

ZPRÁVA

MIKROPLASTY
A NANOPLASTY

NANOPLASTY V BIOSFÉŘE

OD MOLEKULÁRNÍHO VLIVU
K PLANETÁRNÍ KRIZI

Roční objem výroby
pryskyřic a vláken

million
tun

1000

800

600

400

200

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

2040

2050

ZPRÁVA

NANOPLASTY V BIOSFÉŘE

OD MOLEKULÁRNÍHO VLIVU
K PLANETÁRNÍ KRIZI

AUTOŘI



Mezinárodní společenské hnutí ALLATRA

PŘEHLED INSTITUCÍ Akademická spolupráce



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Bolivijská katolická univerzita San Pablo - UCB
Fakulta environmentálního inženýrství a vědeckého výzkumu



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Autonomní univerzita Juana Misaela Saracha - UAJMS
Oddělení výzkumu, vědy a technologií

VĚDECKÁ SPOLUPRÁCE



**CREATIVE
SOCIETY**

Mezinárodní projekt Tvořivá společnost

OBSAH

Anotace	5
Důsledky plastového znečištění: mikro- a nanoplasty (MNP) jako nový faktor planetární krize	7
Kvantitativní odhady a trendy globální produkce plastového odpadu.....	7
Velká tichomořská odpadková skvrna.....	12
Jak vznikají mikro- a nanoplastové částice.....	12
Šíření MNP v životním prostředí.....	18
Dopady mikro- a nanoplastového znečištění na životní prostředí a klima	23
Jak MNP narušují ekosystémy na molekulární úrovni.....	23
Vliv mikro- a nanoplastů na klima	46
Vliv mikro- a nanoplastů na lidské zdraví	71
MNP jako nový rizikový faktor pro vznik epidemií 21. století.....	71
Molekulární mechanismy toxicity MNP: poškození DNA, mitochondrií a buněčných membrán.....	72
Role mikro- a nanoplastů (MNP) v předčasném stárnutí a rozvoji rakoviny.....	84
Narušení hormonálního systému vyvolané mikro- a nanoplasty (MNP).....	87
Elektrostatický náboj nanoplastů jako klíčový faktor jejich vysoké toxicity pro lidské tělo.....	93
Systémové účinky mikro- a nanoplastů (MNP) na lidské orgány a funkční systémy.....	100
Mechanismy poškození dýchacího systému při vdechování MNP.....	101
Neurotoxické působení MNP: poškození centrálního a periferního nervového systému.....	102
Účast MNP v patogenezi kardiovaskulárních onemocnění.....	114
Gastrointestinální dysfunkce v důsledku expozice mikro- a nanoplastům (MNP).....	116
Vliv MNP na imunitní systém.....	117
Karcinogenní působení MNP: mechanismy mutací a rozvoje metastáz.....	120
Vliv MNP na metabolismus vápníku a strukturu kostí.....	121
Reprodukční poruchy spojené s působením MNP: neplodnost a erektilní dysfunkce.....	122
Pronikání MNP přes placentární bariéru a jejich vliv na vyvíjející se organismus.....	126
Účinky expozice mikro- a nanoplastům (MNP) a jejich souvislost s vrozenými vadami.....	130
Závěry a perspektivy. Je možné snížit vliv MNP na lidské zdraví?.....	133
Analýza moderních strategií snižování plastového znečištění	134
Technologie odstraňování velkých plastových odpadů z vodních ekosystémů.....	134
Současné metody čištění od mikro- a nanoplastů.....	139
Přístupy vědecké komunity ALLATRA k boji s epidemií mikro- a nanoplastů	142
Technologie generátorů atmosférické vody (GAV) pro čištění oceánu od MNP.....	142
Inovativní vědecký přístup ke snižování toxicity mikro- a nanoplastů.....	148
Faktor X. Vliv mikro- a nanoplastů na dynamiku cyklu přírodních katastrof	151
Závěry: nanoplasty – výzva, kterou nelze ignorovat	171
Reference	173

ANOTACE

„Kdyby si Země vedla deník, poslední století by neslo název psaný černým inkoustem: Doba plastová.“ Od mikroskopických částic pronikajících do buněk živých organismů až po obří odpadkové ostrovy v oceánu – plasty se nesmazatelně zapsaly do geologického záznamu planety. Ale za jakou cenu?

Každý rok se na světě vyprodukuje více než 400 milionů tun plastového odpadu, z nichž přibližně 11 milionů tun končí ve světovém oceánu. V oceánu se již nahromadilo více než 200 milionů tun plastů. Analýza vzorků povrchových vod odhalila, že hmotnost plastů šestinásobně převyšuje hmotnost zooplanktonu. Budeme-li pokračovat v současném trendu, hmotnost plastů v oceánu do roku 2050 překročí hmotnost ryb.

Plasty se rozkládají stovky až tisíce let, ale působením vln, slané vody a ultrafialového záření se rozpadají na drobné částice: mikro- a nanoplasty. Ty jsou přenášeny tisíce kilometrů mořským vzduchem a srážkami, překonávají hranice států, kontinenty i oceány, hromadí se v lesích a nacházejí se v potravinách i ve vodě. Mikroplasty pronikly dokonce i do nejdlehlších koutů planety, jako je Mariánský příkop a vrchol Everestu.

