

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav pro životní prostředí

Ekologie a ochrana prostředí
Ochrana životního prostředí



Diplomová práce

Posuzování životního cyklu ražby tunelové stavby metodou NRTM

LCA of NATM tunnel stamping method

Vypracovala: Bc. Alice Pokorná
Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Kočí, Ph.D.
Praha, 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně pod vedením doc. Ing Vladimíra Kočího, Ph.D. s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou řádně citovány. Dále prohlašuji, že předložená tištěná verze diplomové práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne

Alice Pokorná

Poděkování

Ráda bych poděkovala především svému školiteli doc. Ing. Vladimíru Kočímu, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky a ochotu mi vždy pomoci při zpracování diplomové práce.

Odborným pracovníkům stavební společnosti Subterra a.s. děkuji za konzultace ohledně metody NRTM, umožnění navštěvovat realizované podzemní dílo a pomoc se sběrem dat.

Rovněž děkuji rodině za neustálou podporu v celé době studia. Bez jejich podpory by tato práce nemohla vzniknout.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	CÍL PRÁCE	10
3	SEZNAM ZKRATEK	11
4	TEORETICKÁ ČÁST	12
4.1	NRTM – Nová Rakouská tunelovací metoda.....	12
4.1.1	Historie tunelářství.....	12
4.1.2	Technologie NRTM.....	12
4.1.3	Průzkumná geologická štola tunelu Radlice.....	14
4.1.4	Monitorované materiálové a energetické toky.....	17
4.2	LCA - Posuzování životního cyklu	18
4.3	Standardizace LCA.....	19
4.4	Definice cílů a rozsahu	19
4.4.1	Funkce produktu	19
4.4.2	Funkční jednotka.....	20
4.4.3	Referenční tok.....	20
4.4.4	Hranice systému.....	20
4.4.5	Volba kategorií dopadu.....	20
4.5	Inventarizační analýza (LCI).....	21
4.5.1	Alokace	22
4.5.2	Ekovektor.....	22
4.5.3	Inventarizační tabulka.....	22
4.6	Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA).....	22
4.6.1	Klasifikace	24
4.6.2	Charakterizace	24
4.6.3	Normalizace	24
4.6.4	Vážení	25

4.7	Interpretace životního cyklu	25
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
5.1	Definice cílů a rozsahu	26
5.1.1	Funkce produktu	26
5.1.2	Funkční jednotka a referenční tok	26
5.1.3	Hranice systému.....	26
5.1.4	Procesy produktového systému	26
5.1.5	Použitá databáze	27
5.1.6	Charakterizační model	27
5.2	Inventarizační analýza (LCI)	28
5.2.1	Zdroj dat.....	28
5.2.2	Alokace	28
5.2.3	Procesy produktového systému	28
5.2.4	Inventarizace	31
5.2.5	Práce v programu GaBi 6.....	32
5.3	Hodnocení dopadů na životní prostředí (LCIA).....	33
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	38
6.1	Interpretace životního cyklu	38
6.1.1	Úbytek minerálních surovin.....	38
6.1.2	Acidifikace.....	39
6.1.3	Eutrofizace	39
6.1.4	Sladkovodní Ekotoxicita.....	40
6.1.5	Globální oteplování.....	40
6.1.6	Humánní toxicita.....	41
6.1.7	Mořská ekotoxicita	41
6.1.8	Úbytek stratosférického ozonu	42
6.1.9	Vznik fotooxidantů	42

6.1.10	Terestrická ekotoxicita.....	42
6.2	Diskuze	43
7	ZÁVĚR	44
8	SEZNAM LITERATURY	46

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce bylo posoudit dopady na životní prostředí tunelářské metody NRTM pomocí sestavení studie LCA.

Sektor stavitelství má stále vysoký potenciál rozvoje a proto se stává předmětem zájmu i pro studie LCA. S rostoucími nároky na prostor se v oblasti infrastruktury uplatňuje stále více podzemní stavitelství. Pokud je zájmem udržitelný rozvoj ve stavebnictví, je nutné mít představu o environmentálních dopadech tohoto sektoru.

Udržitelný rozvoj vyžaduje metody a nástroje pro měření a porovnávání dopadů lidské činnosti na životní prostředí. Tyto nástroje poskytují studie LCA, které zároveň umožňují i proaktivní přístup. Výhodou LCA je náhled na celý životní cyklus produktu. Nedochozí tedy k přesunu problému mezi jednotlivými fázemi životního cyklu téhož produktu. Pro posouzení Nové Rakouské tunelovací metody byla zvolena LCA studie typu od kolébky k bráně (cradle-to-gate).

LCA studie byla zpracována pro 1 tunel o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² ražený metodou NRTM realizovaný za dobu 18 měsíců. Pro vypracování této studie byl použit softwarový nástroj GaBi 6.

Výsledky ukazují, že nejvýznamnějšími emisními zdroji tunelářské metody NRTM jsou výroba cementu, skládkování odtěžené rubaniny, výroba betonářské oceli a exploziva. Výroba cementu je hlavním emisním zdrojem kategorie dopadu Globální oteplování a Úbytek minerálních surovin. Skládkování odtěžené rubaniny má největší vliv na Acidifikaci a Terestrickou ekotoxicitu. Betonářská ocel je hlavním emisním zdrojem Sladkovodní ekotoxicity. Exploziva mají vliv v kategoriích dopadu Mořská ekotoxicita, Humánní toxicita a Sladkovodní toxicita.

Toto stavební odvětví má významný potenciál snižování vlivů na životní prostředí. Zlepšení v oblasti zmíněných emisních zdrojů představují především alternativní paliva, obnovitelné zdroje energie a jaderná energie využívané k vytápění vysokých pecí na výrobu cementu a betonářské oceli. Rubaninu je možné využít jako alternativní materiál a není tedy potřeba ji skládkovat. Exploziva jsou problémem, který lze řešit vylepšením jejich trhacích vlastností a tím snížením jejich spotřeby.

Klíčová slova: posuzování životního cyklu, dopady na životní prostředí, NRTM, podzemní stavitelství, udržitelnost stavebních prací

ABSTRACT

The aim of this thesis was to evaluate the environmental impacts of NATM tunnelling method using the assembly of LCA studies.

Construction sector still has large potential for advancement, and therefore is a subject of interest for also for LCA studies. Underground constructions applies more with growing demands for space in infrastructure. If sustainable growth in construction is desired, it's important to have an idea about the environmental impacts of this sector.

Sustainable growth requires methods and tools for measurement and comparison of impacts of human activities on the environment. These tools are provided by LCA studies, which also allow a proactive approach. The advantage of LCA is a preview of the entire life cycle of the product, so there is no shifting of problems between the individual stages of the product's life cycle. LCA study of cradle-to-gate type was selected to evaluate New Austrian tunnelling method.

LCA study was done for one tunnel, length 850m with cross-section surface of 13,46m² excavated by the NATM method, realized over the course of 18 months. GaBi 6 software tool was used for making of this study.

Results show that the most important emission sources of NATM tunnelling method are production of cement, dumping of excavated material, production of reinforcing steel and explosives. Production of cement is the main emission source of Global warming potential and Abiotic depletion potential. Landfilling of spoil material has the greatest effect on Acidification and Terrestrial ecotoxicity potential. Reinforcing steel is the main emission source of Freshwater aquatic ecotoxicity potential. Explosives have an effect in categories of Marine aquatic ecotoxicity, Human toxicity and Freshwater toxicity potential.

This construction industry has a significant potential for reducing environmental impact. Improvement in the mentioned emission source categories is offered mainly by alternative fuels, renewable energy sources and nuclear energy used for blast furnace heating in production of cement and reinforcing steel. Spoil material can be used as alternative material and therefore there is no need to landfill it. Explosives are a problem that can be addressed by improvement of their explosive properties, and thereby reduce their consumption.

Keywords: life cycle assessment, environmental impacts, NATM, underground constructions, sustainability of constructions works

1 ÚVOD

Předmětem této diplomové práce je posouzení životního cyklu stavebních prací tunelové stavby ražené Novou Rakouskou tunelovací metodou. Ve spolupráci se stavební společností Subterra a.s. byla získána všechna potřebná data pro vypracování LCA studie.

Posuzování životního cyklu výrobků, technologií a služeb pomocí LCA studií umožňuje nahlížet na celý život produktu od získávání materiálů, přes užívání produktu až po jeho odstranění. Tato metoda je proto ideální pro identifikaci problému v životním prostředí způsobeného činností člověka a jeho následné řešení. Díky náhledu na produkt od začátku do konce jeho života nedochází k přesunu problému například z fáze výroby do fáze odstranění, nebo přesunu mezi regiony. První LCA studie se datují do let 1960-1970. Od této doby popularita LCA stále roste. Jako komparativní metoda umožňuje nacházet nejlepší alternativy z produktů plnících stejnou funkci. Výsledky studií napomáhají tvůrcům politik v rozhodování týkajících se produktů, postupů a politických strategií. [1,2,3,4]

Počátky vlastního tunelářství se datují do dob Napoleona, kdy byl na počátku 19. století postaven první tunel [5]. Díky možnostem zkrácení vzdáleností nebo vyhnutí se nepříznivým povrchovým podmínkám má toto odvětví stavebnictví stále velký potenciál. V městské zástavbě se často jedná o efektivnější alternativu k pozemním stavbám, čímž je poskytnuta infrastruktura potřebná pro udržitelnost městské komunity. Podzemní stavitelství přispívá také snížením hlučnosti a prašnosti dopravy. [6]

Odvětví stavebnictví bylo jako téma práce zvoleno pro jeho neustálý rozvoj. Zároveň s rozvojem tohoto odvětví narůstá také pozornost směřovaná na jeho udržitelnost[7]. V této oblasti jsou ekologická data dostupná především pro stavební materiály. Údaje o stavebních pracích však většinou chybí. Jednou z hnacích sil využívajících zdroje Evropské unie jsou na tomto území především různá odvětví stavebnictví[8]. Udržitelný rozvoj vyžaduje metody a nástroje pro měření a porovnávání dopadů lidské činnosti na životní prostředí. Tyto nástroje poskytují studie LCA, které zároveň umožňují i proaktivní přístup [9]. Problémem v oblasti stavebnictví je dlouhá životnost staveb pohybující se v řádech desítek let, což je pro zmapování celého životního cyklu náročné. V případě této práce byla tedy zvolena zúžená studie LCA v podobě „od kolébky k bráně,“ která neuvažuje fáze užívání a odstranění produktu.

Termín NRTM neboli **N**ová **R**akouská **T**unelovací **M**etoda byl oficiálně poprvé použit roku 1962 [10,11]. Od této doby se jedná o převažující tunelářskou technologii, kterou je světově vystavěna více než polovina tunelových staveb[12,13]. Ačkoli se tato metoda v České

republice začala používat až v 90. letech, již po roce 2000 je zde také naprosto převládající metodou podzemního stavitelství [14,15]. Principem metody je spolupůsobení horninového masivu s výztužnými prvky (především stříkaný beton) [16].

2 CÍL PRÁCE

Cíle diplomové práce jsou:

1. Sběr inventarizačních dat a provedení LCA studie stavebních prací na tunelové stavbě
2. Zjištění příspěvku jednotlivých modulů (upstream, core procesů) k celkovým dopadům stavby

3 SEZNAM ZKRATEK

ADP - Úbytek minerálních zdrojů

AP - Acidifikační potenciál

ČR - Česká republika

EN- Evropská norma

EU- Evropská unie

EP - Eutrofizační potenciál

FAETP - Potenciál ekotoxicity na sladkovodní ekosystémy

FSTEP - Potenciál ekotoxicity sladkovodních sedimentů

GWP - Potenciál globálního oteplování

HTP - Potenciál humánní toxicity

ISO - Mezinárodní organizace pro normalizaci

LCA - Life Cycle Assessment (Posuzování životního cyklu)

LCIA - Life Cycle Impact Assessment (Hodnocení dopadů na životní prostředí)

MAETP - Potenciál mořské ekotoxicity

MSTEP - Potenciál ekotoxicity mořských sedimentů

NRTM - Nová Rakouská tunelovací metoda

ODP - Potenciál úbytku stratosferického ozónu

POCP - Potenciál tvorby fotooxidantů

TETP - Potenciál ekotoxicity na terestrické ekosystémy

4 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce představí tunelovací technologii NRTM a metodiku LCA. V obou případech budou představeny hlavní kroky, které NRTM i LCA charakterizují.

4.1 NRTM – Nová Rakouská tunelovací metoda

Nová Rakouská Tunelovací metoda je v současnosti nejvyužívanější tunelářskou metodou. Výhodami NRTM je její přizpůsobivost a rychlá možnost reakce na změny horninového masivu se zpětnou vazbou. Tato vlastnost optimalizace technologického postupu výstavby i způsobu zajištění stability výrubu podle aktuálních podmínek se odráží pozitivním dopadem na výši investičních nákladů. Jako konvenční tunelovací metoda je NRTM unikátní svým přístupem k horninovému masivu. Zatímco v původních tunelářských metodách působil masiv vždy spíše komplikace a zatěžoval konstrukce, Nová Rakouská tunelovací metoda ho naopak využívá jako jeden z opěrných prvků nosného systému ostění-hornina. [14,15,16,17,18]

4.1.1 Historie tunelářství

Tunelářství má ve stavebním odvětví dlouhou tradici. První menší podzemní stavby, například rozvody vody, mají svůj počátek minimálně 3000 let před naším letopočtem. V 19. století začíná výstavba tunelových staveb pro dopravní účely, jak je známe dnes. Největší pokrok technologií se udál na počátku 20. století. Tehdy došlo k nahrazení dřevěných uhnívajících opěrných prvků kovovými, poprvé byly použity skalní kotvy a především byla poprvé použita technologie stříkaného betonu. Do této doby byl vždy výrub ohrazen bedněním, za které se beton aplikoval. [5,10,11,14,15,16,18,19]

4.1.2 Technologie NRTM

Nová Rakouská tunelovací metoda je charakterizována především neustálým střídáním vlastního postupu stavby a zpětné vazby z monitoringu, který probíhá současně s výstavbou [11]. Již v době přípravy stavby je nutné zajistit potřebné zázemí pro výstavbu díla. Především se jedná o zajištění prostoru pro vybudování zařízení stanoviště, energetické a vodovodní přípoje [15].

