nakládání s vodou a na základě toho vypracovat strategii pro snižování vodní stopy. Jedním z prvních podniků, které šly v tomto směru příkladem, byla jihoafrická pivovarnická společnost SABMiller, která je druhou největší pivovarskou skupinou na světě (SABMiller and WWF-UK, 2009). Jak jsme již zmínili výše, v některých případech je možné pomocí uzavřeného cyklu výroby (vyhneme-li se vypařování vody a budeme-li důkladně čistit odpadní vody) redukovat modrou i šedou vodní stopu až na nulu. Klíčové je pokusit se zamezit zbytečnému užití vody a vodu využívat opětovně.

Pro většinu výrobních zařízení tvoří největší podíl na jejich celkové vodní stopě vodní stopa jejich dodavatelského řetězce. Proto je zásadní, aby bral podnik při tvorbě své

strategie snižování vodní stopy v úvahu i tento fakt. Pomocí uzavírání dohod o určitých vodních standardech s dodavatelskými firmami či přechodu k dodavatelům s nízkou vodní stopou se může vytvořit celá řetězová reakce snižování vodní stopy, jež může vést ke změně modelu podnikání (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 70). Hoekstra a Chapagain (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 71-72) uvádějí komplexní škálu kroků, které podniku pomohou účelně snížit vodní stopu – jedná se o oblast vlastních výrobních postupů, dodavatelského řetězce, konečného použití výrobku, environmentálních, sociálních i ekonomických kompenzací či výrobní a obchodní transparentnosti.

2.4.3. Investoři

Problémy s nedostatečným množstvím sladké vody či s ohrožením jejích zdrojů se mohou podstatně dotýkat investorů a zvyšovat riziko jejich investic (Morrison, Morkawa et al., 2009). To se nemusí týkat čistě jen možného fyzického omezení výroby, v potaz je třeba vzít také sílu spotřebitelů a jejich poptávky – vzedme-li se vlna odporu proti nešetrnému zacházení s vodou ve výrobě či proti vypouštění zbytečně velkého množství odpadních vod, může být výrazně narušena image společnosti a investoři mohou přijít o své zisky. Investoři musí rovněž počítat s vládními zásahy a regulacemi, jejichž množství bude pravděpodobně v budoucnu díky stále tíživější vodní situaci narůstat.

Na druhou stranu však tato situace umožňuje využít konkurenční výhody těm společnostem, které chtějí těmto výzvám čelit – výrobní a obchodní transparentnost a úspornější technologie mohou podpořit takový spotřebitelsky atraktivní obraz společnosti, který jí pomůže prosadit se na trhu.

2.4.4. Vládní politika

Problémem legislativní regulace zacházení s vodními zdroji je zejména to, že se politika národních států nesoustředí na problematiku z globální perspektivy (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 113). Takto omezený pohled brání rozvinutí funkčního mezinárodního obchodu s virtuální vodou, který by mohl být jedním z nejdůležitějších nástrojů udržitelného globálního využívání sladkovodních zdrojů. Vzhledem k tomu, že standardní ukazatel užití vody neupozorňuje ani na jeho udržitelnost, ani na znečištění vodních zdrojů, měla by se stát vodní stopa státu standardním indikátorem zahrnutým do

národních statistik. Příznivým signálem je, že k tomuto kroku již několik států, například Čína či Španělsko, přistoupilo (Liu and Orr, 2010; Aldaya, Martínez-Santos et al., 2010).

Na základě analýzy vodní stopy státu a jejích kritických míst může vládní politika učinit mnoho kroků, které podpoří lepší zacházení s vodními zdroji. Podle toho, zda se stát nachází na území s vysokým či nízkým vodním stresem, může podporovat import či export virtuální vody, například systémem cel a daní. Může rovněž podporovat úspornější technologie a zamezit poskytování dotací do zemědělských oblastí, jejichž vodní efektivita je nízká nebo se nacházejí na území, v němž jsou vodní zdroje vzácné. Může podporovat takové zemědělské postupy, které nevyžadují použití hnojiv, a pesticidů. A v neposlední řadě může uzavírat mezinárodní dohody o redukci vodní stopy či výrobní a obchodní transparentnosti.

2.5. VÝPOČET MODRÉ, ZELENÉ A ŠEDÉ VODNÍ STOPY ZEMĚDĚLSKÉ PLODINY

Základní vzorec pro výpočet vodní stopy procesu pěstování zemědělské plodiny tvoří součet modré, zelené a šedé vody.

$$VS_{proc} = VS_{proc.modrá} + VS_{proc.zelená} + VS_{proc.šedá}$$

Jednotkou, v níž se vodní stopa zemědělských plodin udává, je vždy objem vody na určité množství, tedy většinou m³/tuna.

Zelený i modrý komponent vodní stopy pěstování plodiny vypočítáme analogicky – zelená (popř. modrá) voda využitá plodinou ($VVP_{modrá}$, $VVP_{zelená}$, v jednotkách m³/ha) dělená výnosem (V , t/ha) (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 41):

$$VS_{proc.modrá} = \frac{VVP_{modrá}}{V}$$
$$VS_{proc.zelená} = \frac{VVP_{zelená}}{V}$$

Chceme-li počítat šedý komponent vodní stopy, musíme nejprve vydělit množství aplikované chemické látky (polutantu) (P , kg/ha) vynásobené bezrozměrným koeficientem

α^{22} rozdílem mezi maximální přípustnou (k_{max} , kg/m³) a naturální, přirozenou koncentrací dané látky ve vodním tělese (k_{nat} , kg/m³). Výsledek pak vydělíme výnosem plodiny (V , tuna/ha) (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 41):

$$VS_{proc.šedá} = \frac{(P \times \alpha) / (k_{max} - k_{nat})}{V}$$

Složka zelené a modré vody využité plodinou ($VVP_{modrá}$ a $VVP_{zelená}$) je vypočítána jako nashromáždění každodenní evapotranspirace²³ během celého období pěstování plodiny:

$$VVP_{modrá} = 10 \times \sum_{d=1}^{dop} ET_{modrá}$$

$$VVP_{zelená} = 10 \times \sum_{d=1}^{dop} ET_{zelená}$$

$ET_{modrá}$ ve vzorečku představuje evapotranspiraci modré vody (celkové množství závlahové vody vypařující se z pole), $ET_{zelená}$ evapotranspiraci zelené vody (celkové množství dešťové vody vypařující se z pole). Faktor 10 slouží k přepočítání hloubky vody v mm na objem vody v půdním povrchu v m³/ha. Suma evapotranspirace je počítána ode dne sadby až do dne sklizně (dop – délka období pěstování).

Evapotranspiraci plodiny měříme na základě údajů z klimatických dat, vlastností půdy a charakteristik plodiny (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 27). Jedním z počítačových modelů, které se pro výpočet evapotranspirace využívají, je model EPIC (Williams, Jones et al., 1989). V našem výzkumu jsme ovšem pracovali s modelem v současné době nejvyužívanějším, modelem CROPWAT. Tento počítačový model byl vyvinut Organizací OSN pro výživu a zemědělství a je založen na Penman-Monteithově rovnici²⁴.

Do výše zmíněných kalkulací není zahrnuta modrá a zelená voda vtělená do plodiny. Jelikož podíl vtělené modré a zelené vody tvoří obvykle zhruba 0,1 % vypařené vody (Hoekstra, Chapagain et al., 2009: 27), přispívá vtělená voda k výsledné vodní stopě

²² Koeficient α vyjadřuje podíl chemické látky, které rostliny nevyužijí a který se vyplaví do vodních rezervoárů.

²³ Viz níže, kapitola „Evapotranspirace“

²⁴ Viz níže, kapitola „Metodologie“

plodiny pouze velmi malou částí a ve výzkumech se s ní tedy v drtivé většině případů nekalkuluje.

2.6. EVAPOTRANSPIRACE

Největší podíl na vodní stopě zemědělských plodin má voda využitá plodinou během období jejího pěstování ($VVP_{modrá}$, $VVP_{zelená}$). Jelikož objem vody využitý plodinou je tvořen sumou denní evapotranspirace plodiny během celého období jejího pěstování, je výpočet evapotranspirace základním předpokladem pro výpočet zelené a modré vodní stopy plodiny a tedy i východiskem pro finální výpočet její celkové vodní stopy.

Evapotranspirace je kombinací dvou samostatných procesů:

- *evaporace* – vypařování vody z půdního povrchu
- *transpirace* – vypařování vody povrchem rostlin.

Oba tyto procesy probíhají současně a není snadné je od sebe oddělit. Vedle množství vody ve svrchní vrstvě půdy ovlivňuje vypařování z oseté půdy podíl slunečního záření dopadajícího na půdní povrch. Podíl tohoto záření klesá spolu s tím, jak se plodiny vyvíjejí a zastiňují stále více povrchu. Dokud nejsou plodiny dostatečně vyvinuté, ztrácí se většina vody vypařováním z půdy, tedy evaporací. Jakmile jsou plodiny vyvinuty plně do té míry, že pokrývají většinu povrchu půdy, stává se hlavním procesem ztráty vody transpirace (Allen, Pereira et al., 1998: 3). Hodnoty evapotranspirace se většinou uvádějí v mm na jednotku času (hodina, den, měsíc či rok).

Evapotranspiraci ovlivňují 4 základní faktory: klimatické podmínky, charakteristiky dané plodiny, zemědělské postupy a environmentální faktory (vlastnosti půdy).

2.6.1. Klimatické podmínky

Hlavními klimatickými faktory, které ovlivňují evapotranspiraci, jsou sluneční záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost větru. Aby bylo možné zkoumat atmosférické nároky na odpařování nezávisle na typu plodiny, jejím vývoji a hospodářských postupech, byl vytvořen koncept tzv. „referenční evapotranspirace“ neboli „evapotranspirace referenční plodiny“ - ET_0 .

Referenční evapotranspirací ET_0 se rozumí „evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobného standardnímu travnímu porostu, který se vyznačuje během celého kalendářního roku konstantní výškou (0,12 m), konstantním albedem (0,23), konstantním povrchovým odporem (70 s.m^{-1}), plným (maximálním) zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou“ (Kohut, 2005: 25) . V případě referenční evapotranspirace je v půdě dostatek vody, evapotranspiraci proto neovlivňují půdní faktory, pouze faktory klimatické. Díky tomu můžeme referenční evapotranspiraci ET_0 vypočítat pomocí celosvětově používané metodiky Organizace OSN pro výživu a zemědělství, která je založena na tzv. Penman-Monteithově kombinační rovnici²⁵, máme-li k dispozici nezbytné klimatické údaje (Allen, Pereira et al., 1998: 19).

2.6.2. Charakteristiky plodiny

Za stejných environmentálních podmínek se může evapotranspirace povrchů s různým vegetačním pokryvem lišit díky charakteristikám jednotlivých druhů rostlin. Hodnoty evapotranspirace ovlivňuje výška rostliny, hustota osevu či kořenová hloubka. Aby bylo možné vzít tyto faktory v úvahu při výpočtu nároků plodin na vodu, kalkuluje Penman-Monteithova rovnice s tzv. „evapotranspirací plodiny za standardních podmínek“ - ET_p . Evapotranspirace plodiny za standardních podmínek (ET_p) představuje vypařování vody z plodin, které jsou pěstované na velkých polích s optimální půdní vlhkostí, dobrým hospodářstvím a vhodnými environmentálními podmínkami a které za daných klimatických podmínek dosahují plné produkce (Allen, Pereira et al., 1998: 5). Evapotranspirace za standardních podmínek tedy není ovlivněna klimatickými faktory, ale pouze tzv. „koeficientem plodiny“ K_p , který vztahuje ET_p k ET_0 . Chceme-li vypočítat evapotranspiraci za standardních podmínek (ET_p), musíme ET_0 upravit o koeficient plodiny K_p , který vyjadřuje anatomické rozdíly mezi plodinami:

$$ET_p = ET_0 \times K_p$$

Koeficient plodiny se liší v jednotlivých fázích vývoje rostlin. Hodnoty pro „koeficient plodiny v iniciačním stádiu vývoje“ ($K_{p,ini}$) uváděné v tabulkách jsou pouze

²⁵ Pro vzorec Penman-Monteithovy rovnice viz kapitola „Metodologie“

přibližné a doporučuje se je využívat pouze pro úvodní a plánovací studie (Allen, Pereira et al., 1998: 114). Pro účely naší práce však tyto hodnoty postačují. Pro přesnější odhady $K_{p,ini}$ bychom museli vzít v úvahu časový interval mezi závlahami v iniciační (počáteční) fázi vývoje rostliny, rozsah této závlahy a odpařovací sílu atmosféry (Allen, Pereira et al., 1998: 115).

„Koefficient plodiny pro střednědobé stádium“ ($K_{p,mid}$) může být ovlivněn klimatickými podmínkami a výškou plodiny. Vyšší hodnoty koeficientu pro střednědobé stádium $K_{p,mid}$ budou mít oblasti se sušším klimatem a vyšší rychlostí větru (Allen, Pereira et al., 1998: 121). Pro výpočet přesnějšího koeficientu $K_{p,mid}$ je možné použít rovnici uvedenou v Allenovi a kol. (Allen, Pereira et al., 1998: 121-124). I pokud však vezmeme v úvahu další faktory pro zpřesnění $K_{p,mid}$, nebudou se hodnoty lišit tak markantně jako v případě $K_{p,ini}$.

Hodnoty „koeficientu plodiny pro období zrání“ ($K_{p,end}$) v tabulkách Organizace OSN pro výživu a zemědělství (Allen, Pereira et al., 1998) můžeme zpřesnit, pokud známe postupy místního vodního managementu a místní zemědělské postupy pro načasování sklizně. Pro účely našeho výzkumu postačí hodnoty uvedené v tabulkách²⁶-

²⁶ Tabulky uvádějí i úpravy $K_{p,end}$ pro plodiny, pro něž jsou typické rozdílné postupy pro načasování sklizně – v našem případě je to konkrétně kukuřice, kterou je možné sklízet před nebo až po vyschnutí zrna (Allen, Pereira et al. 1998, s. 111)

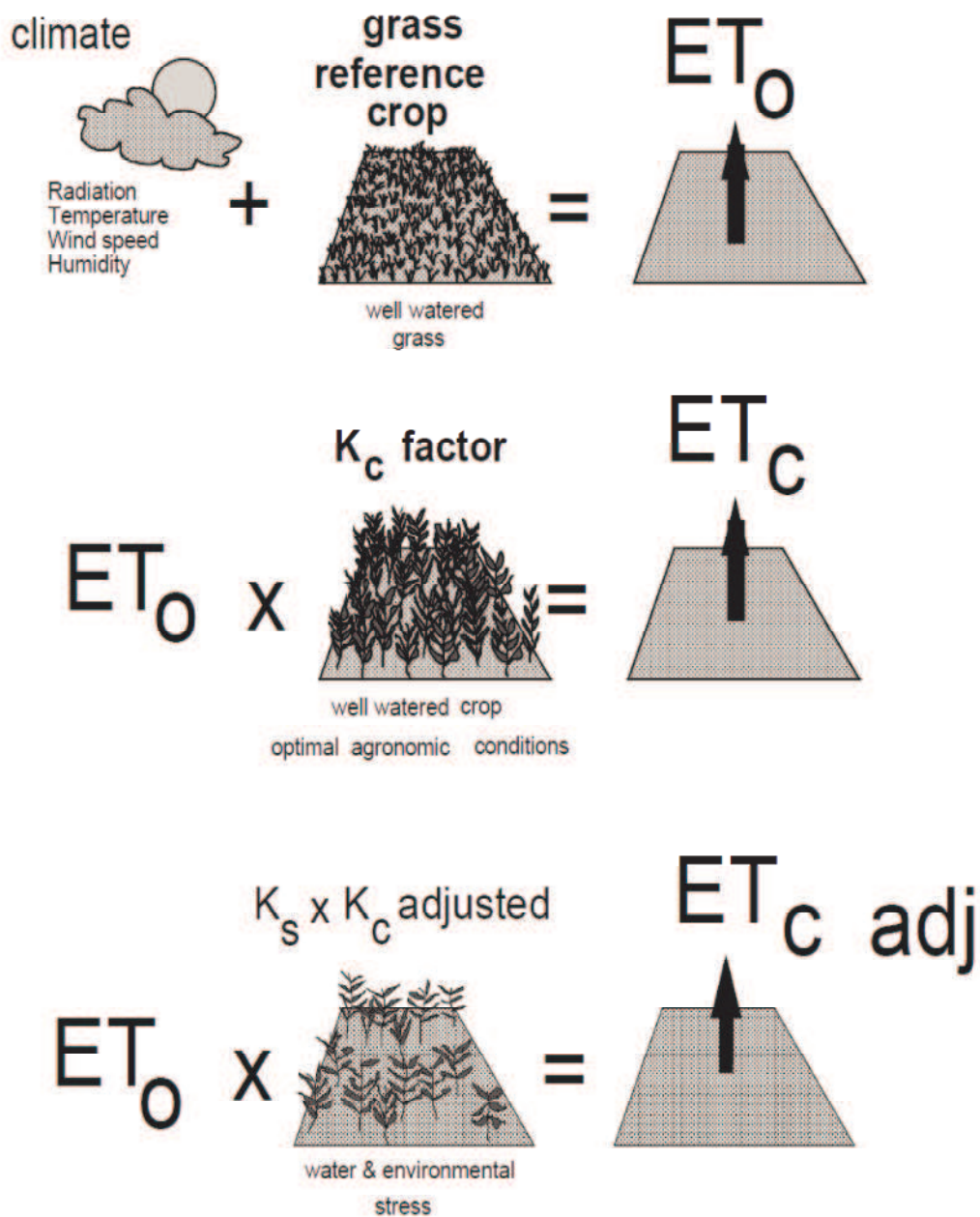
2.6.3. Zemědělské postupy a environmentální faktory (vlastnosti půdy)

Špatné zemědělské postupy, jako například nedostatečné či přílišné zavlažování a nedostatečné hnojení či používání pesticidů, stejně tak jako nepříznivé environmentální faktory (tvrdé a neproniknutelné půdní horizonty, salinita půdy, obsah živin), mohou omezovat vývoj plodin a snižovat tak jejich evapotranspiraci. Tyto faktory jsou pomocí tzv. „*stresového koeficientu*“ K_s zahrnuty do výpočtu upravené (skutečné) evapotranspirace plodiny ET_u tak, aby odpovídala evapotranspiraci plodiny za podmínek, které se liší od standardních (Allen, Pereira et al., 1998: 9). Upravená evapotranspirace ET_u tak odráží vlivy místních zemědělských postupů a environmentálních faktorů, kterými jsou zejména vlastnosti půdy:

$$ET_u = ET_p \times K_s$$

$$ET_u = ET_0 \times K_p \times K_s$$

Obrázek 2. Evapotranspirace referenční plodiny (referenční evapotranspirace ET_0), evapotranspirace plodiny za standardních podmínek (ET_p , v anglické terminologii odpovídá ET_c - crop evapotranspiration under standard conditions) a upravená (skutečná) evapotranspirace plodiny (ET_u , v anglické terminologii odpovídá $ET_{c\ adj}$ - crop evapotranspiration under non-standard conditions)



(**Zdroj:** Allen, R. G., L. S. Pereira, et al. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, s.6)

3. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části se budeme zabývat metodologií a výpočtem vodní stopy procesu pěstování vybraných zemědělských plodin na území České republiky.