Tato zpráva přináší hluboké analytické zhodnocení dopadu plastového znečištění na životní prostředí, lidské zdraví a stabilitu životně důležitých systémů společnosti. Zpráva zkoumá vliv mikro- a nanoplastů, které nesou statický náboj a obsahují toxické chemické sloučeniny, na ekosystémy. Zvláštní důraz je kladen na jejich roli při okyselování oceánu, destabilizaci potravních řetězců a ohrožení biodiverzity. Je předložena hypotéza která spojuje mikro- a nanoplasty se změnami vlastností vody, jež mohou urychlovat oteplování oceánů a zesilovat přírodní katastrofy.

Jedním z nejpálčivějších a nejznepokojivějších problémů, kterým se zpráva věnuje, je vliv mikro- a nanoplastů (MNP) na lidské zdraví. Plastové částice jsou díky své malé velikosti schopny překonávat biologické bariéry, vyvolávat oxidační stres, poškození DNA, zánětlivé reakce a narušení buněčných funkcí. Zvláštní pozornost je věnována možné souvislosti mezi působením MNP a rostoucím výskytem neurodegenerativních a neuropsychiatrických onemocnění. Ve zprávě je ukázáno, že působení MNP na vyvíjející se organismus v prenatálním a postnatálním období vede k poruchám kognitivních funkcí a duševního zdraví, což představuje vážný problém pro budoucnost lidstva.

Nárůst počtu onemocnění způsobených působením mikro- a nanoplastů již dnes výrazně zhoršuje kvalitu života obyvatelstva, zejména v oblastech s vysokou úrovní plastového znečištění.

Ve zprávě jsou označeny regiony, které již nyní patří k oblastem se zvýšeným rizikem, stejně jako ty, které zatím zůstávají relativně bezpečné. Zhoršování situace v kombinaci s absencí účinných metod ochrany před tímto působením může lidi donutit opouštět znečištěná území a hledat bezpečnější podmínky k životu. To vytvoří předpoklady pro nekontrolovanou masovou migraci, která může dále zvyšovat sociální napětí, zatěžovat městskou infrastrukturu a destabilizovat ekonomiku.

Ekologický problém plastového znečištění se tak postupně proměňuje v problém makroekonomický a geopolitický.

Zpráva zdůrazňuje nezbytnost řešení problému mikroplastů a nabízí nový pohled na jejich šíření, působení a důsledky. Jedinečnost této práce spočívá v interdisciplinárním přístupu, který spojuje údaje o fyzikálních, chemických a biologických aspektech plastového znečištění. Díky tomu je zpráva aktuální pro výzkumníky a vědce z širokého spektra oborů, kteří se zajímají o vývoj udržitelných řešení pro bezpečnou budoucnost lidstva a planety.

DŮSLEDKY PLASTOVÉHO ZNEČIŠTĚNÍ: MIKRO- A NANOPLASTY (MNP) JAKO NOVÝ FAKTOR PLANETÁRNÍ KRIZE

Plast se stal neoddělitelnou součástí dnešního života. Obaly, nádobí, oblečení, obuv, hygienické potřeby, lékařské výrobky, dopravní prostředky a komunikační zařízení – většina předmětů, které člověka obklopují, je vyrobena z plastu. Plast však neexistuje pouze ve formě velkých objektů, ale také ve formě mikroskopických částic, které se z těchto výrobků uvolňují: mikro- a nanoplasty. Mikroplasty jsou částice plastu menší než 5 mm, které mohou být viditelné pouhým okem. Nanoplasty naopak mají velikost menší než 1 μm (jedna miliontina metru), a proto většinu těchto částic nelze spatřit ani pod standardním mikroskopem.

Plastové materiály existují v mnoha typech, ale všechny jsou založeny na polymerech – přírodních nebo syntetických sloučeninách složených z velkých molekul propojených mezi sebou. Díky svým jedinečným chemickým vlastnostem se polymery vyznačují vysokou trvanlivostí a odolností vůči vnějším vlivům.

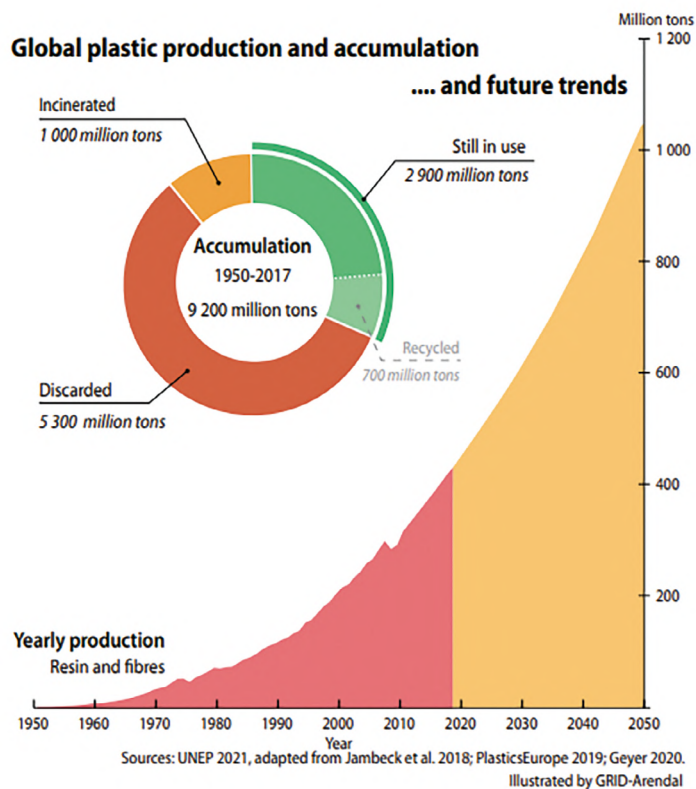
Plast se tak díky své pevnosti, univerzálnosti a nízké ceně stal hlavním materiálem pro hromadnou výrobu včetně jednorázových předmětů¹. Nesprávné nakládání s plastovým odpadem však vedlo k tomu, že se plast stal nejvýznamnějším znečišťovatelem životního prostředí z hlediska objemu.