Horninové prostředí v místě budoucí výstavby je obvykle různorodé a před prováděním stavby jen omezeně poznatelné. Stěžejní je proto již první krok, kterým je posouzení inženýrskogeologické situace NRTM, který umožňuje vedení stavby mimo rizikové geologické podmínky. Zatřídění zkoumaného geologického prostředí podle některých z tunelářských klasifikací, jako je Q (Barton), RMR (Bieniawski), GSI (Hoek), nebo podle rakouské směrnice OGG slouží pro geotechnický návrh tunelů [12,20,21,22].

V počátečních fázích projektu se proto zpracovává projektová dokumentace, která zahrnuje zhodnocení geotechnických rizik na základě geologické, hydrogeologické a geotechnologické rešerše, případně také rešerše historické báňské činnosti. Ačkoli nebývá obvyklé, že by se v běžných geologických poměrech a malých hloubkách vyskytovala radiace, nebo unikající plyn, je nutné posoudit i tato rizika. Spolu s náchylností k prašnosti jsou tato hodnocení podkladem pro projekt větrání tunelu. Je třeba zjistit a kvantifikovat také případnou agresivitu podzemní vody vůči injektážním hmotám i betonu. [15,23]

NRTM je řazena mezi observační metody, kde je postup stavby průběžně sledován. Geotechnický monitoring opírající se o měření deformací tunelového výrubu poskytuje potřebné údaje. Monitorování různých trendů deformací umožňuje odhalení geologických poruch a změn mimo viditelnou oblast včetně prostoru před čelbou tunelu. Zmíněný princip NRTM tkívá ve vytvoření stabilního spolupůsobení horninového prostředí a výstužných prvků tedy může maximálně a bezpečně využít vlastností horninového prostředí a minimalizovat rozsah výstužných prvků. V reakci na zjištění skutečného stavu geologie jsou dle potřeby upravovány způsob ražby a zajištění výrubu primárním ostěním. Především nesmí docházet k degradaci a nepřiměřené deformaci primárního ostění. Horninový masiv je po délce tunelu rozdělen do kvazihomogenních celků. Každý tento celek je popsán Technologickou Třídou Výrubu (TTV). Zařazení do technologických tříd NRTM závisí na mnoha faktorech (zjištění rozpojitelosti, vrtatelnosti, těžitelnosti, lepivosti, prašnosti, abrazivity, zkoušky propustnosti pro injektáž, tlakové zkoušky a injekční zkoušky). Je třeba zjistit a kvantifikovat případnou agresivitu podzemní vody vůči injekčním hmotám i betonu. Hornina se též klasifikuje podle stability výrubu. [11,15,16,23,24]

Rozpojování horniny se provádí buď za použití trhavin anebo bez použití trhavin. Varianta za použití trhavin se provádí navrtáním čela výrubu systémem vrtů podle vrtného schématu závisícího na zastiženém typu horniny a postupu trhání. Vlastní rozpojování se provádí pomocí průmyslových trhavin umístěovaných do vrtů s časově odstupňovanými rozněty (povolení trhacích prací a jejich projekt schvaluje Obvodní báňský úřad). Maximální výbušná kapacita je soustředěna do centra čelby. S časovým odstupem jsou přibírány další vrstvy, v závěru jsou odstřeleny vrty na vnějším obvodu s nejnižší výbušnou kapacitou a spodní vrty. V obytné zástavbě je nutno počítat s přerušением prací v nočních hodinách. Po provedení odstřelu se pracoviště na čelbě odvětrává, bez systému odvětrání a monitoringu ovzduší nesmí být podzemní dílo prováděno. [15]

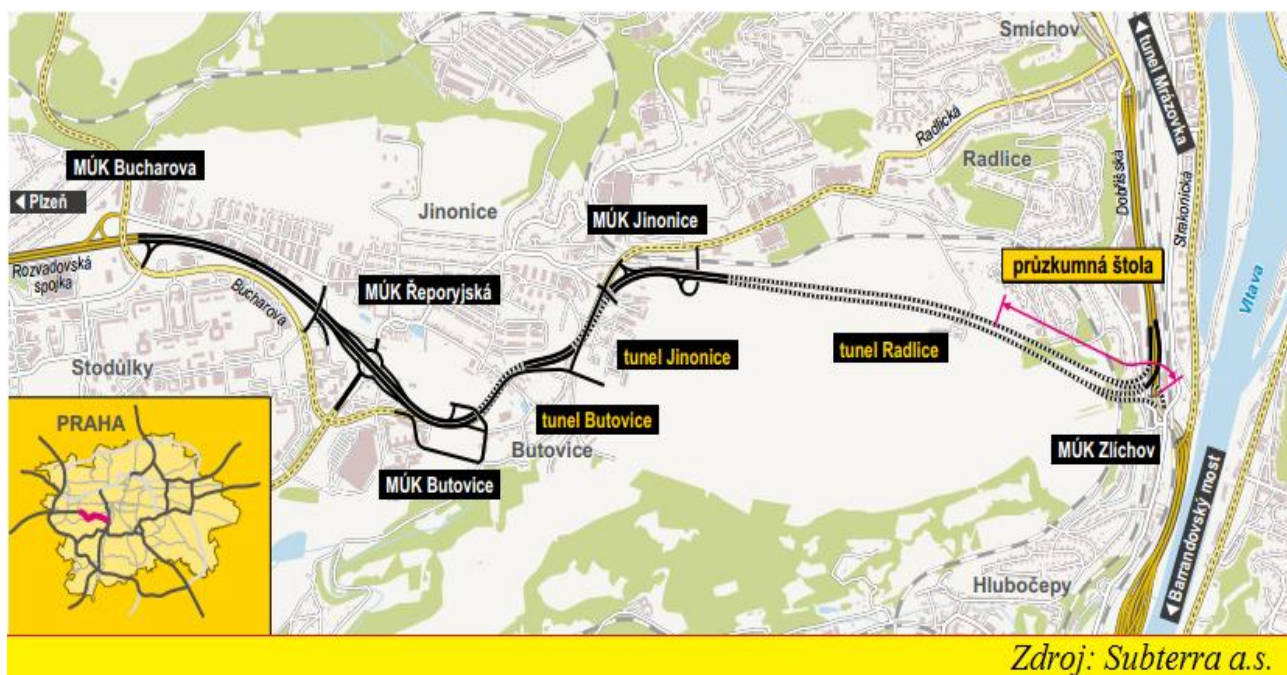
Následujícím krokem je nakládání rubaniny nakladači a její odvoz z místa ražby a následně i ze staveniště.

Po ustálení napěťově-deformačního stavu je stabilita výrubu zajištěna primárním ostěním. V závěrečné fázi i sekundárním ostěním, které představuje definitivní konstrukci tunelové trouby. Primární (vnější) ostění se skládá ze stříkaného betonu, kotevního systému, kari sítí a kovových rámců, které určují tvar tunelové trouby. Aby horninový masiv působil v okolí výrubu jako nosný prvek, je nutné dosáhnout co nejmenšího porušení při rozpojování a zároveň co nejrychleji zpevnit povrch výrubu. Povrch výrubu se stabilizuje stříkaným betonem. Předností stříkaného betonu je postupné tuhnutí a tvrdnutí, které kopíruje „sesedání“ horninového masivu po odstřelu a přenáší tak bez velkého poškození značné deformace. Klíčovou přísadou betonu jsou proto urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, které jsou specificky navrhované pro dané podmínky. Stříkaný beton stabilizuje výrub v kombinaci s radiálními kotvami, sahají do nenarušeného prostředí horninového masivu. Kotvy jsou různého principu a materiálu. Speciálním druhem jsou kotvy opatřené vrtnou korunkou používané do nestabilního podloží. Tyto kotvy se skládá z podložky, vrtné ocelové tyče opatřené vrtnou korunkou s otvorem uprostřed průřezu, který umožňuje následně kotvu injektovat cementovou směsí. Měkké primární ostění v souladu s principem Fenner-Pacherovy křivky umožňuje deformaci a tím optimální zapojení horninového masivu do funkce. Podle zastižených podmínek mohou být operativně aplikovaná i různá doplňková opatření, např. jehlování, nebo mikropilotové deštníky. [15,16,23,24]

Požadavky na materiály a trvale zabudované části konstrukce z hlediska trvanlivosti jsou specifikovány většinou až na 100 let.

4.1.3 Průzkumná geologická štola tunelu Radlice

Dílem, na kterém byl prováděn monitoring pro diplomovou práci, je Průzkumná geologická štola tunelu Radlice. Tuto štolu realizuje Divize 1 stavební společnosti Subterra a.s. v časovém horizontu 18 měsíců pomocí vrtacích a trhacích prací. Celková délka štoly je 850 m s maximálním podélným sklonem 6,56%. Plocha příčného řezu je 13,46 m² (23,35 m² v případě výhybny) s maximální šířkou výrubu 4,25 m (6,55 m výhybna) a maximální výškou výrubu 4,33 m (4,30 m výhybna). Pro přepravu osob, materiálu a odtěžené rubaniny byla mezi povrchem a vlastní štolou nejprve vybudována 14 m hluboká těžní šachta. Způsobem realizace je NRTM za pomoci trhacích prací. [23,25,26,27]

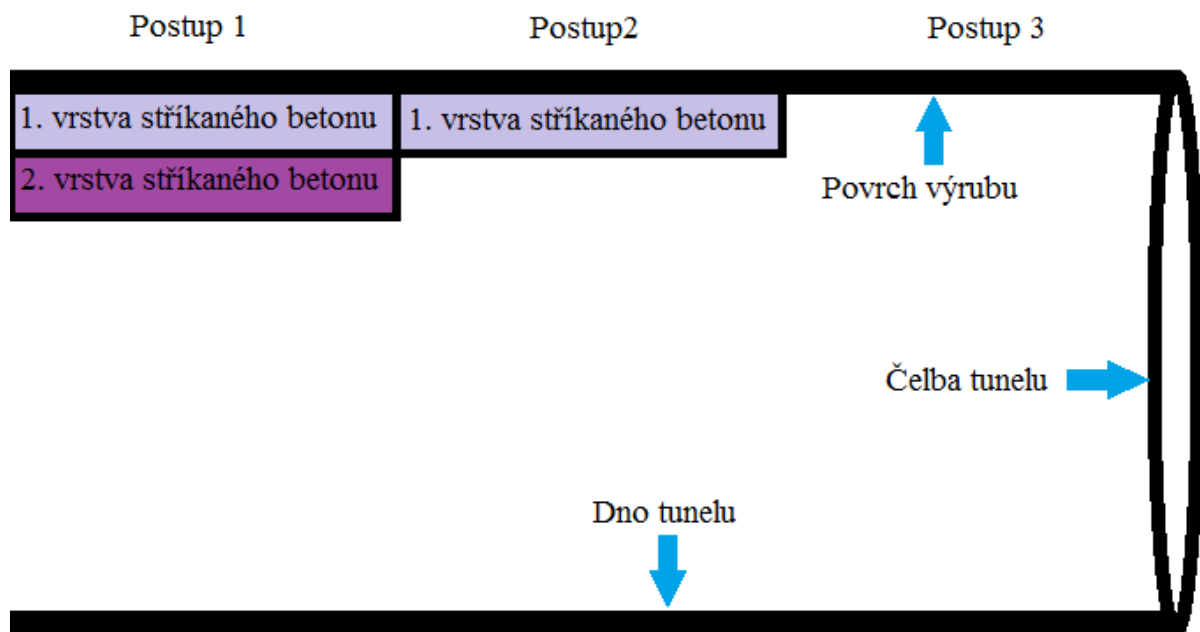


Obr. 1 Mapa trasy Radlické radiály

Ražená průzkumná štola se nachází v trase druhé části budoucího tunelu Radlické radiály mezi Jihozápadním městem a Smíchovem, nazvané Radlická radiála JZM – Smíchov. Radiála je budována jako spoj Městského a Pražského okruhu. Bude finálně dlouhá 5,5 kilometru a zahrne dva hloubené tunely shodné délky 299 m a ražený tunel délky 2 220 m. Varianta tunelů byla zvolena kvůli vedení poloviny trasy urbanizovaným územím. Historické zkušenosti v této oblasti z roku 1981 ukázaly riziko vyskytujících se krasových jevů. Tehdy došlo k průvalu zvodnělých zemin při ražbě stoky „P.“ Proto bylo rozhodnuto před vlastní výstavbou tunelů zmapovat geologickou a hydrogeologickou situaci v budoucí trase radiály. [23,25,26,27]

