

## POSOUZENÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU VÝROBY EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

VLADIMÍR KOČÍ

Ústav chemie ochrany prostředí, Vysoká škola chemicko-  
technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6  
Vlad.Koci@vscht.cz

Došlo 8.3.12, přepracováno 13.6.12, přijato 15.3.13.

Klíčová slova: posuzování životního cyklu, uhlíková stopa, LCA, epoxidové pryskyřice, environmentální dopady

### Obsah

1. Úvod
2. Výroba epoxidové pryskyřice
3. Posuzování životního cyklu výroby epoxidové pryskyřice
4. Výsledky porovnání environmentálních dopadů
  - 4.1. Spotřeba surovin
  - 4.2. Emise škodlivých látek
5. Diskuse
  - 5.1. Výsledky indikátorů environmentálních dopadů
  - 5.2. Normalizované hodnoty výsledků indikátorů kategorií dopadu
  - 5.3. Analýzy citlivosti výsledků na změnu hodnot vstupních dat
  - 5.4. Skupiny procesů s hlavním podílem na environmentálních dopadech
6. Závěr

### 1. Úvod

Snaha po snížení nepříznivých environmentálních dopadů lidské činnosti vedla nejprve k ochraně krajinných území, posléze ke snižování emisí z konkrétních technologických provozů<sup>1</sup> a nyní se zaměřuje průmysl i na snižování dopadů konkrétních výrobků<sup>2,3</sup>. Sleduje se např. uhlíková stopa<sup>4</sup> či další parametry<sup>5</sup> vztažené k určitému množství výrobků či materiálů<sup>6</sup>. Jelikož se informace o environmentálních aspektech staly předmětem popisu vlastností výrobků, začaly se o tento typ informací zajímat i provozovatelé chemického průmyslu<sup>7</sup>. Stále častěji se zde hovoří o „zelené“ chemii<sup>8</sup>. Jedním z analytických nástrojů zelené chemie je metoda posuzování životního cyklu life cycle assessment (LCA), o které již bylo v Chemických listech v obecné rovině pojednáno<sup>9</sup>. V tomto článku si ukážeme použití LCA na konkrétním chemickém provozu výroby epoxidových pryskyřic ve Spolku pro chemickou a hutní výrobu, a.s. (Spolchemie).

### 2. Výroba epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se používají pro celou řadu aplikací. Díky svým vlastnostem, jako je tvrdost, přilnavost, chemická i tepelná odolnost či nevodivost jsou vhodným materiálem používaným v celé řadě aplikací včetně stavebního průmyslu, kde slouží jako podkladové nátěry, složky izolačních či povrchových materiálů, jako pojivo či jako materiál pro výrobu konstrukčních prvků. Jelikož je to materiál s velmi pestrým použitím, kterého se ve stavebním průmyslu používají velká množství, je logické zajímat se o environmentální dopady jeho výroby či použití. Celosvětově vzrůstající zájem o uhlíkovou stopu a obdobné parametry založené na posuzování životního cyklu vedly výrobce epoxidové pryskyřice LER (liquid epoxy resin) k sestavení studie LCA. Největším výrobcem LER v České republice je Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. Významný zákazník Spolchemie, projevil zájem o hodnotu uhlíkové stopy a podmínil tím svůj další zájem o výrobek.

Epoxidové pryskyřice se synteticky vyrábějí z epichlorohydrinu a bisfenolu A dehydrochlorinačními reakcemi v bazickém prostředí. Epichlorohydrin se obvykle vyrábí z ropy, je to tedy produkt vyráběný z fosilních zdrojů. Ve Spolchemii vyvinuli novou patentovanou technologii výroby epichlorohydrinu založenou na využití glycerinu vznikajícího jako vedlejší produkt při výrobě methylesteru řepkového oleje (MEŘO), tedy biodieselu. Jelikož je glycerin jako vedlejší produkt zatížen nižší „ekologickou stopou“, lze předpokládat, že i environmentální dopady z něho vyrobeného finálního produktu budou nižší. Obě epoxidové pryskyřice jsou ve Spolchemii vyráběny ve spřažených technologických provozech, a tak bylo možné porovnat environmentální dopady výroby epoxidové pryskyřice založené na epichlorohydrinu z propylénu z ropy (LER-P) a epoxidové pryskyřice vyrobené z epichlorohydrinu vyrobeného z odpadního glycerinu (LER-G). Porovnání obou výrob bylo možné, neboť se jednalo o stejnou technologickou linku a stejného výrobce používající suroviny od stejných subdodavatelů. Bližší podrobnosti o výrobní lince nelze z důvodů patentové ochrany a obchodního tajemství uvést, pro účely následujícího textu to však není nezbytně nutné.