Kvantitativní odhady a trendy globální produkce plastového odpadu

Od 50. let 20. století bylo na světě vyrobeno přibližně 9,2 miliard tun plastů. Z toho je v současnosti využíváno 2,9 miliardy tun včetně 2,7 miliardy tun primárních plastů a přibližně 0,2 miliardy tun recyklovaného materiálu. 5,3 miliard tun skončilo na skládkách a 1 miliarda tun byla spálena. Dále je známo, že se s 1,75–2,5 miliardami tun „nesprávně nakládá“, což znamená, že se mohou nekontrolovaně dostávat do životního prostředí (viz obr. 1).

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php

Do dnešního dne bylo do plastových výrobků přidáno přibližně 640 milionů tun dalších chemických látek². Podle údajů Programu OSN pro životní prostředí (UNEP)³ se každoročně na světě vyprodukuje více než 400 milionů tun plastového odpadu.



Obrázek 1 Světová výroba plastů, akumulace a budoucí trendy.

Zdroj: UNEP 2021, Upraveno podle Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Pouze 9 % plastového odpadu je recyklováno, 19 % je spalováno a vše ostatní zůstává v životním prostředí včetně skládek a oceánů⁴ (viz obr. 2).

Způsob likvidace podíl	Globální, 2023
Recyklace	9%
Spalování	19%
Nevhodná likvidace	22%
Uložení na skládku	49%

Obrázek 2 Roční plastový odpad podle způsobu likvidace, 2000–2023.
Zdroj dat: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Každý rok se do světového oceánu dostane přibližně 11 milionů tun plastů⁵. To odpovídá více než jednomu popelářskému vozu plastového odpadu vysypanému do oceánu každou minutu.

²Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Accessed: 1 May 2025)

⁴How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled>

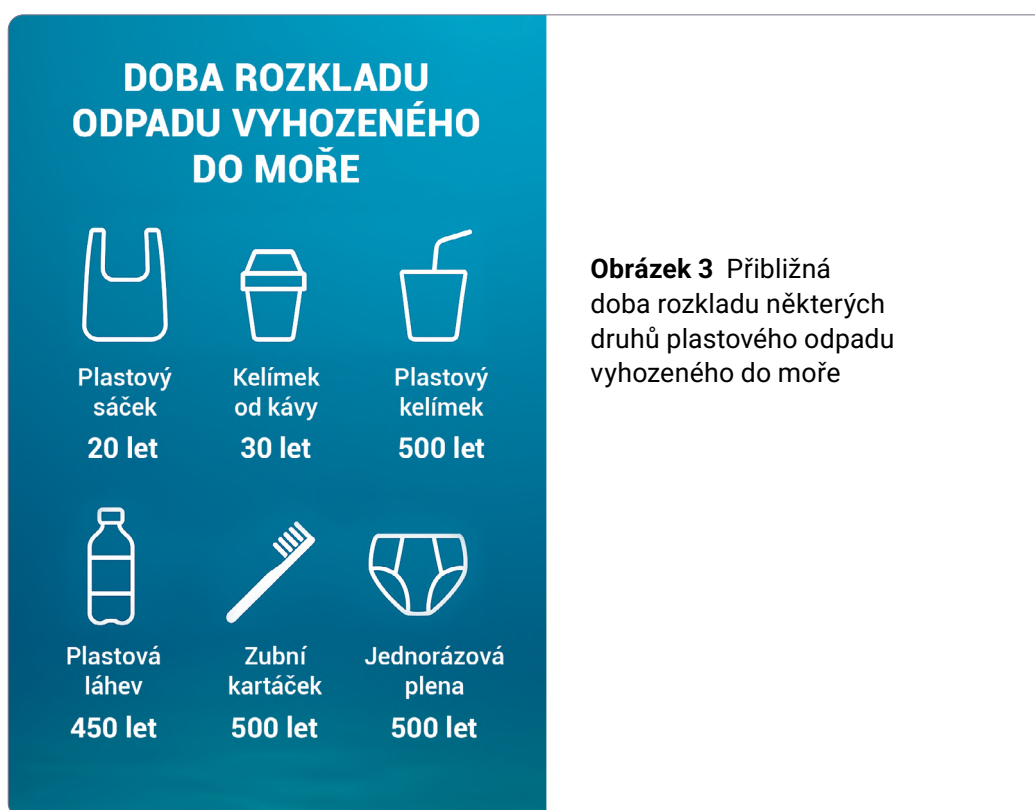
⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

V současnosti se v oceánech již nahromadilo více než 200 milionů tun velkých plastových odpadů a 35 540 tun mikroplastů⁶. Údaje o ročním objemu plastového odpadu vypouštěného do životního prostředí z pevninských zdrojů se liší v závislosti na použitých analytických metodách. Podle běžného scénáře a při absenci nezbytných opatření se množství plastového odpadu, které se dostává do vodních ekosystémů, může téměř ztrojnásobit: přibližně z 9–14 milionů tun ročně v roce 2016 na 23–37 milionů tun ročně do roku 2040.