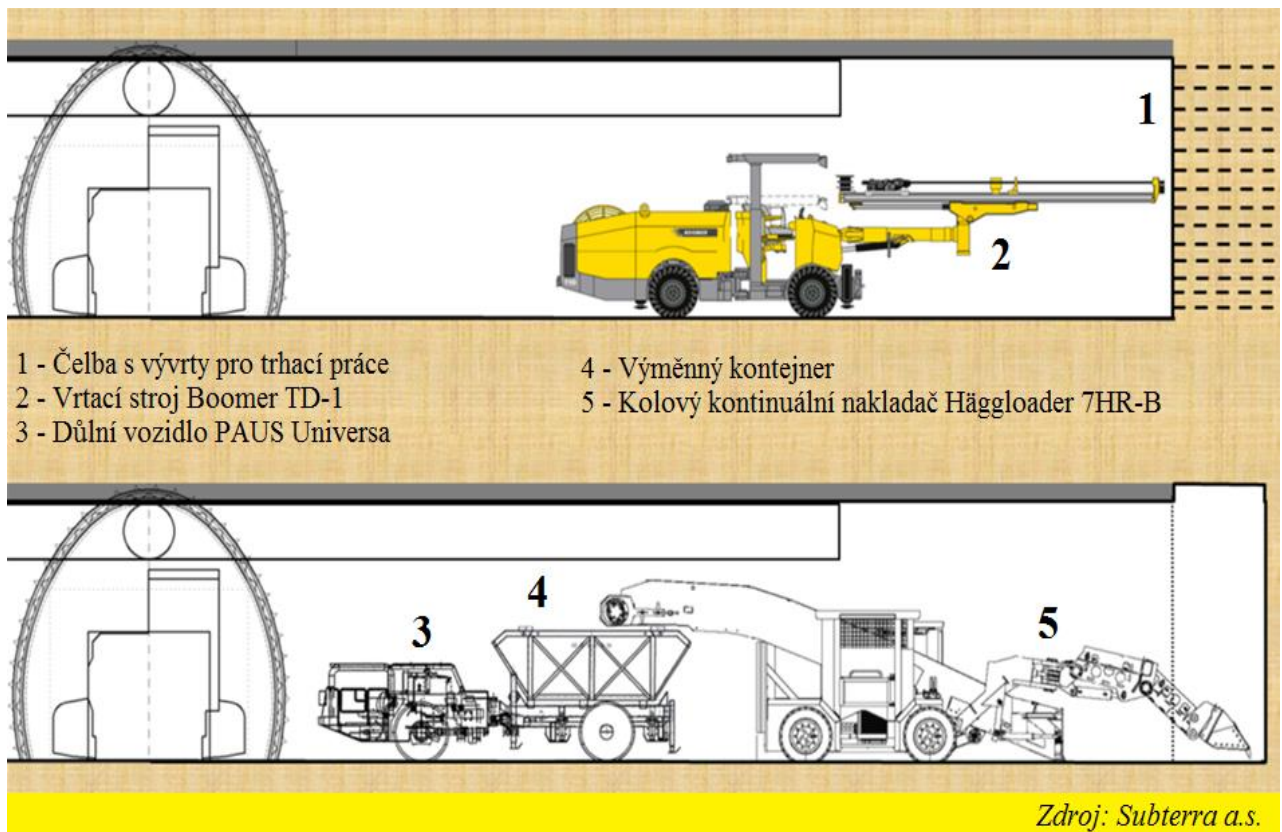
Postup v Průzkumné geologické štole tunelu Radlice probíhal podle zásad NRTM. Postup v jednom záběru NRTM je definován hranicí 1- 3,5 metru. V případě štoly tunelu Radlice se počítalo s maximálním postupem v jednom záběru o délce 1,7 m. Jeden záběr NRTM se skládá z několika po sobě jdoucích kroků. Prvním krokem je navrtání čelby tunelu vrtacím strojem Boomer T1-D sérií přesně rozmístěných vrtů. Do vzniklých vrtů jsou následně vloženy trhavy (typu EURODYN 2000 a Senatel™ Powerfrag™) s detonátory. Po odstřelu je odtěžená rubanina pásovým nakladačem Hägglader7HR-B naložena na důlní vozidlo PAUS Universa a odvezena k těžní šachtě. Ze dna těžní šachty je následně rubanina vyzvednuta i s kontejnerem jeřábem RDK 300 na povrch, kontejner je usazen na vůz Tatra T 815 a odvezen na skládku vzdálenou 2,6 km. Stejnou cestou jsou dopravovány stavební

materiály zpět na čelbu tunelu. Jedná se především o betonážní směs dováženou z 8 km vzdáleného zařízení na jeho výrobu. Po odtěžení rubaniny se výrub stabilizuje zmíněným primárním ostěním ze stříkaného betonu, kotevního systému injektovaného cementovou směsí, kari sítěmi a rámy. Použité kovové prvky jsou z betonářské oceli a stříkaný beton typu SB C 20/25 X0. Beton se skládá z cementu, jemného a hrubého kameniva a vody. Na stavbě se používá jako suchá směs a voda je přidávána přímo na trysce stříkající beton. Stříkaný beton je aplikován ve dvou vrstvách při dvou po sobě jdoucích postupech. [15,23]



Obr. 2 Aplikace stříkaného betonu

Další stroje zapojené na stavbě byly například Cat 305 a Cat 308 pro beztrhavinové rozpojování horniny. Dále bylo používání ponorné kalové čerpadlo, injektážní betonážní čerpadlo, čerpadlo na nástřik suché směsi betonu s přívodem vody, kompresor a větrák Zitron. Strojová soustava této stavby je výjimečná. Od nakládání rubaniny na čelbě až k jejímu vykládání na skládce nedochází k žádné manipulaci s rubaninou ani jejímu překládání. Díky tomu bylo dosaženo snížení prašnosti v troubě tunelů. [23]



Obr. 3 Strojová soustava pracující v Průzkumné geologické štolě tunelu Radlice

4.1.4 Monitorované materiálové a energetické toky

- Spotřeba elektrické energie (MWh)
- Spotřeba vody (m³)
- Spotřeba nafty (l)
- Objem vyrubaného materiálu (m³) + vzdálenost odvozu (km)
- Objem použitého betonu (m³) + vzdálenost dovozu (km)
- Použitá betonářská ocel (kg)
- Použité urychlovače (kg)
- Množství trhavin (kg)
- Pracovní stroje (životnost)

4.2 LCA - Posuzování životního cyklu

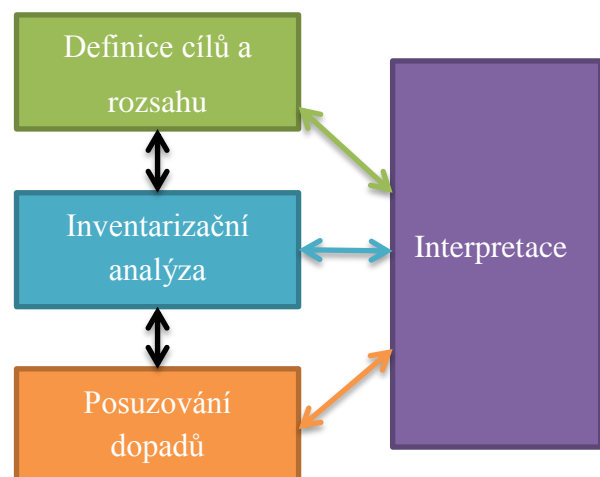
Posuzování životního cyklu LCA (Life Cycle Assessment) je analytická metoda hodnocení dopadů výrobků, technologií a služeb na životní prostředí. Každý produkt člověka ovlivňuje životní prostředí po celou dobu svého životního cyklu. LCA je ideální metoda pro komparativní přístup. Každý produkt může mít obvykle několik variant životního cyklu, mezi kterými lze volit. Tato metoda poskytuje informace důležité pro strategické plánování, vývoj a zlepšení produktu, utváření politiky i například marketing. LCA zkoumá dopady na životní prostředí ve 3 dimenzích- environmentální, sociální a ekonomické. Charakter dopadů na životní prostředí závisí na množství emitované látky, vlastnostech látky, charakteristice emitujícího zdroje a přijetí prostředím. [1,9,28]

Životní cyklus uvažuje environmentální dopady výrobků, technologií a služeb člověka „od kolébky do hrobu.“ Zahrnuje tedy stadia získávání surovin, výroby materiálu, výroby produktu, užívání produktu, odstranění produktu s možnostmi opětovného užití materiálů nebo následnou recyklaci produktu. Zúženým typem studie LCA je „od kolébky k bráně,“ které končí výrobou produktu, ale nepočítá již s jeho užíváním a odstraněním. [1]

Komplexní pohled na celý životní cyklus výrobku umožňuje odhalit jeho nedostatky. Zabráni tak přemísťování problému mezi různými fázemi životního cyklu výrobku, technologie či služby. Nesprávným přístupem by mohlo sice dojít ke snížení dopadů produktu na jedné straně, ale zároveň by přenesením problému narostly environmentální dopady na straně jiné. [1,28]

Tvorba studie LCA zahrnuje čtyři hlavní části:

- a) Definice cílů a rozsahu
- b) Inventarizace životního cyklu
- c) Posuzování dopadu životního cyklu
- d) Interpretace životního cyklu



Obr. 4 Schéma propojení jednotlivých částí životního cyklu

4.3 Standardizace LCA

Studie LCA jsou využívány pro politické rozhodování nadnárodní, národní i v soukromém sektoru. Aby se předešlo marketingovému zneužití, vznikla potřeba standardizace metody, na jejímž vývoji se podílela Společnost pro environmentální toxikologii a chemii – SETAC (The Society of Environmental Toxicology and Chemistry). Dnes již platné standardy zabraňují interpretaci studie LCA zavádějícím způsobem. Od roku 2006 upravují postupy metody LCA především následující české technické normy:

ČSN EN ISO 14040 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova

ČSN EN ISO 14044 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice

ČSN ISO/TR 14047 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Příklady aplikace

ČSN ISO/TR 14048 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Formát dokumentace údajů.

ČSN ISO/TR 14049 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Příklady aplikace ISO/TR pro stanovení cíle a rozsahu inventarizační analýzy [1,2,4,28,29,30,31]

4.4 Definice cílů a rozsahu

Prvním krokem při zahájení studie LCA je definice cílů neboli důvodů jejího zahájení. Následně jak bude posuzování provedeno, pro koho je studie určena, kdo bude seznámen s jejími výsledky a za jakých podmínek budou tyto výsledky platné. Rozsah studie je určen **funkcí produktu**, **funkční jednotkou** (kvantifikovaná funkce produktu za čas), **referenčním tokem** (kolik produktu je třeba k naplnění funkční jednotky), **hranicemi systému** (které procesy do studie spadají, které již ne) a použitými **kategoriemi dopadu**. Stanovené hranice systému musejí být v souladu s cílem studie. [1,9]

4.4.1 Funkce produktu

Pro posouzení životního cyklu produktu je stěžejní přesné vymezení, k čemu se produkt používá a za jakých okolností tuto funkci plní. Jeden produkt může ve více sférách (spotřeba, komunikace, bezpečnost...) plnit více funkcí. Pokud se porovnává více produktů, je nezbytné, aby ve všech sférách plnily totožné funkce. Pomocí LCA studií lze porovnávat výhradně produkty plnící stejné funkce. [1,9,28]

4.4.2 Funkční jednotka

Měřitelná velikost funkce v konkrétních jednotkách značí funkční jednotku. Funkční jednotka je základ, ke kterému se vztahují všechny vstupy a výstupy modelovaného systému. Pro všechny posuzované systémy musí být tato jednotka stejná. [1,28]

4.4.3 Referenční tok

Referenční tok vyjadřuje množství produktu potřebné k naplnění funkční jednotky. Totožně s měřitelností funkční jednotky je zákonitě měřitelný i referenční tok.

4.4.4 Hranice systému

V první řadě je také potřeba definovat hranice systému, tzn., jaké procesy životního cyklu produktu budou v posuzovaném systému zahrnuty. Ne všechny podílející se procesy mají totiž pro výsledky studie stejnou váhu. Některé související procesy nemusí být pro zpracování studie významné. Nezahrnutí jakékoli části životního cyklu musí být logicky zdůvodněno. Hranice systému lze podle potřeb studie rozšířit, nebo naopak zúžit. S rozšiřováním hranic systému roste i komplikovanost sestavení studie. [1,28]

Vymezení produktového systému hranicemi systému je důležité pro následující kroky studie. Určující je například pro inventarizační fázi. Zodpovídá za to, co bude a nebude předmětem monitoringu.

V různých velikých geografických celcích mohou být dopady na životní prostředí různé. Hranice systému se proto definují i geograficky (místní, regionální, státní, kontinentální nebo světové). Zahrnut je také časový rozsah studie. Vztahuje se například k životnosti výrobku, časovému horizontu procesů nebo době trvání environmentálních dopadů [1,9,28].

Interakce materiálových a energetických toků mezi životním prostředím a produktovým systémem jsou označovány jako elementární toky. Tyto toky překračují hranice systému a zajišťují tak výměny hmoty nebo energie s okolním systémem (životním prostředím). Příkladem může být vstup surovin zatím neupravených člověkem, jako ropa, sluneční záření, rudy, do produktového systému.

4.4.5 Volba kategorií dopadu

Lidská činnost se negativním způsobem odráží nejen na životním prostředí, ale také na lidském zdraví a zásobách abiotických i biotických surovin. V těchto oblastech jsou následně definovány kategorie dopadu vyjadřující potenciální dopady na konkrétní problémy prostředí. Komplikací může být dopad jedné příčiny s několika následky. Hovoří se také o tzv. dopadovém řetězci. Na jeho počátku je elementární tok a na konci pozorované účinky.

Kategorie dopadu lze dělit podle geografického rozsahu na globální, regionální a lokální. Další dělení kategorií je možné podle dopadu odehrávajícího se buď na vstupu, nebo na výstupu ze systému. Jedná se o kategorie surovinové (vstup) a intervenční (výstup). [1]

- a) Kategorie dopadu surovinové
 - Úbytek abiotických zdrojů
 - Úbytek biotických zdrojů
- b) Kategorie dopadu intervenční
 - Globální oteplování
 - Úbytek stratosférického ozónu
 - Vznik fotooxidantů
 - Humánní toxicita
 - Ekotoxicita (sladkovodní, mořská, terestrická)
 - Acidifikace
 - Eutrofizace

Krom základních kategorií dopadu existují i specifické kategorie (změna ve využívání krajiny a ionizační záření) nebo kategorie, které prozatím nebývají součástí metodik (hluk, odpadní teplo, zápach, desertifikace...).[1,29]

V definici rozsahu studie jsou uvedeny nejen kategorie dopadu, ale také podmínky, za kterých jsou pro danou studii relevantní. [32]

4.5 Inventarizační analýza (LCI)

Neutrální kolektivizací vstupních a výstupních toků hodnoceného produktového systému je inventarizační analýza LCI (Life Cycle Inventory). Fáze LCI zahrnuje sestavení schématu produktového systému, sběr dat a výpočet ekovektoru produktu. Shromažďování informací o zúčastněných procesech zařazených do produktového systému je zahájeno identifikací všech zúčastněných procesů, jejich vstupů a výstupů. Schéma produktového systému v rámci hranic systému je dokončeno pomocí propojení jednotlivých procesů energetickými a materiálními toky. Následuje sběr dat o jednotkových procesech zařazených do produktového systému. [1,2,3]

Tato část LCA studie je náročná na datovou základnu. Pro zajištění potřebné kvality studie je stěžejní získávání potřebných dat. V ideálním případě tato data poskytuje přímo výrobce nebo provozovatele sledované technologie. Provozovatel sledované aktivity však může mít malou nebo žádnou zkušenost s poskytováním dat pro potřeby LCA. Stejně tak sestavovatel LCA studie může mít malou znalost technologie provozované činnosti, což také

znesnadňuje výběr dat vhodných pro studii. Klíčovým krokem této fáze se tak může stát proces vzájemného učení a zvyšování povědomí o dané problematice. [1,3,9,28]

Jelikož nikdy není možné zajistit si všechny údaje vlastním monitoringem, doplňují je databázové zdroje.