### 3. Posuzování životního cyklu výroby epoxidové pryskyřice

Metoda LCA přistupuje k hodnocení environmentálních dopadů produktů s ohledem na jejich celý životní cyklus, zahrnuje tedy environmentální dopady produktů již od stádia získávání a výroby výchozích materiálů, přes výrobu samotného produktu, jeho užívání až po jeho odstranění a opětovné užití či recyklaci v něm použitých materiálů. Environmentální dopady produktů jsou hodnoceny na základě posouzení vlivu materiálůvých a energetických toků, jež sledovaný systém vyměňuje s životním prostředím. Druhým významným přínosem metody LCA

je převedení těchto emisních toků (emisí stovek konkrétních látek) na kategorie dopadu jako je např. eutrofizace, acidifikace, ekotoxická, globální oteplování. Jasně definovaným postupem podle ČSN EN ISO 14040 a ČSN EN ISO 14044 (cit.<sup>10,11</sup>) se sečtou účinky látek podílejících se na každé kategorii dopadu a vyjádří se souborné hodnoty vyjadřující míru zasažení každé kategorie dopadu. Jelikož význam různých kategorií dopadu může být pro společnost v různých regionech různá, používá se vážení jednotlivých kategorií dopadu či jejich normalizace.

Celkovou míru poškození životního prostředí není snadné posoudit pouze na základě množství emitovaných látek. Důležitá je rovněž míra schopnosti dané emise ten či onen nežádoucí efekt vyvolávat. K takovému porovnání se v LCA právě používají výsledky indikátorů kategorií dopadu. Jelikož porovnávat různé výrobky podle tak rozsáhlého seznamu dat není jednoduché, a protože nás více než samotná přítomnost škodlivin v prostředí zajímá celková míra jejich škodlivého působení, jakýsi součet dopadů, používá se pro vyjádření zásahu emisí uvolněných z životního cyklu výrobku do životního prostředí již výše zmíněné kategorie dopadu. V případě posuzování propylenové a glycerinové epoxidové pryskyřice byl způsob charakterizace dopadů vypuštěných látek metodikou CML 2001 (cit.<sup>12</sup>). Jedná se o metodiku vyjadřující míru škodlivosti emisí pomocí referenční látky<sup>13</sup>. Například pro environmentální dopad skleníkového jevu (globální oteplování) se používá jednotka kg ekvivalentů CO<sub>2</sub>, označovaná často jako uhlíková stopa.

Vzájemné porovnání významnosti kategorií dopadu není vždy jednoznačné a musí se provádět citlivě a s ohledem na místní specifika. Po provedené charakterizaci se může provádět pomocí normalizace či vážení<sup>9,14</sup> výsledků indikátorů kategorií dopadu pomocí definovaných, často site-specific, faktorů<sup>15–18</sup>. Po provedení normalizace je možné vyjádřit souborně environmentální dopady srovnávaných produktů.

Hodnocení výsledků indikátorů kategorií dopadu bylo realizováno pomocí charakterizačních modelů doporučených pro metodu LCA. V této práci použité modely vycházely z aktuální verze metodiky CML 2001 (cit.<sup>12,19</sup>). Účinky skleníkových plynů na míru skleníkového jevu byly charakterizovány v souladu s postupem Mezinárodního panelu pro klimatické změny a vyjadřovány v kg ekvivalentů CO<sub>2</sub>. Míra schopnosti látek podílet se na rozkladu stratosférického ozonu byla vyjadřována v kg ekvivalentů trichlorfluormethanu (CFC-11), což je rovněž postup doporučený Mezinárodním panelem pro klimatické změny. Míra toxického působení na lidskou populaci, akvatická i půdní ekotoxická byla vyjádřena pomocí kg ekvivalentů 1,4-dichlorbenzenu (DCB). Účinky acidifikujících látek na půdní a vodní prostředí v kg ekvivalentů SO<sub>2</sub>. Účinky emisí živin na rozvoj eutrofizace vodních a půdních ekosystémů v kg ekvivalentů PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Schopnost látek podílet se na vzniku fotooxidantů byla vyjádřena v kg ekvivalentů C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Úbytek minerálních surovin byl vyjádřen v kg ekvivalentů Sb a úbytek fosilních paliv pomocí MJ.

Cílem studie LCA bylo určit uhlíkovou stopu (kg

ekvivalentů CO<sub>2</sub>) a hodnoty indikátorů dalších kategorií dopadu výroby 1 tuny epoxidové pryskyřice. Funkční jednotka i referenční tok byly zvoleny právě jako 1 tuna výroby LER. Hranice systému byly zvoleny tzv. cradle-to-gate<sup>20–22</sup>, tedy od fáze získávání surovin, jejich zpracování, transport až po výrobu finálního produktu LER. Do hranic systému bylo zahrnuto odpadové hospodářství, čištění odpadních vod, recyklace odpadních chemikálií a regenerace. Spotřeba energie byla založena na konkrétní energetické bilanci výrobce a použit byl současný energetický mix České republiky. Hodnoty emisí látek do atmosféry byly určeny na základě konkrétních měření ve Spolchemii. Výstupy jsou tedy založeny převážně na místně specifických hodnotách. Surovinová náročnost a emise látek do životního prostředí vstupních surovin a energií byly získány dílem od výrobců, dílem z obecných databází LCA. Transport vstupních surovin byl modelován s použitím konkrétních vzdáleností a s použitím odpovídajících dopravních prostředků: diesellový vlak, nákladní automobil odpovídající tonáže a nákladní automobil s návěsem.

