

HEXABROMCYKLODODEKAN A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

VLADIMÍR KOČÍ

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

Došlo 14.4.11, přepracováno 19.3.12, přijato 10.5.12.

Klíčová slova: HBCDD, toxicita, ekotoxicita, perzistence, biodostupnost

Obsah

1. Úvod
2. Chemická charakteristika a použití
3. Výskyt HBCDD v prostředí
4. Toxické vlastnosti
5. Ekotoxicita
6. Závěr

1. Úvod

Hexabromcyklododekan (HBCDD, někdy uváděn pod ne zcela správnou zkratkou HBCD) je sloučenina používaná jako zpomalovač hoření v polystyrenu a v průmyslových textiliích, kde je nutno předcházet možnému vzniku a šíření požáru. HBCDD se ve větším průmyslovém měřítku vyrábí od 80. let, s výrazným nárůstem produkce od 90. let. Důvodem používání tohoto bromderivátu je snížení rizika vzniku a šíření požárů v budovách, a to jak průmyslových či kancelářských, tak i v domácnostech, což vyžaduje evropská norma EN 13 501-1. Jelikož s HBCDD je v kontaktu opravdu téměř každý, je nutné se věnovat zdravotním dopadům a rovněž i možným nepříznivým účinkům této látky na životní prostředí. HBCDD v důsledku své lipofilní povahy a omezené odbouratelnosti se hromadí v potravním řetězci a má tak nepříznivé účinky na zdraví lidí i ekosystémů.

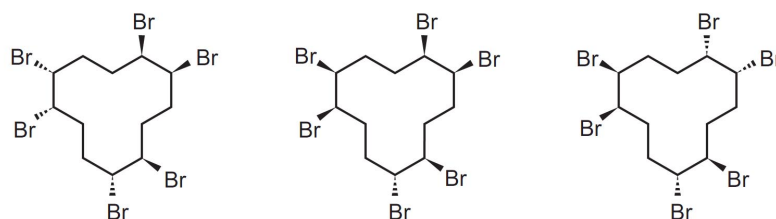
Významnost tématu dokladuje skutečnost, že látka byla v roce 2008 označena Evropskou agenturou pro chemické látky (ECHA) za látku vzbuzující mimořádné obavy (tzv. SVHC – substance of very high concern). V roce 2009 ECHA doporučila zařadit HBCDD na autorizační list REACH, k čemuž došlo v září 2010. V říjnu 2010 byla látka zařazena na seznam perzistentních organických látek (POP) Stockholmské úmluvy a výborem této úmluvy byl doporučen celosvětový zákaz užívání. V příloze XIV. nařízení ES/1970/2006 (REACH) z února 2011 (cit.¹) se s platností od 17. února 2011 objevil i HBCDD, což zna-

mená, že tato látka se od roku 2015 nebude bez povolení smět používat. Od roku 2009 je tato látka agenturou ECHA klasifikována jako vysoce toxická vůči vodním organismům s možným dlouhodobým nepříznivým účinkem na vodní prostředí (R50 a R53). V prosinci 2010 navrhla ECHA klasifikovat HBCDD v souladu se směrnicí EU 67/548/EEC jako látku vyvolávající reprodukční toxicitu s možnými účinky na nenarozené plody (R63) a možnými účinky na kojence (R64). Přestože byly publikovány zprávy vyvracející nepříznivé účinky HBCDD na zdraví², bylo publikováno větší množství prací potvrzujících obavy z této látky.

2. Chemická charakteristika a použití

Hexabromcyklododekan je alifatický cyklický uhlovodík substituovaný 6 atomy bromu. Molekulární struktura je na pohled atraktivní, viz obr. 1. Systematický název látky je 1,2,5,6,9,10-hexabromcyklododekan, sumární vzorec má $C_{12}H_{18}Br_6$. Z 64 možných prostorových konformací existuje 16 stereoisomerů včetně 6 párů enantiomerů³. Přesná stereochemie HBCDD však dosud popsána není^{4,5}. Průmyslovým produktem je směs α -, β - a γ -isomerů o složení 10–13 % α , 1–12 % β a 75–89 % γ -isomeru. Zvýšení reakční teploty nad 160 °C vede bez ohledu na původní poměr isomerů k přeskupení do následujícího poměru: 78 % α , 13 % β a 9 % γ -isomeru⁶. Vyšší zastoupení α -isomeru při vyšších teplotách dokládá jeho vyšší tepelnou stálost. HBCDD je za normálních podmínek netěkavá bílá látka nerozpustná ve vodě, ale dobře rozpustná v organických rozpouštědlech.