Metodologický rámec, který jsme pro náš výzkum využili, je používán a prosazován nizozemskou neziskovou organizací *Water Footprint Network* – mezinárodní sítí, která sdružuje vládní i nevládní organizace, podnikatelské subjekty a vědecké instituce zabývající se problematikou udržitelného využívání vodních zdrojů. K výpočtu modré a zelené vodní stopy plodin používá počítačový model CROPWAT 8.0, jenž je založen na Penman-Monteithově kombinační rovnici.

Pro empirický výpočet vodní stopy v podmínkách České republiky jsme si zvolili 4 druhy zemědělských plodin, které patří mezi naše nejvíce exportované zemědělské komodity. Kritériem výběru rovněž bylo, aby pro vybrané komodity existovaly též zahraniční výzkumy jejich vodní stopy. Díky tomu jsme mohli analyzovat vodní stopu v našich místních podmínkách a porovnat ji též s vodní stopou stejných plodin v jiných oblastech světa.

3.1. PŘEDMĚT A CÍLE VÝZKUMU

Česká republika se nachází v oblasti, jež je definována jako oblast „*mírného vodního stresu*“. K určení míry vodního stresu slouží tzv. „*Falkenmarkův indikátor*“ neboli „*index vodního stresu*“, jenž jako hraniční hodnotu stanovuje 1700 m³ vody na osobu ročně (Rijsberman, 2004)²⁷. Toto množství uspokojí minimální požadavky jedince na vodu potřebnou v domácnosti a nezbytnou k zajištění potravy a ostatních statků a služeb, které spotřebovává. Oblasti, v nichž je k dispozici 1700 – 1000 m³ vody na osobu ročně, jsou oblastmi tzv. „*vodního stresu*“ (water stress), dostupné množství 1000 – 500 m³ odpovídá oblastem „*vzácných vodních zdrojů*“ (water scarcity). Pokud toto množství klesá pod 500 m³ na osobu ročně, jedná se o oblasti „*absolutně vzácných vodních zdrojů*“ (absolute scarcity) (Rijsberman, 2004).

²⁷ Česká republika se pohybuje právě okolo této hraniční hodnoty

Globálně je v současnosti sladkovodních zdrojů stále dostatek – problém je však v jejich nerovnoměrné distribuci. Pokud státy své vodní zdroje přetěžují, dochází k jejich degradaci a postupnému pozbytvání jejich zásobovacích i ekologických funkcí²⁸. To má negativní důsledky nejen na životní prostředí, ale také na společnost. Státy, které se nacházejí v oblasti vodního stresu nebo vzácných vodních zdrojů, by měly šetrně využívat zdroje, které mají k dispozici, a zaměřit se spíše na dovoz virtuální vody. Neměly by vyvážet komodity, které jsou na vodu náročné – například zemědělské plodiny. Ty mají totiž v těchto suchých oblastech mimořádně vysokou vodní stopu, jelikož kladou vysoké nároky na zavlažování – například zemědělství Turkmenistánu je na zavlažování závislé stoprocentně (Píšková, 2010: 150). Zemědělství je obecně největším spotřebitelem vody, proto se většina odborných studií vodní stopy zabývá právě zemědělskými plodinami. Ani náš výzkum nebude výjimkou.

Jak jsme již zmínili výše, též Česká republika je charakterizována jako oblast vodního stresu, ač mírného. Jaká je tedy vodní stopa zemědělských plodin, které vyvážíme? Jak je na tom v porovnání s ostatními zeměmi? Můžeme si za dané situace dovolit vývoz těchto komodit, aby naše hospodaření s vodními zdroji bylo udržitelné? To jsou otázky, kterými se budeme v naší práci zabývat. Pro náš výzkum jsme zvolili čtyři plodiny, které patří k největším zemědělským vývozním artiklům České republiky – pšenici, kukuřici, cukrovou řepu a rajčata. Zároveň existuje dostatek světových studií o jejich vodní stopě, budeme mít tedy možnost porovnat námi vypočítanou vodní stopu s odbornými výpočty. Využili jsme sekundární data pro rok 2009 (s výjimkou některých údajů získaných z databáze ClimWat, jako například průměrná rychlost větru), aby naše výpočty korespondovaly s aktuální situací.

Cílem našeho výzkumu tedy bude představit výpočet vodní stopy, a to na konkrétním příkladu výpočtu vodní stopy *procesu pěstování vybraných zemědělských plodin*. Kalkulaci modré a zelené vodní stopy provedeme pro oba moduly počítačového modelu CROPWAT 8.0, pro modul „nároky plodiny na vodu“ i modul „zavlažovací plán“. Výsledné hodnoty modré, zelené a šedé vodní stopy se pokusíme nejen zasadit do kontextu environmentálních, ekonomických a sociálních podmínek České republiky, ale také je porovnat s hodnotami vodní stopy daných plodin v jiných státech světa.

²⁸ Typickým příkladem je případ přetěžování Aralského jezera

3.2. METODIKA PRÁCE

Zelenou, modrou a šedou vodní stopu procesu pěstování vybraných zemědělských plodin jsme počítali podle výpočetního rámce představeného Hoekstrou a dalšími (Hoekstra, Chapagain et al., 2009). Pro kalkulaci evapotranspirace plodin jsme použili počítačový model CROPWAT 8.0 (FAO, 2010a) a řídili jsme se doporučeními Allena a kol. (Allen, Pereira et al., 1998) pro výpočet evapotranspirace v případě pěstování plodin v optimálních i neoptimálních podmínkách.

3.2.1. Výpočet zelené a modré vody pomocí počítačového modelu CROPWAT

Počítačový model CROPWAT 8.0, vyvinutý Organizací OSN pro výživu a zemědělství (FAO), nám pomocí zadaných dat vypočítá referenční evapotranspiraci (ET_0), evapotranspiraci plodiny za standardních podmínek (ET_p) i upravenou (skutečnou) evapotranspiraci plodiny během jejího růstu, tedy od období setí po dobu sklizně (ET_u).

3.2.1.1. Penman-Monteithova rovnice

Referenční evapotranspiraci ET_0 počítá model CROPWAT na základě Penman-Monteithovy rovnice (Allen, Pereira et al., 1998). Základní rovnici sestavil v roce 1948 Penman, když spojil koncept energetické bilance s teorií přenosu hmoty a odvodil vzorec pro výpočet výparu z otevřeného vodního povrchu, k němuž postačí znát pouze standardní klimatologické ukazatele, jako jsou délka slunečního svitu, teplota, vlhkost vzduchu a rychlost větru (Allen, Pereira et al., 1998: 18). Tato tzv. „kombinační metoda“ byla během desítek let dále rozvíjena a zdokonalována mnoha vědci a zavedením faktorů rezistence (či odporu) byla uzpůsobena pro výpočet evapotranspirace z povrchu pokrytého kulturními plodinami (Allen, Pereira et al., 1998: 19). Vzorec základní Penman-Monteithovy kombinační rovnice je následující²⁹:

²⁹ V dále uváděných vztazích bylo ponecháno původní anglické značení proměnných

$$\lambda \times ET = \frac{\Delta \times (R_n - G) + \rho_a \times c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \times \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Kde:

- ET = intenzita evapotranspirace [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- λ = skupenské (latentní) teplo vypařování neboli měrné teplo vypařování ($\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$)
- Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [$\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$]
- R_n = radiační bilance na povrchu [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
- G = tok tepla v půdě [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
- ρ_a = hustota vzduchu při dané teplotě vzduchu a atmosférickém tlaku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- c_p = specifické (měrné) teplo vzduchu [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$]
- e_s = tlak nasycené vodní páry při teplotě vzduchu [kPa]
- e_a = aktuální tlak vodní páry [kPa]. Rozdíl $(e_s - e_a)$ je tzv. „sytnostní doplněk“
- r_a = aerodynamický odpor (rezistence) [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]
- r_s = povrchový odpor (rezistence) plodiny [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]
- γ = psychrometrická konstanta [$\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$]. $\gamma = 0,66$ pro teplotu vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$ a tlak vodní páry v mb nebo hPa.

Z této základní Penman-Monteithovy rovnice a rovnic pro výpočet aerodynamického a povrchového odporu byla odvozena rovnice, s jejíž pomocí model CROPWAT vypočítá evapotranspiraci referenční plodiny ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{(900)}{(T + 273)} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times [1 + (0,34 \times u_2)]}$$

Kde:

- T = průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 = průměrná denní rychlost větru ve 2 m nad povrchem [m.s^{-1}]

3.2.1.2. Modul „nároky plodiny na vodu“

Model CROPWAT nám umožňuje vypočítat množství zelené i modré vody využitě plodinou ($VVP_{modrá}, VVP_{zelená}$) ve dvou volitelných modulech: můžeme využít modul „nároky plodiny na vodu“ či modul „zavlažovací plán“. Zevrubný manuál k počítačovému modelu CROPWAT 8.0 je k dispozici online (FAO, 2010a).

První modul počítačového modelu CROPWAT, modul „nároky plodiny na vodu“, předpokládá, že pro plodiny neexistují žádná omezení, co se týče dostupnosti vody. CROPWAT nám v tomto modulu vypočítá:

- nároky plodiny na vodu (NPV) během celého období pěstování plodiny za daných klimatických podmínek
- tzv. efektivní srážky během tohoto období
- požadavky plodiny na zavlažování.

Pod termínem „nároky plodiny na vodu“ (NPV) si můžeme představit vodu, která je využita na evapotranspiraci plodiny v ideálních podmínkách růstu, a to od data setí až po období sklizně (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 131). Ideálními podmínkami rozumíme to, že je v půdě k dispozici dostatečné množství vody, které je udržováno dešťovými srážkami a/nebo zavlažováním. Díky tomu není nijak omezen růst plodin a tedy ani výnos. Nároky plodiny na vodu vypočítáme jednoduše tak, že vynásobíme referenční evapotranspiraci (evapotranspiraci referenční plodiny) ET_0 koeficientem plodiny K_p :

$$NPV = ET_0 \times K_p$$

Jelikož předpokládáme, že nároky plodiny na vodu jsou plně uspokojeny, budou odpovídat její aktuální evapotranspiraci - ET_p :

$$NPV = ET_p$$

Referenční evapotranspirace ET_0 je míra evapotranspirace z referenčního povrchu, který netrpí nedostatkem vody. Jak jsme se již zmínili v kapitole „Evapotranspirace“, referenční plodina je hypotetický povrch pokrytý travním porostem se specifickými

standardizovanými vlastnostmi, takže jedinými faktory, které ovlivňují referenční evapotranspiraci, jsou klimatické podmínky. Referenční evapotranspirace tudíž neodráží vlastnosti plodiny ani půdy, na níž je pěstována – odráží pouze evaporační sílu atmosféry místa, kde je zkoumaná plodina pěstována. Evapotranspirace plodiny (ET_p) v ideálních podmínkách se od referenční evapotranspirace liší tím, že zahrnuje vlastnosti povrchu pokrytého zkoumanou plodinou, jež jsou vyjádřeny koeficientem plodiny K_p . Koeficient K_p je bezrozměrný a během růstu plodiny se mění (Mekonnen and Hoekstra, 2010: 9) – proto také model CROPWAT počítá se třemi hodnotami tohoto koeficientu, $K_{p,ini}$, $K_{p,mid}$, $K_{p,end}$.

Efektivní srážky (S_{ef}) nám vyjadřují tu část z celkového množství srážek, která je zadržena v půdě a tak je potenciálně dostupná pro potřeby plodiny (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 132). Efektivní srážky jsou většinou menší než celkové, jelikož ne všechnu srážkovou vodu si může plodina přivlastnit – například díky povrchovému odtoku či prosakování (Dastane, 1978). Existuje několik metod, kterými se efektivní srážky počítají. Vedle fixního procenta (80% z celkových srážek) nám model CROPWAT nabízí tři způsoby kalkulace: tzv. „spolehlivé srážky“ (FAO/AGLW vzorec), což je vzorec využívaný zejména v případech, kdy předpokládáme, že efektivní srážky budou větší než 80% z celkového množství srážek, „empirický vzorec“, což je stejný vzorec jako u spolehlivých srážek, ovšem s tím rozdílem, že můžeme upravit tzv. korelační koeficienty, které jsou pro vzorec spolehlivých srážek fixně stanoveny, na hodnoty získané měřením v konkrétních podmínkách. Poslední možností je *vzorec USDA*, tedy vzorec vyvinutý Odborem ochrany půdy amerického Ministerstva zemědělství. Tato poslední metoda je všeobecně nejpoužívanější a je doporučována i pro model CROPWAT (Smith, 1992); (FAO, 2010a).

Požadavky plodiny na zavlažování (PZ) se počítají jako rozdíl mezi nároky plodiny na vodu a efektivními srážkami:

$$PZ = NPV - S_{ef}$$

Pokud jsou efektivní srážky větší než nároky plodiny na vodu, pak jsou požadavky na zavlažování nulové. Evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) se bude rovnat minimální hodnotě evapotranspirace plodiny (ET_p) a efektivních srážek (S_{ef}). Evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) je rovna rozdílu mezi evapotranspirací plodiny (ET_p) a efektivními

srážkami (S_{ef}), případně je nulová, pokud jsou efektivní srážky větší než evapotranspirace plodiny:

$$ET_{zelená} = \min(ET_p, S_{ef})$$

$$ET_{modrá} = \max(0, ET_p - S_{ef})$$

Všechny toky vody jsou vyjadřovány v jednotkách mm/období pěstování.

3.2.1.3. Modul „zavlažovací plán“

Modul „zavlažovací plán“ je přesnější než první modul zmíněný výše. Přesto není o mnoho složitější. Tento modul nepracuje s konceptem efektivních srážek – místo toho zahrnuje do svých výpočtů bilanci půdní vlhkosti, přičemž sleduje změny v jejím obsahu během celého období pěstování plodiny. Díky tomu vyžaduje navíc data týkající se půdního typu. Vypočítanou evapotranspiraci plodiny nazýváme ET_u , upravenou (skutečnou) evapotranspirací. Upravená evapotranspirace plodiny může být menší než evapotranspirace plodiny ET_p , jelikož její výpočet zahrnujeme podmínky, které nejsou ideální (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 133). Spočítáme ji tak, že vynásobíme evapotranspiraci plodiny za optimálních podmínek ET_p koeficientem vodního stresu K_s :

$$ET_u = K_s \times ET_p = K_s \times K_p \times ET_0$$

Koeficient vodního stresu K_s popisuje, jaký efekt má nedostatek vody na evapotranspiraci plodiny. Pokud je v půdě dostatek vlhkosti a plodina vodním stresem netrpí, je $K_s = 1$, pokud je množství vody v půdě limitujícím faktorem, bude $K_s < 1$. Pro koeficient plodiny K_p počítá CROPWAT i v tomto modulu „zavlažovacího plánu“ se třemi hodnotami, tedy $K_{p,ini}$, $K_{p,mid}$, $K_{p,end}$.

Pro kalkulaci evapotranspirace zelené a modré vody můžeme využít dvě základní možnosti – můžeme předpokládat, že zemědělství nevyužívá žádné umělé zavlažování a plodiny získávají vodu pouze ze srážek. V tomto případě se bude evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) rovnat celkové evapotranspiraci plodiny ET_p a evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) bude nulová.

Pro simulaci evapotranspirace plodiny v podmínkách umělého zavlažování musíme blíže určit, jakým způsobem je plodina zavlažována. Model CROPWAT nabízí dvě standardní možnosti: zavlažování při dosažení kritického vyčerpání půdní vlhkosti nebo doplnění půdní vlhkosti na 100% využití kapacity pole. Volbou jednoho z těchto scénářů můžeme předpokládat, že se plodiny vyhnou stresu (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 134).

Výstupy počítačového modelu CROPWAT mají odlišnou terminologii, než která je pro vodní stopu běžně používána. Upravená evapotranspirace (ET_u) odpovídá hodnotám spadajícím pod termín „skutečné užití vody plodinou“³⁰, evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) odpovídá minimální hodnotě z „celkové čisté závlahy“³¹ a „skutečných požadavků na zavlažování“³². Evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) je rovna rozdílu mezi upravenou evapotranspirací plodiny (ET_u) a evapotranspirací modré vody ($ET_{modrá}$):

$$ET_{modrá} = \min(\text{celková čistá závlaha, skutečné požadavky na zavlažování})$$

$$ET_{zelená} = ET_u - ET_{modrá}$$

3.2.2. Datové zdroje nezbytné pro kalkulaci vodní stopy procesu pěstování zemědělských plodin

Abychom vypočítali modrou a zelenou vodní stopu procesu pěstování zemědělských plodin, potřebujeme určitá data týkající se klimatu, půdního typu, charakteristik plodiny a zemědělských výnosů. Pro výpočet šedé vodní stopy jsou nezbytné údaje o množství a typu použitých chemických látek, o velikosti jejich podílu, který se dostane z půdy do vodních zdrojů a o místních standardech kvality vody.