#### 4. Výsledky porovnání environmentálních dopadů

Výsledky porovnání environmentálních dopadů dvou způsobů výroby epoxidové pryskyřice jsou rozděleny na oblast spotřeby surovin a na oblast emisí škodlivých látek do prostředí mající konkrétní environmentální dopady vyjádřené pomocí indikátorů kategorií dopadu.

##### 4.1. Spotřeba surovin

Spotřeba surovin jako specifická kategorie dopadu je významná nejen z environmentálního, ale i ekonomického či sociálního úhlu pohledu<sup>23</sup>. Spotřeba vybraných primárních energetických surovin související s životním cyklem výroby 1 tuny epoxidové pryskyřice je uvedena v tab. I. Epoxidová pryskyřice vyráběná z glycerinového epichlorhydrinu (LER-G) je méně náročná na spotřebu všech sledovaných energetických surovin. Náročnost porovnávaných výrob na spotřebu minerálních surovin již tak jednoznačná není, byť celkově lze hodnotit LER-G opět jako úspornější. Ty položky, kde byla LER-G na danou surovi-

Tabulka I  
Spotřeba vybraných energetických surovin spotřebovaných při životním cyklu výroby 1 tuny epoxidové pryskyřice

Surovina [kg/t LER]	LER-G	LER-P
Ropa	1100	1460
Černé uhlí	630	1140
Hnědé uhlí	571	1380
Zemní plyn	666	822
Uran	0,016	0,037

Tabulka II

Spotřeba vybraných minerálních surovin při životním cyklu výroby 1 tuny epoxidové pryskyřice

Surovina [kg/t LER]	LER-G	LER-P
<i>Neobnovitelné suroviny</i>		
Vápenec	668	1057
NaCl	473	1292
Minerální zdroje fosforečnanů	372	0,00003
Potaš (10% K <sub>2</sub> O)	324	0,122
BaSO <sub>4</sub>	3,92	6,24
Křemičitý písek	3,14	4,01
Bentonit	2,38	3,27
Fosfor (29% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,97	0,00002
KCl	1,75	0,000002
Rudy Fe	1,55	2,64
MgCl <sub>2</sub> (40% výluh)	1,13	2,74
Bauxit	0,719	1,10
Rudy Pb + Zn	0,373	0,522
Sádrovec	0,149	0,228
Manganová ruda	0,106	0,020
Rudy Zn	0,103	0,167
Rudy Cu	0,100	0,381
CaF <sub>2</sub>	0,066	0,010
Rudy Ni	0,047	0,073
Basalt	0,032	0,058
Dolomit	0,022	0,030
Kaolínová ruda	0,021	0,019
Ilmenit (ruda titania)	0,016	0,027
Rudy Ti	0,009	0,034
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,007	0,024
Rudy Sb + Au	0,004	0,000
Rudy Cu + Au + Ag	0,003	0,011
Rudy Cr	0,002	0,010
Rudy Cu + Mo + Au + Ag	0,002	0,006
Molybdenit (Mo 0,24%)	0,001	0,004
<i>Obnovitelné suroviny</i>		
Voda, m <sup>3</sup>	1243	1032
CO <sub>2</sub> (vzdušný, spotřeba)	1345	51
N <sub>2</sub> vzdušný	0,013	0,131

nu více náročná, souvisely vždy s procesem pěstování energetické plodiny, výrobou pesticidů a hnojiv souvisejícími s výrobou MERO.

#### 4.2. Emise škodlivých látek

Vyjmenovat všechny emise látek do prostředí související s životním cyklem výroby epoxidové pryskyřice je obtížné, neboť se jedná o značný rozsah dat. V problematice posuzování životního cyklu se obvykle pracuje se stovkami položek. V této studii byly sledovány emise kovů, anorganických i organických sloučenin (těžké uhlovodíky, polyaromatické uhlovodíky, halogenované uhlovodíky), živin (látek obsahujících biodostupný dusík a fosfor) a ropných látek do jednotlivých složek prostředí. Jednalo se tedy o sledování paralelních emisí uvedených látek do povrchových vod, do ovzduší, do zemědělsky či do průmyslově využívané půdy. V tab. III jsou uvedeny sumární množství skupin emisí uvolněných do jednotlivých sledovaných složek prostředí.

### 5. Diskuse

#### 5.1. Výsledky indikátorů kategorií dopadu

V tab. IV jsou uvedeny výsledky indikátorů kategorií dopadu vztahované k životnímu cyklu výroby 1 tuny epoxidové pryskyřice. Takto postavené výsledky mohou být použity pro srovnání jednotlivých epoxidových pryskyřic. Ve srovnání však nejsou zahrnuty vlastnosti významné při užívání výrobků z pryskyřic (např. možné zbytky bisfenolu ve finálním produktu). To je dáno tím, že tato studie LCA je tzv. cradle-to-gate, tedy od kolébky k bráně. Zdravotní aspekty používání výrobků z pryskyřic již nebyly zahrnuty do hranic posuzovaného systému. Jaké informace lze tedy získat na základě výsledků indikátorů kategorií dopadu uvedených v tab. IV?