HBCDD se používá jako retardér hoření polystyrenových pěnových plastů a v průmyslových textiliích. V celosvětovém měřítku představuje 8 % všech bromovaných retardérů hoření. Jedná se o aditivní retardér hoření, jenž není ve výsledném polymeru vázán chemickými vazbami, ale pouze vazbami fyzikálními. Existuje tedy možnost, že by se v průběhu výroby, dlouhodobého používání i konečného odstraňování mohl uvolňovat z polymeru do životního prostředí. HBCDD se používá v koncentraci do 0,7 hm.% v pěnovém polystyrenu (EPS – Expandable Polystyrene), který se nejčastěji užívá v konstrukčních a izolačně-konstrukčních deskách, jako obalový materiál či izolace v nákladních automobilech. HBCDD plní v EPS dobře svoji funkci, zároveň však nemění jeho požadované technické vlastnosti. Koncentrace v extrudovaném polystyrenu (XPS – Extruded Polystyrene), jenž se používá jako zátěžový izolační materiál do vlhkého prostředí (tzv. inverzní střechy i podklady silnic), je až 3 hm.%. V koncentracích až 7 hm.% se HBCDD vyskytuje v houževnatém polystyrenu (HIPS – High Impact Polystyrene) využívaném především v elektronice. O rozšíření

Obr. 1. Strukturní vzorce nejčastějších isomerů hexabromocyclododekanu: α , β a γ

používání polystyrenu není třeba referovat, stačí, když si uvedeme některé jeho užitečné vlastnosti: a) má vynikající tepelně izolační účinnost ve vztahu k hmotnosti; b) je lehký, tuhý a snadno manipulovatelný bez nutnosti speciální ochrany; c) PS sám o sobě je netoxický, neobsahuje žádné zvláštní alergeny; d) lze jej řezáním snadno upravit do požadovaného tvaru; e) má dobré mechanické a akustické vlastnosti; f) je odolný vůči vodě a není náchylný k růstu plísní; g) je odolný vůči hmyzu a hlodavcům; h) izolační vlastnosti PS zůstávají konstantní; i) je recyklovatelný. Souborem těchto vlastností PS předčí většinu ostatních izolačních materiálů. Vzhledem k požadavkům na prevenci vzniku požárů se PS bez HBCDD v současnosti neobejde (s výjimkou polystyrenu pro potravinářské účely). V textilních tkaninách a výplních čalouněných výrobků, například matrací, automobilových sedadel, v draperiích a textilních tapetách a v podlahových krytinách dosahuje koncentrace HBCDD v polymerní disperzi místy až 15 hm. %.

Celosvětová produkce HBCDD přesahuje 20 tisíc tun (cit.^{4,7,8}). V České republice se HBCDD používá od roku 1997 při výrobě polystyrenu v Synthos Kralupy, a. s., kde se v posledních letech spotřebovala následující množství: 2008 – 386 t; 2009 – 381 t; 2010 – 491 t. Nárůst v roce 2010 byl způsoben zahájením výroby EPS desek používaných pro zateplování budov a jako izolace základů budov i silnic. Pro ilustraci uveďme, že přibližně 200 milionů budov v Evropě je izolováno polystyrenovými pěnovými materiály. EPS představuje 1/3 izolačních materiálů na evropském trhu. V kontextu použití polystyrenu (obsahujícího HBCDD) jako izolačního materiálu je nutno mít na paměti, že snížením energetické náročnosti budov dochází k odvrácení (úsporám) emisí, jež v důsledku úspor (lepší energetické izolace) nebylo nutno vyprodukovat. Z tohoto pohledu má aplikace polystyrenu včetně HBCDD jednoznačně pozitivní úlohu. Použití HBCDD má však i své stinné stránky. Je třeba mít na paměti, že omezení používání HBCDD omezí i výrobu a používání polystyrenových výrobků, což může mít ekonomické i sociální důsledky.

Na výzkumu alternativních retardérů hoření se v současnosti pracuje, je však otázkou, zda i nové retardéry hoření budou vykazovat nepříznivé zdravotní a environmentální dopady.

