



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

INŽENÝRSKÁ ŘEŠENÍ PRO ZMÍRNĚNÍ KLIMATICKÉ ZMĚNY - METODY PRO ELIMINACI SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ Z ATMOSFÉRY

ENGINEERING SOLUTIONS FOR MITIGATION OF CLIMATE CHANGE - METHODS FOR
ELIMINATION OF GREENHOUSE GASES FROM THE ATMOSPHERE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Veronika Lněničková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Veronika Lněničková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. František Lízal, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Klimatická změna představuje nejzávažnější výzvu pro celou současnou společnost. Aby jí bylo možné čelit, je třeba kombinovat opatření mitigační (předcházení, zmírnění) a adaptační. Cílem bakalářské práce bude provést rešerši dostupných inženýrských možností spadajících do první skupiny, přičemž důraz je kladen na metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry a další řešení aplikovaná mimo samotné zdroje.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši literatury na téma aktuálně dostupných a do budoucna perspektivních inženýrských metod pro zmírnění klimatických změn – konkrétně metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry. Vyhledat další následné metody mitigace aplikované mimo zdroje skleníkových plynů.

Zpracovat přehled potenciálně nejúčinnějších metod, jejich principů, energetické a finanční náročnosti a celkové bilance uhlíku.

Analyzovat výhody a nevýhody jednotlivých metod, identifikovat výzkumná témata, jejichž řešení přinese největší pozitivní efekt a nejúčelnější využití prostředků a zdrojů.

Seznam doporučené literatury:

GAGNON, B., R. LEDUC AND L. SAVARD From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. Journal of Engineering Design, Jan-Mar 2012, 23(1-3), 49-74.

OWUSU, P. A. AND S. ASUMADU-SARKODIE A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Engineering, 2016, 3(1).

SAMANTA, A., A. ZHAO, G. K. H. SHIMIZU, P. SARKAR, et al. Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Feb 2012, 51(4), 1438-1463.

SANZ-PEREZ, E. S., C. R. MURDOCK, S. A. DIDAS AND C. W. JONES Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chemical Reviews*, Oct 2016, 116(19), 11840-11876.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá metodami eliminace skleníkových plynů z atmosféry, jejich výhodami či nevýhodami a finanční náročností spojenou s jejich aplikací. První část práce popisuje vědní obor geoinženýrství, které se zabývá odstraněním oxidu uhličitého z atmosféry. Druhá část je zaměřena na metody řízení slunečního záření, nakonec jsou popsány metody eliminující jiné skleníkové plyny, než je oxid uhličitý.

Klíčová slova

Klimatická změna, oxid uhličitý, geoinženýrství, řízení slunečního záření

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with methods of eliminating greenhouse gases, their advantages and disadvantages and the costs associated with their applications. The first part of this thesis describes the scientific field of geoengineering dealing with the removal of carbon dioxide from the atmosphere. The second part is focused on methods of solar radiation management and finally, methods eliminating other greenhouse gases than carbon dioxide are described.

Key words

Climate change, carbon dioxide, geoengineering, solar radiation management

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LNĚNIČKOVÁ, Veronika. *Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132488>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Františku Lízalovi Ph.D.za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	Co je to klimatická změna	12
3	Skleníkové plyny	13
3.1	Vodní pára.....	13
3.2	Oxid uhličitý CO ₂	13
3.3	Metan CH ₄	14
3.4	Oxid dusný N ₂ O.....	14
4	Odstranění oxidu uhličitého CO ₂ ze zemské atmosféry – Geoinženýrství.....	16
4.1	Odstranění CO ₂ z atmosféry (Carbon Dioxide Removal – CDR)	16
4.1.1	Zalesňování	16
4.1.2	Hnojení oceánů.....	18
4.1.3	Půdní sekvestrace uhlíku (Soil Carbon Sequestration – SCS).....	18
4.1.4	Zesílené zvětrávání (Enhanced Weathering – EW)	20
4.1.5	Biochar	21
4.1.6	Technologie BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage – bioenergie a zachytávání a ukládání uhlíku).....	21
4.1.6.1	Technologie Carbon Capture and Storage	22
4.1.6.2	Bioenergetické zdroje.....	22
4.1.7	Technologie DACC (Direct Air Carbon Capture – Přímé zachycení uhlíku ze vzduchu)	23
4.1.7.1	Projekt společnosti Carbon Engineering.....	25
4.1.7.2	Projekt společnosti Carbfix.....	28
4.1.7.3	Budoucí výhled technologií DACC.....	29
4.2	Řízení slunečního záření (Solar Radiation Management – SRM).....	30
4.2.1	Stratosférická aerosolová injekce (Stratospheric Aerosol Injection – SAI).....	30
4.2.1.1	Letadla.....	31
4.2.1.2	Balóny.....	32
4.2.1.3	Zbraně.....	33
4.2.1.4	Vysoké věže.....	34
4.2.2	Vesmírná zrcadla (Space Mirrors – SM).....	34
4.2.3	Bělení mraků (Marine Cloud Brightening – MCB)	35
4.2.4	Zvyšování pozemského albeda.....	36
5	Ostatní skleníkové plyny	38
5.1	Odstranění metanu ze zemské atmosféry.....	38
5.2	Technologie solárních komínových elektráren ve spojení s fotokatalytickými reaktory (Solar Chimney Power Plant with Photocatalytic Reactors – SSCP-PCR)	39
6	Potenciál inženýrských metod odstranění skleníkových plynů z atmosféry	42
6.1	Finanční náklady a sekvestrační potenciál.....	42
6.2	Rizika a přínosy aplikace jednotlivých metod.....	43
7	ZÁVĚR.....	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	57

1 ÚVOD

Klimatická změna není pojmem novým. Změna klimatu probíhala více či méně v průběhu celé historie lidstva. Problém, který nastal nyní je, že člověk ovlivňuje negativně klima na takové úrovni, jako nikdy předtím a ohrožuje tak život na Zemi.

Za zlomový bod této změny je považováno období průmyslové revoluce probíhající v období od 18. do 19. století, kdy nastal přechod od řemeslné a manufakturní výroby k tovární. Vznik průmyslové výroby je nedomyslitelně spjat s parním strojem a spalováním uhlí. Právě uhlí a fosilní paliva obecně jsou považovány za hlavního viníka klimatické krize, jelikož je jejich nadměrnou spotřebou uvolňováno větší množství skleníkových plynů a dochází tak k oteplování planety, které je považováno za jeden z hlavních projevů klimatické změny.

Obecně existují dva přístupy, jak s klimatickou změnou bojovat – mitigace a adaptace. Mitigační opatření jsou taková, která zmírní dopady klimatické změny, kdežto adaptační se pouze změně přizpůsobují. S největší pravděpodobností se nacházíme ve fázi, kdy je nutné využít obou přístupů.

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši dostupných inženýrských řešení pro zmírnění klimatické změny a to takových, které eliminují skleníkové plyny z atmosféry.

Existují také metody, které lze aplikovat přímo v místě zdrojů skleníkových plynů, proto bylo téma klimatické změny rozděleno do dvou prací a informace k metodám aplikovatelným v místě zdrojů, více informací lze nalézt v práci [1] Valentíny Remekové.

Obsahem této práce bude současně i ekonomické a sekvestrační zhodnocení spolu s přínosy a riziky spojenými s aplikací níže uvedených metod.

2 Co je to klimatická změna

Na úvod je vhodné vysvětlit, co je to klima jako takové. Jednoduše řečeno se jedná o dlouhodobý stav počasí typický pro určitou oblast. Například v České republice dochází díky místnímu klimatu ke střídání čtyř ročních období, a proto lze odhadnout, jaké počasí očekávat v průběhu roku a současně určuje celosvětové průměry atmosférických podmínek. Klimatickou změnou se tedy rozumí změna podmínek běžných pro určité regiony či změna globálních průměrů atmosférických podmínek [2].

Nejčastěji zmiňovaným důsledkem klimatické změny je globální oteplování. Pojem globální oteplování označuje trvalý růst průměrné zemské teploty. K tomu dochází především lidskými činnostmi, často též označovány jako antropogenní činnosti, zejména se jedná o spalování fosilních paliv, čímž vzniká nadměrné množství emisí skleníkových plynů. Průměrná globální teplota se od dob průmyslové revoluce zvýšila o 1,18 °C, přičemž antropogenní činnosti zapříčinily vzrůst teploty o 1 °C, pouze tedy 0,18 °C lze přisuzovat přirozeným změnám [2].

Mezi další důkazy klimatické změny patří například [3]:

- Vzestup teplot oceánů – za posledních 50 let o více než 0,3 °C
- Zvýšení hladin moří – od počátku 20. století o více než 20 cm
- Okyselování oceánů – od dob průmyslové revoluce o cca 30 %
- Snižující se množství arktického mořského ledu



Obr. 1 Úbytek plochy arktického ledu rok 1979 vs 2020 [4]

Důležitým milníkem v boji proti globálnímu oteplování bylo podepsání Pařížské dohody na Světové klimatické konferenci v Paříži roku 2015. Cílem dohody je udržet vzrůst teploty pod hranicí 2 °C v porovnání s předindustriálními hodnotami, ideálně však zamezit růstu nad 1,5 °C [5].

Aby bylo možné takových cílů dosáhnout, je nutné zaměřit se na tzv. skleníkové plyny, které budou popsány v následující kapitole.

3 Skleníkové plyny

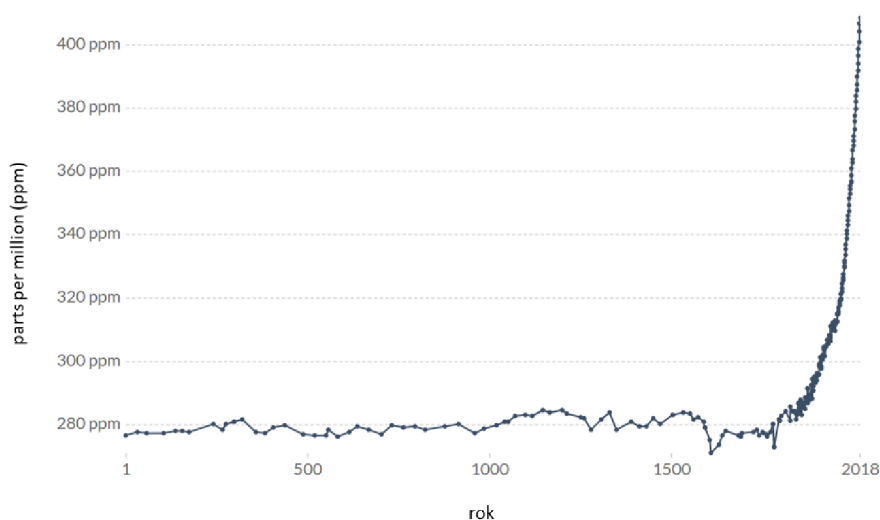
Mezi nejvýznamnější skleníkové plyny patří vodní pára, oxid uhličitý (CO_2), metan (CH_4), oxid dusný (N_2O) a ozon (O_3). Významné jsou především z důvodu, jakým způsobem ovlivňují zemskou atmosféru a tím pádem život na Zemi. Doba, po kterou zůstávají zachyceny v atmosféře, je ovlivněna jejich vlastnostmi, mohou to být stovky až tisíce let. Se skleníkovými plyny je úzce spjat pojem skleníkový efekt. Díky skleníkovému efektu dochází k zachycení dlouhovlnného záření skleníkovými plyny, které proto není schopno opustit zemskou atmosféru. Se zvýšenou koncentrací skleníkových plynů zůstává v atmosféře zachyceno větší množství záření a dochází tak k nadměrnému oteplování, které způsobuje nemalé problémy, avšak na skleníkový efekt nelze pohlížet pouze negativně. Naopak, bez skleníkového efektu by průměrná teplota Země byla výrazně nižší a planeta by se tak stala pro lidstvo neobyvatelnou [6].

3.1 Vodní pára

Vodní pára představuje plynné skupenství vody vznikající vypařováním nebo sublimací. Jedná se o nejrozšířenější skleníkový plyn, avšak doba, po kterou zůstává v atmosféře zachycen, se pohybuje v rozmezí několika dnů [7][8]. Důvodem, proč je vodní pára jakožto skleníkový plyn nebezpečná, je tzv. zpětná vazba vodní páry, která je zodpovědná až za 10 % globálního oteplování [9]. Jedná se o proces, při kterém je se zvyšující se teplotou odpařeno větší množství vody ze zemského povrchu do atmosféry, a tím pádem se zvyšuje účinek ostatních skleníkových plynů, což opět vede k navýšení globálních teplot [10].

3.2 Oxid uhličitý CO_2

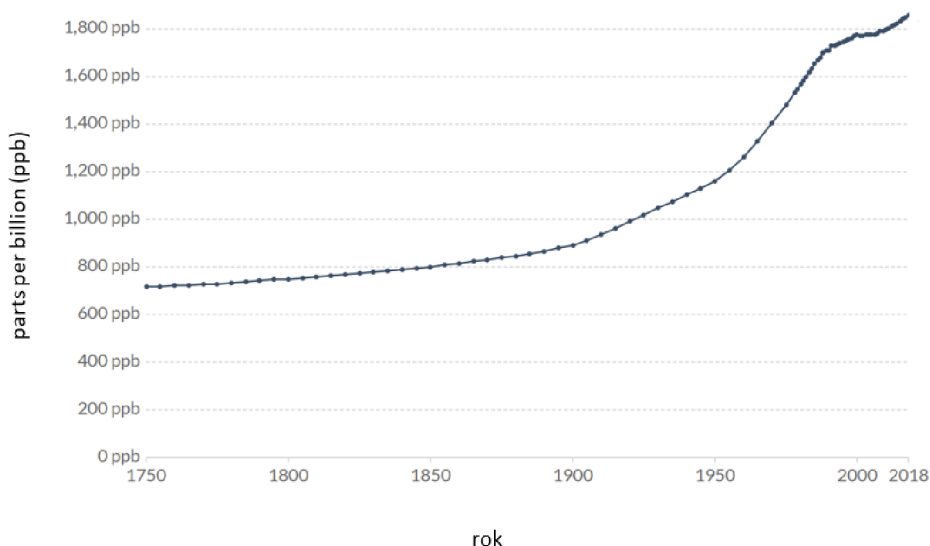
Oxid uhličitý je bezbarvý plyn tvořený atomem uhlíku a dvěma atomy kyslíku. Jeho výskyt v atmosféře je přirozený v rámci uhlíkového cyklu Země, během kterého dochází k přirozené cirkulaci uhlíku mezi zemskými organismy a atmosférou. Kvůli antropogenním činnostem, především spalováním fosilních paliv, byl přirozený uhlíkový cyklus Země narušen, jelikož je do atmosféry vypouštěno více uhlíku, než kolik je možné v rámci přirozeného cyklu zachytit, a proto zůstává v atmosféře a velkou měrou se podílí na globálním oteplování [11]. Doba, po kterou zůstává zachycen v atmosféře je ze všech skleníkových plynů nejdelší, pohybuje se v rozmezí 300 až 1000 let [12]. To je jeden z hlavních důvodů, proč je jeho vysoká koncentrace v atmosféře nebezpečná. Ročně je do atmosféry antropogenními činnostmi vypouštěno okolo 43 bilionů tun CO_2 [13]. Jeho koncentrace v atmosféře je v průběhu roku proměnlivá. Mění se v závislosti na vegetačním období rostlin. Během vegetačního období rostliny fotosyntézou vstřebávají oxid uhličitý, kdežto k jeho vylučování dochází v průběhu celého roku, ať už přírodní cestou, či lidskou činností. Tento jev probíhá především na severní polokouli a vyznačuje se tím, že křivka koncentrace oxidu uhličitého má tzv. „pilovitý efekt“ [14]. Současné hodnoty (únor 2021) atmosférického CO_2 se pohybují kolem 416 ppm [15]. V porovnání s předindustriálními hodnotami se jedná o 48% nárůst. Pro představu – posledních 171 let bylo antropogenními činnostmi vyprodukováno stejné množství emisí CO_2 , které vzniklo přírodními procesy za 20 000 let v předindustriálním období [15].



Obr. 2 Vývoj koncentrace CO_2 v atmosféře v čase [16]

3.3 Metan CH_4

Metan je uhlovodíkový plyn tvořený jedním atomem uhlíku a čtyřmi atomy vodíku. V porovnání s CO_2 se jedná o účinnější skleníkový plyn, který absorbuje více záření, avšak doba, po kterou zůstává v atmosféře, je výrazně kratší – v rozmezí jednoho století se jedná o dobu 12 let [17]. Na konci roku 2020 se hodnoty emisí metanu pohybovaly kolem 1892 ppb, což je asi 2,5krát více než předindustriální úroveň [18]. Ročně je do atmosféry vypuštěno kolem 570 Mt metanu, přičemž z 60 % se jedná o antropogenní emise [17]. Největším přírodním zdrojem metanu jsou mokřady, které představují téměř třetinu emisí (194 Mt). Na antropogenních emisích se nejvýznamněji podílí zemědělství s cca 145 Mt [17].

