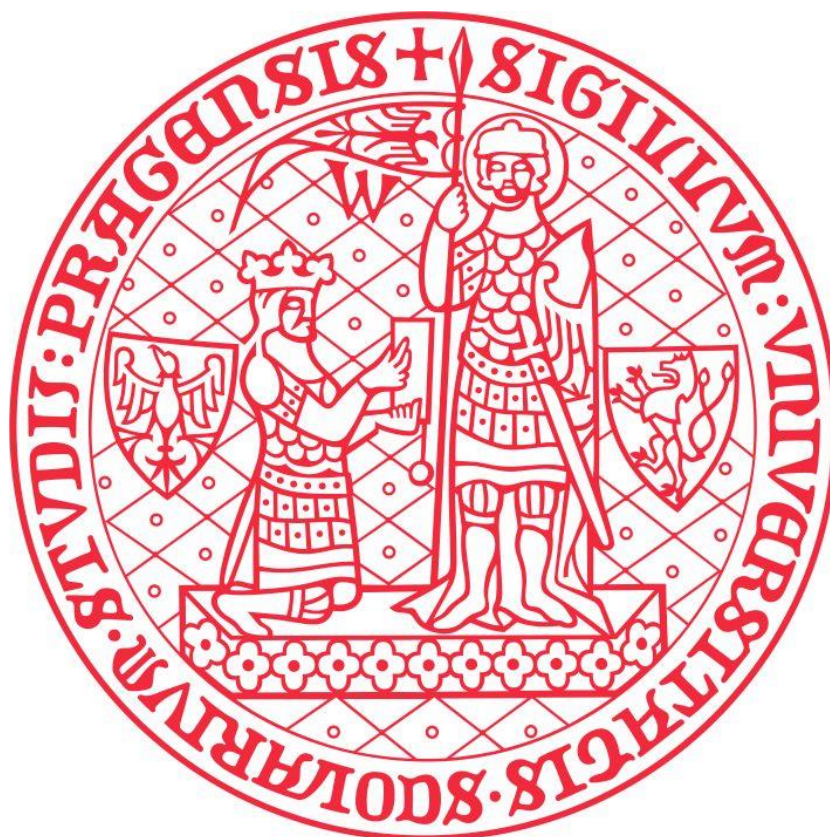


Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie
Studijní obor: Povrchová a podzemní voda



Štěpán Straka

Vodní stopa plodin pro výrobu biopaliv
Water footprint of crops for biofuel production

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc.

Praha, 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 3. května 2021

.....

Štěpán Straka

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je pomocí rešeršní studie posoudit opomíjené dopady pěstování plodin využívaných pro výrobu biopaliv, a to dle jejich tzv. vodní stopy. V teoretické části se práce zabývá nejprve definováním pojmu vodní stopa, její historií a postupným vývojem jejího chápání. Dále se práce věnuje problematice definic a určování nedostatku vody. Teoretická část je zakončena základními informacemi o biopalivech, jejich dělením a představením nejčastěji používaných biopaliv. V následujících kapitolách je shrnutý současný stav produkce biopaliv ve světě a seznámení s problémy, které tato produkce ve světě způsobuje. Stěžejní částí práce je syntéza a zpracování dat o vodní stopě vybraných plodin pěstovaných jako zdroj biopaliv, porovnání těchto hodnot s klimatickými pásmy a hodnocení vhodnosti produkce těchto plodin vůči vodním zdrojům.

Klíčová slova: vodní stopa, biopaliva, kukuřice, řepka olejná, cukrová třtina, palma olejná

Abstract

The aim of the bachelor's thesis is to apply a research study for the assessment of often-overlooked effects of growing crops used for the production of biofuels, according to their so-called water footprint. In the theoretical part, the thesis focuses on the definition of the concept of the water footprint, its history and the gradual development of people understanding the impact. Furthermore, the thesis deals with the issue of definitions and determination of water scarcity. The theoretical part concludes with basic information about biofuels, their division and a presentation of the most commonly used biofuels. The following chapters summarize the current state of biofuel production in the world and familiarize the reader with the issues this production causes. The main part of the thesis is the synthesis and processing of data regarding the water footprint of selected crops grown as a source of biofuels, comparison of the values with climate zones and evaluation of the suitability of the production of these crops concerning water resources.

Keywords: water footprint, biofuels, maize, canola, sugarcane, oil palm

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. RNDr. Zbyňkovi Hrkalovi, CSc. za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, doporučení, připomínek a zároveň za velkou trpělivost a ochotu při konzultacích.

Obsah

1 Úvod a cíle práce.....	1
2 Teoretická část.....	2
2.1 Vodní stopa	2
2.1.1 Virtuální voda	2
2.1.2 Definice vodní stopy.....	2
2.1.3 Jednotlivé složky vodní stopy.....	3
2.1.4 Water Footprint Network	4
2.1.5 Kritika vodní stopy.....	5
2.2 Nedostatek vody	5
2.2.1 Příčiny nedostatku vody.....	6
2.2.2 Metody stanovení nedostatku vody	6
2.3 Biopaliva	8
2.3.1 Historie	8
2.3.2 Dělení biopaliv.....	9
2.3.3 Příklady biopaliv	10
3 Současný stav biopaliv ve světě	12
3.1 Pěstování plodin pro biopaliva.....	12
3.1.1 Vliv na biodiverzitu a odlesňování	13
3.1.2 Spotřeba vody	14
3.1.3 Ceny potravin	15
3.1.4 Výnosnost plodin.....	15
3.2 Produkce paliv.....	16
3.2.1 Politika biopaliv	18
3.2.2 Obchod s biopalivy	19
3.2.3 Energetická efektivnost biopaliv	20
4 Analytická část	21
4.1 Data	21
4.1.1 Vodní stopa	21
4.1.2 Falkenmark Water Stress Indicator.....	22
4.1.3 Köppenova klasifikace podnebí.....	22
4.2 Vodní stopa vybraných plodin.....	22
4.2.1 Kukuřice.....	23
4.2.2 Cukrová třtina.....	25

4.2.3 Řepka olejná.....	27
4.2.4 Palma olejná.....	28
4.3 Vliv podnebí na velikost vodní stopy plodin	30
4.3.1 Analýza plodin	30
4.3.2 Zelená a modrá vodní stopa.....	31
4.4 Vodní stopa a nedostatek vody.....	32
4.4.1 Kukuřice.....	32
4.4.2 Cukrová třtina.....	33
4.4.3 Řepka olejná.....	34
4.4.4 Palma olejná.....	34
5 Závěr	36
6 Bibliografie	38
7 Seznam grafických příloh a tabulek.....	44

Seznam zkratek

EJ	Exajoule (10^{18} joule)
FAME	Metylester mastných kyselin
HEFA	Hydroprocessed esters and fatty acids
HVO	Hydrogenovaný rostlinný olej
MEŘO	Metylester řepkového oleje
PJ	Petajoule (10^{15} joule)
VS	Vodní stopa
WFA	Water footprint assessment
WFN	Water Footprint Network
WPI	Water Poverty Index
Použité zkratky klimatických podnebí	
A	Tropické podnebí
B	Suché podnebí
Cfb	Mírné oceánské podnebí
Ds	Kontinentální podnebí se suchým létem

1 Úvod a cíle práce

Celosvětově se počet obyvatel zvyšuje, zároveň však roste i životní úroveň. S tím jsou spojené větší nároky na energie, které zatím nejvíce pocházejí z fosilních paliv, jejichž zdroje jsou omezené. Jako jedna z alternativ jsou biopaliva, která jsou současně největším zdrojem obnovitelné energie na světě (REN 21, 2020).

S narůstající produkcí biopaliv přibývá i množství otázek ohledně jejich socioekonomických a environmentálních dopadů. Na rozdíl od nejvíce diskutovaných problémů biopaliv, jako je například jejich negativní vliv na ceny potravin, je téma náročnosti biopaliv na vodní zdroje opomíjené (Drabik & Venus, 2017). Přitom se ukazuje, že biopaliva jsou až čtyřístakrát náročnější na vodu než jiné zdroje energie (Gerben-Leenes et al., 2008).

Tato práce si klade za cíl poukázat na současný stav produkce plodin pro výrobu biopaliv ve světě a na možná úskalí spojená s jejich pěstováním. Hlavní důraz je však kladen na problematiku biopaliv v kontextu vodní stopy. Práce se nevěnuje pouze porovnání vodních stop mezi jednotlivými plodinami, ale díky využití dat od Mekonnena a Hoekstry (2010) se v této práci ukazují i rozdíly vodních stop v rámci jedné plodiny v zemích světa. Tyto hodnoty jsou porovnány s klimatickými podmínkami daných regionů a zároveň jsou srovnány s dostupnými vodními zdroji státních útvarů.

Cílem práce je tedy zhodnotit, v kterých oblastech světa je možné pěstovat plodiny pro výrobu biopaliv ve vyšší míře, případně jaká plodina je v daném regionu z hlediska vodní stopy nejvýhodnější.

2 Teoretická část

2.1 Vodní stopa

2.1.1 Virtuální voda

Ještě před existencí pojmu vodní stopa zavedl v roce 1993 koncept tzv. virtuální vody britský geograf John Anthony Allan, který se inspiroval analýzou ekonoma Gideona Fishelona. Ten v osmdesátých letech varoval, že Izrael pěstuje a vyváží plodiny, které jsou náročné spotřebou vody (WWC, 2004), což vzhledem ke geografickým podmínkám Izraele není úplně vhodné.

Allan (1993) virtuální vodu definoval jako „celkové množství vody potřebné k výrobě daného produktu.“ Tento ukazatel nevyužíval pouze u potravin a chovu dobytka, ale také v průmyslu, jako například v automobilismu. Dokonce odhadoval i virtuální vodu u služeb, a to konkrétně v cestovním ruchu. Tato metoda měla za cíl ukázat, že sušší regiony by mohly vodou šetřit tak, že by dovážely produkty, které jsou náročnější na spotřebu vody a tím by vodu ušetřily (Velázquez et al., 2010).

2.1.2 Definice vodní stopy

Pojem vodní stopa byl poprvé představen profesorem Arjenem Y. Hoekstrou v roce 2002 na Mezinárodním setkání odborníků o obchodu s virtuální vodou¹ v nizozemském Delftu.

Vodní stopu definoval jako „ukazatel, který říká, kolik vody bylo spotřebováno a znečištěno během celého výrobního a dodavatelského řetězce výrobku nebo služby.“ (Hoekstra, 2019) Tento údaj z důvodu lepšího kvantifikování přepočítával na jednu osobu nebo konkrétní stát. Tímto ukazatelem by se prý širší veřejnost mohla názorně dozvědět, jakou mají nepřímou spotřebu vody a jaké plodiny jsou na vodní stopu náročné. Na rozdíl od virtuální vody, která se zabývala především pohledem dovážející země se Arjen Y. Hoekstra díval na problematiku i ze strany exportující země, jelikož podle něj právě ona má zásadní vliv na transport vodní stopy a často tímto způsobem vyveze více vody, než je pro daný region či zemi udržitelné. (Hoekstra et al., 2011; Hoekstra 2019)

¹ Přeloženo z anglického názvu International Expert Meeting on Virtual Water Trade.

2.1.3 Jednotlivé složky vodní stopy

Vodní stopa se skládá ze tří složek, z modré, zelené a šedé vody. V rámci těchto složek se vytváří jednotlivé vodní stopy a jejich součtem vznikne vodní stopa daného procesního kroku či produktu. Druhé možné dělení vodní stopy je na přímou a nepřímou vodní stopu.

2.1.3.1 Modrá a zelená vodní stopa

V roce 2006 vyšel článek od autorů A.Hoekstra a A.K.Chapagain, který mapoval vodní stopu bavlny. Zde se poprvé objevily jednotlivé složky vodní stopy, které se pojmenovaly jako modrá a zelená vodní stopa.

- Modrá vodní stopa představuje celkový objem spotřebované podzemní a povrchové vody. Skládá se z výparu této vody, poté z vody, která po využití změní své povodí a také z vody, která se přímo stane součástí daného produktu. U modré vodní stopy se někdy odhaduje, odkud tato voda konkrétně pochází, zda z povrchových, podzemních nebo fosilních vod². Nejvýznamnější složkou modré vodní stopy je výpar této vody a to natolik, že se často při výzkumech počítá pouze s tímto komponentem. Vzorec pro modrou vodní stopu je tedy součet těchto složek a jeho jednotka je množství vody za jednotku času. (Hoekstra et al., 2011)
- Zelená vodní stopa se skládá z vody, která dopadá ve formě srážek. Tato voda se tedy nachází buď na povrchu země nebo v půdě. Hlavní složkou zelené vodní stopy je výpar této vody. Podobně jako u modré vody i zde je součástí ta voda, která je v daném produktu či surovině obsažena, avšak i v tomto případě se v mnohých výzkumech tato část kvůli její zanedbatelnosti vynechává. Jednotka je shodná s modrou vodní stopou. (Hoekstra et al., 2011)

Toto rozdělení se nepoužívá pouze kvůli hydrologickým důvodům, jelikož mají rozdílný dopad na hydrologický cyklus, avšak i z ekonomických, potažmo sociálních důvodů, protože náklady při používání zelené vody jsou prakticky vždy nižší než při používání vody modré. (Hoekstra et al., 2011)

2.1.3.2 Šedá vodní stopa

Šedou vodní stopu neboli vodní stopu znečištění poprvé představili A.Hoekstra a A.K.Chapagain o dva roky později, než zelenou a modrou vodní stopu. Vychází ze starších indikátorů, primárně od autorky Sandry Postelové z roku 1996. Šedá vodní stopa

² V literatuře se toto rozdělení někdy rozlišuje jako světle modrá, tmavě modrá a černá vodní stopa.

se na rozdíl od jiných detekcí množství znečištěné vody se soustředí i na druh konkrétního znečištění.

Hoekstra et al. (2011) definovali šedou vodní stopu jako „objem vody, který je zapotřebí k zředění znečišťujících látek tak, aby se staly neškodnými dle místních standardů“.

Šedá vodní stopa se vypočítá podle vzorce:

$$VS_{\text{šedá}} = \frac{P}{c_{\text{max}} - c_{\text{přir}}}$$

Kde P je množství daného polutantu v čase, c_{max} je maximální koncentrace, která je vnímána jako neškodná a $c_{\text{přir}}$ je přirozená koncentrace, která se nachází v té dané vodě. (Hoekstra et al., 2011)

2.1.3.3 Přímá a nepřímá vodní stopa

Vodní stopa se dá vnímat i jako výsledek součtu přímé a nepřímé vodní stopy. Jednotlivé definice záleží na tom, jak vnímáme zacílení dané vodní stopy³.