3. Výskyt HBCDD v prostředí

HBCDD je látka v prostředí velmi perzistentní a jelikož není snadno degradovatelná, její pozadíové koncentrace v prostředí narůstají. To bylo pozorováno například v sedimentech švýcarských jezer, kde nedochází k poklesu množství i 30 let staré kontaminace, naopak dochází k soustavnému nárůstu koncentrace HBCDD na úroveň jednotek ng/g suché váhy sedimentu⁹. Někteří autoři na druhé straně degradaci v anaerobních podmínkách pozorovali, její rychlost se však lišila u α -, β - a γ -isomerů¹⁰. Zastoupení jednotlivých isomerů se liší v biotických a abiotických složkách prostředí. Proces isomerizace obvykle vede ke vzniku α -isomeru^{8,11}. Intenzivně se v poslední době sleduje výskyt bromovaných zpomalovačů hoření včetně HBCDD v Číně^{12–14} a Japonsku¹⁵, kde se používá ve výrobě elektroniky, a vyskytuje se tedy i v provozu technologii její recyklace^{16,17}. Jelikož i evropský region není této látce ušetřen, provádí se monitoring i zde^{18–24}. Výskyt HBCDD byl potvrzen ve všech sledovaných složkách prostředí a bylo potvrzeno, že se do prostředí uvolňuje jak z bodových, tak z difúzních zdrojů¹⁹. V současné době byl HBCDD detegován v celé řadě ekosystémů od arktické až po tropickou oblast^{20,24,25}. Významným sekundárním zdrojem znečištění jsou dnové sedimenty řek²⁶.

Odhady množství emisí HBCDD do prostředí byly prováděny pro jednotlivé technologické aplikace a složky prostředí. V Evropské unii v roce 2008 bylo emitováno do ovzduší 508 kg, do odpadních vod 6251 kg a do povrchových vod 1933 kg HBCDD. Jedná se ovšem o hodnoty stanovené uprostřed životního cyklu výrobků, neboť většina výrobků obsahujících HBCDD vyrobených např. v roce 2008 je dosud v užívání a množství emisí HBCDD do prostředí na konci životního cyklu bude záviset na způsobu nakládání s odpady. A právě v budoucích odpadech je obsaženo značné množství této látky. Na toto nebezpečí poukazuje situace v půdách v okolí recyklační stanice elektroodpadu v Číně. Zde byly v rozsáhlém monitoringu identifikovány koncentrace HBCDD až v řádu stovek ng/g suché hmotnosti půdy a celkové množství 1800 kg HBCDD¹⁷. Bude nutno vyvinout nové technologie recyklace elektroodpadu, při kterých by nedocházelo k uvolňování HBCDD do prostředí, což se bohužel dosud děje²⁷. V půdách byl v nejvyšších koncentracích obvykle

stanoven γ -isomer²⁸.

Z pohledu kontaminace potravního řetězce je významné, zda koncentrace HBCDD v rybím masu překračuje významně bezpečné hodnoty. Toto prozatím pozorováno nebylo^{29,30}, ovšem vzhledem k silnému bioakumulačnímu potenciálu HBCDD je každý příspěvek potenciálně nebezpečný, což dokazují vyšší koncentrace HBCDD na vrcholu oceánské potravní pyramidy^{31–33}. V tomto případě je nejvýznamnější cestou příjmu HBCDD gastrointestinální trakt³⁴.

Co se jednotlivých složek prostředí týče, odhadují se koncentrace bromovaných zpomalovačů hoření v ovzduší center měst na jednotky pg m^{-3} , v čistírenských kalech v řádu desítek až stovek $\mu\text{g kg}^{-1}$, v povrchových vodách v řádu setin ng l^{-1} a v půdách až v řádech $\mu\text{g kg}^{-1}$ (cit.²⁴). HBCDD se do člověka dostává především potravou a vdechnutím prachu. Denní příjem potravou se pohybuje v rozmezí 1,2–20 ng/den , vdechnutím prachu obsahujícího HBCDD člověk přijímá 3–8 ng/den (cit.³⁵). V lidském séru byla stanovena průměrná hodnota 2,9 ng/g hmotnosti lipidů³⁵. Nejvýznamnější cestou příjmu pro člověka je domácí prostředí, resp. prach obsahující stopy HBCDD^{24,35}. To bylo potvrzeno srovnáním množství isomerů α a γ v krvi člověka, v potravě a v prachu. Ačkoli v potravě převažuje α -isomer, tak v prachu je to naopak γ -isomer^{36,37}, jenž byl detegován jako dominantní v lidském séru³⁵. Vedle prachu z domácností je významný i prach v automobilech³⁸. Závažný je výskyt HBCDD v mateřském mléce, jenž byl potvrzen v různých zemích^{39–41} o možných zdravotních důsledcích však zatím informace dostupné nejsou. V mateřském mléce se v nejvyšších koncentracích vyskytoval α -isomer, což by naopak zvyšovalo význam příjmu potravou. Koncentrace HBCDD v mateřském mléce dosud soustavně narůstají a přesahují hodnotu 5 ng/g tuku⁴². V České republice byly sledovány bromované retardéry hoření v různých matricích: v stabilizovaných kalech z ČOV⁴³, v rybách^{44,45}, říčních sedimentech, lidském tuku⁴⁶ (odpad z liposukce), mateřském mléce a prachu v bytech, obchodech a kancelářích⁴⁷. Koncentrace HBCDD v čistírenských kalech od roku 2006 narůstá a pohybuje se v řádech stovek $\mu\text{g kg}^{-1}$ sušiny kalu⁴⁷. V tukových tkáních lidí byly zaznamenány koncentrace HBCDD v řádu jednotek až desítek ng/g tuku⁴⁷, což řádově odpovídá hodnotám stanoveným v USA³¹. Některé současné práce nepotvrzují výrazná rizika zdravotně významné expozice, a tudíž i reálný škodlivý vliv HBCDD na člověka⁴⁸. Na druhé straně je třeba uvážit, že dosud není k dispozici dostatečný soubor dat, a to jak toxikologických, tak z environmentálního monitoringu, aby bylo možné zdravotní a environmentální rizika správně posoudit^{49–51}.