Podle jiné analytické metody se množství odpadu může zvýšit více než dvojnásobně: přibližně z 19–23 milionů tun ročně v roce 2016 na 53 milionů tun ročně do roku 2030⁷.

Pokud budou současné trendy pokračovat, bude podle výzkumů do roku 2050 v oceánu přibližně 12 miliard tun plastů⁸, což bude hmotnostně srovnatelné s celkovou hmotností ryb v oceánu (přibližně 10 miliard tun⁹).

V závislosti na typu se plasty rozkládají od 100 do 1 000 let (viz obr. 3). V oceánu se plasty rozkládají výrazně pomaleji a ve tmavých a chladných podmínkách mořských hlubin se rychlost jejich degradace ještě více snižuje¹⁰.



Obrázek 3 Přibližná doba rozkladu některých druhů plastového odpadu vyhozeného do moře

⁶Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoién, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

S výjimkou materiálů, které byly spáleny, všechny běžné plasty, které se kdy dostaly do životního prostředí, zůstávají dosud nerozložené – buď ve formě celých výrobků, nebo jejich fragmentů¹¹. Tento odpad prakticky nikam nemizí, ale neustále se hromadí. Tuto situaci lze přirovnat k odpadkovému kontejneru, do kterého se neustále přidává odpad, ale nikdy se nevyváží. Otázka, jak by ten odpadkový koš mohl vypadat po měsíci, naznačuje rozsah problému globální akumulace plastového odpadu.

Velká tichomořská odpadková skvrna

Plastový odpad nacházející se ve vodním sloupci a na povrchu vody je unášen oceánskými proudy, přenášen do centrálních oblastí oceánu a vytváří rozsáhlá shromaždiště, kterým se říká „ostrovy“.

„Velká tichomořská odpadková skvrna“ je největší koncentrací plastů na planetě a vykazuje stálý růst (viz obr. 4). Tato odpadková skvrna se rozkládá na rozsáhlé ploše mezi Severní Amerikou a Japonskem. Pozorování ukazují, že v roce 2018 byla její povrchová rozloha 1,6 milionů čtverečních kilometrů¹², ačkoli toto číslo podléhá kolísání v důsledku oceánských proudů a sezónní proměnlivosti.



Obrázek 4 Schématický náhled vzniku odpadkové skvrny v Tichém oceánu

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Výzkumy ukazují, že až 80 %¹³ obsahu odpadkových skvrn tvoří právě plastový odpad¹⁴. V odpadkové skvrně se nachází nejméně 80 000 tun odpadu¹⁵. To je však jen viditelná část problému. Až 94 % plastů, které se dostanou do oceánu, končí na mořském dně¹⁶. Právě tam se může skrývat a hromadit značné množství odpadu.

Přesný objem Velké tichomořské odpadkové skvrny zůstává neznámý, protože subtropický gyr severního Pacifiku má příliš velké rozměry na to, aby mohl být při současné úrovni technologických možností komplexně vědecky prozkoumán.

Dynamika hromadění plastů v oceánu

Přístrojová měření ukazují exponenciální nárůst objemu Velké tichomořské odpadkové skvrny. V období od roku 2015 do roku 2022 se hmotnost plastového odpadu v této oblasti zvýšila pětinasobně¹⁷. Zvláštní znepokojení vyvolává skutečnost, že množství drobných plastových fragmentů se za stejné období zvýšilo desetinásobně, což svědčí o intenzivním procesu fragmentace velkých plastových objektů.

Velká odpadková skvrna ve skutečnosti vytváří sedmý „kontinent“ naší planety. Je však důležité poznamenat, že tento jev není ojedinělý. V současnosti vědecká komunita identifikovala ve světovém oceánu 5 velkých shromaždišť odpadu¹⁸: dvě v Atlantském oceánu, dvě v Tichém oceánu a jednu v Indickém oceánu¹⁹ (obr. 5).

