ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav řízení a ekonomiky podniku

POSOUZENÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU PRODUKTU VYRÁBĚNÉHO TECHNOLOGIÍ 3D TISKU

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A PRODUCT MANUFACTURED BY 3D PRINTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Michaela Broumová

Vedoucí práce: Ing. Barbora Stieberová, Ph.D.

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku

Praha 2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Broumová** Jméno: **Michaela** Osobní číslo: **434241**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení a ekonomika podniku**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Posouzení životního cyklu produktu vyráběného technologií 3D tisku

Název diplomové práce anglicky:

Life cycle assessment of the product manufactured by 3D printing technology

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Zásady a postup zpracování LCA (Life cycle assesment)
3. Zpracování LCA studie
4. Ekonomické posouzení
5. Závěr – vyhodnocení výsledků a návrh doporučení

Seznam doporučené literatury:

1. KOČÍ, Vladimír. Posuzování životního cyklu = Life cycle assessment - LCA. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 978-80-86832-42-5.
2. HAUSCHILD, Michael Z., ROSENBAUM, Ralph K., OLSEN, String Irving a Editors. Life cycle Assessment, Theory and Practice. Montpellier: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-56474-6.
3. HORNE, Raplh E., GRANT, Tim a VERGHESE, Karli. Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects [online]. Victoria: CSIRO Publishing, 2009. ISBN 9780643094529.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Barbora Stieberová, Ph.D., ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **01.03.2021**

Ing. Barbora Stieberová, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	prof. Ing. František Freiberg, CSc. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29. 6. 2020
Datum převzetí zadání

Podpis studentky

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Posouzení životního cyklu produktu vyráběného technologií 3D tisku jsem vypracovala samostatně s využitím uvedené odborné literatury a pramenů a na základě konzultací s vedoucím práce.

V Praze dne ....

Bc. Michaela Broumová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala paní Ing. Barboře Stieberové, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat firmě Beneš a Lát, s.r.o., která mi poskytla data pro diplomovou práci. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze
	Fakulta strojní
Ústav:	Ústav řízení a ekonomiky podniku
Vedoucí ústavu:	prof. Ing. František Freiberg, CSc.

Téma diplomové práce:	**Posouzení životního cyklu produktu vyráběného technologií 3D tisku**

Akademický rok:	2019/2020
Autor:	Bc. Michaela Broumová
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Barbora Stieberová, Ph.D.
Klíčová slova:	LCA, životní cyklus, 3D tisk, aditivní technologie, SimaPro, Impact 2002+
Abstrakt:	Práce se zabývá posouzením dopadů na životní prostředí v celém životním cyklu formy pro vysokotlaké odlévání součástky do automobilového průmyslu vyráběné aditivní technologií. Dopady na životní prostředí formy vyrobené 3D tiskem jsou porovnány s dopady formy vyráběné konvenčně.

Rozsah práce a příloh

Počet stran:	81
Počet obrázků:	46
Počet tabulek:	14

Annotation

University:	Czech Technical University in Prague
	Faculty of Mechanical Engineeriing
Department:	Department of Business Management and Economics
Head of the department:	prof. Ing. František Freiberg, CSc.

Theme of work:	**Life cycle assessment of a product produced by 3D printing technology**

Academic year:	2019/2020

Author:	Bc. Michaela Broumová
Supervisor:	Ing. Barbora Stieberová, Ph.D.

Keywords:	LCA, Life Cycle Assessment, 3D print, additive technology, SimaPro, Impact 2002+

Abstract:	This thesis focuses on the assessment of environmental impacts of the full life cycle of a mould for high-pressure component casting in automotive industry produced by additive technology. Environmental impacts of a mould produced by 3D print are compared with environmental impacts of conventionally made mould.

Volume of work

Number of pages:	81
Number of pictures:	46
Number of tables:	14

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Z anglického
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
CNC	Computer Numeric Control
EDM	Electric Discharge Machining
CAD	Computer-Aided Design
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CED	Cumulative Energy Demand

OBSAH

1 Úvod do problematiky 10

2 Zásady a postup zpracování LCA (Life cycle assessment) 11

2.1 Definování cíle 12

2.2 Definování rozsahu 14

2.2.1 Terminologie a klíčové pojmy pro definování rozsahu 14

2.2.2 Předmět hodnocení 16

2.2.3 Rámec modelování LCI a zpracování multifunkčních procesů 17

2.2.4 Hranice systému a požadavky na úplnost 18

2.2.5 Reprezentativnost dat LCI 18

2.2.6 Příprava základu pro posouzení dopadů 19

2.3 Inventarizační analýza 19

2.4 Hodnocení dopadů životního cyklu 20

2.4.1 Kategorie dopadu 21

2.4.2 Indikátor kategorie dopadu 22

2.5 Interpretace 24

2.6 Metoda pro výpočet LCIA – IMPACT 2002+ 24

2.6.1 Charakterizace 25

2.6.2 Normalizace 25

2.6.3 Kategorie dopadu metody IMPACT 2002+ 25

2.6.4 Další metodiky LCIA 28

3 Aditivní výroba 30

3.1 Druhy aditivní výroby 30

3.1.1 Selective Laser Sinterinig (Selektivní spékání laserem) 31

3.1.2 Direct Metal Laser Sintering (řízené spékání kovu laserem) 32

3.2 Kovový prášek 32

3.2.1 Výroba prášku 33

4 Zpracování LCA studie 34

4.1 Definice cíle a rozsahu 35

4.2 Inventarizační analýza 36

4.2.1 Životní cyklus formy vyráběné 3D tiskem 36

4.2.2 Životní cyklus formy vyráběné konvenčně 43

4.3 Hodnocení dopadů 48

4.3.1 Dopady formy vyráběné 3D tiskem 48

4.3.2 Dopady formy vyráběné konvenčně 56

4.3.3 Porovnání dopadů 63

4.4 Shrnutí výsledků 67

5 Ekonomické posouzení 69

5.1 Náklady na výrobu jedné formy pomocí 3D-tisku 69

5.2 Náklady na jednu formu vyrobenou konvenčně 69

5.3 Používání formy a vyčíslení nákladů 70

5.4 Celkové zhodnocení 70

6 Závěr – vyhodnocení výsledků a návrh doporučení 72

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 73

SEZNAM OBRÁZKŮ 76

SEZNAM TABULEK 78

PŘÍLOHY 79

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V dnešním světě se stále více obyvatel zajímá o životní prostředí a jeho ochranu, proto čím dál více z nich hledá výrobky s nižšími environmentálními dopady. Díky poznatkům o dopadech lidské činnosti na životní prostředí je zde již od konce 70. let 20. století vyvíjena metoda Posuzování životního cyklu (z angl. Life Cycle Assessment), zkráceně psáno LCA.

Díky celospolečenskému zájmu o životní prostředí je vyvíjen tlak jak na legislativu, tak na výrobní společnosti ohledně environmentálních dopadů. V roce 2006 byla vydána norma ČSN EN ISO 14 040:2006, kde jsou nastaveny členění, principy a způsob posuzování životního cyklu materiálů.

Metoda LCA je vyvíjena pro možnost nalezení zlepšení environmetálních profilů produktu v jednotlivých etapách jejich životního cyklu, dále je pro osoby, které činí různá rozhodnutí v oblasti průmyslu, vládních i nevládních organizací a v neposlední řadě může pomáhat v marketingu například jako ekoznačení. [4]

V současné době se rozvojem metody LCA zabývají jak soukromé společnosti, tak i státní organizace, které se podílejí na tvorbě databází a rozvoji softwarů pro usnadnění práce při tvorbě analýzy LCA. Mezi světově nejznámější softwarové nástroje pro zpracovávání LCA patří GaBi, SimaPro a Umberto.

Tato práce se zabývá posouzením životního cyklu formy pro vysokotlaké odlévání zinku vyráběnou aditivní technologií. Zkoumaná forma je prvním prototypem pro tento účel. Zároveň se porovnává tato forma s formou vyráběnou konvenčně, která se již vyrábí řadu let. Hlavní otázkou tedy je, která z forem bude přívětivější k životnímu prostředí a bude mít nižší dopady na životní prostředí.

Nedílnou součástí výroby je i ekonomická stránka, a proto je součástí této práce srovnání nákladů výroby při používání obou posuzovaných forem.

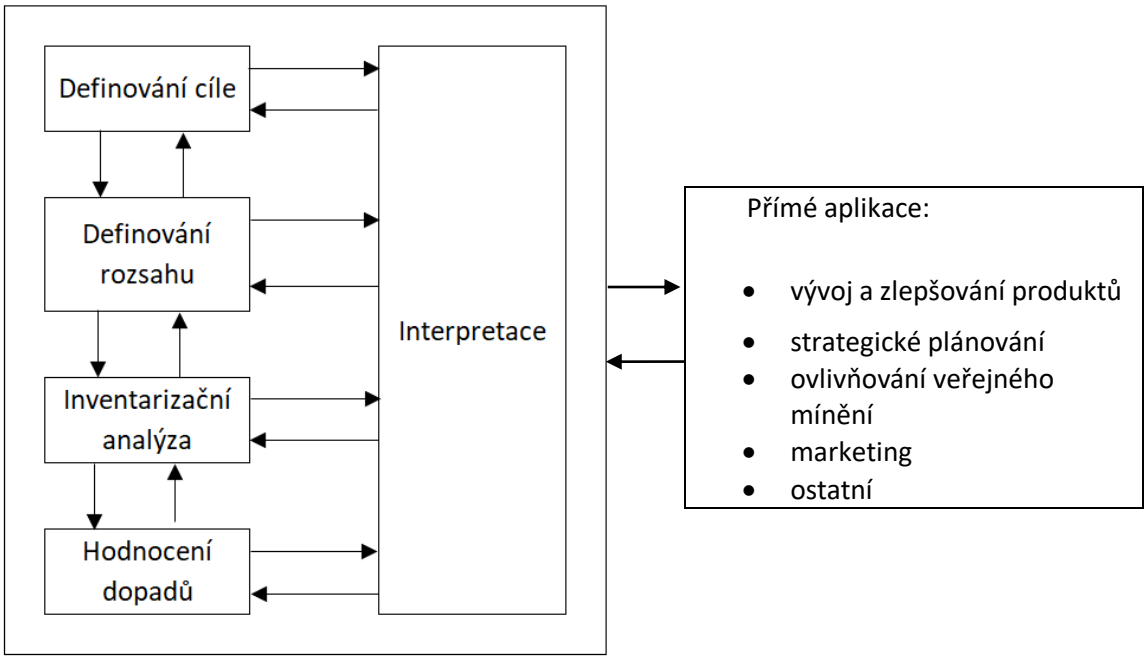
2 ZÁSADY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ LCA (LIFE CYCLE ASSESSMENT)

V této kapitole jsou detailně popsány jednotlivé kroky postupu aplikace metody LCA, kategorie hodnocení dopadů na životní prostředí a používané metody pro vyhodnocení dopadů produktů a procesů na životní prostředí.

LCA je metodou hodnocení dopadů produktu na životní prostředí. Tato metoda zahrnuje všechny fáze životního cyklu výrobku či výrobkového systému, tedy od všech vstupujících materiálů, energií a dopravy potřebné pro výrobu výrobku přes jeho používání až po jeho recyklaci či likvidaci. [3]

Rámec LCA pracuje se čtyřmi samostatnými fázemi:

1. definování cíle a rozsahu
2. inventarizační analýza
3. hodnocení dopadů
4. interpretace [2]



Obr. 2.1 Modifikovaný rámec LCA převzaté ze standardů ISO 14040 [2]

2.1 Definování cíle

Definování cíle je první fáze pro jakoukoliv LCA analýzu. Je založeno na standardních požadavcích normy ISO, která obvykle zahrnuje šest hledisek:

1. Zamýšlené aplikace výsledku
2. Omezení z důvodů metodických rozhodnutí
3. Kontext rozhodnutí a důvod provedení studie
4. Cílová skupina
5. Srovnávací studie zpřístupněné veřejnosti
6. Komisař studie a další vlivní aktéři [2]

Při provádění LCA analýzy musí být každé hledisko zváženo. Pro vytvoření LCA jsou nezbytnými hledisky jedna a tři, další hlediska jsou hlavně pro sdělování výsledků. Dále práce rozebere pouze hlavní hlediska. [2]

Zamýšlená aplikace výsledku

Všechny LCA analýzy zahrnují studii jednoho nebo víc produktových systémů, a to se používá v několika systémech:

- Porovnání dopadů na konkrétní zboží či službu.
- Identifikace částí produktového systému, které mají největší vliv na životní prostředí.
- Vyhodnocení potenciálu zlepšení vyplývajících ze změn v návrzích designu produktu.
- Dokumentace vlivu výrobku na životní prostředí.
- Vypracování kritérií pro ekoznačku.
- Vypracování kvůli politickým opatřením, které zohledňují životní prostředí. [2]

Kontext rozhodnutí a důvod provedení studie

Jedná se o důležitý aspekt definice cíle, protože velmi ovlivňuje vhodné vypracování soupisu životního cyklu. Důvody by měly být jasně spojeny se zamýšleným použitím výsledku. [2]

Existují tři typy souvislostí pro rozhodování:

- Situace A (podpora rozhodování na makroúrovni)

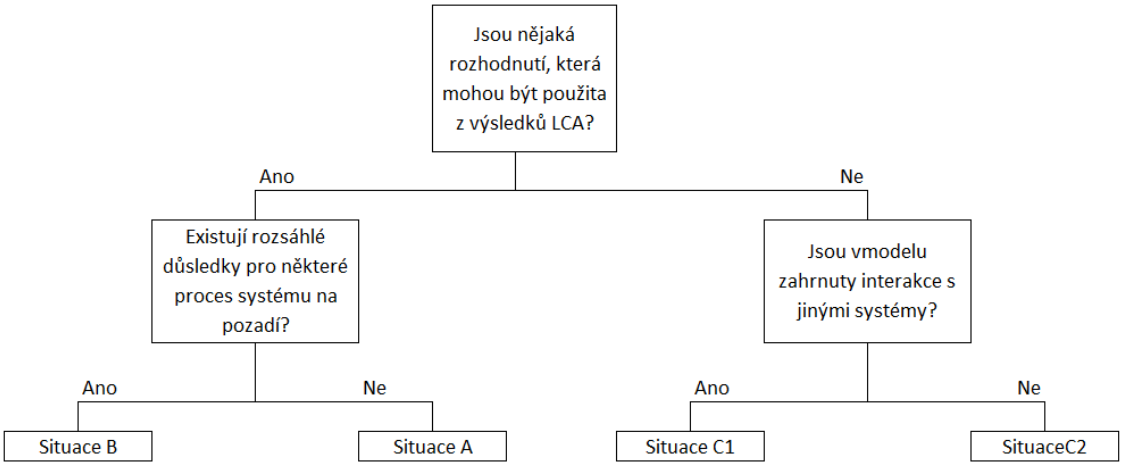
Výsledky studie jsou určeny k podpoře rozhodnutí, které zkoumají malý rozsah systému zkoumaných výrobků. Tato studie nezpůsobí strukturální změny v systémech, se kterými daný produktový systém interaguje. [2]

- Situace B (podpora rozhodování na úrovní Meso/Makro)

Výsledky studie jsou určeny k podpoře rozhodnutí a rozsah zkoumaného produktového systému je takový, že očekávána rozhodnutí způsobí strukturální změny v jednom nebo ve více procesech systému, se kterými studovaný produktový systém interaguje. [2]

- Situace C (účetnictví)

Studie nemá být použita na podporu rozhodnutí a má čistě popisný charakter. Dokumentuje to, co se již stalo nebo co se stane v důsledku již přijatého rozhodnutí. Proto přítomnost studie LCA nepovede ke změnám na jiných systémech. Interakce s jinými systémy, např. prostřednictvím energie generované spalováním odpadu, může být buď začleněno do modelu systému produktů (situace C1) nebo může být částečně zváženo v LCA přidělením (situace C2). C1 se používá, pokud C2 není specifiky předepsáno cílem komise pro studii. [2]



Obr. 2.2 Rozhodovací strom pro správnou identifikaci rozhodovacích souvislostí [2]

Obrázek 2.2 ukazuje, že identifikace kontextu rozhodování závisí na:

- zda je studie zamýšlena jako podpora rozhodnutí
- zda se od rozhodnutí, podporovaného studií, očekávají strukturní změny v interakčních systémech
- zda je vybráno modelovat interakce s jinými systémy jako součást modelu produktového systému nebo je částečně řešit přidělením [2]

2.2 Definování rozsahu

Definice rozsahu určuje, které systémy výrobku se mají posuzovat a jak by se mělo toto hodnocení provádět. Hlavním cílem je zajistit a zdokumentovat konzistenci metod, předpokladů a údajů a posílit reprodukovatelnost studie. [3]

Rozsah se skládá z následujících devíti položek:

1. Výstupy
2. Předmět hodnocení
3. Rámec modelování LCI a zpracování multifunkčních procesů
4. Hranice systému a požadavky na úplnost
5. Reprezentativnost dat LCI
6. Příprava základu pro posouzení dopadů
7. Zvláštní požadavky na srovnávací systém
8. Potřeba kritického přezkoumání
9. Plánování podávání zpráv o výsledcích [2]

Položky 2-6 jsou pro provádění LCA klíčové, protože mají přímý vliv na rozhodnutí učiněná v pozdějších fázích LCA. [2]

2.2.1 Terminologie a klíčové pojmy pro definování rozsahu

Jednotkový proces a toky

Jednotkový proces je nejmenší prvek uvažovaný v modelu inventáře životního cyklu, pro které jsou kvantifikována vstupní a výstupní data. Jednotkové procesy lze proto považovat za stavební bloky inventárního modelu životního cyklu, které jsou spojeny pomocí vstupních a výstupních dat, které lze uspořádat do šesti kategorií toků: [2]

Tabulka 2.1 Základní kategorie toků [2]

Vstupní toky	**Výstupní toky**
Materiály	Produkty
Energie	Odpady ke zpracování
Zdroje	Emise

V praxi může jednotkový proces představovat jediný proces, jako je např. válcování oceli (obr. 2.3), ale může také představovat celé zařízení, které obsahuje mnoho různých procesů. Tento typ jednotkového procesu lze rozdělit na dva nebo více nových jednotkových procesů v modelu inventáře životního cyklu. [2]

Obecně platí, že jednotkové procesy v průběhu času nezískávají ani neztrácejí hmotnost a součet všech vstupních toků by proto měl být roven součtu všech výstupních toků na úrovni prvků (např. mědi). Výstupní toky patřící k produktům nebo odpadům do kategorií zpracování z jednoho jednotkového procesu mohou fungovat jako vstupní toky patřící do kategorií materiálů a energie pro jiné jednotkové procesy a takto jsou jednotkové procesy spojeny v modelu inventáře životního cyklu. Pro srovnání se zdroje a emisní toky nevyměňují mezi jednotkovými procesy. Jsou označovány jako elementární toky. [2]

Obr. 2.3 Zjednodušený jednotkový proces válcování ocelových plechů a příklady toků [2]

Model a výsledky inventarizace životního cyklu

Model inventarizace životního cyklu (Life Cycle Inventory=LCI) si klade za cíl propojit všechny jednotkové procesy, které jsou vyžadovány pro dodání produktů studovaného v LCA (propojení celého produktového systému). Výsledek LCI je soupis agregovaných množství elementárních toků, oddělení na zdroje a emise ze všech jednotkových procesů v rámci systémové hranice. [2]

Hodnocení dopadů životního cyklu

Hodnocení dopadů životní cyklu (Life Cycle Impact Assessment=LCIA) se skládá z výběru dopadů, klasifikace a charakterizace, normalizace a vážení. [2]

Dále práce rozebírá šest klíčových položek definice rozsahu.

2.2.2 Předmět hodnocení

Funkce

Všechny LCA studie jedno či více produktových systémů složených z mnoha jednotkových procesů, které jsou aktivní během životního cyklu produktového systému. Ke studiu těchto systémů je potřeba pochopit funkce, které poskytují. Studie LCA by měla nejprve definovat funkce z pohledu uživatele. [3] Například dvě různé energetické technologie mohou být porovnány na základě funkce, kterou zajišťují dodávku elektřiny do domácností. Funkce jsou zvláště důležité při porovnání dvou nebo více produktových systémů, protože srovnání je spravedlivé a smysluplné, pokud porovnávané systémy poskytují uživateli přibližně stejnou funkci. [2]

Funkční jednotka

Pro podporu relevantního kvantitativního srovnání alternativních způsobů poskytování funkce musí být pro definici funkční jednotky použity znalosti funkcí poskytovaných alternativními výrobními systémy. Funkční jednotka definuje kvantitativní aspekty funkce, což obecně zahrnuje zodpovězení otázek: „Co?“, „Kolik?“, „Za jak dlouho?“, „Kde?“ a „Jak dobře?“ [2]

Je důležité správně definovat funkční jednotky, protože významně ovlivňuje způsob provádění LCA, její výsledky a interpretaci, zejména ve srovnávacích studiích. Je tomu tak proto, že funkční jednotka slouží jako referenční bod pro rozhodování, které jednotky procesy mají zahrnovat a do jaké míry jsou čerpány. Je proto nezbytné zajistit, aby funkční jednotka plně zachycovala relevantní funkční aspekty sledovaných systémů. [3]

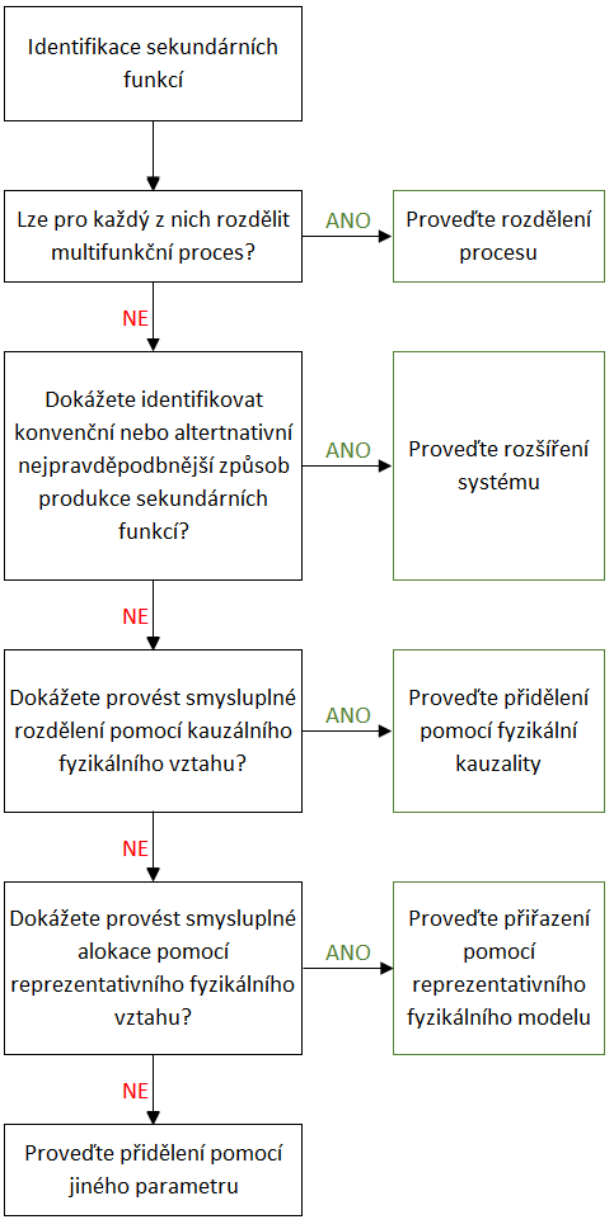
Referenční toky

Po definování funkční jednotky lze určit referenční toky. Referenční tok je tok produktu, ke kterému musí být kvantitativně vztaženy všechny vstupní a výstupní toky pro procesy v produktovém systému. Jinými slovy, referenční tok je množství produktu, které je potřebné k realizaci funkční jednotky. Referenční tok je typicky odlišný kvalitativně a kvantitativně pro různé výrobky ve srovnání s funkční jednotkou, kvůli rozdílům ve vlastnostech produktu. Dále je výchozím bodem pro následující fázi analýzy LCI, protože určuje všechny toky produktu požadované během životního cyklu studovaného produktového systému a jejich související elementární toky. Důležité je nezaměňovat referenční tok s funkční jednotkou, první může být znám pouze tehdy, pokud je druhý správně definován. [2]

2.2.3 Rámec modelování LCI a zpracování multifunkčních procesů

Tato část se zabývá výběrem vhodného rámce pro modelování LCI a způsoby, jak zacházet s multifunkčními procesy. Tato rozhodnutí musí být provedena v souladu s definicí cíle, zejména s určeným kontextem rozhodnutí, protože mají silný vliv na výsledky LCA a jejich interpretaci. [2]

Aby bylo možné vyřešit problémy s multifunkčností, norma ISO 14 044 představuje hierarchii řešení a je shrnuta do rozhodovacího stromu na obr. 2.4. Toto řešení se používá pro srovnání různých produktových systémů. [5]



Obr. 2.4 Rozhodovací strom dle normy ISO 14 044 [5]

2.2.4 Hranice systému a požadavky na úplnost

Hranice systému určují hranice mezi studovaným produktovým systémem, okolní ekonomikou a prostředím. Požadavky na úplnost je příbuzný koncept, který lze použít k určení toho, jaké procesy by měly být zahrnuty do systémových hranic, aby bylo dosaženo stupně úplnosti v modelování systému produktu, které jsou třeba v souladu s cílem studie. Stanovení systémových hranic může mít velký vliv na výsledky LCA, protože určují jednotkové procesy, z nichž by měly být kvantifikovány dopady na životní prostředí. V tomto bodě definice rozsahu by měly být hranice systému znázorněny v diagramu, který poskytuje přehled, které části studovaného produktového systému jsou zahrnuty, a které jsou vyloučeny. Vhodnou úrovní podrobnosti v tomto diagramu jsou fáze životního cyklu (jako je výroba, doprava, maloobchod, použití a likvidace) nebo hlavní kroky zpracování. Často je užitečné začít s fází procesu nebo životního cyklu, která poskytuje referenční tok a poté expandovat proti proudu. [2]