4. Toxické vlastnosti

Informace o toxikologických vlastnostech HBCDD, účincích na člověka, dosud nejsou dostatečné⁵². Ačkoli byly některé toxikologické experimenty prováděny, jedna-

lo se často o interní nebo nezveřejněné studie⁵³. V MSDS databázi dosud nejsou k dispozici žádná toxikologická data (ke dni 19.3.2012). To je poněkud překvapivé, uvědomíme-li si, jaká množství této látky se ročně vyrábějí a používají.

Akutní toxicita HBCDD je poměrně nízká³⁴, což souvisí s malou rozpustností ve vodě a pomalým vstupem látky do organismu z vodního prostředí. Rovněž vstřebání HBCDD pokožkou je značně omezené. Toxikologické experimenty byly prováděny na krysách, myších a na králících. Při dermálních testech nebyl zaznamenán nepříznivý účinek až do dávky 20 g kg^{-1} hmotnosti králíků. Dermální toxicita HBCDD je tedy nízká. Akutní expozice nevykazují nepříznivé účinky až do poměrně vysokých koncentrací: LD50 u myši byla vyšší než 6,4 g kg^{-1} hmotnosti těla a u krys vyšší než 10 g kg^{-1} hmotnosti těla. Látka nepůsobí na pokožku ani dráždivě ani korozivně. Ani Amesův test chromosomálních aberací nedetegoval mutagenní potenciál HBCDD³⁴.

V případě opakovaného podání HBCDD nepříznivé účinky zaznamenány byly. Zasaženým orgánem krys byla játra, která vykazovala po 28denní i po 90denní expozici nárůst hmotnosti vyvolané hyperplazií^{54,55}. V experimentálních studiích byl detegován nárůst koncentrace HBCDD v několika orgánech právě po orálním příjmu. Významné účinky však pozorovány nebyly, a to ani fetotoxické či teratogenní³⁴. V posledních letech se ovšem začaly objevovat publikace⁵⁶ poukazující na neurotoxicitu HBCDD a potenciální nepříznivé účinky HBCDD na rozmnožování, ačkoli současné expozice touto látkou jsou naštěstí zatím hluboce pod limitními hodnotami⁵⁷ NOAEL. Byla pozorována citlivost jaterních buněk krys na expozici HBCDD a to především zvýšenou indukcí CYP3A enzymů v hepatocytech⁵⁸. Samci vykazovali signifikantně nižší citlivost na expozici HBCDD⁴⁹. HBCDD vykazuje rovněž hormonální disrupci, poškozuje hormonální rovnováhu krysích samic^{59,60} a má nepříznivý vliv na vývoj mozku⁶¹. S účinky HBCDD na mozkové buňky souvisí i pozorovaný efekt na chování ovlivňované dopaminem a dopaminovými receptory. To sice bylo pozorováno u krys s koncentracemi HBCDD v tkáních vyššími o 3–4 řády než v současnosti u lidské populace, ovšem zvýšená tendence HBCDD k bioakumulaci může hypoteticky vést až k významným koncentracím s možnými účinky i na člověka⁵⁶.

5. Ekotoxicita

Rozdělovací koeficient oktanol/voda je u HBCDD poměrně vysoký, $K_{OW}=5,6$. Látka má tedy silnou tendenci k bioakumulaci srovnatelnou s DDT. Nejvíce se bioakumuluje α -isomer. Akvatická ekotoxicita HBCDD je velmi nízká. To samozřejmě vyplývá především z nízké rozpustnosti ve vodě. V prvních zprávách po možných ekotoxických účincích HBCDD byla tato látka hodnocena jako neškodlivá^{34,62}.