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

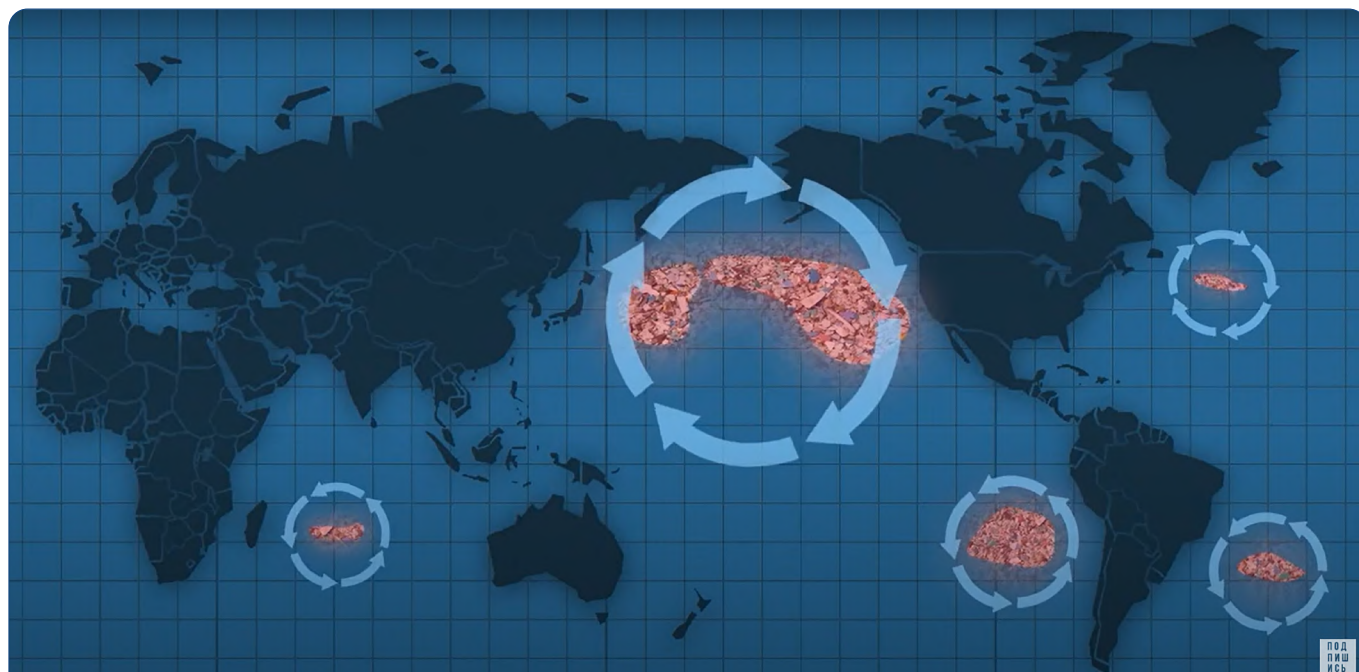
¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>



Obrázek 5 Schématické znázornění pěti velkých shromaždišť odpadu ve světovém oceánu: dvě v Atlantském oceánu, dvě v Tichém oceánu a jedno v Indickém oceánu

Jak vznikají mikro- a nanoplastové částice

Plastový odpad je velmi odolný vůči biologickému rozkladu, ale působením vln, slané vody a slunečního záření se rozpadá na drobné částice: mikro- a nanoplasty²⁰, které mohou být neviditelné pouhým okem. Tyto částice si zachovávají svou polymerní strukturu²¹ a proces rozpadu pokračuje až na nanoúroveň (obr. 6–7). Výsledkem je, že se plastový odpad stává trvalou součástí ekosystému planety.

Kromě toho mikro- a nanoplasty obsahují nebezpečné chemické látky, které jsou do plastu přidávány během výroby.