2.2.5 Reprezentativnost dat LCI

Cílem LCA je odrážet realitu. To znamená, že model by měl v co největší míře představovat to, co se ve skutečnosti děje nebo co se stalo a jednotkové procesy aplikované na modelování produktového systému musí být reprezentativní pro procesy, které jsou skutečně použity v analyzovaném produktovém systému nebo ovlivněné v důsledku uvedení hodnoceného výrobku na trh. Typicky budou části systému v popředí založeny na datech (elementární toky atd.) shromážděných praktikem od společnosti, pro kterou je LCA zpracovávána. U těchto primárních dat se předpokládá, že neobsahují chyby. Na druhé straně jsou ostatní části systému pozadí konstruovány z jiných zdrojů, než jsou zdroje primární, tak je důležité zvážit, jak reprezentativní tato data jsou. [2]

Reprezentativnost dat LCI lze chápat ve třech vzájemně propojených dimenzích: geografické, časové a technologické. [2]

- Geografická

Geografická reprezentativnost odráží, jak dobře údaje seznam dat reprezentuje skutečné procesy týkající se parametrů specifických pro danou lokalitu. Je třeba vzít toto v úvahu, protože dva procesy dodávají stejný produktový výstup, ale probíhající na dvou různých místech (např. jiné země), se mohou lišit v ostatních tocích, jako jsou elementární toky, energetické toky, materiální toky a nakládání s odpady. Rozdíly mohou být způsobeny geografickými rozdíly, jako je místní klima, blízkost k přírodním zdrojům, regulační rozdíly (energetické daně a emisní limity). [2]

- Časová

Stejně jako dva procesy dodávající stejný výstup produktu se mohou lišit, pokud se vyskytují na různých místech, mohou se také lišit, pokud se vyskytují v různých časech. Je to způsobeno technologickými inovacemi a vývojem, který má často tendenci vést v průběhu času k efektivnějším procesům, bezvýznamným vstupům (toky energie, materiálu a zdrojů) a někdy také k méně žádoucím vedlejším produktům (zpracovávaný odpad a emise) na jednotku výstupu. [2]

- Technologická

Dva identické produkty mohou být vyráběny pomocí dvou různých technologií, a tudíž mohou být spojeny s různými jednotkovými procesy a souvisejícími toky. Například surová ocel může být vyráběny pomocí elektrické pece nebo základní kyslíkové pece, což jsou dvě velmi odlišné technologie zahrnující různé inventarizační toky. Technologická reprezentativnost odráží, jak dobře souhrn dat představuje skutečné technologie, které jsou součástí studovaného produktového systému. [2]

2.2.6 Příprava základu pro posouzení dopadů

Posouzení dopadů v definici rozsahu má dva hlavní cíle, prvním je zajistit provedení v souladu s definicí cíle a druhým je připravit se na inventarizační analýzu, kde by elementární toky (zdroje a emise) závisely na kategoriích dopadů. Tyto elementární toky mohou také záviset na konkrétních metodách LCIA. [2]

2.3 Inventarizační analýza

Tato fáze analýzy LCA se řídí definicí cíle a rozsahu a shromažďuje všechna důležitá data o elementárních tocích ze všech procesů zařazených do produktového systému. Výsledkem inventarizace by měl být soupis všech vstupů a výstupů systému. [2]

Tato část studie je náročná na dostupnost dat, praktickou zkušenost s modelováním produktových systému a při použití databázových nástrojů je důležité pochopení jejich funkcí a zvládnutí použití nástrojů. [1]

Šest kroků inventární analýzy

1. Identifikace procesů pro model LCI

   První krok podrobně popisuje hrubý počáteční systémový diagram vytvořený v rámci rozsahu systému. Výsledkem je podrobné zobrazení všech procesů a jejich vazeb. [2]

2. Plánování a sběr dat

   Účelem plánování je vyvážit úsilí při sběru údajů podle relevantnosti příslušných údajů a informací. Je to důležité, aby nedošlo ke ztrátě času při sběru dat, které mají malý význam pro výsledky LCA. Sběr dat musí být naplánován a proveden dle definice rozsahu a procesů identifikovaných podle systémových hranic.

   Jako výchozí bod pro sběr dat se doporučuje vytvoření tabulky s plánem sběru dat pro každý proces. [2]

3. Sestavování a kontrola kvality jednotek procesů

4. Sestavování modelu LCI a výpočet výsledků

   Model se sestavuje ze všech vytvořených jednotkových procesů. Každý tento jednotkový proces lze označit za „stavební blok“, jehož „velikost“ je určena referenčním tokem studie odvozeným z funkční jednotky v definici rozsahu. [2]

5. Příprava základu pro řízení nejistoty a analýzu citlivosti

   Analýza nejistoty a citlivosti je důležitá pro interpretaci chyb LCIA, protože informují o spolehlivosti závěrů studie, a na co by se měly zaměřit budoucí studie. [2]

6. Podání zprávy (Report)

2.4 Hodnocení dopadů životního cyklu

Cílem hodnocení dopadů životního cyklu, tedy LCIA, je převést množství elementárních toků na jiné veličiny, které interpretují míru zasažení životního prostředí. Snaží se o měřitelné srovnání dopadů životních cyklů produktových systémů. [1]

Na rozdíl od ostatních tří fází je tato fáze analýzy LCA do jisté míry automatizována softwarem pro LCA, ovšem základní principy, modely a faktory by měly být známy kvůli následné

interpretaci výsledků. Dle ISO standardů 14040/14044 obsahuje LCIA povinné a volitelné kroky: [2]

Povinné kroky

- Výběr kategorie dopadů, indikátorů kategorií a charakterizace modelů
  Jaké dopady se musí posoudit?
- Klasifikace – přiřazení výsledků LCI do kategorií dopadů podle jejich známých potencionálních účinků
  K jakému dopadu (dopadům) přispívá každý výsledek LCI?
- Charakterizace – výpočet výsledků indikátoru kategorie kvantifikující příspěvky z inventárních toků do různých kategorií dopadu
  Jak moc přispívá každý výsledek LCI? [2]

Volitelné kroky

- Normalizace – vyjádření výsledků LCIA ve srovnání s výsledky referenčního systému
  Je to hodně?
- Vážení – vyjádření významnosti kategorií dopadů s ohledem na ekonomicko-sociální hlediska
  Je to důležité?
- Seskupování – agregace několik výsledků indikátorů dopadů do skupiny [2]

Je důležité zmínit, že dopady, které jsou hodnoceny v LCIA, by měly být interpretovány jako dopadové potenciály, nikoli jako skutečné dopady, překročení prahových hodnot nebo jako riziko. [2]

2.4.1 Kategorie dopadu

Kategorie dopadu (tab. 2.2) vyjadřuje závažnost zhoršování stavu životního prostředí a zároveň posuzuje, který produkt nese významnější podíl na environmentálních dopadech. [5] Při porovnávání environmentálních dopadů odlišných produktů je důležité si uvědomit, že každý produkt má odlišné materiálové složení, na produktových systémech se podílejí různé procesy a technologie, a každý má jiné dopady. Na základě vyčíslení environmentálních dopadů rozhodujeme, který produkt je šetrnější k životnímu prostředí. [1]

Tabulka 2.2 Základní kategorie dopadů [1]

Kategorie dopadu	Mipointové kategorie dopadu	Endpointové kategorie dopadu
Základní kategorie dopadu většiny metodik LCIA	Úbytek neobnovitelných (abiotických) zdrojů	Úbytek dostupnosti surovin na trhu Klimatické změny Lidské zdraví Kvality ekosystémů
	Globální oteplování	
	Úbytek stratosférického ozónu	
	Humánní toxicita	
	Ekotoxicita (sladkovodní, mořská, terestrická)	
	Vznik fotooxidantů	
	Acidifikace	
	Eutrofizace	
Specifické kategorie dopadu některých metodik LCIA	Využívání krajiny – zábor a přeměna krajiny	Využívání krajiny – produkční schopnost ekosystémů Finanční hodnota Ekofaktor Biodiverzita Ztráty na životech
	Ekotoxicita (sladkovodní a mořské sedimenty)	
	Ionizační záření	
	Využívání krajiny (pokles množství využitelné krajiny)	
Další kategorie dopadu, jež dosud nebývají součástí metodik LCIA	Úbytek obnovitelných (biotických) zdrojů	
	Odpadní teplo	
	Hluk	
	Zápach (zapáchající plyny)	
	Dezertifikace (vznik pouští)	
	Zápach (zapáchající kapaliny)	

2.4.2 Indikátor kategorie dopadu

Indikátor kategorie dopadu vyjadřuje schopnost elementárních toků způsobovat nežádoucí účinky v životním prostředí, je určen měřitelnou veličinou s jasně definovanými jednotkami. [1]

Indikátory jsou dvojího typu:

1. Midpointový indikátor

U tohoto indikátoru hodnotíme jeho škodlivost na základě chemicko-fyzikálních či biologických vlastností. [1] Příkladem takového indikátoru jsou všechny elementární toky látek, které mohou mít karcinogenní účinky na člověka. Tyto látky budou klasifikovány do stejného midpointu zvaného toxický karcinogen. [2]

Typické kategorie midpointů:

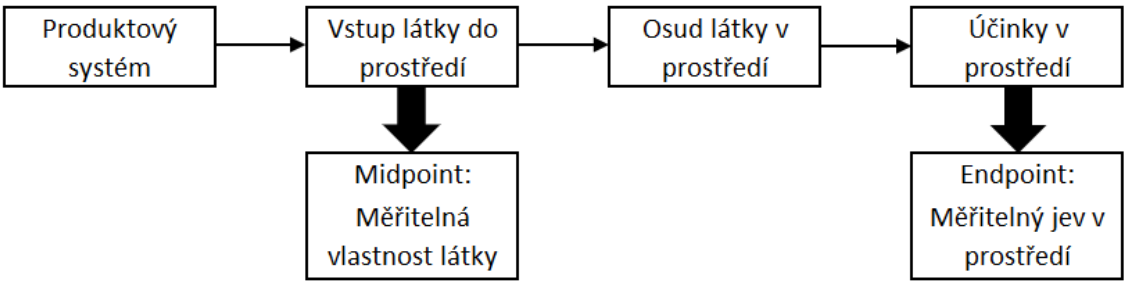
- klimatická změna
- úbytek stratosférického ozonu
- okyselení (suchozemské, sladkovodní)
- eutrofizace (suchozemská, sladkovodní, mořská)
- fotochemická tvorba ozonu
- ekotoxicita (suchozemská, sladkovodní, mořská)
- toxicita pro člověka (rakovina)
- tvorba pevných částic
- ionizující záření (lidské zdraví, vodní a suchozemské ekosystémy)
- využívání půdy (biotická produktivita, eroze, biologická rozmanitost)
- využívání vody (lidské zdraví, vodní ekosystémy, suchozemské ekosystémy)
- využívání abiotický zdrojů (fosilní a minerální)
- využívání biotických zdrojů (rybolov, těžba dřeva, …)
- hluk
- patogeny [2]

2. Endpointový indikátor

Endpointový indikátor vyčísluje vztah mezi elementárním tokem a konečným projevem na životní prostředí. V prostředí lze pozorovat různé účinky konkrétního elementárního toku a tyto účinky se hodnotí na základě různých endpointů. Například lze uvést endpointy kategorie dopadu klimatické změny, které se projevují zvyšováním průměrné teploty atmosféry, změnou délky vegetační období atp. [1]

Typické ukazatele endpoitnu:

- lidské zdraví
- kvalita ekosystému a přírodního prostředí
- přírodní zdroje [2]



Obr. 2.5 Znázornění midpointů a ednpointů v dopadovém řetězci [1]

2.5 Interpretace

Interpretace je poslední fází studie LCA, kde jsou posuzovány výsledky předchozích částí společně a jsou analyzovány s ohledem na nejistoty použitých údajů. Výsledkem této fáze jsou závěry studie a doporučení, která respektují definici cíle a zároveň omezení, které jsou určeny definicí rozsahu. Intepretace by měla představovat závěry studie LCA srozumitelným způsobem a možnost posoudit robustnost studie a potencionální slabiny. [2]

Tato fáze se dá shrnout do tří základních kroků:

- identifikace významných zjištění
- hodnocení
- formulace závěrů a doporučení [16]

2.6 Metoda pro výpočet LCIA – IMPACT 2002+

IMPACT 2002+ je metodika, která patří do evropských metod a využívá charakterizační modely čtrnácti midpointových a čtyřech endpointových indikátorů a kombinuje jejich výhody. Tato metodika vychází z předpokladu, že vyjádření vlivu jednoho elementárního toku v dopadovém řetězci může být na midpointové a zároveň i na endpointové úrovni kategorií dopadu. IMPACT 2002+ používá pro každý elementární tok tři různé charakterizační faktory: [1] [18]

- Midpointový charakterizační faktor
- Normalizovaný endpointový charakterizační faktor
- Endpointový charakterizační faktor [1]

2.6.1 Charakterizace

Charakterizační faktory toxicita pro člověka a vodní a suchozemskou ekotoxicitu jsou převzaty z metodologie IMPACT 2002 – Posouzení dopadů chemických toxinů. Charakterizační faktory pro jiné kategorie jsou upraveny ze stávajících charakterizačních metod, tj. Eko-indikátor 99, CML 2001, IPCC a CED (Cumulativ Energy Demand – kumulativní požadovaná energie). [18]

V SimaPro je uvedeno 15 různých kategorií dopadů, protože toxicita pro člověka je rozdělaná na karcinogeny a nekarcinogeny. [19]

2.6.2 Normalizace

Z důvodů nemožnosti přímého porovnávání indikátorů kategorií dopadu kvůli různým jednotkám vznikla normalizace, která převádí výsledky indikátorů kategorie na bezrozměrné hodnoty. [1] Faktor poškození uváděný v ekoinventu se normalizuje vydělením dopadu na jednotku emise celkovým dopadem všech látek ve specifické kategorii, pro které existují charakterizační faktory, na osobu a rok (pro Evropu). [19]

2.6.3 Kategorie dopadu metody IMPACT 2002+

Podrobnější rozbor midpointových a endpointových indikátorů využívané v metodě IMPACT 2002+.

MIDPOINTOVÉ KATEGORIE DOPADU

- *Human toxicity (Toxicita na lidské zdraví)*

Toxické chemikálie uvolňované do vzduchu, vody a půdy vstupují do lidského těla dýcháním, požitím a kůží. Ať už jsou to látky karcinogenní (způsobující rakovinu) nebo jiné patogeny, výsledkem je zvýšená pravděpodobnost lidské nemoci a dalších negativních účinků na zdraví člověka. [20] Nezahrnují se však zdravotní rizika v pracovním prostředí. [21]

- *Respiratory inorganics (Respirační onemocnění – způsobené anorganickými látkami)*

Respirační anorganické látky jsou částice, které jsou často výsledkem spalování fosilních paliv emitujících síranové a dusičnanové aerosoly. Tyto částice způsobují dýchací potíže. [20]

- *Ionizing radiation (Ionizační záření)*

Ionizující záření je takové záření, které má dostatek energie k ionizaci atomů nebo molekul. Vystavení zařízení může poškodit živou tkáň, což má za následek rakovinu, radiační nemoc, mutaci a dokonce i smrt. [20]

- *Ozone layer depletion (Úbytek ozónové vrstvy)*

Nedávno byly hlavním ekologickým problémem rostoucí díry ozónové vrstvy, tento problém se již zpomalil, ale stále tu je. Zředění ozonové vrstvy v atmosféře způsobují především emise chlor-fluorované uhlovodíky (CFC), hydrochlorofluorouhlovodíky (HCFC), halony a methylbromidy (CH_3Br). Umožňují dosáhnout zvýšeného ultrafialového záření na zemi. Toto záření může u zvířat způsobit rakovinu a snížit životaschopnost rostlin a řas. [20]

- *Respiratory organics (Respirační onemocnění – způsobené organickými látkami)*

Organické respirační onemocnění představuje riziko organických částic uvolňovaných do vzduchu z každého sektoru. [20]

- *Aquatic ecotoxicity (Ekotoxicita vod)*

Ekotoxicita vyplývá z přítomnosti jedů ve vodě. Obecně je to způsobeno tím, že se chemikálie ukládají nebo pronikají do vodních toků, to má za následek snížení produkce vodních rostlin, hmyzu a biodiverzity a zároveň i ovlivnění pitné vody. [20]

- *Terrestrial ecotoxicity (Půdní ekotoxicita)*

Toxiny přítomné v půdě způsobují pokles divoké zvěře, rostlinné produkce a biodiverzity. Zatímco některé toxiny mohou být zaváděny ze vzdušných nebo vodních zdrojů, mnoho z nich je výsledkem přímé lidské aplikace nebo prostřednictvím vylouhování z průmyslových procesů nebo hromadění odpadu. [20]

- *Terrestrial acid/nutri (Acidifikace a eutrofizace půd)*

K dispozici jsou pouze charakterizační faktory pro emise do ovzduší, jde tedy o hodnocení nepříznivých dopadů vzdušných depozic. [1]

- *Land occupation (Užívání půdy)*

Půda sice nemůže být vyčerpána, ale danou oblast lze použít pouze pro omezený počet účelů, proto poté může nastat problém s nedostatkem půdy. Také se může stát, že půda bude nepoužitelná nebo méně cenná v důsledku fyzických změn, jako je eroze. [20]

- *Aquatic acidification (Acidifikace vod)*

K acidifikace dochází při emitování škodlivých látek do půdy, vody a vzduchu. Dochází při tom k okyselování prostředí. Charakterizační faktory jsou vyjádřeny jako ekvivalentní množství emisí SO_2 do ovzduší. [1]

- *Aquatic eutrophication (Eutrofizace vod)*

Eutrofizace nastává, pokud se do vodního ekosystému dostane nadbytek rostlinných živin. Dusík a fosfor z odpadních vod a zemědělských hnojiv způsobují rozkvět řas, které pak vyčerpají kyslík ve vodě, což má za následek udušení vodního života. [20]

- *Global worming (Globální oteplování)*

Oxid uhličitý (CO_2), metan (CH_4) a další tzv. skleníkové plyny vznikající při spalování fosilních paliv se akumulují v atmosféře a zachycují sluneční teplo, které zvyšuje průměrnou teplotu země, a to má za následek ztrátu ledovců, vymírání druhů atp. Potenciál globálního oteplování se obvykle měří v jednotkách ekvivalentu oxidu uhličitého (CO_2e). [20]

- *Non-renewable energy (Energie z neobnovitelných zdrojů)*

I když se pro tvorbu energie požívá celá řada neobnovitelných přírodních zdrojů, největší pozornost obvykle mají ropa, uhlí a zemní plyn. Tento dopad na energii z neobnovitelnou zdrojů zahrnuje energii spotřebovanou během výroby a používání produktu. [20]

- *Mineral extraction (Těžba surovin)*

Nerostné úložiště nelze obnovit, jakmile se vytěží nerostné ložisko, již se nevrátí bez ohledu na to, jak moc se znovu používá nebo recykluje. Každý minerál na zemi má pouze omezené množství. [20]

ENDPOINTOVÉ KATEGORIE DOPADU

- *Human health (Lidské zdraví)*

Součet midpointových kategorií dopadu toxicita na lidské zdraví, respirační onemocnění anorganické i organické, ionizační záření a úbytek stratosférického ozónu představuje kategorii dopadu lidské zdraví. [1] [19]

- *Ecosystem quality (Kvalita ekosystému)*

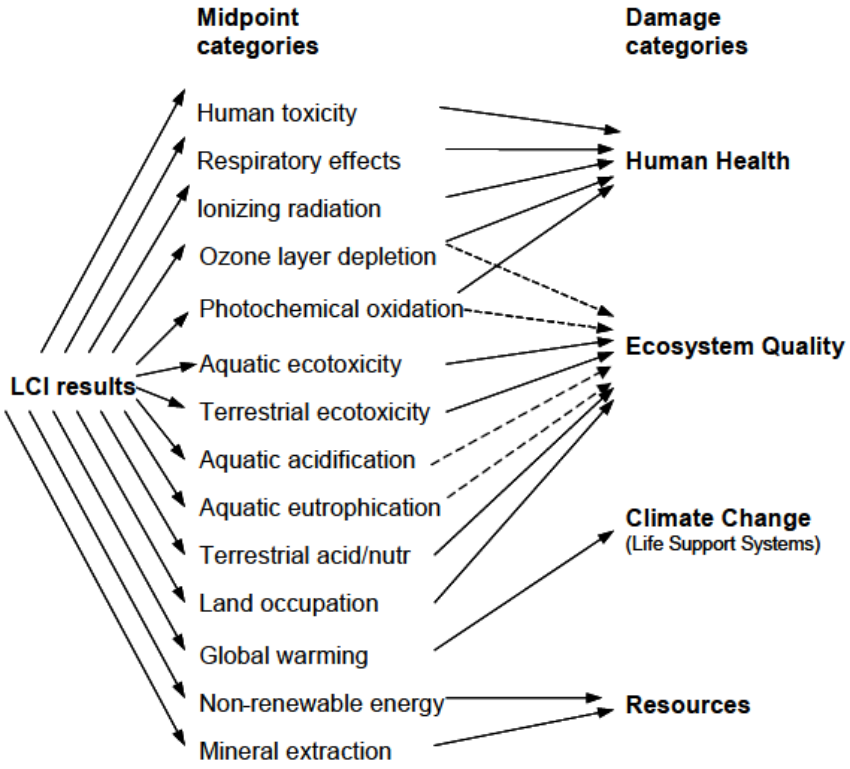
Součet midpointových kategorií dopadu ekotoxicita vod, terestrická ekotoxicita, půdní acidifikace a eutrofizace a užívání krajiny představuje kategorii dopadu kvalita ekosystému. [1]

- *Climate change (Klimatické změny)*

Kategorie dopadu klimatické změny odpovídá midpoitnové kategorii globální oteplování. [1]

- *Resources (Zdroje)*

Midpointové kategorie energie z neobnovitelných zdrojů a těžba surovin svým součtem představují zdroje. [1]



Obr. 2.6 Kategorie dopadů metody IMPACT 2002+ [19]

2.6.4 Další metodiky LCIA

Většina metodik vyhodnocuje buď dopady midpointových kategorií nebo endpointových kategorií. Například CML 2002, EDIP 2003, RECiPe, GHG Protocol nebo USEtox jsou metodiky, které hodnotí environmentální dopady na úrovni midpointů. Naopak Eco-indikátor 99 a ReCiPe hodnotí dopady na životní prostředí na úrovni ednpointů. [22]

Metodiky se různí dle vyhodnocovacích kategorií a zaměření. Například CML 2002 je možnost volit řadu kategorií dopadu, kdežto GHG Protocol je metodou podle standardu uhlíkové stopy. ReCiPe dokáže hodnotit na úrovni osmnácti midpointvých indikátorů a tří endpointových indikátorů. Vždy je důležité vybrat vhodnou metodiku tak, aby výsledky byly co nejvíce vypovídající pro konkrétní studii. [22]

3 ADITIVNÍ VÝROBA

Aditivní výroba (3D tisk) je technologie, při které vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe. Počátky této technologie se datují koncem 80. a začátkem 90. let minulého století, kdy byl používán takzvaný rapid prototyping (zkratka RP). To nabízelo možnost zkoumání a testování modelu součásti z blízka před zahájením samotné výroby. Výroba prototypu pomocí této technologie trvá zpravidla několik hodin, především to závisí na složitosti modelu. Návrh a vytvoření modelu se tvoří pomocí CAD systémů (computer-aided design). Samotné tisknutí vrstev součásti či výrobku je známé pod pojmem trojrozměrný tisk, zkráceně 3D tisk. [6]

3D tisk je stále rozvíjející se technologie, která má potenciál ve snížení dopadů na životní prostředí ve zpracovatelském průmyslu. Mezi přínosy této technologie patří snížená hmotnost produktu, snížení přepravních a materiálových ztrát, ale i vylepšená funkčnost či možnost tisku náhradních dílů.

Možné nevýhody této technologie jsou zvýšená spotřeba elektrické energie a pomalý tisk. [10]

3.1 Druhy aditivní výroby

V současné době, je již mnoho technologií pro 3D tisk, ovšem každá z těchto technologií se používá pouze pro některé materiály. Zvýrazněné technologie se používají pro tisk materiálů z kovového prášku.