Například u vodní stopy osob přímá vodní stopa znamená, kolik daný člověk spotřeboval vody (v domácnosti, na zahradě), kdežto nepřímá vodní stopa je součet všech vodních stop produktů, které tato osoba spotřebovala. (Hoekstra et al., 2011)

2.1.4 Water Footprint Network

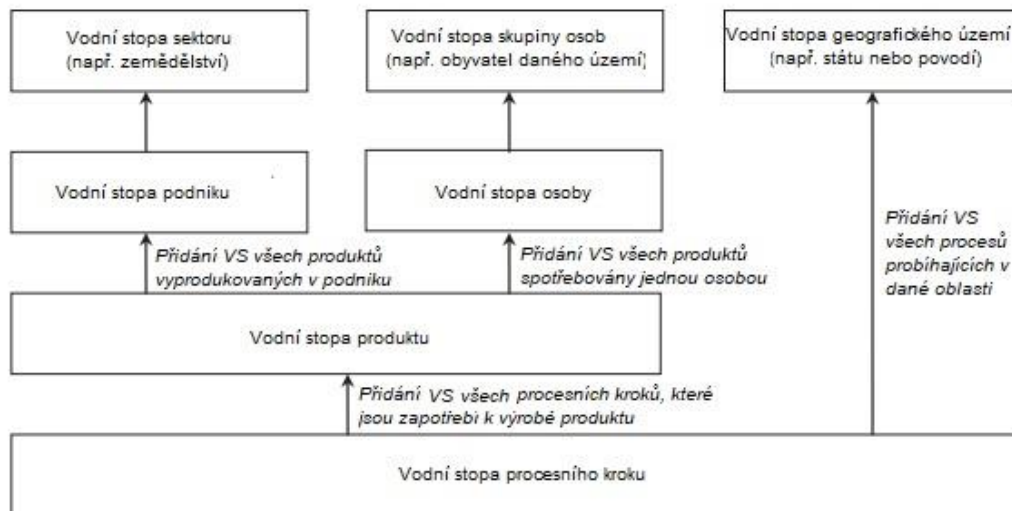
V roce 2008 vznikla A. Hoekstrou nezisková organizace Water Footprint Network (WFN), která si klade za cíl poukázat na neudržitelné hospodaření s vodou a propagovat ukazatel vodní stopy i v rámci širší veřejnosti. Zároveň se WFN pokouší stále vyvíjet a zlepšovat nástroje pro výpočet vodní stopy. V roce 2011 WFN vydala rozsáhlou publikaci *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, která funguje jako příručka pro stanovení vodní stopy a jako doporučení, jak analyzovat vodní stopu. V této knize vznikl pojem tzv. Water footprint assessment (WFA) neboli hodnocení vodní stopy. „WFA nemá za cíl pouze stanovit hodnotu vodní stopy, ale i:

- Kvantifikovat a lokalizovat vodní stopu daného produktu či procesu
- Posoudit, zda tato vodní stopa je v rámci tohoto regionu udržitelná
- Formulovat strategii na případnou reakci“ (Hoekstra, 2019)

³ Vysvětlení jednotlivých zacílení na obrázku č.1

Jak bude finálně WFA vypadat, záleží i na kontextu vodní stopy, jelikož se může zkoumat jak konkrétní produkt, tak se dá WFA aplikovat i na celý stát. Na obrázku (Obr. 1.) jsou vidět jednotlivé vodní stopy, podle nichž se stanovuje WFA. (Hoekstra et al., 2011)

Obr. 1., Vnímání jednotlivých vodních stop v rámci jejich zacílení



Zdroj: obrázek přeložen z Hoekstra et al., 2011

2.1.5 Kritika vodní stopy

I když je vodní stopa mladý pojem, tak se poměrně rychle rozšířil mezi vědeckou komunitu. Někteří vědci jsou o využitelnosti vodní stopy skeptičtí a upozorňují na její limity (Chapagain, 2012). Například Dennis Wichelns poukazuje, že vodní stopa v sobě zahrnuje pouze informace o vodě, ale ne jiné aspekty, jako jsou environmentální, sociální a ekonomické dopady v případě uplatnění vodní stopy na národní úrovni. Vodní stopa prý dostatečně nereflektuje dané hospodaření s vodou, jako je zavlažování a možné šetření s vodou, které by se následně využilo. (Wichens, 2010; 2015)

Wichelns (2017) říká, že „vodní stopa jako indikátor nemá praktické využití, jelikož každý region, který trpí vodním stresem vyžaduje individuální analýzu a dostatečnou investici pro zlepšení situace.“

2.2 Nedostatek vody

I když se s pojmem nedostatek vody setkáváme často, tak je tento pojem poměrně nejednoznačný, jelikož neexistuje jedna ustálená definice, dokonce i celkový pohled na

tuhle problematiku se často liší. To může vézt k nejasnostem při porovnávání výzkumů. (White, 2014)

Obecně však nedostatek vody nastává, když poptávka vody převyšuje její dostupné zásoby (Winpenny, 1993). Nicméně záleží, co vše je vnímáno jako poptávka vody, zda jsou brány v úvahu potřeby životního prostředí anebo například co vše je zahrnuto v rámci potřeby lidí. Také u dostupnosti zásob lze polemizovat ohledně vymezení tohoto pojmu, například zda se počítá i voda, která je pouze potenciálně dostupná, či zda se rozlišuje kvalita vody (Rijsberman, 2006). Projevům nedostatku vody se říká vodní stres, avšak se často tento pojem zaměňuje s nedostatkem vody (FAO, 2012).

2.2.1 Příčiny nedostatku vody

Příčiny nedostatku vody mohou mít různé důvody. Podle Secklera (1998) „existují dva hlavní typy příčin vzniku nedostatku vody, a to fyzický nedostatek vody a ekonomický nedostatek vody“.

Fyzický nedostatek vody nastává v případě, že přírodní vodní zdroje nestačí na poptávku všech požadavků. Mezi tyto požadavky nepatří pouze potřeby společnosti, ale i enviromentální požadavky (Seckler, 1998). „Příznaky fyzického nedostatku vody jsou například degradace životního prostředí a pokles podzemních vod“ (FAO, 2012). Přibližně 20 % celosvětového obyvatelstva se potýká s fyzickým nedostatkem vody, hlavně v zemích Střední Asie nebo na Arabském poloostrově. (Rijsberman, 2006).

Ekonomický nedostatek vody je způsoben především nízkými investicemi do vodohospodářské infrastruktury, projevuje se tedy i v místech, kde je vody dostatek, avšak oblasti jsou natolik chudé či politicky nestabilní, že nedokážou tuhle vodu zajistit. (FAO, 2012) Přibližně 25 % celkové populace se potýká s ekonomickým nedostatkem vody, nejvíce v subsaharské Africe (Rijsberman, 2006).

2.2.2 Metody stanovení nedostatku vody

Pro kvantifikování nedostatku vody existuje mnoho ukazatelů, které se liší svojí metodikou, takže jsou často i výsledky rozdílné. V této kapitole jsou vybrány dva známé indikátory. Každý z nich se dívá na problematiku nedostatku vody z jiného pohledu.

2.2.2.1 Falkenmark Water Stress Indicator

Mezi nejznámější ukazatele nedostatku vody patří Falkenmark Water Stress Indicator. Ten závisí na dvou proměnných, a to na povrchovém odtoku dané oblasti (m^3/rok) a na populaci v daném regionu (Falkenmark, 1989). Jednotkou je $\text{m}^3/\text{osoba}/\text{rok}$.

$$FI = \frac{\text{Povrchový odtok}}{\text{Populace}}$$

Pokud je výsledek nižší než $1700 \text{ m}^3/\text{os}/\text{rok}$, podle indikátoru by v dané oblasti mělo docházet k vodnímu stresu. Když je hodnota nižší než $1000 \text{ m}^3/\text{os}/\text{rok}$, tak se dá hovořit o nedostatku vody, který by se měl začít ve společnosti projevovat například nižším ekonomickým rozvojem. Nejhorším stupněm je tzv. absolutní nedostatek vody, kdy výsledkem je nižší číslo, než $500 \text{ m}^3/\text{os}/\text{rok}$. Tato hodnota vymezuje hranici, při které by mělo docházet k omezení života. (WSM 2004, White 2014)

I když se tato metoda velice často používá, a to i z důvodů dobré dostupnosti dat a jednoduchosti této metody, tak má i řadu nevýhod (White, 2014). Mezi největší nevýhody patří nezohlednění mnoha faktorů, které jsou v rámci používání vody zásadní, například indikátor zcela ignoruje roční sezónnost dostupnosti vody či nezohledňuje vodohospodářskou infrastrukturu (Rijsberman, 2006).

2.2.2.2 Water Poverty Index

Water Poverty Index je poměrně komplexní metoda hodnocení nedostatku vody, která dává do souvislosti nejen fyzické, ale i sociální a ekonomické faktory. V následující tabulce (Tabulka 1.) je ukázán seznam všech faktorů, které tento index zohledňuje.

Každá z těchto jednotlivých složek je vyjádřena hodnotou mezi 0 až 100, přičemž hodnoty blízké se k nule jsou z hlediska Water Poverty Indexu nejhorší. Výsledkem je vážený průměr těchto komponentů, tudíž výsledkem je taktéž hodnota mezi 0 až 100. (Sullivan, 2002)

Výhoda tohoto indikátoru je jeho komplexnost, avšak je poměrně obtížné získat kvalitní data. Water Poverty Index se zpracoval pro většinu zemí světa. Zjistilo se, že vysoké hodnoty tohoto indexu mají skoro vždy vyspělé země, naopak rozvojové státy mají velice nízkou hodnotu. (Liu, 2017)

Tabulka 1. Faktory, které WPI zohledňuje

Komponent WPI	Použitá data
Zdroje	Množství sladkovodních toků
	počet obyvatel
Přístup	populace, která má přístup k čisté vody (v %)
	míra pokrytí základních asanací na obyvatele (v %)
	přístup obyvatelstva k zavlažování (v %)
Kapacita	parita kupní síly na obyvatele
	úmrtnost do pěti let
	vzdělanost
	Giniho koeficient rozdělení příjmu
Použití	spotřeba užitkové vody v litrech za den
	Podíl spotřeby vody v průmyslu a zemědělství zohledněné s HDP
Životní prostředí	Indexy
	kvality vody
	vodního stresu
	managementu a regulace životního prostředí
	informovanosti obyvatel
	biodiverzity založené na ohrožených druzích

Zdroj: tabulka přeložena z Lawrence, 2002

2.3 Biopaliva

Biopalivo je palivo, které je vyrobeno z biomasy nebo biologického odpadu, tedy ze zdrojů živočišného či rostlinného původu. Na rozdíl od fosilních paliv se jedná o obnovitelné zdroje, jelikož se biomasa vyprodukuje v poměrně krátkém časovém horizontu.

Často bývá pojem biopalivo zaměňován s biomasou, avšak biomasa je materiál, z kterého se biopaliva vyrábějí nebo se dá jinak energeticky využít.

2.3.1 Historie

I přes to, že se biopaliva mohou zdát jako něco nového, tak svým způsobem je historie biopaliv prakticky stejně dlouhá jako samotná historie lidstva, neboť i tradiční využívání ohně, jakožto zdroje energie můžeme řadit mezi biopaliva (Guo et al., 2015). Do konce 19. století se celosvětově topilo hlavně dřevem a rostlinné oleje se využívaly jako palivo pro osvětlení. I první spalovací motory a lampy byly poháněny biopalivy. Přechod k fosilním palivům nastal až začátkem 20. století. Zatímco byl tento přesun z biopaliv na fosilní v Evropě postupný, v USA byl kvůli rozdílům v daňové politice poměrně skokový. Naopak vývoj a zvýšené používání biopaliv nastal za druhé světové války, kdy

se mnoho států snažilo o energetickou soběstačnost. Podobná situace nastala při ropném embargu v roce 1973, kdy země začaly investovat do výzkumu biopaliv. (Kovarík, 2013)

Od počátku 21. století se z důvodu globálních změn klimatu a enviromentální udržitelnosti stále více podporuje rozvoj biopaliv. Probíhá bezpočet politických debat a biopaliva jsou často zvýhodňována na úkor fosilních paliv. (Kovarík, 2013)

2.3.2 Dělení biopaliv

Biopaliva se dají klasifikovat podle mnoha faktorů. Dělit je můžeme podle skupenství, jelikož se biopaliva používají ve všech třech základních formách.

- Pevná neboli tuhá biopaliva – hlavně biopaliva ze dřeva jako štěpka, brikety, pelety
- Kapalná biopaliva – bioetanol, butanol, bionafta
- Plynná biopaliva – bioplyn a dřevoplyn

Druhým možným dělením je dělení podle typu získávání biomasy, tedy klasifikace není založena přímo na rozdělení biopaliv, nýbrž jakým způsobem vznikla surovina, z které se biopaliva vyrábí. Tímto způsobem se biopaliva rozdělují do jednotlivých generací.

2.3.2.1 Rozdělení biopaliv podle generací

Biopaliva první generace se vyrábí přímo ze zemědělských plodin, konkurují tedy plodinám vysetých za účelem získávání potravy či krmiv. Používané plodiny jsou bohaté na sacharidy, jako například kukuřice, cukrová třtina či sója. Nebo jsou to plodiny, z kterých se získává olej, a to například slunečnicový, palmový nebo řepkový. (Naqvi, 2015)

Oproti tomu biopaliva druhé generace se vyrábí z tzv. nepotravinářské biomasy. Hlavní nepotravinářskou biomasou je tzv. lignocelulózová biomasa, což mohou být jak zbytky ze zemědělské či lesní činnosti (seno, sláma, zbytky klasů, štěpka nebo například piliny), tak i energetické plodiny, a to od travnatých rostlin (ozdobnice čínská) až po rychlerostoucí dřeviny (akát, topol). (Mousdale, 2017) Další nepotravinářskou biomasou může být biologický odpad z domácnosti. Obecně platí, že u biopaliv druhé generace je technologický proces složitější a náročnější než u biopaliv první generace (Roger et al., 2019).

Existuje i třetí generace biopaliv, která se vyrábí z řas, avšak i přes nesporné výhody pěstování řas a celkového potenciálu třetí generace biopaliv zatím neexistuje žádná komerční výroba a spíše je tato generace ve fázi intenzivního výzkumu. (Roger et al., 2019)

2.3.3 Příklady biopaliv

V následující kapitole jsou zahrnuty nejvíce používaná biopaliva, která se vyrábějí z plodin.

2.3.3.1 Bioetanol

Mezi hlavní biopaliva patří bioetanol, který se v rámci biopaliv první generace vyrábí alkoholovým kvašením škrobnatých, respektive cukernatých plodin, jako je cukrová řepa, kukuřice, cukrová třtina nebo například i obilí (Naqvi, 2015)

Bioetanol se vyrábí i z lignocelulózové biomasy, takže se v tomto případě může bioetanol řadit mezi biopaliva druhé generace. Tato biomasa je nejčastěji hydrolytickým štěpením přeměněna na jednoduché cukry a následnou fermentací vzniká bioetanol. (Mousdale, 2017). Podle Hromádka et al. (2010) „je tento proces konverze mnohonásobně obtížnější než výroba bioetanolu první generace“.

Vyrobený bioetanol se nejčastěji přidává do paliva používaným ve spalovacích motorech. Nejznámější směsí je palivo E85, které se skládá z 85 % bioetanolu a 15 % bezolovnatého benzínu. To má za důsledek vyšší oktanové číslo než u klasických fosilních paliv. Používá se i 100 % bioetanol jako palivo, a to hlavně v Brazílii. (Mousdale, 2017)

2.3.3.2 Bionafta

Dalším biopalivem je bionafta, jejíž součástí je tzv. metylester mastných kyselin neboli FAME⁴, což je látka, která se vyrábí rafinačním procesem jménem esterifikace. V této reakci se olej mísí s metanolem za přítomnosti hydroxidu sodného. (Naqvi, 2015) Vedlejším produktem reakce vzniká glycerol (Mousdale, 2017). Metylestery mastných kyselin se vyrábějí z rostlinných olejů, nejvíce z palmového, sójového a slunečnicového oleje. (Singh, 2013) V Evropě, včetně České republiky se metylestery získávají i z řepkového oleje. Pro tento metylester se používá zkratka MEŘO.

⁴ Z anglického Fatty acid methyl esters

Podobně jako bioetanol, i bionafta se dá vyrábět jako biopalivo druhé generace. Konkrétně pomocí technologie, která se jmenuje Fischerova-Tropschova syntéza. (Mousdale, 2017; Hromádko et al., 2010) Díky tomuto procesu vzniká tzv. syntetická motorová nafta, která je často přidávána do nadstandartních paliv a zvyšuje jejich kvalitu (Hromádko et al., 2010).

2.3.3.3 Hydrogenovaný rostlinný olej

Hydrogenovaný rostlinný olej neboli HVO⁵ je poměrně nové a inovativní biopalivo, které se v posledních letech stále více vyrábí. Například ve Švédsku je nejpoužívanějším biopalivem. (Sherrard, 2017) Může se vyrábět prakticky ze všech rostlinných olejů. Toto biopalivo je natolik kvalitní, že ho lze využít jako palivo do letadel a díky tomu umožňuje snižování emisí z letecké dopravy. (Váchová & Vozka, 2015)

HVO se vyrábí za použití katalyzátorů založených na bázi kombinace kovů. Proces hydrogenace probíhá ve vodíkové atmosféře, kde tlak je okolo 20 MPa a teplota v rozmezí 300-420 °C. V těchto podmínkách dochází k mnoha chemickým reakcím. Výsledkem je přeměna rostlinných olejů na jednoduchou směs uhlovodíků. (Váchová & Vozka, 2015)

Hydrogenovaný rostlinný olej se může vyrábět i z upotřebených kuchyňských olejů nebo odpadních tuků, toto biopalivo se označuje HEFA⁶ (Šimáček et al., 2017).