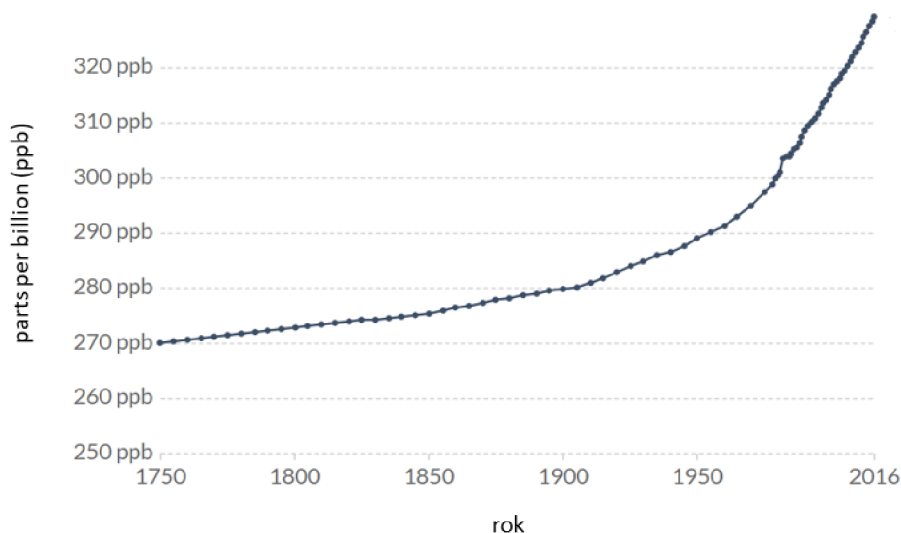


Obr. 3 Vývoj koncentrace CH_4 v atmosféře v čase [16]

3.4 Oxid dusný N_2O

Oxid dusný je plyn tvořený dvěma atomy dusíku a jedním atomem kyslíku. Oxid dusný vzniká jak přírodními procesy, tak lidskou činností, přičemž poměrově se obě tyto činnosti podílí na emisích téměř stejnou měrou (lidskou činností vzniká kolem 55 % emisí) [19]. Současná koncentrace oxidu dusného N_2O v atmosféře se pohybuje kolem 330 ppb, což představuje 20% nárůst v porovnání s předindustriálními hodnotami [20]. N_2O zůstává

zachycený v atmosféře až po dobu 121 let a v porovnání s CO₂ je v horizontu jednoho století 298krát účinnějším skleníkovým plynem [19][21]. Co se antropogenních emisí týče, jeden z největších zdrojů emisí N₂O je proces spalování. Významně se na emisích podílí i zemědělská výroba [21]. Vysoké koncentrace oxidu dusného v atmosféře představují problém především proto, že negativně ovlivňují ozónovou vrstvu [20].



Obr. 4 Vývoj koncentrace N₂O v atmosféře [16]

Stabilizace koncentrací skleníkových plynů na úrovni, která by zabránila nebezpečné klimatické změně, byla tématem Rámcové úmluvy OSN (UNFCCC), která vstoupila v platnost na jaře roku 1994 a navázala tak na Montrealský protokol z roku 1987 [22].

4 Odstranění oxidu uhličitého CO₂ ze zemské atmosféry – Geoinženýrství

V této kapitole bude představen vědní obor geoinženýrství, který se zabývá možnostmi odstranění oxidu uhličitého CO₂ ze zemské atmosféry. Geoinženýrství, někdy též označováno jako klimatické inženýrství, je vědní obor zabývající se možnostmi zmírnění klimatické změny. Jedná se o cílený zásah do klimatického systému, který by mohl ovlivnit život na celé Zemi, proto je třeba důkladně posoudit všechna rizika s geoinženýrstvím spojená [23][24]. Geoinženýrství nenabízí řešení ve smyslu snižování produkce emisí CO₂, dochází pouze ke snížení negativních účinků nebo jejich odstranění z atmosféry [24].

Metody geoinženýrství lze rozdělit do dvou skupin. Tou první jsou metody označované pod zkratkou CDR (Carbon Dioxide Removal – odstranění oxidu uhličitého), druhou skupinou jsou tzv. SRM metody (Solar Radiation Management – řízení slunečního záření) [23].

4.1 Odstranění CO₂ z atmosféry (Carbon Dioxide Removal – CDR)

Principem CDR metod je odstranění oxidu uhličitého z atmosféry a jeho následné uložení [23]. Metody odstraňování oxidu uhličitého v porovnání s SRM metodami nepředstavují tak závažný zásah do klimatu Země. Jejich nevýhodou je doba, za kterou se projeví jejich účinnost. Při současné míře spalování fosilních paliv, by to mohla být desetiletí až staletí [25]. To je poměrně závažný problém, jelikož je třeba snížit obsah skleníkových plynů v atmosféře co nejrychleji [24].

Mezi CDR metody patří:

- Zalesňování
- Hnojení oceánů
- Sekvestrace uhlíku v půdě
- Zesílené zvětrávání
- Biochar (Biouhel)
- Technologie BECCS
- Přímé zachycení CO₂ ze vzduchu (DAC)

Prvních pět zmíněných metod nespadá přímo pod technická řešení, jsou spíše biochemické povahy, avšak při jejich aplikaci bude nutné uplatnit znalosti strojního inženýrství, proto budou v této práci taktéž popsány.

4.1.1 Zalesňování

První metodou, která zde bude zmíněna je zalesňování. Jak název napovídá, jedná se o výsadbu stromů na nezalesněných půdách. Díky většímu množství zalesněné plochy může být uloženo více atmosférického uhlíku do půdy či mikroflóry. Účinek zalesňování je úzce spjat s vegetačním obdobím rostlin. Čím delší vegetační období rostlina má, tím více uhlíku je schopna pojmout. Z tohoto pohledu se jako nejvhodnější jeví tropické lesy [23]. Doba, po kterou je možné uhlík takto zachytávat závisí na hospodaření s půdou, jestliže dojde pouze k výsadbě bez dalšího hospodaření, odhaduje se možná doba zachytávání na 100 let [23].

Aby bylo možné stanovit náklady spojené se zalesňováním, bylo by třeba dalších výzkumů. V současné době se odhadované náklady značně liší, pohybují se v rozmezí 2-150 USD za tunu CO₂ [26]. Stejně tak se liší i odhadovaný potenciál možného množství zachycení CO₂ v závislosti na množství zalesněné plochy. Tohoto času pokrývají lesy okolo 30 % zemského povrchu, což odpovídá 4,06 bha [27]. Jestliže by se podařilo zalesnit 2580 Mha do roku 2100, lze očekávat záchyt v rozmezí 5,83 – 9,56 Gt CO₂/rok [26]. Pro méně optimistický scénář se zalesněnou plochou 1489 Mha se záchytem 3,53 Gt CO₂/rok. Existují možnosti, jak

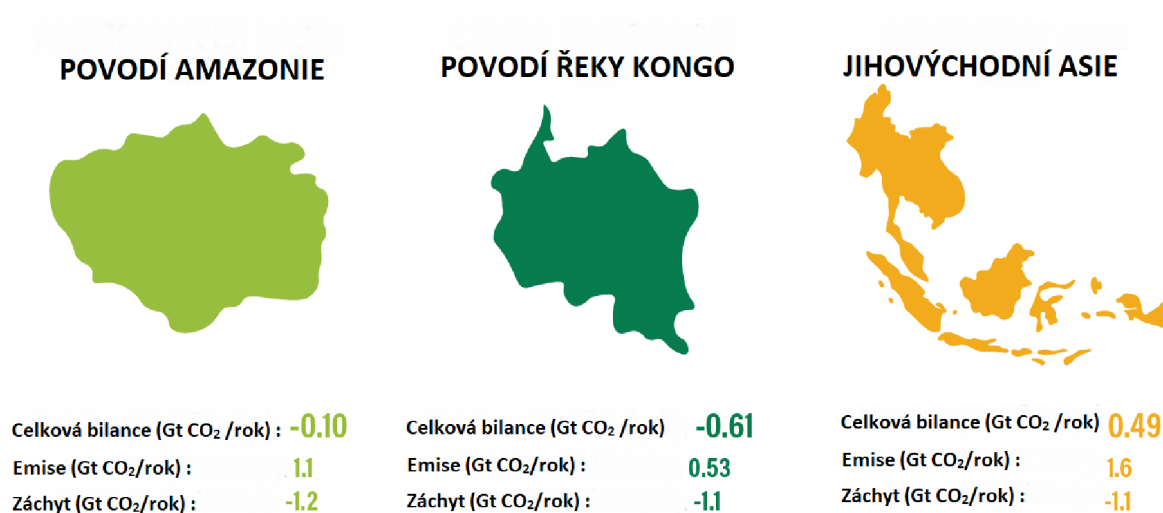
tato čísla navýšit, avšak to pouze za předpokladu, že by se významným způsobem změnila lidská strava. Například pokud by došlo ke značnému omezení světového hovězího průmyslu, bylo by teoreticky možné dosáhnout zachytu okolo 17,9 Gt CO₂/rok [26]. Potenciál zalesňování je ohrožen také šířením škůdců a parazitů, jako příklad lze uvést kůrovcovou kalamitu v českých lesích zapříčiněnou především dlouhými obdobími sucha. Intenzita sucha je sice v rámci roku proměnlivá, obecně je ale půdní sucho stále větším problémem na mnoha místech republiky [28].

Byť se zalesňování může zdát jako jednoduchá a dostupná metoda, jak bojovat s klimatickou změnou, opak je pravdou. Většina studií totiž nezohledňuje narůstající problém, kterému čelíme, a to sice lesní požáry a jejich vliv na emise v ovzduší. Jak se ukazuje především v posledních několika letech, lesní požáry, které jsou stále častějším problémem, uvolňují velké množství emisí CO₂ do atmosféry [29].

Díky globálnímu oteplování se snižuje vlhkost okolního vzduchu a lesy jsou tak náchylnější ke vzplanutí. Při lesním požáru se uvolní enormní množství emisí CO₂, které přispívá ke globálnímu oteplování, což opět zvyšuje riziko lesních požárů. Množství emisí skutečně není zanedbatelné, jak ukazují data naměřená při rozsáhlých lesních požárech v Kalifornii z roku 2020, emise způsobené těmito požáry dosahovaly přibližně 91 milionů tun CO₂ [29].

Dalším problémem je záměrné odlesňování, které můžeme pozorovat v tropických lesích, především ve spojení s Amazonským deštným pralesem, jehož odlesňování je třeba v takovýchto studiích zvažovat. Jeho uhlíkový cyklus silně ovlivňuje celkové klima na Zemi.

UHLÍKOVÝ TOK NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH DEŠTNÝCH PRALESŮ



Obr. 5 Poměr mezi toky emisí CO₂ ve 3 největších deštných pralesech [30]

Navíc již nyní některé lesy emise spíše navyšují, než absorbují. A to hlavně proto, že se k jejich odlesnění účelově zakládají požáry, při kterých se emituje více CO₂, než je les schopný zachytit [30]. Mezi další rizika patří například i změna kyselosti půdy, změna místní hydrologie či klimatických podmínek [23].

4.1.2 Hnojení oceánů

Další možností je využití oceánů. Oceány se přirozeně podílí na zachytávání CO₂ z atmosféry. Od dob průmyslové revoluce oceány zachytily 29 % celosvětových emisí CO₂, což představuje zhruba 112–118 Gt uhlíku a v současné době uchovávají cca 38 000 Gt CO₂ [31].

Z uvedených čísel plyne, že oceány hrají významnou roli v rámci zemského uhlíkového cyklu, právě proto se vědci snaží uměle navýšit kapacitu těchto záchytů. Ještě před samotným vysvětlením principu metody hnojení oceánů, je nutné vysvětlit princip oceánského uhlíkového cyklu.

Atmosférický CO₂ se do oceánských vod dostane svou difúzí [32]. Množství se odvíjí od klimatických podmínek, teploty oceánu a koncentrací CO₂ v dané lokalitě [32]. Oceánský uhlíkový cyklus funguje na mnoha principech a možnostech, jak uchovat uhlík v hlubinách je několik. Pro hnojení oceánů je nejdůležitější tzv. biologické uhlíkové čerpadlo. Základem jsou mořské organismy a fotosyntéza. Fytoplankton žijící v povrchových vodách oceánů zachytí atmosférický CO₂ pomocí fotosyntézy a přemění jej na sloučeniny, které slouží jako potrava ostatním organismům a část CO₂ je navracena do atmosféry při dýchání. Uhlík, který se stal součástí potravní oceánské sítě, se poté dostane do hlubokého oceánu rozkladem či vyprazdňováním živočichů, kterými byl požit [32].

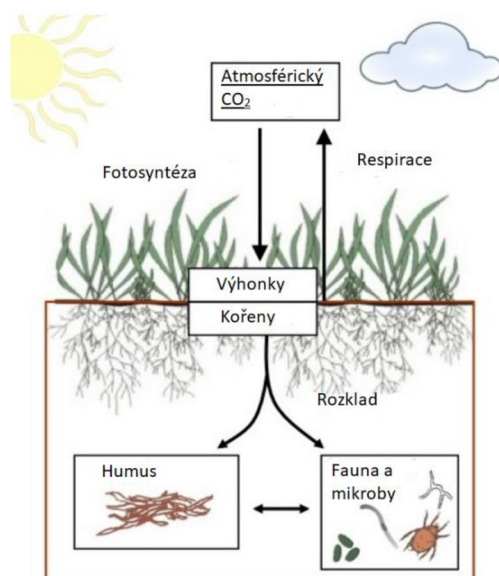
Současně má i tvorba uhličitánů důležitou roli při usazování uhlíku v hlubinných oceánech. Uhličitán vápenatý, který vzniká chemickou reakcí mezi uhličitany (vzniklými z CO₂) a ionty vápníku, slouží jako stavební materiál pro tvorbu skořápek mnoha druhů živočichů. Tito živočichové se po smrti potopí na mořské dno, kde zůstanou uloženy skořápky, nebo se rozpustí. Uhlík pak může zůstat uložen v oceánských hlubinách až po dobu tisíců let [32].

Principem metody hnojení oceánů je umělé zvýšení výskytu fytoplanktonu v eufotické zóně oceánu, který by tak díky fotosyntéze mohl absorbovat více atmosférického CO₂ [31][33]. Aby se podpořil růst tohoto fytoplanktonu je třeba přidat do oceánu více makro a mikroživin, mezi makroživiny řadíme dusičnany a fosfáty, mezi mikroživiny železo a zinek [34]. Jako každá technologie i hnojení oceánů přináší jistá rizika, jejichž dopad je třeba dále posoudit. Hnojením oceánů by mohlo dojít ke snížení hladiny kyslíku v oceánech, změně biologické rozmanitosti či změně pH oceánů [34].

Aby bylo možné odhadnout náklady, bylo by třeba dalšího výzkumu, současné náklady se pohybují v rozmezí 2–457 USD za tunu CO₂ v závislosti na produkci živin, logistice a sekvestračních kapacitách [26].

4.1.3 Půdní sekvestrace uhlíku (Soil Carbon Sequestration – SCS)

Půdní sekvestrace uhlíku je přirozeně se vyskytující proces v rámci zemského uhlíkového cyklu. Snahou geoinženýrství je tento přirozený proces urychlit za účelem významného snížení atmosférického CO₂ [35]. Základem toho, aby mohl být uhlík v půdě uložen, je fotosyntéza a půdní organická hmota. Atmosférický CO₂ se díky fotosyntéze dostane přes kořeny až do půdy. V půdě se uhlík podílí na tvorbě humusu nebo dodává energii půdním mikrobům. Tento proces je graficky znázorněn na obrázku č. 6 [36].



Obr. 6 Půdní sekvestrace uhlíku [36]

Myšlenka využití půdy vychází z toho, že půda je hned po oceánu druhou největší „zásobárnou“ uhlíku, avšak rychlost sekvestrace uhlíku v půdě je vyšší než v oceánech. Přirozeně se v půdách uloží cca 3 Gt C za rok [36]. K tomu, aby mohlo dojít k významné sekvestraci, která by měla reálný efekt, by byla třeba velká prostranství. Za ideální místa jsou považovány především již nevyužívané zemědělské půdy. Uvádí se, že takové půdy by mohly poskytnout plochu o velikosti 430 Mha [35].

Experimentálně bylo prokázáno, že biologická diverzita napomáhá většímu zachytu uhlíku, a to až o několik desítek procent, čímž by se mohla ovlivnit rychlost sekvestrace. Je ovšem nutné podotknout, že rychlost sekvestrace není ovlivněna pouze rostlinnou diverzitou, ale také místním klimatem či typem půdy [35]. Důležité je také zmínit to, že množství atmosférického CO₂ ovlivňuje rychlost fotosyntézy. Paradoxně rychlost fotosyntézy roste s rostoucí koncentrací CO₂ [36].

Při sekvestraci uhlíku do půdy se zvyšuje obsah živin v půdě a tím i její kvalita. To má pozitivní efekt například na její výnosnost. Aby byla metoda SCS, alespoň z pohledu negativních účinků, co nejšetrnější, mělo by se předcházet využívání hnojiv. Ta totiž mohou zapříčinit zvýšení emisí metanu CH₄ či oxidu dusného N₂O. Dále nesmíme zapomenout, že půdní sekvestrace je časově omezená, udává se rozmezí 10–100 let, stejně tak s časem klesá i její rychlost [26].

Co se týče ekonomické náročnosti a potenciálu při aplikaci na globální úrovni, jedná se zatím pouze o odhady. Dosavadní průzkumy by se daly rozdělit na 2 typy – vysoko potenciální a nízko potenciální. Vysoko potenciální odhady nezohledňovaly např. dostupnost pozemků, kdežto nízko potenciální ano. V tabulce níže jsou uvedeny některé příklady nízko potenciálních odhadů, které zohledňují faktory jako je např. již zmiňovaná dostupnost pozemků nebo způsob obhospodařování půdy [26].

Tab. 1 Potenciál sekvestrace uhlíku dle typu půd [26]

Typ půdy/ hospodaření s půdou	Gt CO ₂ /rok
Orné půdy	1,47–2,93
Kontrola desertifikace	0,73 – 1,47
Suchozemské ekosystémy	3,6
Rekultivace zemědělské půdy	1,47 – 3,67
Neobdělávání orných půd	0,4 – 0,6
Obnova znehodnocených půd	0,51 – 1,25
Agrolesnictví	4–8

Odhad nákladů je v případě SCS velmi složitý, jelikož vždy bude záležet na specifikách dané půdy a klimatu. Z již provedených odhadů lze říct, že náklady rostou s rostoucím množstvím zachyceného CO₂ a pohybují se v rozmezí 20–100 USD/t CO₂ [26].