- Stereolitografie (SLA)
- **Selective Laser Sintering (SLS)**
- Laminated Object Manufacturing
- Selective Heat Sintering (SHS)
- **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**
- Fused Deposition Modeling
- Powder bed and injekt head
- Electron Beam Fabrication (EBF)
- Electron Beam Melting (EBM)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Digital Light Processing (DLP) [7]

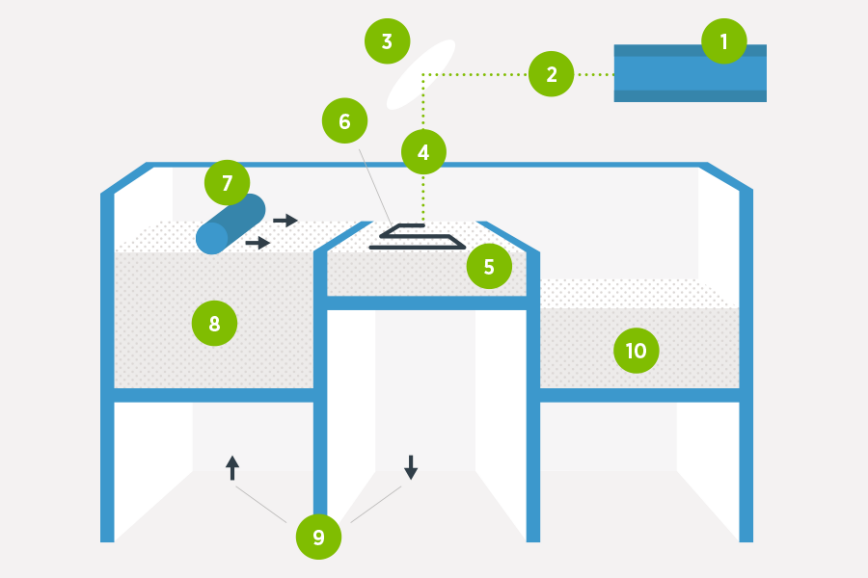
3.1.1 Selective Laser Sinterinig (Selektivní spékání laserem)

Tato technologie 3D tisku používá materiály v práškové formě, mohou to být plasty, kovy, keramika a sklo. Pro spojování práškového materiálu se využívá vysokých teplot CO_2 laseru, tento proces nazýváme spékání. Na stavěcí platformu stroje se nanesena tenká vrstva prášku pomocí speciálního válečkového systému, dojde k předehřevu prášku na teplotu těsně pod bod jeho tání, tím se zvyšuje efektivita laseru. Následně laser osvítí určenou plochu, tím dojde ke spečení vrstvy s vrstvou pod ní a následně se platforma sníží o velikost jedné vrstvy materiálového prášku. Tento proces se opakuje, dokud není součástka či výrobek dokončen. Pří spékání je komora stroje hermeticky uzavřena a naplněna inertním plynem (dusík nebo argon) z důvodů ochrany jakosti povrchu. Na obrázku 3.1 je zobrazen princip selektivního spékání laserem.

Tento výrobní proces se neobejde bez dokončovacích operací jako je tryskání, obrábění, broušení a leštění. [9]

Popis jednotlivých částí obrázku 3.1

1. Laser
2. Laserový paprsek
3. Optika zrcadla
4. Směrovaný paprsek
5. Komora
6. Vyrobená část
7. Válec
8. Zásobník prášku
9. Písty
10. Sběrná nádoba na prášek [8]



Obr. 3.1 Schéma SLS [8]

Podpory u této technologie jsou tvořeny nespečeným práškem v okolí součásti či výrobku, což je považováno za výhodu, protože se nemusí uvažovat při tvoření modelu. Za další výhody jsou považovány vysoká pevnost, možnost vytvářet tvarově složité součásti a rozsáhlé spektrum použitelných materiálů.

Mezi nevýhody této technologie se především řadí vysoká energetická náročnost a cena stroje. Dále nelze vyrobit uzavřenou dutinu, aniž by uvnitř nezůstal nespečený prášek a v neposlední řadě nižší kvalita povrchu. [9]

3.1.2 Direct Metal Laser Sintering (řízené spékání kovu laserem)

Technologie DMLS se od technologie SLS liší pouze tím, že se soustřeďuje pouze na kovové prášky, ale princip zůstává stejný jako SLS. Díky materiálu, který se musí spéct, se používá silnější laser a jemnější prášek a vrstva naneseného prášku je v rozmezí 20–150 µm.

Mezi hlavní výhody této technologie patří tvoření složitých tvarů, které nelze běžnými metodami zhotovit. Zároveň výrobek neztrácí na funkčnosti a mechanických vlastnostech a je plně srovnatelnými s běžnými metodami výroby jako je obrábění či odlévání. Další výhodou DMLS je minimalizace použití podpor a znovupoužití nespotřebovaného prášku, to činí u obou technologií až 98 %. Díky tomu se stává SLS i DMLS velice ekonomickými i ekologickými procesy.

Nevýhody jsou stejné jako u SLS, a tedy vysoká energetická náročnost a cena stroje. [9]

3.2 Kovový prášek

V dnešní době jsou kovy nejrychleji rostoucím segmentem 3D tisku. Levné kovové prášky jsou klíčovým předpokladem pro 3D tisk, k realizaci jeho potenciálu a transformaci průmyslové výroby. Dostupné kovové prášky pro výrobu aditiv jsou většinou ty, které se používají v celé řadě aplikací, kterými jsou lékařství, letectví, šperkařství či automobilový průmysl. Mezi takové prášky se řadí nástrojové oceli, vysokopevnostní oceli, nerezové oceli, hliníkové slitiny, slitiny na bázi kobaltu, chromu a niklu, čistý titan nebo jeho slitiny, slitiny mědi a drahé kovy.

Kovové prášky se liší velikostí zrn, ale i jejich tvarem. V důsledku toho se mění charakteristiky zpracování v kovových systémech aditivní výroby. K zajištění konzistence a opakovatelnosti kvality výrobků je nutná spolupráce výrobců strojů s dodavateli prášků. [11]

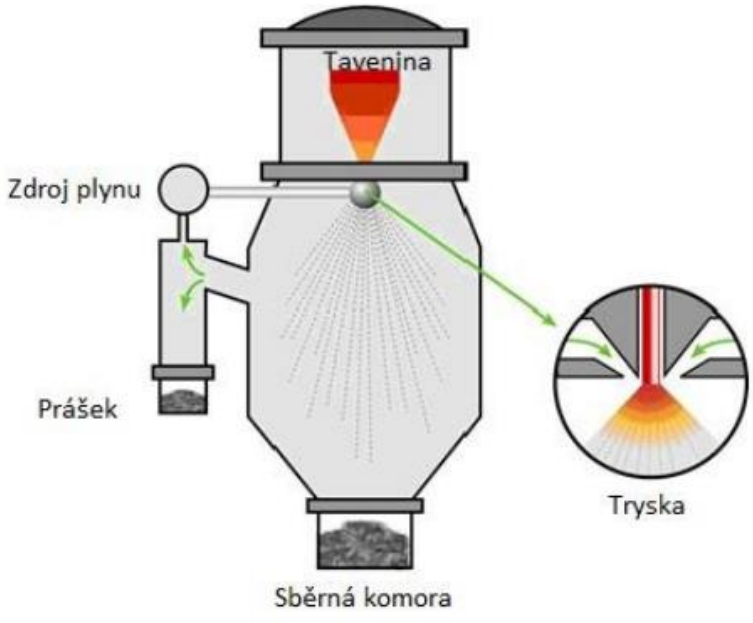
3.2.1 Výroba prášku

Výroba kovového prášku nejčastěji probíhá fyzikálně-mechanickým způsobem, a to rozstřikováním taveniny neboli atomizací. Samotný proces probíhá za působení tlakového plynu, proudu tekutiny nebo odstředivých sil na roztavený kov, jehož kapky se mění na prášek za rychlého ochlazení v rozstřikovacím médiu. Vlastnosti kovového prášku (velikost, tvar, morfologie, struktura, …) jsou dány mnoha faktory:

- teplota taveniny
- viskozita a povrchové napětí taveniny
- podmínky ochlazování
- podmínky atomizace [12]

Jemnost prášku se zvyšuje s rostoucí teplotou taveniny. [12]

Na výrobu kovového prášku pro aditivní technologii se používá atomizace taveniny plynem (vzduch, dusík, helium nebo argon). Tento proces zajišťuje homogenitu výroby a dobré vlastnosti prášku díky sférickému tvaru, což je u aditivní výroby žádoucí. Na obrázku 3.2 je vidět princip výroby kovového prášku atomizací plynem. [12]



Obr. 3.2 Schéma atomizace prášku plynem [12]

Forma, kterou se bude zabývat tato práce je vyrobená technologií DMLS a vyrábí se na stroji EOS M290. Na výrobu formy se používá kovový prášek 1.2709.

4 ZPRACOVÁNÍ LCA STUDIE

Práce se zabývá posouzením environmentálních dopadů formy pro vysokotlaké lití zinku vyráběnou aditivní technologií a srovnáním těchto dopadů s dopady celoživotního cyklu formy vyráběné konvenčně, tedy obráběním. Forma vyráběná aditivní technologií je prvním prototypem pro vyrábění zinkových odlitků, konvenční forma se již vyrábí několik let. Obě formy se používají pro výrobu stejné součástky (obrázek 4.1) – zinková součástka se používá v automobilovém průmyslu a vyrábí se tedy metodou vysokotlakého odlévání. Pro tuto práci většinu dat poskytla firma Beneš a Lát, s.r.o., kde tyto formy vyrábějí a rovněž je používají pro zhotovení odlitků. Data, která nemohla firma poskytnou, byla čerpána z odborné literatury a z databáze Ecoinvent SimaPro. [23]

Důvodem této studie je odlišnost těchto forem. Forma vyrobená aditivní technologií má několik výhod oproti formě vyráběné konvenčně, a to má menší hmotnost, její výroba trvá kratší dobu a u fáze používání se také zkrátí výrobní čas. Předpokladem tedy je, že forma vyráběná 3D tiskem bude mít menší dopady na životní prostředí než forma vyráběná konvenčně.

Obr. 4.1 Vyráběná součástka ve formách

Software SimaPro byl použit pro vytvoření modelu a výpočet výsledků analýzy LCA. Je předním světovým softwarem používaným v oblasti poskytování faktů potřebných k vytvoření studie o udržitelné hodnotě výrobků. [14]

4.1 Definice cíle a rozsahu

Cílem práce je posouzení a srovnání environmentálních dopadů výroby formy určené pro vysokotlaké lití zinku vyráběné technologií 3D tisku a konvenční technologií. Životnost formy se předpokládá na 1 000 000 vyrobených kusů odlitků pro obě varianty. Cílem je najít odpověď na otázku, jestli jsou dopady na životní prostředí v celém životním cyklu formy nižší u formy vyráběné 3D tiskem nebo u formy vyráběné konvenčně.

Funkce

Jedná se o posouzení dopadů na životní prostředí dvou forem pro vysokotlaké odlévání zinku. Hlavní funkcí obou forem je výroba součástky, která se dodává do automobilového průmyslu.

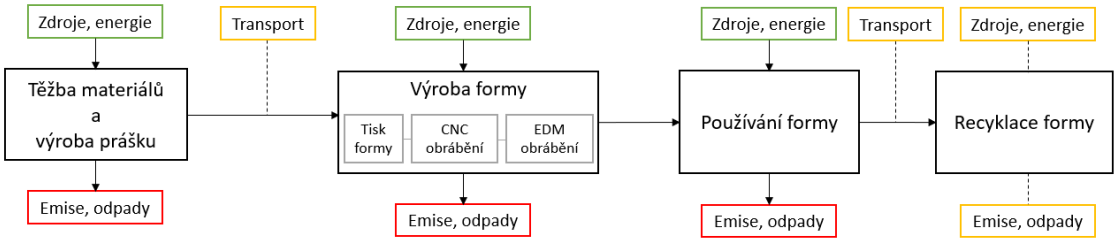
Funkční jednotka

Jako funkční jednotka zde byla zvolena výroba 1 000 000 kusů součástky ve studované formě, protože životnost obou forem je dimenzována na stejné množství vyrobených odlitků.

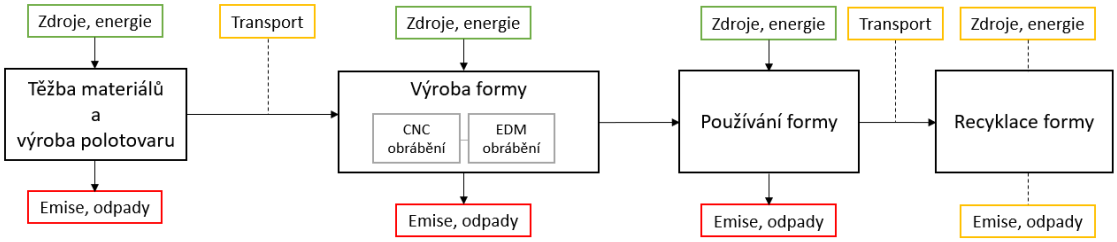
Hranice systému

Hranice systému byly postaveny tak, aby zahrnovaly celý životní cyklus forem a zejména rozdíly způsobené rozdílnou výrobou. Do systému byly zahrnuty zdroje, energie, emise a odpady tří fází životního cyklu, tedy těžby materiálu a výroby prášku/výroby polotovaru, výroby formy a užívání formy. Transporty byly zanedbány, lze ovšem předpokládat, že dopady by byli velmi nízké z důvodů převážení malého množství materiálu. Dále se předpokládá, že by dopady transportu obou forem byly podobné i přes rozdílnou hmotnost materiálů, protože materiál pro 3D tištěnou formu se dováží z Německa. Dále byl zanedbán samotný proces recyklace (např.: svoz materiálu), ale materiálové úspory vzniklé znovuvyužitím použitého matriálu na výrobu obou forem jsou do výpočtu zahrnuty.

Na schématech 4.2 a 4.3 jsou v černých rámečcích hlavní fáze systému, v zelených rámečcích jsou vstupy, v červených rámečcích jsou výstupy a žluté rámečky jsou zanedbané vstupy či výstupy.



Obr. 4.2 Hranice systému formy vyráběné 3D tiskem



Obr. 4.3 Hranice systému formy vyráběné konvenčně

4.2 Inventarizační analýza

Cílem této fáze je shromáždit data o vlivu produktu na životní prostředí v celém životním cyklu výrobku. Nejprve je nutné určit všechny materiálové a energetické vstupy (spotřeba surovin, materiálů, energie) a výstupy (znečišťování ovzduší, vody a půdy, nakládání s odpady) v jednotlivých životních etapách produktu. Pak následuje sběr údajů o jednotlivých vstupech a výstupech.

4.2.1 Životní cyklus formy vyráběné 3D tiskem

Tato výroba formy je nová možnost, jak vyrábět formu pro odlévání a má několik výhod. První výhodou je snížení množství materiálu pro výrobu, dále úspora času při výrobě formy a v neposlední řadě úspora času při užívání formy, tedy výroby součástky. Technologie 3D tisku umožňuje úplně jiné konstrukční provedení samotné formy a díky tomu lze lépe odvádět teplo při odlévání a tím se tedy zrychluje výrobní čas součástky.

Forma se vyrábí z dostupného kovového prášku 1.2709. Specifikace tohoto materiálu jsou v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 Složení materiálu 1.2709

Legující prvek	**Fe**	**Ni**	**Co**	**Mo**	**Ti**	**Al**
Obsah [%]	balance	17,00-19,00	8,50-9,50	4,50-5,20	0,60-0,80	0,05-0,15
Legující prvek	Cu	C	Mn	Si	P	S
Obsah [%]	<0,50	<0,03	<0,10	<0,10	<0,01	<0,01

- *TĚŽBA MATERIÁLU A VÝROBA PRÁŠKU*

Data pro výrobu kovového prášku byla čerpána z odborné literatury, protože firma prášek nakupuje, ale nevyrábí, tedy nemohla data pro tuto část poskytnout.

V této studii se předpokládá rozprašování plynu modelováno jako vstup suroviny a energie a výstup kovového prášku. Využití energie pro atomizaci plynu spočívá v roztavení materiálu a energie pro výrobu a natlakování rozprašovacího plynu. Tabulka 4.2 udává hodnoty pro jednotlivé materiály. [13]

Výroba kovového prášku

Tabulka 4.2 Energie na atomizace kovového prášku

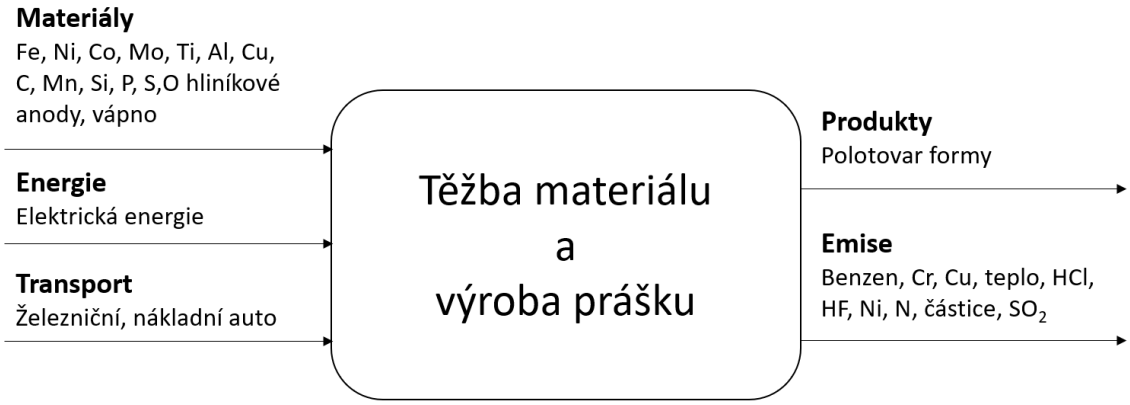
Výroba kovového prášku		
	Tavná energie [MJ/kg]	Natlakování plynu [MJ/kg]
Slitina oceli	2,5	0,44
Slitina niklu	2,5	0,44

Kvůli omezenosti dat jsou všechna čísla v tabulce přibližná. Výsledky dle Lavery (2013) uvádějí, že hodnota pro natlakování plynu je nadhodnocená. Naopak Faludi (2017) a Morrow (2007) uvádějí, že využití atomizační energie pro nástrojovou ocel je přibližně 8-26 MJ/kg, což naznačuje podceňování. [13]

V tomto případě se považuje odhad za přijatelný, protože v celkové analýze jsou rozdíly jednotlivých hodnot minimální a byla zvolena energie 8 MJ/kg.

Pro modelování dopadů materiálu byla použita databáze softwaru, a protože zde nebyl stejný materiál, byla použita chrom niklová ocel vyrobená v elektrické peci, která byla upravena dle chemického složení materiálu DIN 1.2709. Pro atomizaci byla přidána energie potřebná pro

roztavení materiálu i natlakování plynu. Protože prášek, z kterého se forma vyrábí, je vyráběn v Německu, byla v databázi zvolena elektrická energie pro Německo.



Obr. 4.4 Vstupy a výstupy těžby materiálu a výroby prášku

- *VÝROBA FORMY*

Výroba formy probíhá ve firmě Beneš a Lát, s.r.o., kde byla čerpána všechna dostupná data. Forma se tiskne na 3D tiskárně EOS M290 pro kovový tisk, následně se forma obrábí nejprve na CNC stroji (Computer Numeric Control), a poté stroji pro EDM (Electric Discharge Machining).

Provedené výpočty dat pro následné zpracování analýzy

Aby se mohla data využít v programu pro výpočet dopadů, musely se spočítat hmotnosti kovového prášku, propal z tisku, podpor a odpadu z obrábění.

Je známa hmotnost formy, která váží 3,28 kg, dále jsou známy objemy formy a podpor a hustota materiálu. Z těchto hodnot se dopočítaly potřebné hmotnosti výše vyjmenované.

Hmotnost formy

$$\boldsymbol{m_f = 3,28\ \mathbf{kg}}$$

$m = V \cdot \rho$, kde

m → hmotnost, V → objem, ρ → hustota

$\rho = 8{,}0 - 8{,}1\ g \cdot cm^3 \rightarrow průměr\ \rho = 8{,}05\ g \cdot cm^3$

Hmotnost formy po vytištění

$V_1 = 280495{,}350\ mm^3 = 280{,}495350\ cm^3$

$V_2 = 279899{,}456\ mm^3 = 279{,}899456\ cm^3$

$m_{pol} = 280{,}495350 \cdot 8{,}05 + 279{,}899456 \cdot 8{,}05$

$m_{pol} = 2\,258 + 2\,253$

$\boldsymbol{m_{pol} = 4\,511\ g = 4{,}511\ kg}$

Hmotnost prášku a propalu

Je známo, že ztráta prášku při výrobě je 10 %.

$m_p = 4{,}511 \cdot \frac{1}{0{,}9}$

$\boldsymbol{m_p = 5{,}012\ kg}$

$m_{pr} = 5{,}012 \cdot 0{,}1$

$\boldsymbol{m_{pr} = 0{,}501\ kg}$

Hmotnost šrotu z podpor

$m_{š} = 63{,}026799 \cdot 8{,}05 + 62{,}725102 \cdot 8{,}05$

$\boldsymbol{m_{š} = 1012{,}303\ g = 1{,}012\ kg}$

Hmotnost třísek

$m_o = m_p - m_f - m_{š} - m_{pr}$

$m_o = 5{,}012 - 3{,}28 - 1{,}012 - 0{,}501$

$\boldsymbol{m_o = 0{,}219\ kg}$

Vstupy a výstupy jsou uvedeny v tabulkách 4.3 a 4.4.

Tabulka 4.3 Vstupy pro výrobu formy vyráběnou 3D tiskem

Vstupy	Množství	Jednotka
Kovový prášek	5,012	kg/forma
Elektrická energie – tisk	3,2	kW/h
Elektrická energie – obrábění	2	kW/h
Grafit	2	kg/forma

Tabulka 4.4 Výstupy výroby formy vyráběné 3D tiskem

Výstupy	Množství	Jednotka
Forma	1	ks
Propal prášku	0,501	kg
Šrot z podpor	1,012	kg
Třísky	0,219	kg

Materiálovým vstupem je kovový prášek, kterého se spotřebuje okolo 5 kg. Dalším vstupem je množství elektrické energie, které bylo spočítáno dle spotřeby jednotlivých strojů. U tisku se spotřebuje 3,2 kW za hodinu práce stroje a u obrábění CNC i EDM průměrně 2 kW za hodinu práce stroje. Posledním vstupem jsou elektrody pro EDM obrábění, na které se používá 2 kg grafitu.

Hlavním výstupem je tedy samotná forma, která váží 3,28 kg. Dalšími důležitými výstupy jsou propal prášku, šrot z podpor a odpad materiálu z obrábění tedy třísek.

Výstupy, které se zanedbaly ve studii, jsou kontaminace vody ve vysavači tiskárny (ta se mění jednou za několik let), maziva a chladiva u obrábění (všechna média obíhají v systému přes filtr a jsou opakovaně používána).

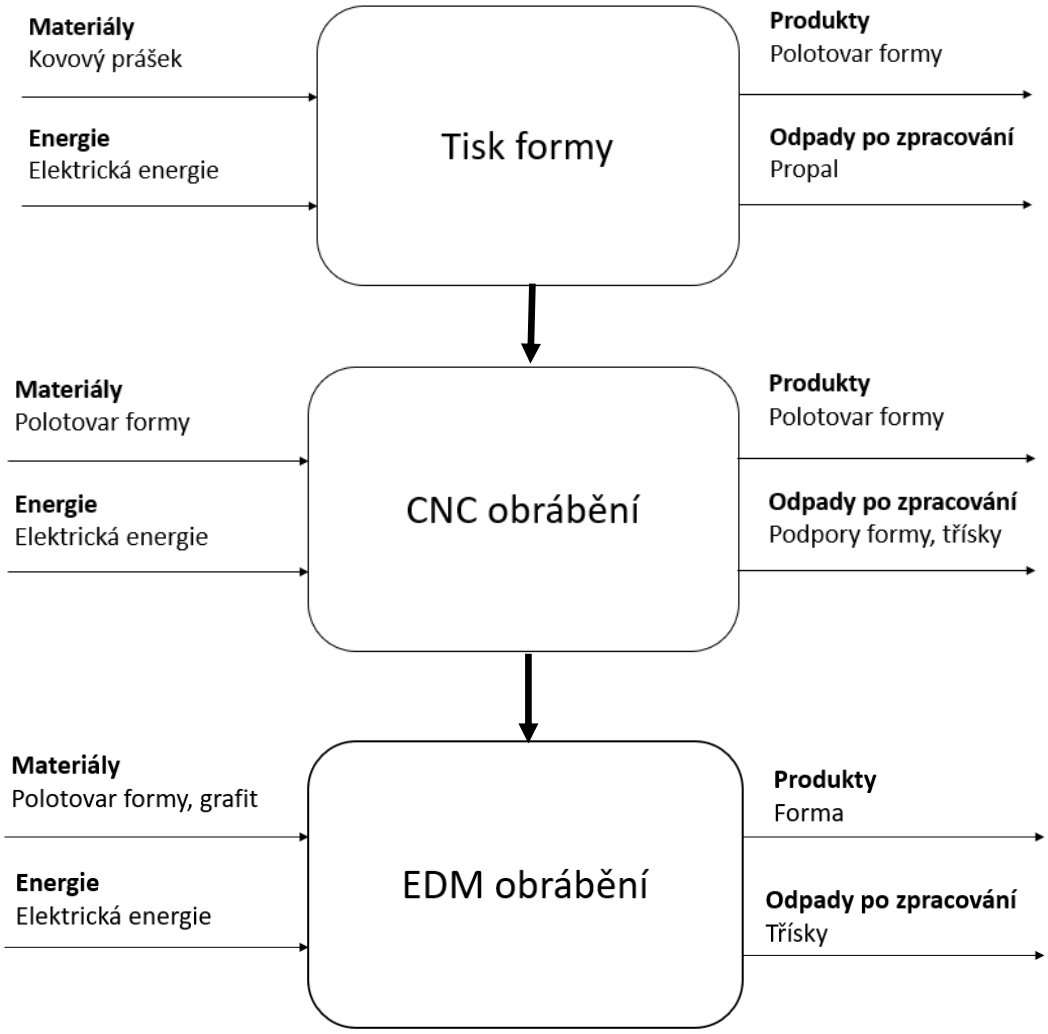
Forma se celkově vyrábí 491,7 hodin (tabulka 4.5), z toho nejkratší čas trvá samotný tisk a to 41,7 hodin. Naopak nejdelší čas trvá formu obrobit na CNC stroji, kde čas dosahuje necelých 276 hodin. EDM obrábění trvá 174,1 hodin. Časy, které jsou zde uvedeny, pochází z výroby prvního prototypu formy, takže se předpokládá, že zde bude po vyrobení dalších forem čas mírně odlišný a zpřesněný.