LER-G je s výjimkou eutrofizace, humánní toxicity a ekotoxicity vždy šetrnější vůči životnímu prostředí. Velmi významný je přínos LER-G v kategorii dopadu globální oteplování, neboť oproti LER-P zde došlo k téměř polovičnímu poklesu produkce skleníkových plynů vyjádřených v kg ekvivalentů CO<sub>2</sub>. Nárůst eutrofizace, humánní toxicity a ekotoxicity LER-G je způsoben intenzivnějším používáním hnojiv a pesticidních přípravků při pěstování energetických plodin.

Závažnost různých kategorií se může významně lišit a tak je na místě položit si otázku, jak se liší celkové environmentální dopady LER-G a LER-P. Jde o to posoudit, zda jsou v případě LER-G zvýšené dopady na eutrofizaci, toxicitu a ekotoxicitu menší environmentální zátěží než úspory získané v ostatních kategoriích dopadu. Na tuto otázku lze odpovědět pomocí normalizace výsledků indikátorů kategorií dopadu.

#### 5.2. Normalizované hodnoty výsledků indikátorů kategorií dopadu

Srovnání normalizovaných výsledků je uvedeno na obr. 1. Normalizované výsledky ukazují, že úspory minerálních i fosilních surovin a snížení uhlíkové stopy LER-G

Tabulka III

Vybrané skupiny emisí látek emitovaných do jednotlivých složek prostředí vztážené k výrobě 1 tuhy epoxidové pryskyřice

Emitované látky [kg/t LER]	LER-G	LER-P	Emitované látky [kg/t LER]	LER-G	LER-P
<i>Emise do ovzduší</i>			<i>Emise do povrchových vod</i>		
Emise do ovzduší celkem	36618	54967	Emise do povrchových vod celkem	20891	21288
Kovy	0,005	0,008	Kovy	1,07	2,47
Anorganické sloučeniny	13295	19798	Anorganické sloučeniny	540	626
Organické sloučeniny celkem	19,0	25,7	Organické sloučeniny celkem	5,94	0,03
Těkávé uhlovodíky	3,26	3,60	Halogenované uhlovodíky	0,0000015	0,0000017
Polyaromatické uhlovodíky	0,0009	0,0017	Ostatní uhlovodíky	0,034	0,024
Halogenované uhlovodíky	0,0003	0,0006	Nerozpustné látky, suspenze, zeminy	64,7	17,5
Prachové částice	0,73	1,11	<i>Emise do oceánských vod</i>		
Radioaktivní materiály	0,0001	0,0003	Emise do oceánských vod celkem	48,73	60,21
<i>Emise kovů do zemědělsky využívané půdy</i>	0,254	0,000	Kovy	0,0099	0,0123
<i>Emise do průmyslově využívané půdy</i>			Anorganické sloučeniny	47,9	59,3
Emise do průmyslově využívané půdy, celkem	0,251	0,352	Organické sloučeniny celkem	0,028	0,036
Kovy	0,062	0,087	Ostatní uhlovodíky	0,028	0,035
Anorganické sloučeniny	0,188	0,264	Nerozpustné látky, suspenze, zeminy	0,688	0,797
Organické sloučeniny	0,0006	0,0010			

Tabulka IV

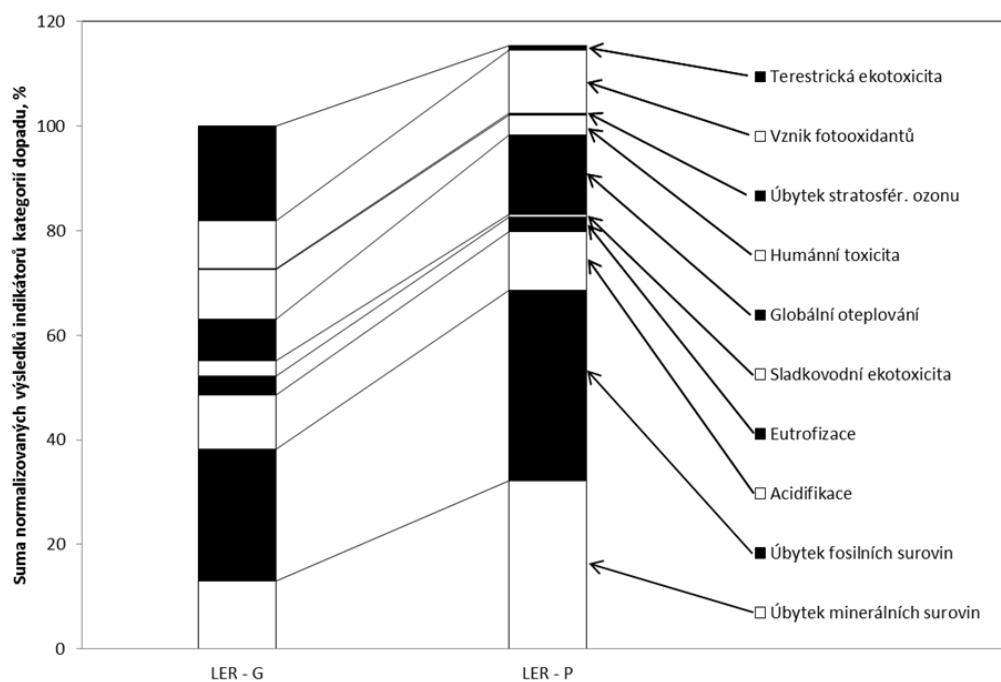
Výsledky indikátorů kategorií dopadu související s výrobou 1 tuny epoxidové pryskyřice