Ačkoli jsou koncentrace HBCDD v povrchových vodách poměrně nízké, byly v důsledku bioakumulace detegovány

vyšší koncentrace např. v úhořích *Anguilla anguilla* vyskytujících se v oblastech po proudu od průmyslových závodů^{63,64}. Lze tedy očekávat nárůst koncentrace HBCDD v různých biologických druzích. Výsledků ekotoxických biotestů HBCDD je dosud publikováno velmi málo. Naše informace o možných dopadech HBCDD na zdraví a rovnováhu ekosystémů jsou tedy velmi omezené. Účinky HBCDD na játra byly obdobně jako u krys pozorovány i u pstruha duhového *Oncorhynchus mykiss*, jehož juvenilní jedinci po 28denní expozici vykazovali zvýšený hepatosomatický index HSI a inhibiční účinky na aktivitu cytochromu P450 (cit.⁶⁵). Dlouhodobé expozice platýsů bradavičnatých *Platichthys flesus* neukázaly žádné nepříznivé účinky ani somatického ani behaviorálního charakteru²³. Naopak u ryb danií daňuských *Gobiocypris rarus* byly po expozici HBCDD pozorovány výrazné nárůsty EROD aktivity i zvýšení oxidativního stresu vedoucího k poškození lipidů i bílkovin a ke snížení antioxidantní kapacity organismu⁶⁶. Nepříznivé účinky HBCDD na ryby byly potvrzeny i sledováním vývojových vad⁶³ a zvýšeného oxidativního stresu⁶⁷ juvenilních danií pruhovaných *Brachydanio rerio*. V případě dospělých ryb byla pozorována rychlá distribuce HBCDD do orgánů ryb, kde z mozku a jater se látka poměrně rychle vylučovala, zůstávala však delší dobu zadržována ve svalech⁶⁸. Tato práce rovněž potvrdila rozdílné vlastnosti různých isomerů HBCDD. Po krátkodobé expozici dospělých ryb vůči HBCDD byl pozorován maternální přenos do jiker⁶⁹, což vzhledem k výše uvedeným pracím sledujících účinky HBCDD na juvenilní jedince⁶³ je poměrně závažné. Význam maternálního přenosu byl sledován i u ptáků, kde ve vejcích celé řady ptáků v Jižní Africe²⁵ i ve Švédsku⁷⁰ byly detegovány zvýšené koncentrace HBCDD. Zvýšená aktivita cytochromu P450 jaterních buněk kuřat potvrzuje, že i u ptáků může HBCDD vyvolávat poruchy jater⁷¹. Problematické je rovněž spolupůsobení HBCDD s jinými jedovatými látkami, kde může docházet k celé řadě neočekávaných synergických účinků⁷². Výsledky experimentálních studií s půdními heterotrofními organismy však dosud zveřejněny nebyly. Co se týče suchozemských rostlin, byla pozorována schopnost rostlin HBCDD z půdní matrice inkorporovat do biomasy rostlin. Jedná se však dosud o první práci v této oblasti⁷³.

6. Závěr

HBCDD je látka s nesporným environmentálním významem. Snaha po jejím omezení v životním prostředí je logická, podložená publikacemi a nutná i ze zdravotního hlediska. Proto je třeba uvítat snahu po legislativní regulaci používání této látky. Na druhé straně omezení používání HBCDD povede k omezování výroby a užití EPS, což může mít rovněž nežádoucí účinky na životní prostředí, a to nejen s ohledem na skleníkové plyny, ale i na emise toxických látek uvolňovaných do prostředí při výrobě tepla v jakékoli formě. Používání polystyrenu jako izolačního materiálu totiž vede k významným tepelným úsporám, což

se odráží na nižších emisích škodlivých látek při výrobě tepla či elektrické energie. Posouzení, zda používat EPS či jiný izolační materiál pro zateplování budov, by mělo být provedeno metodou posuzování životního cyklu (LCA). Problematické bude ovšem zahrnutí HBCDD do LCA, neboť dosud nejsou určeny charakterizační faktory (čísla popisující v řech LCA environmentální dopady látek) této látky⁷⁴. Důsledkem toho je, že zatím nelze provést důsledné posuzování dopadů životního cyklu (LCIA – Life Cycle Impact Assessment) materiálů obsahujících HBCDD. Tento problém je bohužel značně aktuální, neboť např. Ministerstvo životního prostředí ČR v roce 2010 vypsalo nabídku pro zpracování LCA polystyrenových izolací budov. Je zřejmé, že LCA studie zpracované bez zahrnutí environmentálních dopadů HBCDD nejsou úplně a relevantní pro otázku, jak nakládat s velkými množstvími polystyrenu po skončení jejich životnosti. Na významu problematiky LCA polystyrenových izolací nic nemění fakt, že MŽP ČR nakonec od financování výzkumu v oblasti LCA polystyrenových izolací bez udání důvodu ustoupilo. Otázku, zda nadále používat HBCDD v EPS, bude ovšem nutno zodpovědět právě použitím LCA, neboť posoudit, zda množství a nebezpečnost odvrácených emisí z energetiky (ušetřených lepší tepelnou izolací budov) je nižší než význam toxicity a ekotoxicity emisí z životního cyklu HBCDD, lze právě metodou LCA. Do problematiky zákazu používání HBCDD v EPS budou ovšem určitě vstupovat i firmy vyrábějící konkurenční izolační materiály, než je EPS. V současné době ovšem tyto konkurenční materiály nejsou schopny pokrýt všechny aplikace EPS, nehledě na to, že rozvoj výroby EPS v posledních letech zaznamenal značný nárůst a omezení jeho výroby by tedy mělo ekonomické i sociální důsledky.