⁵ Z anglického Hydrotreated vegetable oil

⁶ Z anglického Hydroprocessed esters and fatty acids

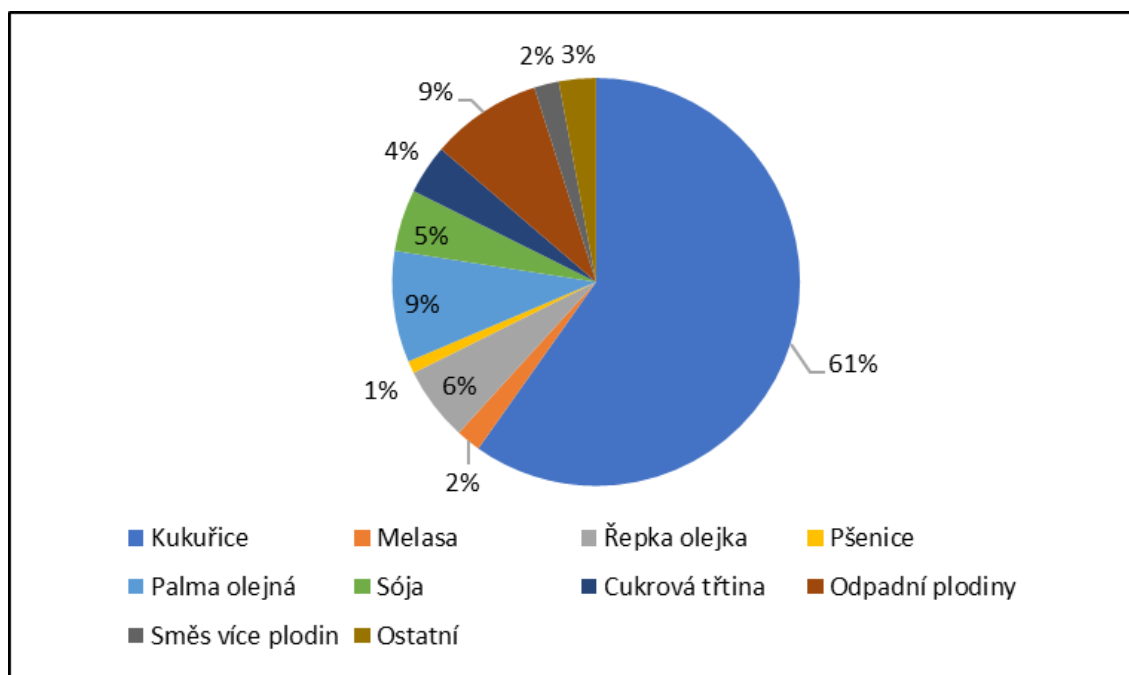
3 Současný stav biopaliv ve světě

3.1 Pěstování plodin pro biopaliva

Následující kapitola má za cíl nastínit aktuální situaci pěstování plodin pro výrobu biopaliv, a to včetně problematiky s ní spojené.

Bohužel je poměrně obtížné zjistit podíl jednotlivých vypěstovaných plodin za účelem výroby biopaliv. Pro názornost je uvedeno na následujícím grafu (Graf 1.) procentuální zastoupení plodin pro výrobu biopaliv, které vyrábí a zpracovává firma Shell. Tato firma je jedna z největších výrobců biopaliv na světě. Je zde vidět jasná dominance kukuřice, naopak z olejnatých plodin se nejvíce používá řepka olejná a palma olejná.

Graf 1. Využívání plodin pro výrobu biopaliv firmou SHELL



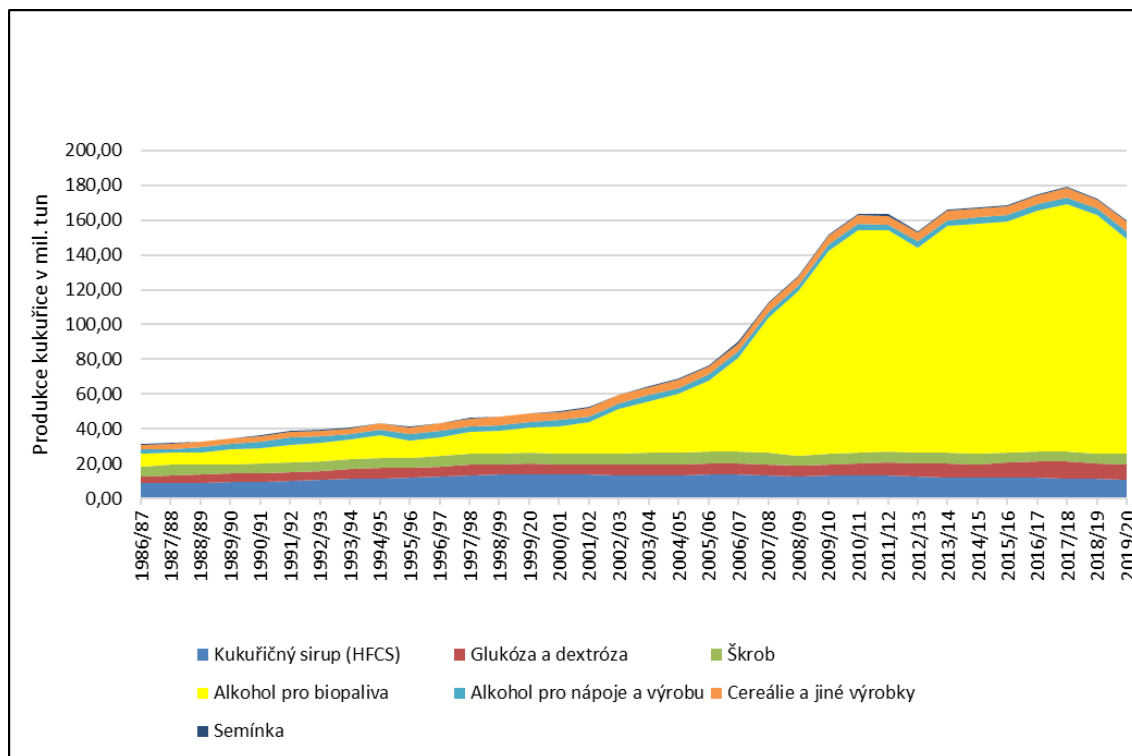
Zdroj: graf vytvořen z dat z reportu Shell, 2019

Pro představu změny využívání plodin v čase je uveden na grafu (Graf 2.) příklad využití vypěstované kukuřice v USA. V rámci přehlednosti jsou zde uvedeny pouze typy využití přímo pro potřeby lidí, nejsou zde tedy zahrnuty například krmiva pro zvířata. Na grafu je zjevný nárůst pěstování kukuřice pro výrobu biopaliv od roku 2000. Naopak v posledních letech se tento nárůst nezaznamenává, spíše naopak klesá.⁷ Ostatní typy

⁷ Důvodem je změna dotační politiky viz. kapitola Produkce biopaliv

využití jsou prakticky v čase konstantní, tedy rozšiřování pěstování je ovlivněno přímo produkcí kukuřice pro biopaliva.

Graf 2., Využívání kukuřice v USA v čase



Zdroj: graf vytvořen z dat z ERS, 2021⁸

3.1.1 Vliv na biodiverzitu a odlesňování

Produkce biopaliv každým rokem celosvětově roste a s tím je spojen i větší zábor půdy. To vede k otázce, do jaké míry má vliv pěstování plodin na biodiverzitu, protože i když existuje mnoho moderních alternativ, nejvíce se stále používají biopaliva první generace nebo biopaliva vyrobená z rychlerostoucích dřevin. Důvodem je nízká cena a jednoduchost výroby (Roger et al., 2019).

Hlavním problémem je, že se často tyto plodiny pěstují na místech, které se dosud nevyužívaly pro zemědělskou činnost, a jelikož se plodiny pěstují především monokulturně na velkých plochách, jsou tyto oblasti druhově velmi chudé. (Wiens, 2011) Největší dopad je především v tropech při pěstování palmy olejná a cukrové třtiny. To se netýká pouze rostlin, ale i živočichů. Podle Fletchera Jr. (2010) „v oblastech, kde se

⁸ Jednotky byly převedeny z „bushels“ na tuny dle převodníku kukuřice ze stránky <https://www.agric.gov.ab.ca/app19/calc/crop/bushel2tonne.jsp>

pěstují plošně biopaliva je zaznamenán nižší počet obratlovců, a to jak početně, tak i druhově“. Například v některých regionech Brazílie dochází k destrukci celých ekosystémů a ničení původních pralesů (Garcia, 2017). Navíc tyto plodiny jsou často invazivní a mohou se šířit mimo plantáže (Pohl, 2012).

Monokulturní plodiny jsou daleko náchylnější k škůdcům a chorobám. Z tohoto důvodu se často používají dusíkatá hnojiva, a i ty mají za důsledek sníženou biodiverzitu. Oblastem, které jsou takto postiženy se říká *death zones* a jsou například u delty řeky Mississippi u Mexického zálivu nebo v oblasti Guarani, kde z důvodu používání glyfosátových herbicidů dochází k snížení půdních mikroorganismů (Liu, 2014).

Bohužel se nedá přesně kvantifikovat do jaké míry probíhá odlesňování z důvodu pěstování plodin pro biopaliva, protože data existují jen ve velmi omezeném množství. Avšak dopad v budoucnu může být významný, pokud jednotlivé státy dodrží své ambiciózní cíle v oblasti biopaliv. (Gao et al. 2011, Skutsch et al. 2011)

Momentálně je nejhorší situace v amazonském pralese, jelikož koncem roku 2019 brazilský prezident Jair Bolsonaro zrušil zákaz pěstování cukrové třtiny, aby pomohl zvýšit produkci biopaliv v zemi. Toto rozhodnutí zvyšuje obrovský tlak na deštné pralesy. (Ferrante & Fearnside 2020)

3.1.2 Spotřeba vody

Problém spotřeby vody při pěstování plodin na výrobu biopaliv je na rozdíl od jiných problémů pěstování poměrně upozaděn, což je velmi závažné (Drabik & Venus, 2017).

Podle nejruznějších studií vyplývá, že množství půdy i vodních zdrojů stačí k pokrytí výživy všech lidí na světě, avšak momentální hospodaření může vést k vodním krizím na řadě míst světa. Žádná z těchto studií však nezahrnuje široké využití biopaliv. To vyvolává otázky, zda vodní zdroje jsou dostatečné, případně jaký dopad bude mít čím dál intenzivnější pěstování plodin za účelem výroby biopaliv. (Fraiture & Berndes, 2009).

Biopaliva jsou až čtyřikrát náročnější na vodu než jiné zdroje energie, jako jsou fosilní paliva, větrná a solární energie (Gerben-Leenes et al., 2008). Více než 90 % vody biopaliva spotřebují ve fázi růstu plodin, přičemž biopaliva první generace vyrobená z plodin jsou více náročná na vodu než biopaliva vyrobená z lignocelulózových rostlin. Naopak ve fázi zpracování biomasy na samotná biopaliva se použije relativně malé množství vody. (Berndes, 2002)

V některých oblastech světa se tyto plodiny obejdou bez zavlažování, avšak ve spoustě zemí tomu tak není. Například Brazílie, která je největším producentem cukrové třtiny nemusí prakticky nikdy zavlažovat, naopak v Indii se cukrová třtina pěstuje za přítomnosti zavlažovacích systémů. Kukuřice je většinou zavlažována v Číně a v USA pouze částečně. (Fraiture & Berndes, 2009) Palma olejná a maniok nevyžadují zavlažování. (Müller et al. 2008)

Například na jeden litr etanolu na bázi cukrové třtiny v Indii vyžaduje 3500 litrů závlahové vody, kdežto stejné množství etanolu z kukuřice v Číně potřebuje 2400 litrů závlahové vody (Fraiture & Berndes, 2009).

3.1.3 Ceny potravin

Jedno z nejdiskutovanějších témat ohledně biopaliv je to, jak moc ovlivňují biopaliva ceny potravin. Existuje bezpočet vědeckých prací a analýz, které se tomuto tématu věnují a často mají rozdílné výsledky. Pěstování plodin pro biopaliva a pro potraviny si svým způsobem konkurují, vezmeme-li v úvahu, že zemědělské plochy je pouze omezené množství.

Jedním z důvodů aktuálnosti tohoto kontroverzního tématu je fakt, že od nového tisíciletí, kdy se začala biopaliva produkovat ve větším měřítku se ceny potravin velmi zvýšily. Například od roku 2000 do roku 2011 se cena kukuřice zvýšila o 180 % (Zilberman et al. 2014).

Podle reportu organizace ActionAid (Rice, 2010) se biopaliva podílí 30 % na celosvětovém nárůstu potravin, což způsobilo, že kvůli biopalivům 100 milionů lidí se ocitlo za hranicí chudoby a 30 milionů lidí trpí hladem. Podle Debocqueta (2012) mohou biopaliva za zdražení pšenice o 2 % a u kukuřice o 15–40 %. Nejvíce biopaliva ovlivnila cenu rostlinných olejů, a to o 40 %.

Naopak podle výzkumu Amely Ajanovicové (2011) nemají biopaliva významný dopad na cenu potravin.

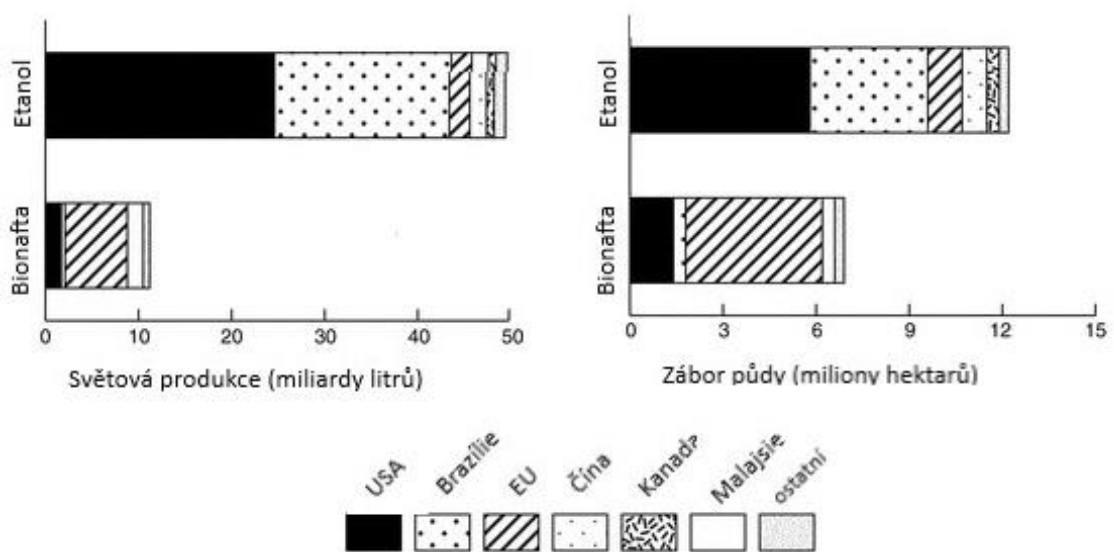
3.1.4 Výnosnost plodin

Na rozdíl od výhřevnosti jednotlivých biopaliv z různých plodin, která je velmi podobná, se výnosnost jednotlivých plodin velmi liší (Kong et al., 2013).

Na obrázku (Obr. 2.) jsou vidět dvě dvojice grafů, které ukazují, kolik se v roce 2009 vyprodukovalo litrů biopaliv a zároveň množství zabrané půdy plodinami, z kterých se tyto biopaliva vyrábějí. Z těchto grafů je zřejmé, že plodiny, z nichž se vyrábí bionafta jsou daleko náročnější na zábor půdy, pokud jde o množství získaného biopaliva.