Jelikož by byla primární data nezbytná pro výpočet vodní stopy velmi náročná na sběr, jsou běžně využívána data sekundární, tedy údaje z místních i celosvětových databází.

³⁰ „actual water use by crop“

³¹ „total net irrigation“

³² „actual irrigation requirement“

3.2.2.1. Klimatické údaje

Pro výpočet vodní stopy je samozřejmě ideální využít klimatická data z té meteorologické stanice, která je nejvíce reprezentativní – tedy pokud možno z té, která se nachází v bezprostřední blízkosti zkoumané oblasti. Pokud je zkoumaná oblast příliš velká a/nebo se v ní nachází větší počet meteorologických stanic, máme dvě možnosti – počítat vodní stopu zkoumané plodiny pěstované v této oblasti pro údaje z každé meteorologické stanice zvlášť a výstupy následně vážit, nebo počítat s průměrnými hodnotami klimatických dat. Pro počítačový model CROPWAT 8.0 však můžeme rovněž využít klimatická data z klimatické databáze Organizace OSN pro výživu a zemědělství, CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010b). Data z této databáze jsou ve formátu, jenž je plně kompatibilní s programem CROPWAT 8.0. Nenajdeme zde však údaje pro jednotlivé roky, nýbrž průměrné hodnoty za 30 let. Tento fakt nás sice zdánlivě omezuje, chceme-li počítat vodní stopu plodiny v konkrétním roce, hodnoty dlouhodobého průměru nám však mohou pomoci vyvarovat se nestandardních výkyvů způsobených extrémně suchým či naopak extrémně deštivým rokem. Údaje z databáze CLIMWAT je rovněž možno použít jen pro některá nezbytná data, která nebylo možné získat z lokálních meteorologických stanic. Jinou možností je využít další databázi Organizace OSN pro výživu a zemědělství, LocClim I.I (FAO, 2005). V ní můžeme najít odhady průměrných hodnot pro některá klimatická data podle geografické polohy, kterou zadáme. Tato databáze je vhodná pro ty případy, kdy ve zkoumané oblasti nejsou žádné meteorologické stanice.

Mezi údaji pro výpočet evapotranspirace plodiny potřebujeme předně údaje o nadmořské výšce (m) a zeměpisných souřadnicích (stupně délky a šířky), díky čemuž může počítačový model upravit hodnoty atmosférického tlaku (kPa) a vypočítat mimozemskou radiaci (MJ/m²/den) a v některých případech též délku slunečního svitu (h). Dalšími nezbytnými údaji jsou minimální a maximální teplota vzduchu pro jednotlivé měsíce v roce (°C), vlhkost vzduchu (%), tlak par (kPa), rychlost větru (km/den nebo m/s) a radiace (v MJ/m²/den). Hodnoty radiace nejsou běžně dostupné, můžeme však použít výše zmíněnou databázi CLIMWAT 2.0.

3.2.2.2. Parametry plodiny

Metody setí a sklizně (tedy data výsevu a sklizně) budeme v ideálním případě získávat z údajů lokálních zemědělských výzkumných stanic. Tato data se totiž velmi liší zejména podle klimatických podmínek v dané oblasti, ale ovlivňují je rovněž jiné faktory, jako jsou místní zvyky a tradice, společenská struktura či politika (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 44). Také koeficienty plodiny K_p budeme ideálně získávat z místních zemědělských výzkumných ústavů. Jelikož však takováto lokální data většinou nejsou k dispozici, můžeme rovněž využít celosvětové databáze: Allen a kol. (1998), FAO (2010a) či USDA (1994).

3.2.2.3. Zemědělské výnosy

Zemědělské výnosy (v t/ha) je opět nejlepší získávat z místa výzkumu. V tomto případě jsou místní data poměrně snadno dostupná, zejména počítáme-li vodní stopu konkrétních zemědělských plodin v rámci státu, jako v našem případě. Údaje o výnosech pak můžeme získat ze státních statistických úřadů. Je ovšem třeba věnovat pozornost tomu, jakým způsobem byly výnosy měřeny – například zda bylo váženo suché či ještě nevyschlé zrno. Veřejně přístupná online je globální databáze Organizace OSN pro výživu a zemědělství (FAO, 2010c).

3.2.2.4. Půda

Pokud chceme použít v počítačovém modelu CROPWAT modul „*zavlažovací plán*“, musíme zadat údaje o půdních charakteristikách – celková dostupná půdní vlhkost (mm/m), podíl maximálního pronikání deště (mm/den), maximální kořenová hloubka (cm), výchozí spotřeba půdní vlhkosti (v % z celkové dostupné půdní vlhkosti) a výchozí dostupná půdní vlhkost (mm/m). Globální data o půdních charakteristikách můžeme najít v databázi ISRIC-WISE (Batjes, 2006), a to v úhlovém rozlišení 5 nebo 30 arc minut (což zhruba odpovídá mřížce o velikosti jedné buňky 10 a 50 km). Pokud můžeme charakterizovat půdu, na níž roste zkoumaná plodina, jako půdu lehkou, středně těžkou nebo těžkou, můžeme zvolit jedno z defaultních nastavení modelu CROPWAT.

3.2.2.5. Použití hnojiv

V ideálním případě využijeme místní data ze zemědělských výzkumných či statistických ústavů. Pokud tato data nejsou dostupná, můžeme využít databázi Organizace OSN pro výživu a zemědělství FertiStat (FAO, 2010d), která obsahuje spotřebu hnojiv za určité roky pro konkrétní plodiny. Údaje v databázi FertiStat pro jednotlivé státy však nejsou uvedeny pro stejné časové období, ale pouze pro ty roky, pro něž se podařilo získat data přímo z výzkumných či statistických ústavů daného státu.

3.2.2.6. Použití pesticidů

Opět v ideálním případě použijeme data z místních zemědělských výzkumných či statistických ústavů. Data pro použití pesticidů v Evropě najdeme v databázi Eurostatu (Eurostat, 2007), data pro Spojené státy můžeme nalézt v databázi CropLife Foundation (CropLifeFoundation, 2006).

3.2.2.7. Podíl vyluhování

Pro tzv. podíl vyluhování, tedy bezrozměrný koeficient α , který vyjadřuje podíl chemické látky, jenž rostliny nevyužijí a který se vyplaví do vodních rezervoárů, nejsou dostupné žádné databáze. Ve většině případů můžeme předpokládat, že tento podíl bude tvořit 10% aplikovaného množství chemických látek. Pro dusíkatá hnojiva je v kalkulacích šedé vodní stopy desetiprocentní podíl vyluhování běžně používán (Chapagain, Hoekstra et al., 2006).

3.2.2.8. Místní standardy kvality vody

Zde můžeme využít standardy kvality vody tak, jak jsou regulovány národní legislativou. V případě České republiky je to například Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb., která stanovuje kvalitu pitné vody. V Evropě sjednocuje tuto problematiku Evropská unie Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2008/105/ES o normách environmentální kvality v oblasti vodní politiky (EU, 2008). Pokud pro zkoumanou oblast nejsou k dispozici žádné místní standardy kvality vody a zároveň se

předpokládá, že voda v dané oblasti má být pitná, můžeme použít standardy kvality pitné vody tak, jak je stanoví například Evropská unie nebo Agentura pro ochranu životního prostředí Spojených států.

3.3. VÝPOČET VODNÍ STOPY PROCESU PĚSTOVÁNÍ ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN: PŘÍKLAD VÝPOČTU PRO PŠENICI, KUKUŘICI, CUKROVOU ŘEPU A RAJČATA PĚSTOVANÉ V ČESKÉ REPUBLICE

Pro názorný příklad výpočtu vodní stopy v podmínkách České republiky jsme si zvolili 4 zemědělské komodity, jejichž vývoz je pro Českou republiku charakteristický – pšenici, kukuřici, cukrovou řepu a rajčata. Kriteriem výběru ovšem bylo rovněž to, aby pro plodiny existovaly zahraniční výpočty vodní stopy, které bychom posléze mohli zkontrolovat s našimi výsledky. Díky tomu můžeme v závěru porovnat náročnost plodiny na vodu v podmínkách České republiky a jednotlivé komponenty vodní stopy, tedy vodní stopu modrou, zelenou a šedou, s odbornými světovými výzkumy.

To, že jsme pro výpočet zvolili celé území České republiky, v sobě nese *a priori* předpoklad nepřesnosti výpočtu. Důvodem ke zkreslení výsledku mohou být údaje o klimatických a půdních podmínkách, které jsou zprůměrované pro celé území republiky, tedy i pro oblasti, kde se dané plodiny nepěstují. To je jedním z důvodů, proč je mnoho odborných studií vodní stopy zemědělských plodin zaměřeno na menší území (Bulsink, Hoekstra et al., 2010; Chapagain and Orr, 2009; Aldaya, Martínez-Santos et al., 2010). Stejně tak může výsledek ovlivnit nedostatek potřebných dat z lokálních výzkumných stanic, která byla nahrazena daty z celosvětových databází Organizace OSN pro výživu a zemědělství.

3.3.1. Datová základna nezbytná pro výpočet modré, zelené a šedé vodní stopy – konkrétní databáze a zdroje dat pro Českou republiku

Pro výpočet zelené a modré vodní stopy pěstování vybraných zemědělských komodit jsme využili počítačový model CROPWAT 8.0 (Allen, Pereira et al., 1998).

Pomocí tohoto počítačového modelu jsme mohli vypočítat množství (zelené i modré) vody využité zkoumanými plodinami ($VVP_{modrá}$, $VVP_{zelená}$) ve dvou volitelných modulech: nejprve jsme počítali vodu využitou plodinou v modulu „nároky plodiny na vodu“, posléze též v modulu „zavlažovací plán“. Řídili jsme se manuálem k počítačovému modelu CROPWAT 8.0 (FAO, 2010a).

Pro oba případy jsme potřebovali klimatická data pro oblast České republiky. Údaje o maximálních a minimálních teplotách, vlhkosti vzduchu a srážkových úhrnech jsme získali z databází Českého hydrometeorologického ústavu. Data o průměrné rychlosti větru v jednotlivých měsících roku ani o délce slunečního svitu nebyla dostupná, proto jsme využili databázi Organizace OSN pro výživu a zemědělství CLIMWAT 2.0, která je kompatibilní s programem CROPWAT 8.0 (FAO, 2010b). Databáze CLIMWAT 2.0 nepracuje s údaji pro jednotlivé konkrétní roky, nýbrž s dlouhodobým průměrem za 30 let. Tato skutečnost nemusí být nutně na škodu, jelikož eliminuje možnost, že byl konkrétní zkoumaný rok v tomto ohledu výjimečný.

Údaje o koeficientech jednotlivých plodin jsme získali z celosvětové databáze (Allen, Pereira et al., 1998). Dny výsevu byly stanoveny na základě v České republice ustálených zemědělských postupů (Chochola, 2010; Křen, 2002).

Jelikož jsme si v programu CROPWAT 8.0 mohli zvolit defaultní nastavení pro jednotlivé zvolené plodiny (pšenici, kukuřici, cukrovou řepu i rajčata), počítačový model automaticky odhadl na základě námi zadaných údajů o dnech výsevu délku období pěstování plodiny, tedy délku jejího iniciačního období, vývojového období i období zrání, jsme nastavili v programu CROPWAT 8.0 defaultně pro každou zkoumanou plodinu.

Jelikož z půdních druhů převažují v České republice půdy středně těžké, tedy písčitohlinité až hlinité, které se vyskytují na plných 66 % povrchu našeho území³³ (Jandák, Prax et al., 2004: 115), mohli jsme v programu CROPWAT 8.0 zvolit defaultní nastavení pro výpočet vody využité plodinou ($VVP_{modrá}$, $VVP_{zelená}$) v podmínkách středně těžkých půd. Nezbytnými daty, která počítačový model vyžaduje, chceme-li počítat modrou a zelenou vodní stopu plodiny v modulu „zavlažovacího plánu“, jsou celková dostupná půdní vlhkost (mm/m), podíl maximálního pronikání deště (mm/den), maximální kořenová hloubka (cm), výchozí spotřeba půdní vlhkosti (v % z celkové dostupné půdní vlhkosti) a výchozí dostupná půdní vlhkost (mm/m).

³³ Lehké půdy v České republice tvoří 25%, půdy těžké pak 9%.

Do výpočtu šedé vodní stopy vybraných kulturních plodin jsme zahrnuli pouze látku, která se dostává do vody ze zemědělského sektoru v největším množství, tedy dusičnany³⁴. Tento postup uznává jako legitimní i Manuál pro výpočet vodní stopy (Hoekstra, Chapagain et al., 2009; Hoekstra, Chapagain et al. 2011). Statistická ročenka České republiky 2010 (Habartová, Novotná et al., 2011) neuvádí spotřebu hnojiv podle jednotlivých zemědělských plodin, pouze podle krajů, proto jsme použili údaje z globální databáze Organizace OSN pro výživu a zemědělství FertiStat (FAO, 2010d). FertiStat ovšem pro Českou republiku uvádí hodnoty jen pro rok 2000, kdy byla v ČR spotřeba dusíkatých hnojiv 67,4 kg/ha, tedy o něco menší než ve zkoumaném roce 2009, kdy se spotřeba dusíkatých hnojiv pohybovala na úrovni 78,1 kg/ha (Habartová, Novotná et al., 2011). Nepřesnosti ve výpočtu bude způsobovat rovněž fakt, že nejsou dostupné údaje pro hnojení rajčat, data jsou k dispozici pouze pro zeleninu jako celek.

3.3.2. Výpočet zelené a modré vody v modulu „nároky plodiny na vodu“

Na základě dat o maximálních a minimálních teplotách, vlhkosti vzduchu, rychlosti větru a délce slunečního svitu model CROPWAT 8.0 vypočítá evapotranspiraci referenční plodiny (též referenční evapotranspiraci) ET_0 ³⁵. Jelikož jsme zadávali klimatická data pro jednotlivé měsíce v roce, model nám může spočítat rozdílnou referenční evapotranspiraci plodin během těchto měsíců (automaticky přitom rozděluje jednotlivé měsíce do třech dekad, tedy do třech období po deseti dnech).

Abychom mohli vypočítat evapotranspiraci plodin za standardních podmínek (ET_p), musíme zadat údaje o koeficientech těchto plodin, a to pro všechna tři stádia jejich vývoje – tedy koeficient plodiny pro iniciační období ($K_{p,ini}$), střednědobé stádium ($K_{p,mid}$) a období zrání ($K_{p,end}$). Jelikož je evapotranspirace plodiny za standardních podmínek rovna násobku referenční evapotranspirace (ET_0) a koeficientu plodiny (K_p), získáme rovněž hodnoty pro jednotlivé měsíce roku, respektive pro jednotlivá období pěstování plodiny odpovídající jejímu vývojovému stádiu:

³⁴ Pro zkoumaný rok 2009 bylo v zemědělském sektoru v České republice užito celkem 278 198 tun minerálních hnojiv, přičemž celých 221 667 tun tvořila hnojiva dusíkatá (Zdroj: Český statistický úřad, www.czso.cz, 1.3.2011)

³⁵ Viz kapitola „Evapotranspirace“

$$ET_p = K_p \times ET_0$$

Protože modul „nároky plodiny na vodu“ počítačového modelu CROPWAT 8.0 vypočítává evapotranspiraci za standardních podmínek (tedy předpokládá, že plodiny nejsou sužovány chorobami, mají dostatečné příděly živin, jsou pěstovány na velkých polích s optimálními půdními vlastnostmi a za daných klimatických podmínek dosahují plné produkce), bude se evapotranspirace plodiny za standardních podmínek ET_p rovnat celkovým nárokům plodiny na vodu (NPV , v jednotkách mm/období):

$$NPV = ET_p$$

Chceme-li u zkoumané plodiny zjistit evapotranspiraci zelené vody, potřebujeme znát hodnoty efektivních srážek (S_{ef}). Hodnoty efektivních srážek nám vypočítal program CROPWAT na základě zadaných údajů o srážkových úhrnech během jednotlivých měsíců roku, a to pomocí jedné ze čtyř nabízených metod. My jsme pro náš výzkum zvolili metodu vyvinutou Odborem ochrany půdy amerického Ministerstva zemědělství (USDA SCS³⁶). Tato metoda je obecně nerozšířenější a nejpoužívanější a je rovněž doporučována metodikou FAO (FAO, 2010a).

Evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) je pak rovna minimální hodnotě evapotranspirace plodiny (ET_p) a efektivních srážek (S_{ef}):

$$ET_{zelená} = \min(ET_p, S_{ef})$$

Takto jsme nejprve zjistili evapotranspiraci zelené vody pro jednotlivé měsíce v roce, respektive pro jednotlivé časové úseky během celého období pěstování plodiny – abychom zjistili celkovou evapotranspiraci zelené vody, musíme spočítat sumu těchto jednotlivých evapotranspirací.

Evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) je rovna rozdílu mezi evapotranspirací plodiny (ET_p) a efektivními srážkami (S_{ef}), případně je nulová, pokud jsou efektivní srážky větší než evapotranspirace plodiny:

³⁶ Soil Conservation Service of the United States Department of Agriculture

$$ET_{modrá} = \max(0, ET_p - S_{ef})$$

Poté, co tímto způsobem získáme hodnoty evapotranspirace modré vody pro jednotlivé úseky celkového období pěstování dané plodiny, můžeme vypočítat celkovou evapotranspiraci modré vody jako sumu těchto jednotlivých hodnot.