4.1.4 Zesílené zvětrávání (Enhanced Weathering – EW)

Zesílené zvětrávání (EW) je další metodou geoinženýrství, která využívá přirozeného zachytu atmosférického CO₂. Principem EW je zachycení CO₂ pomocí minerálů vyskytujících se v půdách [38]. Současné přírodní zvětrávání zajišťuje zachyt zhruba 0,25 Gt C za rok [37]. Pro zesílení zvětrávání půd se využívá silikátových minerálů ve formě prášku, kterými se půdy mohou pohnojit. Tzv. silikátové minerály neboli křemičitany, mezi které patří například křemík či olivín, při svém rozpouštění spotřebovávají CO₂ za vzniku kationtů [37][38][39].

Vhodným územím pro aplikaci EW jsou tropické oblasti díky svým klimatickým podmínkám. Problémem je, že se často jedná o oblasti deštných pralesů nikoliv o orné půdy a vykácet deštné pralesy za účelem zisku orné půdy a následné implementace EW, by bylo kontraproduktivní vzhledem k tomu, že zalesňování je také jednou z metod geoinženýrství [26].

Výhodou oproti běžnému geologickému ukládání uhlíku je, že EW není tak energeticky náročné, jelikož se CO₂ neukládá ve formě stlačeného plynu, čímž se také eliminují rizika s takovým uchováním spojená. Další výhodou je, že při aplikaci do oceánských vod by mohly minerály příznivě působit proti okyselování oceánů či příznivě ovlivnit tzv. biologické uhlíkové čerpadlo, o kterém se hovořilo výše [38].

Při aplikaci EW se také zvyšuje obsah jejich živin, toho by se dalo využít například v tropických oblastech, kde se nachází rozlehlé oblasti půd chudých na živiny [26]. Současně by docházelo ke zvýšení zásaditosti pH těchto půd a půdních vod [38].

Velkým rizikem této metody je, že by došlo ke změnám biochemického cyklu, u kterého nejsou zatím známy všechny vedlejší účinky [38].

Potenciál této metody je odhadován na 2–4 Gt CO₂ ročně s cenou v rozmezí 50–200 USD/t CO₂. Jedná se však spíše o teoretické poznatky, v praxi nebylo doposud EW ve větším měřítku odzkoušeno [26].

4.1.5 Biochar

Biochar, česky též označován jako biouhel, získáváme z biomasy pyrolýzou nebo zplyňováním [40]. Je to stabilní forma uhlíku, podobající se dřevěnému uhlí, která se přidává do půdy především za účelem zvýšení úrodnosti půdy a bezpečné sekvestrace uhlíku. To, s jakou účinností dochází k sekvestraci uhlíku, závisí na dostupnosti biomasy, ze které je biochar vyráběn [26] [41][42].



Obr. 7 Biochar neboli Biouhel [43]

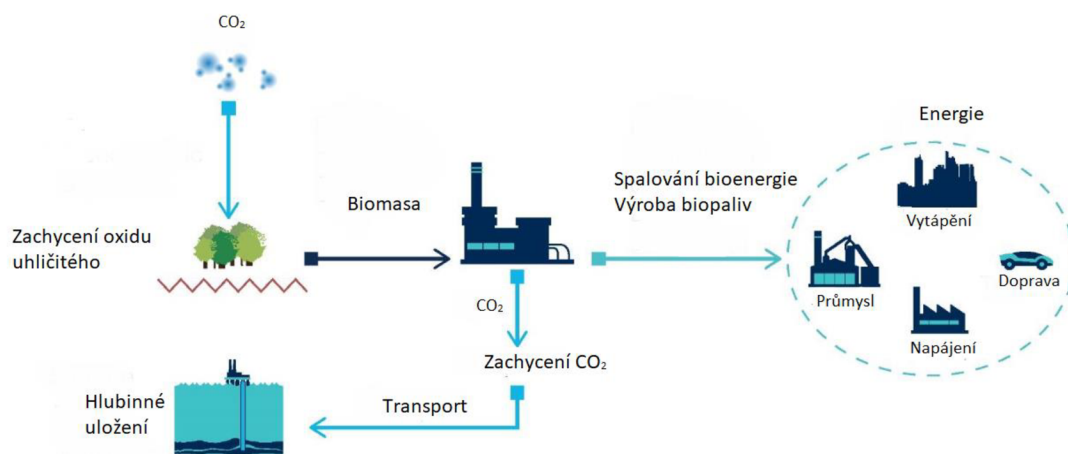
Kromě sekvestrace uhlíku zabraňuje biochar uvolňování N_2O a CH_4 z půd do ovzduší [26] [42]. Zatím nelze jednoznačně určit po jakou dobu zůstává biochar v půdě uložený. Odhady se pohybují v rozmezí desetiletí až tisíciletí v závislosti na klimatických podmínkách, vlastnostech půdy či zpracování biocharu [26] [42]. Aplikace biocharu do půdy není vratný proces, proto je třeba důkladně zvážit případná rizika s touto aplikací spojená. Existují totiž důkazy, že biochar může mít i negativní vliv na růst rostlin, které se tak mohou stát zranitelnějšími nebo dokonce při rozsáhlé aplikaci snížit dostupnost potravin [26] [44].

Z provedených studií vyplývá, že dopad na výnos plodin je ovlivněn složením půdy v závislosti na klimatických podmínkách dané oblasti. V oblastech tropického pásma by mohla mít aplikace biocharu příznivý vliv na výnosnost plodin. Naopak výsledky z provedených studií v oblastech mírného pásma naznačují, že výnosnost těchto oblastí by zůstala neměnná nebo by dokonce mohlo dojít k mírnému poklesu, pravděpodobně z důvodu změny pH půdy. Vše se ovšem odvíjí od množství aplikovaného biocharu [44].

Potenciál sekvestrace uhlíku pomocí biocharu je nižší než například u technologie BECCS, která bude popsána v následující kapitole. Při zvážení všech vstupních parametrů se odhaduje, že by bylo možné do roku 2100 takto sekvestrovat až 200 Gt oxidu uhličitýho [41]. Cenové rozpětí aplikace biocharu se pohybuje v rozmezí 30 až 120 USD/tCO₂ [26]. K rozsáhlým aplikacím biocharu však kvůli vysokým cenám zatím nedochází [26].

4.1.6 Technologie BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage – bioenergie a zachytávání a ukládání uhlíku)

Jedná se o technologii spadající do skupiny Carbon Capture and Storage (CCS), neboli zachytávání a ukládání uhlíku, v kombinaci s využitím biomasy jako energetického zdroje. Tato technologie spojuje princip fotosyntézy a CCS. Nejprve je atmosférický oxid uhličitý navázán na biomasu, která se může dovážet nebo se záměrně pro tyto účely vypěstují plodiny v okolí. V současné chvíli se obecně vzato záměrně biomasa nepěstuje a využívá se spíše odpadní biomasa, která se energeticky dále využije a oxid uhličitý vzniklý spalováním je uložen pod zem. Takto vzniklá energie může být v tomto případě využita například jako zdroj paliva, k výrobě elektřiny či jako zdroj tepla [45][46].



Obr. 8 Schéma technologie zachytávání a ukládání oxidu uhličitého v kombinaci s výrobou bioenergie (BECCS) [46]

Tato technologie je nyní využívána pouze na 5 zařízeních, z toho 4 se nachází v USA a 1 v Kanadě s celkovým zachytem zhruba 1,5 milionu tun CO_2 /rok [46]. Plánuje se však využití ve 3 dalších zařízeních v Evropě a Japonsku. Významně by tato technologie mohla ovlivnit především fosilní průmysl, který by mohl být částečně nahrazen výrobou bioetanolu v kombinaci s CCS [46].

4.1.6.1 Technologie Carbon Capture and Storage

Při běžném spalování biomasy se zachycený CO_2 uvolňuje zpět do atmosféry, aby k tomu v rámci BECCS nedocházelo, je do procesu zařazena technologie CCS. Technologie Carbon Capture and Storage (CCS), tedy zachytávání a ukládání uhlíku, zahrnuje tři hlavní procesy: zachycení, přepravu a následné uložení zachyceného oxidu uhličitého. Nejedná se o novou technologii, v provozu je již od roku 1972 [47].

- **Zachycení CO_2 :** V místě zdroje emisí dojde k oddělení CO_2 od ostatních plynů
- **Přeprava CO_2 :** Zachycený CO_2 je třeba upravit do formy vhodné k přepravě k místu vhodnému k trvalému uložení. Přeprava probíhá nejčastěji potrubní či lodní dopravou
- **Uložení CO_2 :** CO_2 se ukládá do hlubinných geologických úložišť v hloubce až 1 kilometru [47]

V rámci této práce nebude technologie CCS dále popsána, jelikož její podstatou není zachycení CO_2 z atmosféry, ale z bodového zdroje. Zde je zmíněna pouze pro úplnost. Více informací lze nalézt v bakalářské práci [1] Valentíny Remekové.

4.1.6.2 Bioenergetické zdroje

Jedná se o obnovitelný zdroj energie získaný z biomasy, který lze použít k výrobě tepla, elektřiny, pohonných hmot neboli biopaliv či bioproduktů [48].

- **Biopaliva:** Přeměnou biomasy do kapalného skupenství vznikají tzv. biopaliva. V současné době se nejvíce využívá bionafta a etanol.
 - **Bionafta:** Jedná se o biologicky odbouratelné kapalné palivo využívané u diesellových motorů. Vzniká kombinací alkoholu s rostlinnými či živočišnými tuky. Nejčastěji bychom se setkali s typem paliva B20, který obsahuje 20 % bionafty a 80 % nafty [49].

- *Etanol*: Jedná se o alkohol, který se za účelem zvýšení oktanového čísla míchá s benzínem a nejčastěji vzniká fermentací biomasy [49]. Při smíchání s benzínem se snižuje množství vypouštěného CO₂, avšak co se týče energetické bilance, galon benzínu je schopen poskytnout větší množství energie než etanol. Nejčastěji se etanol s benzínem míchá v poměru 10:90, tedy 10 % etanolu a 90 % benzínu, označováno pod zkratkou E10 [49][50].
- **Bioenergie**: Pojem bioenergie označuje tepelnou a elektrickou energii získanou z biomasy. Bioenergií lze získat třemi způsoby – spalováním, anaerobní digestí a přeměnou na plynné či kapalné palivo [51].
 - *Spalování*: Principu spalování se nejčastěji využívá při výrobě elektrické energie, kdy se pára vzniklá spalováním biomasy využívá k pohonu generátoru, který produkuje elektrickou energii.
 - *Anaerobní digesce*: Při anaerobní digesti dochází k rozkladu organické hmoty metanovými bakteriemi za nepřítomnosti kyslíku. Vzniká zemní plyn, který může být dále využit.
 - *Přeměna na plynné či kapalné palivo*: Plynné či kapalné palivo lze získat metodou zplyňování nebo pyrolýzou. Při vysokoteplotním zplyňování vzniká směs vodíku a oxidu uhelnatého, tzv. syngas, který lze dále využít například k výrobě elektřiny. Pyrolýza je anaerobní proces, který probíhá za nižších teplotních podmínek a vzniká tzv. bio-olej, který lze využít při výrobě elektrické energie [51].

I když je technologie BECCS v současné době považována za poměrně vyspělou, pro široké komerční použití existuje několik překážek, které je třeba vyřešit. Kromě technických a ekonomických problémů, je to především dostupnost surovin z biomasy, dostupnost půdy a dostatek úložného prostoru. Rozsáhlé zavádění bioenergie by mohlo mít negativní dopad na množství potravin, které budeme schopni vyprodukovat pro nedostatek půdy [26] [45]. Jednou z možností, jak uvolnit značné množství půdy je změna stravování lidské populace. Naše strava obsahuje velké množství živočišných produktů, aby bylo možné pokrýt roční průměrnou spotřebu člověka, je k tomu zapotřebí cca 1,08 ha půdy, kdežto v případě vegetariánské stravy se jedná o 0,14 ha půdy. Je však nereálné předpokládat, že by došlo k tak razantní změně ve stravování populace, aby se uvolnilo dostatečné množství půdy [45].

Díky mnoha nejasnostem se i cena a sekvestrační potenciál této technologie nedá přesně určit a pohybuje se v rozmezí od 15 do 400 USD/t CO₂ [46]. Do odhadu ceny se často nezahrnuje dostupnost půdy, kdy v případě jejího nedostatku, by se cena mohla rapidně zvýšit [45]. Celkový sekvestrační potenciál BECCS byl odhadnut na 3,4 – 5,2 Gt CO₂/rok [52]. I přes všechny nejistoty se předpokládá, že tato technologie by byla schopná udržet vzrůstající teplotu na Zemi pod hodnotou 2 °C [41]. Je však otázkou, zda je tak velké nasazení BECCS vůbec reálné.

4.1.7 Technologie DACC (Direct Air Carbon Capture – Přímé zachycení uhlíku ze vzduchu)

Další významnou technologií v oblasti geoinženýrství je technologie přímého zachycení uhlíku ze vzduchu (DACC). Dle toho, jak se dále zachycený CO₂ využije, můžeme technologii rozdělit na DACCS – Přímé zachycení uhlíku ze vzduchu a následné uložení v geologických úložištích, nebo tzv. DACCU – Přímé zachycení uhlíku ze vzduchu a následné využití,

například pro výrobu paliv. Technologie DACCU by se dala využít například v odvětvích, kde je dekarbonizace a využívání obnovitelných zdrojů těžko dosažitelné [53][54].

Aby bylo využití technologie DACC účinné a dosáhlo se dostatečných výsledků, je třeba, aby byl provoz zajištěn z obnovitelných či nízkouhlíkových zdrojů elektrické energie. Pokud by tomu tak nebylo, nedošlo by ve výsledku téměř k žádnému odstranění CO₂ z atmosféry, jelikož by při výrobě energie pro provoz z neobnovitelných zdrojů docházelo k vypouštění CO₂ do atmosféry a výsledný efekt DACC by tak byl velice nízký [53].

Základem technologie DACC je kontakt atmosférického CO₂ s rozpouštědly nebo sorbenty a následná regenerace. K tomu lze využít jednoho ze dvou principů – absorpce nebo adsorpce.

- **Absorpce**

Absorpce představuje první možnost, jak oddělit CO₂ z okolního vzduchu pomocí chemických reakcí. Silné bazické sorbenty se využívají, při již zmiňované absorpci, kdy se molekuly CO₂ při styku se sorbenty rozpustí. Mezi silné bazické sorbenty řadíme např. NaOH, KHO. Do procesu se dále přidává roztok Ca(OH)₂, který lze opakovaně v procesu využít. V porovnání s adsorpcí se jedná se o vysokoteplotní proces [53].

- **Adsorpce**

Pokud je technologie DAC založena na adsorpci CO₂ z okolního vzduchu, jsou za tímto účelem využity pevné sorbenty, které jsou schopny na sebe CO₂ navázat. Jako sorbenty jsou často využívány tzv. aminy. Po zachycení dojde k nízkoteplotnímu zahřátí (teplota je dána v závislosti na druhu sorbentu) a uvolnění CO₂, který je v procesu dál využit [55].

Technologie DACCS je v porovnání s CCS až třikrát energeticky náročnější, díky rozdílné koncentraci CO₂ okolního vzduchu v porovnání se spaliny, ze kterých je CO₂ zachytáván při použití technologie CCS v elektrárnách či spalovnách. Na druhou stranu, výhodou DACCS technologie je, že může být provozována v podstatě kdekoliv, protože není vázána na bodový zdroj emisí [53][54].

Bylo provedeno několik studií, které se snažily stanovit potenciál zachycení těchto technologií. Nejčastěji zmiňovanou hodnotou je 1 Gt CO₂ za rok, které by mohlo být dosaženo do roku 2050 [54].

Aby bylo možné posoudit energetickou a s tím spojenou ekonomickou náročnost DACC, je nutné myslet na to, že i samotná výroba hydroxidových roztoků či pevných sorbentů vyžaduje nemalou část energie [56]. Jak už bylo zmíněno výše, proces je energeticky náročnější než například technologie CCS. Nešlo by využívat „nadbytečnou“ elektrickou energii. DACCS potřebuje svůj vlastní zdroj elektrické energie, který by musel dodávat elektrickou energii po dobu zhruba 6000 až 8000 hodin za rok [54]. Je však nutno zmínit, že při využití DACCS technologie se poměrně výrazně sníží potřeba využití jiných technologií, například pro BECCS by to mohlo být až o 20–40 % méně [53].

Zatím se nejedná o technologii, která by byla komerčně využívána, existuje pouze 15 projektů. [57]. Dva takové projekty budou představeny v následujících kapitolách.

Větší pozornost bude věnována především projektu společnosti Carbon Engineering, k němuž existuje dostatek pokladů pro jeho detailnější popis, a především proto, že na začátku tohoto roku (2021) došlo k uzavření smlouvy mezi společnostmi Carbon Engineering a Shopify, která si zakoupila technologii DACCS s kapacitou 10 000 tun CO₂ [58]. Bude se tak jednat o první komerční využití a v provozu by mělo být zařízení DAC od roku 2024 [58].