Nejvýhodnější plodinou, která má největší výnosnost biopaliv je cukrová třtina. Z jednoho hektaru této plodiny se průměrně vyrobí přibližně 3400 litrů biopaliva. Oproti tomu řepka olejná má méně než poloviční výnosnost, a to 1500 l/ha. Nejhůře na tom je sója, z hektaru této plodiny se vyrobí pouze 600 litrů biopaliva. (IEA, 2011)

Obr. 2., Vliv produkce biopaliv na zábor půdy

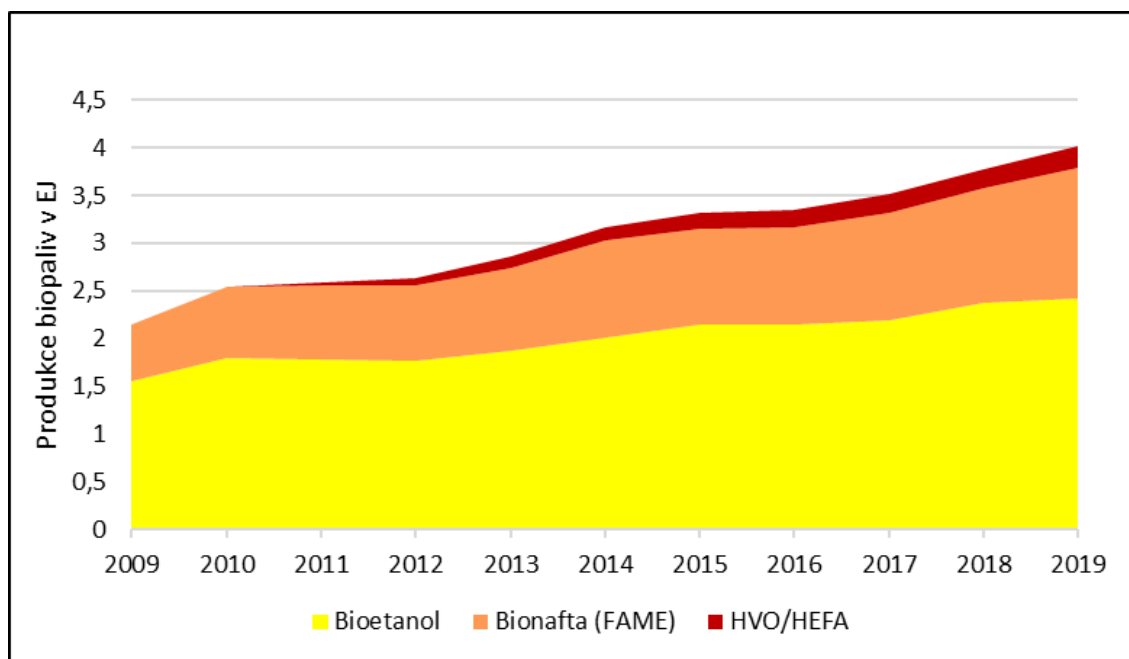


Zdroj: obrázek přeložen a upraven z Wiens, 2011

3.2 Produkce paliv

Moderní biopaliva poskytují celosvětově asi 5,1 % celkové energie, což je ze všech druhů obnovitelných zdrojů největší podíl na světě a tvoří asi polovinu všech obnovitelných zdrojů. Globální roční produkce kapalných biopaliv byla v roce 2019 161 miliard litrů, což odpovídá ekvivalentu 4 EJ. Největším výrobcem je USA, která vyrábí 41% celkové produkce kapalných biopaliv, dalším významným výrobcem je Brazílie (26 %) a na dalších místech jsou Indonésie (4,5 %) a Německo (2,8 %). (REN21, 2020)

Graf 3., Celosvětová produkce biopaliv



Zdroj: graf vytvořen z dat z reportu REN21, 2020

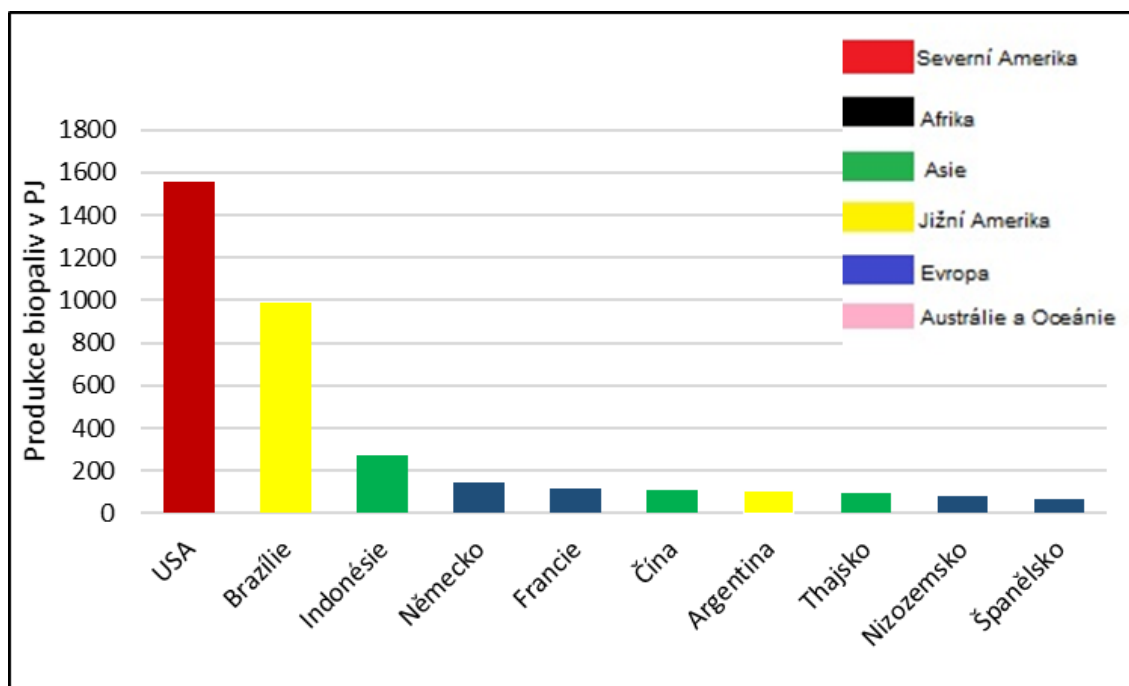
Hlavními biopalivy jsou bioetanol, bionafta a HVO společně s HEFA. V roce 2019 představoval etanol 59 % celkové produkce, bionafta 35 % a HVO s HEFA 6 %. Ostatní biopaliva jako biometan jsou v celosvětové produkci zanedbatelná. (REN21, 2020)

Celosvětově se produkce bioetanolu zvýšila o 2 %. Největší meziroční nárůst produkce zaznamenala Brazílie, konkrétně o 7 % na 35,3 miliardy litrů. V Indii se zvýšila produkce mezi roky 2018 a 2019 dokonce o 70 % (na 2 miliardy litrů) a to z důvodu snahy snížit dovoz ropy. (REN21, 2020) V následujících letech se nejspíše bude rozvíjet výroba etanolu i v Číně, neboť si klade za cíl přimíchávat 10 % bioetanolu do benzínu ve všech provinciích (Tsanova, 2018). Naopak Spojené státy americké snížily produkci o 7 % z důvodu omezení daňového zvýhodnění. (REN21, 2020)

Daleko větší nárůst globální produkce je u bionafty, která se z roku 2018 na rok 2019 zvýšila celkově o 13 %. Za tento vysoký nárůst může především stát Indonésie, který zdvojnásobil produkci a nyní je největším výrobcem bionafty na světě. I v Brazílii došlo k nárůstu výroby, konkrétně o 11 %. (REN21, 2020)

K silnému růstu dochází i výroba HVO a HEFA, zde došlo k nárůstu o 12 %. Výroba je soustředěna ve Finsku, Nizozemsku a v Singapuru. (REN21, 2020)

Graf 4., Produkce biopaliv dle jednotlivých zemí



Zdroj: graf vytvořen z dat od Sömnichsena (2021)

Na grafu (Graf 4.) jsou vidět největší producenti biopaliv v roce 2019. Nejvíce biopaliv vyrobí Spojené státy americké, avšak produkce v Brazílii i Indonésii je v posledních letech ze strany vlády velice podporována a odhaduje se, že v následujících letech se výroba bude i nadále zvyšovat. (Ferrante & Fearnside 2020; REN21, 2020)

3.2.1 Politika biopaliv

Rozmach biopaliv ve světě nemá pouze ekologické důvody, ale jejich rozšíření má často i politický kontext. V Brazílii je tento rozmach ovlivněn situací, ve které se Brazílie objevila v roce 1975. Počínaje tímto rokem Brazílie prakticky nemohla dovážet ropu. (Moraes & Zilberman, 2014) V podobné situaci se objevila USA v roce 1973, kdy na Spojené státy americké bylo uvaleno ropné embargo ze strany zemí OPEC⁹, jelikož USA podporovala Izrael během Jomkipurské války. Z podobných důvodů se mnoho zemí snaží být alespoň částečně energeticky soběstačné.

Výroba biopaliv se prakticky nikdy neobejde bez vládní podpory. (Zilberman et al., 2014) Biopaliva jsou často zvýhodňována nejrůznějšími formami, a to až dotacemi

⁹ Organizace zemí vyvážející ropu

nebo úlevami od daní. Jednotlivé země si od biopaliv neslibují pouze ekologické výhody, ale i vznik nových pracovních míst na venkově (Magdoff, 2008).

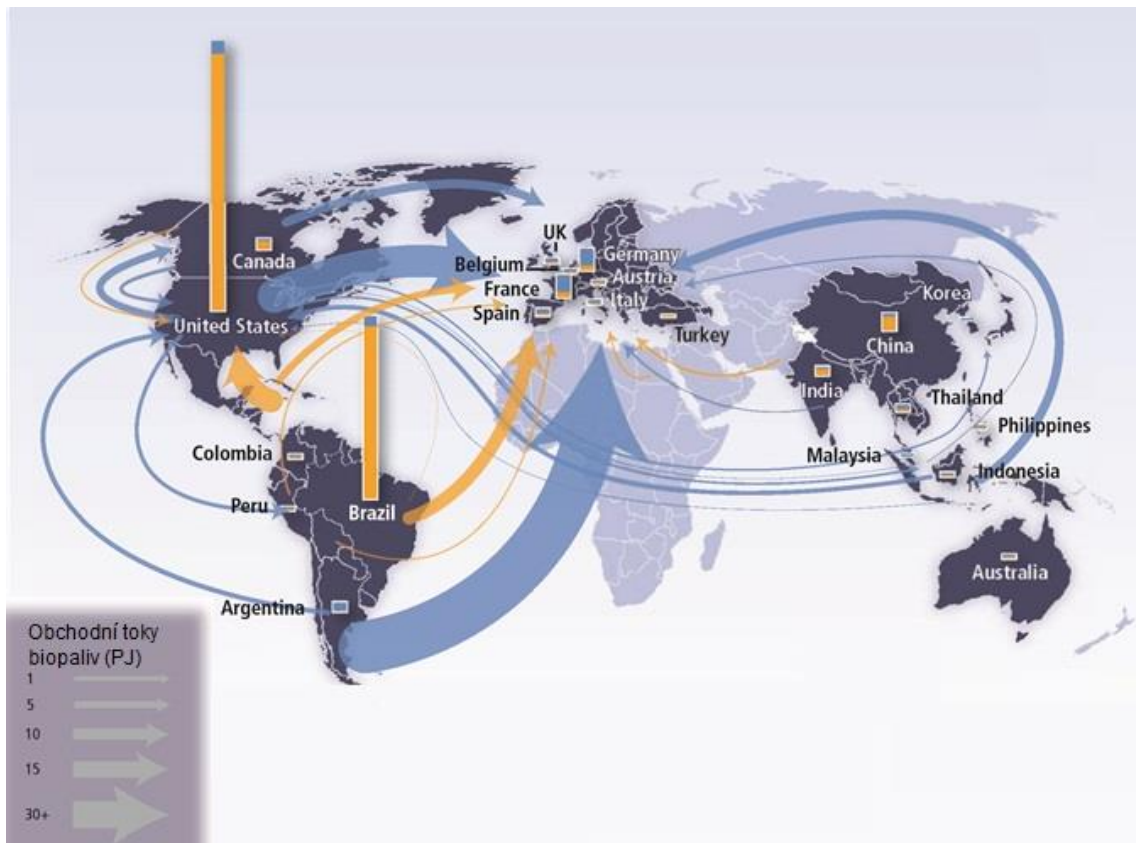
Například vláda Spojených států amerických významně dotuje pěstování plodin za účelem výroby biopaliv. (Zilberman et al., 2014) V roce 2005 byl založen vládní program *Renewable Fuel Standard*, který si klade za cíl velkou podporu biopaliv, kupříkladu díky tomuto programu američtí výrobci aut přizpůsobili své automobily na palivo E85 (Grover, 2018). Brazílie a státy Evropské Unie zdánlivě zdanily fosilní paliva daleko více než biopaliva. Díky tomuto rozhodnutí se nejen podpořila biopaliva, ale zároveň se velmi zvýšil vládní příjem (Zilberman et al., 2014).

3.2.2 Obchod s biopalivy

Mnoho zemí má konkurenční výhodu při výrobě biopaliv a zároveň jejich výroba převyšuje národní poptávku. Oproti tomu existuje spousta zemí, které z mnoha důvodů nevyrábějí biopaliva v takové míře, jaké by potřebovaly. To vede k mezinárodnímu obchodu s biopalivy.

V současné době se většina biopaliv vyváží z Argentiny, Brazílie, USA a zemí v jihovýchodní Asii do Evropy. Další větší trh je mezi USA a Brazílií, kde se v obou směrech dováží bioetanol (Singh, 2012). Následující mapa (Obr. 3.) vychází z dat z roku 2009 a již je zde zřejmé, že existuje poměrně velký mezinárodní obchod s biopalivy. Žluté šipky znázorňují transport etanolu, naopak modré šipky znázorňují bionaftu. Vertikální sloupce ukazují produkci biopaliv v dané zemi.

Obr.3., Obchodní toky biopaliv



Zdroj: obrázek přeložen a upraven z reportu IPCC (Edenhofer et al., 2012)

3.2.3 Energetická efektivnost biopaliv

Energetická efektivnost biopaliv je bilance dodané a získané energie při výrobě daného biopaliva. Do této bilance se započítávají všechny náklady, včetně například transportu.

Podle autorů Earley a McKeown (2009) je tato bilance u biopaliva vyrobeného z čiroku 1:1, což znamená, že získaná energie je stejně velká, jako energie, která byla vynaložena na výrobu tohoto biopaliva. O něco lépe si vede kukuřice, která má tento poměr 1,5:1. Podobně na tom je cukrová řepa a pšenice, tyto dvě plodiny poskytují dvakrát větší energii, než byla potřeba k výrobě. Nejlépe z biopaliv první generace je na tom cukrová třtina, která má poměr 8:1. Největší potenciál mají biopaliva z lignocelulóзовých rostlin, kde tento poměr může být až 36:1.

Podle Pimentala a Patzaka (2005) dochází dokonce k záporným hodnotám energetické efektivnosti biopaliv. Bioetanol vyrobený z kukuřice podle nich spotřebuje o 29 % více fosilní energie, než může poskytnout. Podobně je na tom bionafta vyrobená ze sóji, která vyžaduje o 27 % více energie. Nejhůře je na tom bionafta ze slunečnice, ta podle výzkumu spotřebuje dokonce o 118 % více fosilní energie.

4 Analytická část

4.1 Data

4.1.1 Vodní stopa

Data, která jsou použita v této práci, vznikla v rámci reportu organizace Water Footprint Network z roku 2010. Autory jsou Mesfin Mergia Mekonnen a Arjen Y. Hoekstra, tedy jedni ze zakladatelů a průkopníků myšlenky vodní stopy. V této práci byla stanovena vodní stopa více než 126 plodin a více než 200 produktů, které vycházejí z těchto plodin. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

Výpočty evapotranspirace a výnosu plodiny, které jsou potřeba pro odhad zelené a modré vodní stopy v zemědělství, byl proveden pro růst plodin za neoptimálních podmínek podle metody, kterou sestavil a aplikoval Allen et al. (1998). (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

$$ET_a = K_c \times K_s \times ET_o$$

V této rovnici se evapotranspirace ET_a vypočítá jako součin koeficientu plodiny K_c ¹⁰, redukčního faktoru transpirace závislý na dostupné půdní vodě a ET_o , což je referenční evapotranspirace. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

Data neberou v potaz zavlažování, ale počítá se pouze s tzv. parametrem zavlažovaných plodin, což je například hloubka zakořenění. Růst plodiny a výnos jsou ovlivněny vodním stresem. Aby se zohlednil účinek vodního stresu byla použita metoda Doorenbos a Kassama z roku 1979, která klade lineární vztah mezi výtěžkem a evapotranspirace. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

Šedá vodní stopa je vyčíslena pouze pro dusík, ukazuje tedy, kolik vody je potřeba na naředění použité vody, aby se dosáhlo maximální přijatelné koncentrace dusíku. Tato hodnota ($m^3/tuna$) je stejně jako u modré a zelené vodní stopy vztažena ke skutečnému výnosu plodiny. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

Tato data byla aplikována celosvětově pomocí rastru o velikosti 5×5 úhlových minut. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

¹⁰ Koeficient plodiny se mění v čase v závislosti na fázi růstu rostlin

Pro bližší analýzu dat jsem vybral čtyři plodiny. Dvě cukernaté plodiny, z nichž se vyrábí bioetanol a dvě plodiny, bohaté na olej, používané pro výrobu bionafty. Tyto plodiny jsem zvolil především z důvodu, že vždy jeden zástupce je pěstován celosvětově, zatímco druhý je spíše pěstován v rovníkových oblastech. Konkrétně se jedná o kukuřici, cukrovou třtinu, palmu olejnou a brukev řepku – neboli řepku olejnou.