Výstupy počítačového modelu CROPWAT 8.0 nám neudávají přímo hodnoty evapotranspirace zelené ani modré vody - model nám pouze rozdělí celkové období pěstování zkoumané plodiny na jednotlivé úseky, které se liší v hodnotách evapotranspirace plodiny za standardních podmínek (ET_p), efektivních srážek (S_{ef}) i požadavků plodiny na zavlažování. Z těchto hodnot můžeme výše zmíněným postupem vypočítat evapotranspiraci modré a zelené vody nejprve pro jednotlivé úseky a posléze pro celé období pěstování plodiny. Výstup programu CROPWAT 8.0 pro modul „nároky plodiny na vodu“ vypadá následovně:

Obrázek 3. Výstup počítačového programu CROPWAT 8.0 – modul „nároky plodiny na vodu“

CROP WATER REQUIREMENTS							
ETo station: Czech Hydromete. Ins RAIN station: Czech republic				Crop: Spring Wheat Planting date: 03/04			
Month	Decade	Stage	Kc coeff	ETc mm/day	ETc mm/dec	Eff. rain mm/dec	Irr. Req. mm/dec
Apr	1	Init	0.30	0.72	5.8	7.4	0.0
Apr	2	Init	0.30	0.91	9.1	2.9	6.3
Apr	3	Init	0.30	0.95	9.5	10.1	0.0
May	1	Deve	0.40	1.31	13.1	20.0	0.0
May	2	Deve	0.69	2.36	23.6	26.3	0.0
May	3	Deve	1.00	3.43	37.8	27.8	10.0
Jun	1	Mid	1.17	4.08	40.8	29.4	11.4
Jun	2	Mid	1.17	4.13	41.3	31.9	9.5
Jun	3	Mid	1.17	4.34	43.4	31.3	12.1
Jul	1	Mid	1.17	4.56	45.6	31.8	13.8
Jul	2	Late	1.04	4.24	42.4	32.3	10.2
Jul	3	Late	0.74	2.96	32.6	27.2	5.3
Aug	1	Late	0.43	1.74	17.4	21.4	0.0
					362.2	299.6	78.5

3.3.2.1. Zelená a modrá vodní stopa pšenice v modulu „nároky plodiny na vodu“

Abychom správně pochopili, jakým způsobem dospějeme k zelené a modré vodní stopě pšenice a ostatních zvolených plodin, je nezbytné vysvětlit si podrobně tabulku

uvedenou níže (**Tabulka 1**). Tuto tabulku s hodnotami pro pšenici tvoří výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0 (v té podobě, v níž je zobrazen výše – viz **Obrázek 3**. Výstup počítačového programu CROPWAT 8.0 – modul „nároky plodiny na vodu“), který jsme doplnili již dopočítanými hodnotami pro evapotranspiraci zelené a modré vody ($ET_{zelená}$, $ET_{modrá}$).

Jak vidíme v tabulce, program CROPWAT rozděluje jednotlivé měsíce na tři dekády. U každé dekády je uvedeno, v jakém stádiu vývoje se plodina momentálně nachází. Fáze jsou přitom rozděleny na iniciační fázi (nevyklíčené semeno – odpovídá koeficientu plodiny $K_{p,ini}$), vývojovou fázi (rostlinka klíčí a objevují se první listy), růstovou fázi (střednědobé stádium, během něhož rostlina dorůstá do dospělé velikosti a je schopna plodit – odpovídá koeficientu plodiny pro střednědobé stádium $K_{p,mid}$) a období zrání (plodina dospívá do stádia, kdy ji můžeme sklízet – odpovídá koeficientu $K_{p,end}$). Hodnoty koeficientu plodiny se liší nejen pro jednotlivé měsíce, ale mohou se různit rovněž v jednotlivých dekáдах měsíce – to souvisí s měnícími se charakteristikami plodin podle toho, v jakém stádiu vývoje se právě rostlina nachází.

Evapotranspirace plodiny za standardních podmínek odráží charakteristiky plodiny, jež jsou vyjádřeny právě koeficientem K_p . Proto budou rozdílné hodnoty tohoto koeficientu ovlivňovat hodnotu evapotranspirace plodiny. Podíváme-li se v tabulce pro pšenici například na třetí dekádu měsíce dubna, vidíme, že se pšenice právě začíná vyvíjet a její koeficient se změnil z $K_p = 0,30$ na koeficient $K_p = 0,38$. To má tedy vliv též na změnu hodnoty evapotranspirace plodiny. Napadne-li nás, že se hodnota evapotranspirace plodiny změnila i v předchozích dekáдах, kdy zůstal koeficient plodiny nezměněn, musíme mít stále na paměti, že na evapotranspiraci plodiny má vliv také referenční evapotranspirace ET_0 , jež odráží klimatické podmínky - maximální a minimální teploty, vlhkost vzduchu, srážkové úhrny, průměrnou rychlost větru a délku slunečního svitu, které se rovněž mění.

Podle údajů vypočítaných modelem CROPWAT jsme mohli dopočítat jednotlivé hodnoty pšenice pro evapotranspiraci zelené a modré vody. Evapotranspirace modré vody je rovna minimální hodnotě z evapotranspirace plodiny (ET_p) a efektivních srážek (S_{ef}). Abychom získali hodnoty evapotranspirace zelené vody pro jednotlivé měsíce (a jejich dekády) období pěstování plodiny, musíme vždy porovnat hodnoty evapotranspirace plodiny a efektivních srážek a identifikovat, která z těchto dvou hodnot je menší – ta bude hodnotou evapotranspirace zelené vody pro příslušnou dekádu příslušného měsíce.

Podíváme-li se opět do tabulky pro pšenici do třetího řádku (druhá dekáda dubna), je evapotranspirace plodiny $ET_p = 9,1$ a hodnota efektivních srážek $S_{ef} = 2,8$. Jelikož je minimální hodnotou $S_{ef} = 2,8$, je také evapotranspirace zelené vody pro druhou dekádu dubna $ET_{zelená} = 2,8$. Celkovou evapotranspiraci zelené vody pro celé období pěstování pšenice získáme součtem hodnot pro všechny dekády všech měsíců od doby setí po dobu sklizně.

Chceme-li vypočítat evapotranspiraci modré vody ($ET_{modrá}$), musíme nejprve u každého měsíce a jeho dekády zjistit rozdíl mezi evapotranspirací plodiny za standardních podmínek (ET_p) a efektivními srážkami S_{ef} . Evapotranspirace modré vody je pak rovna maximální hodnotě mezi tímto rozdílem a nulou - $ET_{modrá} = \max(0, ET_p - S_{ef})$. Podíváme-li se v tabulce například na první dekádu května (pátý řádek), vidíme, že $ET_p = 21,6$ a $S_{ef} = 20$. Tyto hodnoty od sebe odečteme: $ET_p - S_{ef} = 21,6 - 20 = 1,6$. Tento výsledek porovnáme s nulovou hodnotou a zvolíme vyšší číslo: $ET_{p,květen1} = \max(0; 1,6)$. Hodnota evapotranspirace modré vody pro první dekádu května je tedy 1,6. Celkovou evapotranspiraci modré vody pro celé období pěstování pšenice získáme opět součtem všech hodnot evapotranspirace modré vody pro všechny měsíce a jejich dekády od data setí do období sklizně.

Tabulka 1. Zelená a modrá vodní stopa pšenice na základě modulu „nároky plodiny na vodu“.

Měsíc	Dekáda	Vývojové stádium	K_p	ET_p mm/ den	ET_p mm/ obd	S_{ef} mm/ obd.	Závlaha mm/ obd.	$ET_{zelená}$ mm/ obd.	$ET_{modrá}$ mm/ obd.
Březen	3	Inic.	0,30	0,50	3,5	12,1	0,0	3,5	0
Duben	1	Inic.	0,30	0,72	7,2	9,3	0,0	7,2	0
Duben	2	Inic.	0,30	0,91	9,1	2,8	6,3	2,8	6,3
Duben	3	Vývoj	0,38	1,20	12,0	10,1	1,9	10,1	1,9
Květen	1	Vývoj	0,67	2,16	21,6	20,0	1,6	20,0	1,6
Květen	2	Vývoj	0,96	3,26	32,6	26,3	6,3	26,3	6,3
Květen	3	Růst	1,17	4,02	44,2	27,8	16,4	27,8	16,4
Červen	1	Růst	1,18	4,10	41,0	29,4	11,5	29,4	11,6
Červen	2	Růst	1,18	4,14	41,4	31,8	9,7	31,8	9,6
Červen	3	Růst	1,18	4,36	43,6	31,3	12,3	31,3	12,3
Červenec	1	Zrání	1,07	4,16	41,6	31,8	9,9	31,8	9,8
Červenec	2	Zrání	0,78	3,18	31,8	32,2	0,0	31,8	0
Červenec	3	Zrání	0,48	1,91	21,0	27,2	0,0	21,0	0
Srpen	1	Zrání	0,30	1,21	1,2	2,1	1,2	1,2	0
Souhrn					351,9	294,3	77,1	276,0	75,8

Jak vidíme v tabulce, evapotranspirace zelené vody pšenice činí 276,0 mm během celého období jejího pěstování. Evapotranspirace modré vody pšenice je 75,8 mm/období pěstování. Jelikož v modulu „nároky plodiny na vodu“ platí, že $NPV = ET_p$, pak zároveň platí, že:

$$NPV_{zelená} = ET_{zelená}$$

$$NPV_{modrá} = ET_{modrá}$$

Pro výpočet zelené a modré vodní stopy pšenice však potřebujeme znát hodnotu vody využitou plodinou (VVP), tedy objem vody, který je nezbytný k vyprodukování jednoho hektaru plodiny (v tomto případě pšenice). Abychom tento údaj získali, musíme hodnoty nároků plodiny na vodu ($NPV_{zelená}$, $NPV_{modrá}$), tedy hodnoty evapotranspirace modré i zelené vody (mm/období pěstování) vynásobit faktorem 10^{37} :

³⁷ Faktor 10 slouží k přepočítání hloubky vody v mm (vodní sloupec) na objem vody v půdním povrchu v m³/ha

$$VVP_{zelená} = NPV_{zelená} \times 10 = ET_{zelená} \times 10 = 276,0 \times 10 = 2760$$

$$VVP_{modrá} = NPV_{modrá} \times 10 = ET_{modrá} \times 10 = 75,8 \times 10 = 758$$

Máme tedy vypočítány hodnoty zelené a modré vody využití plodinou (v tomto případě pšenice) v modulu „nároky plodiny na vodu“ v jednotkách m³/ha. Abychom vypočítali zelenou a modrou vodní stopu pšenice ($VS_{pšenice}$, m³/t), musíme znát zemědělské výnosy pšenice (V , t/ha), které dosadíme do vzorce:

$$VS_{pšenice,zelená} = \frac{VVP_{zelená}}{V}$$

$$VS_{pšenice,modrá} = \frac{VVP_{modrá}}{V}$$

Jelikož byly zemědělské výnosy pšenice pro rok 2009 5,24 t/ha, vypočítáme zelenou a modrou vodní stopu následovně:

$$VS_{pšenice,zelená} = \frac{2760}{5,24} = 526,7 \text{ m}^3/\text{t}$$

$$VS_{pšenice,modrá} = \frac{758}{5,24} = 144,7 \text{ m}^3/\text{t}$$

Analogicky budeme postupovat i v případě dalších zkoumaných plodin, tedy kukuřice, cukrové řepy a rajčat. Jelikož jsme si již vysvětlili tabulku i postup, kterým dopočítáme hodnoty evapotranspirace zelené a modré vody ($ET_{zelená}$, $ET_{modrá}$) i objem vody využití plodinou (VVP), budeme se v následujících kapitolách věnovat čistě jen konkrétnímu výpočtu zelené a modré vody příslušné zemědělské plodiny.

3.3.2.2. Zelená a modrá vodní stopa kukuřice v modulu „nároky plodiny na vodu“

Evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) kukuřice je 280,1 mm/období pěstování, evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) je 115,7 mm/období pěstování. Z těchto hodnot vypočítáme vodu využitou plodinou:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 280,1 \times 10 = 2801 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 115,7 \times 10 = 1157 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Výnosy kukuřice (V) pro uvažovaný rok 2009 činily 8,45 t/ha. Doplníme-li do vzorce hodnoty pro vodu využitou plodinou a pro výnosy kukuřice, můžeme spočítat zelenou a modrou vodní stopu:

$$VS_{kukuřice,zelená} = \frac{2801}{8,45} = 331,5 \text{ m}^3/\text{t}$$

$$VS_{kukuřice,modrá} = \frac{1157}{8,45} = 136,9 \text{ m}^3/\text{t}$$

Tabulka 2. Zelená a modrá vodní stopa kukuřice na základě modulu „nároky plodiny na vodu“.

Měsíc	Dekáda	Vývojové stádium	K_p	ET_p mm/ den	ET_p mm/ obd	S_{ef} mm/ obd.	Závlaha mm/ obd.	$ET_{zelená}$ mm/ obd.	$ET_{modrá}$ mm/ obd.
Duben	3	Inic.	0,30	0,95	4,7	5,1	0,0	4,7	0,0
Květen	1	Inic.	0,30	0,97	9,7	20,0	0,0	9,7	0,0
Květen	2	Vývoj	0,34	1,15	11,5	26,3	0,0	11,5	0,0
Květen	3	Vývoj	0,59	2,03	22,3	27,8	0,0	22,3	0,0
Červen	1	Vývoj	0,87	3,01	30,1	29,4	0,7	29,4	0,7
Červen	2	Růst	1,13	3,96	39,6	31,8	7,9	31,8	7,8
Červen	3	Růst	1,22	4,52	45,2	31,3	13,9	31,3	13,9
Červenec	1	Růst	1,22	4,74	47,4	31,8	15,7	31,8	15,6
Červenec	2	Růst	1,22	4,97	49,7	32,2	17,5	32,2	17,5
Červenec	3	Zrání	1,21	4,88	53,7	27,2	26,4	27,2	26,5
Srpen	1	Zrání	1,20	4,06	40,6	21,4	19,2	21,4	19,2
Srpen	2	Zrání	0,71	2,87	28,7	16,9	11,9	16,9	11,8
Srpen	3	Zrání	0,45	1,58	12,6	9,9	0	9,9	2,7
Souhrn					396,0	311,0	113,1	280,1	115,7

3.3.2.3. Zelená a modrá vodní stopa cukrové řepy v modulu „nároky plodiny na vodu“

Jak vidíme v tabulce níže (Tabulka 3), hodnota evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) cukrové řepy je 334,9 mm/období pěstování, evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) pak je 139,7 mm/období pěstování. Vodu využitou plodinou (VVP) vypočítáme:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 334,9 \times 10 = 3349 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 139,7 \times 10 = 1397 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Výnosy cukrové řepy (V) pro uvažovaný rok 2009 činily 57,91 t/ha. Doplníme-li do vzorce hodnoty pro vodu využitou plodinou a pro výnosy cukrové řepy, můžeme spočítat zelenou a modrou vodní stopu:

$$VS_{cukr.řepa,zelená} = \frac{3349}{57,91} = 57,8 \text{ m}^3/\text{t}$$

$$VS_{cukr.řepa,modrá} = \frac{1397}{57,91} = 24,1 \text{ m}^3/\text{t}$$

Tabulka 3. Zelená a modrá vodní stopa cukrové řepy na základě modulu „nároky plodiny na vodu“.

Měsíc	Dekáda	Vývojové stádium	K_p	ET_p mm/ den	ET_p mm/ obd	S_{ef} mm/ obd.	Závlaha mm/ obd.	$ET_{zelená}$ mm/ obd.	$ET_{modrá}$ mm/ obd.
Duben	1	Inic.	0,35	0,84	6,7	7,4	0,0	6,7	0,0
Duben	2	Inic.	0,35	1,06	10,6	2,8	7,8	2,8	7,8
Duben	3	Vývoj	0,36	1,15	11,5	10,1	1,4	10,1	1,4
Květen	1	Vývoj	0,56	1,82	18,2	20,0	0,0	18,2	0,0
Květen	2	Vývoj	0,81	2,75	27,5	26,3	1,2	26,3	1,2
Květen	3	Vývoj	1,07	3,68	40,5	27,8	12,7	27,8	12,7
Červen	1	Růst	1,22	4,24	42,4	29,4	13,0	29,4	13
Červen	2	Růst	1,22	4,29	42,9	31,8	11,1	31,8	11,1
Červen	3	Růst	1,22	4,51	45,1	31,3	13,8	31,3	13,8
Červenec	1	Růst	1,22	4,74	47,4	31,8	15,6	31,8	15,6
Červenec	2	Růst	1,22	4,96	49,6	32,2	17,4	32,2	17,4
Červenec	3	Zrání	1,17	4,70	51,7	27,2	24,5	27,2	24,5
Srpen	1	Zrání	1,06	4,30	43,0	21,4	21,6	21,4	21,6
Srpen	2	Zrání	0,96	3,88	38,8	16,9	21,9	16,9	21,9
Srpen	3	Zrání	0,86	2,99	32,9	13,6	19,3	13,6	19,3
Září	1	Zrání	0,75	2,20	19,8	7,4	11,6	7,4	12,4
Souhrn					528,6	337,5	192,8	334,9	139,7

3.3.2.4. Zelená a modrá vodní stopa rajčat v modulu „nároky plodiny na vodu“

Evapotranspirace zelené vody ($ET_{zelená}$) rajčat činí 304,5 mm/období pěstování, evapotranspirace modré vody ($ET_{modrá}$) je 181,1 mm/období pěstování. Vypočítáme vodu využitou plodinou:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 304,5 \times 10 = 3045 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 181,1 \times 10 = 1811 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Výnosy rajčat (V) pro uvažovaný rok 2009 činily 33,38 t/ha. Doplníme-li do vzorce hodnoty pro vodu využitou plodinou a pro výnosy rajčat, můžeme spočítat zelenou a modrou vodní stopu:

$$VS_{rajčata,zelená} = \frac{3045}{33,38} = 91,2 \text{ m}^3/\text{t}$$

$$VS_{rajčata,modrá} = \frac{1811}{33,38} = 54,3 \text{ m}^3/\text{t}$$

Tabulka 4. Zelená a modrá vodní stopa rajčat na základě modulu „nároky plodiny na vodu“.