4.5.1 Alokace

Alokace se uplatňuje v případech, kdy je identický tok ze dvou různých zdrojů zaústěn do jednoho procesu, nebo kdy z jedné operace vzniká více produktů. Tyto produkty mají ale stejné vstupní i výstupní toky. Alokace v takových případech umožňuje rozdělit environmentální dopady jednoho procesu mezi dva a více vystupujících produktů. Dále lze alokací řešit i recyklaci nebo práci strojů na různých projektech v rámci celé životnosti stroje.

Alokace probíhá podle alokačních pravidel. Možná alokační pravidla jsou například počet produktů, objem produktů, hmotnost produktů, cena atp.. [1]

Nejlepším možným krokem však je se alokaci vyhnout. To je možné například pomocí rozšíření hranic systému nebo zvětšením podrobnosti produktového systému (často velmi náročné).

4.5.2 Ekovektor

Ekovektorem procesu je označen soubor hodnot všech jednotlivých elementárních toků vztažených na jednotku hlavního výstupu (produktu). V případě vyčíslení všech elementárních toků celého produktového systému byl získán ekovektor produktového systému (suma emisních látek celého systému, například CO₂, SO₂, Cd). [1]

4.5.3 Inventarizační tabulka

Výstupem inventarizace je tzv. inventarizační tabulka. Tato tabulka poskytuje souhrn všech energií a materiálů procházejících produktovým systémem. Tato data lze uspořádat do logických celků, ze kterých se skládá životní cyklus produktu (výroba materiálu, výroba produktu, užívání produktu...). [1]

4.6 Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA)

Účelem této fáze LCA je vyhodnocování významu potenciálních dopadů na životní prostředí. Podkladem hodnocení jsou výsledky fáze inventarizace. Hodnocení dopadů životního cyklu probíhá převodem ekovektorů produktových systémů na hodnoty, které vystihují míru zasažení jednotlivých problémů životního prostředí. Cílem LCIA je tedy vyjádření environmentálních dopadů jako kvantifikovaných veličin, tedy **kategorií dopadu**. [1,32]

Jako měřitelná veličina s definovanou jednotkou se používá **indikátor kategorie dopadu**. Tento indikátor slouží k vyjádření schopnosti elementárních toků poškozovat životní prostředí. Indikátory kategorií dopadu jsou dvojího druhu, midpointové a endpointové. **Midpointové indikátory** hodnotí potenciální škodlivost na základě fyzikálních, chemických a biologických vlastností daného toku. Je tedy měřítkem potenciálních schopností danou kategorii dopadu zapříčinit. V případě hodnocení konkrétního pozorovatelného poškození prostředí a konečného měřitelného účinku se jedná o **endpointový indikátor**. Například pro kategorii dopadu Globální oteplování je midpointový indikátor ekvivalent uvolněného oxidu uhličitého vyjádřený v kilogramech obvykle v časovém horizontu 100 let (GW_{100} , kg CO₂-Eq). Endpointových indikátorů pro tutéž kategorii dopadu je více, například nárůst teploty, zvýšení hladiny moří a oceánů, úbytek ledovcové hmoty atd.. [1,33,34,35]

Institutem environmentálních věd v Leidenu, Nizozemí (Centrum voor Milieuwetenschappen) byla vyvinuta metodika pro posuzování dopadů na životní prostředí na základě midpointových indikátorů. Tato metoda nese označení CML-IA (CML impact Assessment) nebo podle nejnovější verze CML 2001. [1,33]

Tab. 1 Přehled kategorií dopadu dle metodiky CML-IA

Kategorie dopadu	Charakterizační faktor	Jednotka výsledku indikátoru kategorie dopadu	Referenční látka
<i>Základní kategorie dopadu</i>			
Úbytek abiotických surovin	ADP	kg Sb-eq	antimon (Sb)
Využívání krajiny		m ² /rok	využité území (m ²)
Globální oteplování	GWP	kg CO ₂ -eq	oxid uhličitý (CO ₂)
Úbytek stratosférického ozonu	ODP	kg CFC-11-eq	freon CFC-11
Humánní toxicita	HTP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Sladkovodní ekotoxicita	FAETP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Mořská ekotoxicita	MAETP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Terestrická ekotoxicita	TETP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Ekotoxicita sladkovodních sedimentů	FSETP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Ekotoxicita mořských sedimentů	MSETP	kg DCB-eq	1,4-dichlorbenzen (DCB)
Vznik fotooxidantů	POCP	kg C ₂ H ₄ -eq	ethen (C ₂ H ₂)
Acidifikace	AP	kg SO ₂ -eq	oxid siřičitý (SO ₂)
Eutrofizace	EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	fosforečnanový anion (PO ₄ ³⁻)
<i>Dodatkové kategorie dopadu</i>			
Úbytek obnovitelných surovin	BDP	kg slon-eq	Slon Africký
Zápach	Z	m ³	
Ionizační záření	DF	rok.kBq ⁻¹ (=DALY)	uvolněná radiace do prostředí

V případě kategorie dopadu Ionizační záření bývá jako výsledek indikátoru kategorie dopadu používána jednotka DALY. Tato jednotka je definována jako počet roků, o které poškozená populace přijde ve vztahu k průměrnému věku. [1]

Jako endpointová metodika se využívá například Eco-indicator 99. Hlavními skupinami environmentálních dopadů v tomto případě jsou lidské zdraví, biodiverzita, a úbytek surovin.

4.6.1 Klasifikace

Výsledky inventarizace musí být přiřazeny zvoleným kategoriím dopadu. Provedení tohoto kroku je klasifikací, která přiřadí každý elementární tok podle jeho účinků určité kategorii dopadu. Není však výjimkou, že jeden elementární tok má vliv na více kategorií dopadu. Avšak ne všem kategoriím dopadu musí být nutně některý tok přiřazen. [1]

4.6.2 Charakterizace

Po přiřazení elementárních toků jim odpovídajícím kategoriím dopadu je nutné dopady těchto toků také vyčíslit. Toto vyčíslení se vztahuje vždy k jednotlivé kategorii dopadu. Každá kategorie dopadu má proto zvolenou svou veličinu, kterou se poškození v její oblasti vyjadřuje. Touto veličinou je již zmíněný indikátor kategorie dopadu.

Pro přepočítání elementárního toku na jednotku indikátoru kategorie dopadu je využívána konstantní tabelovaná hodnota zvaná charakterizační faktor (CF). Tyto stanovené hodnoty jsou k dispozici v metodikách LCIA. Příkladem může být kategorie dopadu Globální oteplování s charakterizačním faktorem GWP (potenciál globálního oteplování) vyjádřeným v jednotkách výsledku indikátoru kategorie dopadu $\text{kg CO}_2\text{-eq}$. Oxid uhličitý, jako základní jednotka pro vyjadřování této kategorie dopadu, má hodnotu $1 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$. Ostatní skleníkové plyny jsou pomocí svých charakterizačních faktorů následně přepočteny na ekvivalent oxidu uhličitého. Například charakterizační faktor pro oxid uhelnatý je $2 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ a pro metan $21 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$. Znamená to, že oxid uhelnatý má 2 krát větší potenciál způsobovat globální oteplování a metan 21 krát. Důležitý je však také časový horizont. GWP se nejčastěji vyjadřuje v horizontu sta let s klesající tendencí účinku. Existují však i plyny, které s rostoucím časem zvyšují svůj potenciál způsobovat globální oteplování. [1,28]

4.6.3 Normalizace

LCA jakožto komparativní metoda má za úkol porovnávat mezi sebou různé systémy. Avšak bylo by výjimkou, kdyby jeden produkt vynikal v šetrnosti ve všech kategoriích dopadů oproti ostatním porovnávaným produktům. V případě, že jeden produkt je šetrnější například k acidifikaci a druhý naopak k eutrofizaci, nastává problém volby. Tento problém

spočívá v nemožnosti porovnávání různých kategorií dopadu, protože také mají rozdílné jednotky. Cíl normalizace je proto jasný, převádí výsledky indikátorů kategorií dopadu na bezrozměrné hodnoty a umožňuje vzájemné srovnání. Normalizace vyjadřuje relativní velikost skóre dopadu na stupnici, která je společná pro všechny kategorie dopadu a tím usnadňuje interpretaci výsledků [1,28,35].

4.6.4 Vážení

Vážení nemusí nutně být součástí LCA studie. Osvětluje však významnosti kategorií dopadu s ohledem na ekonomicko-sociální hlediska. I když po normalizaci mohou být výsledky indikátoru kategorie dopadu stejné, jejich význam pro společnost se může v závažnosti lišit. [1]

4.7 Interpretace životního cyklu

Povinností zpracovatele LCA studie je utřídění a správná i srozumitelná interpretace velkého množství dat, která z celé studie vystupují. V zájmu co nejmenšího ovlivnění výsledků interpretací byla zavedena pravidla, kterými se zpracovatel studie řídí. Důležitým krokem je identifikace parametrů (procesů a hlavních vstupujících a vystupujících toků), které mají největší vliv na životní prostředí. Následuje zhodnocení citlivosti studie, úplnosti a kvality dat. Výsledkem LCA studie jsou závěry a doporučení pro zadavatele, které zpracovatel vyhodnotil z analýzy fází LCI a LCIA. [1]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část diplomové práce představí praktické využití metody LCA pro posouzení dopadů na životní prostředí stavební technologie NRTM.

5.1 Definice cílů a rozsahu

5.1.1 Funkce produktu

Funkcí Nové Rakouské tunelovací metody je výstavba tunelu.

5.1.2 Funkční jednotka a referenční tok

Funkční jednotkou s referenčním tokem je pro tuto technologii 1 tunel o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² ražený metodou NRTM realizovaný za dobu 18 měsíců.

5.1.3 Hranice systému

V tomto případě byla zvolena zúžená studie formou „od kolébky k bráně“ (anglicky „cradle to gate“). Mapovány byly tedy toky od použitých materiálů pro NRTM po vlastní užití technologie, tj. výstavbu tunelu s primárním ostěním. Procesy produktového systému byly zvoleny podle logických celků, ve kterých NRTM postupuje.

Přeprava exploziv a betonářské oceli není ve studii zahrnuta z důvodu jednorázových dodávek. Zahrnuta je však přeprava betonové směsi a rubaniny, která probíhala pravidelně.

Ve studii rovněž nejsou zahrnuty lidské zdroje.

5.1.4 Procesy produktového systému

První proces je nazván „Vrtání.“ Jedná se o vrtací práce, u kterých byla sledována především spotřeba vody. Spotřeba vody je udávána strojem Boomer T1D, který vodu nutně potřebuje pro chlazení vrtacího zařízení, které se při kontaktu s horninovým masivem zahřívá.

Následuje proces „Trhání,“ kde byly sledovány trhaviny a detonátory.

Další dva procesy probíhající souběžně jsou „Betonáž“ a „Kotvení.“ Pro Betonáž byla sledována spotřeba suché betonové směsi a vody. U procesu Kotvení sledování podléhala spotřeba cementové směsi společně se spotřebou betonářské oceli použité na radiální kotvy, kari sítě a rámy.

Jako procesy za celou stavbu byly zavedeny „Režijní nafta,“ „Režijní elektřina“ a „Režijní voda.“ Z důvodu bezpečnosti, ekologie a celkově zlepšení ovzduší v troubě tunelu většina důlních strojů pracuje na hybridní pohon. Pojezdy v tunelu tedy spalují naftu, ale vlastní práci strojů (například navrtávání čelby) pohání elektrická energie. Větrání tunelu udává spotřebu elektrické energie z nadpoloviční většiny.