4.1.2 Falkenmark Water Stress Indicator

Pro identifikaci zemí, které se potýkají s nedostatkem vody potažmo vodním stresem jsem zvolil Falkenmark Water Stress Indicator¹¹. Tento indikátor se i přes svoji jednoduchost používá v této problematice nejčastěji. Zdroj dat pro jednotlivé země jsem použil z výzkumu od Lawrence et al. (2002).

4.1.3 Köppenova klasifikace podnebí

Pro analýzu rozdílů velikosti vodní stopy byla použita Köppenova klasifikace podnebí, tato klasifikace je utvořena podle rozložení teplot vzduchu a atmosférických srážek ve vztahu k vegetaci (ČMeS, 2021). V Köppenově klasifikaci existuje 5 základních klimatických pásem, tato pásma se však dělí na jednotlivé typy, případně i podtypy. Tato hierarchie se značí jednotlivými písmeny, takže každé klimatické pásmo je vyjádřeno dvěma až třemi písmeny. Na mapě (Obr. 4.) je vidět celosvětové rozložení Köppenovy klasifikace podnebí.

4.2 Vodní stopa vybraných plodin

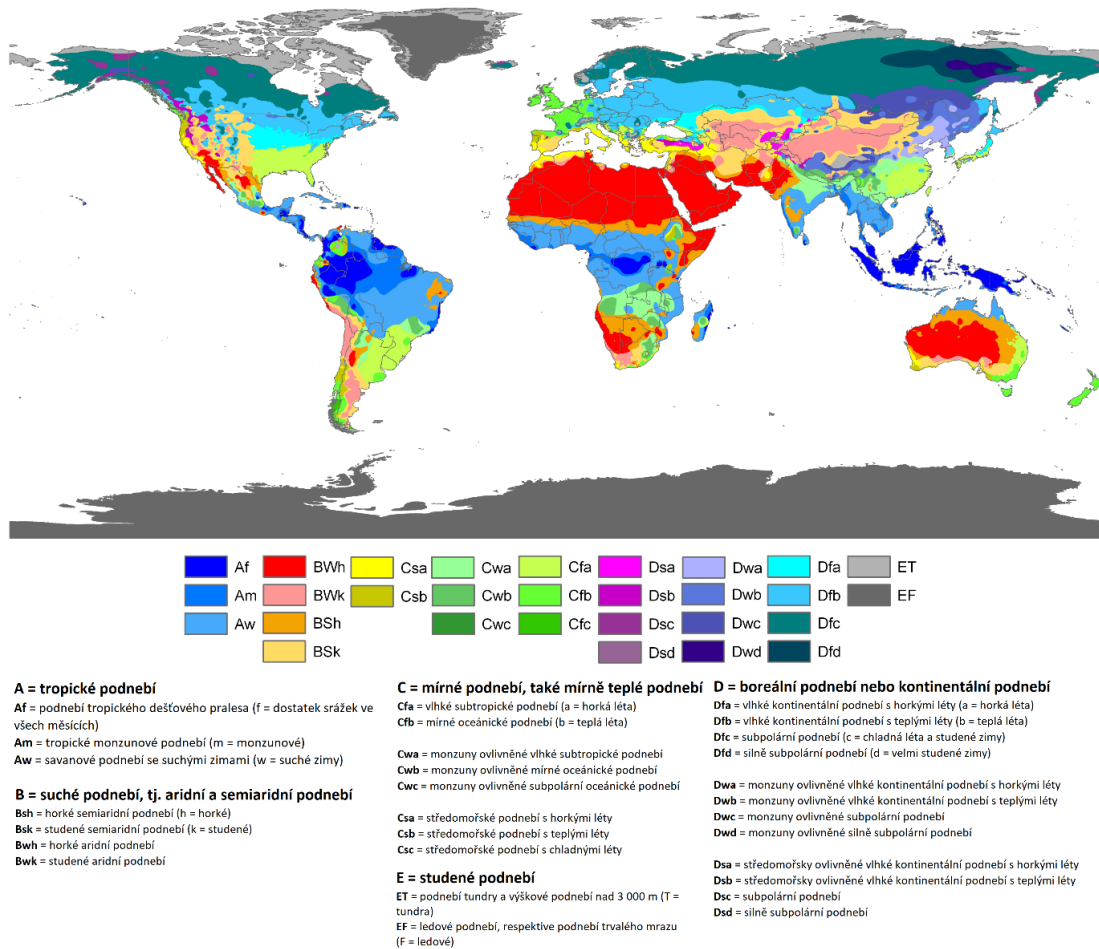
V následující kapitole bych rád představil vybrané čtyři plodiny, jejich vodní stopu a na grafech znázornil země, kde se tyto plodiny nejčastěji pěstují.

Jednotka vodní stopy je zachována z původních dat, tedy m^3/t .¹² U kukuřice a cukrové třtiny je tato hodnota vztažena k celkové rostlině, naopak množstvím řepky olejné a palmy olejné je kalkulováno pouze na plod, respektive semeno dané rostliny. (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

¹¹ Falkenmark Water Stress Indicator je vysvětlen v kapitole 2.2.2. Metody stanovení nedostatku vody

¹² Jednotka znázorňuje „kolik kubických metrů vody vodní stopy připadá na jednu tunu plodiny“.

Obr. 4., Köppenova klasifikace podnebí



Zdroj: mapa vytvořena z dat z ArcGIS Hubu (2021)

legenda vytvořena z informací z Elektronického meteorologického slovníku (ČMeS, 2021)

4.2.1 Kukuřice

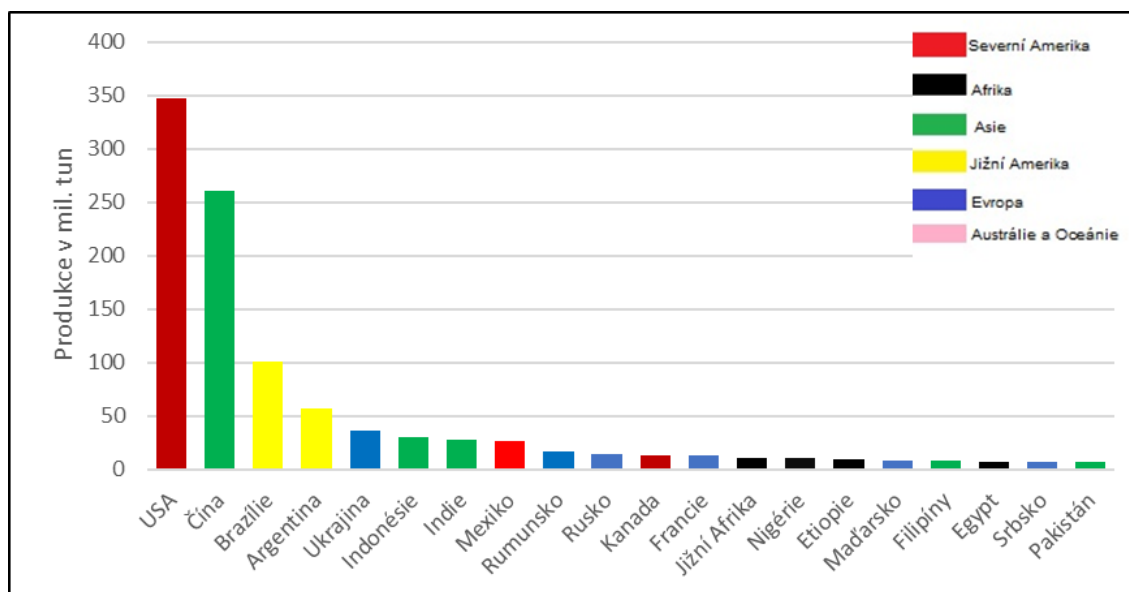
Kukuřice, jakožto energetická plodina, se hlavně pěstuje v USA, Číně a v Brazílii, přičemž USA i Brazílie jsou největší producenti bioetanolu na světě. Čína si však klade za cíl v následujících letech několikanásobně produkci biopaliv zvýšit.

Kukuřice se vzhledem k její relativní velké výtěžnosti pěstuje prakticky na celém světě. Má široké využití v potravinářství, používá se jako krmivo a v neposlední řadě slouží právě jako energetická plodina pro výrobu bioetanolu¹³.

Na následujícím grafu (Graf 5.) je vidět dvacet největších producentů kukuřice. Kromě již zmíněných třech největších je vidět, že množství pěstování není příliš ovlivněno specifickým klimatickým pásmem nebo určitým kontinentem.

¹³ Jako ukázka využití kukuřice je Graf 2., který znázorňuje, jak se měnilo využití v čase v USA.

Graf 5., Produkce kukuřice v zemích světa v roce 2019

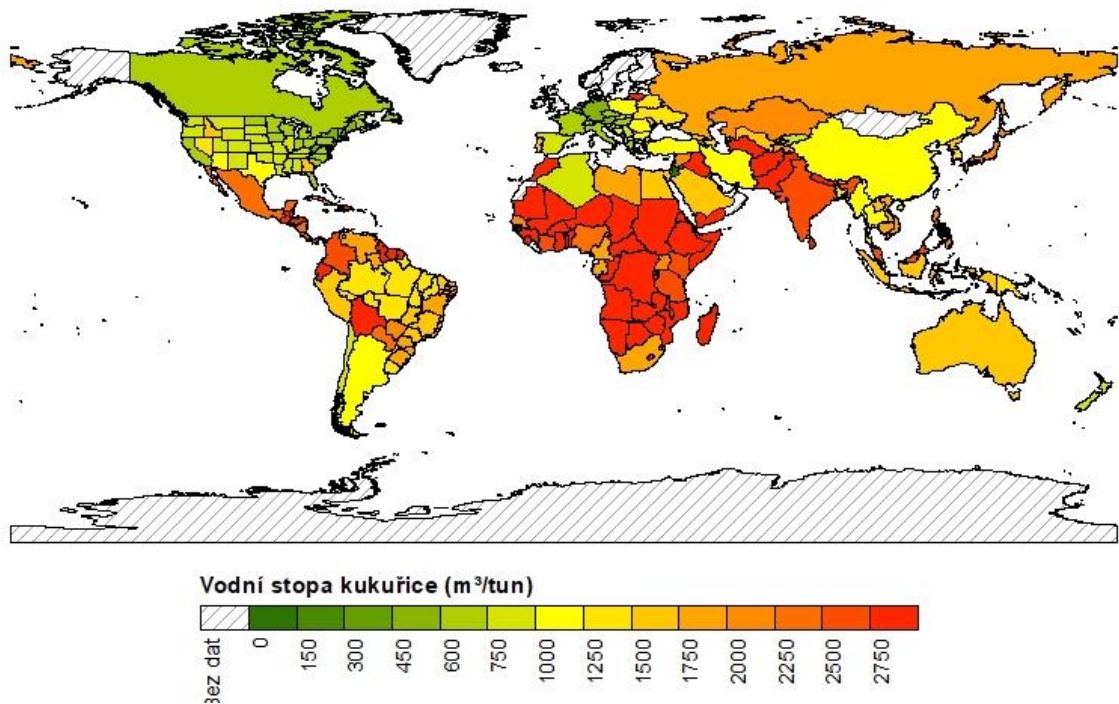


Zdroj: graf byl vytvořen z dat z webové stránky fao.org (FAOSTAT, 2021)

Na mapě (Obr. 5.) je vidět vodní stopa kukuřice (m^3/tuna) pro konkrétní země světa. Kromě těchto zemí jsou navíc rozlišeny i jednotlivé státy USA a Brazílie. Hned na první pohled je zde vidět, že jsou u kukuřice poměrně velké rozdíly ve vodní stopě. I přes to, že celosvětový průměr vodní stopy kukuřice je $1222 \text{ m}^3/\text{t}$, tak existují regiony, kde vodní stopa je daleko menší. Příkladem jsou státy západní Evropy, v kterých je vodní stopa kukuřice do $500 \text{ m}^3/\text{t}$ (nejmenší je v Belgii $323 \text{ m}^3/\text{tuna}$). Podobně jsou na tom státy USA na východním pobřeží, které mají vodní stopu jen mezi $500\text{--}600 \text{ m}^3/\text{t}$. Mírně nad celosvětovým průměrem je Brazílie, kde nejnižší hodnoty mají oblasti ležící v amazonském pralese. Na konci pomyslného žebříčku jsou především státy v Africe a v jižní Asii. Zde se vodní stopa pohybuje řádově v tisících m^3/t . Jako příklad lze uvést jednoho z největších afrických pěstitelů, Etiopii, kde kukuřice má vodní stopu $4000 \text{ m}^3/\text{t}$.

Pro srovnání vodní stopa kukuřice v České republice je $606 \text{ m}^3/\text{t}$, což je přibližně dvakrát méně, než je celosvětový průměr.

Obr. 5., Mapa vodní stopy kukuřice



Zdroj: mapa vytvořena v GIS z dat z reportu od Mekonnen a Hoekstry (2010)

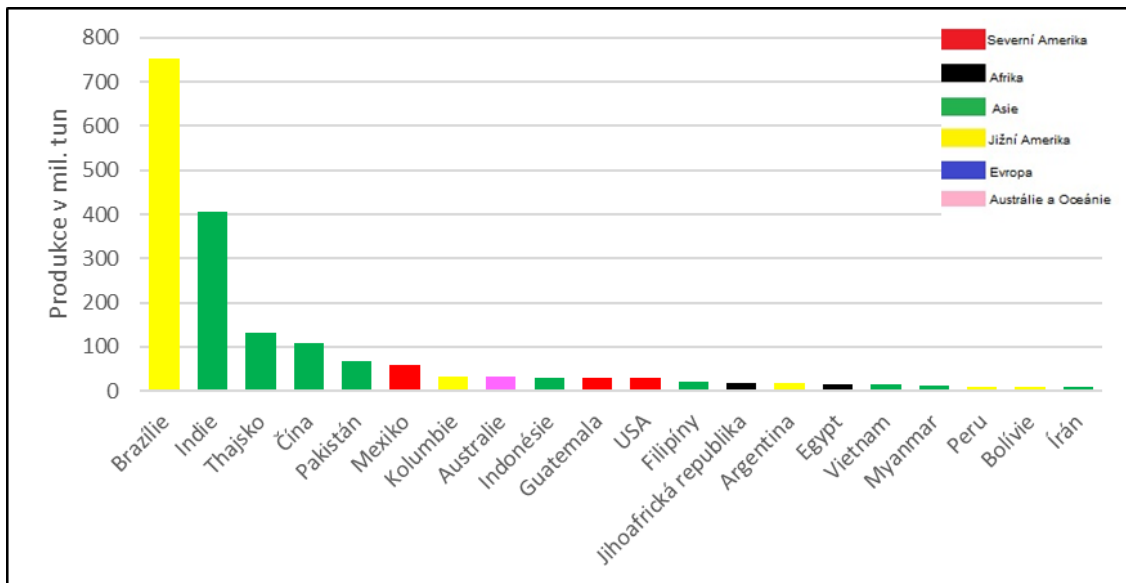
4.2.2 Cukrová třtina

Jako druhou plodinu, z které se hojně vyrábí bioetanol jsem zvolil cukrovou třtinu (Třtinovec cukrový). Tato rostlina se stejně jako kukuřice řadí mezi tzv. vysoce výnosné plodiny. Její tradiční využití spočívá v získávání cukru a z vedlejšího produktu melasy se vyrábí alkohol nebo krmiva pro hospodářská zvířata. V posledních dvaceti letech se pěstování v řadě zemí přetransformovalo na výrobu biopaliv (REN21, 2020).

Na grafu (Graf 6.) jsou vidět největší producenti cukrové třtiny na světě. Kromě Brazílie se cukrová třtina ve velkém pěstuje v Indii i v Číně, i zde se podle reportu REN21 (2020) značně rozvíjí výroba a používání biopaliv¹⁴.

¹⁴ O tom, jak se v posledním roce rozvinula výroba biopaliv se věnuji v kapitole 3.2 Produkce biopaliv.