Měsíc	Dekáda	Vývojové stádium	K_p	ET_p mm/ den	ET_p mm/ obd	S_{ef} mm/ obd.	Závlaha mm/ obd.	$ET_{zelená}^m$ mm/ obd.	$ET_{modrá}$ mm/ obd.
Květen	1	Inic.	0,60	1,95	19,5	20,0	0,0	19,5	0,0
Květen	2	Inic.	0,60	2,04	20,4	26,3	0,0	20,4	0,0
Květen	3	Vývoj	0,60	2,07	22,8	27,8	0,0	22,8	0,0
Červen	1	Vývoj	0,69	2,41	24,1	29,4	0,0	24,1	0,0
Červen	2	Vývoj	0,83	2,93	29,3	31,8	0,0	29,3	0,0
Červen	3	Vývoj	0,97	3,60	36,0	31,3	4,7	31,3	4,7
Červenec	1	Růst	1,11	4,33	43,3	31,8	11,5	31,8	11,5
Červenec	2	Růst	1,16	4,74	47,4	32,2	15,1	32,2	15,2
Červenec	3	Růst	1,16	4,68	51,5	27,2	24,3	27,2	24,3
Srpen	1	Růst	1,16	4,71	47,1	21,4	25,7	21,4	25,7
Srpen	2	Růst	1,16	4,69	46,9	16,9	30,1	16,9	30,0
Srpen	3	Zrání	1,12	3,93	43,2	13,6	29,6	13,6	29,6
Září	1	Zrání	1,00	2,94	29,4	8,3	21,1	8,3	21,1
Září	2	Zrání	0,89	2,15	21,5	3,8	17,7	3,8	17,7
Září	3	Zrání.	0,82	1,60	3,2	1,9	3,2	1,9	1,3
Souhrn					485,6	323,5	183,0	304,5	181,1

3.3.3. Výpočet zelené a modré vody v modulu „zavlažovací plán“

V druhém modulu počítačového programu CROPWAT 8.0 můžeme počítat jak evapotranspiraci plodiny za optimálních (ideálních) podmínek, tak evapotranspiraci plodiny za podmínek, které optimální nejsou. Tento modul je založen na denní bilanci půdní vlhkosti a vypočítanou evapotranspiraci nazýváme evapotranspirací upravenou (ET_u).

Aby mohl počítačový model pracovat s denní bilancí půdní vlhkosti, museli jsme zadat kromě nezbytných klimatických podmínek a charakteristik plodiny též údaje o půdním typu. Jelikož jsou půdy v České republice ze 66% půdami středně těžkými, mohli

jsme zvolit defaultní nastavení pro tento typ půdy³⁸. Abychom simulovali podmínky zavlažovaného hospodářství a vyhnuli se tomu, aby byly plodiny vystaveny stresu, nastavili jsme v modelu CROPWAT možnost „zavlažovat při kritickém vyčerpání půdní vlhkosti“.

Upravená evapotranspirace plodiny během období pěstování (ET_u) odpovídá ve výstupu programu CROPWAT 8.0 hodnotě uvedené pod termínem „skutečná voda využitá plodinou“. Evapotranspiraci modré vody ($ET_{modrá}$) jsme zjistili určením minimální hodnoty z „celkové čisté závlahy“ a „skutečných požadavků na zavlažování“. Evapotranspiraci zelené vody ($ET_{zelená}$) jsme vypočítali jako rozdíl mezi celkovou upravenou evapotranspirací (ET_u) a evapotranspirací modré vody ($ET_{modrá}$):

$$ET_{modrá} = \min(\text{celková čistá závlaha, skutečné požadavky na zavlažování})$$

$$ET_{zelená} = ET_u - ET_{modrá}$$

³⁸ Pro účely diplomové práce, v níž počítáme hodnoty vodní stopy vybraných plodin pro celou Českou republiku, tato data postačují. V ideálním případě by ale bylo třeba identifikovat oblasti, v nichž se jednotlivé plodiny pěstují, a následně charakterizovat půdní typy těchto oblastí a zjistit příslušná data o půdě. To by ovšem svou náročností přesahovalo požadavky diplomové práce.

Obrázek 4. Výstup počítačového programu CROPWAT 8.0 – modul „zavlažovací plán“

CROP IRRIGATION SCHEDULE

ETC station: Czech Hydromete. Crop: Spring Wheat Planting date: 25/03
 Rain station: Czech republic Soil: Medium (loam) Harvest date: 01/08

Yield red.: 0.0 %

Crop scheduling options
 Timing: Irrigate at 100 % depletion
 Application: Refill to 100 % of field capacity
 Field eff. 70 %

Table format: Irrigation schedule

Date	Day	Stage	Rain mm	Kc Fract.	Eta %	Depl %	Net Irr	Deficit	Loss	Gr. Irr	Flow
							mm	mm	mm	mm	l/s/ha
1 Aug	End	End	0.0	1.00	0	0					

Totals:

Total gross irrigation	0.0 mm	Total rainfall	343.6 mm
Total net irrigation	0.0 mm	Effective rainfall	329.6 mm
Total irrigation losses	0.0 mm	Total rain loss	14.0 mm
Actual water use by crop	350.7 mm	Moist deficit at harvest	21.1 mm
Potential water use by crop	350.7 mm	Actual irrigation requirement	21.1 mm
Efficiency irrigation schedule	- %	Efficiency rain	95.9 %
Deficiency irrigation schedule	0.0 %		

Yield reductions:

Stagelabel	A	B	C	D	Season
Reductions in ETC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
Yield response factor	0.40	0.60	0.80	0.40	1.15
Yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
Cumulative yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %

3.3.3.1. Zelená a modrá vodní stopa pšenice v modulu „zavlažovací plán“

Podíváme-li se výše na Obrázek 4., který znázorňuje výstup programu CROPWAT 8.0 v modulu „zavlažovací plán“ právě pro pšenici, uvidíme všechny hodnoty, které potřebujeme pro výpočet zelené a modré vodní stopy. Údaje „total net irrigation“ (celková čistá závlaha) a „actual irrigation requirement“ (skutečné požadavky na zavlažování) jsou nezbytné pro určení evapotranspirace modré vody. Údaj „actual water use by crop“ odpovídá hodnotě celkové upravené evapotranspirace plodiny (ET_u), která je nezbytná pro výpočet evapotranspirace zelené vody. Dosadíme-li příslušné hodnoty z výstupu modelu

CROPWAT 8.0 v modulu „zavlažovací plán“ (pro pšenici viz **Obrázek 4** či **Příloha 5**), dostaneme tyto hodnoty:

$$ET_u = 350 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{modrá} = 21,1 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{zelená} = ET_u - ET_{modrá} = 350 - 21,1 = 329,6 \text{ mm/období pěstování}$$

Abychom vypočítali zelenou a modrou vodu využitou plodinou, musíme převést hodnoty vodního sloupce v mm na m³/ha:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 329,6 \times 10 = 3296 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 21,1 \times 10 = 211 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Pro výpočet zelené a modré vodní stopy pšenice v modulu „zavlažovací plán“ musíme do vzorečku dosadit hodnoty výnosu pšenice pro zkoumaný rok 2009, tedy 5,24 t/ha:

$$VS_{pšenice,zelená} = \frac{VVP_{zelená}}{V} = \frac{3296}{5,24} = 629 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VS_{pšenice,modrá} = \frac{VVP_{modrá}}{V} = \frac{211}{5,24} = 40,27 \text{ m}^3/\text{ha}$$

3.3.3.2. Zelená a modrá vodní stopa kukuřice v modulu „zavlažovací plán“

Údaje o skutečné evapotranspiraci plodiny (ET_u) a údaje o celkové čisté závlaze a skutečných požadavcích na zavlažování vyčteme z tabulky modelu CROPWAT 8.0 pro kukuřici (viz **Příloha 6**). Na jejich základě zjistíme tyto hodnoty:

$$ET_u = 394,5 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{modrá} = 85,8 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{zelená} = ET_u - ET_{modrá} = 394,5 - 85,8 = 308,7 \text{ mm/období pěstování}$$

Evapotranspiraci zelené a modré vody převedeme na hodnoty vody využitě plodinou, tedy na údaj odpovídající jednotkám m³/ha:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 308,7 \times 10 = 3087 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 85,8 \times 10 = 858 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Víme-li, že výnos kukuřice pro rok 2009 byl 8,45 t/ha, můžeme vypočítat zelenou a modrou vodní stopu kukuřice následovně:

$$VS_{kukuřice,zelená} = \frac{VVP_{zelená}}{V} = \frac{3087}{8,45} = 365,3 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VS_{kukuřice,modrá} = \frac{VVP_{modrá}}{V} = \frac{858}{8,45} = 101,5 \text{ m}^3/\text{ha}$$

3.3.3.3. Zelená a modrá vodní stopa cukrové řepy v modulu „zavlažovací plán“

Údaje o skutečné evapotranspiraci cukrové řepy (ET_u) a údaje o celkové čisté závlaze a skutečných požadavcích na zavlažování vyčteme z tabulky modelu CROPWAT 8.0 pro cukrovou řepu (viz **Příloha 7**). Na základě těchto hodnot vypočítáme stejně jako v předchozích případech evapotranspiraci zelené vody:

$$ET_u = 526,4 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{modrá} = 140,4 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{zelená} = ET_u - ET_{modrá} = 526,4 - 140,4 = 386,0 \text{ mm/období pěstování}$$

Evapotranspiraci zelené a modré vody převedeme na zelenou a modrou vodu využitou plodinou v m³/ha:

$$VVP_{zelená} = ET_{zelená} \times 10 = 386,0 \times 10 = 3860 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{modrá} = ET_{modrá} \times 10 = 140,4 \times 10 = 1404 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Do vzorce pro výpočet vodní stopy cukrové řepy dosadíme její výnosy pro rok 2009, tedy 57,91 t/ha:

$$VS_{\text{cukr.řepa,zelená}} = \frac{VVP_{\text{zelená}}}{V} = \frac{3860}{57,91} = 66,7 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VS_{\text{cukr.řepa,modrá}} = \frac{VVP_{\text{modrá}}}{V} = \frac{1404}{57,91} = 24,2 \text{ m}^3/\text{ha}$$

3.3.3.4. Zelená a modrá vodní stopa rajčat v modulu „zavlažovací plán“

Počítačový program CROPWAT nám pro rajčata vypočítal následující hodnoty (viz **Příloha 8**), s jejichž pomocí dopočítáme evapotranspiraci zelené vody:

$$ET_u = 483,8 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{\text{modrá}} = 125,7 \text{ mm/období pěstování}$$

$$ET_{\text{zelená}} = ET_u - ET_{\text{modrá}} = 483,8 - 125,7 = 358,1$$

Evapotranspiraci zelené a modré vody převedeme na zelenou a modrou vodu využitou plodinou:

$$VVP_{\text{zelená}} = ET_{\text{zelená}} \times 10 = 358,1 \times 10 = 3581 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VVP_{\text{modrá}} = ET_{\text{modrá}} \times 10 = 125,7 \times 10 = 1257 \text{ m}^3/\text{ha}$$

A dosadíme hodnoty pro výnos rajčat za rok 2009, tedy $V = 33,38 \text{ t/ha}$:

$$VS_{\text{rajčata,zelená}} = \frac{VVP_{\text{zelená}}}{V} = \frac{3581}{33,38} = 107,3 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$VS_{\text{rajčata,modrá}} = \frac{VVP_{\text{modrá}}}{V} = \frac{1257}{33,38} = 37,6 \text{ m}^3/\text{ha}$$

3.3.4. Porovnání zelené a modré vodní stopy vybraných zemědělských plodin vypočítaných v obou modulech programu CROPWAT 8.0

Abychom se mohli blíže podívat na zelenou a modrou vodní stopu čtyř vybraných zemědělských plodin a abychom mohli porovnat údaje získané ze dvou modulů počítačového programu CROPWAT 8.0, zadáme si tyto údaje do tabulky (**Tabulka 5**).

Z tabulky lépe vyčteme rozdíly mezi hodnotami evapotranspirace zelené a modré vody počítané v modulu „nároky plodiny na vodu“ a těmi, jež byly počítány v modulu „zavlažovací plán“.

Tabulka 5. Výsledné hodnoty jednotlivých komponentů zelené a modré vodní stopy pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat pěstovaných v České republice (porovnání výsledků modulu „nároky plodiny na vodu“ a „zavlažovací plán“)

Pšenice

Modul programu CROPWAT	$ET_{zelená}$	$ET_{modrá}$	$VVP_{zelená}$	$VVP_{modrá}$	$VS_{zelená}$	$VS_{modrá}$	VS_{tot}
Nároky plodiny na vodu	276,0	75,8	2760	758	526,7	144,7	671
Zavlažovací plán	329,6	21,1	3296	211	629,0	40,3	670

Kukuřice

Modul programu CROPWAT	$ET_{zelená}$	$ET_{modrá}$	$VVP_{zelená}$	$VVP_{modrá}$	$VS_{zelená}$	$VS_{modrá}$	VS_{tot}
Nároky plodiny na vodu	280,1	115,7	2801	1157	331,5	136,9	468
Zavlažovací plán	308,7	85,8	3087	858	365,3	101,5	467

Cukrová řepa

Modul programu CROPWAT	$ET_{zelená}$	$ET_{modrá}$	$VVP_{zelená}$	$VVP_{modrá}$	$VS_{zelená}$	$VS_{modrá}$	VS_{tot}
Nároky plodiny na vodu	334,9	139,7	3349	1397	57,8	24,1	82
Zavlažovací plán	386,0	140,4	3860	1404	66,7	24,2	90

Rajčata

Modul programu CROPWAT	$ET_{zelená}$	$ET_{modrá}$	$VVP_{zelená}$	$VVP_{modrá}$	$VS_{zelená}$	$VS_{modrá}$	VS_{tot}
Nároky plodiny na vodu	304,5	181,1	3045	1811	91,2	35,4	127
Zavlažovací plán	358,1	125,7	3581	1257	107,3	37,6	145

V tabulce máme v posledním sloupci uveden součet zelené a modré vodní stopy konkrétní plodiny (VS_{tot}), a to pro oba moduly. Vidíme, že v případě pšenice a kukuřice se tento součet pro oba moduly téměř shoduje, zatímco u cukrové řepy a rajčat je tento součet vodních stop vyšší v modulu zavlažovacího plánu. To znamená, že v případě cukrové řepy a rajčat vyvstává důležitost omezení, jež jsou důsledkem bilance půdní vlhkosti. S touto modul „nároky plodiny na vodu“ nepočítá. Modul „zavlažovací plán“ však uvažuje množství půdní vlhkosti a nechává plodinu vyčerpat vodu až na úroveň kritické hladiny, kdy je třeba zavlažit pole na původní úroveň půdní vlhkosti. Výpočty modulu „zavlažovací plán“ jsou tedy přesnější, jelikož tento modul díky kalkulaci půdních charakteristik lépe vystihuje, že je plodina ve svém růstu omezena půdními podmínkami (zatímco modul „nároky plodiny na vodu“ předpokládá, že se rostlina vyvíjí v optimálních podmínkách). To je vidět i v případě pšenice a kukuřice. V jejich případě je sice součet modré i zelené vodní stopy v obou modulech v podstatě identický, když se ale podíváme na podíly zelené a modré vodní stopy, uvidíme, že se v jednotlivých modulech liší – v modulu „nároky plodiny na vodu“ je zelená vodní stopa nižší, než v modulu „zavlažovací plán“ (a to proto, že modul „nároky plodiny na vodu“ nepočítá s tím, že rostlina může využívat nejen srážkovou vodu, ale též půdní vlhkost – vlivem toho předpokládá vyšší požadavky na zavlažování). Jelikož jsme tedy dospěli k závěru, že jsou hodnoty zelené a modré vodní stopy získané modulem „zavlažovací plán“ přesnější, budeme nadále ve výpočtu celkové vodní stopy pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat pracovat právě s nimi.

Neměli bychom zapomenout, že jsme dosud pracovali pouze s vodou, která odkazuje na evapotranspiraci plodiny. Vynechali jsme objem zelené a modré vody, která je vtělená do sklizené plodiny. Vezmeme-li však v úvahu, že i v případě rajčat, která běžně obsahují až 95% vody, tvoří objem této vtělené vody méně než 1% z množství zelené a modré vody ztracené evapotranspirací, můžeme se řídit metodikou navrženou Hoekstrou a Chapagainem a vtělenou vodu z výpočtu celkové vodní stopy vyloučit (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 43).

3.3.5. Výpočet šedé vodní stopy

Šedou vodní stopu tvoří objem vody, která je nezbytná k asimilaci znečišťujících látek vypouštěných do vodního tělesa. Počítá se jako podíl množství znečišťujících látek a rozdílu mezi maximální a přirozenou koncentrací těchto látek ve vodním tělese.