Tabulka 4.5 Časy jednotlivých fází výroby formy tištěné

	Čas [hod]
3D tisk	41,7
CNC obrábění	275,9
EDM obrábění	174,1
Celkem	491,7

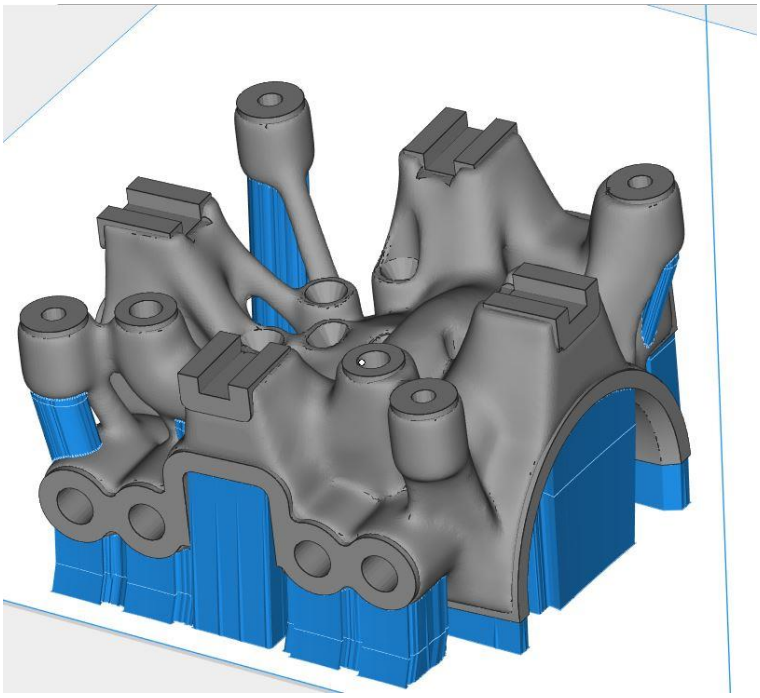
Do analýzy v SimaPro byla vložena data dle jednotlivých procesů, nejprve pro 3D tisk, pak následuje CNC obrábění, a nakonec EDM obrábění. Data pro tištěnou formu se vložila ve formě spotřebované elektřiny a počtu hodin tisku, CNC obrábění bylo také vytvořeno přes spotřebu elektrické energie a počtu hodin obrábění a stejně tak tomu bylo i u EDM obrábění.

Na obrázku 4.5 vidíme jednotkové procesy jednotlivých úkonů při výrobě formy.



Obr. 4.5 Schéma vstupů a výstupů výroby formy 3D tiskem

Na obrázku 4.6 je forma namodelovaná v programu, kde šedivě je zobrazena forma a modře podpory. Ty slouží k pevnému ukotvení na tiskovou platformu, odvodu tepla a podpoře jinak nevytisknutelných tvarů. Samotné podpory jsou ze stejného materiálu jako forma, liší se pouze použitými tiskovými parametry. Podpory jsou odsekávány ručně před obráběním a odpad z podpor byl zahrnut do odpadů k CNC obrábění.



Obr. 4.6 Model poloviny tištěné formy

- *UŽÍVÁNÍ FORMY*

Forma je využívána na výrobu součástek do automobilového průmyslu. Během jejího užívání se vyrobí 1 000 000 ks součástek. Samotná součástka se vyrábí pomocí vysokotlakého odlévání zinku na stroji TECHMIRE NTX 44. Výroba jedné součástky trvá 2,45s. Podrobná data jsou uvedena v tabulkách 4.6 a 4.7. a jednotkový proces je zobrazen na obrázku 4.7.

Tabulka 4.6 Vstupy užití tištěné formy

Vstupy	**Množství**	**Jednotka**
Elektrická energie	28,9	kWh
Hydraulická kapalina + postřik	153,69	mg/1 ks

Tabulka 4.7 Výstupy užití tištěné formy

Výstupy	**Množství**	**Jednotka**
Oxidy dusíku	16,18	mg/1 ks
Oxid uhelnatý	15,73	mg/1 ks
Oxid siřičitý	27,5	mg/1 ks
Tuhé znečistění (prach)	8,09	mg/1 ks

Vstupem je zde elektrická energie stroje, kde je spotřeba 28,9 kW za hodinu práce stroje. Dále do užití formy vstupuje hydraulická kapalina a postřik v množství 153,69 mg na kus.

Jednotlivé výstupy jsou spočítány z celoroční spotřeby zinku odlitého na stroji Techmire NTX 44 a byly přepočítány na jeden kus odlité součásti, tato data byla dodána firmou Beneš a Lát, s.r.o. Oxidu dusíku se uvolní 16,18 mg na kus, oxidu uhelnatého 15,73 mg na kus, oxidu siřičitého 27,5 mg na kus a tuhého znečištění je 8,09 mg na kus.

Obr. 4.7 Schéma vstupů a výstupů používání formy vyrobené 3D tiskem

- *RECYKLACE FORMY*

Po ukončení života se forma dává do šrotu. Pro recyklaci byla uvažována hmotnost formy (3,28 kg), odpad z podpor (1,012 kg), propal byl započítán pouze z padesáti procent (0,25 kg), protože část je zachycena na filtrech tiskárny a část je odloučena v prosévačce a třísky z obrábění (0,219 kg), tento materiál lze znovu využít jako vstupní materiál pro výrobu oceli, proto byly environmentální dopady ze vstupů odečteny.

4.2.2 Životní cyklus formy vyráběné konvenčně

Konvenční způsob výroby formy, tedy běžný způsob výroby znamená, že se polotovar materiálu obrobí do požadovaného tvaru a forma je připravena k použití. Nevýhodou této metody je, že obráběním nemůže forma dosáhnout takových tvarů, jako u formy vyráběné 3D tiskem. Z tohoto důvodu při používání formy je horší odvod tepla při odlévání součásti a tím i delší čas výroby.

Forma se vyrábí z běžně dostupného materiálu 1.2367, tedy nástrojové oceli. Chemické složení je uvedeno v tabulce 4.8. [15]

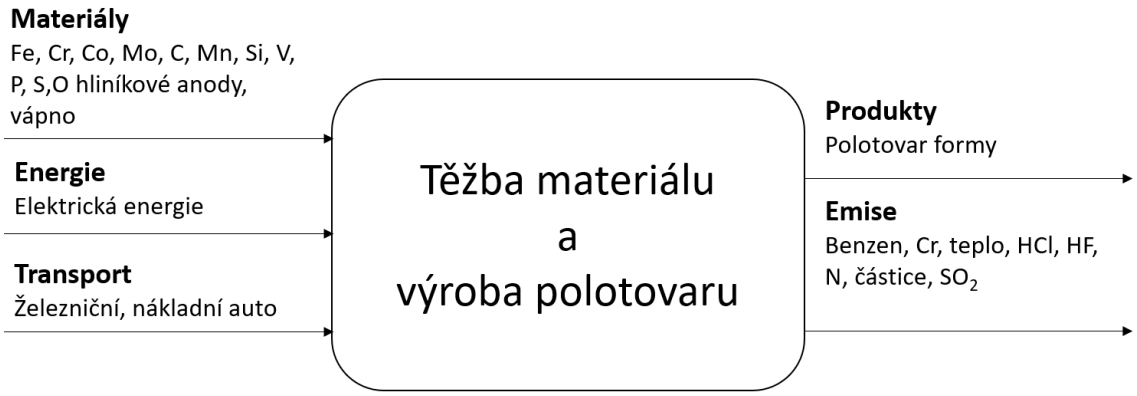
Tabulka 4.8 Složení materiálu 1.2367

Legující prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
Obsah [%]	0,35-0,40	0,30-0,50	0,30-0,50	<0,03	<0,02	4,80-5,20	2,70-3,20	0,40-0,60

- *VÝROBA MATERIÁLU*

Výroba nástrojové oceli probíhá v peci s elektrickým obloukem, do které se vloží vsázka. Poté se pec spustí a matriál v ní se začne natavovat, pomocí různých čidel v peci se automaticky hlídá teplota a další parametry. V průběhu tavby se odebírají vzorky, u kterých je zjišťován obsah chemických prvků. Nakonec probíhá legování jednotlivými chemickými prvky, dle požadovaného složení oceli a vylití tavby. [17]

Pro modelování dopadů materiálu byla použita databáze softwaru, a protože zde nebyl stejný materiál, byla použita chrom niklová ocel vyrobená v elektrické peci, která byla upravena dle chemického složení materiálu 1.2367. Tento materiál se následně ještě válcuje, takže byl přidán proces válcování, a tím byl vytvořen vstupní polotovar pro výrobu formy. Kalení materiálu bylo zanedbáno.



Obr. 4.8 Vstupy a výstupy těžby materiálu a výroby prášku

- *VÝROBA FORMY*

Data byla čerpána z firmy Beneš a Lát, s.r.o., kde se forma vyrábí. Pro výrobu formy jsou potřeba dva polotovary ve tvaru kvádru. Poté se každá polovina polotovaru obrobí nejprve na CNC stroji, a poté se obrábí na EDM stroji.

Zde byla poskytnuta velikost polotovaru. Pro jednu polovinu formy je potřeba kvádr o velikosti 102x102x54 mm. Dále se přiřadila odpovídající hustota materiálu. Hmotnosti obrobených polovin forem je 3,63 kg a 3,57 kg.

Hmotnost polotovaru

$$V = a \cdot b \cdot c$$

$$V = 102 \cdot 102 \cdot 54$$

$$V = 561\,816\ mm^3 = 0{,}000\,561\,816\ m^3$$

$$\rho = 7850\ \mathrm{kg/m^3}$$

$$m = V \cdot \rho$$

$$m_p = 0{,}000561816 \cdot 7850 \cdot 2$$

$$\boldsymbol{m_p = 8{,}820\ kg}$$

Hmotnost formy

$$m_f = 3{,}63 + 3{,}57$$

$$\boldsymbol{m_f = 7{,}2\ kg}$$

Hmotnost třísek

$$m_o = 8{,}820 - 7{,}2$$

$$\boldsymbol{m_o = 1{,}62\ kg}$$

Tabulka 4.9 Vstupy výroby formy konvenční

Vstupy	Množství	Jednotka
Polotovar	8,82	kg/forma
Elektrická energie – obrábění	2	kW/h
Grafit	2	kg/forma

Tabulka 4.10 Výstupy výroby formy konvenční

Výstupy	Množství	Jednotka
Forma	1	ks
Třísky	1,62	kg/forma

Vstupy (tabulka 4.9) pro výrobu formy je nakupovaný polotovar nástrojové oceli, kterého jsou dvě poloviny a dohromady váží 8,82 kg. Dalším vstupem je elektrická energie, která byla spočítána dle spotřeby stroje a činí průměrně 2 kW za hodinu práce stroje. Posledním vstupem jsou elektrody pro EDM obrábění, na které se používá 2 kg grafitu.

Výstupy (tabulka 4.10) je tedy samotná forma, která má hmotnost 7,2 kg a dalším výstupem jsou třísky z obrábění, které mají 1,62 kg.

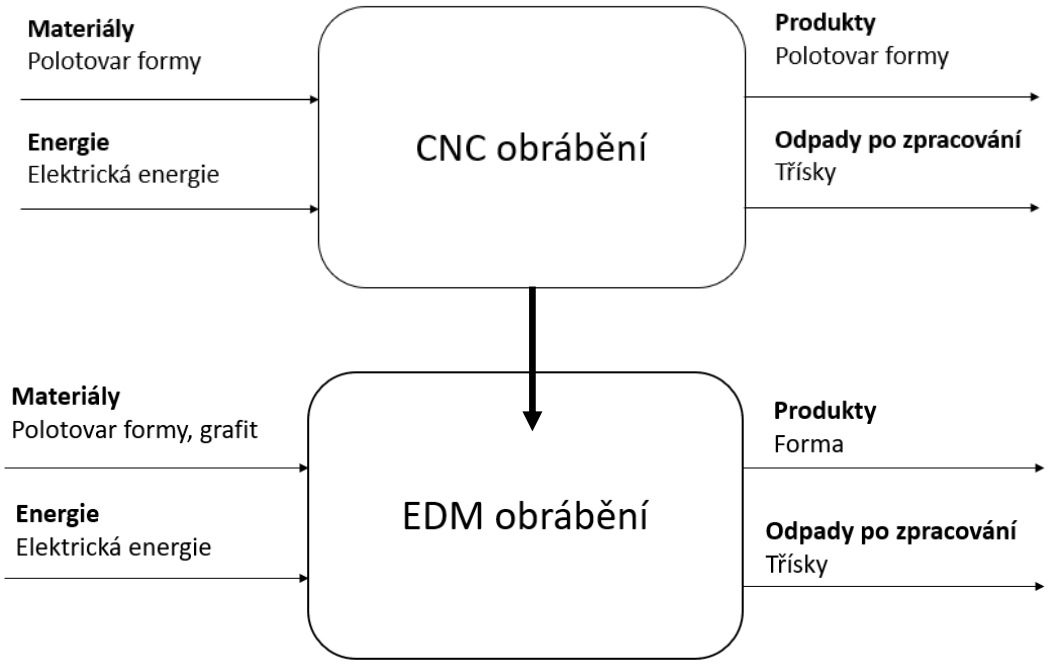
Výstupy, které se zanedbaly ve studii jsou maziva a chladiva u obrábění (všechna média obíhají v systému přes filtr a jsou opakovaně používána).

Forma se celkově vyrábí 600 hodin (tabulka 4.11), kde delší čas trvá obrábění na CNC stroji a to necelých 383 hodin a kratší EDM obrábění trvá 217,1 hodin.

Tabulka 4.11 Časy jednotlivých fází výroby formy konvenční

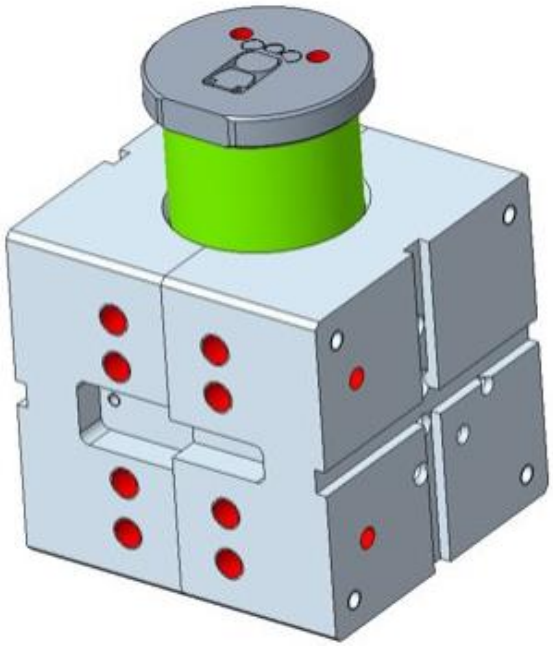
	Čas [hod]
CNC obrábění	382,9
EDM obrábění	217,1
Celkem	600

Zobrazení jednotkového procesu je na obrázku 4.9.



Obr. 4.9 Schéma vstupů a výstupů výroby formy klasickou technologií

Na obrázku 4.10 je vidět, že forma vyráběná konvenčně se tvarově velmi liší od formy vyráběné 3D tiskem (obrázek 4.6), zatímco tato forma připomíná krychli, forma tištěná má mnoho záhybů a vývodů, díky kterým lépe funguje odvod tepla při následném používání.



Obr. 4.10 Schéma formy vyrobené klasickou technologií

- *UŽITÍ FORMY*

Užití formy je stejné jako u formy vyráběné 3D tiskem, používá se na výrobu součástky do automobilového průmyslu. Během jejího užívání se vyrobí 1 000 000 ks součástek. Samotná součástka se vyrábí pomocí vysokotlakého odlévání zinku na stroji TECHMIRE NTX 44.

V čem se užití formy liší od formy tištěné je doba výroby jedné součástky, čas výroby je 2,85s u konvenční oproti pouhým 2,45 s u formy vyrobené 3D tiskem. Což by mělo hrát roli ve srovnání výsledných dopadů v rámci celého životního cyklu obou posuzovaných forem. Všechna data pro odlévání jsou stejná jako u předchozí formy a jsou uvedena v tabulkách 4.6 a 4.7 a jednotkový proces je zobrazen na obrázku 4.7.

- *RECYKLACE FORMY*

Po ukončení života se forma dává do šrotu. Zde bylo uvažováno, že celá forma (7,2 kg) a třísky z obrábění (1,62 kg) lze recyklovat, materiál se znovu použije na výrobu oceli a o to se výsledný environmentální dopad sníží. Toto bude patrné ve výsledcích v následující kapitole.

4.3 Hodnocení dopadů

Pro hodnocení dopadů byl vybrán software SimaPro 8.3.0.0. Metoda byla zvolena Impact 2002+, protože využívá čtrnácti midpointových a čtyřech endpointových indikátorů charakterizačních modelů a kombinuje jejich výhody. Jednotlivé kategorie midpointů jsou toxicita na lidské zdraví, která se ještě dělí na karcinogeny a nekarcinogeny, dále ionizační záření, úbytek ozónové vrstvy, respirační onemocnění způsobené organickými látkami, respirační onemocnění způsobené anorganickými látkami, ekotoxicita vod, půdní ekotoxicita, acidifikace a eutrofizace půd, užívání půdy, acidifikace vod, eutrofizace vod, globální oteplování, energie z neobnovitelných zdrojů a těžba surovin. Mezi kategorie endpointů patří lidské zdraví, kvalita ekosystému, klimatické změny a zdroje. [23]

Zároveň byla využívána integrovaná databáze v softwaru ecoinvent 3.2, která byla shromážděna v březnu 2016. Tato databáze je rozsáhlá, spolehlivá a zároveň obsahuje reprezentativní data v evropském měřítku. [23]

Nejdříve byly zhodnoceny dopady formy vyráběné 3D tiskem, následně se provedlo hodnocení formy vyráběné konvenčně. Pro obě formy byly výsledky po životních fázích i pro celý životní cyklus. Na závěr se obě formy a jejich dopady porovnaly a vyhodnotilo se, která forma má v celém životním cyklu nižší dopady na životní prostředí.

Všechny výsledky byly vyexportovány ze softwaru a převedeny do grafů pro lepší přehlednost a interpretaci. Midpointové indikátory jsou ve většině případů vyjádřeny pomocí charakterizace a jsou v procentuálním poměru, pouze u celého životního cyklu jsou i normalizovány, aby bylo možné interpretovat, ve kterých kategoriích jsou dopady na životní prostředí nejvyšší. Endpointové indikátory jsou normalizovány.

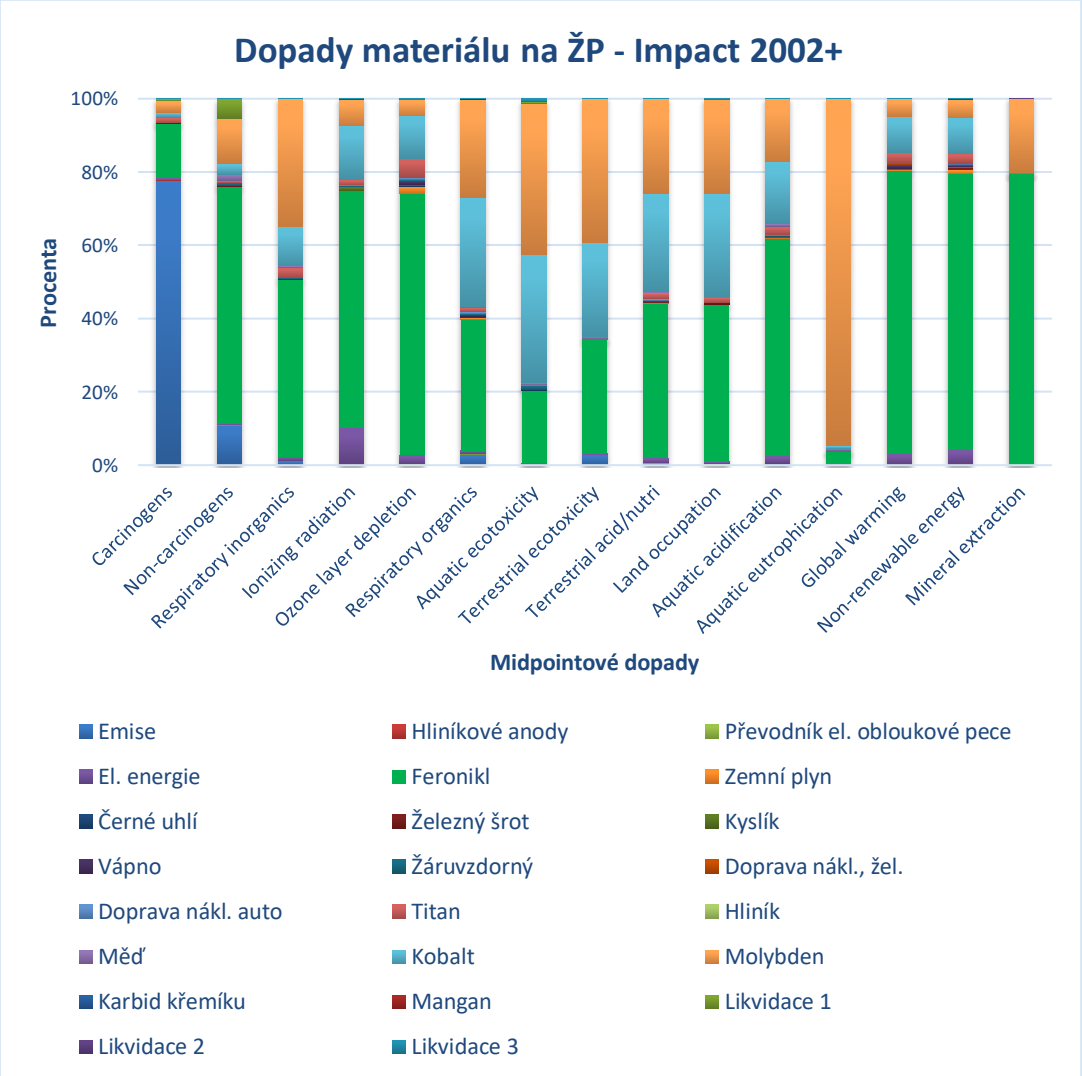
4.3.1 Dopady formy vyráběné 3D tiskem

Dopady na životní prostředí formy vyráběné 3D tiskem byly analyzovány nejdříve zvlášť po fázích životního cyklu. Prvně je zhodnocena těžba materiálů a výroba prášku, dále výroba formy, poté používání formy. Recyklace formy byla zahrnuta přímo v celém životním cyklu formy a nebyla vyhodnocena zvlášť.

- *HODOCENÍ MATERIÁLOVÝCH DOPADŮ*

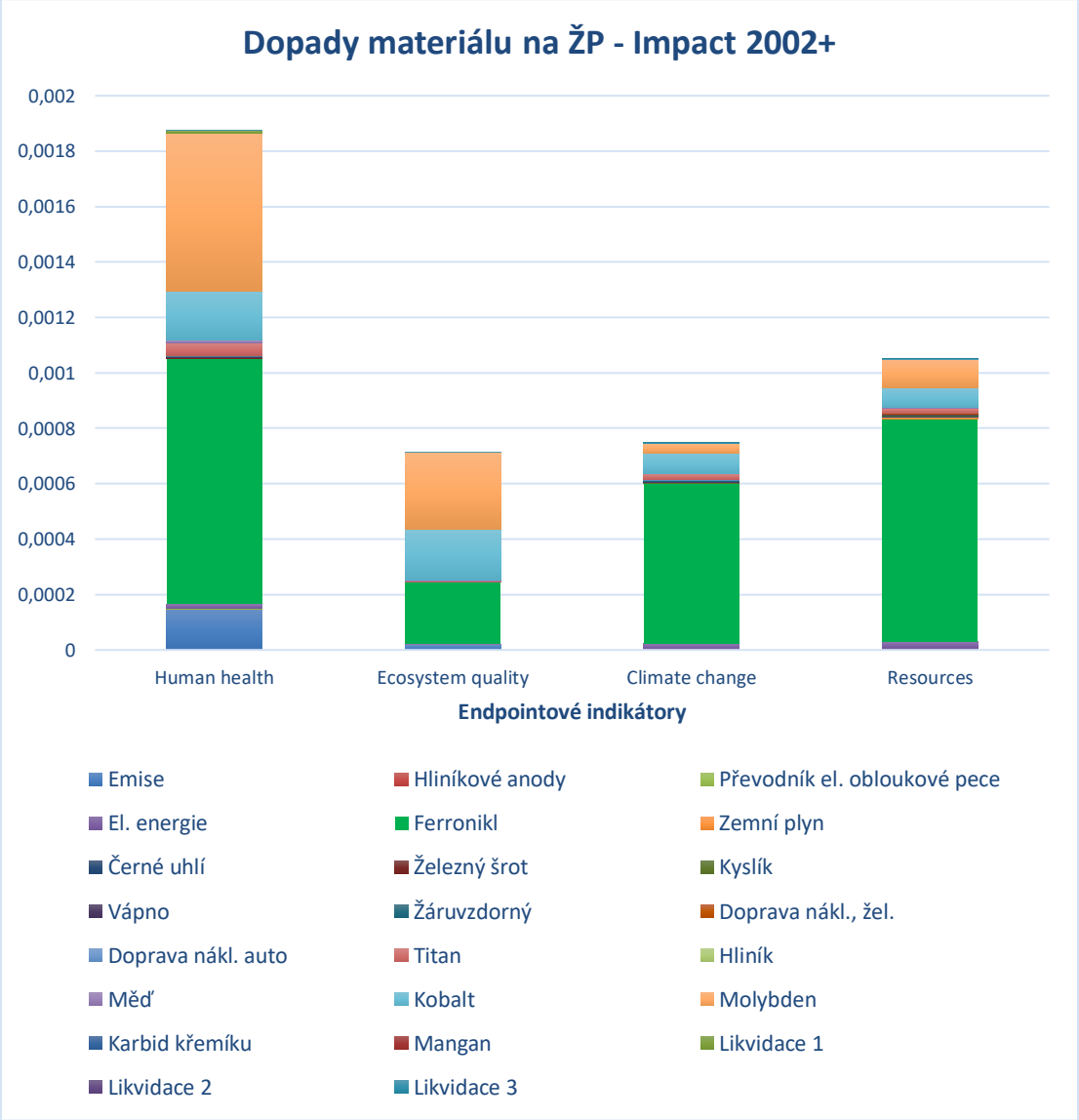
Výsledky pro materiálové dopady na životní prostředí jsou vztaženy na jeden kilogram materiálu.