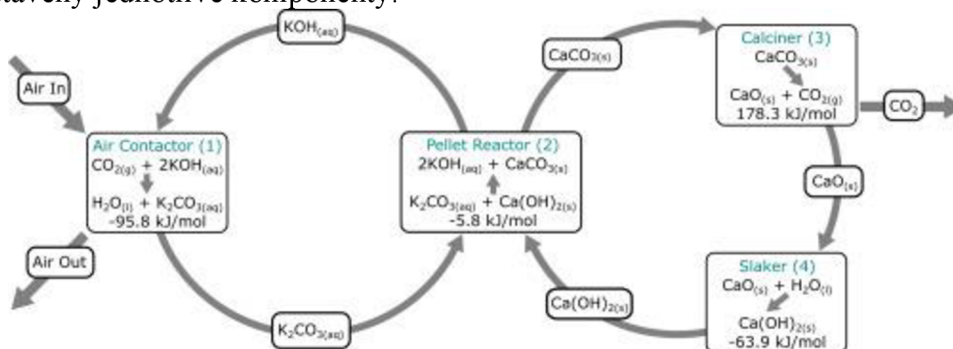
4.1.7.1 Projekt společnosti Carbon Engineering

Pilotní projekt Carbon Engineering poskytuje reálný obraz procesu zachytu CO₂ z technického i ekonomického pohledu. Z navržených metod CDR se jedná o jednu z nejlépe popsáných.

DAC vyžaduje svůj vlastní zdroj energie, jelikož se CO₂ zachytává při tlaku 15 MPa. Při využití zemního plynu je třeba dodat 8,81 GJ na zachycení 1 tuny CO₂ nebo lze využít kombinaci plynu a elektrické energie, v takovém případě je třeba 5,25 GJ a 366 kWh elektrické energie na 1 tunu CO₂ [59].

Cena se pohybuje v rozmezí 94–232 USD/ t CO₂, při započítání cen za dodávku energií potřebné k provozu bude cena spíše kolem 107–249 USD/t CO₂. Pilotní projekt je schopen zachytit až kolem 1 Mt CO₂/ rok s využitím vodných sorbentů KOH [59].

Technologie DAC je sestavena ze čtyř hlavních komponent, které mají základ v průmyslově využívaných technologiích. Tyto komponenty jsou zacykleny ve dvou chemických smyčkách tak, jak je zobrazeno na obrázku číslo 9. V následující části budou představeny jednotlivé komponenty.



Obr. 9 Dva chemické okruhy technologie DAC [59]

Vzduchový ventilátor

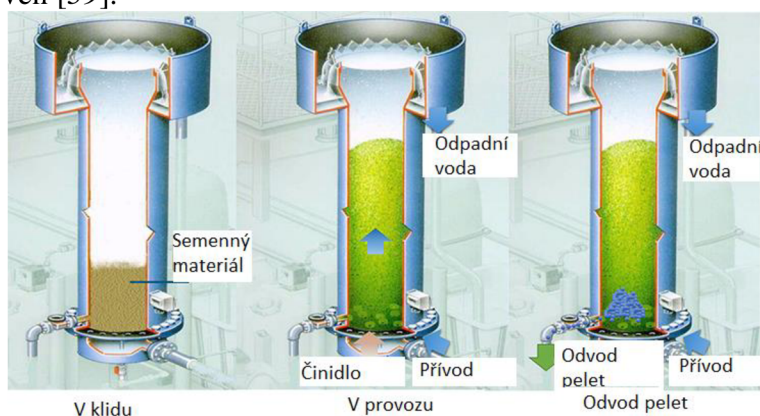
První fází je zachycení okolního vzduchu pomocí ventilátoru. Konstrukce těchto zařízení vychází z komerčně využívaných chladících věží [59]. Uvnitř proudí vzduch přes materiál voštinové struktury, na který je nepřetržitě přiváděn roztok chemikálií, v tomto případě se jedná o hydroxid draselný (KOH), který na sebe naváže CO₂ ze vzduchu s účinností 80 % (jedná se tedy o absorpci). Chemickou reakcí mezi absorbentem a CO₂ dojde ke vzniku uhličitany draselného (K₂CO₃) [59].



Obr. 10 Vizualizace vzduchových stykačů v rámci technologie DAC [60]

Peletový reaktor

V peletovém reaktoru reaguje K_2CO_3 s hydroxidem vápenatým ($Ca(OH)_2$) za vzniku $CaCO_3$ ve formě pelet o průměru 0,1 – 0,9 mm. Při této reakci dochází současně ke vzniku KOH, který je navrácen zpět do vzduchového ventilátoru k opětovnému využití. Proces vzniku pelet je založen na podobném principu jako technologie úpravy vody patentovaná společností RHDHV. Nejprve je do reaktoru přiváděna suspenze 30% hydroxidu vápenatého ($Ca(OH)_2$), který reaguje s K_2CO_3 za vzniku pelet uhličitanu vápenatého ($CaCO_3$), které s časem nabobtnávají. Se zvětšující se velikostí se pelety začnou propadávat dolů a mohou být z reaktoru odvedeny ven [59].

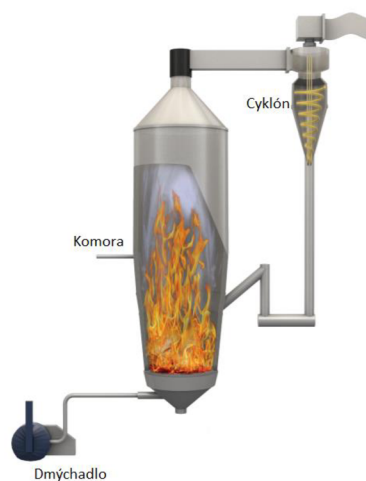


Obr. 11 Crystalactor s peletovým reaktorem společnosti RHDHV pro čištění odpadních vod [61]

Kalcinátor

Vzniklé uhličitanové pelety jsou přiváděny do kalcinátoru s cirkulujícím fluidním ložem, který se běžně využívá například při zpracování železné rudy. Kvůli nutnému ohřevu pelet je do kalcinátoru přiváděn vysokoteplotní plyn, který jim předá část svého tepla – pelety se zahřívají ve dvoustupňovém procesu nejprve na 450 °C, poté na 650 °C, to vše za tlaku okolí [59].

Tímto tepelným rozkladem uhličitanových pelet vzniká oxid vápenatý (CaO) a oxid uhličitý (CO_2) [59]. Takto oddělený CO_2 je z cyklu odveden pryč a dál využit tak, jak je popsáno níže.



Obr. 12 Kalcinátor společnosti TechnipFMC, který je využíván v rámci DAC [62]

System hašení vápna

Poslední částí je systém pro hašení vápna. V tomto případě se jedná o průmyslově využívaný systém, který nepotřebuje speciální úpravy. Namísto hašení vodou, jako je tomu například u Kraftových procesů, se v rámci DAC používá pára, která je z termodynamického hlediska výhodnější, následně je totiž toto teplo dále využito k předehřevu pelet v kalcinátoru. Proces probíhá za teploty 300 °C a finálním produktem je $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který je navrácen do peletového reaktoru a opětovně využit [59].



Obr. 13 Systém hašení vápna z průmyslové výroby [63]

Využití CO_2

Oxid uhličitý odvedený z kalcinátoru může být geologicky uložen, nebo se dále využívá pro výrobu paliv.

- **Geologické uložení**

Geologické ukládání uhlíku bylo zmíněno i v kapitole CCS, princip je naprosto stejný v obou případech. Nejprve je CO_2 stlačen do kapaliny a injektován pod zem. Poté je nad úložiště uložena horninová vrstva, která zajistí nenávratné skladování. Při správném zajištění může zůstat uhlík pod zemí až po dobu milionů let [60].

Za ideální úložiště jsou považovány solné formace či vytěžená ropná a plynárenská pole. Případně se nabízí i využití nevytěžených ropných nádrží za předpokladu, že se množství vstříkovaného CO_2 z technologie DAC rovná vyprodukovanému množství ropy, aby se zachovala uhlíková neutralita procesu [60].

- **Výroba paliv**

Výroba uhlíkově neutrálních paliv je další možností, jak nakládat se zachyceným CO_2 . Společnost Carbon Engineering provozuje od roku 2017 pilotní závod, kde se snaží s maximální efektivností vytvářet nízkoemisní paliva [64].

K výrobě takového paliva je nutné dodávat do procesu další elektrickou energii a vodu. Aby byl proces uhlíkově neutrální je třeba, aby elektrická energie pocházela z obnovitelných zdrojů. Tato energie je využita k elektrolýze vody, čímž vznikne vodík a kyslík. Vodík následně s CO_2 vytváří uhlovodíky, ze kterých lze vyrobit benzín, naftu či jiná paliva [64].

Ekonomické odhady

Projekt společnosti Carbon Engineering udává ucelenější představu o nákladech spjatých s výstavbou. Jedná se o odhady vypracované na základě spolupráce s mnoha společnostmi napříč obory. V následující tabulce jsou shrnuty odhady cen pro výstavbu projektu Carbon Engineering.

Tab. 2 Souhrn odhadů cen pro výstavbu projektu společnosti Carbon Engineering [59]

Zařízení	Cena komponent [\$M USD]	Cena za materiál [\$M USD]	Cena za práci [\$M USD]	Celková suma [\$M USD]
Vzduchový stykač	114,2	48	50	212,2
Peletový reaktor	76,9	28,4	25,5	130,8
Kalcinátor + Systém hašení vápna	43,8	18,1	15,8	77,7
Ostatní zařízení	211,6	31,8	33,6	277
			Cena výstavby celkem	697,7
			Administrativní a jiné náklady	429,1
			Cena projektu celkem	1126,8

Společnost často zmiňuje možné využití této technologie k pokrytí emisí z dopravního sektoru. Jedno megatunové zařízení by údajně bylo schopné pokrýt emise až 250 000 automobilů [65]. To se vzhledem k celkovému počtu automobilů na fosilní pohon nejeví jako závratné číslo, v současné době se na silnicích pohybuje zhruba přes 1 000 000 000 automobilů na fosilní paliva [66]. Navíc jak už bylo zmíněno výše, pro zachycení 1 tuny CO₂ je třeba 8,81 GJ zemního plynu, případně v kombinaci s 366 kWh elektrické energie 5, 25 GJ plynu. Pro zachycení 1 Mt by se tedy jednalo o 1 000 000krát energeticky náročnější proces a například při využití plynu by takové zařízení potřebovalo 6 % celosvětové výroby plynu na pokrytí pouhých 0,025 % automobilových emisí [67]. Aby se aplikace DAC vyplatila, je nutné snížit její energetické náklady.

4.1.7.2 Projekt společnosti Carbfix

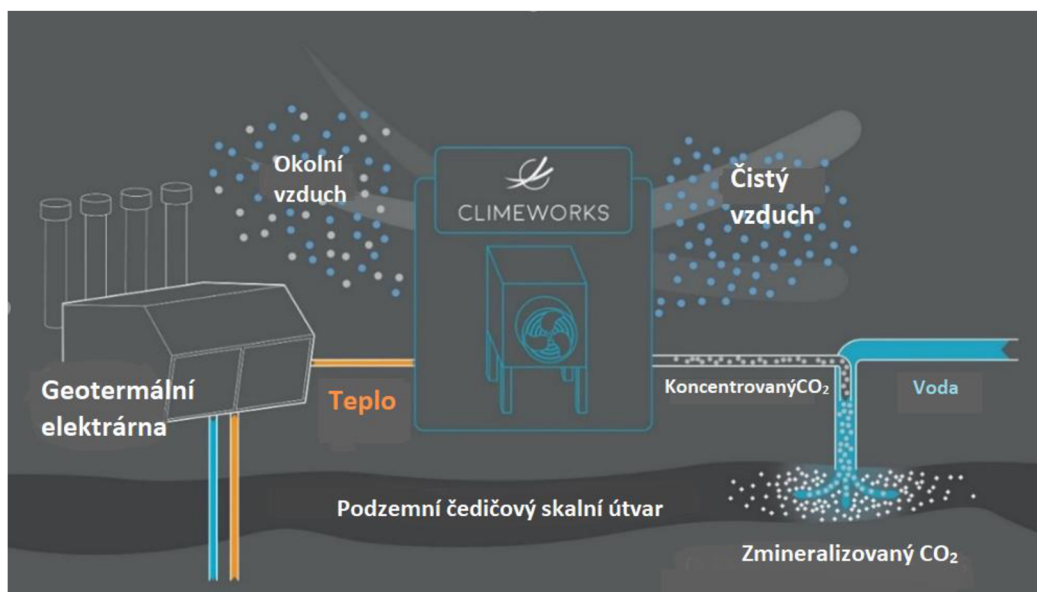
Dalším projektem, který je vhodné zmínit, je projekt společnosti Carbfix provozovaný na Islandu, který využívá procesu mineralizace a injektovaný CO₂ je přeměněn v horninu. Tento projekt probíhá ve spolupráci společností Carbfix a Climeworks.

Oproti projektu společnosti Carbon Engineering je zde využito principu adsorpce. Pro oddělení CO₂ z okolního vzduchu se nevyužívá pouze aminů, ale speciálního filtru z celulózových vláken a aminů [55].

Energie se získává z geotermálních zdrojů, následně je CO₂ zachycen pomocí kolektorů ve dvou stupňovém procesu. K následujícímu uvolnění čistého CO₂ stačí zvýšit teplotu v kolektorech na 80–100 °C, CO₂ může být následně uložen [57] [68].

Z energetického úhlu pohledu je tento proces méně náročný na elektrickou energii. Na uvolnění 1 tuny CO₂ je třeba 200-300 kWh. Co se týče požadavků na teplo, jsou tyto dva systémy srovnatelné. Adsorpce vyžaduje 1500-2000 kWh tepelné energie na 1 tunu CO₂ [55].

Významným krokem vpřed by mohl být patent společnosti Global Thermostat, který snižuje jak dobu a teplotu nutnou k regeneraci, tak i spotřebu elektrické a tepelné energie. Při využití jejich amino – polymerového adsorbentu by se spotřeba tepla snížila na cca 1170-1410 kWh a elektřiny na 150-260 kWh na tunu CO₂ [55].



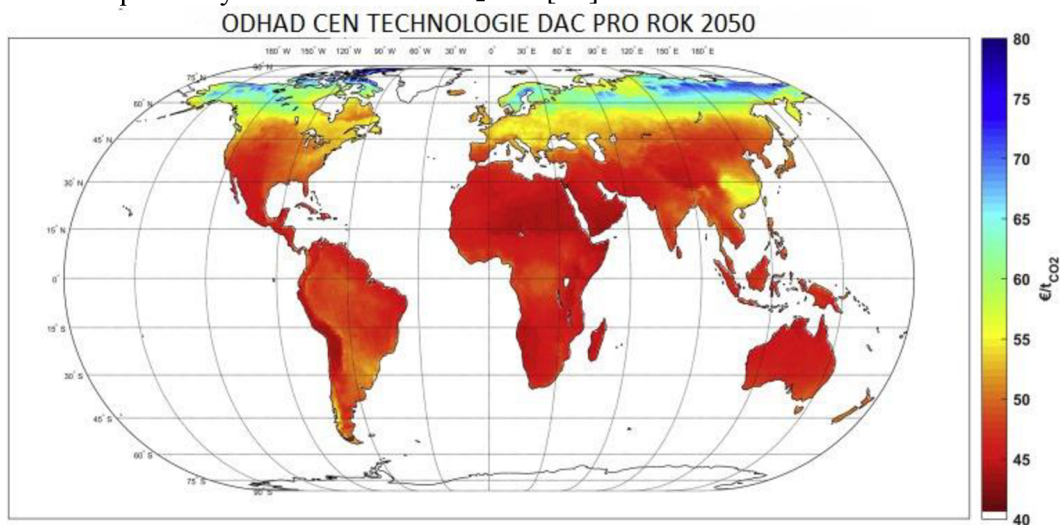
Obr. 14 Schéma technologie DACCS projektu Carbfix 2 [68]

K tomu, aby bylo možné zachycený CO₂ zmineralizovat, je třeba sycená voda a čedičové či jiné reaktivní horniny, s kterými by mohl CO₂ zreagovat. Proces mineralizace uhlíku touto metodou trvá zhruba dva roky a následně může být uložen až po dobu tisíců let [68].

Odhady nákladů na komerční provoz nejsou tak podrobné jako u společnosti Carbon Engineering. Cena, na kterou je v rámci této technologie zacíleno, je 75 EUR/ tunu CO₂ [55].

4.1.7.3 Budoucí výhled technologií DACC

V budoucnu se bude cena DACC odvíjet také od lokality, kde budou technologie DACC využívány, při vysoké dostupnosti obnovitelných zdrojů a jejich akumulaci lze náklady značně snížit [53]. Je nutné při odhadech nezapomínat na cenu za přepravu, která se bude odvíjet od typu dopravního prostředku a vzdálenosti, kam má být CO₂ uložen. Nejatraktivnější možnostmi z hlediska kapacity jsou plynovody a lodní doprava. Následně i cena za skladování, která by se při optimističtějších odhadech mohla pohybovat kolem 10 EUR/ tunu CO₂ [55]. Poptávka po technologiích DACC v budoucnu pravděpodobně významně poroste. V roce 2050 by mohla požadovaná kapacita být až 15 356 Mt CO₂/rok [55].



Obr. 15 Odhadované náklady přímého zachycení CO₂ ze vzduchu v roce 2050 dle zeměpisného umístění [54]

DACC bývá často označována jako technologie, která by mohla hrát významnou roli ve snaze udržet oteplování pod 2 °C, což je cílem Pařížské dohody. Důležitým krokem vpřed je jistě zmíněná investice firmy Shopify a první komerční využití těchto zařízení, které přiblíží skutečné náklady DACC v průmyslovém provozu, avšak z mnoha důvodů by měla zůstat hlavní snahou dekarbonizace, aby se technologie DACC nestala nástrojem pro odkládání tohoto cíle. Nesmíme také zapomenout, na energetickou náročnost DACC, rozsáhlá implementace této technologie by vyžadovala obrovské množství elektrické energie z obnovitelných zdrojů, které v současné době jen těžko zajistí stabilní přísun energie spotřebitelům a těmto technologiím. Navíc projekty DACC, které jsou v současné době spuštěné, vyžadují jako jednu z hlavních vstupních surovin vodu. Vzhledem ke stále více převládajícím obdobím sucha, by měla být snaha najít surovinu, která by mohla vodu nahradit, jedním z hlavních cílů budoucího vývoje.