Abychom tedy vypočítali šedou vodní stopu pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat, potřebovali jsme znát množství znečišťujících látek, které se vlivem pěstování těchto konkrétních plodin dostane do vodních zásobáren. Jelikož většinu chemických látek používaných v zemědělství tvoří dusíkatá hnojiva, počítali jsme šedou vodní stopu vybraných plodin právě pro ně. Při výpočtu je nutné mít na paměti, že z celkového množství látek aplikovaných během zemědělské produkce se do vody dostane pouze určitá část, která není využita plodinami a je z půdy vyplavena. V našem výzkumu jsme předpokládali, že se do vodních těles dostane 10% aplikované množství dusíkatých hnojiv (značíme koeficientem α) (Hoekstra, Chapagain et al., 2011: 142). Jako maximální přípustnou koncentraci dusíku ve vodním tělese jsme uvažovali 10 mg/l, přirozenou koncentraci jsme pro nedostatek odpovídajících dat uvažovali jako nulovou. Hodnoty pro množství aplikovaných dusíkatých látek (polutantů, P) pro jednotlivé plodiny a pro výnosy těchto plodin jsou následující:

Pšenice – $P = 104$ kg/ha; $V = 5,24$ t/ha

Kukuřice – $P = 83$ kg/ha; $V = 8,45$ t/ha

Cukrová řepa – $P = 90$ kg/ha; $V = 57,91$ t/ha

Rajčata (zelenina) – $P = 109$ kg/ha; $V = 33,38$ t/ha

Výše uvedené hodnoty jsme posléze dosadili do vzorce pro výpočet šedé vodní stopy:

Pšenice:

$$VS_{pšenice.šedá} = \frac{(P \times \alpha) / (k_{max} - k_{nat})}{V} = \frac{(104 \times 0,1) / (0,01 - 0)}{5,24} = 198,5 \text{ m}^3/\text{t}$$

Kukuřice:

$$VS_{kukuřice.šedá} = \frac{(P \times \alpha) / (k_{max} - k_{nat})}{V} = \frac{(83 \times 0,1) / (0,01 - 0)}{8,45} = 98,2 \text{ m}^3/\text{t}$$

Cukrová řepa:

$$VS_{cukr.řepa.šedá} = \frac{(P \times \alpha) / (k_{max} - k_{nat})}{V} = \frac{(90 \times 0,1) / (0,01 - 0)}{57,91} = 15,5 \text{ m}^3/\text{t}$$

Rajčata:

$$VS_{rajčata.šedá} = \frac{(P \times \alpha) / (k_{max} - k_{nat})}{V} = \frac{(109 \times 0,1) / (0,01 - 0)}{33,38} = 32,7 \text{ m}^3/\text{t}$$

3.4. CELKOVÁ VODNÍ STOPA VYBRANÝCH ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN A JEJÍ ZASAZENÍ DO MEZINÁRODNÍHO KONTEXTU

Celkovou vodní stopu procesu pěstování vybraných zemědělských plodin (VS_{proc}) vypočítáme tak, že sečteme její jednotlivé komponenty, tedy zelenou, modrou a šedou vodní stopu:

Tabulka 6. Celková vodní stopa zkoumaných zemědělských plodin a její jednotlivé komponenty

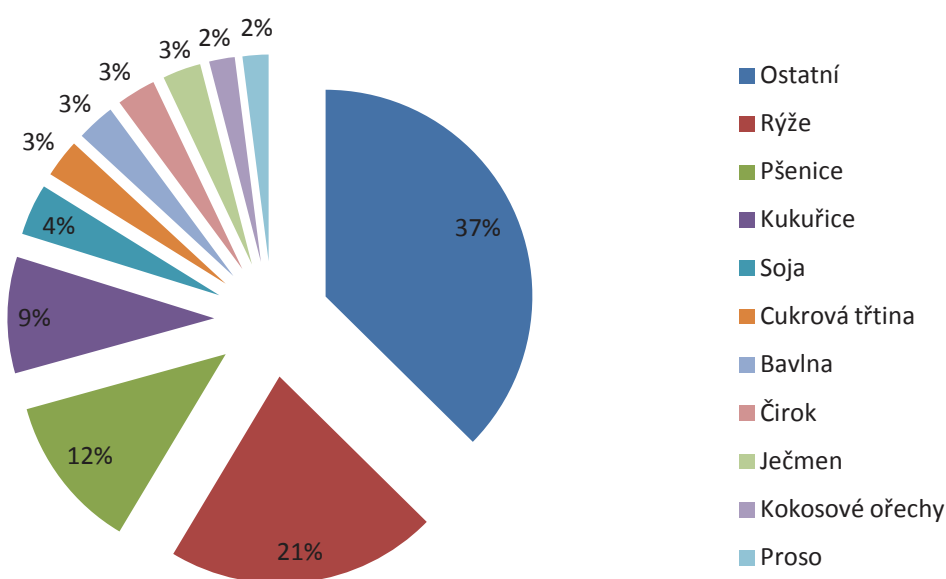
Plodina	$VS_{zelená}$ (m ³ /t)	$VS_{modrá}$ (m ³ /t)	$VS_{šedá}$ (m ³ /t)	VS_{proc} (m ³ /t)
Pšenice	629,0	40,3	198,5	867,8
Kukuřice	365,3	101,5	98,2	565,0
Cukrová řepa	66,7	24,2	15,5	106,4
Rajčata	107,3	37,6	32,7	177,6

Nejvyšší vodní stopu má dle našich výpočtů pšenice, konkrétně 867 m³/t. Kukuřice má vodní stopu nižší - je rovna 565,0 m³/t. Vodní stopa rajčat je se 177,6 m³/t téměř pětkrát menší než vodní stopa pšenice a cukrová řepa má s hodnotou 106,4 m³/t dokonce osmkrát menší vodní stopu než pšenice.

Česká republika je podle tzv. „*Falkenmarkova indikátoru*“ (neboli „*indexu vodního stresu*“) charakterizována jako oblast mírného vodního stresu. To znamená, že vodní zdroje nacházející se na území naší republiky umožňují přivlastňovat si méně než 1700 m³ vody na osobu ročně (Rijsberman, 2004). Toto množství je stanoveno jako hraniční hodnota – je to množství, které uspokojí minimální požadavky jedince na vodu potřebnou v domácnosti a nezbytnou k zajištění potravy a ostatních statků a služeb, které spotřebovává. Za těchto podmínek by se Česká republika měla zaměřit spíše na dovoz virtuální vody, případně se snažit o to, aby její bilance vývozu a dovozu virtuální vody byla vyrovnaná. Vzhledem k tomu, že zejména pšenice a kukuřice tvoří hlavní zemědělské vývozní artikly České republiky, měli bychom se zaměřit na to, jaká je efektivita jejich

pěstování v našich podmínkách. Abychom zbytečně neexportovali virtuální vodu a zachovali si jistou vodní soběstačnost a nezávislost, měli bychom exportovat pouze produkty a plodiny, které jsme schopni vyrobit či vypěstovat s relativně nízkou vodní spotřebou. Porovnáme-li vodní stopu zemědělských komodit, které Česká republika nejvíce vyváží, s vodní stopou stejných plodin vypěstovaných v jiných státech, můžeme zjistit, nakolik je naše zemědělská produkce efektivní a zda je tedy vývoz těchto komodit z hlediska vodního managementu žádoucí.

Obrázek 5. Podíl jednotlivých plodin na celkové vodní stopě pěstování plodin



(Zdroj: Hoekstra, A. Y. and A. K. Chapagain (2007). "Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern." Water Resource Management)

Zemědělské plodiny, které jsme si pro náš výzkum zvolili, nejsou pro výzkum vhodné pouze z toho důvodu, že patří mezi nejvíce vyvážené plodiny České republiky. Obecně to jsou plodiny, které tvoří významnou část mezinárodního obchodu s virtuální vodou obsaženou v zemědělských komoditách. Na **Obrázku 5.** můžeme vidět, že největší podíl na celkové vodní stopě procesu pěstování zemědělských plodin má s 21% rýže. S tou se však v mezinárodním měřítku neobchoduje v takové míře jako s pšenicí, která je s 12% až na druhém místě v podílu na celkové vodní stopě zemědělských plodin. Obchod s virtuální vodou obsaženou v pšenici tvoří 30% světového obchodu s virtuální vodou zemědělských plodin, obchod s virtuální vodou rýže činí 15% (Hoekstra and Chapagain,

2007: 51). Kukuřice, která je s 9% třetím nejvýznamnějším přispěvatelem ke globální vodní stopě zemědělských plodin, tvoří téměř 9% světového toku virtuální vody. Rajčata se na tocích virtuální vody mezi státy podílí 0,15%. Chceme-li tedy ovlivnit toky virtuální vody směrem k udržitelnému využívání vodních zdrojů, měli bychom podporovat export těch plodin (zejména pšenice, rýže a kukuřice, s nimiž se v mezinárodním měřítku obchoduje nejvíce), které jsou produkovány s co nejnižší vodní stopou.

Námi vypočítané hodnoty vodní stopy porovnáme nejprve s průměrnými hodnotami vodní stopy, jak je uvádí Mekonnen a Hoekstra (Mekonnen and Hoekstra, 2010). Výsledné údaje se mohou lišit, jelikož autoři ke kalkulaci výsledků většiny plodin používají jiný model, tzv. *mřížkový model dynamické vodní bilance*. Počítačový model CROPWAT 8.0 je použit pouze pro menší část plodin (20 ze 126 uváděných plodin). Mřížkový model dynamické vodní bilance nepracuje s lokálními klimatickými daty, ale na základě údajů celosvětové databáze kalkuluje přímo s uváděnými hodnotami referenční evapotranspirace (ET_0)³⁹.

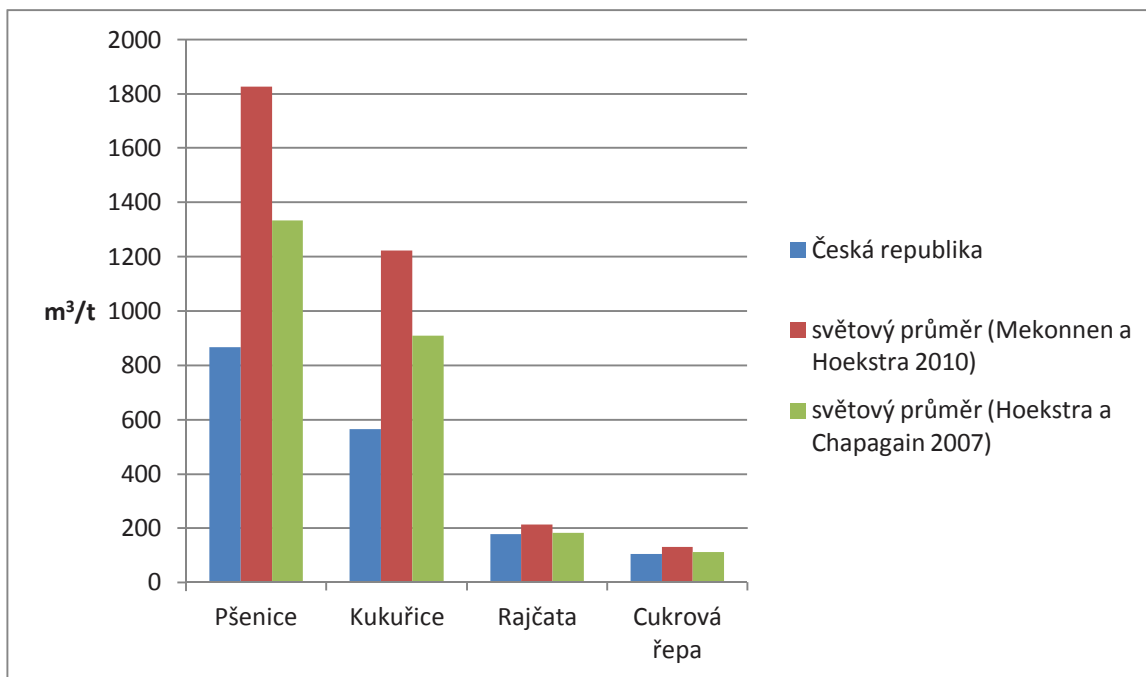
Průměrná vodní stopa obilnin je poměrně vysoká – 1644 m³/t. Pšenice patří mezi obilniny náročnější na vodu, její průměrná vodní stopa je 1827 m³/t. Kukuřice s hodnotou 1222 m³/t naopak průměrnou hodnotu vodní stopy obilnin snižuje. Zelenina obecně velkou vodní stopu nemá, alespoň počítáme li ji v m³/t – pokud budeme počítat objem vody nezbytný k vyprodukování jedné kalorie, vyjde nám vyšší objem vody u zeleniny než u obilnin. Průměrná vodní stopa rajčat je 214 m³/t. Cukrové plodiny mají vodní stopu nízkou, průměrně 197 m³/t – vodní stopa cukrové řepy je přitom nižší než vodní stopa cukrové třtiny, 132 m³/t oproti 210 m³/t.

Můžeme vidět, že ve srovnání se světovými průměrnými hodnotami uváděnými Mekonnenem a Hoekstrou je vodní stopa pšenice, kukuřice, rajčat i cukrové řepy pěstovaných v České republice nižší. A v případě obilnin (pšenice a kukuřice) dokonce velmi výrazně. Srovnáme-li námi zjištěné hodnoty s výsledky jiné studie (Hoekstra and Chapagain, 2007), námi zjištěné hodnoty a uváděné celosvětové průměry se více přiblíží, ačkoliv vodní stopa zkoumaných plodin pěstovaných v České republice bude stále nižší: Hoekstra a Chapagain uvádějí pro pšenici 1334 m³/t, pro kukuřici 909 m³/t, pro rajčata 184 m³/t a pro cukrovou řepu 113 m³/t. Srovnání našich hodnot a celosvětových průměrů uváděných oběma studiemi můžeme vidět na **Obrázku 6**. Můžeme si všimnout, že námi vypočítané hodnoty pro pšenici a kukuřici jsou hluboko pod průměrnou vodní stopou

³⁹ GeoNetwork – grid database. Databáze pracuje s rozlišením 10 na 10 arc minut.

těchto plodin. Můžeme tedy říci, že Česká republika je schopná produkovat pšenici i kukuřici poměrně efektivně.

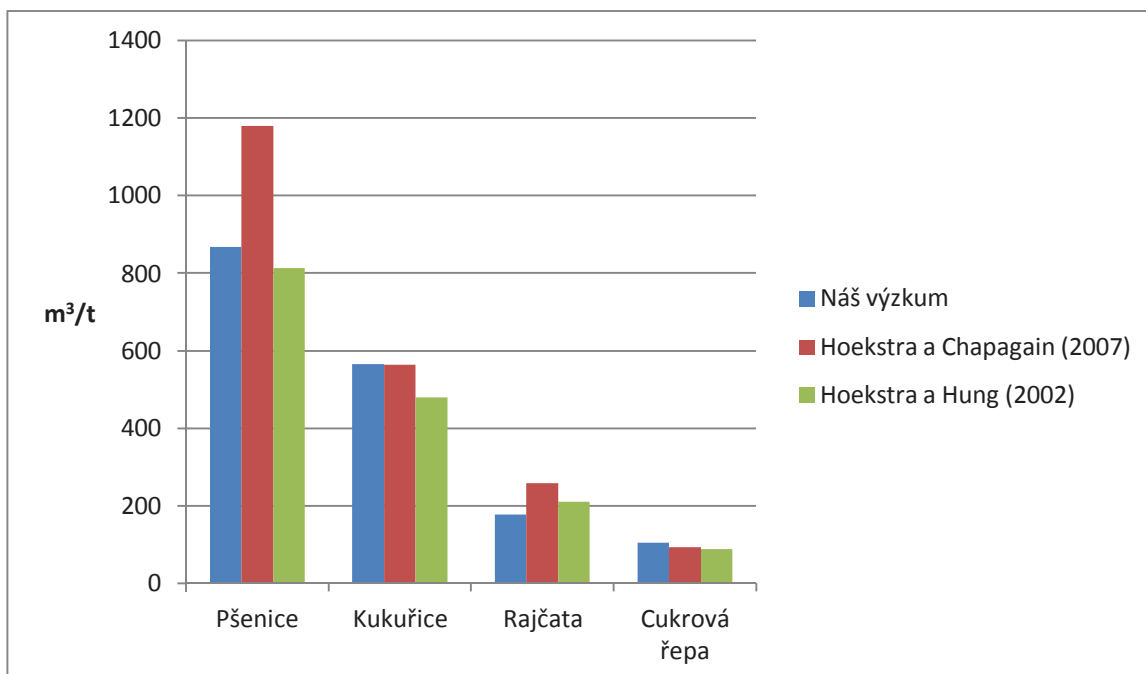
Obrázek 6. Srovnání vodní stopy pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat pěstovaných v České republice s celosvětovými průměrnými hodnotami



Abychom mohli posoudit, jak rozdílné výsledky vodní stopy plodin pěstovaných v ČR vyšly z našeho výzkumu a z odborných studií, podíváme se do grafu na **Obrázku 7**. Výsledky Hoekstry a Hunga (Hoekstra and Hung 2002) se našim výsledkům velmi blíží. Autoři pro výpočet vodní stopy využívali rovněž počítačový program CROPWAT 8.0. Data o parametrech plodiny se tedy v obou výzkumech shodují. Hoekstra a Hung však na rozdíl od nás použili veškerá klimatická data z databáze CLIMWAT, která obsahuje dlouhodobé průměry. Hodnoty pro výnosy plodin získali autoři z databáze Organizace OSN pro výživu a zemědělství FAOSTAT. Naše výsledky odpovídají spíše konkrétním podmínkám pro zkoumaný rok 2009. Z výsledků Hoekstry a Chapagaina (Hoekstra and Chapagain, 2007) vyplývá o něco vyšší vodní stopa pšenice a rajčat (1180 m³/t pro pšenici a 258 m³/t pro rajčata). Údaje pro kukuřici a cukrovou řepu jsou ale téměř totožné s našimi

výsledky (Hoekstra a Chapagain uvádějí 564 m³/t pro kukuřici a 93 m³/t pro cukrovou řepu)⁴⁰.