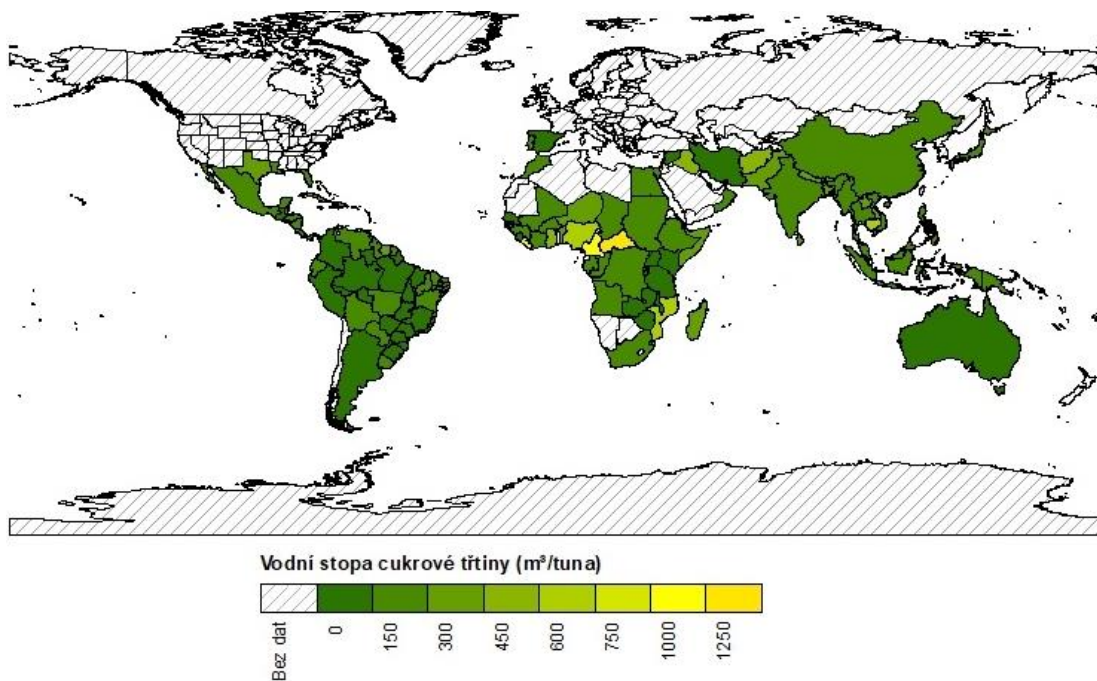
Graf 6., *Produkce cukrové třtiny v zemích světa v roce 2019*



Zdroj: graf vytvořen z dat z webové stránky fao.org (FAOSTAT, 2021)

Na následující mapě je vidět vodní stopa pěstování cukrové třtiny. Úmyslně bylo zachováno stejné škálování, jako u kukuřice, aby bylo zřejmé, že cukrová třtina je daleko méně náročná na vodní stopu než pěstování kukuřice. Celosvětový průměr je 122 m³/t, což je oproti kukuřici desetina. Také rozdíly mezi jednotlivými státy jsou daleko menší, až na pár výjimek v Guinejském zálivu mají všechny země vodní stopu mezi 100–300 m³/t, přičemž státy Brazílie mají hodnoty okolo 115 m³/t.

Obr. 6., *Mapa vodní stopy cukrové třtiny*



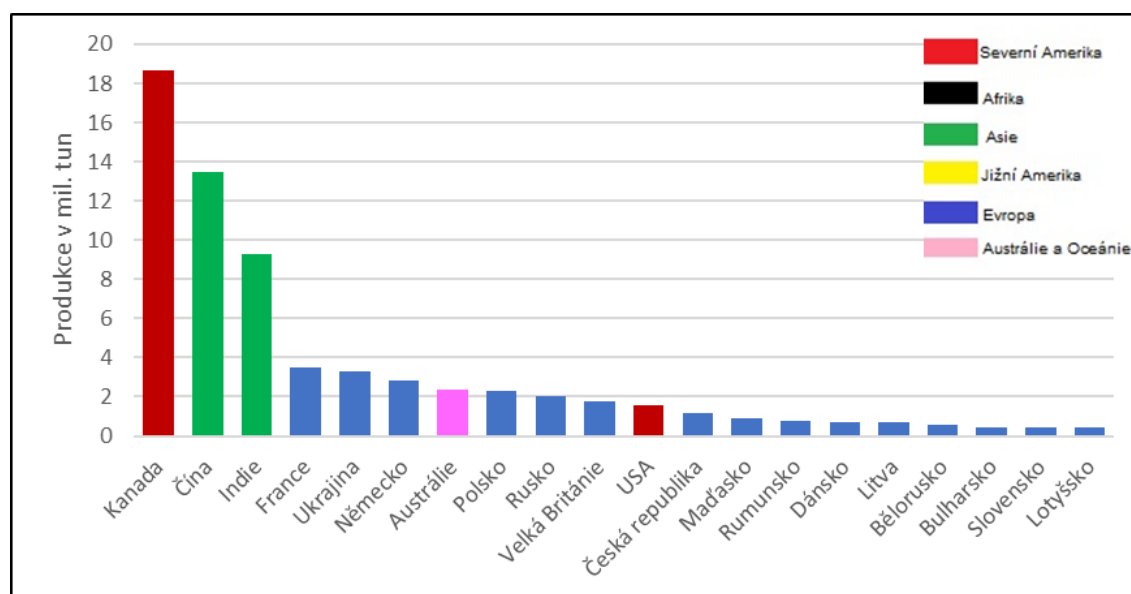
Zdroj: mapa vytvořena v GIS z dat z reportu od Mekonnena a Hoekstry (2010)

4.2.3 Řepka olejná

Další vybranou plodinou je řepka olejná. Jak už název napovídá, jedná se o olejnatou plodinu. Olej, který pochází z této plodiny, se využívá v potravinářství jako kuchyňský olej a v kosmetice, avšak hlavní využití je právě při výrobě bionafty.

Největším pěstitelem na světě je Kanada, která za rok 2019 vypěstovala více než 18 milionů tun. Následují ji Čína a Indie, dále se hojně pěstuje v evropských zemích, a to včetně České republiky.

Graf 7., Produkce řepky olejně v zemích světa v roce 2019

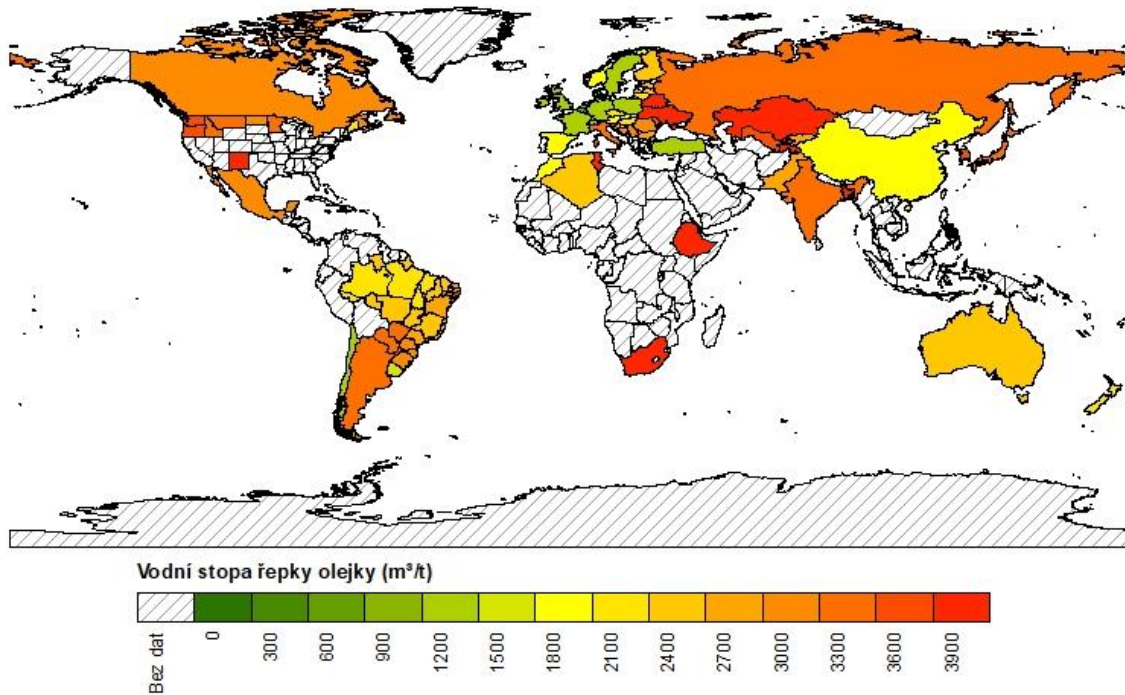


Zdroj: graf vytvořen z dat z webové stránky fao.org (FAOSTAT, 2021)

Na mapě, která znázorňuje vodní stopu řepky olejně, byla oproti cukernatým plodinám zvolena dvojnásobná škála, a to z důvodu velmi velké variability dat. Průměrná celosvětová hodnota je sice 2271 m³/t, ale existují země, kde jsou hodnoty okolo 1100 m³/t. Jedná se především o země v střední a v západní Evropě, Turecko a Chile. Čína, jakožto jeden z největších producentů má vodní stopu 1877 m³/t, což je mírně pod celosvětovým průměrem. Naopak Kanada a Indie mají nadprůměrnou vodní stopu, konkrétně 3070 m³/t a 3398 m³/t. V mnoha zemích světa je vodní stopa řepky extrémně vysoká, ať už to jsou země jihovýchodní a východní Evropy, jednotlivé státy USA nebo například země střední Asie.

Pro srovnání Česká republika má vodní stopu řepky olejně 2324 m³/t, což je celosvětově průměrná hodnota.

Obr. 7., Mapa vodní stopy řepky olejné



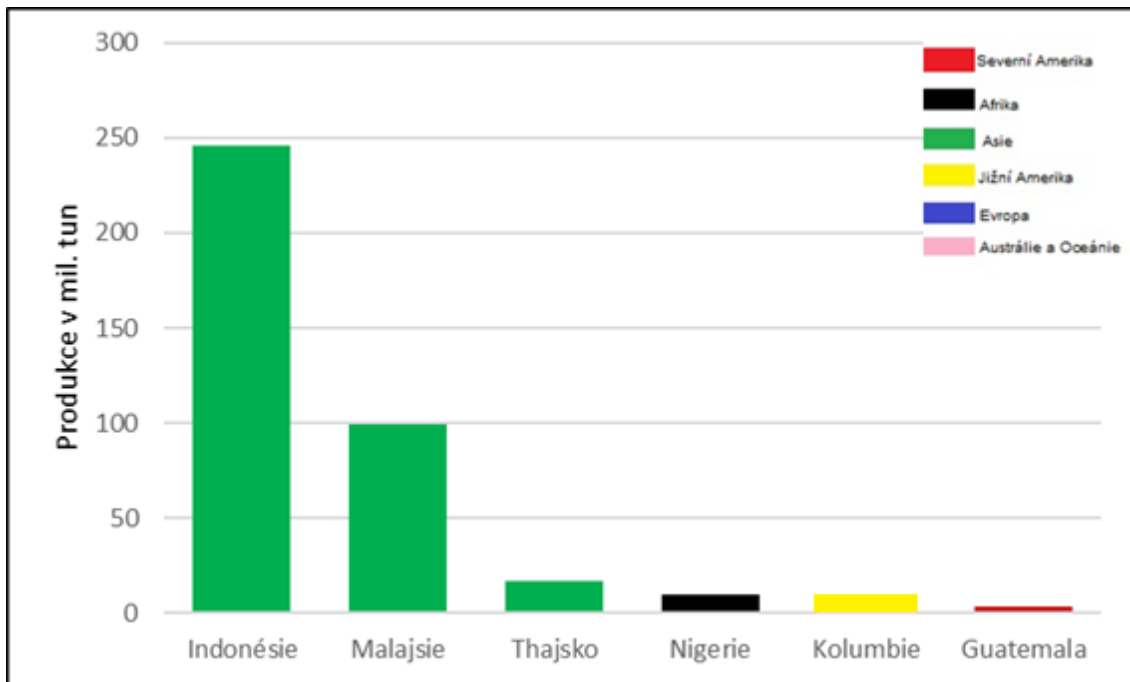
Zdroj: mapa vytvořena v GIS z dat z reportu od Mekonnen a Hoekstry (2010)

4.2.4 Palma olejná

Palma olejná je poměrně kontroverzní plodinou, a to kvůli způsobu pěstování. Díky své nízké ceně a vlastnostem se používá v potravinářství, v kosmetice a v průmyslových mazivech. Podle reportu REN21 (2020) se však každým rokem stále více používá na výrobu biopaliv, především z důvodu rozvoje této technologie v jihovýchodní Asii.

Na rozdíl od jiných grafů má tento graf daleko menší rozsah, jelikož produkce palmy olejná je koncentrována jen do několika zemí, konkrétně do Indonésie, Malajsie a Thajska. Ostatní země produkují pouze zlomek celosvětové produkce. Dalšími zeměmi, které pěstují palmu olejnou jsou státy v Latinské Americe a země subsaharské Afriky.

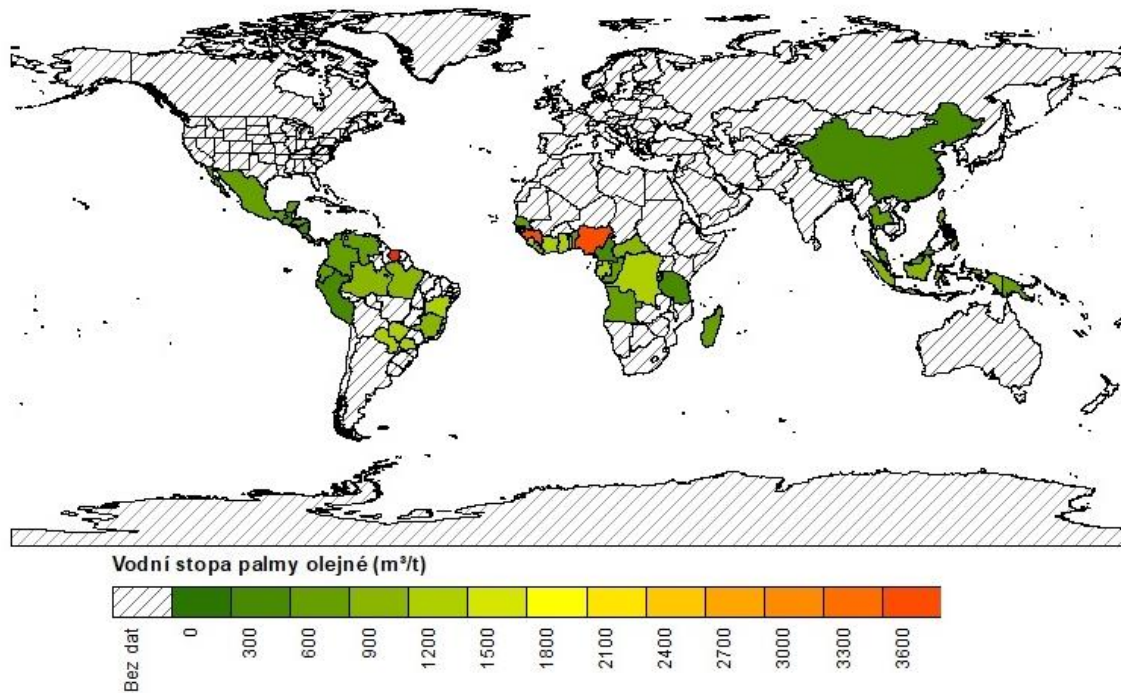
Graf 8., Produkce palmy olejné v zemích světa v roce 2019



Zdroj: graf vytvořen z dat z webové stránky fao.org (FAOSTAT, 2021)

Stejně jako u cukernatých plodin, i zde jsem zachoval stejnou škálu, aby byly čitelné rozdíly ve vodní stopě mezi řepkou olejnou a palmou olejnou. Z mapy je jasné, že vodní stopa palmy je daleko menší než u řepky. Celosvětový průměr je $1097 \text{ m}^3/\text{t}$, což je poloviční hodnota oproti vodní stopě řepky olejně. Nejnižší hodnota je v jednotlivých zemích okolo $400\text{-}500 \text{ m}^3/\text{t}$, je to například Peru, Tanzánie nebo Čína. V Thajsku je vodní stopa palmy olejně $740 \text{ m}^3/\text{t}$, v Malajsii $857 \text{ m}^3/\text{t}$ a v Indonésii, jakožto největší producent této plodiny je vodní stopa $967 \text{ m}^3/\text{t}$. Za zmínku stojí někteří významní producenti této plodiny v Guinejském zálivu s velkou vodní stopou. Konkrétně to je Guinea a Nigérie, ve kterých vodní stopa palmy olejně je $3669 \text{ m}^3/\text{t}$ respektive $3751 \text{ m}^3/\text{t}$.