Jako poslední byla za pomoci alokace vyřešena i životnost důlních strojů. Pracovalo se s dobou, kterou stroj stráví na stavbě s ohledem na životnost, která je pro stroj navržena výrobcem. Důlní stroje mají navrhovanou životnost nižší, než stroje pracující na pozemních stavbách kvůli náročnějším podmínkám. Obvykle se tato životnost pohybuje mezi 6-8mi lety. Servisní odstavení strojů nebylo bráno v úvahu z důvodu jeho minoritního podílu. Důvodem je neustálá práce strojů. Jelikož nemají velmi dlouhou životnost, je snaha stroje maximálně využít. V případě, že Subterra a.s. aktuálně nějaký stroj sama nevyužije, je možné ho přemístit například na stavbu její mateřské společnosti. Byla navštívena i půjčovna strojů, kde je prováděn i servis. Aktuálně byl servis prováděn u dvou důlních strojů, všechny ostatní stroje jsou nasazeny v práci. [23]

5.1.5 Použitá databáze

Softwarovým a databázovým zdrojem poskytujícím podklady pro vypracování studie LCA je GaBi 6 PE International, Německo v poslední aktualizované verzi (GaBi 6.0. PE International). Toto softwarové zázemí bylo zvoleno pro svou reprezentativnost především pro střední Evropu. GaBi obsahuje nejen environmentální data, ale také nabízí hledisko technické a socio-ekonomické. Pracuje samozřejmě v souladu se stanovenými ISO normami pro LCA. [3,36]

Základním problémem sestavování LCA studie je dostupnost spolehlivých a vhodných dat. GaBi je v současné době databází, která pravděpodobně obsahuje nejvyšší počet dostupných dat z odvětví stavebnictví. Výhodou GaBi je rovněž integrovaná databáze ecoinvent. Mezi Německem, odkud GaBi pochází, a ostatními státy existují totiž rozdíly. Tento rozdíl je například patrný při výrobě oceli, kdy GaBi udává nižší spotřeby elektrické energie než okolní státy. Tento rozdíl je způsoben vyšší mírou využívání obnovitelných zdrojů energie v Německu a specifickou výrobou oceli v této zemi. Ecoinvent však pracuje s průměrnou produkcí světa i Evropy, proto je v takovýchto případech ideální moci využít i tuto databázi. [3,37]

5.1.6 Charakterizační model

Jako charakterizační model byla zvolena metodika CML 2001. Zvolené midpointové kategorie dopadu jsou Úbytek abiotických zdrojů, Acidifikace, Eutrofizace, Sladkovodní ekotoxicita, Globální oteplování, Humánní toxicita, Marinní ekotoxicita, Úbytek stratosférického ozónu, Vznik fotooxidantů a Terestrická ekotoxicita. [1,33]

5.2 Inventarizační analýza (LCI)

V této části práce bude především uveden výčet jednotlivých procesů a do nich vstupujících a vystupujících toků.

5.2.1 Zdroj dat

Nezbytná data pro sestavení studie LCA o Nové Rakouské tunelovací metodě poskytla stavební společnost Subterra a.s.. Pro zajištění efektivní spolupráce bylo společností Subterra a.s. umožněno navštěvovat probíhající výstavbu Průzkumné geologické štoly tunelu Radlice. V místě realizace stavby tak bylo možné opakovaně provádět měření i monitoring. Tato osobní spolupráce umožnila zpracovateli LCA studie lepší porozumění technologii a tím i získávání vhodných a potřebných dat. Data pro fázi LCIA byla čerpána z databáze softwaru GaBi 6. [23,36]

5.2.2 Alokace

V této studii byla použita alokace pro vyjádření, jakou část své navrhované životnosti důlní stroje pracovaly na realizaci Průzkumné geologické štoly tunelu Radlická. Jak již bylo uvedeno, životnost důlních strojů se pohybuje průměrně mezi 6-8 lety. Pro účely studie byla vybrána nižší hranice životnosti, tedy 6 let. Stroje na stavbě pracovaly 18 měsíců, což odpovídá 25% jejich životnosti.

5.2.3 Procesy produktového systému

Pro hodnoty základních materiálů následných produktů byl vždy využit softwarový nástroj GaBi.

Proces „Vrtání“

Proces vrtání je charakterizován důlním strojem Boomer T1D, který využívá při navrtávání čelby tunelu vodu. Využívaná voda je standardně upravená, tedy napojená na městský rozvod vody. Výstupem tohoto procesu je tedy odpadní voda. Pro vstupní i výstupní vodu byl použit již namodelovaný proces z databázového zdroje GaBi 6. [23,36]



Autor: Alice Pokorná

Obr. 5 Důlní stroj Boomer T1D
navrtávající čelbu tunelu

Proces „Trhání“

Vstupy procesu Trhání jsou především detonátory a trhaviny. Hlavní složky detonátorů se pohybují v řádech maximálně miligramů. Hlavní nadpoloviční složkou obou použitých trhavin EURODYN 2000 30/380/400g a Senatel™ Powerfrag™ je dusičnan amonný. [38] Prachové částice z odstřelu by na okolí stavby neměly mít velký vliv. Na začátku ražby je vzduch z trouby odčerpáván kompresory a veden přes mokrý odlučovač prachu. V dalším postupu stavby je trouba již natolik dlouhá, že se částice prachu usadí a vzduch je přiváděn na čelbu tunelu, aby bylo dílo dostatečně provzdušněné. [23]

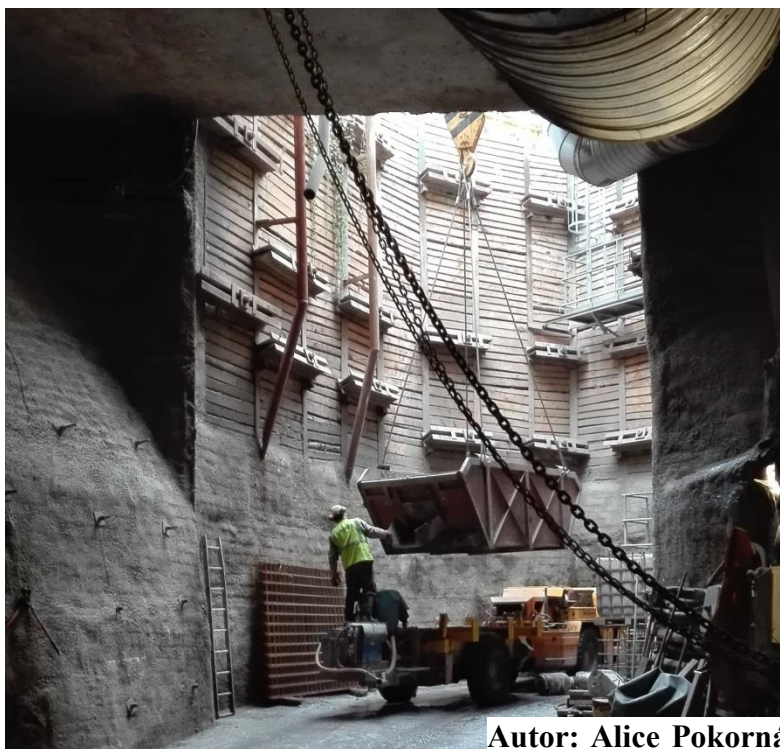
Výstupem tohoto procesu je množství odtěžené rubaniny. Rubaninu je nutné naložit do kontejneru, odvézt k těžní šachtě, vyzvednout a odvézt na skládku. Nakladač rubaniny pracuje na elektrický pohon, avšak pojezdy strojů v tunelu stejně jako odvoz rubaniny vozem Tatra spotřebovávají naftu. Spotřeba nafty je tak také výstupem tohoto procesu.

Pro dieslová paliva, vůz Tatra i rubaninu odvezenou na skládku byly použity již namodelované procesy z databázového zdroje GaBi 6. [36]

Proces „Betonáž“

V tomto procesu je opět zahrnuta nafta, která je nutná pro dovoz betonážní směsi. Betonážní směs se skládá z cementu CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, drobného kameniva o průměru zrna 0-4 mm, hrubého kameniva o průměru zrna 3-8 mm, vody a urychlovače MasterRoc SA 190. Používaná voda je ze stejného městského zdroje jako v případě navrtávání čelby tunelu. [3,23,39]

Pro všechny komponenty betonáže byly použity procesy již obsažené v databázovém zdroji GaBi 6.



Autor: Alice Pokorná

Obr. 6 Vyzvednutí kontejneru jeřábem RDK 300 z důlního vozidla PAUS Universa

Proces „Kotvení“

Toky procesu kotvení jsou spotřeba betonářské oceli, cement CEM II 42,5 R a voda. Cementová směs, kterou jsou injektovány kotvy se skládá z cementu a vody. Voda je používána jako v ostatních případech z městské rozvodné sítě. Všechny komponenty kotev, kari sítí i rámu jsou z betonářské oceli, která je jako proces již součástí databázového zdroje GaBi 6. [23,36,40]

Proces „Režijní nafta“

Objem režijní nafty vznikl odečtením nafty spotřebované na transport materiálu vozy Tatra od celkového objemu spotřebované nafty za celou stavbu. Režijní nafta tedy odpovídá spotřebě důlních strojů na pojezdy v troubě tunelu. [23,36]

Proces „Režijní elektřina“

Proces režijní elektřiny reprezentuje spotřebu elektřiny za celou stavbu. Nadpoloviční většinu elektřiny spotřebovává větrání tunelu, které je s jeho rostoucí délkou stále náročnější. Zbylá elektřina zahrnuje především práci strojů, které mají hybridní pohony a naftu spotřebovávají výhradně na pojezdy. Proces elektřiny byl z databáze GaBi 6 vybrán reprezentativní pro Českou republiku, tedy především z tepelných elektráren na spalování uhlí. [23,36,41]

Proces „Režijní voda“

Režijní voda je veškerá spotřebovaná voda na stavbě po odečtení vody spotřebované na vrtání a do cementové a betonové směsi.

Většina této vody je spotřebována na umývání důlních strojů. V rámci udržení maximální možné životnosti nákladných důlních strojů, je nutné o ně neustále pečovat. Minoritní část vody spotřebovává personál stavby pro své potřeby. [23]

Pro vstup i výstup vody z produktového systému byl použit již namodelovaný proces z databázového zdroje GaBi 6. [36]



Autor: Alice Pokorná

Obr. 7 Kalové čerpadlo

Proces „Důlní stroje“

Pro pracující důlní stroje byl použit již namodelovaný proces z databázového zdroje GaBi 6. Po ukončení životnosti stroje jsou kovové části stroje recyklovány. [23,36]

5.2.4 Inventarizace

Následující tabulka představuje inventarizační data, která byla poskytnuta stavební společnosti Subterra a.s. pro potřeby studie. Inventarizační data byla získávána v průběhu let 2014 a 2015. [23]



Autor: Alice Pokorná

Obr. 8 Údržba stroje

Tab. 2 Vstupy a výstupy produktového systému

	Materiálové a energetické toky	Spotřeba	Jednotka
Vstupy	Beton SB C 20/25 X0	3 361	m ³
	CEM II 42,5 R	5,666	t
	Betonářská ocel	104,729	t
	Režijní nafta	50 830,400	l
	Voda na vrtání	1 016,137	m ³
	Režijní voda	1 876,440	m ³
	Režijní elektřina	71,931	MWh
	EURODYN 2000 30/380/400 g	13,253	t
	Senatel™ Powerfrag™	14,033	t
Detonátory	29 204	ks	
Výstupy	Odpadní voda	1 876,440	m ³
	Skládkovaný materiál	17 071	m ³

Vzdálenosti uvažované při inventarizaci jsou 2,6 km ze staveniště na skládku odpadu a 8 km ze staveniště do betonárny.

Tab. 3 Složení stříkaného betonu

Složení betonu SB C 20/25 X0	Spotřeba na 3361 m ³ betonu	Jednotka
Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	1 512,450	t
Drobné kamenivo 0-4 mm	2 991 290	m ³
Hrubé Kamenivo 4-8 mm	2 453 530	m ³
Voda	739,420	m ³
Urychlovač MasterRoc SA 190	108,759	t

Pro podrobnější mapování nejvíce užívaného materiálu, kterým je stříkaný beton, byly modelovány materiálové toky přesně podle receptury stříkaného betonu poskytnuté stavební společnosti Subterra a.s.. [23]

Tab. 4 Složení detonátorů v rozmezí dolní i horní možné hranice

Složení detonátorů	Spotřeba na 29 204 ks detonátorů	Jednotka
Azid olovnatý $Pb(N_3)_2$	181,770-203,970	g
PETN $C(CH_2ONO_2)_4$	13 787,380-27 241,050	g
RDX $(CH_2-N-NO_2)_3$		

Pro zajištění úplnosti studie byl navázán kontakt i s dodavatelem detonátorů. Dodavatel poskytl přesné složení rozbušek. Detonátorů bylo použito více druhů, avšak všechny obsahují stejné složky. Hlavní složkou detonátorů je buď Pentrit (PETN), nebo Hexogen (RDX). V menším množství rozbušku doplňuje Azid olovnatý. U jednoho typu rozbušek Azid olovnatý používán není. [42]

Složení na 1 kus rozbušky je udáváno v určitém rozmezí. Například Azid olovnatý se pohybuje v rozmezí 45-60 mg/ks. Pro potřeby studie byla uvažována horní hranice složení. Avšak i když se v celkovém součtu jedná o téměř tři desítky kilogramů, v porovnání se stovkami tun cementu nebyl vysloven předpoklad, že by detonátory hrály významnou roli ve výsledku studie. [42]

5.2.5 Práce v programu GaBi 6

V softwarovém nástroji GaBi 6 byly předešlé procesy propojeny v jeden produktový systém vymezený svými hranicemi. GaBi také umožňuje procesy skládat do skupin. Pokud je tedy zájmem z NRTM vyjádřit vliv na životní prostředí například skupin jako je Stavební odvětví, Odpadové hospodářství, Elektrická energie a Transport, je to možné.

5.3 Hodnocení dopadů na životní prostředí (LCIA)

Po dokončení inventarizační fáze byly její výsledky použity pro vyhodnocení dopadů na životní prostředí. Software GaBi 6 obsahuje potřebné charakterizační faktory pro všechny elementární toky dotýkající se produktového systému. Pomocí GaBi 6 byly tedy výsledky inventarizace přiřazeny jednotlivým kategoriím dopadu podle metodiky CML 2001.

Následující tabulky zobrazují absolutní hodnoty vztažené k funkční jednotce produktového systému, tedy tunelu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² realizovaného za dobu 18 měsíců metodou NRTM. V tabulkách zobrazujících procentuální zastoupení jsou barevně odlišeny hodnoty nedosahující 1% a překračující 15%. Hodnoty pod jedno procento jsou ve výsledku studie zanedbatelné. Naopak hodnoty přesahující patnáct procent byly zvýrazněny jako ekologicky významnější.