Děkuji Allanu Astrupovi Jensenovi a Norbertu Eichlerovi za poskytnutí podkladů. Práce vznikla díky podpoře grantem MSM 6046137308.

LITERATURA

1. EC No 1907/2006
2. Law R. J., Kohler M., Heeb N. V., Gerecke A. C., Schmid P., Voorspoels S., Covaci A., Becher G., Janak K., Thomsen C.: Environ. Sci. Technol. 40, 2 (2006).
3. Heeb N. V., Schweizer W. B., Kohler M., Gerecke A. C.: Chemosphere 61, 65 (2005).
4. Heeb N. V., Schweizer W. B., Mattrel P., Haag R., Gerecke A. C., Kohler M., Schmid P., Zennegg M., Wolfensberger M.: Chemosphere 68, 940 (2007).
5. Heeb N. V., Schweizer W. B., Mattrel P., Haag R., Kohler M.: Chemosphere 66, 1590 (2007).
6. Heeb N. V., Schweizer W. B., Mattrel P., Haag R., Kohler M., Schmid P., Zennegg M., Wolfensberger M.: Chemosphere 71, 1547 (2008).
7. Wu J., Zhang Y., Luo X., She Y., Yu L., Chen S., Mai B.: J. Environ. Sci. 24, 183 (2012).
8. Heeb N. V., Graf H., Bernd Schweizer W., Lienemann