Obrázek 7. Srovnání vypočítaných hodnot pro ČR s údaji pro ČR udávanými jinými studiemi



Mezi země, které nejvíce přispívají k celkové vodní stopě procesu pěstování zemědělských plodin, patří Indie, Čína, USA, Brazílie, Rusko a Indonésie (Mekonnen and Hoekstra, 2010: 22). Čtyři z těchto států (Čína, Indie, Rusko a USA) jsou zároveň největšími světovými producenty pšenice a dva z nich (USA a Čína) patří též mezi největší producenty kukuřice. Vodní stopa zkoumaných plodin pěstovaných v USA je ve všech případech nižší než vodní stopa těchto plodin pěstovaných v České republice⁴¹, ačkoliv rozdíly jsou velmi malé (viz **Obrázek 8**). Rovněž Čína patří mezi producenty s poměrně nízkou vodní stopou, ačkoliv její vodní stopa kukuřice i cukrové řepy je vyšší než vodní stopa těchto plodin pěstovaných v ČR. Indie má ve všech případech vodní stopu výrazně vyšší než Česká republika⁴². Rovněž vodní stopa plodin pěstovaných v Rusku vysoce převyšuje jejich vodní stopu v podmínkách ČR, v případě pšenice a kukuřice je dokonce více než dvojnásobná. Další z 6 států, které se podílí na celkové vodní stopě procesu pěstování zemědělských plodin, Indonésie, se nezaměřuje na pěstování pšenice ani cukrové

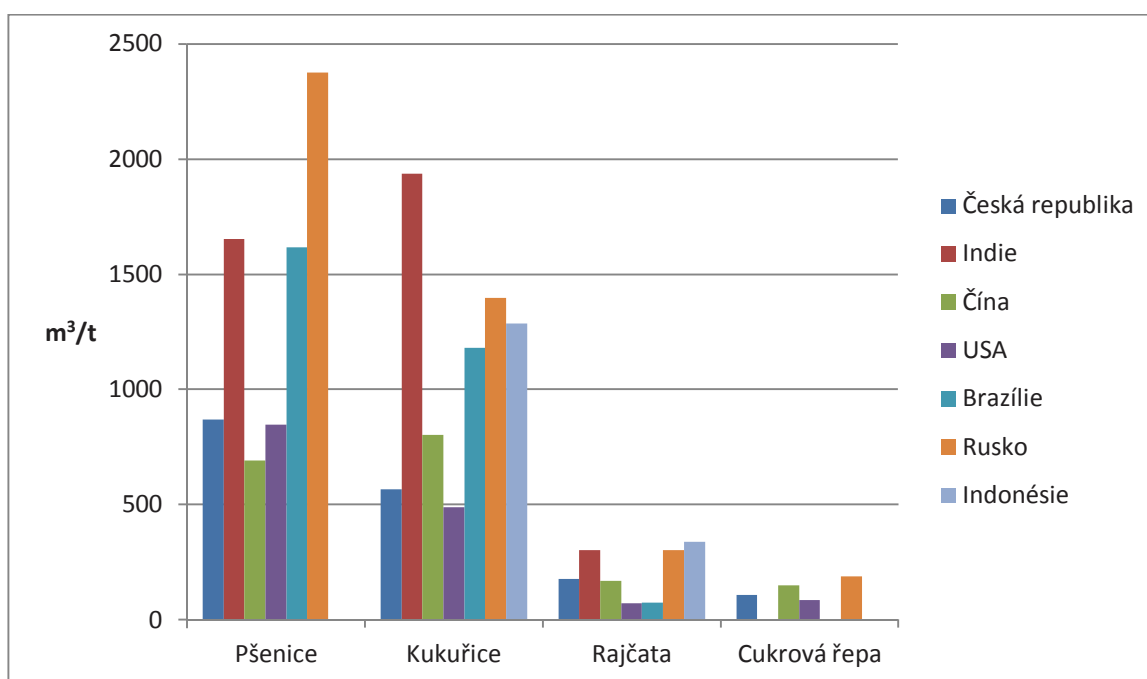
⁴⁰ Pro naše výsledky viz **Tabulka 6**, strana 71

⁴¹ Uvádíme údaje z výzkumu Hoekstry a Chapagina (Hoekstra and Chapagain 2007)

⁴² Rajčata v případě Indie neuvažujeme, jelikož se zde nepěstují

řepy. Vodní stopa kukuřice a rajčat je zde však opět výrazně vyšší než v ČR. Brazílie⁴³ je schopna produkovat rajčata s více než dvakrát nižší vodní stopou než ČR, vodní stopa pšenice a kukuřice je zde však oproti ČR téměř dvojnásobná. Vidíme tedy, že Indie, Brazílie, Rusko a Indonésie produkují obilniny s výrazně vyšší vodní stopou, než Česká republika – a dokonce s vyšší vodní stopou než je jejich světový průměr⁴⁴. Indie a Rusko přitom patří mezi největší světové producenty pšenice a Indie je známá tím, že se drobní farmáři díky permanentnímu zavlažování polí velkých společností potýkají s vážným nedostatkem vody (UNDP, 2006: 10). Vývoz obilnin z těchto států tedy není příliš efektivní a virtuální voda v tomto případě není alokována optimálně – v případě Indie by bylo vhodné zaměřit se více na ekologické a sociální důsledky vysoké vodní stopy obilnin⁴⁵, v případě Ruska na technologické možnosti snižování vodní stopy, jelikož vodních zdrojů je zde v porovnání s Indií dostatek (Hoekstra and Chapagain, 2007).

Obrázek 8. Srovnání ČR a šesti zemí, které přispívají k polovině celkové světové vodní stopy pěstování plodin



⁴³ Brazílie nepěstuje cukrovou řepu

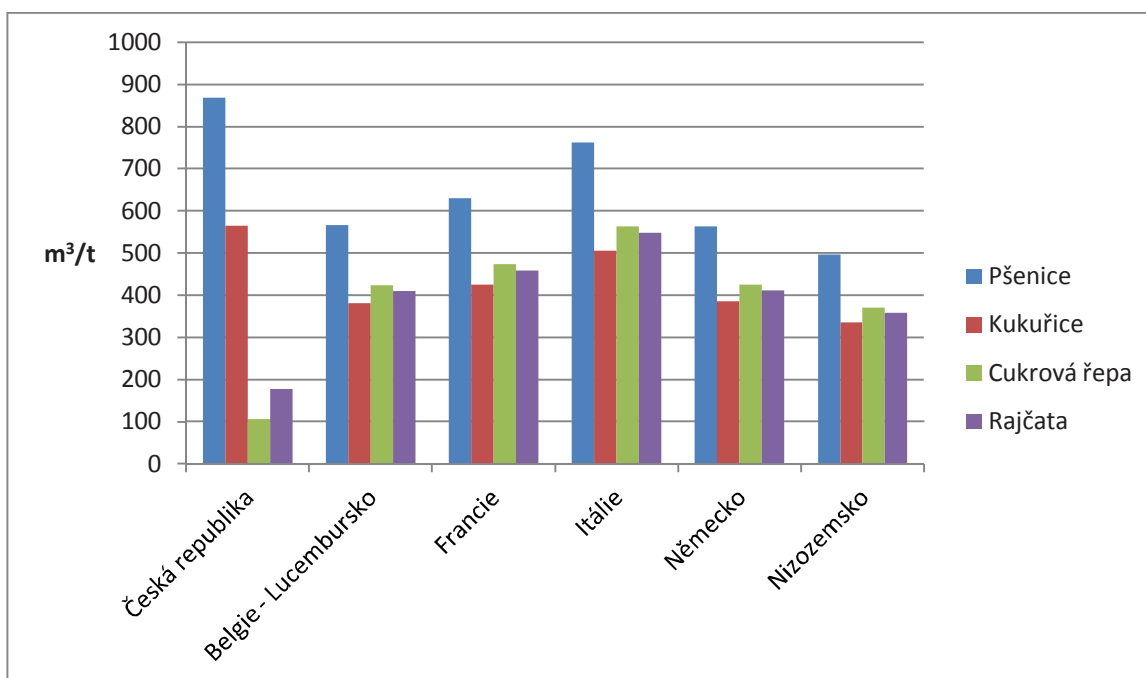
⁴⁴ Alespoň při srovnání s průměrnou vodní stopou uváděnou Hoekstrou a Chapagainem (Hoekstra and Chapagain 2007). Uvážíme-li průměrné hodnoty uváděné Mekonnenem a Hoekstrou (Mekonnen and Hoekstra 2010), přiblíží se více průměru – Indie a Rusko se však stále pohybují nad tímto průměrem.

⁴⁵ Jak jsme již zmínili výše, zavlažování plodin velkofarmáři zde má negativní sociální dopady na drobné rolníky. Rovněž environmentální dopad na ekosystémy může být vážný, jelikož Indie spotřebovává třetinu svých dostupných sladkovodních zdrojů na zavlažování (Hoekstra and Chapagain 2007).

Země Evropské unie patří spolu se Spojenými státy mezi největší vývozce pšenice. Vedle USA a Ruska jsou také největšími exportéry cukrové řepy – zejména Francie, Německo a Belgie. Francie a Itálie patří mezi 10 největších světových producentů kukuřice (zdroj: FAO). Státy EU jsou rovněž největším přímým vývozcem a největším světovým producentem rajčat (zdroj: Evropská komise). Jelikož zeměpisná poloha i vodní situace (zvláště některých) států Evropské unie je velmi blízká podmínkám České republiky, zajímalo nás, jak si tyto země vedou v porovnání vodních stop zkoumaných zemědělských plodin. Srovnání můžeme vidět na **Obrázku 9**. Srovnáme-li výsledky našeho výpočtu s vodní stopou daných plodin pěstovaných v zakládajících státech EU, vidíme, že Česká republika má podstatně nižší vodní stopu cukrové řepy a rajčat. Naopak máme ale vyšší vodní stopu jak pšenice, tak kukuřice – nejvíce se v tomto případě blížíme hodnotám Itálie. Můžeme vidět, že vodní stopa pěstování pšenice a kukuřice je ve vyspělých státech Unie pod průměrnými světovými hodnotami (1334 m³/t pro pšenici a 909 m³/t pro kukuřici) – pěstování těchto plodin v zemích EU je tedy efektivní⁴⁶. Vodní stopa cukrové řepy a rajčat je však nižší než průměrná hodnota pouze v případě České republiky – všechny níže zmíněné země EU mají vodní stopu cukrové řepy i rajčat vyšší (průměrná hodnota pro vodní stopu cukrové řepy je 113 m³/t, pro vodní stopu rajčat 184 m³/t).

⁴⁶ Samozřejmě pouze uvažujeme-li o celkovém hospodářství státu – v ideálním případě bychom posuzovali místní dopady na úrovni regionu či povodí a výsledky by se mohly diametrálně lišit. To je případ například španělského regionu Mancha, kde mělo pěstování rajčat a jejich zavlažování vážné dopady na mokřady chráněné Ramsarskou úmluvou.

Obrázek 9. Vodní stopa zkoumaných plodin – srovnání ČR a EU⁴⁷



3.5. ZHODNOCENÍ TŘÍ KOMPONENTŮ CELKOVÉ VODNÍ STOPY ZKOUMANÝCH ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN

Podíváme-li se opět na **Tabulku 6** (s. 71), můžeme vidět, jaký je podíl jednotlivých komponentů celkové vodní stopy zkoumaných zemědělských plodin – tedy vodní stopa zelená, modrá a šedá. Chceme-li porovnat jednotlivé komponenty vodní stopy pšenice kukuřice, rajčat a cukrové řepy, které jsme získali naším výzkumem, s celosvětovým průměrem, musíme využít studii Mekonnena a Hoekstry (Mekonnen and Hoekstra, 2010), kteří uvádějí průměrné hodnoty zelené, modré a šedé vodní stopy zkoumaných plodin. Většina ostatních odborných studií toto rozlišení bohužel nezahrnuje, a když, pak většinou vynechává šedou vodní stopu a pracuje pouze s modrou a zelenou vodní stopou⁴⁸. Srovnání našich výsledků s průměrnými hodnotami v podobě procentuálního zastoupení jednotlivých komponentů vodní stopy na celkové vodní stopě zkoumaných plodin najdeme v **Tabulce 7**. Ačkoliv jsme viděli, že vodní stopa zkoumaných plodin v České republice je

⁴⁷ Srovnávané údaje pochází z Hoekstry a Chapagaina (Hoekstra and Chapagain 2007). Jelikož autoři uvádějí vodní stopu Belgie a Lucemburska dohromady, je počet zakládajících zemí EU redukován.

⁴⁸ To, že mnoho studií vodní stopy nepracuje s rozdělením na modrou, zelenou a šedou vodní stopu, je škoda, jelikož právě v tomto rozdělení tkví obrovská výhoda tohoto indikátoru.

výrazně nižší než jejich průměrné celosvětové hodnoty (zvláště v případě obilnin), v porovnání s celkovou vodní stopou těchto plodin

Tabulka 7. Porovnání jednotlivých komponentů vodní stopy zkoumaných zemědělských plodin pěstovaných v ČR s průměrnými hodnotami

Plodina	$VS_{zelená}$ (%)	$VS_{modrá}$ (%)	$VS_{šedá}$ (%)	VS_{proc} (m ³ /t)
Pšenice – ČR	72	5	23	867,8
Celosvětový průměr	70	19	11	1827
Kukuřice – ČR	65	18	17	565,0
Celosvětový průměr	78	7	15	1222
Cukrová řepa – ČR	63	23	14	106,4
Celosvětový průměr	62	19	19	132
Rajčata – ČR	61	21	18	177,6
Celosvětový průměr	51	29	20	214

v blízkých státech EU (které mají podobné klimatické podmínky) můžeme mít ještě rezervy pro její snižování.

Věnujme se nejprve pšenici. Vidíme, že na celkové vodní stopě pšenice pěstované v České republice se ze 72% podílí zelená voda. To je velmi blízko celosvětovému průměrnému zastoupení zelené vody. Modrá vodní stopa tvoří pouhých 5% celkové vodní stopy, což znamená, že podíl zavlažování je velmi malý a nachází se hluboko pod průměrnou hodnotou. Nebezpečí degradace povrchových a podpovrchových vod (modré vody) vlivem zavlažování pšeničných polí tedy v České republice obecně nehrozí. Podíváme-li se však na procentuální zastoupení šedé vody při pěstování pšenice v našich podmínkách, vidíme, že zde máme velké rezervy – podíl šedé vodní stopy je v případě ČR více než dvojnásobný oproti průměrné hodnotě. Jak jsme již viděli na **Obrázku 9**, oproti zakládajícím členům Evropské unie je naše vodní stopa pšenice vyšší. Prostor pro snižování naší celkové vodní stopy pšenice by proto mohl být právě zde.

V případě kukuřice je situace jiná – zelená vodní stopa kukuřice pěstované v ČR tvoří pouhých 65% celkové vodní stopy, zatímco celosvětový průměr je 78%. Modrá vodní stopa se podílí plnými 18% oproti celosvětovému průměru, který činí 7%. Modrá vodní stopa kukuřice pěstované v ČR je tedy více než dvakrát vyšší než průměr. Zastoupení šedé vodní stopy je v případě ČR také o něco vyšší, avšak jen o 2%. Na grafu na **Obrázku 9** jsme viděli, že vodní stopa kukuřice pěstované v našich podmínkách je vyšší, než její vodní stopa ve zmíněných státech EU. Stejně jako pšenici i kukuřici tedy tyto státy produkují s větší efektivitou než ČR. U pšenice je jasný potenciál snižování šedé vodní stopy. U kukuřice je sice tento potenciál také patrný, nebude však mít zřejmě takový efekt jako v případě pšenice. Podíváme-li se však opět na mezinárodní srovnání vodní stopy těchto plodin, nemůžeme tvrdit, že je pěstování kukuřice a pšenice v České republice neefektivní – stále jsme schopni produkovat tyto obilniny s dvakrát nižší vodní stopou než někteří z jejich největších producentů a vývozců – Indie, Brazílie, Rusko či Indonésie.

Vodní stopa cukrové řepy a rajčat pěstovaných v České republice je nejen nižší než celosvětový průměr, ale je také nižší než jejich vodní stopa ve srovnávaných zemích EU. V případě cukrové řepy má ČR vyšší procentuální zastoupení modré vody, na vyprodukované množství jedné tuny spotřebujeme o 4% více závlahové vody než je tomu u celosvětového průměru. Jsme však schopni produkovat toto množství s o 5% nižší šedou vodní stopou. Na vyprodukování tuny rajčat potřebujeme o 8% modré vody a 2% šedé vody méně, než v případě celosvětového průměru.

Jak vidíme z **Tabulky 7**, cukrová řepa a rajčata jsou co se týče procentuálního zastoupení modré vody plodinami nejnáročnějšími na zavlažování. Kukuřice je v těsném závěsu za nimi. Posoudíme-li však skutečný objem modré vody nezbytný k vyprodukování jedné tuny plodiny, stává se nejnáročnější plodinou právě kukuřice, jejíž modrá vodní stopa je 101,5 m³/t, zatímco modrá vodní stopa rajčat je 37,6 m³/t a cukrové řepy 24,2 m³/t. Šedá vodní stopa je v případě České republiky nejvyšší jak procentuálním zastoupením, tak objemově u pšenice. Šedá vodní stopa pšenice pěstované v ČR je 198,5 m³/t – rozdíl mezi její šedou vodní stopou a šedou vodní stopou kukuřice, která je s 98,2 m³/t na druhém místě, je velmi výrazný. Proto můžeme usuzovat, že je zde velký potenciál ke snížení šedé vodní stopy.

4. ZÁVĚR

V teoretické části naší diplomové práce jsme si představili v České republice zcela nový indikátor využívání vodních zdrojů, který se nezabývá pouze přímým užitím vody, ale zaměřuje se také na nepřímé toky virtuální vody, která byla nezbytná k vyprodukování daného statku a služby – tzv. *vodní stopu*.

Výpočet a analýza vodní stopy může poskytnout jasný a srozumitelný rámec k tomu, abychom mohli odhalit důsledky naší vodní spotřeby a následně formulovat strategie, jak s vodními zdroji zacházet lépe a efektivněji. Abychom ukázali možnosti aplikace ukazatele vodní stopy v podmínkách České republiky, zvolili jsme si výpočet vodní stopy procesu pěstování konkrétních zemědělských plodin. Kritériem výběru právě této oblasti vodní stopy byly dvě základní skutečnosti. Za prvé, *procesní krok* je základem pro výpočet jak vodní stopy výrobku, tak geograficky vymezené oblasti, spotřebitele, skupiny spotřebitelů či podniku. Proto nám správné porozumění tomuto základu poskytne lepší představu o dalších nezbytných krocích ve výpočtu vodní stopy. Za druhé, zemědělský sektor je globálně největším spotřebitelem vody a zemědělské plodiny patří vedle chovu hospodářských zvířat ke komoditám nejnáročnějším na zdroje vody.

Česká republika se nachází v oblasti mírného vodního stresu. V našem výzkumu jsme proto vycházeli z úvahy, že by měla pečlivě alokovat své vodní zdroje a její bilance dovozu a vývozu virtuální vody by měla být vyrovnaná. Jelikož je problematika mezinárodního obchodu s virtuální vodou příliš komplexní a přesahuje rámec možností diplomové práce, zaměřili jsme se na výpočet a analýzu vodní stopy čtyř zemědělských komodit, které česká republika nejvíce vyváží – pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat. Výsledky našeho výzkumu jsme se pokusili zasadit do mezinárodního kontextu a porovnat vodní stopu zkoumaných komodit nejen s průměrnými hodnotami, které jsou pro tyto plodiny běžně uváděny, ale též s jejich hodnotami v jiných státech, které se svými podmínkami blíží podmínkám České republiky nebo které patří mezi největší producenty těchto komodit.