Tab. 5 1. část vyhodnocení dopadů 1 tunelu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² vystavěný za dobu 18 měsíců na jednotlivé kategorie dopadu pomocí charakterizačního modelu CML 2001

Charakterizační profil - vyjádřeno v ekvivalentních jednotkách kategorií dopadu (1. Část)							
Charakterizace provedena: CML2001 - Duben 2015	Tunel CELKEM Tab.5+6	Elektřina	Cement (CEMII 42.5)	Urychlovač tuhnutí	Kamenivo 2-32 mm	Nafta	Skládkování inertního materiálu
Úbytek minerálních surovin (ADP elements) [kg Sb-Eq.]	3,7	0	2,1	0,1	0	0	0,3
Acidifikace (AP) [kg SO ₂ -Eq.]	8 089	136	1 334	215	137	120	4 437
Eutrofizace (EP) [kg PO ₄ ³⁻ -Eq.]	1 515	12	148	33	22	20	603
Sladkovodní ekotoxicita (FAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	146 286	68	777	261	91	871	3 420
Globální oteplování (GWP 100 let) [kg CO ₂ -Eq.]	2 584 088	51 914	1 077 122	139 231	153 566	12 949	740 156
Globální oteplování (GWP 100 let), vč. Biogen. Uhlíku [kg CO ₂ -Eq.]	2 503 296	51 864	1 007 624	137 529	153 674	21 394	735 140
Humánní toxicita (HTP inf.) [kg DCB-Eq.]	495 635	1 599	220 303	2 807	1 278	3 487	47 988
Mořská ekotoxicita (MAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	773 373 661	3 481 285	29 942 394	5 139 880	1 480 385	1 917 010	157 342 182
Úbytek stratosférického ozonu (ODP) [kg CFC-11-Eq.]	0	0	0	0	0	0	0
Vznik fotooxidantů (POCP) [kg C ₂ H ₄ -Eq.]	745	11	178	32	17	20	426
Terestrická ekotoxicita (TETP inf.) [kg DCB-Eq.]	24 657	41	1 300	95	107	337	18 033

Tab. 6 2. část vyhodnocení dopadů 1 tunelu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² vystavěný za dobu 18 měsíců na jednotlivé kategorie dopadu pomocí charakterizačního modelu CML 2001

Charakterizační profil - vyjádřeno v ekvivalentních jednotkách kategorií dopadu (2. Část)								
Charakterizace provedena: CML2001 - Duben 2015	Tunel CELKEM Tab.5+6	Odpadní voda	Upravená voda	Důlní stroje	Doprava	Betonářská ocel	Detonátory	Explosiva (Tovex)
Úbytek minerálních surovin (ADP elements) [kg Sb-Eq.]	3,7	0	0	0,5	0	0,1	0	0,6
Acidifikace (AP) [kg SO ₂ -Eq.]	8 089	14	1,7	65	274	544	0,8	810
Eutrofizace (EP) [kg PO ₄ ³⁻ -Eq.]	1 515	21	0,8	6,8	72	346	0,2	230
Sladkovodní ekotoxicita (FAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	146 286	128	5,8	108	0,2	103 146	37	37 373
Globální oteplování (GWP 100 let) [kg CO ₂ -Eq.]	2 584 088	13 779	1 523	22 937	75 539	150 886	141	144 345
Globální oteplování (GWP 100 let), vč. Biogen. uhlíku [kg CO ₂ -Eq.]	2 503 296	2 185	744	23 590	71 775	151 475	143	146 159
Humánní toxicita (HTP inf.) [kg DCB-Eq.]	495 635	306	72	4 476	227	93 429	117	119 546
Mořská ekotoxicita (MAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	773 373 661	3 355 662	166 786	3 294 932	0	190 320 007	368 160	376 564 978
Úbytek stratosférického ozonu (ODP) [kg CFC-11-Eq.]	0	0	0	0	0	0	0	0
Vznik fotooxidantů (POCP) [kg C ₂ H ₄ -Eq.]	745	0,8	0,2	7,7	-125	122	0,1	55
Terestrická ekotoxicita (TETP inf.) [kg DCB-Eq.]	24 657	33	2,7	312	0	3 254	1,1	1 141

Tab. 7 Procentuální zastoupení vyhodnocení dopadů 1 tunelu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² vystavěný za dobu 18 měsíců na jednotlivé kategorie dopadu pomocí charakterizačního modelu CML 2001. Žlutě jsou zvýrazněny hodnoty menší než 1%, červeně jsou zvýrazněny hodnoty větší než 15%.

Charakterizační profil - procentuální vyjádření														
Charakterizace provedena: CML2001 - Duben 2015	Tunel	Cement					Skládkování		Upravená	Důlní	Betonářská		Explosiva	
	CELKEM (%)	Elektřina	(CEM II 42.5)	Urychlovač tuhnutí	Kamenivo 2-32 mm	Nafta	inertního materiálu	Odpadní voda	voda	stroje	Doprava	ocel	Detonátory	(Tovex)
Úbytek minerálních surovin (ADP elements) [kg Sb-Eq.]	100	0,3	55,9	1,7	0,4	0,3	6,9	0	0	14,6	0	3,1	0	17
Acidifikace (AP) [kg SO ₂ -Eq.]	100	1,7	16,5	2,7	1,7	1,5	54,9	0,2	0	0,8	3,4	6,7	0	10
Eutrofizace (EP) [kg PO ₄ ³⁻ -Eq.]	100	0,8	9,8	2,2	1,5	1,3	39,8	1,4	0	0,4	4,7	22,8	0	15,2
Sladkovodní ekotoxicita (FAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,1	0,5	0,2	0,1	0,6	2,3	0,1	0	0,1	0	70,5	0	25,5
Globální oteplování (GWP 100 let) [kg CO ₂ -Eq.]	100	2	41,7	5,4	5,9	0,5	28,6	0,5	0,1	0,9	2,9	5,8	0	5,6
Globální oteplování (GWP 100 let), vč. Biogen. uhlíku [kg CO ₂ -Eq.]	100	2,1	40,3	5,5	6,1	0,9	29,4	0,1	0	0,9	2,9	6,1	0	5,8
Humánní toxicita (HTP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,3	44,4	0,6	0,3	0,7	9,7	0,1	0	0,9	0	18,9	0	24,1
Mořská ekotoxicita (MAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,5	3,9	0,7	0,2	0,2	20,3	0,4	0	0,4	0	24,6	0	48,7
Úbytek stratosférického ozonu (ODP) [kg CFC-11-Eq.]	100	0	0	0,1	0	0	0,1	0	0	1,8	0	44,1	0,1	53,8
Vznik fotooxidantů (POCP) [kg C ₂ H ₄ -Eq.]	100	1,5	23,9	4,2	2,3	2,6	57,3	0,1	0	1	-16,8	16,4	0	7,4
Terestrická ekotoxicita (TETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,2	5,3	0,4	0,4	1,4	73,1	0,1	0	1,3	0	13,2	0	4,6

Tab. 8 Procentuální zastoupení vyhodnocení dopadů jednotlivých skupin stavebních prací 1 tunelu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² vystavený za dobu 18 měsíců na jednotlivé kategorie dopadu pomocí charakterizačního modelu CML 2001. Žlutě jsou zvýrazněny hodnoty menší než 1%, červeně jsou zvýrazněny hodnoty větší než 15%.

Skupiny stavebních prací - procentuální vyjádření										
Charakterizace provedena: CML2001 - Duben 2015	Tunel CELKEM (%)	Vrtání	Trhání	Detonátory	Betonáž	Kotvení	Důlní stroje	Režijní voda	Režijní elektrina	Režijní nafta
	Úbytek minerálních surovin (ADP elements) [kg Sb-Eq.]	100	0	23,9	0,1	57,9	3,3	14,6	0	0,1
Acidifikace (AP) [kg SO ₂ -Eq.]	100	0,1	65,9	0,9	24	6,8	0,8	0,1	0,8	0,6
Eutrofizace (EP) [kg PO ₄ ³⁻ -Eq.]	100	0,5	56,3	0,4	17,5	22,9	0,4	0,9	0,4	0,6
Sladkovodní ekotoxicita (FAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0	28	0	1	70,5	0,1	0,1	0	0,3
Globální oteplování (GWP 100 let) [kg CO ₂ -Eq.]	100	0,2	35	1,1	55,3	6	0,9	0,3	0,9	0,2
Globální oteplování (GWP 100 let), vč. Biogen. uhlíku [kg CO ₂ -Eq.]	100	0,1	36	1,1	54,3	6,2	0,9	0,1	0,9	0,4
Humánní toxicita (HTP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0	33,9	0,2	45,4	19	0,9	0	0,1	0,3
Mořská ekotoxicita (MAETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,2	69,1	0,2	4,8	24,6	0,4	0,3	0,2	0,1
Úbytek stratosférického ozonu (ODP) [kg CFC-11-Eq.]	100	0	53,9	0	0,2	44,1	1,8	0	0	0
Vznik fotooxidantů (POCP) [kg C ₂ H ₄ -Eq.]	100	0,1	60,9	0,8	18,8	16,5	1	0,1	0,7	1,1
Terestrická ekotoxicita (TETP inf.) [kg DCB-Eq.]	100	0,1	78	0,1	6,6	13,2	1,3	0,1	0,1	0,6

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této části diplomové práce jsou interpretovány výsledky LCIA fáze.

6.1 Interpretace životního cyklu

V této práci byla posouzena ražba tunelové stavby metodou NRTM. Předmětem práce bylo jak vlastní posuzování životního cyklu stavby, tak i odhalení příspěvku výroby materiálů i vlastních stavebních prací prováděných na místě výstavby. Všechny výsledky se vztahují k jednomu podzemnímu dílu o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² realizovaného za dobu 18 měsíců metodou NRTM.

Tabulky 5 a 6 představují midpointové výsledky LCIA fáze studie. Jedná se o absolutní hodnoty vyjádřené v ekvivalentních jednotkách příslušných jednotlivým kategoriím dopadu. Související Tabulka 7 zobrazuje relativní zastoupení týchž skupin v každé midpointové kategorii. V této tabulce jsou barevně odlišeny hodnoty, jejichž podíl na celkových dopadech životního cyklu je minoritní (žlutá barva) a hodnoty významnější (červená barva).

Tabulka 8 zobrazuje začlenění předešlých skupin do jednotlivých procesů, neboli skupin stavebních prací, které tvoří postup Nové Rakouské tunelovací metody. Tato tabulka představuje relativní zastoupení jednotlivých skupin stavebních prací. Také jsou barevně rozlišeny jednotlivé hodnoty, podle stejného klíče jako v případě Tabulky 7.

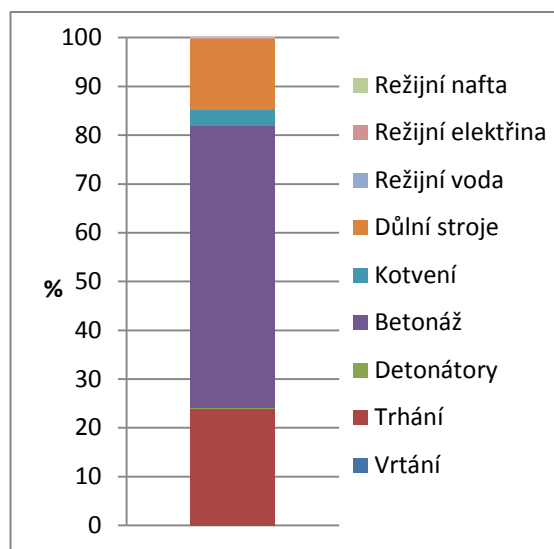
Všechny procesy zmíněné ve výsledcích jsou vysvětleny v předchozích kapitolách.

V následujících kapitolách jsou interpretovány výsledky prezentované v LCIA fázi podle jednotlivých kategorií dopadu.

6.1.1 Úbytek minerálních surovin

Úbytek minerálních surovin je očekávaným dopadem na životní prostředí. V rámci betonáže i případného odtěžení rubaniny ho lze očekávat. Jeden tunel o délce 850 m s plochou příčného řezu 13,46 m² realizovaného za dobu 18 měsíců Novou Rakouskou tunelovací metodou reprezentuje kolem 3,7 kg Sb ekvivalentu úbytku minerálních surovin.

Přičemž z 57,9% je za tuto spotřebu zodpovědný proces Betonáže a z 23,9%

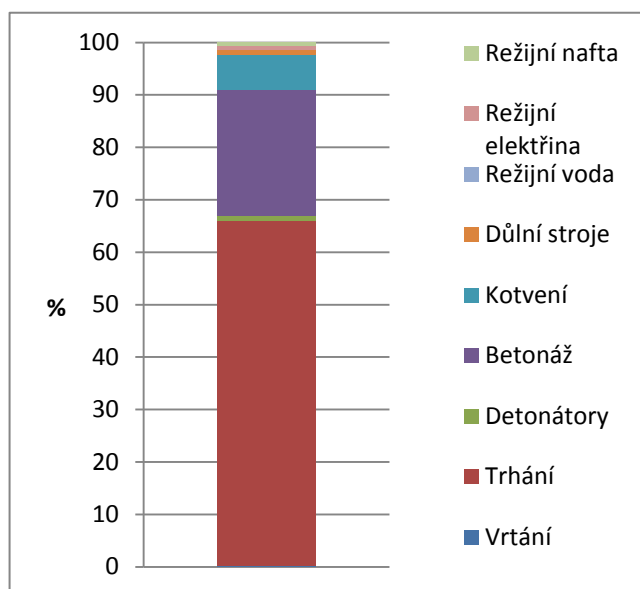


Obr. 9 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Úbytek minerálních surovin

proces Trhání. Dopady úbytku surovinových zdrojů jsou v těchto skupinách stavebních prací nejvýraznější z důvodu nejvyšší spotřeby primárních surovin. [43] Betonáž spotřebovává jemné a hrubé kamenivo, které je těženo. Stejně tak je těžen vápenec a jíly jako hlavní složky výroby cementu do betonové směsi. Trhací práce jsou díky tunám spotřebovaných výbušnin podobně náročné na spotřebu dusičnanu amonného, ethyleneglycol dinitrátu, a dusičnanu sodného. [38]

6.1.2 Acidifikace

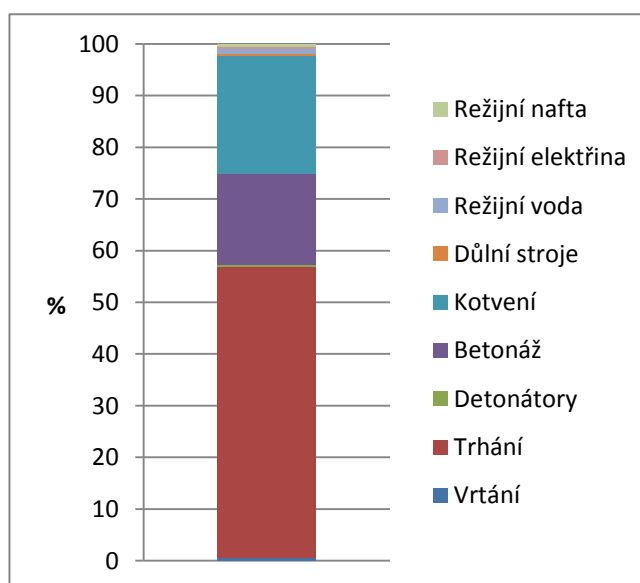
Stejné podzemní dílo reprezentuje 8 089 kg SO₂ ekvivalentu. Podobně se uplatňují především dvě skupiny stavebních prací a to Trhání z 65,9% a Betonáž z 24%. V procesu trhání se jedná opět o zmíněné složky výbušnin, tedy především soli kyseliny dusičné. Majoritní podíl však v tomto případě má skládkování odtěžené rubaniny. V procesu Betonáže figurují především emise oxidů dusíku a oxid siřičitý, které jsou produkovány při vypalování slínku ve vysokých pecích.