Na následujícím grafu je možné vidět dopady těžby materiálu a jeho zpracování pro další použití. Je zřejmé, že největší dopady v midpointových indikátorech má feronikl, ten dosahuje osmdesáti procent v kategoriích globální oteplování, energie z neobnovitelných zdrojů a těžba surovin. Dalším významným prvkem z hlediska dopadů je molybden, ten má přibližně devadesát pět procent podílu v kategorii eutrofizace vod. Posledním významnějším prvkem podílejícím se na dopadech na životní prostředí je kobalt, největší podíl má v indikátoru ekotoxicita vod, a to třicet pět procent. U karcinogenů dosahují necelých osmdesáti procent emise. Ostatní vstupy mají dopady do deseti procent v jednotlivých kategoriích.



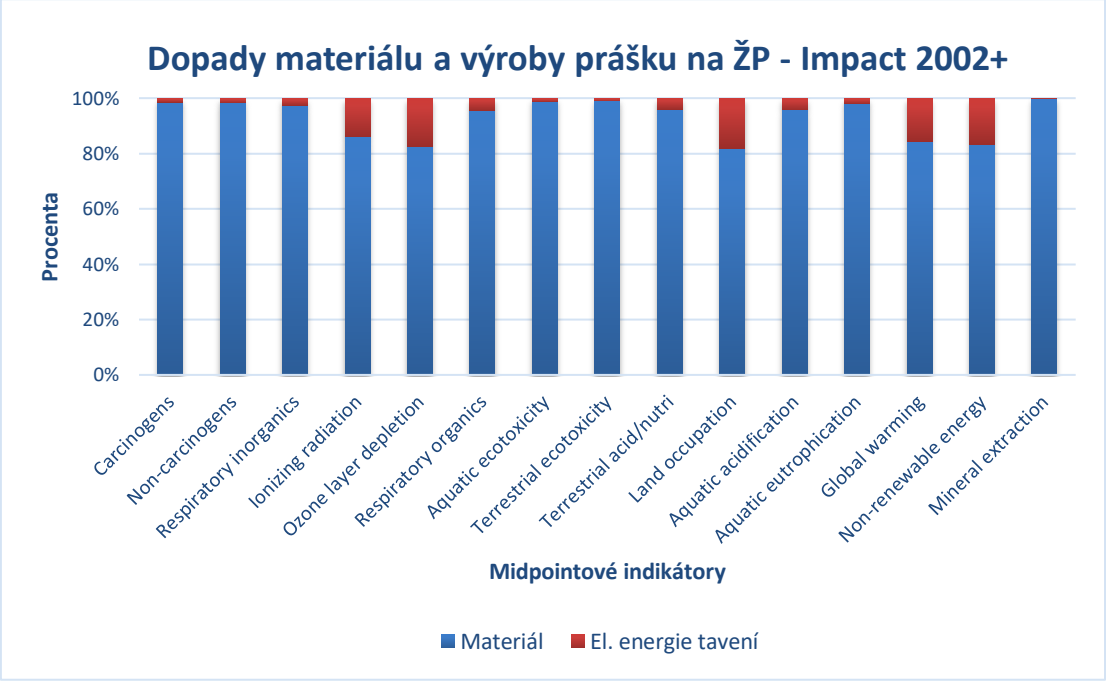
Obr. 4.11 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu pro 3D tisk (Impact 2002+)

Na dalším grafu jsou vidět čtyři endpointové indikátory, kde nejvyšší dopady vyšly na lidské zdraví, naopak nejnižší vyšly na kvalitu ekosystému. Dopady feroniklu se poměrově nejvíce podílejí na dopadech klimatické změny a zdroje. Na lidské zdraví má přibližně poloviční podíl a na kvalitě ekosystému se jeho dopady podílejí z jedné třetiny. Molybden má nejvyšší vliv na lidské zdraví, naopak na klimatickou změnu má vliv minimální. Kobalt má nejvyšší dopady na lidské zdraví, stejně tak se v této kategorii významně podílejí emise.



Obr. 4.12 Normalizační graf dopadů těžby materiálu pro 3D tisk (Impact 2002+)

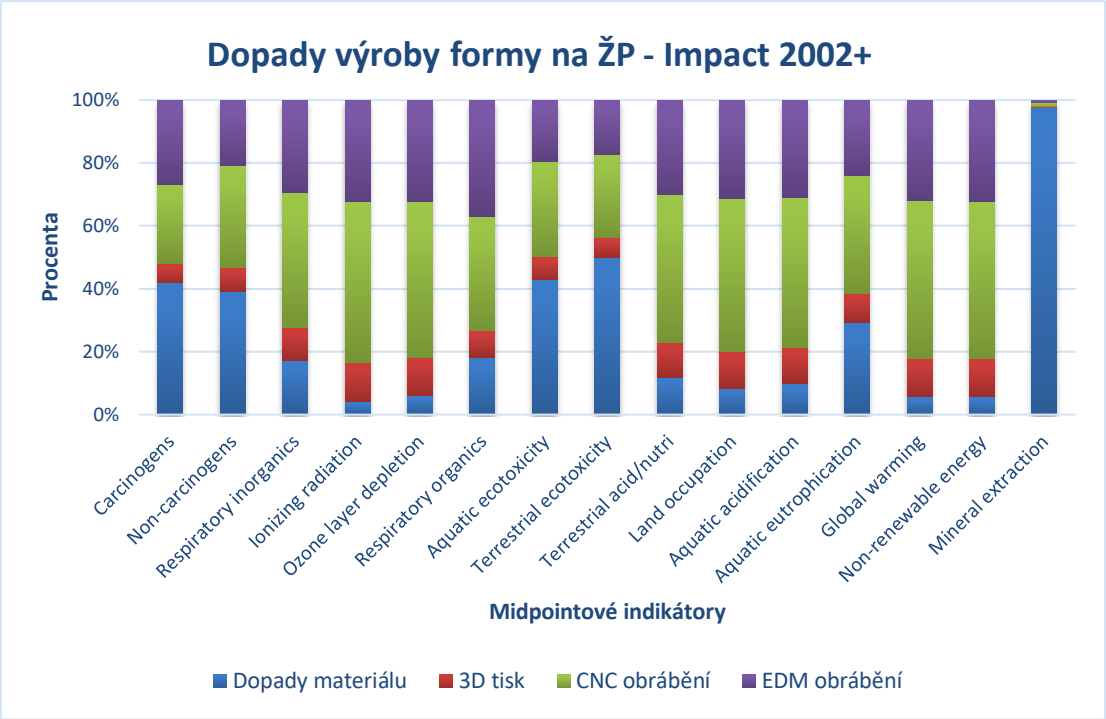
Dále je v odpadech zahrnuta i atomizace materiálu pro vznik kovového prášku. Je vidět, že zde má největší dopad vytěžení a zpracování materiálu, samotná atomizace prášku, kde byla započítána elektrická energie na roztavení materiálu a vhánění plynu, nemá tak vysoké dopady na životní prostředí. Pouze v kategoriích úbytku ozónové vrstvy, využívání půdy, globálního oteplování a energie z neobnovitelných zdrojů dosahují dopady necelých dvacet procent pro atomizaci.



Obr. 4.13 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu a výroby prášku (Impact 2002+)

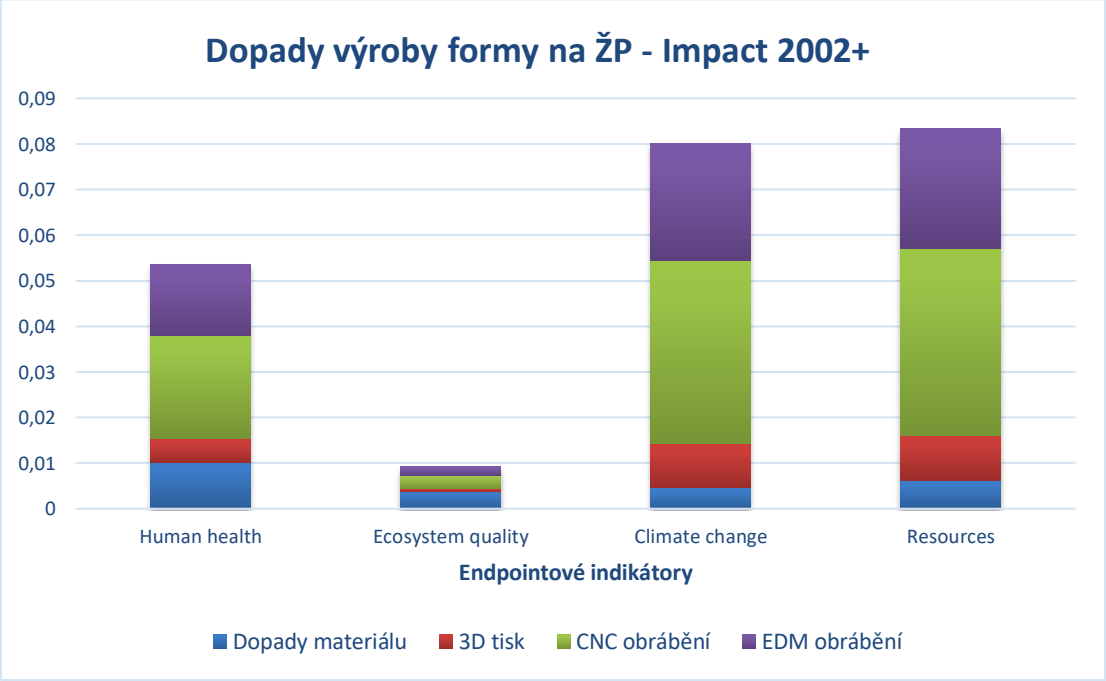
- *HODNOCENÍ DOPADŮ VÝROBY FORMY*

U dopadů výroby formy 3D tiskem je vidět, že hlavní podíl na dopadech má obrábění vyjma kategorie těžby surovin. CNC obrábění má o něco vyšší dopady než EDM, je to z důvodu, že CNC obrábění trvá u výroby formy déle. Proces 3D tisku se podílí na všech indikátorech do dvanácti procent kromě těžby surovin. Dopady materiálu se významně podílí na těžbě surovin, dále pak na karcinogenech, nekarcinogenech, toxicitě vod a půdní ekotoxicitě.



Obr. 4.14 Charakterizační graf dopadů výroby formy 3D tiskem (Impact 2002+)

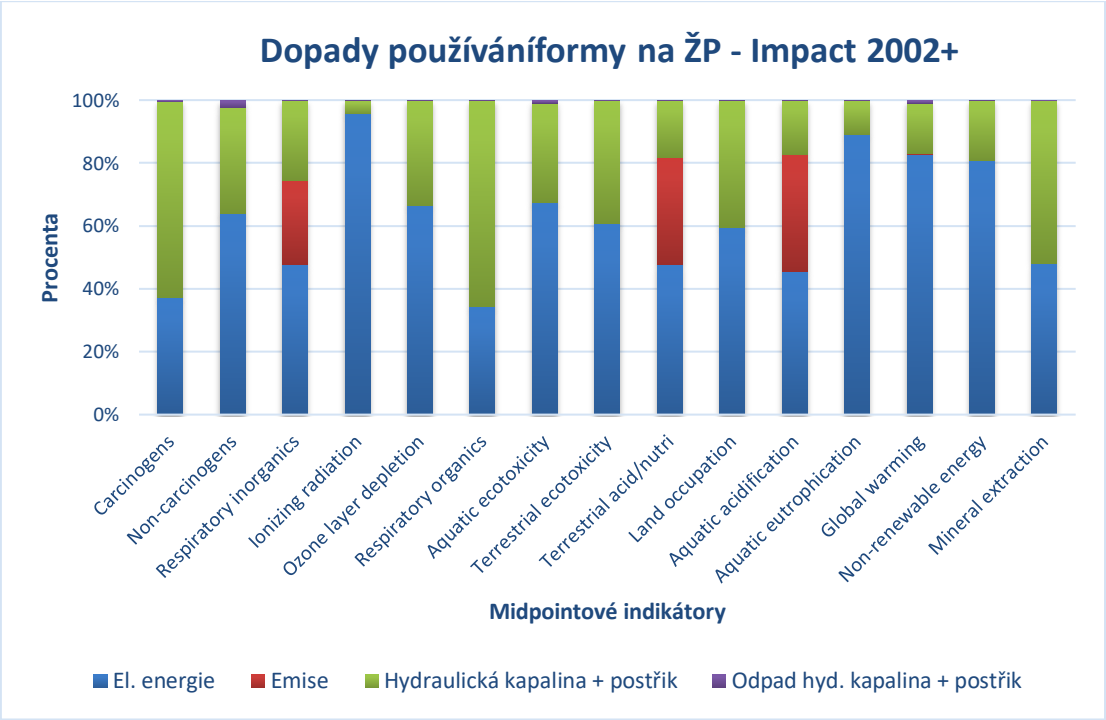
U endpointových indikátorů jsou nejvyšší dopady v kategoriích zdroje a klimatická změna. Naopak na kvalitu ekosystému jsou dopady výrazně nižší. Ve všech kategoriích má největší podíl opět obrábění CNC a hned následuje obrábění EDM.



Obr. 4.15 Normalizační graf dopadů výroby formy 3D tiskem (Impact 2002+)

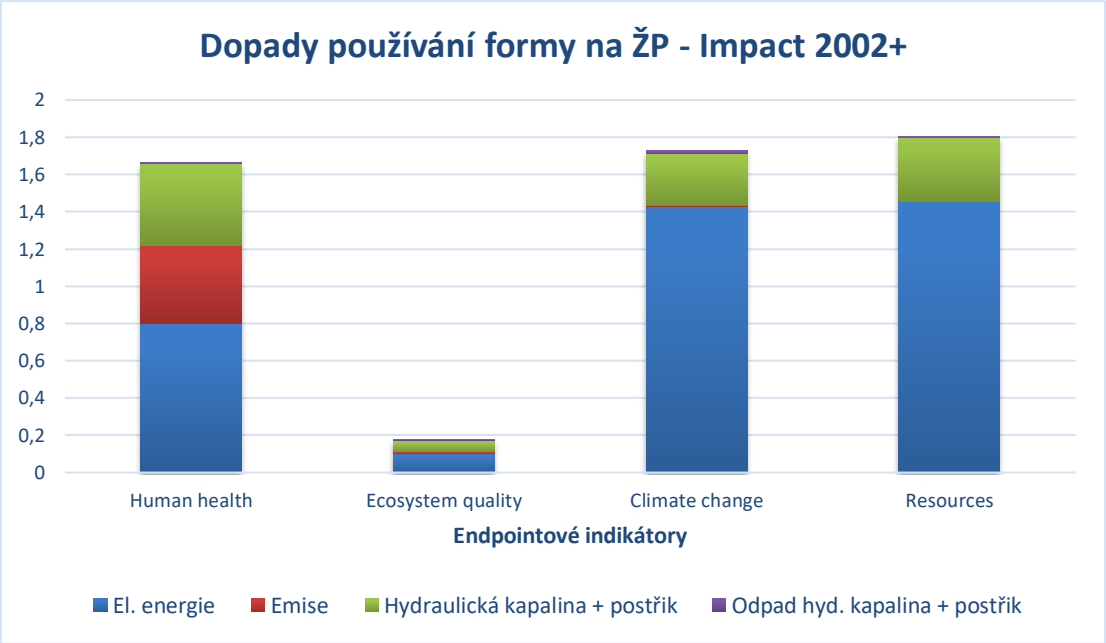
- *HODNOCENÍ DOPADŮ POUŽÍVÁNÍ FORMY*

Dopady při užívání formy u midpointových indikátorů jsou především způsobeny elektrickou energií, které je na tento proces potřeba velké množství. Další vysoký dopad, hlavně v kategoriích karcinogeny, respirační onemocnění organické a těžba surovin, má hydraulická kapalina s postřiky. Emise z odlévání se projevují pouze ve třech kategoriích, a to v respiračních onemocněních způsobené anorganickými látkami, acidifikaci a eutrofizaci půdy a eutrofizaci vod.



Obr. 4.16 Charakterizační graf dopadů používání formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+)

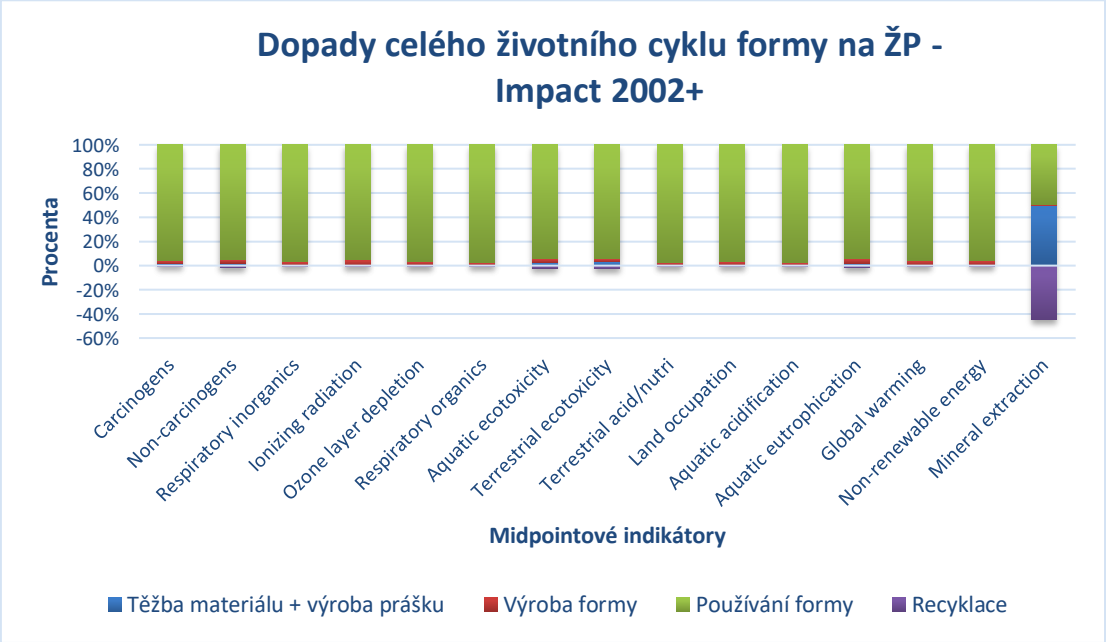
Na grafu u endpointových indikátorů má tato životní fáze formy vysoké dopady na lidské zdraví, klimatické změny i zdroje. Na první zmiňované kategorii se z poloviny podílí elektrická energie, dále se pak dopady dělí mezi emise a hydraulickou kapalinu. U klimatické změny a zdrojů jsou dopady hlavně z elektrické energie a podíl zde nese i hydraulická kapalina. Dopady na kvalitu ekosystému jsou vůči zbylým třem kategoriím nízké.



Obr. 4.17 Normalizační graf dopadů používání formy vyrobené 3D tiskem (Impact2002+)

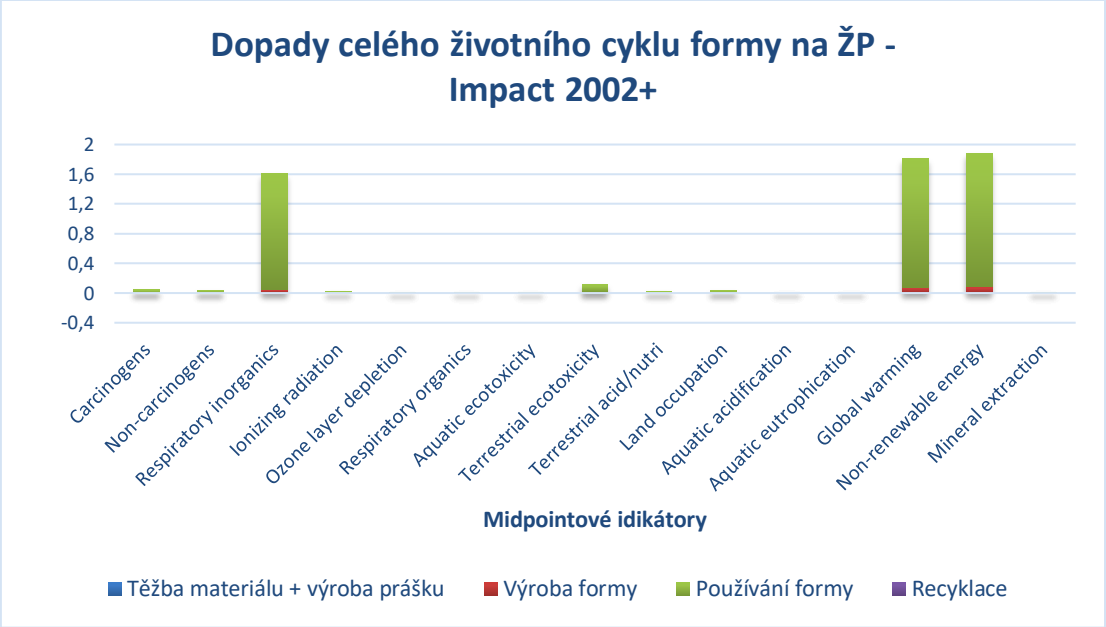
- *HONOCENÍ DOPADŮ CELÉHO ŽIVOTNÍHO CYKLU FORMY*

V grafu dopadů celého životního cyklu formy vyráběné 3D tiskem jasně dominuje fáze užití formy a nese největší dopady ve všech midpointových indikátorech na životní prostředí vyjma těžby surovin, v této kategorii dopadů užití formy zaujímá přibližně padesát procent. Na této kategorii dopadů se také přibližně padesáti procenty podílí materiál, jeho dopady jsou ovšem snižovány díky recyklaci.



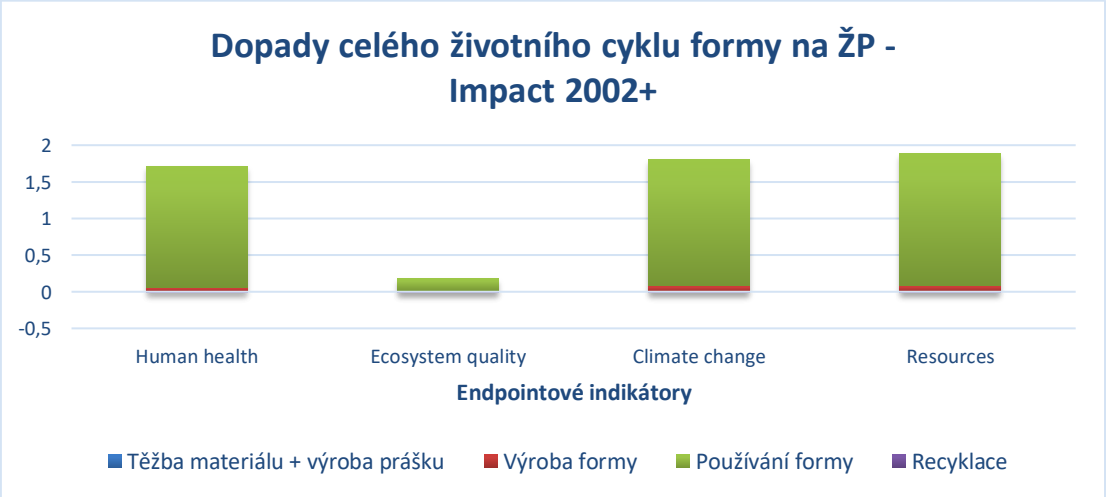
Obr. 4.18 Charakterizační graf dopadů celého životního cyklu formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+)

Po normalizaci midpointových indikátorů je z grafu vidět, že největší dopady jsou u respiračních onemocnění způsobených anorganickými látkami, dále u globálního oteplování a u neobnovitelných zdrojů. Tyto kategorie velmi významně převyšují ty ostatní.



Obr. 4.19 Normalizační graf midpoitových dopadů na životní cyklus formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+)

U endpointových indikátorů mají hodně podobné dopady jak na lidské zdraví, tak na klimatické změny, tak i na zdroje. To je způsobeno tím, že každá významná kategorie z midpointových indikátorů se podílí na jedné kategorii z endpointových indikátorů, tedy respirační onemocnění způsobené anorganickými látkami se řadí do lidského zdraví, globální oteplování do klimatických změn a energie z neobnovitelných zdrojů do zdrojů.