4.2 Řízení slunečního záření (Solar Radiation Management – SRM)

Druhou část geoinženýrství tvoří metody spadající pod tzv. řízení slunečního záření. Oproti metodám CDR dochází pouze ke zmírňování globálního oteplování, nijak tedy neovlivňuje množství skleníkových plynů v atmosféře. Jedná se ale o jedno z možných řešení klimatické změny, proto je nutné představit alespoň některé z metod.

Základní myšlenkou metod SRM je snížení hustoty toku dopadajícího slunečního záření na zemský povrch [69]. Tyto metody jsou významné především svou rychlostí, jakou by mohly stabilizovat globální nárůst teploty. V případě CDR metod se jedná o desítky, možná dokonce stovky let, zde hovoříme pouze v rozsahu několika let [26]. Obecně však metody solárního inženýrství představují velký risk kvůli neznalosti vedlejších účinků a je téměř nemožné zrealizovat praktické studie. Z teoretických studií provedených v minulosti vyplývá, že dopad na ekosystémy by byl nemalý. Navíc, dalším problémem je, že při zavedení jakékoliv metody SRM bude dopad globální a nerovnoměrný. Shoda na jejich využití by tak musela panovat mezi všemi státy [70]. Z provedených průzkumů vyplývá, že se veřejnost shoduje na podpoře hlubšího výzkumu těchto metod, a především jejich negativních účinků [71]. Metody SRM lze rozdělit do tří podskupin – atmosférické, vesmírné a pozemské [26].

4.2.1 Stratosférická aerosolová injekce (Stratospheric Aerosol Injection – SAI)

Jak sám název napovídá, jedná se o injekci aerosolových částic do stratosféry Země, dle rozdělení výše jde o atmosférickou metodu. Na úvod by bylo vhodné vysvětlit, co je to vlastně aerosol.

Aerosol je heterogenní směs, někdy označována též jako suspenze částic v plynu [72]. Tyto částice mohou být jak pevného, tak kapalného charakteru [72]. Důvodem, proč se v rámci geoinženýrství vědci aerosoly zabývají, je jejich schopnost vytvářet „bariéru“, která odráží část slunečního záření, a tím ovlivňuje celkovou teplotu Země. Celkem rozlišujeme 3 druhy aerosolů – sopečný aerosol, pouštní prach a aerosol vzniklý lidskou činností. Z pohledu geoinženýrství je důležitý především sopečný aerosol, jehož chování se v rámci SAI snaží vědci napodobit. Sopečný aerosol vzniká vulkanickou činností, kdy se do stratosférické vrstvy dostane velké množství SO₂, které v průběhu několika měsíců chemicky zreaguje s okolím a přemění se na H₂SO₄. Vznikne tak vrstva, která brání průchodu slunečního záření [73]. Snahou geoinženýrství je napodobit tento efekt umělým vypouštěním aerosolových částic ze zemského povrchu. K vyrovnání účinků antropogenních emisí, v porovnání s předindustriální hodnotou, by bylo třeba vypustit 3–5 milionů tun síry ročně za předpokladu, že dojde alespoň k částečné redukci fosilních paliv [74]. Emise SO₂ pocházející ze spalování uhlí představují ~ 15 217 000 tun/rok (2018) [75]. Bylo provedeno mnoho modelových studií, které se snažily simulovat dopad odstranění aerosolů vzniklých antropogenními činnostmi. Při úplné redukci aerosolů by došlo k nárůstu globálního oteplování o 0,5 – 1,1 °C [76]. Na druhou stranu se asi nedá předpokládat,

že by bylo možné plně redukovat vypouštění aerosolů do atmosféry, přece jen nevznikají pouze spalováním fosilních paliv, na něž je boj s klimatickou změnou zaměřen. I přesto je nutné počítat s tím, že při odstranění antropogenních aerosolů částic dojde k částečnému oteplení.

Nesmíme zapomínat, že SAI nelze využít jednorázově. Pokud bychom se rozhodli po krátké době injektáž zastavit, planeta by se začala rychle oteplovat a docílili bychom opačného výsledku. Životnost aerosolových částic je 1–3 roky [77]. Snížení tepelného toku je odhadováno na 1 W/m² na 1 Mt S/rok. Ve stratosféře je nutné vytvořit sloučeninu H₂SO₄, nejčastěji se tak hovořilo o využití SO₂ nebo H₂S, od sulfanu se však upouští, jelikož je ve větším množství pro lidský organismus smrtelně nebezpečný [78]. V posledních letech se začalo hovořit také o kalcitu, jeho vedlejší účinky jsou však ještě větší neznámou [79].

Za nevhodnější místo pro injektáž je považováno tropické pásmo díky místní cirkulaci vzduchu a jako optimální výška pro injektáž 20–25 km nad zemí [36] [79].

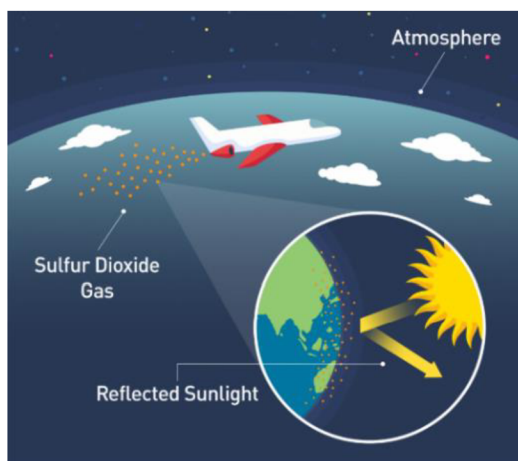
V minulosti bylo navrženo mnoho metod, jakým způsobem by bylo možné aerosoly injektovat do stratosféry. Všechny studie se shodují na tom, že nejlepším řešením je využití letadel. Současná letadla sice nejsou technicky dostatečně vyspělá na to, aby je bylo možné použít, je třeba provést nespočetné úpravy, i přesto se ale jedná o technologicky a finančně nejdostupnější metodu [79].

Za předpokladu, že budeme schopni technologicky dosáhnout vhodného logistického prostředku pro injektáž aerosolových částic do stratosféry, jsou naši největší překážkou vedlejší účinky, které metoda SAI přináší. S jistotou lze říct, že jedny z nejnebezpečnějších jsou tvorba kyselých dešťů a poškození ozónové vrstvy [69]. I když nejsou všechny vedlejší účinky řádně prozkoumané, lze již nyní říct, že by SAI jistě ovlivnila místní ekosystémy [69].

4.2.1.1 Letadla

Jak už bylo zmíněno výše, využití letadel se jeví, alespoň z technického hlediska, jako nejrealističtější řešení. Problémem současných letadel je, že se nejsou schopny dostat do výšek vyšších než 16 km [80]. Naproti tomu vojenské stíhačky by byly schopné dosáhnout požadovaných výšek, avšak doba, po kterou je nutné v nich setrvat, je nad jejich možnosti. Lze samozřejmě namítnout, že není pravda, že by v současné době neexistovaly technologie schopné vzlétnout do výšky 20 km a delší dobu v ní pobýt. Je pravda, že takové technologie existují, a to sice kosmické lodě, avšak náklady na jejich využití by byly astronomické. Je tedy třeba výrazně zvýšit výkon letadel, toho lze dosáhnout například využitím více motorů a současně větší plochou křídel [80]. Důležitá je také automatizace těchto letů [79].

Kromě problému proveditelnosti letu jako takového se nabízí otázka, jak síru během letu uchovávat. Existují dvě varianty. První variantou je smíchání síry s palivem. Druhou je přídavná nádrž, která by pomocí trysek uvolňovala síru v potřebné výšce. Pokud by se síra míchala s palivem, je třeba zabránit uvolňování síry během letu v nižších výškách, toho lze dosáhnout například rozdělením palivové nádrže. Dalším problémem je možné poškození motorů letadel kyselinou sírovou H₂SO₄ [78].

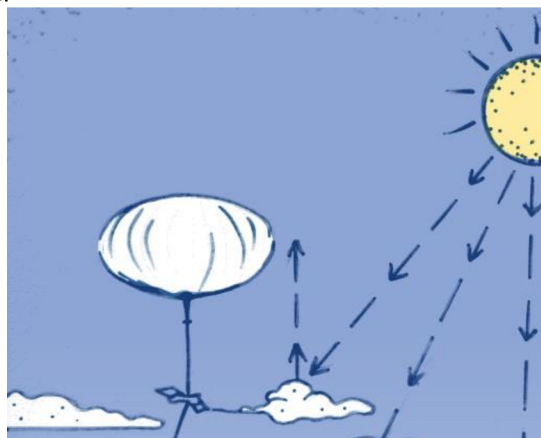


Obr. 16 Princip SAI pomocí letadel [81]

Cena vývoje letadla, které by bylo schopné provést takovýto let, byla odhadnuta na 2,35 miliard USD s tím, že byla záměrně předimenzovaná kvůli častému překročení rozpočtů v leteckém průmyslu [80]. Cena za tunu materiálu se pohybuje v rozmezí 1000 až 1500 USD [79]. Navíc nesmíme zapomenout na náklady spjaté s výrobou oxidu siřičitého SO_2 , který bude třeba v poměrně velkém množství, pro snížení teploty o $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ je to 5 Mt SO_2 na rok [79].

4.2.1.2 Balóny

Bylo navrženo mnoho metod, jak by mohly být balóny v rámci SAI využity, ne všechny jsou v současné chvíli technicky dostupné, avšak díky meteorologickým balónům a výzkumům technologických gigantů, se výzkum posouvá kupředu [79]. Mohlo by se tak kromě letadel jednat o další slibnou metodu.



Obr. 17 Princip SAI s využitím stratosférických balónů [82]

Balóny mohou být buďto volně vypuštěné do stratosféry nebo připevněny k zemskému povrchu. V prvním případě je velkým problémem znečištění. Jak bylo uvedeno v textu [83] stratosférické balóny by musely být kvůli nepříznivým teplotním podmínkám vyráběny z plastu. Pokud se plyn umístí přímo do balónu, který by ve stratosféře explodoval, aby mohl být plyn uvolněn, planeta by byla zahlcena dalšími 100 000 000 kg plastového odpadu, který by po explozi dopadl na Zem [83]. Jako zvedací plyn by byl pravděpodobně využit vodík, který by navíc znečistil stratosféru [79]. V případě balónů připevněných k zemi by bylo třeba zkonstruovat alespoň 20kilometrové potrubí, kterým by se vytlačil plyn do stratosféry. Balón by v tomto případě sloužil jako podpěra pro potrubí. Problémem je právě konstrukce potrubí,

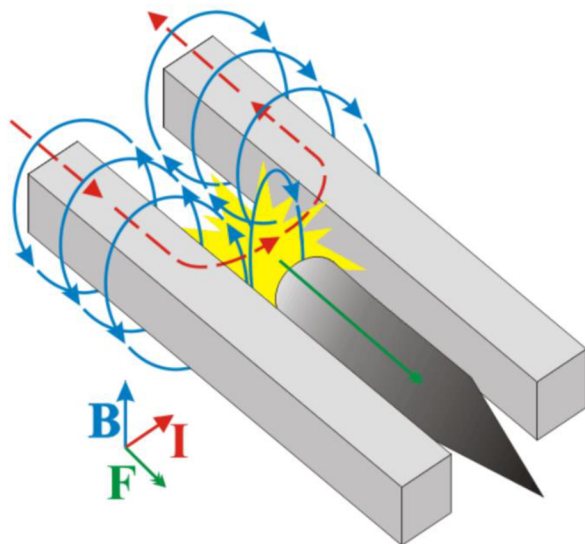
které musí být z velmi odolného materiálu a vydržet extrémní podmínky. Podrobně se tímto problémem zabývá projekt SPICE, ten ale zatím nepřinesl uspokojivé řešení [79].

4.2.1.3 Zbraně

Zbraně jsou další navrhovanou metodou pro přepravu aerosolů do stratosféry. V porovnání s ostatními metodami jsou považovány za nejdražší metodu, záleží samozřejmě na typu zbraně, ale roční náklady by se mohly vyšplhat až k desítkám miliard USD [78]. Problém pro jejich využití spočívá v krátké dráze letu a zařízení pro přímou distribuci je technologicky velmi náročné [79]. Za zmínku stojí dva typy navrhovaných zbraní – Railgun a Coilgun.

- **Railgun**

Railgun neboli elektromagnetické dělo je zbraň, která využívá magnetické pole k odpalování projektilů umístěných mezi dvěma kolejnicemi [84]. Problémem je opotřebení jejich kolejnic, kterému nelze, alespoň zatím, nijak předejít [79].

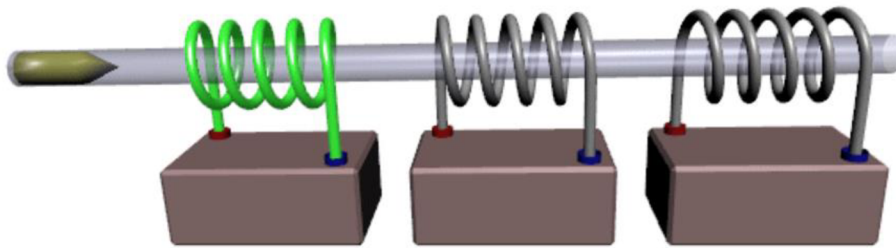


Základní princip kolejnicového elektromagnetického děla. Červeně je označen tekoucí proud I , modře magnetické pole B a zeleně působící síla F .

Obr. 18 Schéma fungování zbraně Railgun [85]

- **Coilgun**

Coilgun, někdy též označována jako Gaussova puška, funguje na stejném principu jako vlaky MAGLEV. To představuje velikou výhodu, jelikož se jedná o dnes již ozkoušený systém, přesto, pokud by se uvažovalo nad využitím Coilguns v rámci geoinženýrství, je nezbytné provést rozsáhlé úpravy [79].



Obr. 19 Schéma fungování zbraně Coilgun [86]

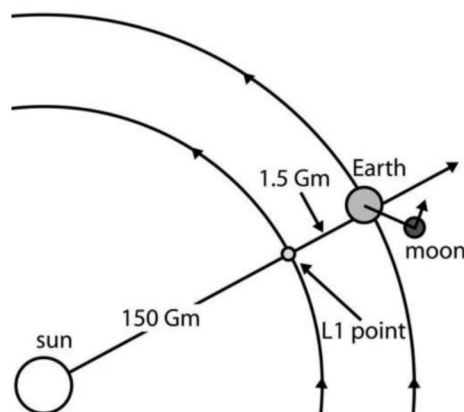
4.2.1.4 Vysoké věže

Principiálně se jedná o jednoduchou metodu založenou na postavení několikakilometrových věží, které by injektovaly plyn do stratosféry. Postavení dvaceti kilometrové věže, se může zdát nereálné, avšak z materiálového hlediska by taková konstrukce nepředstavovala velký problém, i z obyčejného hliníku je možné postavit věž vysokou až 15 km [78]. Při využití karbonu nebo epoxidu dokonce výšek přes 100 km [78]. Problém, který zde vzniká, není stavebního charakteru, ale termodynamického. Pokud bychom čerpali plyn do takových výšek, ochladí se na tolik, že značně zamrzat [36]. Plyn by tak bylo třeba ve vysokých výškách zahřívat a z energetického finančního a časového pohledu by se jednalo o velmi náročný proces [78] [79].

4.2.2 Vesmírná zrcadla (Space Mirrors – SM)

Koncept vesmírných zrcadel je v současné době spíše jen teoretický, i přesto bylo provedeno několik studií, které potenciál této metody zkoumaly poměrně podrobně, vše ovšem pouze v teoretickém rozsahu. Prvotní myšlenka konceptu vesmírného zrcadla se datuje do minulého století. Jako příklad lze uvést tzv. Earlyův štít navržený koncem 80. let 20. století. V té době to však byl z technického hlediska naprosto nereálný koncept [87].

Odhaduje se, že pokud by se podařilo odvrátit 1,8 % slunečního záření, vyrovnal by se tak oteplovací účinek antropogenních emisí (ve srovnání s předindustriálními hodnotami). Téměř jedinou zodpovězenou otázkou této metody je umístění zrcadel. Jako vhodná lokalita byl označen tzv. Lagrangeův bod vzdálený více než 1,5 milionu km od planety Země [74].



Obr.20 Pozice Lagrangeova bodu (L1) mezi Zemí a Sluncem [74]

Vzdálenost, do které by byla tato zrcadla umístěna, hraje významnou roli. Čím blíže ke Slunci, tím větší musí štít být. Pro představu – pokud bychom umístili zrcadla do vzdálenosti 1,5 milionu km, plocha takového zrcadla by musela být cca 3,4 miliony km², pro dvojnásobnou vzdálenost dokonce 9,4 milionů km². Navíc výsledná vzdálenost také významně ovlivňuje účinnost samotného blokování [74].

Pro vzdálenost 1,5 milionu km by se účinnost pohybovala kolem 68 %, pro 3 miliony km účinnost významně klesá na 25 % [74]. Problémem vesmírných zrcadel a jiných clon je především jejich hmotnost, její redukce by tak měla být prioritou budoucího vývoje [74].

Bylo diskutováno mnoho materiálů, které by mohly být využity, jako příklad lze uvést železný meteorit, v takovém případě by ale hmotnost dosahovala desítek až stovek milionů tun. Naopak za nejllehčí materiál, ze kterého by mohla být clona vyrobena, je považován průhledný film s malými otvory. Takový film je třeba opatřit ochranným povlakem. Za vhodný povlak je považován nitrid křemíku díky svým fyzikálním vlastnostem. Pokud bychom uvažovali takovýto koncept clony, musela by být umístěna ve vzdálenosti 1,85 milionů km od Země, výsledná hmotnost by byla kolem 20 milionů tun a plocha o velikosti 6,5 milionu km² [74].