Obr. 10 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Acidifikace

6.1.3 Eutrofizace

Dopady eutrofizace představuje 1 515 kg PO₄³⁻ ekvivalentu. Z 56,3% je eutrofizace zapříčiněna trhacími pracemi. Opět se jedná majoritně o vliv skládkování odtěžené rubaniny, kde může docházet k výluhu živin. V kombinaci s menším vlivem exploziv. Druhý největší podíl na této kategorii dopadu představuje z 22,9% Kotvení, kde jsou stěžejní emise z produkce betonářské oceli. Poslední skupinou stavebních prací je Betonáž se 17,5%.

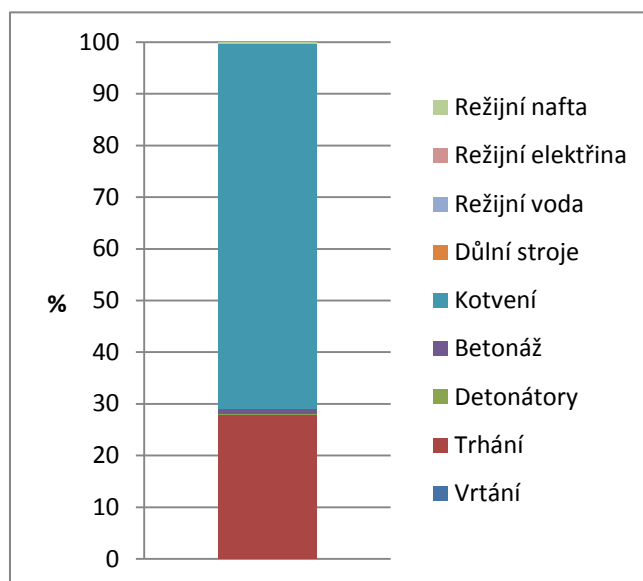


Obr. 11 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Eutrofizace

Dopady způsobené Betonáží a částečně i Kotvením jsou utvářeny výrobou cementu.

6.1.4 Sladkovodní Ekotoxicita

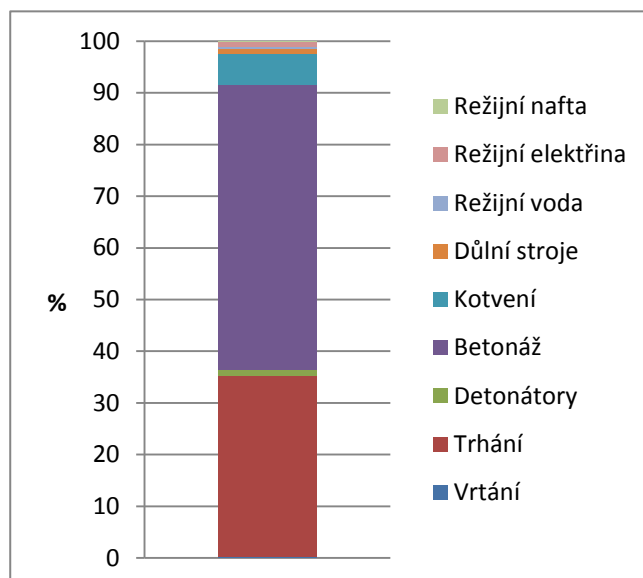
Sledované podzemní dílo se podílí na kategorii dopadu Sladkovodní ekotoxicita 146 286 kg DCB ekvivalentu. Ze 70,5% tuto hodnotu reprezentuje Kotvení a z 28% Trhání. Dopady na životní prostředí z procesu Kotvení způsobuje výroba betonářské oceli s potenciálem uvolňování těžkých kovů. Z procesu Trhání mají negativní dopady na životní prostředí exploziva.



Obr. 12 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Sladkovodní ekotoxicita

6.1.5 Globální oteplování

Kategorie dopadu Globální oteplování byla přepokládána jako stěžejní emisní zdroj celé NRTM. Sledované tunelářské dílo vydá v kategorii dopadu Globální oteplování v horizontu 100 let 2 584 088 kg CO₂ ekvivalentu. Procesy Betonáže a Trhání jsou zodpovědné za 55,3% a 35% těchto emisí. Betonáž je hlavním emisním zdrojem díky cementu, který se na produkci oxidu uhličitého podílí masivně. Emise procesu trhání jsou v tomto případě reprezentovány skládkováním odtěžených rubanin. Naopak vliv dopravy materiálu na stavenišť a odtěžených rubanin ze staveniště je v této kategorii dopadu zastoupen pouze necelými 3%. Ačkoli je obecně spalování fosilních paliv významným zdrojem skleníkových plynů, v tomto případě emisní zdroje pocházející z cementu silně převažují.

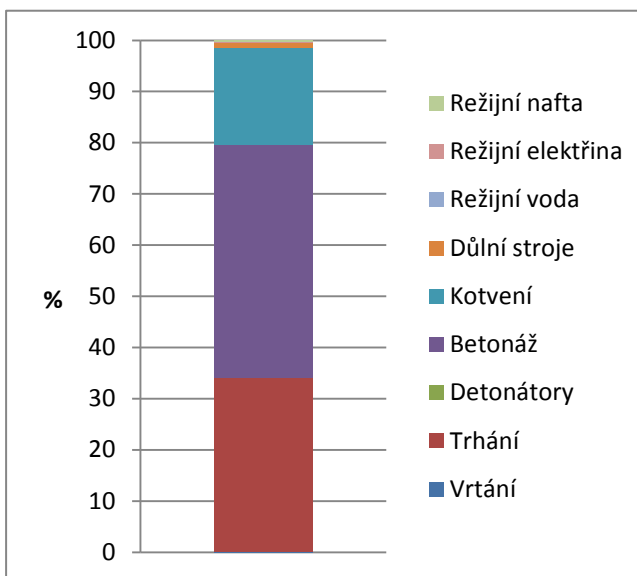


Obr. 13 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Globální oteplování

Kategorie dopadu globální oteplování včetně biogenního uhlíku udává mírně nižší hodnoty. Konkrétní pokles kg CO₂ ekvivalentu na hodnotu 2 503 296 je způsoben biogenním pohlcováním CO₂ v průběhu fotosyntézy.

6.1.6 Humánní toxicita

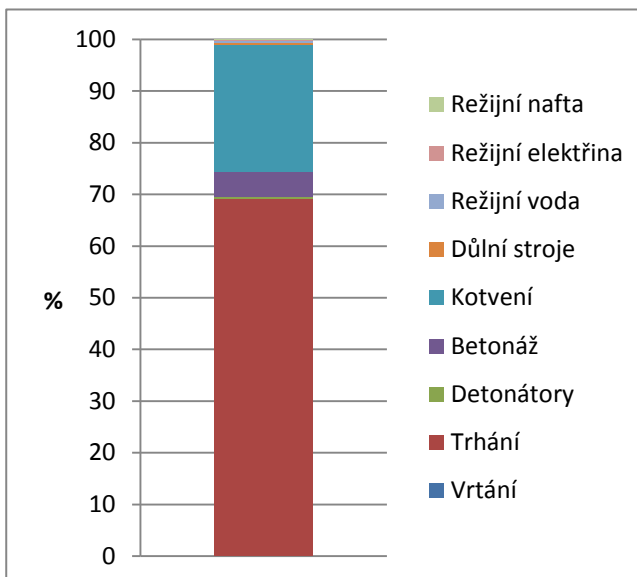
Nepříznivé účinky na zdraví člověka představuje 495 635 kg DCB ekvivalentu. 45,4% zastupuje Betonáž, 33,9% Trhání a 19% Kotvení. Hlavním zdrojem Betonáže je opět cement. Člověku nebezpečné je vlastní užívání, kdy v kontaktu člověka s cementem dochází k dermatitidám, alergiím, podráždění dýchací soustavy a rohovky. Stejně tak mají vliv na zdraví člověka i látky uvolňované při výrobě cementu, například dioxiny a kontaminace kovy. Kontaminace kovy se týká i procesu Kotvení zastoupeném výrobou betonářské oceli a opět cementem užívaným v cementové kotvící směsi. Proces Trhání reprezentuje výroba exploziv v kombinaci s menším vlivem skládkování odtěžené rubaniny.



Obr. 14 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Humánní toxicita

6.1.7 Mořská ekotoxicita

Potenciál mořské ekotoxicity reprezentuje 773 373 661 kg DCB ekvivalentu. Za 69,1% emisí této kategorie dopadu je zodpovědný proces Trhání a za 24,6% proces Kotvení. Hlavním emisním zdrojem je výroba a užívání exploziv. Dalšími zdroji jsou výroba betonářské oceli a skládkování odtěžené rubaniny.



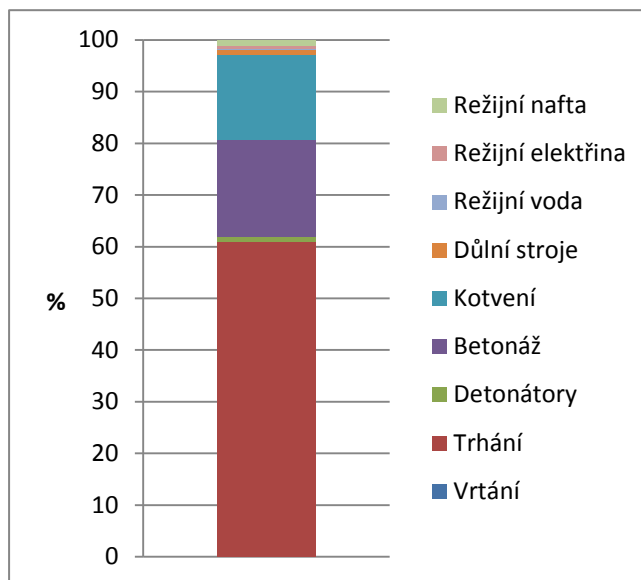
Obr. 15 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Mořská ekotoxicita

6.1.8 Úbytek stratosférického ozonu

Úbytek stratosférického ozonu byl za celou stavbu vyhodnocen jako téměř nulový.

6.1.9 Vznik fotooxidantů

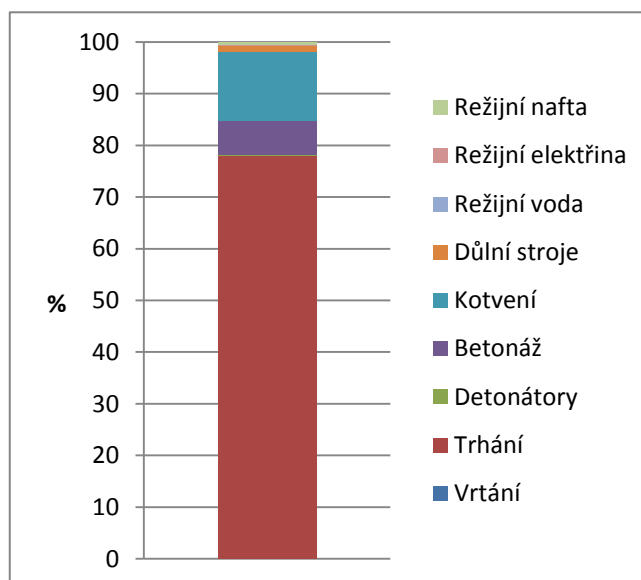
Podzemní dílo vydá za dobu své realizace 745 kg C₂H₄ ekvivalentu. Ze 60,9% se na této kategorii dopadu podílí Trhání, z 18,8 Betonáž a z 16,5 proces Kotvení. Nadpoloviční podíl na všech emisích této kategorie má skládkování odtěžené rubaniny z procesu Trhání. Z procesu Betonáže se jedná opět o cement a z procesu Kotvení o výrobu betonářské oceli.



Obr. 16 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Vznik fotooxidantů

6.1.10 Terestrická ekotoxicita

V poslední kategorii dopadu podzemní dílo produkuje 24 657 kg DCB ekvivalentu. Za majoritní podíl 78% zodpovídá proces Trhání. Očekávaným původcem těchto emisí je skládkování odtěžené rubaniny.