Obr. 4.20 Normalizační graf endpointových dopadů celého životního cyklu formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+)

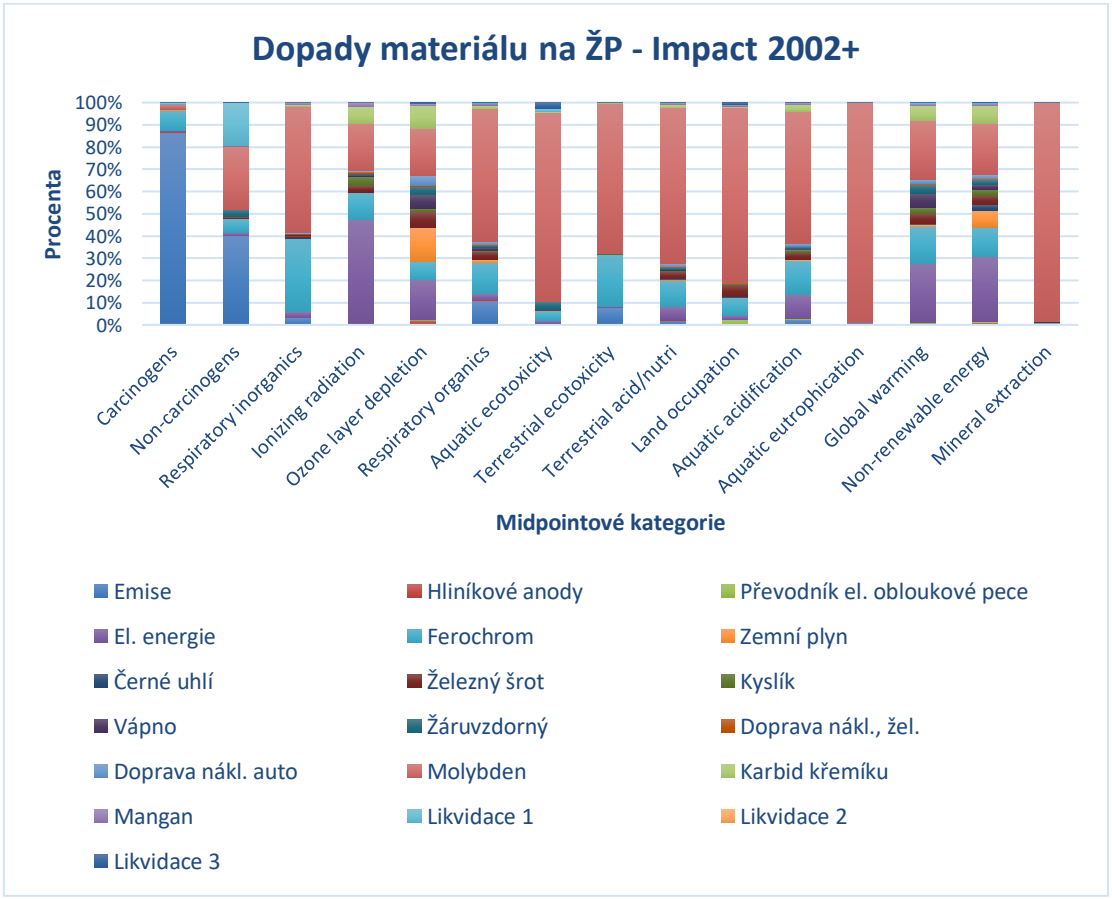
4.3.2 Dopady formy vyráběné konvenčně

Dopady na životní prostředí formy vyráběné konvenčně byly analyzovány nejdříve zvlášť po fázích životního cyklu. Prvně je zhodnocena těžba materiálů a výroba polotovaru, dále výroba formy, poté používání formy. Recyklace formy byla zahrnuta přímo v celém životním cyklu formy a nebyla vyhodnocena zvlášť.

- *HODNOCENÍ MATERIÁLOVÝCH DOPADŮ*

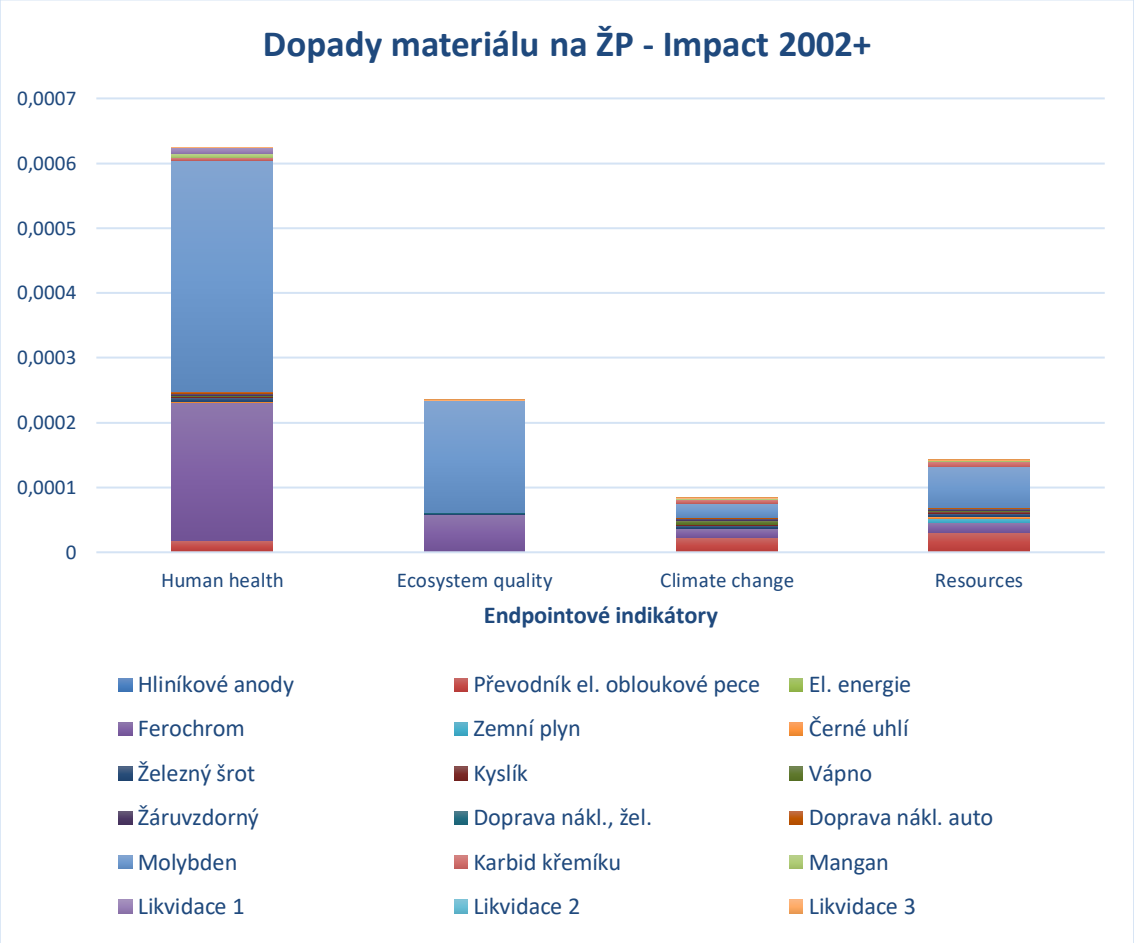
Výsledky pro materiálové dopady na životní prostředí jsou vztaženy na jeden kilogram materiálu.

Graf ukazuje, že největší dopady má molybden, a to ve většině indikátorů. Další významný dopad má ferochrom, ten se objevuje ve všech midpointových indikátorech poměrem maximálně do třiceti pěti procent. Na kategorii karcinogeny se nejvíce podílejí emise, zároveň mají dopady i v nekarcinogenech. Elektrická energie se podílí hlavně na dopadech ionizačního záření, úbytku ozonové vrstvy, globálního oteplování a energii z neobnovitelných zdrojů. Ostatní složky se v jednotlivých kategoriích objevují maximálně do deseti procent.



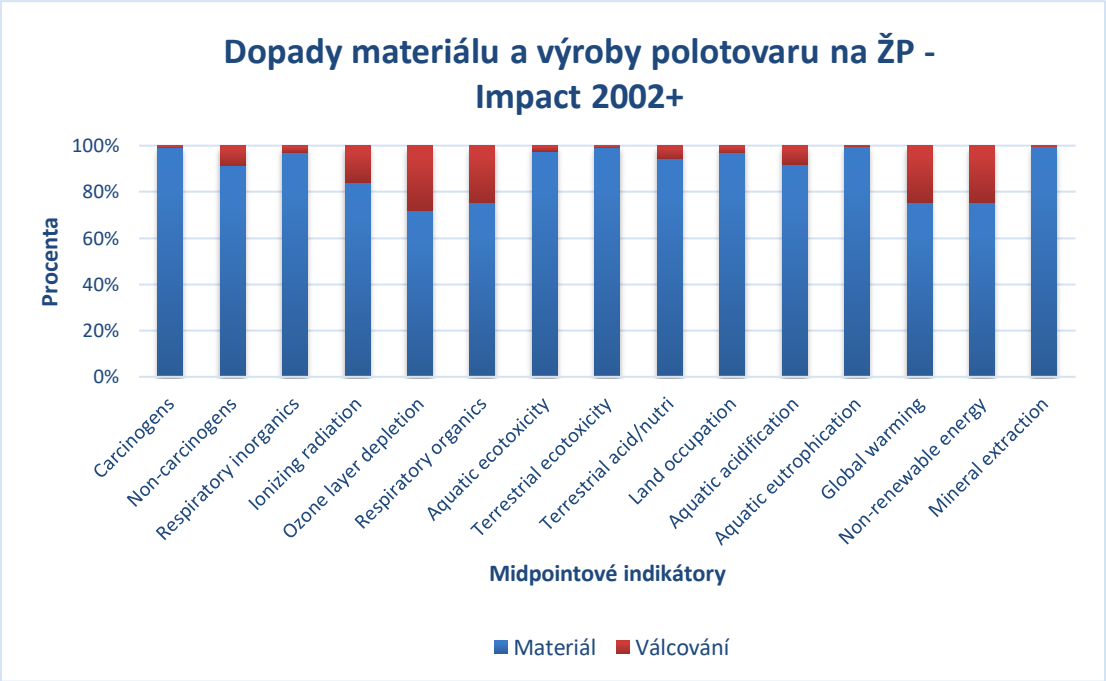
Obr. 4.21 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu pro výrobu formy konvenčně (Impact 2002+)

V grafu endpointových indikátorů dosahuje materiál nejvyšší hodnoty v dopadech na lidské zdraví. Ve všech kategoriích se na dopadech na životní prostředí podílí hlavně molybden. Na lidské zdraví a kvalitu ekosystému má také vyšší podíl ferochrom. V indikátorech klimatické změny a zdroje má také podíl převodník elektrické obloukové pece. Zbylé složky již mají velmi nízké dopady.



Obr. 4.22 Normalizační graf dopadů těžby materiálu pro formu vyrobenou konvenčně (Impact 2002+)

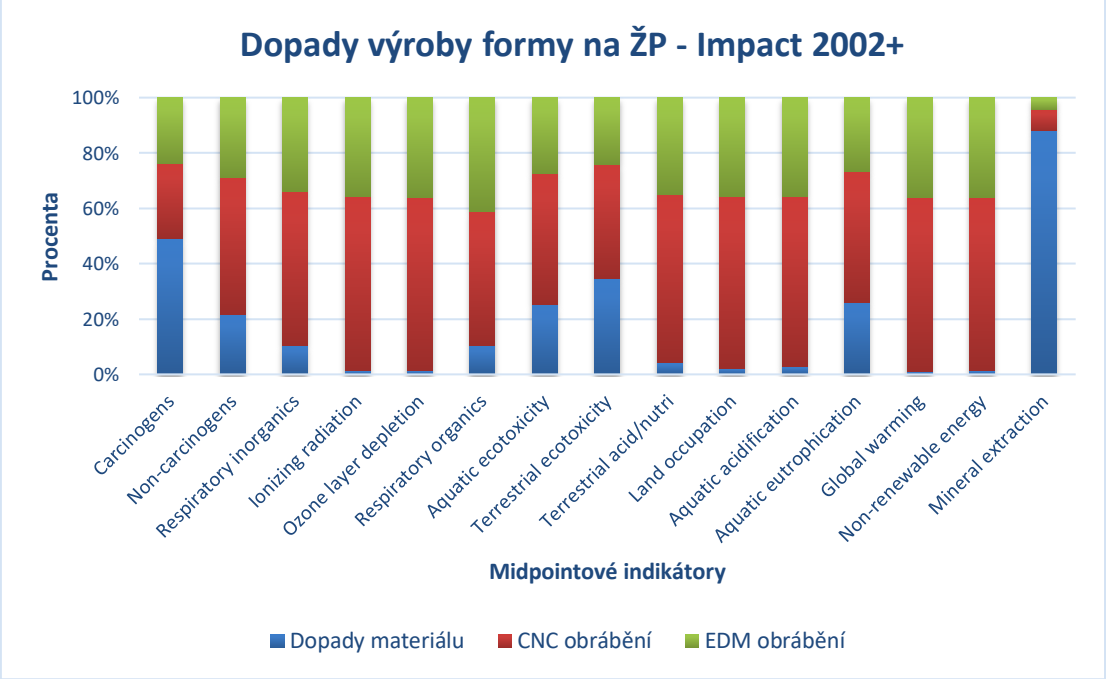
Následující graf zahrnuje i válcování materiálu. Na jednotlivých midpointových indikátorech má vyšší dopady samotný materiál. U úbytku ozónové vrstvy, respiračních onemocnění způsobené organickými látkami, globálního oteplování a energie z neobnovitelných zdrojů se na dopadu podílí válcování okolo třiceti procent.



Obr. 4.23 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu a výroby polotovaru (Impact 2002+)

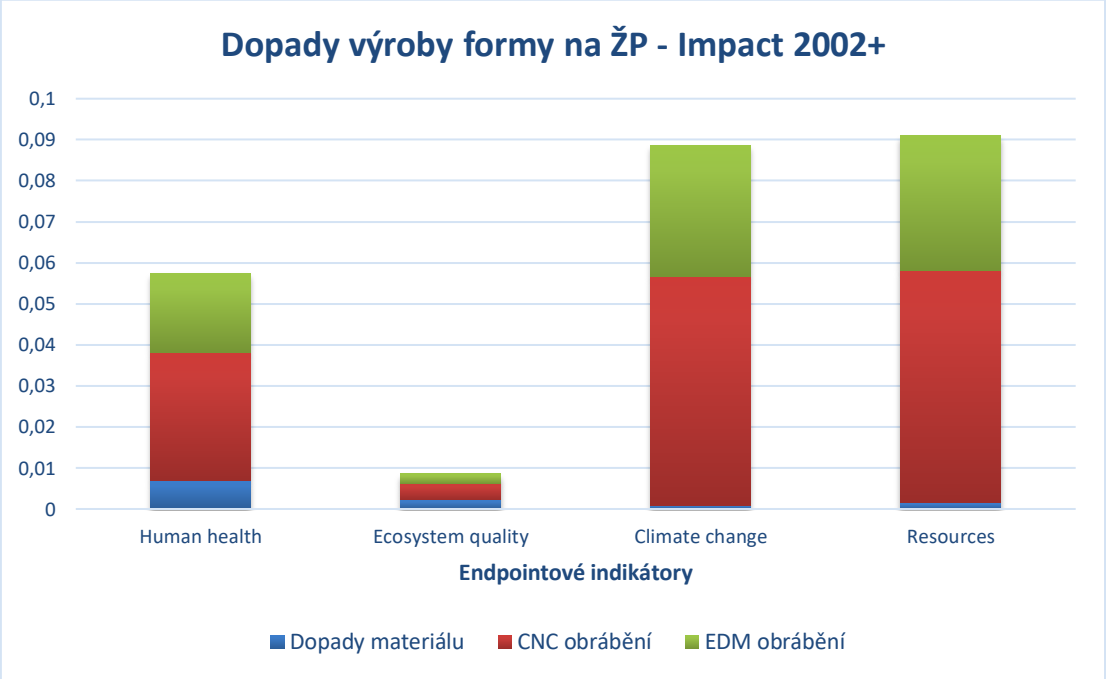
- *HODNOCENÍ DOPADŮ VÝROBY FORMY*

Největší vliv na dopady formy vyráběné konvenčně má obrábění CNC. Je to způsobeno tím, že tento proces trvá delší dobu než EDM obrábění. Významný podíl nese výroba materiálu na karcinogenech a také na těžbě surovin.



Obr. 4.24 Charakterizační graf dopadů výroby formy konvenčně (Impact 2002+)

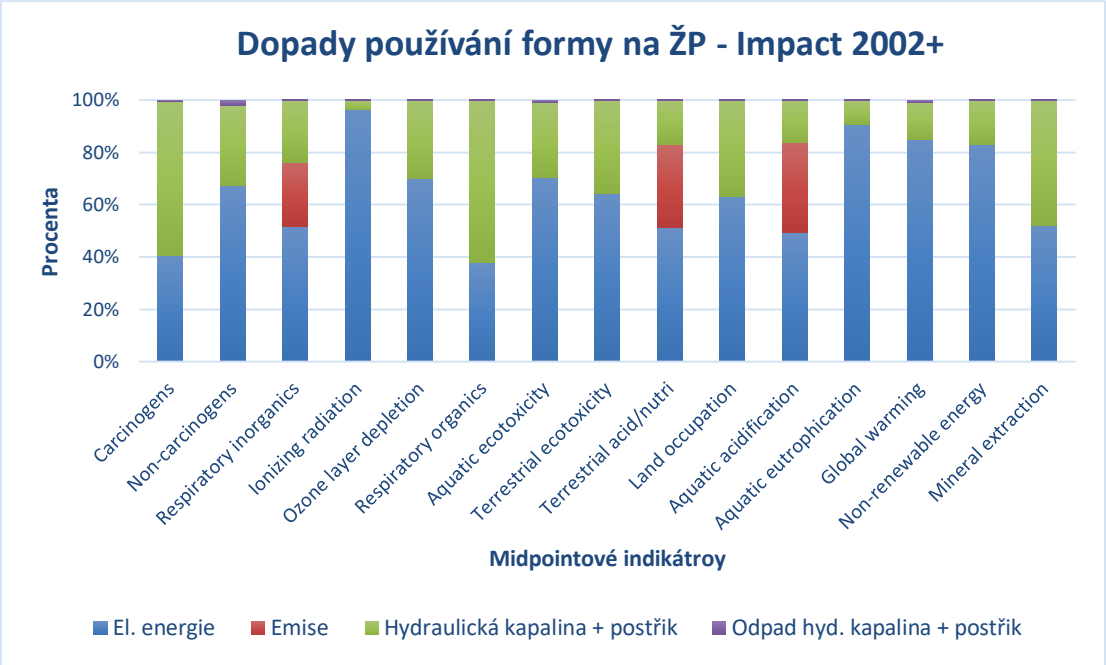
Na grafu endpointových indikátorů jsou výraznější dopady u zdrojů a klimatických změn. Jednotlivé procesy se podílejí poměrově přibližně stejně u všech čtyřech indikátorů. Nejvyšší podíl má CNC obrábění, pak EDM obrábění a nejméně se podílí na dopadech výroba materiálu. Nejnižší dopady jsou na kvalitu ekosystému.



Obr. 4.25 Normalizační graf dopadů výroby formy konvenčně (Impact 2002+)

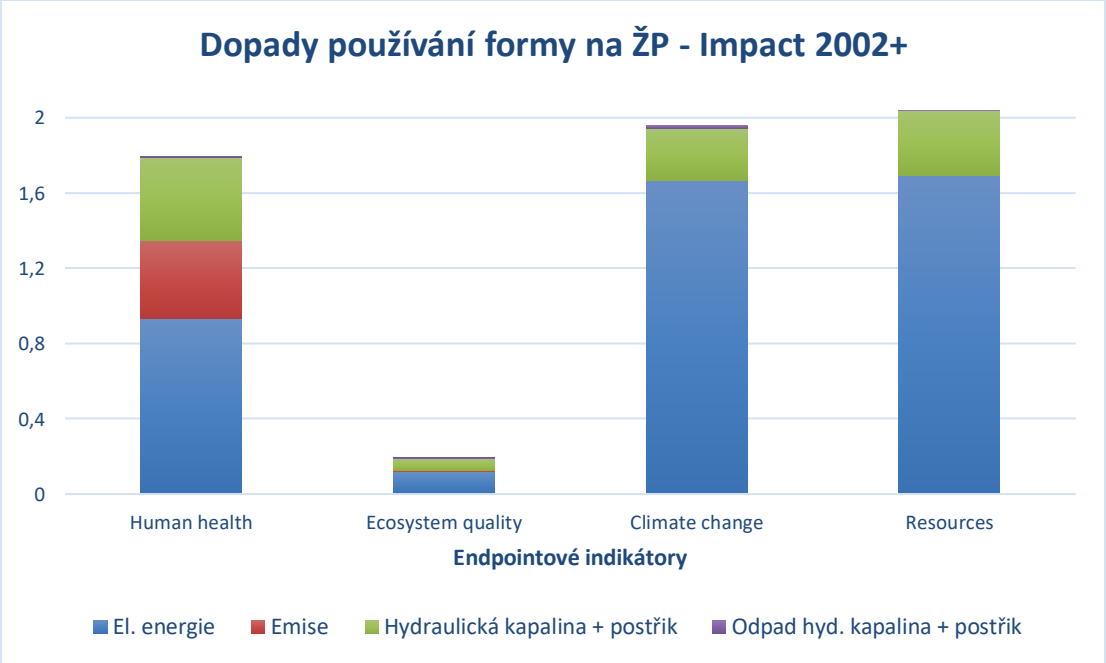
- *HODNOCENÍ DOPADŮ POUŽÍVÁNÍ FORMY*

Dopady při užívání formy u midpointových indikátorů jsou především způsobeny elektrickou energií, které je na tento proces potřeba velké množství. Další vysoký dopad, hlavně v kategoriích karcinogeny, respirační onemocnění způsobené organickými látkami a těžba surovin, má hydraulická kapalina s postřiky. Emise z odlévání se projevují pouze ve třech kategoriích, a to v respiračních onemocněních způsobené anorganickými látkami, acidifikaci a eutrofizaci půdy a eutrofizaci vod.



Obr. 4.26 Charakterizační graf dopadů používání formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+)

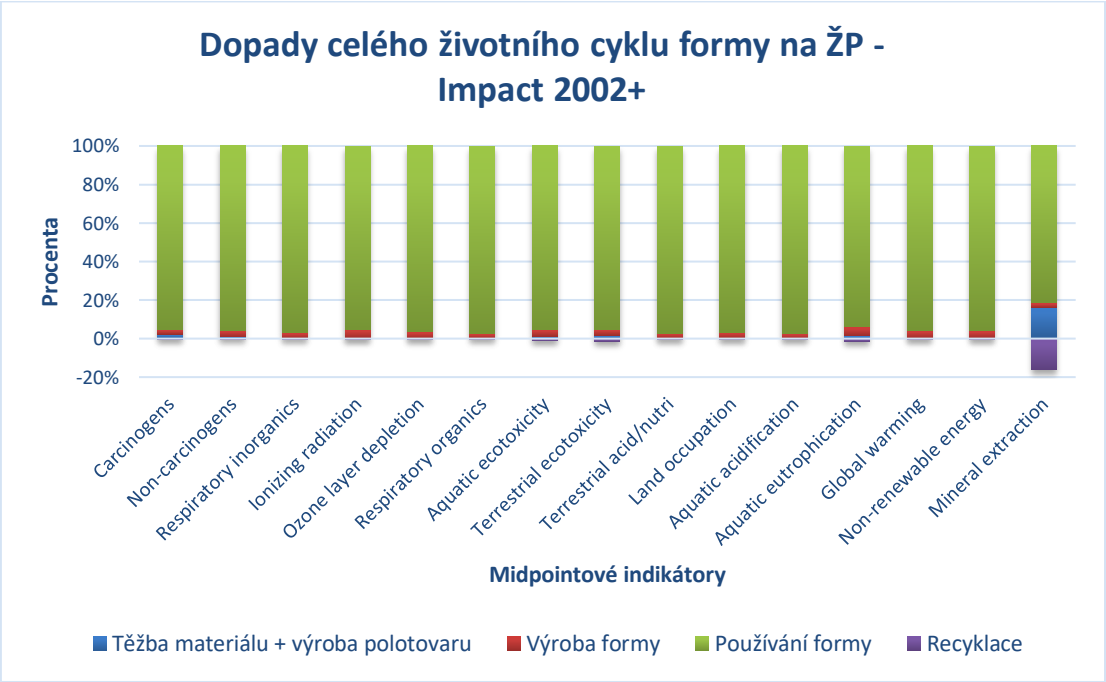
Na grafu u endpointových indikátorů má tato životní fáze formy vysoké dopady na lidské zdraví, klimatické změny i zdroje. Na první zmiňované kategorii se z poloviny podílí elektrická energie, dále se pak dopady dělí mezi emise a hydraulickou kapalinu. U klimatické změny a zdrojů jsou dopady hlavně z elektrické energie a podíl zde nese i hydraulická kapalina. Dopady na kvalitu ekosystému jsou vůči zbylým třem kategoriím nízké.