- P.: *Chemosphere* 80, 701 (2010).
9. Kohler M., Zennegg M., Bogdal C., Gerecke A. C., Schmid P., Heeb N. V., Sturm M., Vonmont H., Kohler H. P. E., Giger W.: *Environ. Sci. Technol.* 42, 6378 (2008).
 10. Gerecke A. C., Giger W., Hartmann P. C., Heeb N. V., Kohler H. P. E., Schmid P., Zennegg M., Kohler M.: *Chemosphere* 64, 311 (2006).
 11. EFSA: *EFSA J.* 9, 2296 (2011).
 12. Wang Y., Luo C., Li J., Yin H., Li X., Zhang G.: *Environ. Pollut.* 159, 2443 (2011).
 13. Lam J. C. W., Kajiwaru N., Ramu K., Tanabe S., Lam P. K. S.: *Environ. Pollut.* 148, 258 (2007).
 14. Bi X., Qu W., Sheng G., Zhang W., Mai B., Chen D., Yu L., Fu J.: *Environ. Pollut.* 144, 1024 (2006).
 15. Tanabe S.: *Mar. Pollut. Bull.* 57, 267 (2008).
 16. Zhang X. L., Yang F. X., Luo C. H., Wen S., Zhang X., Xu Y.: *Chemosphere* 76, 1572 (2009).
 17. Gao S. T., Wang J. Z., Yu Z. Q., Guo Q. R., Sheng G. Y., Fu J. M.: *Environ. Sci. Technol.* 45, 2093 (2011).
 18. Lind Y., Darnerud P. O., Atuma S., Aune M., Becker W., Bjerselius R., Cnattingius S., Glynn A.: *Environ. Res.* 93, 186 (2003).
 19. Remberger M., Sternbeck J., Palm A., Kaj L., Strömberg K., Brorström-Lundén E.: *Chemosphere* 54, 9 (2004).
 20. Haukås M., Hylland K., Nygård T., Berge J. A., Mariussen E.: *Sci. Total Environ.* 408, 5910 (2010).
 21. Polder A., Thomsen C., Lindström G., Lfken K. B., Skaare J. U.: *Chemosphere* 73, 14 (2008).
 22. Goscinny S., Vandevijvere S., Maleki M., Overmeire I. V., Windal I., Hanot V., Blaude M.-N., Vleminckx C., Loco J. V.: *Chemosphere* 84, 279 (2011).
 23. Kuiper R. V., Cantón R. F., Leonards P. E. G., Jensen B. M., Dubbeldam M., Wester P. W., van den Berg M., Vos J. G., Vethaak A. D.: *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 67, 349 (2007).
 24. Law R. J., Herzke D., Harrad S., Morris S., Bersuder P., Allchin C. R.: *Chemosphere* 73, 223 (2008).
 25. Polder A., Venter B., Skaare J. U., Bouwman H.: *Chemosphere* 73, 148 (2008).
 26. Marvin C. H., Tomy G. T., Alae M., MacInnis G.: *Chemosphere* 64, 268 (2006).
 27. Zhong Y., Peng P. a., Yu Z., Deng H.: *Chemosphere* 81, 72 (2010).
 28. Meng X. Z., Duan Y. P., Yang C., Pan Z. Y., Wen Z. H., Chen L.: *Chemosphere* 82, 725 (2011).
 29. Xia C. H., Lam J. C. W., Wu X. G., Sun L. G., Xie Z. Q., Lam P. K. S.: *Chemosphere* 82, 1662 (2011).
 30. Ueno D., Isobe T., Ramu K., Tanabe S., Alae M., Marvin C., Inoue K., Someya T., Miyajima T., Kodama H., Nakata H.: *Chemosphere* 78, 1213 (2010).
 31. Johnson-Restrepo B., Adams D. H., Kannan K.: *Chemosphere* 70, 1935 (2008).
 32. Shaw S. D., Berger M. L., Brenner D., Kannan K., Lohmann N., Pöpke O.: *Sci. Total Environ.* 407, 3323 (2009).
 33. Vorkamp K., RigeËt F. F., Bossi R., Dietz R.: *Environ. Sci. Technol.* 45, 1243 (2011).
 34. Darnerud P. O.: *Environ. Int.* 29, 841 (2003).
 35. Roosens L., Abdallah M. A.-E., Harrad S., Neels H., Covaci A.: *Environ. Health Perspect.* 117, 1707 (2009).
 36. Abdallah M. A. E., Harrad S., Ibarra C., Diamond M., Melymuk L., Robson M., Covaci A.: *Environ. Sci. Technol.* 42, 459 (2008).
 37. Abdallah M. A. E., Ibarra C., Neels H., Harrad S., Covaci A.: *J. Chromatogr., A* 1190, 333 (2008).
 38. Harrad S., Abdallah M. A. E.: *Chemosphere* 82, 1240 (2011).
 39. Colles A., Koppen G., Hanot V., Nelen V., Dewolf M.-C., Noël E., Malisch R., Kotz A., Kypke K., Biot P., Vinkx C., Schoeters G.: *Chemosphere* 73, 907 (2008).
 40. Abdallah M. A.-E., Harrad S.: *Environ. Int.* 37, 443 (2011).
 41. Kakimoto K., Akutsu K., Konishi Y., Tanaka Y.: *Chemosphere* 71, 1110 (2008).
 42. Fangstrom B., Athanassiadis L., Odsjo T., Noren K., Bergman A.: *Mol. Nutr. Food Res.* 52, 187 (2008).
 43. Li Z.-H., Zlabek V., Turek J., Velisek J., Pulkrabova J., Kolarova J., Sudova E., Berankova P., Hradkova P., Hajšlová J., Randak T.: *Water Res.* 45, 1403 (2011).
 44. Hajšlová J., Pulkrabová J., Poustka J., Čajka T., Randák T.: *Chemosphere* 69, 1195 (2007).
 45. Pulkrabová J., Hajšlová J., Poustka J., Kazda R.: *Environ. Health Perspect.* 115(S-1), 28 (2007).
 46. Pulkrabová J., Hrádková P., Hajšlová J., Poustka J., Nápravníková M., Poláček V.: *Environ. Int.* 35, 63 (2009).
 47. Stavělová M., Pulkrabová J., Hrádková P., Poustka J., Poláček V., Hajšlová J.: *Odpadové forum 2009*, sborník (Pešková K., ed.),
 48. Arnot J. A., Armitage J. M., McCarty L. S., Wania F., Cousins I. T., Toose-Reid L.: *Environ. Sci. Technol.* 45, 97 (2011).
 49. Canton R. F., Peijnenburg A. A. C. M., Hoogenboom R. L. A. P., Piersma A. H., van der Ven L. T. M., van den Berg M., Heneweer M.: *Toxicol. Appl. Pharm.* 231, 267 (2008).
 50. de Wit C. A.: *Chemosphere* 46, 583 (2002).
 51. Vos J. G., Becher G., van den Berg M., de Boer J., Leonards P. E. G.: *Pure Appl. Chem.* 75, 2039 (2003).
 52. Covaci A., Gerecke A. C., Law R. J., Voorspoels S., Kohler M., Heeb N. V., Leslie H., Allchin C. R., de Boer J.: *Environ. Sci. Technol.* 40, 3679 (2006).
 53. KEMI: Risk assessment-hexabromocyclododecane (CAS-no. 25637-99-4; EINECS-No. 247-148-4). Draft 9; 2002 Oct.2002).
 54. Chengelis C. P.: A 28-day repeated dose oral toxicity study of HBCD in rats. Ashland, Ohio, USA (1997).
 55. Chengelis C. P.: A 90-day oral (gavage) toxicity study of HBCD in rats. Ashland, Ohio, USA (2001).
 56. Lilienthal H., van der Ven L. T. M., Piersma A. H., Vos J. G.: *Toxicol. Lett.* 185, 63 (2009).
 57. Ema M., Fujii S., Hirata-Koizumi M., Matsumoto M.:

- Reprod. Toxicol. 25, 335 (2008).
58. Fery Y., Buschauer I., Salzig C., Lang P., Schrenk D.: Toxicology 264, 45 (2009).
 59. van der Ven L. T. M., van de Kuil T., Leonards P. E. G., Slob W., Lilienthal H., Litens S., Herlin M., Hakansson H., Canton R. F., van den Berg M., Visser T. J., van Loveren H., Vos J. G., Piersma A. H.: Toxicol. Lett. 185, 51 (2009).
 60. van der Ven L. T. M., Verhoef A., van de Kuil T., Slob W., Leonards P. E. G., Visser T. J., Hamers T., Herlin M., Hakansson H., Olausson H., Piersma A. H., Vos J. G.: Toxicol. Sci. 94, 281 (2006).
 61. Saegusa Y., Fujimoto H., Woo G. H., Inoue K., Takahashi M., Mitsumori K., Hirose M., Nishikawa A., Shibutani M.: Reprod. Toxicol. 28, 456 (2009).
 62. Dottar K. R., Kreuger H. O.: Hexabromocyclododecane (HBCD): a flow-through life-cycle toxicity test with the cladoceran (*Daphnia magna*). Final report, 439A-108 Easton, Maryland, USA (1997).
 63. Deng J., Yu L. Q., Liu C. S., Yu K., Shi X. J., Yeung L. W. Y., Lam P. K. S., Wu R. S. S., Zhou B. S.: Aquat. Toxicol. 93, 29 (2009).
 64. Roosens L., Dirtu A. C., Goemans G., Belpaire C., Gheorghe A., Neels H., Blust R., Covaci A.: Environ. Int. 34, 976 (2008).
 65. Ronisz D., Farnen Finne E., Karlsson H., Förlin L.: Aquat. Toxicol. 69, 229 (2004).
 66. Zhang X., Yang F., Zhang X., Xu Y., Liao T., Song S., Wang J.: Aquat. Toxicol. 86, 4 (2008).
 67. Hu J., Liang Y., Chen M. J., Wang X. R.: Environ. Toxicol. 24, 334 (2009).
 68. Haukas M., Mariussen E., Ruus A., Tollefsen K. E.: Aquat. Toxicol. 95, 144 (2009).
 69. Nyholm J. R., Norman A., Norrgren L., Haglund P., Andersson P. L.: Chemosphere 73, 203 (2008).
 70. Johansson A.-K., Sellström U., Lindberg P., Bignert A., de Wit C. A.: Environ. Int. 37, 678 (2011).
 71. Crump D., Egloff C., Chiu S., Letcher R. J., Chu S., Kennedy S. W.: Toxicol. Sci. 115, 492 (2010).
 72. Kling P., Forlin L.: Ecotoxicol. Environ. Saf. 72, 1985 (2009).
 73. Li Y., Zhou Q., Wang Y., Xie X.: Chemosphere 82, 204 (2010).
 74. Kočí V.: Chem. Listy 104, 921 (2010).

V. Kočí (*Department of Environmental Chemistry, Institute of Chemical Technology, Prague*): **Hexabromocyclododecane and Environment**

The article is focused on environmental aspects of production and use of hexabromocyclododecane (HBCDD). The compound is used mainly as a flame retardant in polystyrene insulation products. Of particular concern is the ability of this persistent lipophilic organic pollutant to accumulate in the food chain, leading to its progressively increasing levels in human tissues and in wildlife. The extent of accumulation correlates with its ever-increasing use. Despite this alarming trend, only limited toxicological information is available to assess its long-term implications for human health and the environment. HBCDD continues to be used despite the availability of alternative chemicals.