Kategorie dopadu	LER-G	LER-P
Úbytek minerálních surovin, kg ekv. Sb	0,0087	0,0215
Úbytek fosilních surovin, MJ	98000	142000
Acidifikace, kg ekv. SO <sub>2</sub>	19,21	20,80
Eutrofizace, kg ekv. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	7,62	5,55
Akvatická ekotoxicita, kg ekv. DCB	66,9	15,5
Globální oteplování, kg ekv. CO <sub>2</sub>	4540	8700
Humánní toxicita, kg ekv. DCB	532	216
Úbytek stratosférického ozonu, kg ekv. CFC-11	0,00012	0,00037
Vznik fotooxidantů, kg ekv. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,763	2,307
Terestrická ekotoxicita (TETP inf.), kg ekv. DCB	233,0	10,9

jsou ve srovnání s LER-P významné. Z obrázku je patrné, že ačkoli výroba LER-G má téměř o polovinu nižší dopady na kategorii dopadu globální oteplování, není ve stejné míře šetrná v jiných kategoriích dopadu. Vzájemné srovnání závažnosti různých kategorií dopadu ukazuje, že toxicita a ekotoxicita je významným dopadem souvisejícím s LER-G. Toto ukazuje, že posuzování dvou výrobků pouze na základě uhlíkové stopy nemusí být dostatečné a nemusí podat vyčerpávající informaci o závažnosti toho či onoho výrobku. Je třeba mít ovšem na paměti, že vzájemné porovnávání kategorií dopadu různého geografického rozsahu, jako je celoplanetární kategorie globální oteplování a lokální kategorie toxicita a ekotoxicita je problematické.

### 5.3. Analýzy citlivosti výsledků na změnu hodnot vstupních dat

Analýzy citlivosti jsou ve studiích LCA velmi užitečným nástrojem testování, nakořl jsou zjištěné výsledky citlivé na změnu vstupních dat či předpokladů. Analýzy citlivosti jsou také důležitým nástrojem verifikace zjištěných výsledků a míry jejich platnosti. Z provedených analýz citlivosti zde uvádím dvě, jež jsou zajímavé nejen



Obr. 1. Podíl jednotlivých kategorií dopadu na celkových environmentálních dopadech. Normalizace výsledků indikátorů kategorií dopadu provedena pro 27 států EU, vyjádřeno v % pro LER-G

Tabulka V

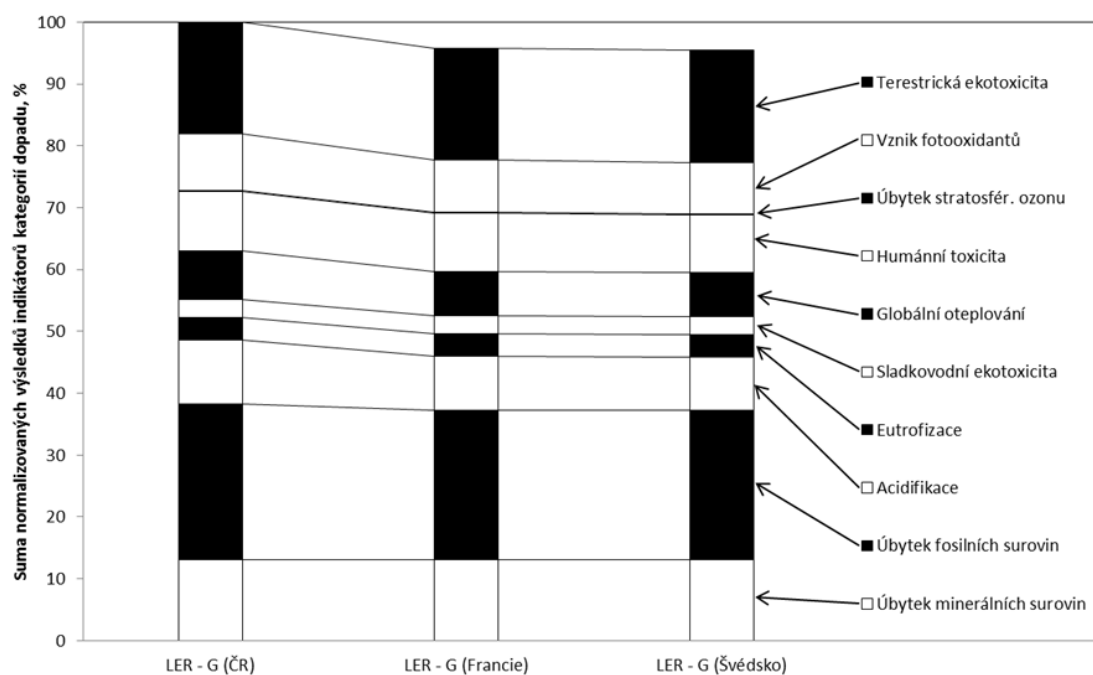
Vliv složení energetického mixu při výrobě elektrické energie na výsledné hodnoty indikátorů kategorií dopadu