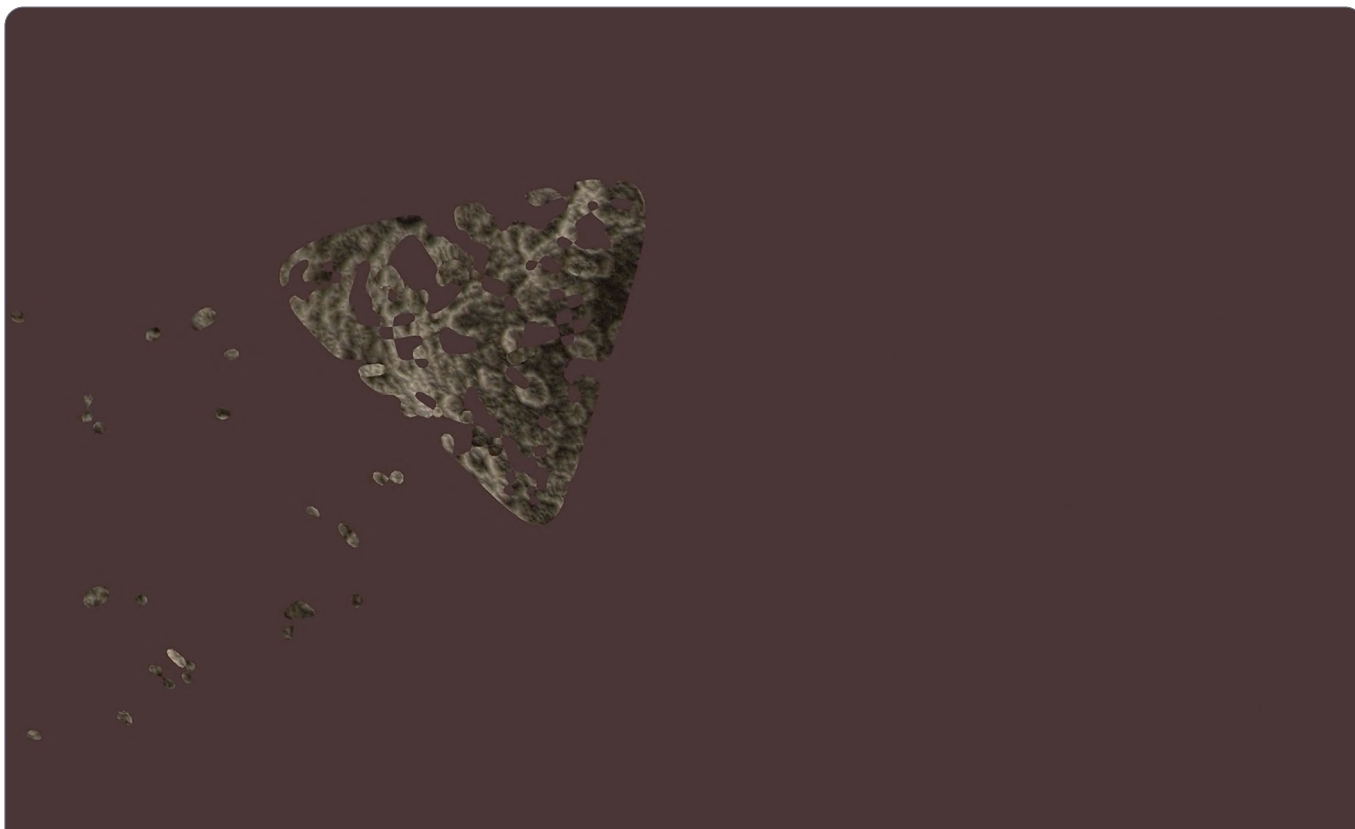


„Plasty obsahují přibližně 16 000 chemických látek. Je známo, že více než 4 200 z nich je odolných vůči rozkladu v životním prostředí, hromadí se v živých organismech, přenášejí se na velké vzdálenosti nebo představují potenciální nebezpečí,“ říká profesorka Annika Jahnke, environmentální chemička z Helmholtzova centra pro výzkum životního prostředí (UFZ)²².

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

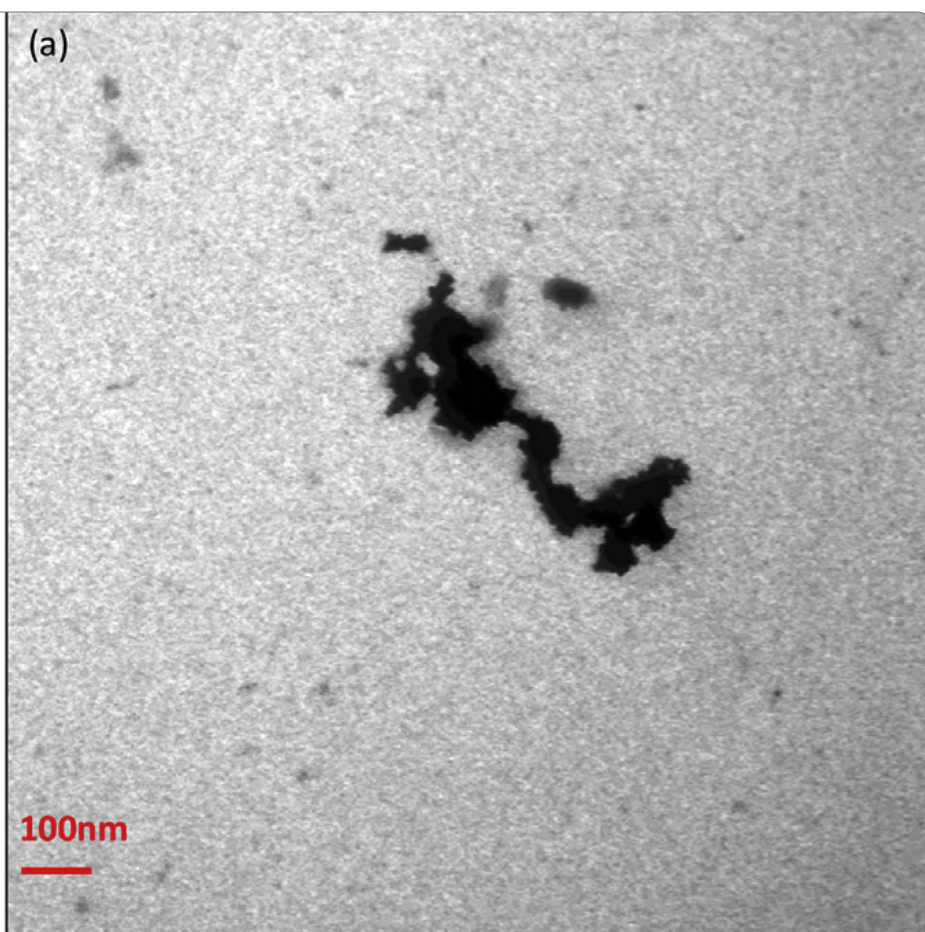
²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



Obrázek 6 Schematické znázornění procesu fragmentace plastových částic až na nanoúroveň při zachování polymerní struktury

Obrázek 7 Transmisní elektronová mikroskopie environmentálně významných nanoplastů polyetylenů vzniklých degradací UV zářením ze „zestárých“ částic mikroplastů odebraných v severním Atlantiku.

Zdroj: Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution 235, 1030–1034 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>



Šíření mikro- a nanoplastů v oceánu

Nejvyšší koncentrace plastů se vyskytuje v oblastech odpadkových skvrn. Tyto oceánské skládky fungují jako zvláštní továrny, kde neustále vznikají mikro- a nanoplasty. Podobně jako virus, který se šíří organismem prostřednictvím krevního oběhu, jsou mikroplasty přenášeny oceánskými proudy po celém světovém oceánu, což podtrhuje globální rozsah tohoto problému.

Navzdory technickým obtížím při detekci mikroplastů, jež ztěžují přesné určení jejich množství v oceánech, umožňují teoretické výpočty odhadnout rozsah tohoto problému.

Mikroplasty byly nalezeny prakticky ve všech vzorcích oceánské vody a v některých oblastech je jejich koncentrace mnohonásobně vyšší než průměrná úroveň.