Obr. 4.27 Normalizační graf dopadů používání formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+)

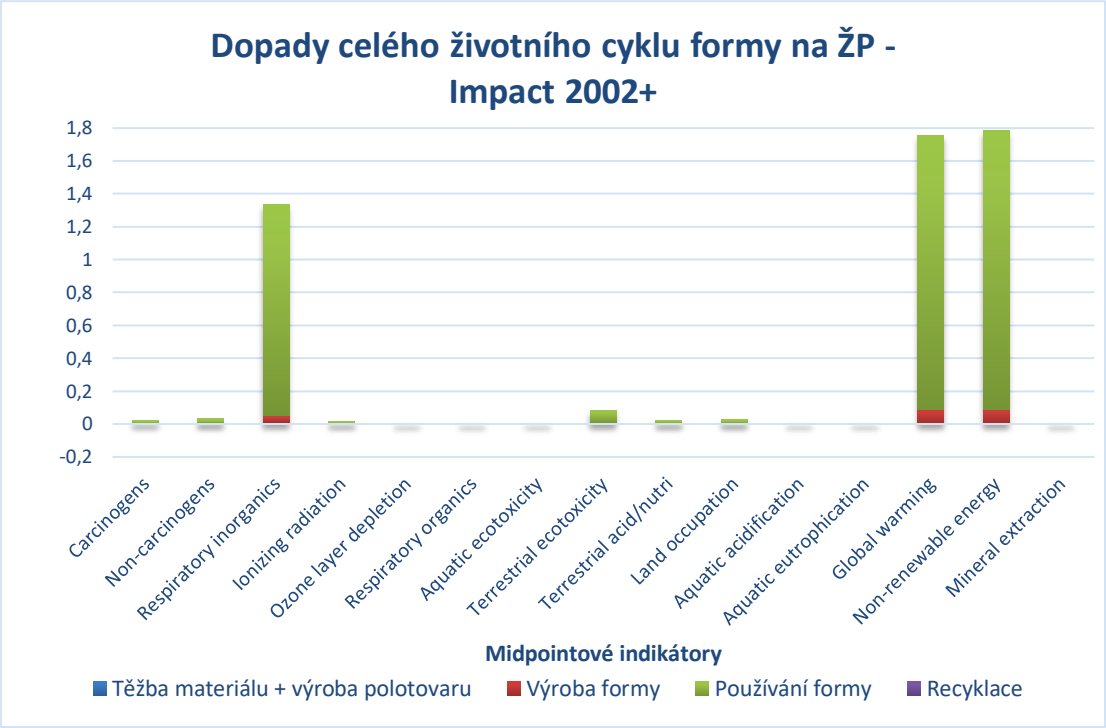
- *HONOCENÍ DOPADŮ CELÉHO ŽIVOTNÍHO CYKLU FORMY*

V grafu dopadů celého životního cyklu formy vyráběné konvenčně jasně dominuje fáze užití formy a nese největší podíl dopadů na životním prostředí. Ve všech midpointových indikátorech zaujímá přibližně devadesát procent a výše vyjma těžby surovin. U této kategorie zaujímá přibližně třicet procent materiál a zároveň jsou jeho dopady sníženy díky recyklaci materiálu.



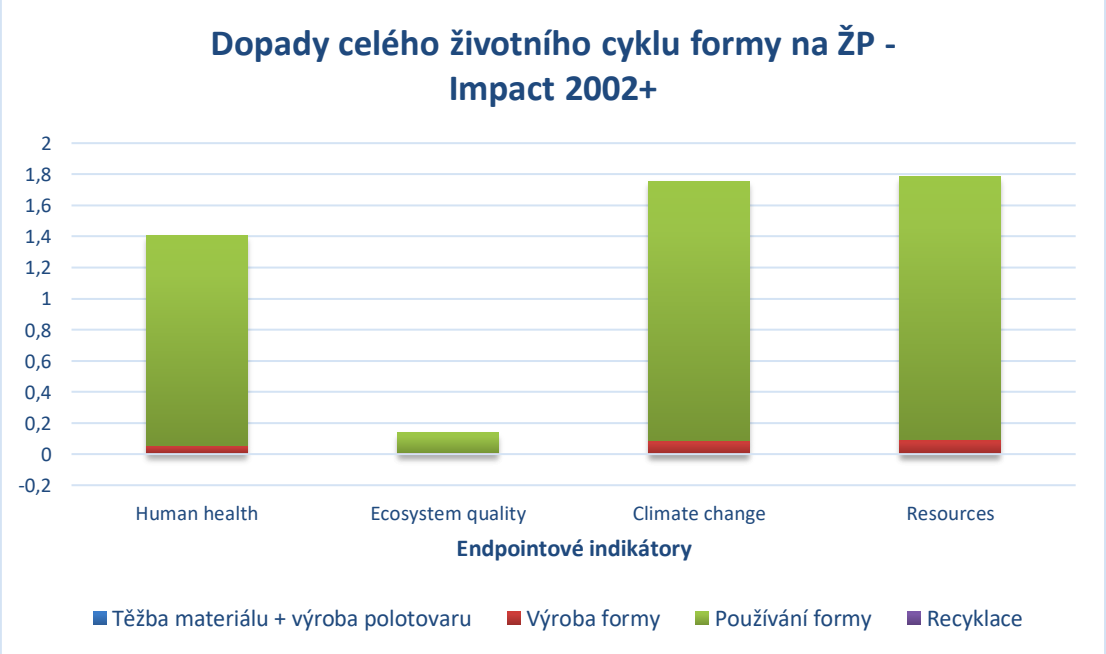
Obr. 4.28 Charakterizační graf dopadů celého životního cyklu formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+)

Na normalizačním grafu midpointových indikátorů je vidět, že největší dopady jsou u respiračních onemocnění způsobené anorganickými látkami, dále u globálního oteplování a u energie z neobnovitelných zdrojů. Tyto kategorie velmi významně převyšují ty ostatní.



Obr. 4.29 Normalizační graf midpoitových dopadů na životní cyklus formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+)

Na grafu endpointových indikátorů je vidět, že nejvyšší dopady ve všech indikátorech má fáze užití formy, dále nese nějaké dopady výroba formy. Těžba a výroba materiálu již není na grafu znatelná. Nejnižší dopady jsou na kvalitu ekosystému.



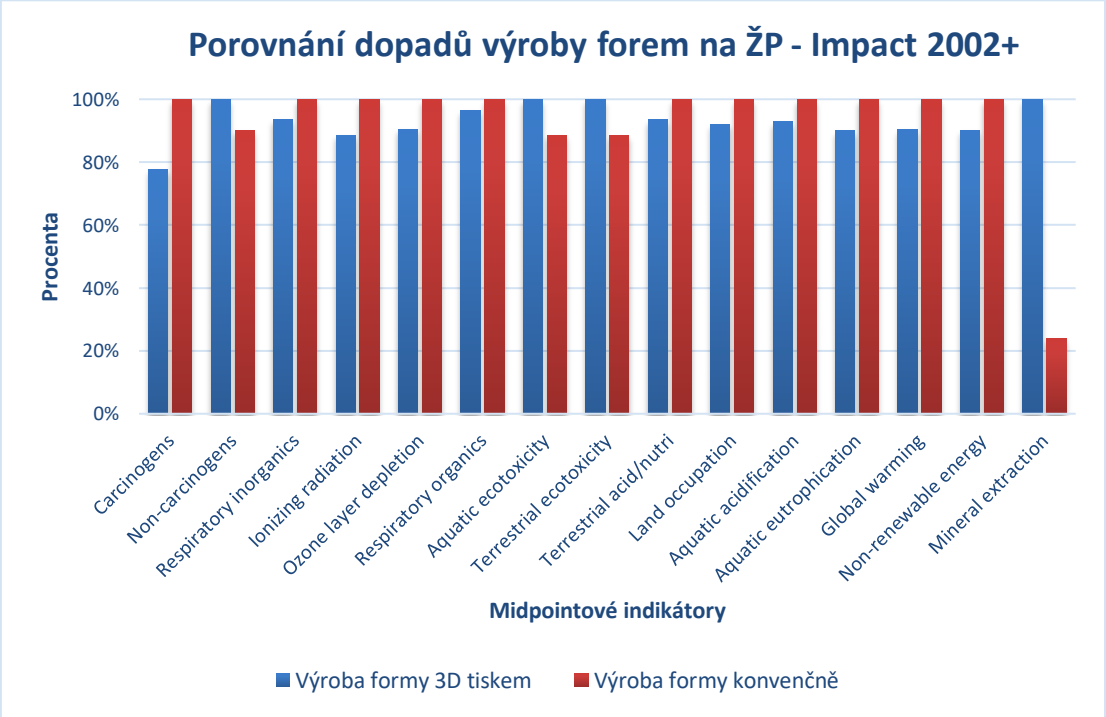
Obr. 4.30 Normalizační graf endpointových dopadů celého životního cyklu formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+)

4.3.3 Porovnání dopadů

V této kapitole je vyhodnocení výsledků porovnávající nejprve výrobu forem, poté používání forem, a nakonec zhodnocení celého životního cyklu. Zde by měla být odpověď na otázku, která forma má nižší dopady na životní prostředí v celém životním cyklu.

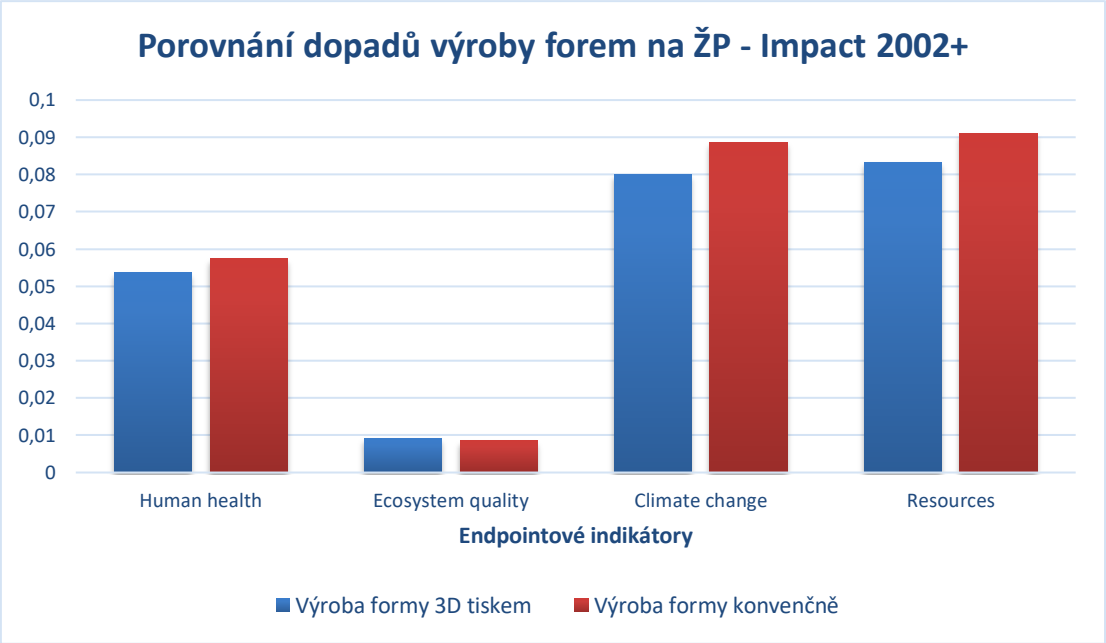
- *HODNOCENÍ DOPADŮ VÝROBY FOREM*

Při srovnání dopadů výroby obou forem je vidět, že ve většině midpointových indikátorech jsou dopady nižší pro formu vyráběnou 3D tiskem. Poměrový rozdíl v jednotlivých kategoriích se pohybuje mezi patnácti až třiceti procenty vyjma těžbu surovin. V této kategorii jsou dopady pro formu vyráběnou 3D tiskem vyšší o sedmdesát šest procent.



Obr. 4.31 Charakterizační graf – porovnání dopadů fáze výroby forem (Impact 2002+)

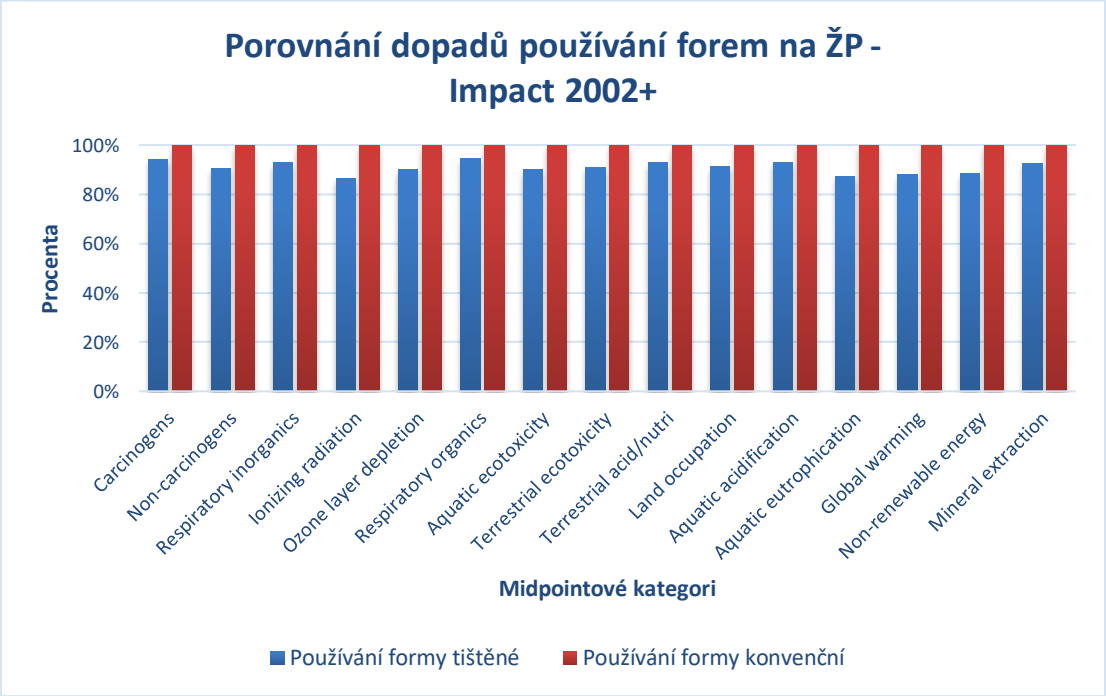
U porovnání ednpointových indikátorů má forma vyráběná konvenčně dopady vyšší ve třech ukazatelích, kterými jsou lidské zdraví, změny klimatu a zdroje. Nejvyšší dopady jsou na zdroje a klimatické změny. U dopadů na kvalitu ekosystému má o trochu vyšší dopady forma vyráběná 3D tiskem, ovšem dopady tohoto ukazatele jsou nejnižší.



Obr. 4.32 Normalizační graf – porovnání dopadů fáze výroba forem (Impact 2002+)

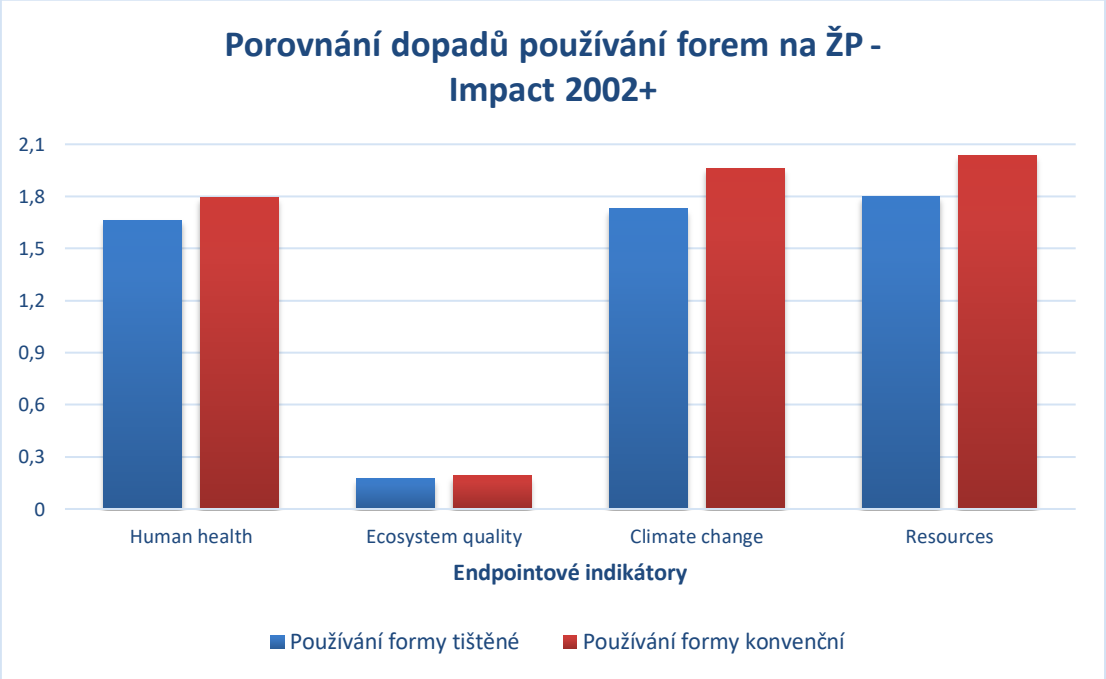
- *HODNOCENÍ DOPADŮ POUŽÍVÁNÍ FOREM*

Z důvodů stejného použití forem je rozdílný dopad pouze v ušetřeném času výroby, a tedy nižší spotřebě elektrické energie. Z grafu je vidět, že rozdíl v jednotlivých kategoriích dopadů na životní prostředí se pohybuje mezi pěti až třinácti procenty. Ve všech kategoriích jsou dopady nižší u formy vyráběné 3D tiskem.



Obr. 4.33 Charakterizační graf – porovnání dopadů fáze používání forem (Impact 2002+)

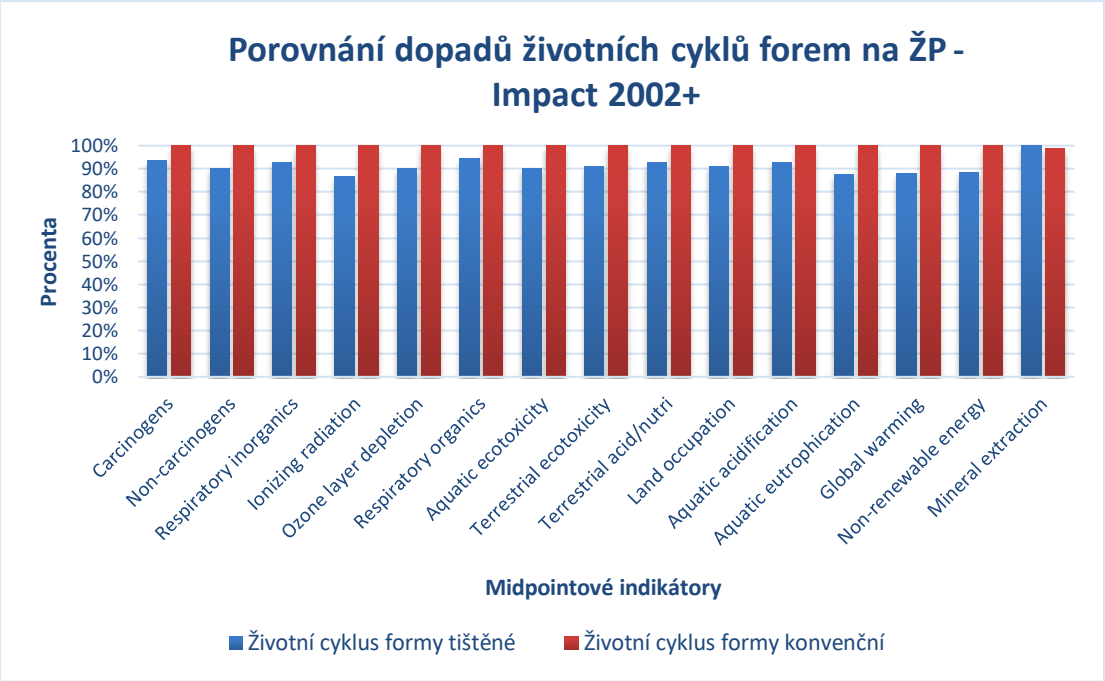
U endpointových normalizovaných kategorií dopadly výsledky stejně jako u midpointových, tedy ve všech případech má vyšší environmentální dopady forma vyráběné konvenčně. Obě formy mají nejvyšší dopady na zdroje, dopady v kategoriích klimatická změna a lidské zdraví jsou také vysoké, naopak nízké dopady jsou na kvalitu ekosystému.



Obr. 4.34 Normalizační graf – porovnání dopadů fáze používání forem (Impact 2002+)

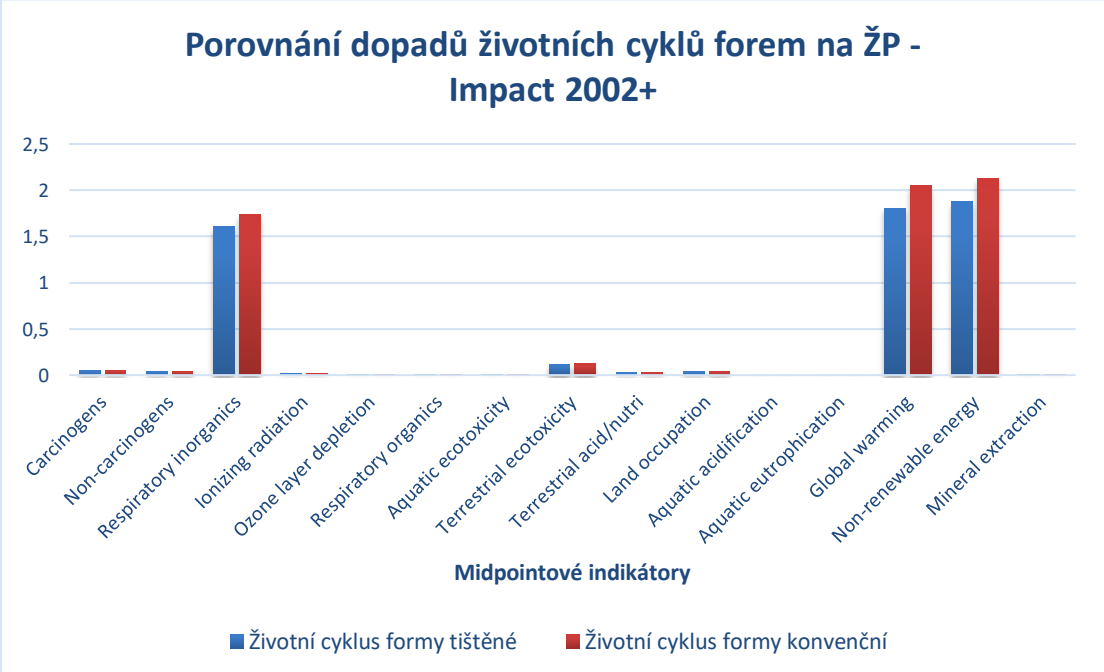
- *HODNOCENÍ DOPADŮ CELÉHO ŽIVONTÍHO CYKLU FOREM*

U porovnání dopadů životních cyklů je na tom ve čtrnácti midpointových indikátorech lépe forma vyráběná 3D tiskem, pouze v těžbě surovin je na tom hůře než forma vyráběná konvenčně. Rozdíly dopadů na životní prostředí jsou do patnácti procent. Největší rozdíly jsou u midpointových indikátorů ionizační záření, eutrofizace vod, globální oteplování energie z neobnovitelných zdrojů. U kategorie těžba surovin má forma vyráběná 3D tiskem o jeden a půl procenta dopady vyšší, což v množství použitého materiálu na výrobu forem je minimální rozdíl.



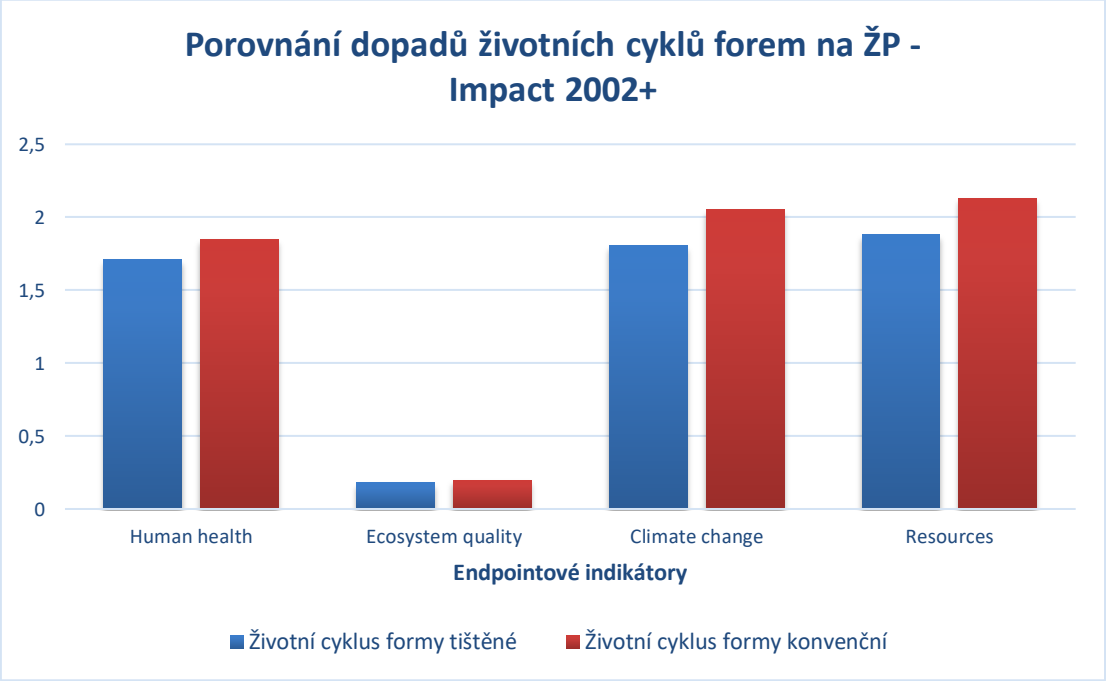
Obr. 4.35 Charakterizační graf – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+)

Na dalším grafu je vidět normalizované srovnání midpointových indikátorů dopadů. Poměry zůstávají stejné, jako na grafu výše. Největší dopady životních cyklů forem jsou na neobnovitelnou energii, globální oteplování a anorganické respirační onemocnění. Ostatní kategorie jsou již výrazně nižší a rozdíly mezi nimi jsou minimální.



Obr. 4.36 Normalizační graf midpointových indikátorů – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+)

Graf endpointových indikátorů ukazuje, že všechny dopady formy vyráběné 3D tiskem jsou nižší než u formy vyráběné konvenčně. Celkově vychází, že největší dopady mají obě formy v kategorii zdrojů a klimatické změny. Naopak nejnižší dopady mají obě formy na kvalitu ekosystému.