Jelikož jsme měli k dispozici data o vývozu pro rok 2009, počítali jsme rovněž vodní stopu vybraných zemědělských plodin pro rok 2009. Využívali jsme výhradně data sekundární. Kde nebyla k dispozici data pro tento konkrétní rok (například v případě údajů o průměrné rychlosti větru či délce slunečního svitu během jednotlivých měsíců roku),

využili jsme údaje o dlouhodobém průměru z globálních databází. Tímto způsobem sice můžeme mírně ovlivnit výsledek výpočtu, na druhé straně hodnoty dlouhodobých průměrů nám pomáhají omezit vliv neobvyklých výkyvů (výjimečné suché či vlhké roky apod.). Mimo to, účelem naší práce nebylo co nejpřesnější zjištění vodní stopy zkoumaných plodin, ale spíše pilotní výpočet a zasazení vodní stopy plodin pěstovaných v našich podmínkách do mezinárodního kontextu, porovnání s průměrnými hodnotami a hodnotami jiných států. Díky zjištěným výsledkům jsme mohli charakterizovat a popsat základní rysy vodní stopy vybraných zemědělských plodin a identifikovat místa, která mají potenciál pro snižování vodní spotřeby.

Vodní stopa pšenice a kukuřice tvoří 21% celkové vodní stopy produkce zemědělských plodin. Společně s rýží patří mezi 3 plodiny, které se nejvíce podílejí na obchodu s virtuální vodou obsaženou v zemědělských plodinách. Jelikož je problematika krize a nedostatku vodních zdrojů především problémem nerovnoměrné distribuce těchto zdrojů, mohl by fungující obchod s virtuální vodou výrazně usnadnit řešení této krize. Právě indikátor vodní stopy nám může pomoci optimálně alokovat virtuální vodu v globálním měřítku, jelikož díky posouzení časoprostorových podmínek produkce zkoumaných statků a služeb určí, kolik vody bylo v daných podmínkách produkce k výrobě statku či služby potřeba. Státy tak budou schopny identifikovat své komparativní výhody či nevýhody a tomu budou moci přizpůsobit i mezinárodní obchod.

Jak vidíme na příkladu pšenice, vodní stopa hlavních producentů těchto plodin se výrazně liší. Dva ze čtyř největších producentů pšenice, USA a Čína, jsou schopni pěstovat tuto plodinu s více než dvakrát menší vodní stopou než zbylí dva největší producenti pšenice, Indie a Rusko. Podmínky v těchto dvou státech se opět výrazně liší – zatímco zdroje vody v Indii jsou relativně malé a zemědělství zde na zavlažování využívá většinu dostupných zdrojů vody, vodní zdroje v Rusku jsou podstatně bohatší. Z analýzy vodní stopy vyplývá, že Indie není vzhledem k vysoké vodní stopě pšenice ideálním vývozcem, chceme-li optimálně alokovat vodní zdroje pomocí obchodu s virtuální vodou. Rusko si sice v podmínkách svých vodních zdrojů může dovolit produkci pšenice s takto vysokou vodní stopou, díváme-li se však na problematiku z globálního hlediska, v jehož rámci jsou vodní zdroje vzácnější než v Rusku, mělo by se ruské zemědělství zaměřit na snižování vodní stopy, což je vzhledem k jeho klimatickým podmínkám v rámci jeho možností (na rozdíl od Indie, která je omezena teplým a suchým klimatem). Účetnictví vodní stopy nám pomáhá uvažovat právě tímto způsobem, díky čemuž můžeme formulovat nové politické

strategie v řešení vodní krize pomocí nejen environmentálně, ale též ekonomicky efektivních nástrojů.

Naše výpočty vodní stopy pšenice, kukuřice, cukrové řepy a rajčat nám prozradily, že produkce těchto plodin v českých podmínkách je z globálního pohledu efektivní – vodní stopa všech zkoumaných komodit je nižší než jejich průměrná vodní stopa, v případě obilnin dokonce výrazně. Podíváme-li se na srovnání jednotlivých komponentů celkové vodní stopy, tedy vodní stopy zelené, modré a šedé, můžeme vidět, že v případě pšenice a kukuřice máme ještě potenciál ke snižování vodní stopy díky snížení množství šedé virtuální vody. Že je to skutečně možné ukazuje srovnání vodní stopy České republiky se státy Evropské unie, které nám jsou svými přírodními i technologickými podmínkami velmi blízké. Vodní stopa pšenice i kukuřice je ve všech srovnávaných státech nižší než v České republice. Naopak vodní stopa cukrové řepy i rajčat je nejnižší v České republice – zde bychom tedy mohli využít našich komparativních výhod a zaměřit se na vývoz právě těchto plodin, které jsme schopni produkovat s výjimečně nízkou vodní stopou.

Krize vodních zdrojů se v současné době projevuje markantně pouze v rozvojových státech, v nichž je navíc většinou problémem chudiny. Nedostatek vody je totiž zatím plíživou krizí, na níž média neupozorňují křiklavými titulky. Přesto odborníci varují před její závažností, jelikož může vést k velmi nebezpečným mezinárodním konfliktům. Světový obchod s virtuální vodou představuje možnou variantu řešení této hrozící globální krize. K tomu bychom však museli přijmout řadu opatření, neboť za současné situace, kdy je voda jako veřejný statek v podstatě statkem tržně neoceneným, nemůže mezinárodní trh vodní zdroje optimálně alokovat. Aby mohl tuto funkci efektivně plnit, musely by vlády přistoupit na řadu právních, politických i ekonomických změn. Indikátor vodní stopy může být velmi užitečným nástrojem hodnocení našeho způsobu zacházení s vodními zdroji, protože jasně a srozumitelně upozorňuje na kritické oblasti naší vodní spotřeby. Díky tomu může velmi dobře posloužit decizní sféře při formulaci nezbytných kroků, které by vedly nejen ke změně národního hospodaření s vodními zdroji, ale které by zohlednily problematiku vzácnosti vodních zdrojů v globálním měřítku.

5. BIBLIOGRAFIE

Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. ze dne 22. dubna 2004, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody.

Alcamo, J. and T. Henrichs (2002). "Critical regions: A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes." Aquatic Science **64**(4): 352-362.

Aldaya, M. M., J. A. Allan, et al. (2010). "Strategic Importance of Green Water in International Crop Trade." Ecological Economics **69**: 887-894.

Aldaya, M. M., P. Martínez-Santos, et al. (2010). "Incorporating the Water Footprint and Virtual Water into Policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain." Water Resource Management **24**: 941-958.

Allan, J. A. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. Priorities for water resources allocation management. London, ODA: 13-26.

Allan, J. A. (1998). "Virtual Water: A strategic Resource. Global Solutions to Regional Deficits." Ground Water **36**(4): 545-546.

Allen, R. G., L. S. Pereira, et al. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Batjes, N. H. (2006). ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes grid. Report 2006/02. Wageningen, ISRIC - World Soil Information.

Berndes, G. (2002). "Bioenergy and water—the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply." Global Environmental Change(12): 253-271.

Budňáková, M., Ed. (2010). Situační a výhledová zpráva Půda 2009. Praha, Ministerstvo zemědělství.

Bulsink, F., A. Y. Hoekstra, et al. (2010). "The Water Footprint of Indonesian Provinces Related to the Consumption of Crop Product." Hydrology and Earth System Sciences **14**: 119-128.

CropLifeFoundation (2006). National Pesticide Use Database 2002. Washington, D.C., CropLife Foundation.

Dastane, N. G. (1978). Effective rainfall in irrigated agriculture. Irrigation and Drainage Paper No 25. Rome, Food and Agriculture Organization.

Doorenbos, J., A. H. Kassam, et al. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

EPA (2005). List of drinking water contaminants: Ground water and drinking water, US Environmental Protection Agency.

EU (2000). Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/EC ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky.

EU (2006). Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/44/ES ze dne 6. září 2006 o jakosti sladkých vod vyžadujících ochranu nebo zlepšení pro podporu života ryb.

EU (2008). Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/105/ES ze dne 16. prosince 2008 o normách environmentální kvality v oblasti vodní politiky, změně a následném zrušení směrnic Rady 82/176/EHS, 83/513/EHS, 84/156/EHS, 84/491/EHS a 86/280/EHS a změně směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES. E. Union.

Eurostat (2007). The Use of Plant Protection Products in the European Union: Data 1992 - 2003. Eurostat Statistical Books, European Commission.

Falkenmark, M. (1989). "The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed?" Ambio **18**(2): 112-118.

Falkenmark, M. (2003). "Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges." Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences **358**(1440): 2037-2049.

FAO (2003). Technical conversion factors for agricultural commodities. Rome, Food and Agriculture Organization.

FAO (2005). New LocClim, Local Climate Estimator CD-ROM. Rome, Food and Agriculture Organisation.

FAO (2010a). CROPWAT 8.0 model. Rome, Food and Agriculture Organization.

FAO (2010b). CLIMWAT 2.0 database. Rome, Food and Agriculture Organization.

FAO (2010c). FAOSTAT database. Rome, Food and Agriculture Organization.

FAO (2010d). FertiStat database. Rome, Food and Agricultural Organization.

Galloway, J. N., M. Burke, et al. (2007). "International Trade in Meat: The Tip of the Pork Chop." Ambio **36**(8): 622-629.

Gerbens-Leenes, P. W. and A. Y. Hoekstra (2009). The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize. Value of Water Research Report Series No. 38. Delft.

Habartová, D., V. Novotná, et al. (2011). Statistická ročenka České republiky 2010. Český statistický úřad. Praha.

Hoekstra, A. Y. (2009). "Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological and water footprint analysis." Ecological Economics **68**: 1963-1974.

Hoekstra, A. Y. and P. Q. Hung (2002). Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report No. 11. Delft.

Hoekstra, A. Y. and P. Q. Hung (2005). "Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade." Global Environmental Change **15**: 45-56.

Hoekstra, A. Y. and A. K. Chapagain (2007). "Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern." Water Resource Management **21**: 35-48.

Hoekstra, A. Y. and A. K. Chapagain (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Oxford, Blackwell Publishing.

Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, et al. (2009). Water Footprint Manual. State of Art 2009. Water Footprint Report. Enschede, Water Footprint Network.

Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, et al. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. London, Washington, DC, Earthscan.

Horlemann, L. and S. Neubert (2007). Virtual Water Trade. A realistic concept for resolving the water crisis? Bonn, Deutsches Institut für Entwicklungspolitik.

Chapagain, A. K. and A. Y. Hoekstra (2004). Water footprints of nations. Value of Water Research Report Series No. 16. Delft, UNESCO-IHE.

Chapagain, A. K., A. Y. Hoekstra, et al. (2006). "The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries." Ecological Economics **60**(1): 186-203.

Chapagain, A. K. and S. Orr (2009). "An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes." Journal of Environmental Management **90**(2): 1219-1228.

Chochola, J. (2010). Průvodce pěstováním cukrové řepy. Semčice, Řepařský institut Semčice.

Jandák, J., A. Prax, et al. (2004). Půdoznalství. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.

Kohut, M. (2005). Referenční evapotranspirace. Evaporace a evapotranspirace. J. Rožnovský and T. Litschmann. Brno: 25-38.

Kozák, J., J. Němeček, et al. (2002). Pedologie. Praha, ČZU v Praze, katedra pedologie a geologie AF.

Kravčík, M. and P. Pačaj (2006). Zelená bez modrej je len žltá. Košice.

Křen, J. (2002). "Agrotechnika jarní pšenice." from http://www.agroweb.cz/Agrotechnika-jarni-psenice_s44x8810.html.

Liu, J. and S. Orr (2010). "Water footprint overview in the governmental, public policy, and corporate contexts." On the Water Front: Selections from the 2009 World Water Week in Stockholm: 73-79.

Mekonnen, M. M. and A. Y. Hoekstra (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water Research Report No. 47. Delft. **Volume 1: Main Report.**

Mekonnen, M. M. and A. Y. Hoekstra (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water Research Report No. 47. Delft. **Volume 2: Appendices.**

Micklin, P. (2010). "The past, present, and future Aral Sea." Lakes & Reservoirs: Research & Management **15**(3): 193 - 213.

Morrison, J., M. Morkawa, et al. (2009). Water scarcity and climate change: Growing risks for business and investors. Boston, CERES.

Naiman, R. J., J. J. Magnusson, et al. (1995). "Freshwater ecosystems and their management: a national initiative." Science **270**: 584-585.

Němec, J., M. Štolbová, et al. (2003). Půda. Situační a výhledová zpráva. Praha, Ministerstvo zemědělství ČR.

Píšková, A. (2010). "Aralské jezero. Socio-ekonomické problémy Aralu aneb Jak dopadlo poroučení větru dešti." Vesmír **90**(3): 149-153.

Postel, L. S. (1999). Pillar of sand: can the irrigation miracle last? New York, W. W. Norton.

Postel, L. S. (2000). "Entering an era of water scarcity: The challenge ahead." Ecological Application **10**(4): 941-948.

Postel, L. S., G. C. Daily, et al. (1996). "Human appropriation of renewable fresh water." Science(271): 785-788.

Raskin, P. D., E. Hansen, et al. (1996). "Water and sustainability: global patterns and long-range problems " Natural Resources Forum **20**(1): 1-5.

Richter, B. D. (2009). "Re-thinking environmental flows: from allocations and reserves to sustainability boundaries." River Research and Applications.

Rijsberman, F. R. (2004). Water Scarcity: Fact or Fiction. "New directions for a diverse planet". Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.

SABMiller and WWF-UK (2009). Water Footprinting: Identifying and Addressing Water Risks in the Value Chain. Goldalming, SABMiller, Woking and WWF-UK.

Smith, M. (1992). CROPWAT - A computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper 46. Rome, Food and Agricultural Organization.

UN (2010). World Urbanization Prospects: The 2009 Revision. New York, United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division.

UNDP (2006). Beyond scarcity: Power, poverty and global water crisis. Human Development Report 2006, United Nations Development Programme.

USDA (1994). The major world crop areas and climatic profiles. Agricultural Handbook No. 664, World Agricultural Outlook Board, USDA (United States Department of Agriculture).

Vié, J.-C., C. Hilton-Taylor, et al., Eds. (2009). Wildlife in a ganging world: An analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species. Gland, IUCN.

Wallace, J. S. (2000). "Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production." Agriculture, Ecosystems and Environment(82): 105-119.

Williams, J. R., C. A. Jones, et al. (1989). "The EPIC crop growth-model." Transaction of the ASAE **32**(2): 497-511.

WWC, Ed. (2004). E-Conference Synthesis: Virtual Water Trade - Conscious Choices. Synthesis, World Water Council.

Zimmerman, J. B., J. R. Mihelcic, et al. (2008). "Global Stressors on Water Quality and Quantity." Environmental Science and Technology **42**(12): 4247-4254.

6. SLOVNÍK ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Evapotranspirace – Evapotranspirace je kombinací dvou samostatných procesů: *evaporace* – vypařování vody z půdního povrchu, a *transpirace* – vypařování vody povrchem rostlin. Oba tyto procesy probíhají současně a není snadné je od sebe oddělit. Jsou ovlivňovány jak klimatickými podmínkami, tak fyzickými charakteristikami plodiny.

Modrá voda – Povrchová a podzemní voda

Modrá vodní stopa – Modrá vodní stopa odkazuje na spotřebu zdrojů tzv. *modré vody*, pod níž rozumíme povrchovou a podzemní vodu. „*Spotřeba modré vody*“ v tomto případě znamená ztrátu vody z dostupných podzemních nebo povrchových vodních těles v příslušném povodí, k níž dojde, když se voda vypaří, vrátí se do jiného povodí nebo do moře nebo je vtělena do výrobku.

Nepřímá vodní stopa – Nepřímá vodní stopa odkazuje na množství vody, které bylo použito nebo znečištěno během výroby statků a služeb, které spotřebitel či skupina spotřebitelů konzumuje. Nepřímá vodní stopa je sumou vodních stop veškerých produktů konzumovaných spotřebitelem či skupinou spotřebitelů.

Přímá vodní stopa – Pod pojmem přímá vodní stopa rozumíme vodu spotřebovanou nebo znečištěnou v domácnosti či na zahradě spotřebitelem nebo skupinou spotřebitelů.

Šedá voda – Voda, která byla znečištěna vlivem lidské produkce statků a služeb.

Šedá vodní stopa – Šedá vodní stopa odkazuje na znečištění vody. Je definována jako objem sladké vody, která je nezbytná k asimilaci znečišťujících látek tak, aby bylo dosaženo místních standardů kvality vody.

Virtuální voda – Virtuální voda je definována jako objem vody, který byl potřebný k produkci určitého statku (služby, výrobku či zemědělské komodity), a to během celého výrobního procesu. Obsah virtuální vody v produktu je ovlivňován místem výroby, jelikož odráží místní podmínky a výrobní postupy. Termín „virtuální“ voda odkazuje na skutečnost, že většina vody, jež byla na produkci výrobku spotřebována, není v samotném výrobku fyzicky obsažena.

Vodní stopa – Vodní stopa je indikátor využití sladkovodních zdrojů, který se zaměřuje na přímou i nepřímou spotřebu vody uživatelem nebo výrobcem. Je definována jako objem sladké vody, který byl použit na produkci statku nebo služby. Můžeme počítat vodní stopu procesního kroku, výrobku, spotřebitele či skupiny spotřebitelů, geograficky vymezené oblasti či výrobce.

Zelená voda – Dešťová voda zachycená v půdě, půdní vlhkost

Zelená vodní stopa – Zelená vodní stopa odkazuje na spotřebu zdrojů tzv. *zelené vody*, již se rozumí dešťová voda zachycená v půdě (jako půdní vlhkost).

7. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „nároky plodiny na vodu“ – pšenice

Příloha 2

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „nároky plodiny na vodu“ – kukuřice

Příloha 3

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „nároky plodiny na vodu“ – cukrová řepa

Příloha 4

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „nároky plodiny na vodu“ – rajčata

Příloha 5

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „zavlažovací plán“ – pšenice

Příloha 6

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „zavlažovací plán“ – kukuřice

Příloha 7

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „zavlažovací plán“ – cukrová řepa

Příloha 8

Výstup počítačového modelu CROPWAT 8.0, modul „zavlažovací plán“ – rajčata

Příloha 9

Projekt diplomové práce