Obr. 17 Procentuální zastoupení skupin stavebních prací podílejících se na kategorii dopadu Terestrická ekotoxicita

6.2 Diskuze

Na základě výsledků LCA studie jsou jako hlavní emisní zdroje Nové Rakouské tunelovací metody identifikovány výroba cementu, skládkování odtěžené rubaniny, výroba betonářské oceli a exploziva. Naopak náročnost stavebních prací provozovaných přímo v místě díla se ukázala jako minoritní. Spotřebovaná voda, elektřina i diesellová paliva se často pohybují v hodnotách pod jedno procento. Dopady na životní prostředí způsobené strojovou soustavou jsou rovněž zanedbatelné.

Obecně lze jednu tunu vyprodukovaného cementu přirovnat k 0,6-1t emisí oxidu uhličitého, světově se jedná až o 7% celkových antropogenních emisí. Výroba cementu je náročná na spotřebu elektrické i tepelné energie. Elektrická energie je využívána na mletí cementu. Tepelná energie je nutná pro vytápění vysokých pecí, kde probíhá vypalování slínku při teplotách blížících se 1500°C. [44,45]

Neustálý nárůst tunelářské činnosti vede nezvratně k vyšším ekologickým nárokům na zacházení s odtěženou rubaninou. V České republice je prozatím rubanina stále klasifikována jako odpadní materiál a podle zákona skládkována. [46]

Spotřeba betonářské oceli jako další významný vliv na životní prostředí má podobné energetické nároky na výrobu jako cement. Vliv na životní prostředí je tak způsoben především nároky na provoz vysokých pecí.

Poslední hlavní příčinou vlivů na životní prostředí je používání trhavin. Spotřeba trhavin je ovlivněna několika parametry. Stěžejní parametry jsou plocha příčného řezu tunelu, délka díla, charakter horninového masivu, trhací vlastnosti exploziv, případně i městská zástavba, kdy je nutné užití opatrných trhacích prací.

V současné době je datová základna ohledně stavebních prací nedostatečná. Nová Rakouská tunelovací metoda je ohledně dopadů na životní prostředí neprozkoumanou půdou. V tomto případě tedy nelze získané výsledky s ničím srovnat. V roce 2015 byla v Norsku provedena LCA studie tunelových staveb realizovaných vrtacími a trhacími pracemi [47]. Avšak soustředila se výhradně na trhací práce, spotřeby nafty a elektřiny bez zahrnutí primárního ostění a skládkování odtěžené rubaniny jako v tomto případě u metody NRTM. Jak však prokázala tato studie, spotřeby diesellových paliv a elektřiny jsou právě v porovnání s betonážními pracemi zanedbatelné.

7 ZÁVĚR

Jedním z cílů této práce bylo posuzování životního cyklu ražby tunelové stavby metodou NRTM. Dalším cílem bylo zhodnotit příspěvek stavebních prací prováděných v místě realizace na celkových dopadech Nové Rakouské tunelovací metody. Monitoring metody probíhal při realizaci Průzkumné geologické štoly tunelu Radlická.

LCA studie byla provedena zúženou formou od kolébky k bráně (cradle- to- gate). Výsledky LCIA fáze byly následně interpretovány a diskutovány podle jednotlivých kategorií dopadu a následně i dle hlavních emisních zdrojů.

Hlavním zdrojem dopadů na životní prostředí Nové Rakouské tunelovací metody je výroba cementu. Možnost zlepšení v tomto odvětví představuje především náhrada paliv fosilních za paliva alternativní (platí i v případě betonářské oceli) [43,44]. Je vhodné snížit podíl uhelné energie a nahradit ji obnovitelnými zdroji energie, nebo jadernou energií. Jednou z možností je také využití odpadního tepla z vytápění vysokých pecí jako alternativního zdroje energie. Obecně jsou zástupným zdrojem vhodným pro spalování a vytápění pecí například odpadní materiály o vhodné výhřevnosti [48]. V případě cementu užívaného pro podzemní stavitelství je však spalování odpadů hazardem. Jelikož v tomto případě beton působí jako nosný prvek tunelu, jsou vysoké nároky na jeho vlastnosti. Spalování odpadů může do cementu uvolňovat nežádoucí látky, které následně narušují jak vlastnosti betonu, tak i vlastnosti použitých specifických urychlovačů [23].

Možnosti zlepšení ve výrobě cementu nabízí také zvýšení biologické absorpční kapacity lesů a půd. Samozřejmostí by mělo být využívání nejlepších dostupných technologií. Pokud se jedná o vlastní složení cementu, lze místo tradičně vysokoteplotně vypalovaného slínku použít alternativní suroviny. Alternativní suroviny při výrobě cementu mohou přispět ke snížení emisí CO₂ o 5-20% [44].

Jelikož je beton jedním z nejvíce užívaných materiálů světa a nejvíce spotřebovaným materiálem ve stavebnictví je nutné brát ohled na využívání minerálních zdrojů [45]. Jak bylo výše řečeno, v kategorii dopadu Úbytek minerálních surovin má beton stěžejní nároky na těžené suroviny. Hrubé a jemné kamenivo by bylo přitom možné nahradit alternativami surovinami jako například ocelářskou struskou [49]. Ke snížení dopadů na životní prostředí dochází nejen u surovinových zdrojů, ale také v případě eutrofizace [50]. Ne všechny studie srovnávající kvalitu běžného betonu a zeleného betonu z recyklátů se však shodují [43,50]. Některé předpoklady prozatím nebyly ověřeny v praxi. V situaci tunelové

stavby by proto opět takovýto beton nemusel splňovat nároky na technické a fyzikální vlastnosti.

Dalším z hlavních zdrojů dopadů na životní prostředí je skládkování odtěžené rubaniny. V některých státech mimo Českou republiku již však existuje možnost využít tento materiál, který se z velké části skládá z pevného odtěženého horninového masivu, jako granulovaný stavební materiál [51]. Tohoto granulátu lze využít například jako spodních vrstev při výstavbách silničních komunikací, parkovišť, naspů a podobně. Udržitelnosti se tak vychází vstříc jak snížením dopadů skládkování, tak i snížením rizika vytěžení lomů. V současné době byly studie na toto téma zpracovány pouze pro tunelářskou metodu razících štítů TBM (Tunnel Boring Machine) [52,53]. V oblasti NRTM je tedy pro další výzkum prostor.

Snížení dopadů na životní prostředí je v případě exploziv možné prostřednictvím zlepšení jejich trhacích vlastností [47].

Dalšími možnostmi výzkumu v této oblasti by bylo nejprve sestavení kompletní LCA studie standardního silničního tunelu. Tato studie by měla zahrnovat jak Novou Rakouskou tunelovací metodu, tak i výstavbu sekundárního ostění a silniční trasy. V případě zmapování hlavních tunelářských metod touto cestou by bylo možné následně porovnat jejich dopady na životní prostředí. Pokud by podobně byla zmapována i výstavba pozemní silniční komunikace s vyhodnocenými dopady na životní prostředí v kategorii dopadu Změna využití půdy, bylo by možné v případě potřeby porovnat i tyto odlišné způsoby výstavby umožňující dopravu.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] Kočí, V. (2009): Posuzování životního cyklu. *Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor spol s.r.o., 264 str.*
- [2] Guinée, J. B (2002): Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *Kluwer Academic Publishers: Dordrecht; Boston 708 str.*
- [3] Takano, A., Winter, S., Hughes, M., Linkosalmi, L. (2014): Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment 79, 20-30*
- [4] Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Rydberg, T., Ekvall, T. (2010): Life cycle assessment: past, present, and future. *Environmental science & technology 45, 90-96*
- [5] Kovári, K. (2003): History of the sprayed concrete lining method—part I: milestones up to the 1960s. *Tunnelling and Underground Space Technology 18, 57-69*
- [6] Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., Daiyan, M. (2012): Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas – The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology 31, 1-8*
- [7] Zimmermann, M., Althaus, H.-J., Haas, A. (2005): Benchmarks for sustainable construction: A contribution to develop a standard. *Energy and Buildings 37, 1147–1157*
- [8] Steger S., Bleischwitz R. (2011): Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production 19, 816–826*
- [9] Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W. (2004): Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International 30, 701–720*

- [10] Kovári, K. (2003): History of the sprayed concrete lining method—part II: milestones up to the 1960s. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, 71-83
- [11] NRTM – Od stavební metody k systému, dostupné na adrese http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2013/2/tunel_2_13-07.pdf 23.8.2016
- [12] Shanga, Y., Li, K., He, W., Sheng, Ch. (2014): From the new Austrian tunneling method to the geoenvironment condition evaluation and dynamic controlling method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6, 366-372
- [13] Leu, S.-S., Chang, S.-L. (2004): Digital image processing based approach for tunnel excavation faces. *Automation in Construction* 14, 750-765
- [14] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vyvoj-podzemniho-stavitelstvi-v-ceske-republice/> Dostupné: 23.8.2016
- [15] Aldorf, J., Hasík, O., Horák, V., Mařík, L., Novotný, M., Rozsypal, A., Soukup, V., Srb, M., Stečinský, B., Stehlík, E., Vajsar, K. (2006): Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR. *Český tunelářský komitét ITA/AITES*, 45 str.
- [16] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/nova-rakuska-tunelovacia-metoda/> Dostupné: 23.8.2016
- [17] <http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&s=mosty-7-clanek9> Dostupné: 23.8.2016
- [18] Porovnání metod NRTM a Adeco- RS na příkladu Italského tunelu Monte Cuneo, dostupné na adrese http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2009/1/tunel_1_09-8.pdf 23.8.2016
- [19] Bobet, A., Einstein, H.H. (2011): Tunnel reinforcement with rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 100-123
- [20] Zhifa, Y., Lee, C.F., Sijing, W. (2000): Three-dimensional back-analysis of displacements in exploration adits - principles and application. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37, 525-533

- [21] Koçkar, M.K., Akgün, H. (2003): Methodology for tunnel and portal support design in mixed limestone, schist and phyllite conditions: a case study in Turkey *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40,173–196
- [22] Alija, S., Torrijo, F.J., Quinta-Ferreira, M. (2013): Geological engineering problems associated with tunnel construction in karst rock masses: The case of Gavarres tunnel (Spain). *Engineering Geology* 157, 103–111
- [23] Subterra a.s.
- [24] Nová Rakouská tunelovací metoda, dostupná na adrese <http://fast10.vsb.cz/duris/nrtm.pdf> 23.8.2016
- [25] <http://www.satra.cz/pruzkumna-stola-pro-tunel-radlice/> Dostupné: 23.8.2016
- [26] <http://mestskyokruh.info/radialy-a-spojky/radlicka-radiala/jzm-smichov/popis-projektu/>
Dostupné: 23.8.2016
- [27] http://www.praha.eu/jnp/cz/o_meste/magistrat/tiskovy_servis/tiskove_zpravy/zacala_razba_pruzkumne_stoly_noveho.html Dostupné: 23.8.2016
- [28] Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Suh, S., Koehler, A., Pennington, D. (2009): Recent developments in life cycle assessment.. *Journal of environmental management* 91, 1-21
- [29] Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. (2013): Life cycle assessment in the construction sector: a review.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 379-388
- [30] ČSN EN ISO 14040 (2006) Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova. *Český normalizační institut*
- [31] ČSN EN ISO 14044 (2006) Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice. *Český normalizační institut*
- [32] CENIA, dostupná na adrese <http://www1.cenia.cz/www/> 23.8.2016

- [33] Metoda CML-IA dostupná na adrese <http://www.gabi-software.com/international/support/gabi/gabi-lcia-documentation/cml-2001/>
23.8.2016
- [34] Sleeswijka, A.W., Laurant F.C.M. van Oers, Guinée, J. B., Struijs, J., Huijbregts, M.A.J. (2008): Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of The Total Environment* 390, 227–240
- [35] Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Joliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, G. (2004): Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment international*. 30, 721-739
- [36] GaBi 6.0. PE International, dostupné na adrese <http://www.gabi-software.com/international/index/> 23.8.2016
- [37] Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., Marrero, M. (2016): LCA databases focused on construction materials: A review.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58, 565-573
- [38] Orca Mining Services, dostupné na adrese <http://www.orcaminingservices.com/>
23.8.2016
- [39] <http://www.heidelbergcement.cz/> Dostupné 23.8.2016
- [40] Minova Bohemia, dostupné na adrese <http://www.minova.cz/> 23.8.2016
- [41] Sivek, M., Kavina, P., Jirásek, J., Malečková, V. (2012): Factors influencing the selection of the past and future strategies for electricity generation in the Czech Republic. *Energy policy* 48, 650-656
- [42] Austin Detonator, dostupné na adrese <http://www.austin.cz/> 23.8.2016
- [43] Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., Šajna, A. (2015): Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA.. *Waste Management* 45, 194-205

- [44] Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S. (2011): A review on emission analysis in cement industries.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 15*, 2252-2261
- [45] Stafford, F. N., Dias, A. C., Arroja, L., Labrincha, J. A., Hotza, D. (2016): Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production 126*, 159-165
- [46] Vyhláška 381/2001 Sb, Vyhláška Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů)
- [47]Huang, L., Bohne, R.A., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Lohne, J. (2015): Environmental impact of drill and blast tunnelling: life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production, 86*, 110-117
- [48] Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A. (2011): A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 15*, 2042-2060.
- [49] Riviera, P.P, Bellopede, R., Marini, P., Bassani, M. (2014): Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction. *Tunnelling and Underground Space Technology 40*, 160–173
- [50] Gokce, A., Nagataki, S., Saekic, T., Hisadad, M. (2004): Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research 34*, 799–806
- [51] Voit, K., Zimmermann, T. (2015): Characteristics of selected concrete with tunnel excavation material. *Construction and Building Materials 101*, 217-226
- [52] Schröfelbauer, T., Schreidl, B., Kitzler C. (2009): S1 Danube-Lobau tunnel – recycling of tunnel spoil materiál. *Geomechanik und Tunnelbau, 2*, 633–642
- [53] Resch, D., Lassnig, K., Galler, R., Ebner, F. (2009): Tunnel excavation material – high value raw materiál. *Geomechanik und Tunnelbau, 2*, 612–618