Obr. 8., Mapa vodní stopy Palmy olejn



Zdroj: mapa vytvořena v GIS z dat z reportu od Mekonnen a Hoekstry (2010)

4.3 Vliv podnebí na velikost vodní stopy plodin

Cílem této kapitoly je posoudit spojitost mezi hodnotou vodní stopy a podnebím, případně určit optimální klimatické podmínky pro jednotlivé plodiny. Pro tuto analýzu byla použita Köppenova klasifikace podnebí.

Data vodní stopy plodin jsou vztaženy nejčastěji na státní útvary a tyto hranice podnebná pásma většinou nerespektují. Pro analýzu jsem proto zvolil metodu, kdy jsem pomocí programu GIS přiřadil každé oblasti nejvíce zastoupený typ podnebí, a to s vědomím, že tento způsob může přinášet určité zkreslení.

4.3.1 Analýza plodin

Místa nejnižší vodní stopy pěstování kukuřice odpovídají podnebí s klasifikací Cfb, což je mírné oceánské podnebí. Toto podnebí se vyznačuje malými denními rozdíly teplot vzduchu v průběhu roku (ČMeS, 2021). Naopak s vysokou hodnotou vodní stopy kukuřice se setkáváme v oblastech s různými variantami podnebí kategorie „A“ (tropické podnebí), a to jak v ekvatoriálním podnebí, tak i tropickém monzunovém podnebí.

Cukrová třtina sama o sobě vyžaduje specifické klimatické podmínky, pěstuje se totiž pouze v tropickém podnebí (A). Až na pár zemí v Guinejském zálivu má vodní stopa této plodiny poměrně malé rozdíly. Zde se podle Yugudy et al. (2020) v sušších obdobích neefektivně zavlažuje a dochází jak k velkému vypařování, tak i k vsakování vody do hlubších vrstev půdy.

Oproti tomu řepka olejná se pěstuje napříč spektrem klimatických pásem a zároveň má rozdílné hodnoty vodních stop. Výsledky jsou velmi podobné s kukuřicí, řepka má nejnižší vodní stopu v místech, kde je mírné oceánské podnebí a s vyšší kontinentalitou vodní stopa roste, daleko více než u kukuřice. Tento trend ovlivňuje i největšího producenta řepky Kanadu, kde je vodní stopa daleko vyšší než v Evropě. Nejvyšší hodnoty se nacházejí v kontinentálních podnebných pásmech, které mají navíc suché léto (označení Ds).

Poslední sledovanou plodinou je palma olejná, která je svými daty podobná cukrové třtině, a to nejen variabilitou vodní stopy, ale z části i regiony kde se pěstuje. Nejvíce se palma olejná pěstuje v jihovýchodní Asii. Zde registrujeme minimální odlišnost ve velikosti vodní stopy, která je způsobena tím, že v sušších oblastech je vodní stopa o něco vyšší. Oproti tomu existují země, kde je vodní stopa několikanásobně vyšší než u ostatních států, konkrétně to je Nigérie a Guyana. Stejně jako u cukrové třtiny, i zde je nejspíše důvodem neefektivní zavlažování.

4.3.2 Zelená a modrá vodní stopa

U všech vybraných plodin existují rozdíly nejen v celkové vodní stopě, ale i v podílu modré a zelené vodní stopy. V mnoha zemích je růst těchto plodin přímo závislý pouze na srážkách. Tomuto druhu zemědělství se říká *rainfed* a bývá často uplatňován v rozvojových zemích. V tomto případě je modrá vodní stopa vždy nulová. Avšak země, jejichž vodní stopu tvoří pouze zelená vodní stopa,¹⁵ nejsou pouze rozvojové, ale nachází se ve všech klimatických pásmech s relativním dostatkem vody. Opačná situace nastává v suchých oblastech, kde je buď zapotřebí velké množství modré vody, případně se musí zavlažovat. Tyto země se většinou nachází v podnebných pásmech „B“ – neboli v oblastech, kde je aridní nebo semiaridní podnebí.

¹⁵ Nepočítám-li vodní stopu šedou.

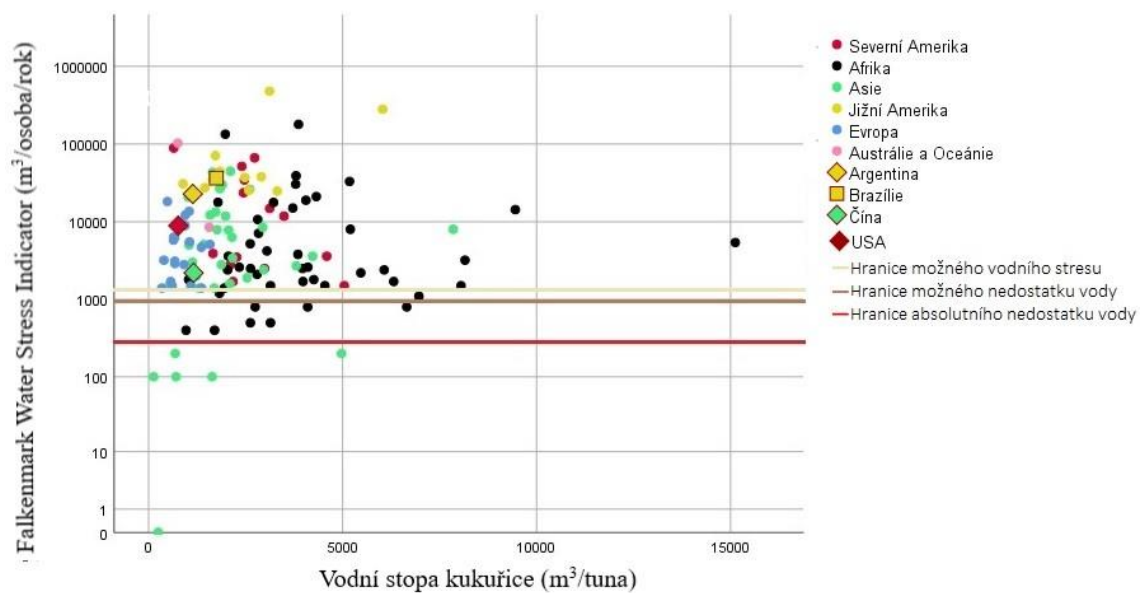
4.4 Vodní stopa a nedostatek vody

Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, biopaliva jsou na rozdíl od jiných zdrojů energie velmi náročná na využívání vody. V této kapitole bych proto rád zhodnotil vodní stopu plodin pomocí *Falkenmark Water Stress Indicator*¹⁶, který kvantifikuje fyzické množství vody na osobu v každé zemi a současně vymezuje hodnoty, při kterých může docházet k vodnímu stresu. V následujících bodových grafech jsou vyznačeny země, které jsou rozlišeny dle světadílů. Zároveň jsou na grafech zvýrazněny státy, které pěstují danou plodinu nejvíce.

4.4.1 Kukuřice

Na bodovém grafu (Graf 9.) je vidět vodní stopa kukuřice s příslušnými hodnotami Falkenmark Water Stress Indicatoru.

Graf 9., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy kukuřice



Zdroj: Graf vytvořen z dat vodní stopy od Mekonnen a Hoekstry (2010) a z dat od Lawrence et al. (2002).

Podle tohoto grafu jsou na tom z největších pěstitelů nejlépe státy Jižní Ameriky, které i přes svoji vyšší vodní stopu disponují velkým množstvím vodních zdrojů. Naopak Čína, která je druhým největším producentem kukuřice je podle tohoto indikátoru skoro na hranici vodního stresu. Podobně na tom je řada evropských zemí, a to včetně České

¹⁶ Tyto data vyjadřují hodnotu na úrovni jednotlivých zemích, takže u větších států může docházet k jistému zkreslení.

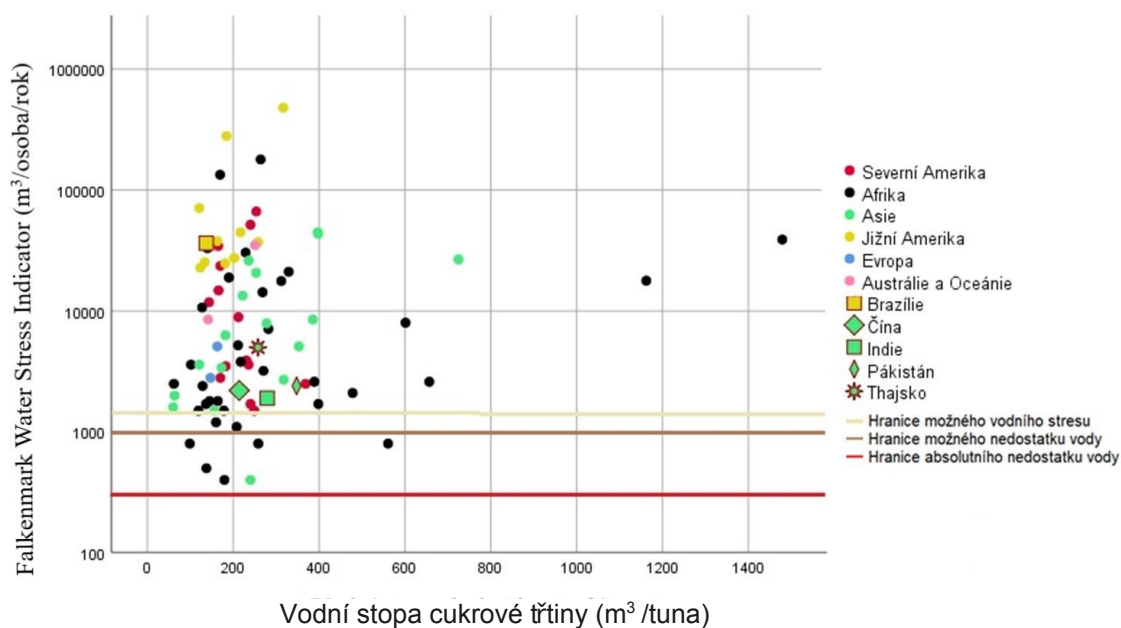
republiky¹⁷. Vhodné podmínky najdeme rovněž na Novém Zélandu a v Kanadě. Tyto země mají velmi vysokou hodnotu Falkenmark indikátoru a zároveň i relativně nízkou vodní stopu kukuřice. Oproti tomu řada zemí na Blízkém a Středním východě leží za hranicí nejen vodního stresu, ale i absolutního nedostatku vody.

4.4.2 Cukrová třtina

I přes to, že cukrová třtina má malou variabilitu vodních stop, tak země, kde se tato plodina pěstuje nabývají v rámci Falkenmark Water Stress Indicatoru velkých rozdílů.

Z největších pěstitelů je na tom nejlépe Brazílie, která má společně s ostatními zeměmi Jižní Ameriky dostatečně velké obnovitelné zdroje vody. Naopak řada asijských zemí, včetně těch, které produkují nejvíce cukrové třtiny na světě, mají až o dva řády nižší Falkenmark Water Stress Indicator. Nejhůře na tom jsou především země v Africe, které leží pod hranicí nedostatku vody.

Graf 10., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy cukrové třtiny



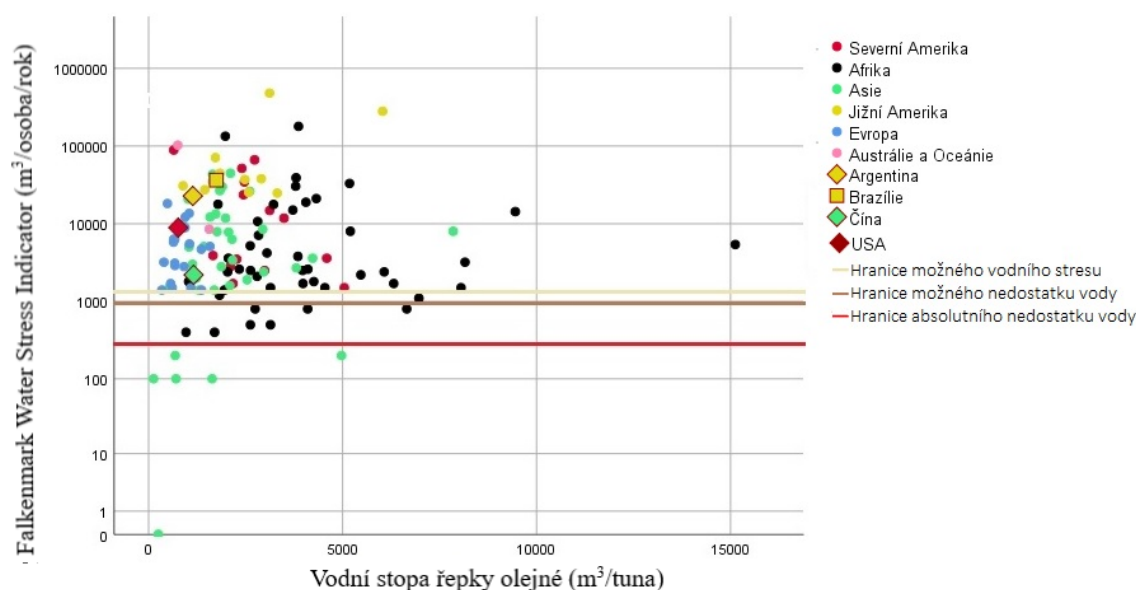
Zdroj: Graf vytvořen z dat vodní stopy od Mekonnena a Hoekstry (2010) a z dat od Lawrence et al. (2002).

¹⁷ Česko má hodnotu 1500 m³/osoba/rok.

4.4.3 Řepka olejná

U řepky olejně se z největších pěstitelů vymyká Kanada, která má jeden z největších vodních zdrojů dle Falkenmark indikátoru na světě. Takto vysokou hodnotu mají ze zemí, kde se pěstuje řepka olejná pouze Nový Zéland a Norsko. Oproti tomu Francie, která vypěstuje z evropských zemí nejvíce řepky olejně, má podle tohoto indikátoru poměrně malé vodní zdroje, a to i v kontextu Evropy. Ještě hůře na tom jsou Indie a Čína, které podle Falkenmark Water Stress Indicatoru mají skoro hraniční hodnoty, při kterých může docházet k vodnímu stresu.

Graf 11., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy řepky olejně

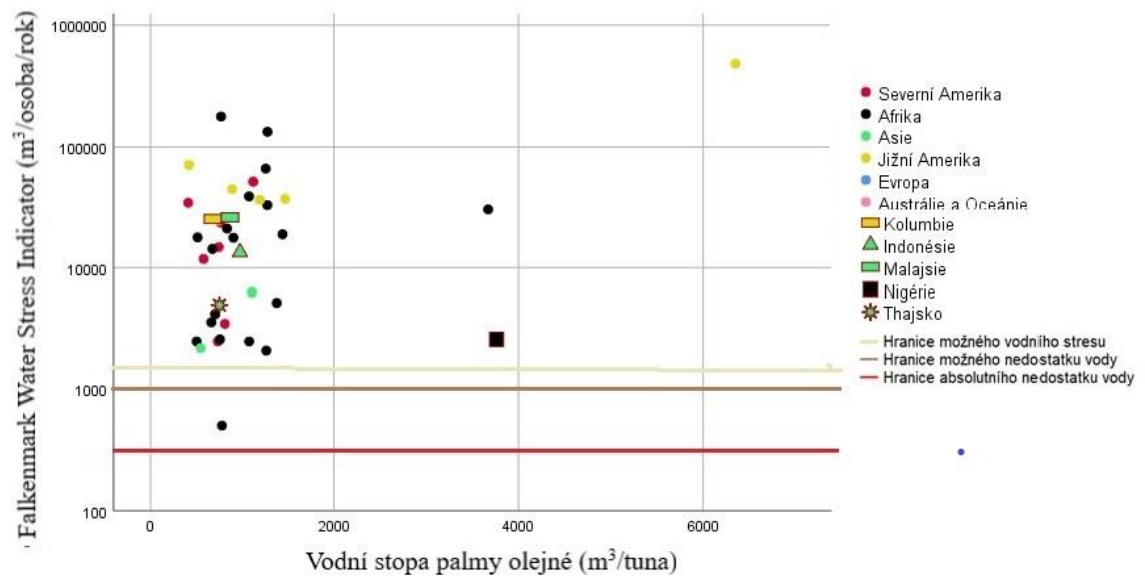


Zdroj: Graf vytvořen z dat vodní stopy od Mekonnena a Hoekstry (2010) a z dat od Lawrence et al. (2002).