Kategorie dopadu	LER-G energetický mix ČR	LER-G energetický mix Francie	LER-G energetický mix Švédska
Úbytek minerálních surovin, kg ekv. Sb	0,0087	0,0087	0,0088
Úbytek fosilních surovin, MJ	98000	94200	93800
Acidifikace, kg ekv. SO <sub>2</sub>	19,2	16,2	16,1
Eutrofizace, kg ekv. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	7,62	7,50	7,49
Akvatická ekotoxicita, kg ekv. DCB	66,9	67,2	66,8
Globální oteplování, kg ekv. CO <sub>2</sub>	4538	4146	4116
Humánní toxicita, kg ekv. DCB	532	521	519
Úbytek stratosférického ozonu, kg ekv. CFC-11	0,00012	0,00020	0,00012
Vznik fotooxidantů, kg ekv. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,76	1,60	1,60
Terestrická ekotoxicita, kg ekv. DCB	233,0	232,7	232,6

z metodického hlediska, ale i pro interpretaci zjištěných výsledků.

V první analýze citlivosti bylo testováno, nakolik se složení kombinace různých zdrojů energie, resp. environmentálních dopadů výroby elektřiny, podílí na celkových environmentálních dopadech LER-G. Samotný podíl ener-

getiky na environmentálních dopadech LER bude ukázán dále, zde je testováno, zda by stejný způsob výroby LER-G teoreticky realizovaný v jiných zemích s jiným složením energetických zdrojů vykazoval srovnatelné environmentální dopady. V tab. V jsou uvedeny procentuální hodnoty, jak by se lišily výsledky indikátorů kategorií



Obr. 2. Srovnání vlivu energetického mixu ČR, Francie a Švédska na celkové environmentální dopady výroby LER-G. Normalizace výsledků indikátorů kategorií dopadů provedena pro 27 států EU

#### Tabulka VI

Výsledky analýzy citlivosti výsledných hodnot indikátorů kategorií dopady na změnu přepravních vzdáleností vstupních materiálů

Kategorie dopadu, %	LER-G (T0)	LER-P (T0)
Úbytek minerálních surovin, kg ekv. Sb	99,97	99,99
Úbytek fosilních surovin, MJ	99,09	99,48
Acidifikace, kg ekv. SO <sub>2</sub>	98,69	99,04
Eutrofizace, kg ekv. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	99,31	99,22
Akvatická ekotoxicita, kg ekv. DCB	99,77	99,18
Globální oteplování, kg ekv. CO <sub>2</sub>	98,56	99,39
Humánní toxicita, kg ekv. DCB	99,48	98,95
Úbytek stratosférického ozonu, kg ekv. CFC-11	99,75	99,89
Vznik fotooxidantů, kg ekv. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	99,98	99,99
Terestrická ekotoxicita, kg ekv. DCB	98,25	98,90

dopadu v případě, že by stejná technologie výroby LER-G byla realizována ve Francii (energetika založená převážně na jaderných elektrárnách) a ve Švédsku (energetika založená z 50 % na hydroelektrárnách a z 50 % na jaderných elektrárnách). Výsledky srovnání ukazují, že celkové environmentální dopady LER-G jsou na složení energetického mixu v případě některých kategorií dopadu prakticky nezávislé. Při použití francouzského energetického mixu by suma normalizovaných výsledků poklesla na hodnotu

95,7 % a v případě švédského energetického mixu na hodnotu 95,4 %.

Druhá analýza citlivosti testuje vliv dopravních vzdáleností, na jaké se musí přepravovat chemikálie a materiály pro výrobu epoxidových pryskyřic. Tento vliv byl testován analýzou citlivosti na výsledné environmentální dopady s použitím nulového scénáře. Jednalo se o porovnání, jak se změní celkové environmentální dopady reálného provozu v případě, kdyby nebylo třeba žádné vstupní suro-

viny do místa výroby dopravovat. Jednalo se tedy o hypotetický scénář, kdy všechny dopravní vzdálenosti byly rovny 0. Výsledky této analýzy citlivosti jsou shrnuty v tab. VI. Reálné hodnoty jsou použity jako vztažné výsledky a byla jim přiřazena hodnota 100 %. Jak vysoké by byly hodnoty v každé kategorii dopadu po vyloučení dopravy je vyjádřeno počtem % z reálné situace. Z tabulky je patrné, že environmentální dopady přepravy vstupních materiálů nedosahují ani 2 % celkových environmentálních dopadů. Výsledky environmentálních dopadů porovnání obou typů epoxidových pryskyřic tedy nejsou na přepravní vzdálenosti citlivé.