Dalším nevyřešeným problémem je nákladnost dopravy. Často se hovoří o využití elektromagnetického odpalování raket s iontovým pohonem jako o nejpříjemnějším řešení. Teoreticky by se mohlo dosáhnout cen kolem 50 USD/kg materiálu [74].

Současně není jasné, jak by byla vesmírná zrcadla provedena. V současné době se hovoří o dvou možných provedeních. Tou první je umístění desetitisíců speciálních zrcadel z drátěného pletiva na oběžnou dráhu, tou druhou je umístění biliónů malých zrcadel o průměru několika centimetrů. Přesto se jedná spíše o teoretické úvahy a rizika spjatá s konceptem vesmírných zrcadel nejsou dostatečně prozkoumaná [69].

Vše je v současné chvíli založeno pouze na teorii a lze předpokládat, že celkové náklady aplikace by byly obrovské. Navíc technologie, které by bylo možné k něčemu takovému využít, v podstatě neexistují. Jistou nadějí mohou představovat soukromé společnosti investující nemalé peníze do vývoje raket a vesmírných letů, i tak se ale zatím nezdá, že by se o technologii vesmírných zrcadel dalo hovořit jako o realistickém plánu.

4.2.3 Bělení mraků (Marine Cloud Brightening – MCB)

Podstatou je zvýšit odrazivost slunečního záření mraků nad oceány [69]. Toho lze dosáhnout zvýšením množství kapek, které daný mrak tvoří [88]. K tomu by se využila mořská voda, která by se rozprašovala do okolí, kde by došlo k vytvoření krystalů solí, díky kterým by vznikl bělejší mrak [69]. Jednalo by se o tzv. stratocumulusové mraky, které pokrývají asi 20 % zemského povrchu [69]. Jsou to nízko položené mraky, které bychom našli ve výškách 360 metrů a výš [89].

V současné chvíli je problémem absence systému, který by byl schopný zajistit dlouhodobou injektáž a který by nebyl ovlivněn nepříznivými podmínkami, jako je například špatné počasí [90].



Obr 21 Návrh systému pro injektáž MCB [91]

Výhodou je možnost využití na regionální úrovni. Toho by se dalo například využít za účelem snížení tání ledovců aplikací v polárních oblastech. Tento efekt byl potvrzen v provedené studii, kdy skutečně došlo k nárůstu ledové pokrývky a zvýšení přirozeného albeda Země. Dalším pozitivním efektem by mohlo být zeslabení tropických cyklónů, jelikož by chladnější oceány nemohly dodat dostatečné množství energie pro jejich tvorbu. Z provedených výzkumů dále vyplývá, že MCB by mohlo zastavit bělení korálů díky snížení teplot oceánů [88].

Provedené studie indikují negativní dopad na množství srážek. Proto se dlouhodobé využití na globální úrovni jeví jako nebezpečné, především v suchozemských oblastech, které se již nyní potýkají s obdobími dlouhodobého sucha [88].

Další výhodou v porovnání s ostatními metodami lze spatřit v tom, že se nejedná o dlouhotrvající efekt a v případě jakýchkoliv nežádoucích účinků lze aplikaci zastavit [69]. Vše se ovšem opírá o předběžné studie a k vytvoření závěru a indikaci všech účinků MCB, ať už kladných či záporných, není v současné chvíli dostatek podkladů.

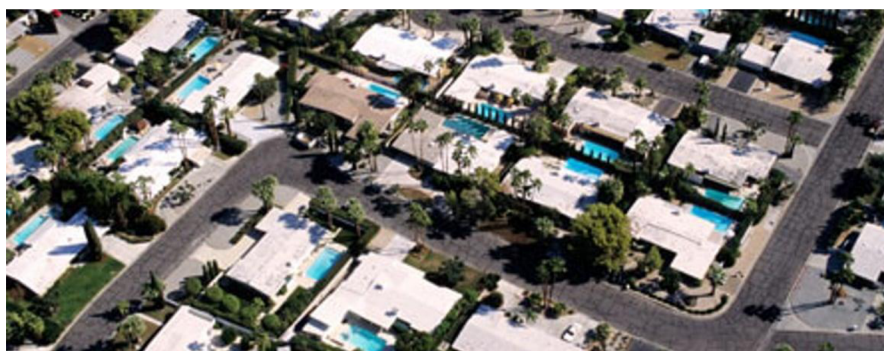
4.2.4 Zvyšování pozemského albeda

Poslední technologií spadající pod geoinženýrství, která zde bude zmíněna, je zvyšování pozemského albeda. Stejně jako ostatní metody SRM neřeší problém odstraňování CO₂ z atmosféry, pouze snižuje jeho následky. Pojem albedo, které zmíněno v názvu, označuje schopnost tělesa odrazit sluneční záření [92]. V rámci geoinženýrství bylo spolu se zvyšováním albeda městských částí navrženo také zvýšení albeda pouštních oblastí či výsadba specifických druhů plodin [93].

V porovnání s ostatními metodami se sice nejedná o metodu tak účinnou, avšak je to metoda snadno proveditelná a technologicky dostupná [93]. Mohla by tak hrát důležitou roli v řešení klimatické krize, kdy by mohla podporovat rozsáhlejší a invazivnější technologie, jelikož řešení klimatické změny nemůže být postaveno na jediné metodě.

Zvyšování městského albeda

V městských oblastech se jedná především o zastavěné plochy v hustě osídlených oblastech, tedy střechy domů, chodníky či vozovky. Ke zvýšení albeda by stačilo při výstavbě využívat jiné, dnes dostupné materiály s vyšší reflexivitou. Zvyšovat městské albedo se zdá jako nejméně invazivní řešení, které by především v letních měsících zlepšilo tepelnou pohodu prostředí [93]. K pokrytí střech lze využít například gumovou membránu z ethylen-propylen-dienového monomeru, membránu z termoplastického polyolefinu či asfaltovou membránu s bílou elastomerní akrylovou barvou [92]. Náklady na instalaci střešních membrán se odvíjí od typu a plochy střechy, většinou se ale pohybují mezi 15 – 50 USD za stopu čtvereční [92].



Obr. 22 Využití bílého pokrytí střech za účelem zvýšením městského albeda USA [94]

Pěstování specifických druhů plodin

Obecně jsou rostliny samy o sobě schopny část slunečního záření odrážet, avšak každá s jinou účinností. Jestliže je cílem navýšit albedo zemských plodin, je třeba zaměřit se na ty, které zajišťují nejvyšší reflektivitu záření [93]. Otázkou zůstává, jak moc je tato metoda reálně využitelná, jelikož nelze začít vysazovat pouze rostliny s vysokou reflektivitou, jistě by tak došlo k narušení místních ekosystémů.

Pouštní albedo

Pro zvýšení albeda pouští je třeba jejich pokrytí reflexním materiálem. V porovnání s předchozími dvěma metodami se jedná o nákladnou a technologicky náročnou metodu, současně je to ale i nejefektivnější metoda. Účinnost s jakou by bylo sluneční záření reflektováno se odvíjí od plochy, která by byla využita [93].

Reálný potenciál při plném využití těchto metod byl zkoumán na základě simulací, které utváří představu o případném efektu. Míra chlazení je závislá na místě použití a také ročním období. Za předpokladu, že se budou emise CO₂ v atmosféře dále navyšovat, bylo potenciální ochlazení zemské teploty odhadnuto na 0,11 °C pro městské oblasti, 0,23 °C pro plodiny a 1,12 °C pro pouště [93]. Vše ovšem závisí na tom, jak jsou nastaveny podmínky studie. I přesto, že mají pouště poměrně veliký potenciál, jejich reálné využití pro tento účel je nejasný. Navíc by negativně ovlivnily srážkové úhrny těchto oblastí, které již nyní trpí nadměrným suchem [93].

5 Ostatní skleníkové plyny

Potřeba odstranit i jiné skleníkové plyny vyplývá z toho, že i při odstranění veškerých antropogenních emisí CO₂ nebude efekt dostatečný, jelikož dojde k uvolnění CO₂ z oceánů [97]. Výzkum technologií odstraňující jiné skleníkové plyny, než je CO₂, je v současné chvíli v počátcích. Díky vyšší účinnosti, které vykazují ostatní skleníkové plyny v porovnání s CO₂, by se v budoucnu mohlo jednat o důležitou součást strategie v boji s klimatickou změnou.

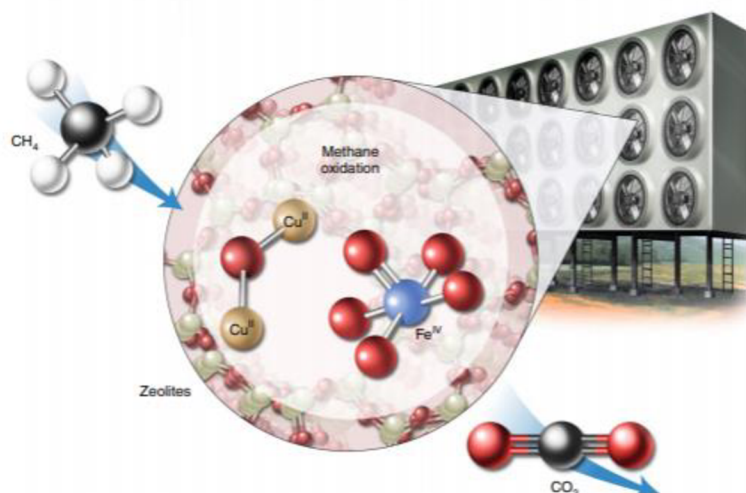
5.1 Odstranění metanu ze zemské atmosféry

K tomu, aby se významně snížil obsah metanových částic v atmosféře, není třeba odstraňovat tak masivní množství, jako je tomu u CO₂. Jak už bylo zmíněno výše, metan zůstává v atmosféře výrazně kratší dobu, takže se ho z dlouhodobého hlediska nenastřádá tolik. Stačilo by tak odstranit 3,2 – 5,3 Gt CH₄ z atmosféry, abychom se vrátili k předindustriálním hodnotám (750 ppb) [20].

Metody přímého odstraňování metanu z atmosféry jsou téměř neprozkoumané. V souvislosti s metanem se totiž většinou hovoří o tom, jak vypouštění předcházet, například snížením produkce hovězího masa. Přímé odstranění tak nebylo zatím v praxi nikdy odzkoušeno a studie, která se tomuto tématu hlouběji věnovala, je zatím pouze teoretická [20]. Metoda, která byla poprvé představena roku 2019 spočívá v přeměně metanu CH₄ na oxid uhličitý CO₂ za využití katalyzátorů. Problémem je, že se při této chemické reakci vytvoří více než dvojnásobné množství CO₂, které by vzhledem k celosvětovému úsilí o snižování těchto emisí bylo vhodné odstranit [20]. Řešením by tak mohl být souběžný vývoj a implementace s technologií DACC, aby mohl být nově vzniklý CO₂ ihned zachycen. Navíc samostatné využití této technologie, by mohlo oddálit snahy o omezení fosilních paliv a celkového vývoje technologií odstraňující emise CO₂. Sice by docházelo ke snižování globální teploty, ale zemská atmosféra by byla zahlcena větším množstvím emisí CO₂, což z dlouhodobého hlediska není dobře.

Bylo navrženo, aby se k odstranění využily, podobně jako u metody DACC, ventilátory. V komorách ventilátorů by byly umístěny katalyzátory zachycující metan. Za přítomnosti kyslíku by se katalyzátory zahřály a následně uvolnily CO₂ do atmosféry [20].

K samotnému zachycení by mohly být použity nanoporézní zeolity. V minulosti proběhlo několik výzkumů zaměřených na oxidaci zeolitu s metanem, při kterých se ale nejednalo o tvorbu CO₂, ale o tvorbu metanolu CH₃OH, ten je ale třeba ze zeolitu extrahovat, jednalo by se tak o energeticky náročnější proces [20]. Kromě zeolitů by se mohly teoreticky využít i porézní organické polymery, ve kterých by mohl být metan skladován. Ostatní materiály, které byly v rámci různých studií navrženy, nevykazovaly dostatečnou selektivitu [20].



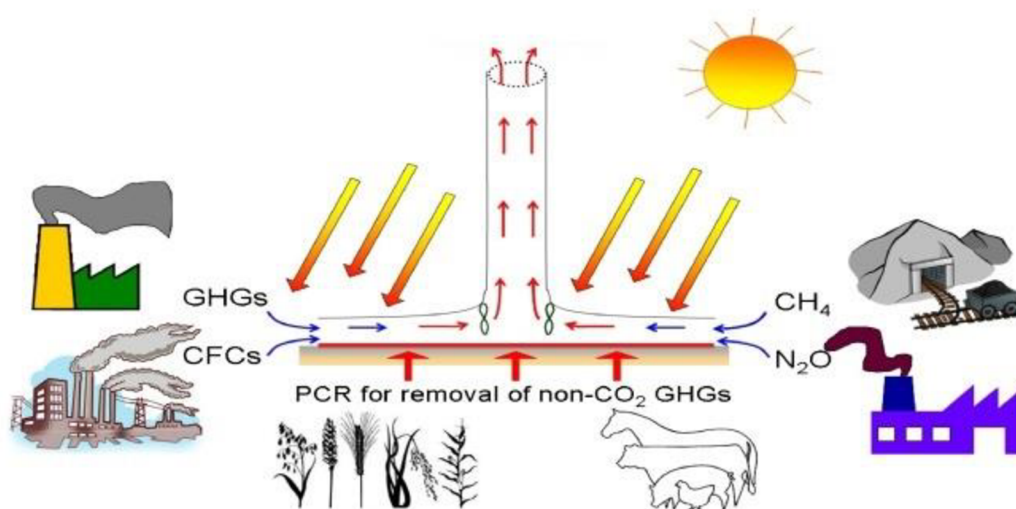
Obr. 23 Technologie zachycení atmosférického metanu pomocí ventilátorů [20]

Pravděpodobně by se jednalo o nákladnější metodu, než je DACC, avšak stanovit přesné náklady je v současné chvíli nereálné [20].

5.2 Technologie solárních komínových elektráren ve spojení s fotokatalytickými reaktory (Solar Chimney Power Plant with Photocatalytic Reactors – SCPP-PCR)

Možnost využití zachycených skleníkových plynů jako vstupní suroviny pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů, by jistě bylo nejlepším řešením. U oxidu uhličitého se jedná o technologii BECCS, pro metan a oxid dusný by takovým řešením mohla být technologie solárních komínových elektráren ve spojení s fotokatalytickými reaktory (SCPP-PCR) [95].

Solární komínová elektrárna (SCPP) se skládá z vysokého komínu, turbin a solárních kolektorů. Díky solárním kolektorům proudí horký vzduch k turbínám, které roztáčí a vytváří tak elektrickou energii. Ochlazený vzduch je poté odváděn komínem ven. Při kombinaci SCPP a fotokatalytických reaktorů (PCR) by se umístila vrstva fotokatalyzátoru na solární kolektor, který by zachytával skleníkové plyny a redukoval na méně škodlivé látky [95].



Obr. 24 Schéma technologie SCPP-PCR [95]

V druhé polovině 20. století byl ve Španělsku postaven pilotní závod SCPP, na kterém bylo prokázáno, že SCPP může být provozována nepřetržitě za předpokladu vhodného skladování

tepelné energie. Současně se projeví konstrukční nedostatky, na které je nutné se při vývoji více zaměřit jako je vývoj vhodných turbín [95].

Turbíny využívané v SCPP mají svá specifika. Jedná se o odlišný princip proudění, než jaký pozorujeme u větrných či vodních elektráren [96]. V již provedených experimentech byly často využívány upravené axiální turbíny. Důvod, proč je vývoj turbín vhodných pro využití v SCPP tak důležitý, je kromě zvýšení účinnosti výroby energie, především ekonomický. Je třeba navrhnout turbínu, která nebude nákladná na výrobu, jelikož se pravděpodobně nebude vyrábět v takovém rozsahu [96].

Odstranění skleníkových plynů by probíhalo pomocí fotokatalýzy. Metan by byl přeměněn na CO_2 a při fotokatalýze N_2O by se využilo principu redukce na dusík a kyslík. Byť se může zdát přeměna metanu na CO_2 nelogická, jelikož se tak vytvoří větší množství emisí CO_2 , má tato přeměna významný a pozitivní dopad na globální oteplování, díky vysoké účinnosti metanu jakožto skleníkového plynu [95]. I přesto se ale nejedná o ideální řešení, proto byla jako další možnost navržena přímá oxidace na metanol CH_3OH . Nevýhodou přeměn metanu je především energetická náročnost kvůli vysoké stabilitě vazeb [95].

Jaký typ fotokatalyzátoru použít, vždy závisí na konkrétních podmínkách. Veškeré návrhy se v současné chvíli většinou opírají o teoretické studie, je tak složité stanovit reálné účinky. Často zmiňovanými fotokatalyzátory jsou především oxidy kovů, přičemž největší potenciál má oxid titaničitý TiO_2 , který by se dal využít pro zachycení metanu i oxidu dusného [95]. Několik studií také prokázalo, že fotokatalytická redukce by mohla být úspěšně provedena za využití zeolitů v kombinaci s kovovými ionty, jako jsou ionty mědi, zlata anebo oxidy [97].

Využití fotokatalyzátorů přináší také výhody v možnosti regionálního, tudíž i méně nákladného a dostupnějšího, využití. Zemědělství je významným producentem N_2O a CH_4 , proto byl proveden experiment s využitím fotokatalytických nátěrů, které měly redukovat množství emisí v atmosféře. Výsledkem bylo snížení emisí N_2O v rozmezí 4–11 % [95]. I když se nejedná o vysoké hodnoty, klimatická změna je v současné chvíli naléhavý problém a jakékoliv snížení koncentrací skleníkových plynů v atmosféře je důležitým krokem vpřed k čistému ovzduší. Navíc pokud by došlo k implementaci na globální úrovni, množství odstraněných emisí by pravděpodobně mohlo dosáhnout významných hodnot.