Oceánské gyry napomáhají globálnímu šíření mikroplastů včetně odlehých oblastí, jako je Arktida. Výzkumy ledovcových jader ukázaly, že míra znečištění mikroplasty v Severním ledovém oceánu je 100krát vyšší než ve vodách Atlantiku severně od Skotska nebo ve vodách subtropického gyru v severním Pacifiku²³. To svědčí o rozsahu problému a jeho přeshraniční povaze.

Většina globálních studií věnovaných znečištění mořského prostředí plastem se soustředí na povrchovou vrstvu oceánu. Podle odhadů se v roce 2019 v povrchové vrstvě oceánu nacházelo 82 až 358 bilionů plastových částic²⁴.

Nicméně se objevuje stále více důkazů, že v hlubokomořských oblastech a v mořských sedimentech dosahuje množství částic mikroplastů nevyčíslitelných bilionů²⁵.

Lehké plasty plavou na hladině, zatímco hustší plasty nebo plasty kolonizované mořskými organismy klesají na mořské dno²⁶. Výpočty ukazují, že přibližně 50 % plastů z městského odpadu má vyšší hustotu než mořská voda, což napomáhá jejich rychlému potopení. Na dně se pak šíří hlubinnými proudy a hromadí se v příkopech a prohlubních. Mikroplasty byly nalezeny dokonce i v nejhlubším místě oceánu – na dně Mariánského příkopu²⁷ (obr. 8–9).

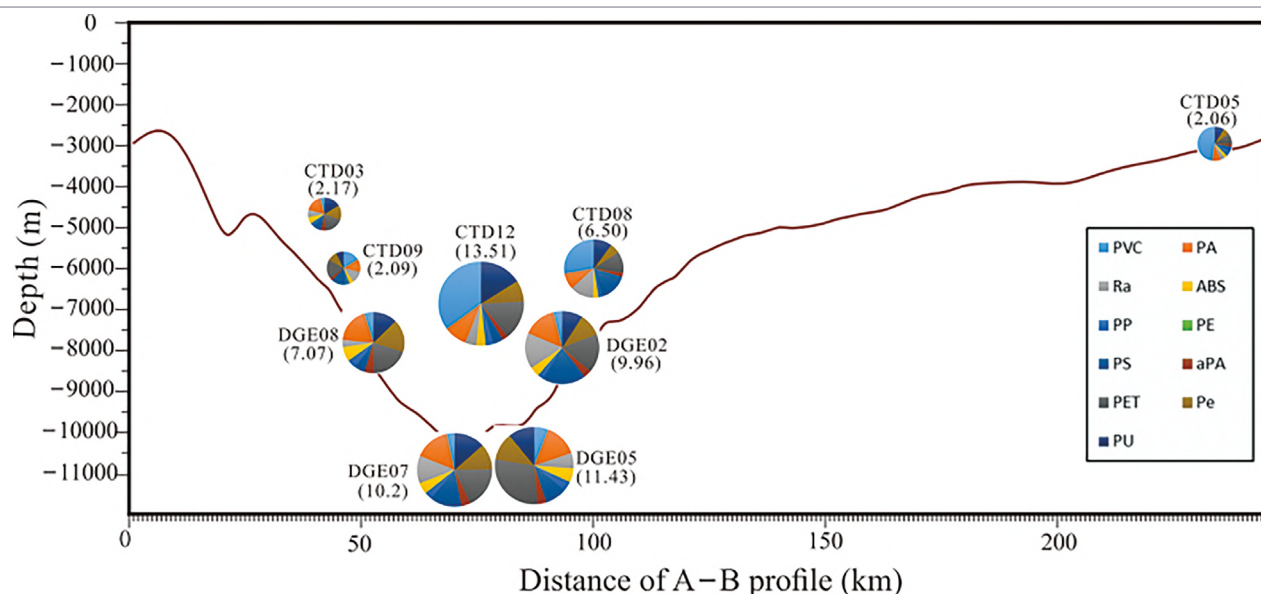
²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

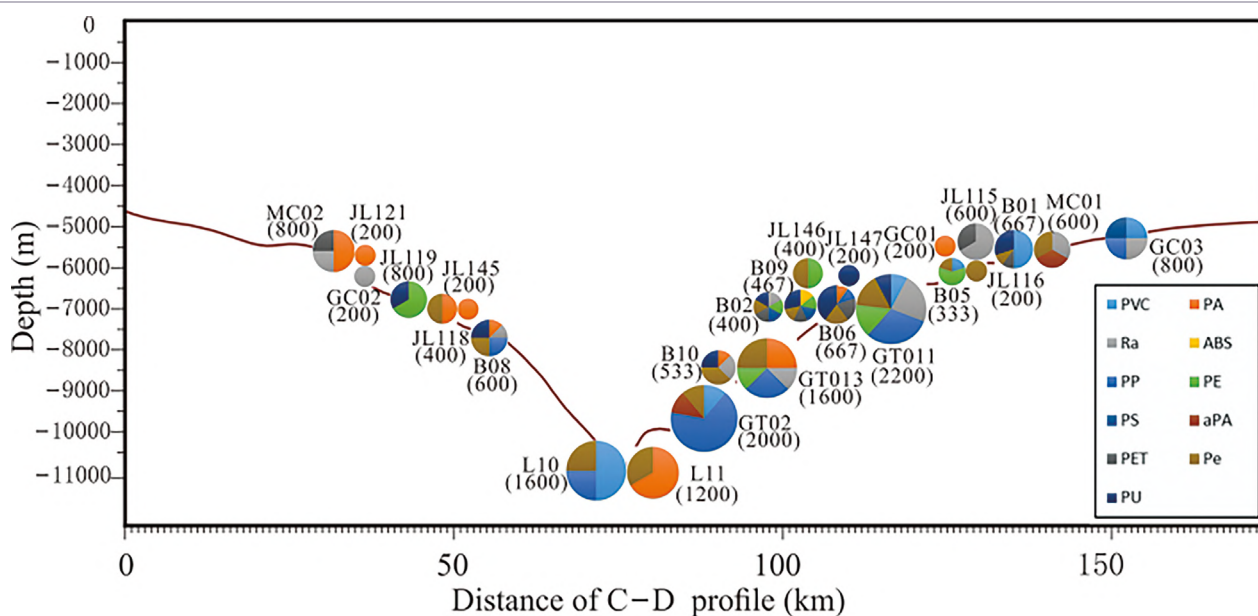
²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