#### 5.4. Skupiny procesů s hlavním podílem na environmentálních dopadech

Pro výrobce je vždy zajímavé, které skupiny procesů nesou největší díl environmentálních dopadů produkce. Pomocí LCA lze identifikovat, které jednotlivé procesy to jsou. LCA ovšem umožňuje rovněž identifikovat, jestli se na celkových environmentálních dopadech podílí především výrobce, či jeho subdodavatelé, tedy výrobci surovin

a energií, ze kterých se vyrábí. Takové zjištění může být zajímavé v oblasti dodavatelsko-odběratelských vztahů. V některých případech může být významné investovat do vlastního zlepšení technologie, v jiných případech může být účinnější změna dodavatele. Tab. VII a VIII ukazují, jak velké environmentální dopady jsou způsobeny dodavateli materiálů a jak velké environmentální dopady realizuje výrobce LER. V případě LER-G jsou větší environmentální dopady na straně dodavatelů, v případě LER-P na straně výrobce. Toto zjištění potvrzuje, že zlepšení technologie výroby LER-G má pro Spolchemii, a.s. přínos a že další smysluplné snížení environmentálních dopadů její produkce lze hledat i za hranicemi závodu.

V tab. VII a VIII byla výroba elektrické energie a její dopady zahrnuta do tzv. vlastních environmentálních dopadů, tedy do skupiny vlastních procesů. Neboť energetická náročnost výroby jde obvykle na vrub provozovatele. Výrobce si však může položit otázku, jak velký podíl environmentálních dopadů svázaných s jeho výrobkem, v našem případě s výrobou epoxidové pryskyřice, má na svědomí energetika, tedy výroba elektrické energie. V tab. IX jsou uvedeny procentuální podíly energetiky na

Tabulka VII

Podíl dodavatelů a vlastních procesů výrobce LER-G na celkových environmentálních dopadech

LER-G	Dodavatelé	Vlastní procesy	Dodavatelé [%]	Vlastní procesy [%]
Úbytek minerálních surovin, kg ekv. Sb	0,0082	0,0005	94	6
Úbytek fosilních surovin, MJ	80469	17525	82	18
Acidifikace, kg ekv. SO <sub>2</sub>	14,18	5,03	74	26
Eutrofizace, kg ekv. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	3,58	4,04	47	53
Akvatická ekotoxicita, kg ekv. DCB	65,68	1,23	98	2
Globální oteplování, kg ekv. CO <sub>2</sub>	2846	1692	63	37
Humánní toxicita, kg ekv. DCB	481,8	49,9	91	9
Úbytek stratosférického ozonu, kg ekv. CFC-11	1,17E-04	1,57E-07	100	0
Vznik fotooxidantů, kg ekv. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,42	0,34	81	19
Terestrická ekotoxicita, kg ekv. DCB	230	3,1	99	1

Tabulka VIII

Podíl dodavatelů a vlastních procesů výrobce LER-P na celkových environmentálních dopadech

LER-P	Dodavatelé	Vlastní procesy	Dodavatelé [%]	Vlastní procesy [%]
Úbytek minerálních surovin, kg ekv. Sb	0,0205	0,0010	95	5
Úbytek fosilních surovin, MJ	111301	30618	78	22
Acidifikace, kg ekv. SO <sub>2</sub>	10,94	9,86	53	47
Eutrofizace, kg ekv. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,18	4,37	21	79
Akvatická ekotoxicita, kg ekv. DCB	13,29	2,25	86	14
Globální oteplování, kg ekv. CO <sub>2</sub>	5665	3037	65	35
Humánní toxicita, kg ekv. DCB	124,7	91,3	58	42
Úbytek stratosférického ozonu, kg ekv. CFC-11	3,50E-04	1,56E-05	96	4
Vznik fotooxidantů, kg ekv. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,67	0,64	72	28
Terestrická ekotoxicita, kg ekv. DCB	6,92	3,95	64	36

Tabulka IX

Podíl výroby elektrické energie na celkových environmentálních dopadech výroby epoxidové pryskyřice

Kategorie dopadu, %	LER-G	LER-P
Úbytek minerálních surovin	0,19	0,13
Úbytek fosilních surovin	18	23
Acidifikace	27	48
Eutrofizace	4	11
Akvatická ekotoxicita	2	15
Globální oteplování	37	36
Humánní toxicita	10	44
Úbytek stratosférického ozonu	0,09	0,05
Vznik fotooxidantů	19	28
Terestrická ekotoxicita	1	40

celkových environmentálních dopadech výroby LER-G a LER-P.

Vysoký podíl energetiky na kategorii dopadu acidifikace je dán složením českého energetického mixu, kdy se majoritní část elektrické energie vyrábí z hnědého uhlí s vysokým obsahem síry. Výroba elektrické energie je významným zdrojem environmentálních dopadů i v jiných oblastech, v globálním oteplování, vzniku fotooxidantů, rozkladu stratosférického ozonu či úbytku fosilních surovin. V případě LER-P je energetika významným a dominantním znečišťovatelem všech kategorií dopadu, kromě úbytku minerálních surovin. Bez nadsázky lze říci, že hlavním procesem ovlivňujícím výsledné environmentální dopady chemické výroby LER je výroba elektrické energie. Toto zjištění je plně v souladu s pracemi Werneta<sup>24</sup> a Kima<sup>25</sup> a potvrzuje, že snaha po snížení vlastních environmentálních dopadů (resp. dopadů vlastního produktu nahliženo z pohledu celého životního cyklu) může vést i za hranice vlastního provozu – v tomto případě k ekologicky šetrnějšímu dodavateli elektrické energie.