Fotokatalyzátorové filmy by se daly využít i ve městech ke snížení emisí znečišťujících látek. Při aplikaci na fasády by byly schopné zachytávat NO_x z ovzduší, které se ve městech koncentrují především díky automobilové dopravě. Během provedených experimentů bylo prokázáno, že škála účinnosti je poměrně široká a závisí na podmínkách v daných lokalitách [59]. Účinnost se pohybovala v rozmezí 36,6 – 82 % [95].

Využití SCPP společně s PCR nebylo nikdy reálně provedeno. Velikou výhodou lze spatřit v tom, že nedochází ke spotřebování energie, jako je tomu například u DACC, ale k jejímu vytváření. To může být do budoucna finančně zajímavé a snížit tak investiční náklady. Navíc se nabízí možnost dalšího snížení nákladů při stavbě komína, pokud by se využil jeden ze dvou alternativních návrhů [95]. Prvním je komín složený z balónkových prstenců s héliem, druhým je postavení komínu souběžně s horou [95]. Rozsáhlé využití druhé metody nelze pravděpodobně očekávat kvůli omezením, která přináší. SCPP by byly limitovány svou polohou, avšak v konkrétních případech by se mohlo jednat o finanční úsporu. Odhadnout náklady jako takové je v současné fázi vývoje složité. U menších konstrukcí by se mohly pohybovat kolem 111 milionů EUR [95]. Avšak smysluplnější by mohlo být investovat do větších konstrukcí, jelikož by se z pohledu výroby energie jednalo o konkurenci schopné elektrárny [95]. Pro ně se odhady cen pohybuji v rozmezí 0,5 až 1 miliardy USD [97].

Potenciál technologie SCPP-PCR byl dle průtoku vzduchu, daným rozměrům SCPP (38 km^2 plocha solárních kolektorů, 200 MW) a současných koncentrací skleníkových plynů,

stanoven na 7900 tun CH₄/rok a 3900 tun N₂O/rok [95]. Současně by tak došlo k odstranění halogenových sloučenin v množství 42 tun/rok [95]. V porovnání s CO₂ se jedná o stejné hodnoty, jako kdyby bylo odstraněno přibližně 1,5 milionu tun CO₂/rok [95].

SCPP-PCR má velký potenciál a mohla by se stát významnou součástí energetického mixu. Investiční náklady budou sice nemalé, avšak následná údržba bude minimální, životnost by mohla přesáhnout jedno století a produkce elektrické energie představuje z finančního hlediska jistou návratnost vložených investic [95].

Tato technologie si jistě zaslouží větší pozornost. Mohlo by se totiž skutečně jednat o technologii, která je schopna udržet vzrůst globální teploty pod hranicí 2 °C a dosáhnout tak cílů Pařížské dohody, což by mohlo být možné při vybudování 10 000 SCPP-PCR [95]. To představuje snížení emisí skleníkových plynů ekvivalentních asi 16 Gt CO₂/rok [95]. Jedná se o optimistický scénář, který by za předpokladu, že bude současně probíhat dekarbonizace a odstraňování CO₂ z atmosféry i jinými metodami (například DAC), mohl být reálný. Navíc velkou výhodou lze spatřit v tom, že zachycené plyny není třeba nikde skladovat, jako je tomu u CO₂ [95].

6 Potenciál inženýrských metod odstranění skleníkových plynů z atmosféry

Poslední kapitola se bude zabývat shrnutím ekonomických a sekvestračních potenciálů, stejně tak výhodami a riziky spojenými s aplikacemi metod představených v této práci. Budou zde uvedeny pouze metody odstraňující skleníkové plyny z atmosféry, nikoli metody řízení slunečního záření (SRM), které pouze maskují dopady zvyšujících se koncentrací skleníkových plynů v atmosféře. Navíc není v tuto chvíli dostatek podkladů k tomu, aby se daly stanovit konkrétní náklady metod SRM.

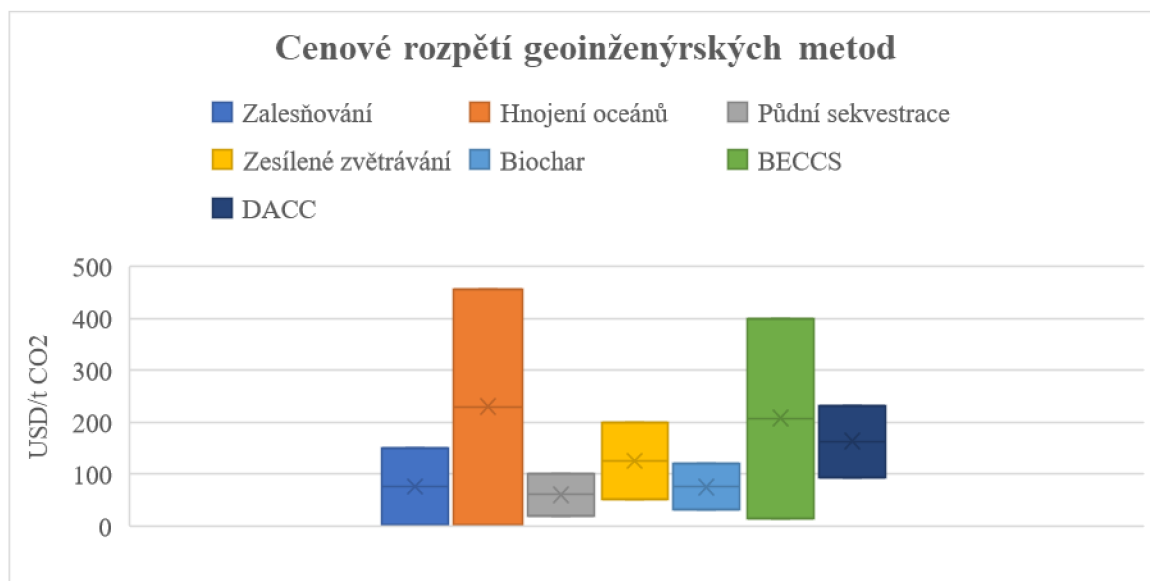
Nejprve budou porovnány především náklady spojené s aplikací těchto metod, poté jejich rizika.

6.1 Finanční náklady a sekvestrační potenciál

V následující tabulce jsou uvedeny odhady finančních nákladů a sekvestračních potenciálů navržených metod odstraňujících skleníkové plyny z atmosféry.

Tab. 3 Finanční náklady a sekvestrační potenciál metod odstranění skleníkových plynů z atmosféry

<i>Metody</i>	<i>Finanční náklady</i>	<i>Sekvestrační potenciál</i>	<i>Poznámky</i>
Zalesňování	2–150 USD/t CO ₂	3,53 Gt CO ₂ /rok 5,83 – 9,56 Gt CO ₂ /rok	<i>nízko potenciální odhad</i> <i>vysoko potenciální odhad</i>
Hnojení oceánů	2–457 USD/t CO ₂		
Půdní sekvestrace	20–100 USD/t CO ₂	0,4 – 0,8 Gt CO ₂ /rok	<i>v závislosti na typu půdy</i>
Zesílené zvětrávání	50–200 USD/t CO ₂	2–4 Gt CO ₂ /rok	
Biochar	30–120 USD/t CO ₂	200 Gt CO ₂	<i>do roku 2100</i>
BECCS	15–400 USD/t CO ₂	3,4 –5,2 Gt CO ₂ /rok	
DACC	94–232 USD/t CO ₂	1 Mt CO ₂ /rok	
Odstranění CH ₄			<i>v současné fázi nejsou podklady</i>
SCPP – PCR	0,5 – 1 miliarda USD	0,0000079 Gt CH ₄ /rok 0,0000039 Gt N ₂ O/rok	<i>cena za výstavbu</i>



Obr. 25 Graficky znázorněná cenová rozpětí metod geoinženýrství

Z této tabulky vyplývá, že metody odstraňující oxid uhličitý (CO₂) jsou více prozkoumané než metody odstraňující metan (CH₄) či oxid dusný (N₂O), proto k nim existují alespoň rozpětí odhadů finančních nákladů a sekvestačních potenciálů. I přesto je vidět, že převládá značná nejistota při reálných aplikacích, protože rozsah odhadů je poměrně široký.

V následujícím grafu jsou uvedena cenová rozpětí metod geoinženýrství, pro zbylé dva návrhy nelze v současné chvíli takovýto rozsah vytvořit, jelikož neexistují příslušné podklady. Nejedná se o přesně stanovené ceny, avšak ze všech zmíněných metod jsou tyto odhady ty nejpřesnější. Navíc se jedná o metody v rámci vědeckých studií nejvíce prozkoumané, tudíž se i jejich nasazení jeví v současné chvíli jako nejrealnější.

6.2 Rizika a přínosy aplikace jednotlivých metod

Kromě financí budou hrát klíčovou roli také rizika, případně přínosy, aplikací těchto metod. Pro případné developery a akcionáře budou hrát jistě finance tu nejvýznamnější roli, avšak na politické úrovni by to měla být především rizika spojená s aplikací jakékoliv ze zmíněných metod. I když není současný vývoj žádné z technologií tak daleko, aby bylo možné s naprostou jistotou stanovit veškerá potenciální rizika, existují odhady založené na teoretických studiích či terénních experimentech, které udávají alespoň částečnou představu o dopadech těchto aplikací.

V tabulce vytvořené na následující straně jsou uvedena hlavní rizika a přínosy jednotlivých metod.

Tab. 4 Výhody a nevýhody metod odstranění skleníkových plynů z atmosféry

Metody	Přínosy	Rizika
Zalesňování	technologicky dostupné oživení biodiverzity	stále častější období sucha zvyšují rizika lesních požárů a rozvoj chorob a škůdců ohrožení dostupnosti potravin
Hnojení oceánů		narušení mořského ekosystému neznámý potenciál
Půdní sekvestrace	zvýšení kvality půd neomezí dostupnost potravin	časově omezené
Zesílené zvětrávání	zvýšení kvality půd chudých na živiny	neznámý dopad na biochemický cyklus půd
Biochar	zabraňuje uvolňování ostatních skleníkových plynů	pravděpodobně není aplikace vhodná ve všech klimatických pásmech
BECCS	zisk energie technologie schopná dosáhnout cílů pařížské dohody	ohrožení dostupnosti potravin technologické překážky
DACC	první komerční projekt technologie schopná dosáhnout cílů pařížské dohody nižší potřeba využití jiných technologií	energeticky a finančně náročné
Odstranění CH ₄	není nutné odstranit tak velké množství CH ₄ k dosažení požadovaného efektu	negativně ovlivní koncentraci CO ₂ v atmosféře nedostatek podkladů
SCPP – PCR	obnovitelný zdroj energie	nedostatek podkladů

Z tohoto souhrnu lze usoudit, že v současné chvíli neexistuje metoda, která by s sebou nepřinášela žádná rizika při plošné aplikaci. Je tedy nutné zvážit všechna pro a proti a vybrat takové metody, které přinášejí riziko nejmenší. Jistě by se dala rizika snížit, pokud by došlo k aplikacím menších objemů za využití více metod. V takovém případě by se naskytla otázka, zda by byly takové aplikace dostatečné pro řešení současné klimatické změny. U metod technického zaměření jsou překážkou často technologické nedostatky, finanční a energetická náročnost, díky čemuž se jejich vysokokapacitní aplikace jeví jako nereálná.

7 ZÁVĚR

V první části této bakalářské práce byly představeny metody geoinženýrství, hlouběji byl kladen důraz na vysvětlení technologie přímého zachycení uhlíku z okolního vzduchu (DAC), protože se jedná o metodu technologicky nejzajímavější. Navíc jako jediná z navržených metod bude během následujících několika let využita v komerčním měřítku. Kromě toho byly zmíněny i metody spíše biochemické povahy, které ovšem mohou hrát důležitou roli v boji proti klimatické změně, proto je nutné jejich uvedení. Kde to bylo možné, byly uvedeny potenciální náklady spojené s jejich aplikací, avšak v současné době neexistují dostatečné podklady pro stanovení přesných nákladů, rizik, ani skutečného přínosu.

Následná část byla věnována technologickým metodám, které neodstraňují skleníkové plyny z atmosféry, ale pouze „maskují“ jejich dopady, jednalo se o metody řízeného slunečního záření (SRM). Jedná se o přístupy, které nejsou v současné době dostatečně popsány a jejich aplikace není technologicky možná. Stejně tak neexistuje dostatek podkladů pro stanovení finančních nákladů jak pro výstavbu zařízení, tak pro jejich provoz.

Kromě odstranění oxidu uhličitého z atmosféry se v rámci řešení klimatické změny začalo hovořit o odstranění jiných skleníkových plynů, konkrétně se jedná o metan a oxid dusný. Této problematice byla věnována třetí část této bakalářské práce a byly zde představeny dvě technologie. První se zabývala odstraněním metanu na podobném principu, kterého je využito v technologii DAC. Jedná se o poměrně novou myšlenku, která byla představena poprvé na konci loňského roku, tudíž neexistuje mnoho podkladů, které by poskytly dostatek informací.

Druhou technologií bylo využití solárních komínových elektráren ve spojení s fotokatalytickými reaktory (SCPP – PCR). I když se obecně nevěnuje v literatuře SCPP – PCR taková pozornost, jako například metodám odstraňujícím CO₂, z momentálně dostupných zdrojů vyplývá, že by se mohlo jednat o technologii, která může významně přispět k dosažení cílů Pařížské dohody, a navíc je schopna posloužit jako obnovitelný zdroj energie, který nevyžaduje velké množství vstupní energie, navíc není nutné odstranit tolik metanu, případně oxidu dusného, aby byl efekt stejný, jako při odstranění velkého množství CO₂.

Poslední část této práce patřila posouzení finančních nákladů, sekvestračních potenciálů a rizik spojených s využitím těchto technologií. Vzhledem k dostupnosti podkladů byla největší pozornost věnována geoinženýrským metodám. Z uvedených dat vyplývá, že neexistuje metoda bez rizik a ani taková, u které by bylo možné jasně určit přínos a náklady. Jediná technologie bude v průběhu několika let poprvé komerčně využita, a to sice technologie DAC, díky které budeme mít konkrétnější představu o přínosu či případných nedostatcích.

Dle dostupnosti informací lze usoudit, že výzkum je nejvíce zaměřen na metody eliminující oxid uhličitý. Ostatní metody jsou poměrně, co se výzkumu týče, upozaděné. V současné chvíli neexistuje technologie, která by byla schopna dosáhnout cílů Pařížské dohody, nejen proto by měla zůstat dekarbonizace prioritní. Je nutné si uvědomit, že samotná dekarbonizace náš problém neřeší, z atmosféry je nutné navíc odstranit nemalou část skleníkových plynů. Podstatné jsou také investice do hlubšího a rychlejšího výzkumu těchto metod, současně musí probíhat i rozvoj obnovitelných zdrojů energií, aby bylo možné provést co nejrozsáhlejší dekarbonizaci. Spotřeba energií bude s největší pravděpodobností stoupat, proto se jako optimální nabízí taková řešení, která jsou schopna energii produkovat, nikoliv spotřebovávat. Jako příklad lze uvést již zmíněnou technologii SCPP – PCR, která slouží jako obnovitelný zdroj energie a současně eliminuje skleníkové plyny. Díky odvětvím, u kterých nebude možná úplná dekarbonizace, by se jistě měla zvážet i komerční aplikace DAC, která by mohla částečně vyrovnat jejich uhlíkovou stopu, avšak její energetická náročnost představuje jistou překážku. U metod biochemického rázu je častým problémem ohrožení dostupnosti půd, a tak se jejich aplikace nejeví ve velkém měřítku jako reálná, avšak jako jakési

„podpůrné“ mechanismy by se jistě daly využít, jelikož řešení klimatické změny nemůže stát na jedné jediné technologii. Mohlo by se jednat například o půdní sekvestraci či aplikaci biocharu, který by eliminoval více skleníkových plynů. Již zmíněná technologie SCPP – PCR, jelikož nepotřebuje zdroj energie a sama jako zdroj slouží. Pokud ovšem nebude vyvíjeno větší úsilí najít smysluplné řešení, je možné, že budeme nuceni využít i metody SRM, která přináší ještě větší nejistoty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] REMEKOVÁ, Valentína. Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody aplikovatelné v místě zdrojů skleníkových plynů [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-16].
Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132487>
- [2] NASA. *Global warming vs climate change* [online]. [cit.2021-04-19].
Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/>
- [3] NASA. *Evidence* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- [4] NASA. *Arctic sea ice* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/>
- [5] United Nations Climate Change. *The Paris Agreement* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://unfccc.int/the-paris-agreement>
- [6] Australian government. *Greenhouse effect* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://www.environment.gov.au/greenhouse-effect>
- [7] NASA. *The causes of climate change* [online]. [cit.2021-03-2020].
Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/causes/>
- [8] KQED. *Water vapor's role in climate change* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://www.kqed.org/quest/73100/water-vapors-role-in-climate-change>
- [9] NOAA. *Water vapor in upper atmosphere amplifies global warming says new study* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://research.noaa.gov/article/Water-vapor-in-the-upper-atmosphere>
- [10] NASA. *Water vapor confirmed as major player in climate change* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/earth/features/vapor_warming.html
- [11] EPA. *Overview of greenhouse gases* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [12] NASA. *The atmosphere: Getting a handle on carbon dioxide* [online]. [cit.2021-03-20]. Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>
- [13] The world counts. *Tons of CO₂ emitted into the atmosphere* [online]. [cit.2021-03-20].
Dostupné z: <https://www.theworldcounts.com/global-co2-emissions/story>
- [14] Klimatická změna. *Průvodce změnou klimatu – 4. kapitola: Uhlíkový cyklus* [online]. [cit.2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/pruvodce-zmenou-klimatu/>