Obr. 4.37 Normalizační graf endpointových indikátorů – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+)

4.4 Shrnutí výsledků

V materiálovém zhodnocení má v obou případech nejvyšší dopady molybden, dále se významně podílejí na dopadech feronikl (forma vyráběná 3D tiskem) a ferochrom (forma vyráběná konvenčně). V porovnání dopadů na těžbu surovin jsou významně horší pro formu vyráběnou 3D tiskem. Je to z důvodů vyššího podílu molybdenu, vysokého podílu niklu a také obsažení kobaltu. Tyto prvky mají vysoké dopady na životní prostředí. U této fáze analýzy LCA mohly vzniknout nepřesnosti kvůli převzatým datům z databáze v softwaru, ale v porovnání s ostatními fázemi životního cyklu forem budou odchylky minimální, protože dopady materiálu jsou velice malé.

U výroby forem jsou výsledky ve většině kategorií dopadů velmi podobné. Doba výroby formy 3D tiskem trvá kratší dobu, ale je u ní navíc proces tištění, který má mírně vyšší dopady než následné obrábění, proto jsou dopady téměř stejné. Pouze v kategorii těžba surovin dominují dopady 3D tištěné formy, což způsobuje již výše zmíněné složení použitého materiálu.

Užití forem je stejné, pouze doba výroby na funkční jednotku 1 000 000 kusů součástek se liší, ve formě konvenční trvá výroba jedné součástky o 0,4 s déle než u formy tištěné. Díky ušetřenému času u formy vyrobené 3D tiskem se ušetří na spotřebě elektrické energie a dopady jsou ve všech midpointových i endpointových indikátorech nižší.

U porovnání dopadů celého životního cyklu forem je z grafů zřejmé, že nižší dopady na životní prostředí má forma vyráběná 3D tiskem. To je hlavně díky fázi užití, která má nejvyšší dopady u obou forem, ale pro formu tištěnou jsou nižší díky ušetřenému času výroby součástky. Další výhodou je kratší doba výroby tištěné formy, kde se také šetří čas a energie potřebná k výrobě formy, a to opět přispívá k nižším environmentálním dopadům.

5 EKONOMICKÉ POSOUZENÍ

Dále se práce zabývá ekonomickým posouzením výroby obou forem a porovnáním, která varianta je výhodnější z hlediska nákladů.

Všechna data opět poskytla firma Beneš a Lát, s.r.o., z nich vyšly výpočty nákladů na formy. V práci je vše procentuálně vyjádřeno, protože si firma nepřála konkrétní čísla zveřejňovat.

Pro výpočty byly použity náklady na materiál, náklady na energii a náklady na pracoviště. Dále byly do výpočtu zahrnuty časy výroby obou forem a časy výroby vysokotlakově litých zinkových součástek pro automobilový průmysl. Konvenční forma byla použita jako základ, tedy 100 % nákladů a vůči tomu jsou procentuálně vyčísleny částky formy vyráběné 3D tiskem.

Tabulka 5.1 Náklady poskytnuté od firmy

	3D tisk	**konvenčně**	**jednotky**
Náklady na materiál	1375	100	%
Náklady na kapaliny	zanedbatelné	zanedbatelné	-
Náklady na pracoviště	188	100	%
Doba výroby formy	492	600	hod

5.1 Náklady na výrobu jedné formy pomocí 3D-tisku

Náklad na materiál byl vypočítán vynásobením hmotností kovového prášku pro výrobu formy a ceny za jeden kilogram materiálu. Cena materiálu byla uvedena v eurech a přepočítána na koruny. Náklady na energii a náklady na pracoviště byly stanoveny dle hodinové sazby a doby výroby formy.

5.2 Náklady na jednu formu vyrobenou konvenčně

Náklady pro formu vyrobenou konvenčně byly spočítány obdobně jako u formy vyráběné 3D tiskem. Cena za jeden kilogram materiálu byla uvažována v korunách na kilogram, takže zde se již nedělal přepočet, ale rovnou se vypočítal náklad vynásobením hmotností nástrojové ocele a ceny za jeden kilogram materiálu. Náklady na energii a náklady na pracoviště se vykalkulovaly dle příslušné ceny za hodinu a doby výroby.

Když porovnáme náklady na výrobu obou forem, tak nám vychází, že náklady formu vyráběnou 3D tiskem jsou o 9 % nižší než u formy vyráběné konvenčně.

5.3 Používání formy a vyčíslení nákladů

Každá forma je dimenzována na jeden milion vyrobených kusů, ovšem výroba jednoho kusu v každé formě je časově rozdílná. Ve formě vyráběné konvenčně je čas výroby jednoho kusu výrobku 2,85 s, kdežto ve formě vyráběné 3D tiskem trvá výroba jednoho kusu 2,45 s.

Přepočteno na hodiny při výrobě milionu kusů:

Výroba součástky v konvenční formě

$$\boldsymbol{t} = 2{,}85 * 1000000 = 2850000 \text{ s} = 791 \text{ hodin } 40 \text{ minut}$$

Výroba součástky ve 3D tištěné formě

$$\boldsymbol{t} = 2{,}45 * 100000 = 2450000 \text{ S} = 680 \text{ hodin } 33{,}3 \text{ minut}$$

Rozdíl v času výroby:

$$\boldsymbol{t} = 2{,}85 - 2{,}45 = 0{,}4$$

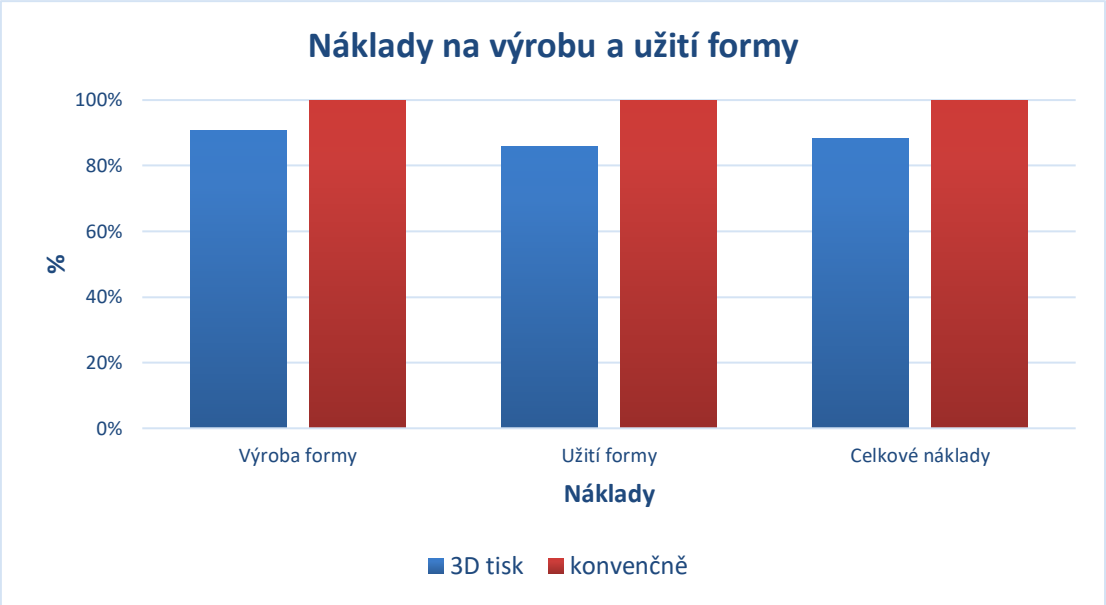
$$\boldsymbol{t} = 0{,}4 * 1000000 = 400000 \text{ s} = 111 \text{ hodin } 6{,}7 \text{ minut}$$

Při výrobě milionu kusů výrobků z forem je rozdíl ve výrobním čase 111 hodin a necelých 7 minut.

Formy se používají na stroji TECHMIRE NTX 44 a pro výpočet byly použity náklady sazby stroje a náklady na obsluhu. Z výpočtů vychází, že náklady při používání formy vytištěné jsou o 14 % nižší než u formy vyráběné konvenčně, a to díky ušetřenému výrobnímu času součástky.

5.4 Celkové zhodnocení

Po ekonomické stránce se firmě vyplatí vyrábět a používat formu vyráběnou aditivní technologií. Sice vstupní náklady jak na nákup materiálu, tak i náklady na pracoviště jsou vyšší, ovšem celková doba výroby formy a vyrobení jednoho milionů kusů součástky v této formě ušetří necelých 220 hodin, a díky tomu se sníží náklady o 12 % (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Porovnání nákladů na výrobu a použití 3D tištěné formy a formy vyráběné konvenčně, vztaženo na funkční jednotku

V případě snížení doby výroby součástky ve formě vyráběné 3D tiskem, může firma buď vyrobit mnohem více kusů, nebo stroj využít na výrobu jiného produktu, tím tedy zvyšuje kapacitu pracoviště a snižuje kusové výrobní náklady.

6 ZÁVĚR – VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NÁVRH DOPORUČENÍ

Cílem práce bylo najít odpověď na otázku, která z forem má menší dopady na životní prostředí v celém životním cyklu. Studie ukázala, že nižší dopady má forma vyráběná 3D tiskem, a to hlavně díky tomu, že má nižší dopady ve fázi používání. Výroba zinkové součástky pro automobilový průmysl ve 3D tištěné formě trvá vyrobit o 0,4 s méně než u formy vyráběné konvenčně. Funkční jednotkou pro studii byla výroba jednoho milionů kusů součástek, úspora času výroby pak činí lehce přes sto jedenáct hodin, což způsobuje významný rozdíl na environmentálních dopadech, protože proces odlévání má vysoké energetické nároky.

U fáze výroby forem nejsou rozdíly v dopadech tak rozdílné, protože dosahované hodnoty dopadů na životní prostředí jsou mnohem menší než u fáze používání formy. V některých kategoriích dopadů vychází hůře i forma tištěná 3D tiskem, největší rozdíl je u kategorie těžba surovin, protože materiál pro tištěnou formu obsahuje prvky, které mají vysoké dopady na životní prostředí, těmito prvky jsou molybden a kobalt a sloučenina feroniklu. Výsledky této fáze mohla ovlivnit skutečnost, že forma vyrobená 3D tiskem je prvním prototypem a hodnoty výroby formy se mohou s další výrobou měnit a optimalizovat. Lze tedy předpokládat, že se dopady na životní prostředí mírně sníží.

Fáze těžby surovin a výroba polotovaru má nejnižší dopady na životní prostředí z celého životního cyklu formy. Protože pro výrobu forem je použito malé množství materiálu vztaženo na funkční jednotku, tak dopady nejsou vysoké, navíc se předpokládá znovuvyužití materiálů.

Ekonomická část byla zaměřena na stanovení nákladů výroby formy a nákladů spojených s jejím následným použitím při výrobě milionu zinkových součástek vysokotlakém lití. Výsledky ukázaly, že i po finanční stránce se vyplatí vyrábět a používat formu vyráběnou 3D tiskem. Celkové náklady na jednu formu a vyrobení jednoho milionů kusů součástek jsou o dvanáct procent nižší u formy tištěné.

Z celkových závěrů studie plyne, že forma vyráběná 3D tiskem je perspektivní a je to správný směr, kterým by se firma Beneš a Lát, s.r.o. měla ubírat. Tato forma vyšla lépe jak z hlediska dopadů na životní prostředí, tak z hlediska ekonomického.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] KOČÍ, Vladimír. *Posuzování životního cyklu = Life cycle assessment – LCA*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 978-80-86832-42-5.

[2] Hauschild, Michael Z., Ralph K. ROSENBAUM, String Irving OLSEN a Editors. *Life cycle Assessment, Theory and Practice.* Montpellier: Springer, 2018.ISBN 978-3-319-56474-6.

[3] HORNE, Ralph E., Tim GRANT a Karli VERGHESE. *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects* [online]. Victoria: CSIRO Publishing, 2009. ISBN 9780643094529;0643094520.

[4] ČSN EN ISO 14040:2006 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova. Praha: Český normalizační institut. c2006.

[5] ČSN EN ISO 14044:2006 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice. Praha: Český normalizační institut, c2006.

[6] *History of 3D printing, 3D printing from scratch* [online]. 2017 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://3dprintingfromscratch.com/common/history-of-3d-printing/

[7] DVOŘÁK, Jan. Technologické možnosti aditivních technologií [online]. Praha 2017. [cit. 2020-06-10] Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.

[8] *Slective Laser Sintering (SLS), 3D printing, Protolabs* [online]. [cit. 2020-06-08], Dostupné z: https://www.protolabs.com/services/3d-printing/selective-laser-sintering/

[9] JAKEŠ, Jakub. *Aditivní technologie výroby* [online]. Ostrava 2016 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114746/JAK0059_FS_B2341_2303R002_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc.Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

[10] *Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. [cit. 2020-06-08], Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619311631

[11] Powder Materials for Metal 3D Printing - 3D Printing Industry. *3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. 2017 [cit. 2020-06-10].

Dostupné z: https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/

[12] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní obory: učební text, scénáře, testy*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.

[13] *Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry – ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. [cit. 2020-06-21], Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619311631

[14] *About SimaPro – SimaPro. SimaPro | The world's leading LCA software* [online]. 2020. [cit. 2020-06-21], Dostupné z: https://simapro.com/about/

[15] *Object moved, Total Materia* [online]. [cit. 2020-06-23], Dostupné z: https://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1619148&keyNum=1&type=2&hs=0

[16] KOČÍ, Vladimír. *Hodnocení environmentálních dopadů technologií* [online]. 2006 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://uchop.vscht.cz/files/uzel/0011054/HEDT2006.pdf?redirected

[17] SZNAPKA, Jakub. *Optimalizace režimu elektrické obloukové pece* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10084/78595. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Vladimír Král

[18] Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.J.; Doka, G.; Dones, R.; Hischier, R.; Hellweg, S.; Humbert, S.; Margni, M.; Nemecek, T.; Spielmann, M. 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3, Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

[19] *SimaPro | The world's leading LCA software* [online]. 2020 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf

[20] JOLLIET, O., et al, IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. The international Journal of Life Cycle Assessment. 2003. 8 (6), 324-330. DOI: 10.1007/BF02978505

[21] *Human Toxicity Potential - an overview | ScienceDirect Topics. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. 2020 Elsevier [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/human-toxicity-potential

[22] *Metodiky LCIA* [online]. Brno 2007 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/Bi6920/um/7_faze3_metodika_ReCiPe_podrobneji.pdf

[23] PRé Sustainability, Global Partner Network. *SimaPro 8.3.0.0* [software]. Březen 2016. Dostupné z: https://simapro.com/licences/#/education

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Modifikovaný rámec LCA převzaté ze standardů ISO 14040 [2] 11
Obr. 2.2 Rozhodovací strom pro správnou identifikaci rozhodovacích souvislostí [2] 13
Obr. 2.3 Zjednodušený jednotkový proces válcování ocelových plechů a příklady toků [2] 15
Obr. 2.4 Rozhodovací strom dle normy ISO 14 044 [5].....17
Obr. 2.5 Znázornění midpointů a ednpointů v dopadovém řetězci [1] 24
Obr. 2.6 Kategorie dopadů metody IMPACT 2002+ [19] 28
Obr. 3.1 Schéma SLS [8] 31
Obr. 3.2 Schéma atomizace prášku plynem [12].....33
Obr. 4.1 Vyráběná součástka ve formách 34
Obr. 4.2 Hranice systému formy vyráběné 3D tiskem 36
Obr. 4.3 Hranice systému formy vyráběné konvenčně.....36
Obr. 4.4 Vstupy a výstupy těžby materiálu a výroby prášku 38
Obr. 4.5 Schéma vstupů a výstupů výroby formy 3D tiskem 41
Obr. 4.6 Model poloviny tištěné formy.....42
Obr. 4.7 Schéma vstupů a výstupů používání formy vyrobené 3D tiskem.....43
Obr. 4.8 Vstupy a výstupy těžby materiálu a výroby prášku 44
Obr. 4.9 Schéma vstupů a výstupů výroby formy klasickou technologií.....46
Obr. 4.10 Schéma formy vyrobené klasickou technologií.....47
Obr. 4.11 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu pro 3D tisk (Impact 2002+) 49
Obr. 4.12 Normalizační graf dopadů těžby materiálu pro 3D tisk (Impact 2002+).....50
Obr. 4.13 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu a výroby prášku (Impact 2002+) 51
Obr. 4.14 Charakterizační graf dopadů výroby formy 3D tiskem (Impact 2002+).....52
Obr. 4.15 Normalizační graf dopadů výroby formy 3D tiskem (Impact 2002+) 52
Obr. 4.16 Charakterizační graf dopadů používání formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+) ..53
Obr. 4.17 Normalizační graf dopadů používání formy vyrobené 3D tiskem (Impact2002+) 54
Obr. 4.18 Charakterizační graf dopadů celého životního cyklu formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+) 54
Obr. 4.19 Normalizační graf midpoitových dopadů na životní cyklus formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+) 55
Obr. 4.20 Normalizační graf endpointových dopadů celého životního cyklu formy vyrobené 3D tiskem (Impact 2002+) 55
Obr. 4.21 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu pro výrobu formy konvenčně (Impact 2002+) 56

Obr. 4.22 Normalizační graf dopadů těžby materiálu pro formu vyrobenou konvenčně (Impact 2002+) 57
Obr. 4.23 Charakterizační graf dopadů těžby materiálu a výroby polotovaru (Impact 2002+) ..58
Obr. 4.24 Charakterizační graf dopadů výroby formy konvenčně (Impact 2002+) 58
Obr. 4.25 Normalizační graf dopadů výroby formy konvenčně (Impact 2002+) 59
Obr. 4.26 Charakterizační graf dopadů používání formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+) 60
Obr. 4.27 Normalizační graf dopadů používání formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+) 60
Obr. 4.28 Charakterizační graf dopadů celého životního cyklu formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+) 61
Obr. 4.29 Normalizační graf midpoitových dopadů na životní cyklus formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+) 62
Obr. 4.30 Normalizační graf endpointových dopadů celého životního cyklu formy vyrobené konvenčně (Impact 2002+).....62
Obr. 4.31 Charakterizační graf – porovnání dopadů fáze výroby forem (Impact 2002+) 63
Obr. 4.32 Normalizační graf – porovnání dopadů fáze výroba forem (Impact 2002+).....64
Obr. 4.33 Charakterizační graf – porovnání dopadů fáze používání forem (Impact 2002+).....64
Obr. 4.34 Normalizační graf – porovnání dopadů fáze používání forem (Impact 2002+).....65
Obr. 4.35 Charakterizační graf – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+).....66
Obr. 4.36 Normalizační graf midpointových indikátorů – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+) 66
Obr. 4.37 Normalizační graf endpointových indikátorů – porovnání životních cyklů forem (Impact 2002+) 67
Obr. 5.1 Porovnání nákladů na výrobu a použití 3D tištěné formy a formy vyráběné konvenčně, vztaženo na funkční jednotku.....71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Základní kategorie toků [2] 14
Tabulka 2.2 Základní kategorie dopadů [1] 22
Tabulka 4.1 Složení materiálu 1.2709 37
Tabulka 4.2 Energie na atomizace kovového prášku 37
Tabulka 4.3 Vstupy pro výrobu formy vyráběnou 3D tiskem 39
Tabulka 4.4 Výstupy výroby formy vyráběné 3D tiskem 40
Tabulka 4.5 Časy jednotlivých fází výroby formy tištěné 40
Tabulka 4.6 Vstupy užití tištěné formy 42
Tabulka 4.7 Výstupy užití tištěné formy 42
Tabulka 4.8 Složení materiálu 1.2367 44
Tabulka 4.9 Vstupy výroby formy konvenční 45
Tabulka 4.10 Výstupy výroby formy konvenční 45
Tabulka 4.11 Časy jednotlivých fází výroby formy konvenční 46
Tabulka 5.1 Náklady poskytnuté od firmy 69

PŘÍLOHY

Příloha 1. Dopady na ŽP výroby formy 3D tiskem

Dopadové kategorie	Jednotky	Dopady materiálu	3D tisk	CNC obrábění	EDM obrábění
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	1,913	0,277	1,145	1,230
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	2,133	0,424	1,754	1,139
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,085	0,051	0,212	0,146
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1111,385	3387,435	14018,921	8875,976
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,014	0,007	0,028	0,029
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	17637,324	3009,480	12454,755	8101,948
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	6112,318	781,362	3233,672	2104,623
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,143	1,102	4,560	2,940
Land occupation	m2org.arable	1,315	1,832	7,581	4,851
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,277	0,326	1,347	0,872
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,160	0,050	0,205	0,131
Global warming	kg CO2 eq	45,763	96,035	397,440	254,236
Non-renewable energy	MJ primary	698,020	1499,444	6205,457	4002,246
Mineral extraction	MJ surplus	251,155	0,823	3,406	2,187

Příloha 2. Dopady na ŽP používání formy vyráběné 3D tiskem

Dopadové kategorie	Jednotky	El. energie	Emise	Hydraulická kapalina + postřik	Odpad hyd. kapalina + postřik
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	40,824	0,000	68,817	0,424
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	62,514	0,000	32,932	2,342
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	7,562	4,221	4,049	0,006
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	499685,967	0,000	22742,249	11,448
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,001	0,000	0,000	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,009	0,000	1,933	0,001
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	443933,328	0,000	209536,969	6066,836
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	115259,990	0,000	73829,046	93,517
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	162,519	116,296	62,203	0,101
Land occupation	m2org.arable	270,229	0,000	183,024	0,049
Aquatic acidification	kg SO2 eq	48,021	38,826	18,323	0,017
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	7,319	0,000	0,883	0,002
Global warming	kg CO2 eq	14166,225	24,696	2750,153	164,059
Non-renewable energy	MJ primary	221185,356	0,000	52084,256	24,420
Mineral extraction	MJ surplus	121,405	0,000	130,302	0,199

Příloha 3. Dopady na ŽP celého životního cyklu formy vyráběné 3D tiskem

Dopadové kategorie	Jednotky	Dopady materiálu	Výroba formy	Používání formy	Recyklace
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	1,932	2,652	110,066	-0,356
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	2,154	3,317	97,787	-1,574
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,086	0,409	15,838	-0,074
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1122,583	26282,332	522439,660	-768,688
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,000	0,000	0,001	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,014	0,064	2,943	-0,012
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	17815,048	23566,184	659537,128	-15396,925
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	6173,909	6119,657	189182,552	-5334,103
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,154	8,601	341,119	-0,970
Land occupation	m2org.arable	1,328	14,264	453,302	-0,968
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,279	2,544	105,187	-0,233
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,161	0,386	8,204	-0,142
Global warming	kg CO2 eq	46,224	747,710	17105,133	-33,404
Non-renewable energy	MJ primary	705,053	11707,147	273294,031	-492,674
Mineral extraction	MJ surplus	253,686	6,416	251,907	-228,731

Příloha 4. Dopady na ŽP výroby formy konvenčně

Dopadové kategorie	Jednotky	Dopady materiálu	CNC obrábění	EDM obrábění
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	2,879	1,590	1,408
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	1,062	2,434	1,413
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,055	0,294	0,179
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	412,217	19455,762	11060,874
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,000	0,000	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,009	0,039	0,034
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	9166,138	17284,979	10043,059
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	3740,867	4487,761	2608,600
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,451	6,328	3,650
Land occupation	m2org.arable	0,383	10,522	6,033
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,088	1,870	1,082
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,158	0,285	0,163
Global warming	kg CO2 eq	9,641	551,576	316,178
Non-renewable energy	MJ primary	180,129	8612,068	4969,386
Mineral extraction	MJ surplus	54,429	4,727	2,718

Příloha 5. Dopady na ŽP používání formy vyráběné konvenčně

Dopadové kategorie	Jednotky	El. energie	Emise	Hydraulická kapalina + postřik	Odpad hyd. kapalina + postřik
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	47,489	0,000	68,817	0,424
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	72,720	0,000	32,932	2,342
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	8,797	4,221	4,049	0,006
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	581266,001	0,000	22742,249	11,448
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,001	0,000	0,000	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,174	0,000	1,933	0,001
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	516411,040	0,000	209536,969	6066,836
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	134077,637	0,000	73829,046	93,517
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	189,052	116,296	62,203	0,101
Land occupation	m2org.arable	314,347	0,000	183,024	0,049
Aquatic acidification	kg SO2 eq	55,861	38,826	18,323	0,017
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	8,513	0,000	0,883	0,002
Global warming	kg CO2 eq	16479,040	24,696	2750,153	164,059
Non-renewable energy	MJ primary	257296,654	0,000	52084,256	24,420
Mineral extraction	MJ surplus	141,226	0,000	130,302	0,199

Příloha 6. Dopady na ŽP celého životního cyklu formy vyráběné 3D tiskem

Dopadové kategorie	Jednotky	Dopady materiálu	Výroba formy	Používání formy	Recyklace
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	2,879	2,998	47,489	-0,331
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	1,062	3,847	72,720	-0,343
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,055	0,473	13,018	-0,050
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	412,217	30516,636	581265,997	-157,090
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,000	0,000	0,001	0,000
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,009	0,073	1,174	-0,005
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	9166,138	27328,037	516411,037	-8066,763
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	3740,867	7096,361	134077,636	-3378,449
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,451	9,978	305,348	-0,370
Land occupation	m2org.arable	0,383	16,554	314,347	-0,344
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,088	2,951	94,687	-0,066
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,158	0,448	8,513	-0,157
Global warming	kg CO2 eq	9,641	867,754	16503,736	-3,987
Non-renewable energy	MJ primary	180,129	13581,454	257296,652	-67,357
Mineral extraction	MJ surplus	54,429	7,445	141,226	-54,181