## 6. Závěr

Výroba epoxidové pryskyřice na bázi glycerinu je z pohledu životního cyklu environmentálně šetrnější ve srovnání s výrobou založenou na propylenu. Na glycerinu založená výroba představuje úspory v minerálních a fosilních surovinách a rovněž produkuje téměř poloviční množství skleníkových plynů vyjádřených jako kg ekvivalentů CO<sub>2</sub>. Glycerinová výroba však z pohledu životního cyklu produkuje větší množství do prostředí uvolněných škodlivých látek, a to především v souvislosti se zemědělskou produkcí plodin využitých pro výrobu MEŘO. Významným zdrojem environmentálních dopadů svázaných s životním cyklem LER-G je výroba elektrické energie spotřebované při produkci a dále výroba vstupních surovin či meziproductů výroby. V případě, že by při výrobě

LER-G byla využita elektrická energie a vstupní suroviny od subdodavatelů s nižšími environmentálními dopady, tak by se to pozitivně projevilo na nižších environmentálních dopadech LER-G. Ve srovnání s LER-G je v případě LER-P větší množství environmentálních dopadů na straně výrobce a tak zlepšení vlastních výrobních procesů může vést u LER-P ke snížení environmentálních dopadů spjatých s životním cyklem tohoto produktu. Doprava a vzdálenost přepravy vstupních surovin a meziproductů použitých při výrobě LER-P i LER-G mají ve vztahu k celku zanedbatelný vliv na environmentálních dopadech životního cyklu epoxidových pryskyřic.

*Autor článku děkuje Ing. Tomášovi Loubalovi, Ing. Pavlovi Kubičkovi a Ing. Přemyslovi Karáskovi za poskytnutí dat. Děkuji recenzentům článku, kteří svým dílem přispěli k jeho vyšší kvalitě. Práce vznikla s podporou Výzkumného záměru č. 6046137308 MŠMT.*

## LITERATURA

- Gustafsson L. M., Borjesson P.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 12, 151 (2007).
- Sugiyama H., Hirao M.: *Process Systems Engineering* 2003, Pts A and B 15, 624 (2003).
- Capello C., Fischer U., Hungerbuhler K.: *Green Chem.* 9, 927 (2007).
- Tjan W., Tan R. R., Foo D. C. Y.: *J. Cleaner Prod.* 18, 848 (2010).
- Wernet G., Papadokonstantakis S., Hellweg S., Hungerbuhler K.: *Green Chem.* 11, 1826 (2009).
- Weidenhaupt A., Hungerbuhler K.: *Chimia* 51, 217 (1997).
- Fischer U., Hungerbuhler K.: *Chimia* 54, 494 (2000).
- Clark J. H., Deswarte F. E. I., Farmer T. J.: *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* 3, 72 (2009).
- Kočí V.: *Chem. Listy* 104, 921 (2010).
- ČSN EN ISO 14040: (2006).
- ČSN EN ISO 14044: (2006).
- Guinee J.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 6, 255 (2001).
- Pennington D. W.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 6, 89 (2001).
- Huijbregts M. A. J., Breedveld L., Huppes G., de Koning A., van Oers L., Suh S.: *J. Cleaner Prod.* 11, 737 (2003).
- Laurent A., Olsen S. I., Hauschild M. Z.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 401 (2011).
- Laurent A., Lautier A., Rosenbaum R. K., Olsen S. I., Hauschild M. Z.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 728 (2011).
- Norris G. A.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 6, 85 (2001).
- Gao F., Nie Z. R., Wang Z. H., Gong X. Z., Zuo T. Y.: *Sci. China, Ser. E: Technol. Sci.* 52, 215 (2009).
- Derwent R. G., Jenkin M. E., Passant N. R., Pilling M. J.: *Atmos. Environ.* 41, 2570 (2007).
- Vizcarra A., Lo V., Bicho P. A., Watson P. A.: *Tappi J.* 82, 115 (1999).



21. Jimenez-Gonzalez C., Curzons A. D., Constable D. J. C., Cunningham V. L.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 9, 114 (2004).
22. Nielsen P. H., Oxenboll K. M., Wenzel H.: *Int. J. Life Cycle Assess.* 12, 432 (2007).
23. Van der Vorst G., Dewulf J., Aelterman W., De Witte B., Van Langenhove H.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 5344 (2009).
24. Wernet G., Mutel C., Hellweg S., Hungerbuhler K.: *J. Ind. Ecol.* 15, 96 (2011).
25. Kim S., Overcash M.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78, 995 (2003).

**V. Kočí** (*Department of Environmental Chemistry, Institute of Chemical Technology, Prague*): **Life Cycle Assessment of Liquid Epoxy Resin Production**

This study compares environmental impacts including carbon footprint of production of liquid epoxy resin (LER) produced from epichlorohydrin synthesized from propylene with LER produced from epichlorohydrin synthesized from glycerin. The influence of upstream and/or core processes on environmental impacts of glycerine-based LER and propylene-based LER are compared.