- [15] NASA. *Carbon dioxide* [online]. [cit.2021-03-18].
Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- [16] Our world in data. *Atmospheric concentrations* [online]. [cit.2021-03-25].
Dostupné z: <https://ourworldindata.org/atmospheric-concentrations>
- [17] IEA. *Methane tracker 2020* [online]. [cit.2021-03-25].
Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>
- [18] NOAA. *Trends in CH₄* [online]. [cit.2021-04-05].
Dostupné z: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/
- [19] European Commission. *Nitrous oxide could be removed from the atmosphere with Simultaneous generation of renewable energy* [online]. [cit.2021-03-29].
Dostupné z: https://ec.europa.eu/nitrous_oxide_removed
- [20] Standford University. *Methane removal and atmospheric restoration* [online]. [cit.2021-04-24]. Dostupné z: <https://jacksonlab.stanford.edu>
- [21] MING, Tingzhen, Renaud DE_RICHTER, Sheng SHEN a Sylvain CAILLOL. Fighting global warming by greenhouse gas removal: destroying atmospheric nitrous oxide thanks to synergies between two breakthrough technologies. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2016, 23(7), 6119-6138 [cit. 2021-4-30]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-6103-9
- [22] United Nations Climate Change. *What is the United Nations Framework Convention On Climate Change* [online]. [cit.2021-04-11].
Dostupné z: <https://unfccc.int/convention-on-climate-change>
- [23] RUSSELL, Lynn M., Philip J. RASCH, Georgina M. MACE, et al. Ecosystem Impacts Of Geoengineering: A Review for Developing a Science Plan. *AMBIO* [online]. 2012, 41(4), 350-369 [cit. 2021-5-6]. ISSN 0044-7447.
Dostupné z: doi:10.1007/s13280-012-0258-5
- [24] SHEPHERD, J. G. Geoengineering the climate: an overview and update. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2012, 370(1974), 4166-4175 [cit. 2021-5-6]. ISSN 1364-503X.
Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2012.0186
- [25] FARAN, Turaj S. a Lennart OLSSON. Geoengineering: neither economical, nor ethical —a risk reward nexus analysis of carbon dioxide removal. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* [online]. 2018, 18(1), 63-77 [cit. 2021-5-6]. ISSN 1567-9764. Dostupné z: doi:10.1007/s10784-017-9383-8.
- [26] FUSS, Sabine, William FLAMB, Max W CALLAGHAN, et al. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* [online]. 2018, 13(6) [cit. 2021-5-6]. ISSN 1748-9326.
Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/aabf9f

- [27] BONAN, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* [online]. 2008, 320(5882), 1444-1449 [cit. 2021-5-6]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1155121
- [28] Klimatická změna. *Aktuální vývoj* [online]. [cit.2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/cs/aktualni-vyvoj/>
- [29] Mongabay. *Off the chart* [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://mongabay.com/off-the-chart-co2-from-california-fires>
- [30] Greenbiz. *New data allows scientists accurately measure carbon flux forests* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.greenbiz.com/article/new-data-allows-scientists-accurately-measure-carbon-flux-forests>
- [31] Aaron Strong et al., “Ocean fertilization: time to move on,” *Nature*, Vol. 461, 2009. See also Secretariat of the CBD, “Scientific Synthesis of the Impacts of Ocean Fertilization on Marine Biodiversity,” Montreal, Technical Series No. 45
- [32] Earth Labs. *Part A: Down to deep* [online]. [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/6a.html>
- [33] Britannica. *Ocean Fertilization* [online]. [cit.2021-02-19.] Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/ocean-fertilization>
- [34] LAMPITT, R.S, E.P ACHTERBERG, T.R ANDERSON, et al. Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2008, 366(1882), 3919-3945 [cit. 2021-5-6]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2008.0139
- [35] YANG, Yi, David TILMAN, George FUREY a Clarence LEHMAN. Soil carbon Sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications* [online]. 2019, 10(1) [cit. 2021-5-6]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-019-08636-w
- [36] *Nature*. *Soil carbon storage* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z : <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-carbon-storage-84223790/>
- [37] TAYLOR, Lyla L., David J. BEERLING, Shaun QUEGAN a Steven A. BANWART. Simulating carbon capture by enhanced weathering with croplands: an overview of key processes highlighting areas of future model development. *Biology Letters* [online]. 2017, 13(4) [cit. 2021-5-6]. ISSN 1744-9561. Dostupné z: doi:10.1098/rsbl.2016.0868
- [38] HARTMANN, Jens, A. Joshua WEST, Phil RENFORTH, Peter KÖHLER, Christina L. DE LA ROCHA, Dieter A. WOLF-GLADROW, Hans H. DÜRR a Jürgen SCHEFFRAN. Enhanced chemical Weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean

- acidification. *Reviews of Geophysics* [online]. 2013, 51(2), 113-149 [cit. 2021-5-6]. ISSN 87551209. Dostupné z: doi:10.1002/rog.20004
- [39] MEYSMAN, Filip J. R. a Francesc MONTSERRAT. Negative CO₂ emissions via enhanced silicate weathering in coastal environments. *Biology Letters* [online]. 2017, 13(4) [cit. 2021-5-6]. ISSN 1744-9561. Dostupné z: doi:10.1098/rsbl.2016.0905
- [40] Regeneration International. *What is biochar* [online]. [cit.2021-03-06]. Dostupné z: <https://regenerationinternational.org/2018/05/16/what-is-biochar/>
- [41] LAWRENCE, Mark G., Stefan SCHÄFER, Helene MURI, et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications* [online]. 2018, 9(1) [cit. 2021-5-6]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-018-05938-3
- [42] JEFFERY, Simon, T. Martijn BEZEMER, Gerard CORNELISSEN, et al. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenergy* [online]. 2015, 7(1), 1-13 [cit. 2021-5-6]. ISSN 17571693. Dostupné z: doi:10.1111/gcbb.12132
- [43] Avello Bioenergy. *Biochar* [online]. [cit.2021-03-06]. Dostupné z: <http://www.avellobioenergy.com/en/products/biochar/>
- [44] Jeffery, S., D. Abalos, M. Prodana, A. C. Bastos, J. W. van Groenigen, B. A. Hungate & F. Verheijen (2017) Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12.
- [45] BUI, Mai, Claire S. ADJIMAN, André BARDOW, et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science* [online]. 2018, 11(5), 1062-1176 [cit. 2021-5-6]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C7EE02342A
- [46] Global CCS institute. *Bioenergy Carbon Capture and Storage* [online]. [cit.2021-03-27]. Dostupné z: https://www.globalccsinstitute.com/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf
- [47] Global CCS institute. *What is CCS* [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/>
- [48] Energy.gov. *Bioenergy basics* [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-basics>
- [49] Energy.gov. *Biofuels basics* [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuels-basics>
- [50] Alternative Fuels Data Center. *Ethanol fuel basics* [online]. [cit. 2021-02-15.] Dostupné z: https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol_fuel_basics.html
- [51] Energy.gov. *Biopower basics* [online]. [cit.2021-02-15.] Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biopower-basics>

- [52] American University Washington. *What is BECCS* [online]. [cit.2021-05-01].
Dostupné z: <https://www.american.edu/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage-beccs>
- [53] GAMBHIR, Ajay a Massimo TAVONI. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth* [online]. 2019, 1(4), 405-409 [cit. 2021-5-6]. ISSN 25903322. Dostupné z: doi: 10.1016/j.oneear.2019.11.006
- [54] BREYER, Christian, Mahdi FASIHI, Cyril BAJAMUNDI a Felix CREUTZIG. Direct Air Capture of CO₂: A Key Technology for Ambitious Climate Change Mitigation. *Joule* [online]. 2019, 3(9), 2053-2057 [cit. 2021-5-6]. ISSN 25424351. Dostupné z: doi: 10.1016/j.joule.2019.08.010
- [55] FASIHI, Mahdi, Olga EFIMOVA a Christian BREYER. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, 224, 957-980 [cit. 2021-4-30]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- [56] CHATTERJEE, Sudipta a Kuo-Wei HUANG. Unrealistic energy and materials requirement for direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature Communications* [online]. 2020, 11(1) [cit. 2021-5-6]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-020-17203-7
- [57] International Energy Agency. *Direct Air Capture* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- [58] Carbon Engineering. *News and Update* [online]. [cit.2021-03-25]. Dostupné z: <https://carbonengineering.com/news-updates/>
- [59] KEITH, David W., Geoffrey HOLMES, David ST. ANGELO a Kenton HEIDEL. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule* [online]. 2018, 2(8), 1573-1594 [cit. 2021-4-30]. ISSN 25424351. Dostupné z: doi:10.1016/j.joule.2018.05.006
- [60] Carbon Engineering. *Our Technology* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://carbonengineering.com/our-technology>
- [61] Crystalactor. *How does it work* [online]. [cit.2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.royalhaskoningdhv.com/en/crystalactor/about-crystalactor/how-does-it-work>
- [62] TechnipFMC. *Dorr-Oliver FluoSolids Systems* [online]. [cit.2021-03-28]. Dostupné z: https://www.technipfmc.com/media/ygld5b2a/oo015-brochure_dorr-oliver_repro.pdf
- [63] Water online. *Lime slaker system* [online]. [cit.2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.wateronline.com/doc/lime-slaker-systems-0001>
- [64] Carbon Engineering. *Air to fuels* [online]. [cit.2021-04-02]. Dostupné z: <https://carbonengineering.com/air-to-fuels>

- [65] Youtube. *Carbon Engineering* [online]. [cit.2021-05.01].
Video dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VtOhPEU8CrA>
- [66] Greencar reports. Gas, Electricity, Hydrogen: *How many cars can fuel and what will it costs* [online]. [cit.2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.greencarreports.com/gas-electricity-hydrogen>
- [67] Our world in data. *Energy mix* [online]. [cit.2021-05-01].
Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [68] Carbfix. *How It Works* [online]. [cit. 2021-03-02].
Dostupné z: <https://www.carbfix.com/how-it-works>
- [69] MING, Tingzhen, Renaud DE_RICHTER, Wei LIU a Sylvain CAILLOL. Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 31, 792-834
[cit. 2021-5-6]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.12.032
- [70] KRAVITZ, Ben, Alan ROBOCK, Piers M. FORSTER, James M. HAYWOOD, Mark G. LAWRENCE a Hauke SCHMIDT. An overview of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2013, 118(23), 13,103-13,107 [cit. 2021-5-6].
ISSN 2169897X. Dostupné z: doi:10.1002/2013JD020569
- [71] MERCER, A M, D W KEITH a J D SHARP. Public understanding of solar radiation management. *Environmental Research Letters* [online]. 2011, 6(4) [cit. 2021-5-6].
ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/6/4/044006
- [72] Aerosol. *About aerosols* [online]. [cit.2021-03-13].
Dostupné z: <https://www.aerosol.org/about-aerosols/>
- [73] NASA. *Aerosols* [online]. [cit.2021-03-13].
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Aerosols.html>
- [74] ANGEL, R. Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2006, 103(46),
17184-17189 [cit. 2021-5-6]. ISSN 0027-8424. Dostupné z:
doi:10.1073/pnas.0608163103
- [75] Greenpeace. *Global SO₂ emission hotspot database* [online]. [cit.2021-03-18].
Dostupné z: <https://www.greenpeace.org/static/final-global-hotspot-and-emission-sources-for-so2>
- [76] SAMSET, B. H., M. SAND, C. J. SMITH, S. E. BAUER, P. M. FORSTER, J. S. FUGLESTVEDT, S. OSPREY a C.-F. SCHLEUSSNER. Climate Impacts From a Removal of Anthropogenic Aerosol Emissions. *Geophysical Research Letters* [online]. 2018, 45(2), 1020-1029 [cit. 2021-4-30]. ISSN 0094-8276.
Dostupné z: doi:10.1002/2017GL076079

- [77] IRVINE, Peter J., Ben KRAVITZ, Mark G. LAWRENCE a Helene MURI. An overview of the Earth system science of solar geoengineering. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* [online]. 2016, 7(6), 815-833 [cit. 2021-5-6]. ISSN 17577780. Dostupné z: doi:10.1002/wcc.423
- [78] MCCLELLAN, Justin, David W KEITH a Jay APT. Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems. *Environmental Research Letters* [online]. 2012, 7(3) [cit. 2021-5-6]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/7/3/034019
- [79] LOCKLEY, Andrew, Doug MACMARTIN a Hugh HUNT. An update on engineering issues concerning stratospheric aerosol injection for geoengineering. *Environmental Research Communications* [online]. 2020, 2(8) [cit. 2021-5-6]. ISSN 2515-7620. Dostupné z: doi:10.1088/2515-7620/aba944
- [80] SMITH, Wake a Gernot WAGNER. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters* [online]. 2018, 13(12) [cit. 2021-5-6]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/aae98d
- [81] Strange sounds. *Chemtrail Power: New study calls for global Stratospheric Aerosol Injection by 2030s* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://strangesounds.org/new-study-calls-for-global-stratospheric-aerosol-injection-by-2030s>
- [82] Geoengineering monitor. *Stratospheric aerosol injection* [online]. [cit.2021-03-11]. Dostupné z: https://www.geoengineeringmonitor.org/2021/02/stratospheric_aerosol_injection/
- [83] Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz & G. Stenchikov (2009) Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 36.
- [84] Dictionary. *Railgun* [online]. [cit.2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.dictionary.com/browse/rail-gun>
- [85] Aldebaran. *Kolejnicové elektromagnetické dělo* [online]. [cit.2021-04-18]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_10_bum.php
- [86] Wikipedia. *Coilgun* [online]. [cit.2021-03-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun#/media/File:Coilgun_animation.gif
- [87] Technology Review. *Cooling the planet* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/2007/02/13/130428/cooling-the-planet/>

- [88] LATHAM, John, Alan GADIAN, Jim FOURNIER, Ben PARKES, Peter WADHAMS a Jack CHEN. Marine cloud brightening: regional applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2014, 372(2031) [cit. 2021-4-30]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2014.0053
- [89] Met Office. *Stratocumulus clouds* [online]. [cit.2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/stratocumulus>
- [90] LATHAM, John, Keith BOWER, Tom CHOULARTON, et al. Marine cloud brightening. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2012, 370(1974), 4217-4262 [cit. 2021-4-30]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2012.0086
- [91] EcoFriend. *Everything I need to know about marine cloud brightening* [online]. [cit.2021-03-29]. Dostupné z: <https://ecofriend.com/marine-cloud-brightening.html>
- [92] GAFFIN, S R, M IMHOFF, C ROSENZWEIG, et al. Bright is the new black—multi-year performance of high-albedo roofs in an urban climate. *Environmental Research Letters* [online]. 2012, 7(1) [cit. 2021-4-30]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/7/1/014029
- [93] IRVINE, Peter J., Andy RIDGWELL a Daniel J. LUNT. Climatic effects of surface albedo geoengineering. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2011, 116(D24), n/a-n/a [cit. 2021-4-30]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/2011JD016281
- [94] The Guardian. *White roofs global warming* [online]. [cit.2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/environment/2011/oct/27/white-roofs-global-warming>
- [95] DE_RICHTER, Renaud, Tingzhen MING, Philip DAVIES, Wei LIU a Sylvain CAILLOL. Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2017, 60, 68-96 [cit. 2021-4-30]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2017.01.001
- [96] CAICEDO, Paul, David WOOD a Craig JOHANSEN. Radial Turbine Design for Solar Chimney Power Plants. *Energies* [online]. 2021, 14(3) [cit. 2021-4-30]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14030674
- [97] MING, Tingzhen, Renaud DE_RICHTER, Sheng SHEN a Sylvain CAILLOL. Fighting global warming by greenhouse gas removal: destroying atmospheric nitrous

oxide thanks to synergies between two breakthrough technologies. Environmental Science and Pollution Research [online]. 2016, 23(7), 6119-6138 [cit. 2021-4-30]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-6103-9

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 Úbytek plochy arktického ledu rok 1979 vs 2020 [4]
Obrázek 2 Vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře v čase [16]
Obrázek 3 Vývoj koncentrace CH₄ v atmosféře v čase [16]
Obrázek 4 Vývoj koncentrace N₂O v atmosféře [16]
Obrázek 5 Poměr mezi toky emisí CO₂ ve 3 největších deštných pralesích [30]
Obrázek 6 Půdní sekvestrace uhlíku [36]
Obrázek 7 Biochar neboli Biouhel [43]
Obrázek 8 Schéma technologie zachytávání a ukládání oxidu uhličitého v kombinaci s výrobou bioenergie (BECCS) [46]
Obrázek 9 Dva chemické okruhy technologie DAC [59]
Obrázek 10 Vizualizace vzduchových stykačů v rámci technologie DAC [60]
Obrázek 11 Crystalactor s peletovým reaktorem společnosti RHDHV pro čištění odpadních vod [61]
Obrázek 12 Kalcinátor společnosti TechnipFMC, který je využíván v rámci DAC [62]
Obrázek 13 Systém hašení vápna z průmyslové výroby [63]
Obrázek 14 Schéma technologie DACCS projektu Carbfix 2 [68]
Obrázek 15 Odhadované náklady přímého zachycení CO₂ ze vzduchu v roce 2050 dle zeměpisného umístění [54]
Obrázek 16 Princip SAI pomocí letadel [81]
Obrázek 17 Princip SAI s využitím stratosférických balónů [82]
Obrázek 18 Schéma fungování zbraně Railgun [85]
Obrázek 19 Schéma fungování zbraně Coilgun [86]
Obrázek 20 Pozice Lagrangeova bodu (L1) mezi Zemí a Sluncem [74]
Obrázek 21 Návrh systému pro injecktáž MCB [92]
Obrázek 22 Využití bílého pokrytí střech za účelem zvýšením městského albeda USA [95]
Obrázek 23 Technologie zachycení atmosférického metanu pomocí ventilátorů [20]
Obrázek 24 Schéma technologie SCPP-PCR [96]
Obrázek 25 Graficky znázorněná cenová rozpětí metod geoinženýrství