4.4.4 Palma olejná

Z největších producentů palmy olejně je na tom nejlépe Kolumbie, Malajsie a Indonésie, naopak o něco hůře na tom jsou Nigérie a Thajsko. Avšak většina ostatních zemí, kde se tato plodina pěstuje má poměrně vysoké hodnoty Falkenmark Water Stress Indicatoru, a to včetně mnoha států, které leží v Africe.

Graf 12., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indikátoru a vodní stopy palmy olejně



Zdroj: Graf vytvořen z dat vodní stopy od Mekonnen a Hoekstry (2010) a z dat od Lawrence et al. (2002).

5 Závěr

Biopaliva jsou stále vnímána jako kontroverzní téma, protože s jejich výrobou je spojena řada otázek a nejasností spojených s jejich efektivitou a dopady na životní prostředí. Přesto jsou stále více vyráběna a používána jako druh obnovitelného zdroje energie.

Mezi největší světové producenty biopaliv patří Spojené státy americké, Brazílie a Indonésie. Kromě USA jsou v těchto zemích biopaliva stále na velkém vzestupu, a to především díky vládním podporám. Avšak tento zdroj energie se používá celosvětově, dalšími významnými regiony jsou západní Evropa, jižní a východní Asie nebo i ostatní země Jižní Ameriky.

Cílem práce bylo zhodnotit nejrozšířenější plodiny využívané pro výrobu biopaliv z hlediska jejich vodní stopy. Z vybraných plodin využívaných pro výrobu biopaliv má nejnižší vodní stopu cukrová třtina. Jejím problémem však je skutečnost, že tato plodina se často pěstuje v zemích s omezenými obnovitelnými vodními zdroji a při zvýšené produkci zde proto dochází k vodnímu stresu. Mezi tyto státy patří například Čína, Indie nebo Pákistán. Mnohem lepšími podmínkami disponují naopak státy Jižní Ameriky s většími zásobami vody. V těchto regionech by z vodohospodářského hlediska využití cukrové třtiny pro výrobu biopaliv mělo být méně problematické.

Kukuřice je jednou z celosvětově nejrozšířenějších plodin a její vodní stopa se v jednotlivých regionech velmi liší. Z této práce vyplývá, že nejnižší hodnoty vodní stopy jsou ve státech, které leží v mírném oceánském klimatu, jako jsou to například země západní Evropy. Tyto státy však většinou pro plošné pěstování kukuřice za účelem produkce biopaliv nemají dostatek vodních zdrojů. Jako bezproblémové pěstování této plodiny vychází pouze většina regionů Jižní Ameriky, Kanada a Nový Zéland. S ohledem na nízké disponibilní vodní zdroje by se kukuřice jako zdroj biopaliv naopak neměla pěstovat v Číně, ale ani ve většině afrických a asijských států pod čarou vodního stresu.

Řepka olejná má ze sledovaných plodin největší vodní stopu, z tohoto hlediska je využití této plodiny jako zdroje energie téměř všude ve světě mimořádně nevhodné. Výjimku představuje pouze největší světový pěstitel řepky, Kanada, která jako jediná disponuje dostatečnými vodními zdroji pro pěstování této plodiny.

Palma olejná je pravděpodobně nejvíce kontroverzní a nejčastěji diskutovaná plodina pro výrobu biopaliv. Paradoxně však z hlediska zanechané vodní stopy je palma oproti

jiným olejnatým plodinám poměrně akceptovatelnou plodinou. Má relativně nízkou vodní stopu a zároveň je pěstována v zemích jihovýchodní Asie nebo Jižní Ameriky s dostatečnými obnovitelnými zdroji vody.

Z této práce vyplývá, že není možné určit plodinu, která by byla celosvětově nejlepším zdrojem pro výrobu biopaliv. Je totiž nutné si ji vždy zařadit do širšího kontextu kombinace velikosti vodní stopy, klimatických podmínek a disponibilních obnovitelných zdrojů vody. Z tohoto hlediska vycházejí nejlépe především tropické plodiny, které se pěstují v jihovýchodní Asii a Jižní Americe.

6 Bibliografie

- AJANOVIC, Amela. Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*. 2011, **36**(4), 2070-2076.
- ALLAN, John Anthony. Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydropolitical futures would be impossible. 36. *Priorities for water resources allocation and management*. London: Overseas Development Administration, 1998, s. 13-26. ISBN 0-90-2500-49-X.
- ALLEN, Richard G., Luis S. PEREIRA, Dirk RAES a Martin SMITH. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998. ISBN 92-5-104219-5.
- ArcGIS Hub* [online]. Redlands, 2021 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <https://hub.arcgis.com/datasets/4034d0ab3eb64d0db7ad688927920f74>
- BERNDES, Göran. Bioenergy and water - The implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change*. 2002, **12**(4), 253-271.
- ČMeS - Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 02.04.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>
- DEBUCQUET, David Laborde a Siwa MSANGI. *Biofuels, Environment, and Food: The Story Gets More Complicated*. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 2012. ISBN IFPRI-p15738coll2-127333.
- DRABIK, Dusan a Thomas J. VENUS. Water Use for Biofuels in Europe. *Competition for Water Resources: Experiences and Management Approaches in the US and Europe*. Amsterdam: Elsevier, 2017, s. 144-159. ISBN 9780128032374.
- EARLEY, Jane a Alice MCKEOWN. *Smart Choices for Biofuels*. Washington: Worldwatch Institute a Sierra Club, 2009.
- EDENHOFER, Ottmar, Ramón Pichs MADRUGA a Youba SOKONA, ed. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press: New York, 2012. ISBN 978-1-107-02340-6.

- ERS Feed Grains: Yearbook Tables* [online]. Washington: Economic Research Service U.S., 2021 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.ers.usda.gov/data-products/feed-grains-database/feed-grains-yearbook-tables/>
- FALKENMARK, Malin. The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed? *Ambio*. 1989, **18**(2), 112-118.
- FAO. *Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security*. 38. Rome: FAO Water Reports, 2012. ISBN 978-92-5-107304-9.
- FAOSTAT* [online]. Rome: FAO, 2021 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- FERRANTE, Lucas a Philip FEARNSTIDE. The Amazon: biofuels plan will drive deforestation. *Nature*. 2020, **577**(7789), 170-170.
- FLETCHER, Robert J, Bruce ROBERTSON, Jason EVANS a Patrick J DORAN. Biodiversity conservation in the era of biofuels: risks and opportunities. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2010, **9**(3), 161-168.
- FRAITURE, Charlotte a Göran BERNDÉS. Biofuels and Water. *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. Gummersbach: CIP, 2009, s. 139-152. ISBN 1441488294.
- GAO, Yan, Margaret SKUTSCH, Rudi DRIGO, Pablo PACHECO a Omar MASERA. Assessing deforestation from biofuels: Methodological challenges. *Applied Geography*. 2011, **31**(2), 508-518.
- GARCIA, Daniel. Introducing Green GDP as an Objective to Account for Changes in Global Ecosystem Services Due to Biofuel Production. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2017, **40**(1), 505-510.
- GERBENS-LEENES, Winnie, Arjen HOEKSTRA a Th.H. Van Der MEER. *Water Footprint of Bio-energy and Other Primary Energy Carriers*. Delft: UNESCO-IHE, 2008.
- GROVER, Dharni. Biofuels are Good Politics but Translate into Bad Policy. *Major Papers*. 2018, (14), 1-33.

- GUO, Mingxin, Weiping SONG a Jeremy BUHAIN. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, **42**(1), 712-725.
- HOEKSTRA, Arjen Y. *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. 2. Londýn: Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 9781138354784.
- HOEKSTRA, Arjen Y., Ashok K. CHAPAGAIN, Maite M. ALDAYA a Mesfin M. MEKONNEN. *Water Footprint Assessment: Manual Setting the Global Standard*. Londýn: Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-279-8.
- HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Petr MILLER, Vladimír HÖNING a Martin CINDR. Technologie výroby biopaliv druhé generace. *Chemické listy*. **104**(1), 784-790.
- CHAPAGAIN, Ashok K. a David TICKNER. Water Footprint: Help or Hindrance? *Water Alternatives*. 2012, **5**(3), 563-581.
- IEA Technology Roadmap: Biofuels for Transport*. Paris: International Energy Agency, 2011.
- KONG, Si, Hui LIU a Hui ZENG. Research Progress on Biomass Liquid-Fuel Products by Thermo-Chemical Conversion. *Advanced Materials Research*. 2013, **860-863**, 472-478.
- KOVARIK, Bill. Biofuels in history. SINGH, Bharat P. *Biofuel Crops: Production, Physiology, and Genetics*. Boston: CAB International, 2013, s. 1-22. ISBN 978-1-84593-885-7.
- LAWRENCE, Peter, Caroline SULLIVAN a Jeremy MEIGH. The Water Poverty Index: an International Comparison. *Keele Economics Research Papers*. 2002, **14**(1), 1-17.
- LIU, Junguo. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*. 2017, **5**(6), 545-559
- LIU, Ye, Xu YUE, Fengchun ZHANG a Jinqi YUN. The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chinese Science Bulletin*. 2014, **59**(34), 1-14.
- MAGDOFF, Fred. The Political Economy and Ecology of Biofuels. *Monthly Review*. 2008, **60**(7), 34-50.
- MEKONNEN, Mesfin Mergia a Arjen Y. HOEKSTRA. *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products: a blue of Water Research Report Series No. 47*. Delft: UNESCO-IHE, 2010.

- MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de a David ZILBERMAN. *Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market*. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2014. ISBN 978-3-319-03139-2.
- MOUSDALE, David M. *Introduction to Biofuels*. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 9781138116276.
- MÜLLER, Alexander, Josef SCHMIDHUBER, Jippe HOOGEVEEN a Pasquale STEDUTO. Some insights in the effect of growing bio-energy demand on global food security and natural resources. *Water Policy*. 2018, **10**(1), 83-94.
- NAQVI, Muhammad a Jinyue YAN. First-Generation Biofuels. *Handbook of Clean Energy Systems*. Hoboken: John Wiley, 2015, s. 1-18. ISBN 9781118388587.
- PIMENTEL, David Pimentel a Tad W. PATZEK. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. *Natural Resources Research*. 2005, **14**(1), 65-76.
- POHL, Christine. Jatropha: Money doesn't grow on trees: Ten reasons why Jatropha is neither a profitable nor sustainable investment. *Friends of the Earth International*. 2010, (120), 1-18.
- REN21: Renewables 2020 Global Status Report*. Paris: REN21, 2020. ISBN 978-3-948393-00-7.
- RICE, Tim. *Meals per Gallon: The impact of industrial biofuels on people and global hunger*. London: ActionAid, 2010.
- RIJSBERMAN, Frank R. Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*. 2006, **80**(1-3), 5-22.
- ROGER, Ruan et al. Biofuels: Introduction. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. 2. Cambridge: Academic Press, 2019, s. 3-43. ISBN 9780128168561.
- SECKLER, David. *World Water Demand and Supply, 1990 to 2025: Scenarios and Issues*. New Delhi: IWMI, 1998. ISBN 92-9090-354-6.

- SHELL Sustainability Report* [online]. The Hague: Shell, 2019 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: https://reports.shell.com/sustainability-report/2019/servicepages/downloads/files/sustainable_energy_future_shell_sr19.pdf
- SHERRARD, Alan a Julie JERÁBKOVÁ. 2017 dalším rekordním rokem biopaliv ve Švédsku. *Biom.* 2018, **17**(2), 3.
- SINGH, Bharat P. *Biofuel crops: production, physiology and genetics*. Boston: CAB International, 2013. ISBN 9781845938857.
- SKUTSCH, Margaret, Rudi DRIGO, Pablo PACHECO, Omar MASERA a Gao YAN. *A global analysis of deforestation due to biofuel development*. Bogor: CIFOR, 2011. ISBN 10568/20838.
- SÖNNICHSEN, N. Leading countries based on biofuel production in 2019 (in petajoules)*. In: *Statista* [online]. New York: Statista, 2021 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/274168/biofuel-production-in-leading-countries-in-oil-equivalent/>
- SULLIVAN, Caroline. Calculating a Water Poverty Index. *World Development*. 2002, **30**(7), 1195-1210. Synthesis, World Water Council.
- ŠIMÁČEK, Pavel, Dan VRTIŠKA, Zlata MUŽÍKOVÁ a Milan POSPÍŠIL. Motor fuels produced by hydrotreating of vegetable oils and animal fats. *Chemické listy*. 2017, **111**(3), 206-112.
- TSANOVA, Tsvetomira. *China's ethanol capacity expanding to meet 2020 demand - report* [online]. In: *Renewables Now* [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://renewablesnow.com/news/chinas-ethanol-capacity-expanding-to-meet-2020-demand-report-636664/>
- VÁCHOVÁ, Veronika a Petr VOZKA. Hydrogenace rostlinných olejů na paliva pro vznětové motory. *Paliva*. 2015, **7**(2), 66-73.
- VELÁZQUEZ, Esther; MADRID, Cristina; BELTRÁN, María J. Rethinking the concepts of virtual water and water footprint in relation to the production–consumption binomial and the water–energy nexus. *Water Resources Management*, 2011, **25**(2) 743-761.

- WHITE, Chris, Quentin GRAFTON, Paul WYRWOLL a David ALLENDES, ed. *Global Water: Issues and Insights* [online]. Canberra: ANU Press, 2014. ISBN 9781925021677.
- WIENS, John, Joseph FARGIONE a Jason HILL. Biofuels and biodiversity. *Ecological Society of America*. 2011, **21**(4), 1085-1095.
- WICHELS, Dennis. Virtual water and water footprints do not provide helpful insight regarding international trade or water scarcity. *Ecological Indicators*. 2015, **13**(52), 277-283.
- WICHELS, Dennis. Virtual water and water footprints offer limited insight regarding important policy questions. *International Journal of Water Resources Development*, 2010, **26**(4) 639-651
- WICHELS, Dennis. Volumetric water footprints, applied in a global context, do not provide insight regarding water scarcity or water quality degradation. *Ecological Indicators*. 2017, **15**(74), 420-426.
- WINPENNY, James. *Managing Water as an Economic Resource*. London: Routledge, 1993. ISBN 9780415103787.
- WSM. *Water Strategy Man: Indicators and indices for decision making in water resources management* [online]. Athens: NTUA, 2004 [cit. 2021-01-25].
- WWC, Ed. (2004). E-Conference Synthesis: Virtual Water Trade - Conscious Choices.
- YUGUDA, Taitiya Kenneth, Yi LI, Wenlong ZHANG a Quanliang YE. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. *Science of the Total Environment*. 2020, **1**(715), 1-16.
- ZILBERMAN, David, Gal HOCHMAN, Scott KAPLAN a Eunice KIM. Political Economy of Biofuel. *Choices*. 2004, **29**(1), 1-6.

7 Seznam grafických příloh a tabulek

Obr. 1., Vnímání jednotlivých vodních stop v rámci jejich zacílení.....	5
Obr. 2., Vliv produkce biopaliv na zábor půdy	16
Obr. 3., Obchodní toky biopaliv	20
Obr. 4., Köppenova klasifikace podnebí.....	23
Obr. 5., Mapa vodní stopy kukuřice	25
Obr. 6., Mapa vodní stopy cukrové třtiny	26
Obr. 7., Mapa vodní stopy řepky olejné.....	28
Obr. 8., Mapa vodní stopy palmy olejné.....	30
Graf 1., Využívání plodin pro výrobu biopaliv firmou SHELL.....	12
Graf 2., Využívání kukuřice v USA v čase.....	13
Graf 3., Celosvětová produkce biopaliv	17
Graf 4., Produkce biopaliv dle jednotlivých zemí.....	18
Graf 5., Produkce kukuřice v zemích světa v roce 2019.....	24
Graf 6., Produkce cukrové třtiny v zemích světa v roce 2019.....	26
Graf 7., Produkce řepky olejné v zemích světa v roce 2019	27
Graf 8., Produkce palmy olejné v zemích světa v roce 2019	29
Graf 9., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy kukuřice	32
Graf 10., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy cukrové třtiny	33
Graf 11., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy řepky olejné	34
Graf 12., Bodový graf Falkenmark Water Stress Indicatoru a vodní stopy palmy olejné	35
Tabulka 1., Faktory, které WPI zohledňuje	8