Obrázek 8 Profil rozšíření a složení mikroplastů ve vzorcích vody z Mariánského příkopu. Koláčové grafy znázorňují složení mikroplastů a čísla v závorkách udávají jejich výskyt v jednotkách kusů na liter. PVC (polyvinylchlorid), PA (polyamid), Ra (viskóza), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PP (polypropylen), PE (polyetylen), PS (polystyren), APA (aromatický polyamid), PET (polyethylentereftalát), PES (polyester), PU (polyuretan). Osa X odpovídá příčné linii od bodu A (12° s. š., 142,5° v. d.) do bodu B (9,8° s. š., 141,43° v. d.).

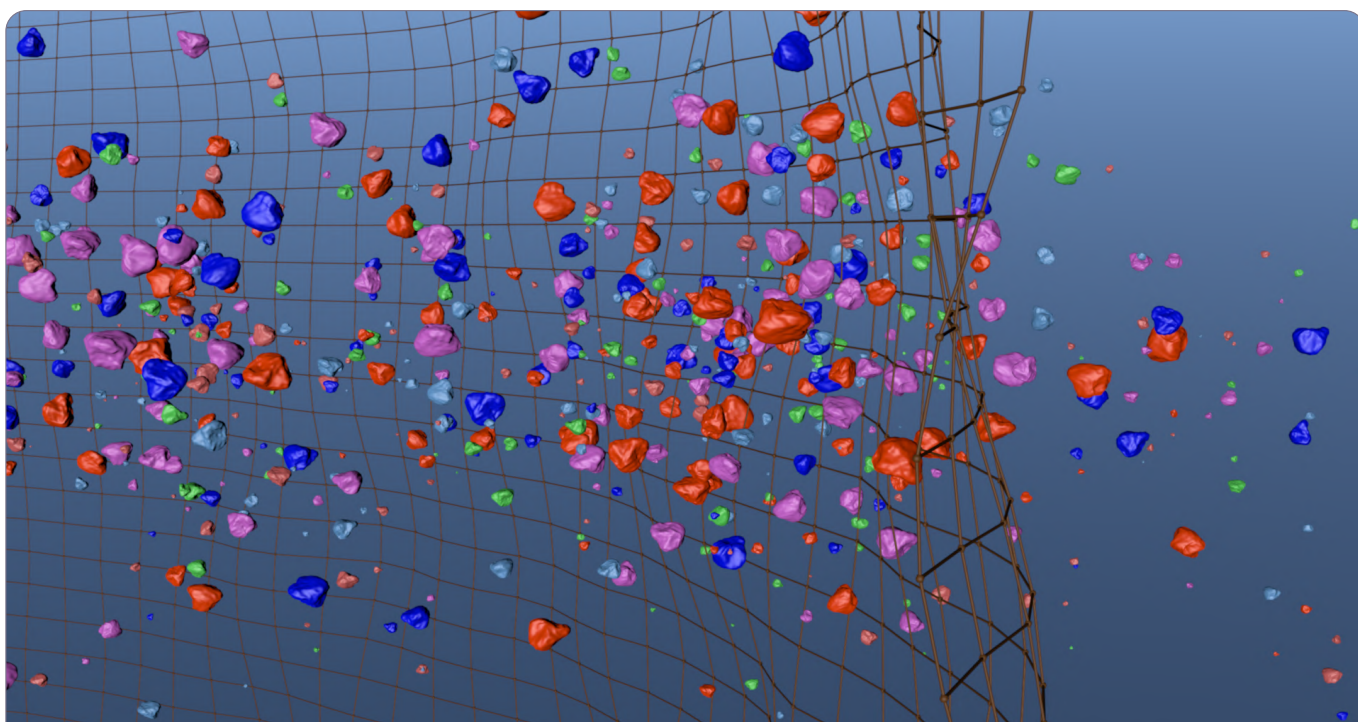
Zdroj: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



Obrázek 9 Profil rozšíření a složení mikroplastů ve vzorcích sedimentů z Mariánského příkopu. Koláčové grafy znázorňují složení mikroplastů a čísla v závorkách udávají jejich výskyt v jednotkách kusů na liter. PVC (polyvinylchlorid), PA (polyamid), Ra (viskóza), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PP (polypropylen), PE (polyetylen), PS (polystyren), APA (aromatický polyamid), PET (polyethylentereftalát), PES (polyester), PU (polyuretan). Osa X odpovídá příčné linii od bodu C (12° s. š., 141,9° v. d.) do bodu D (10,5° s. š., 141,3° v. d.).

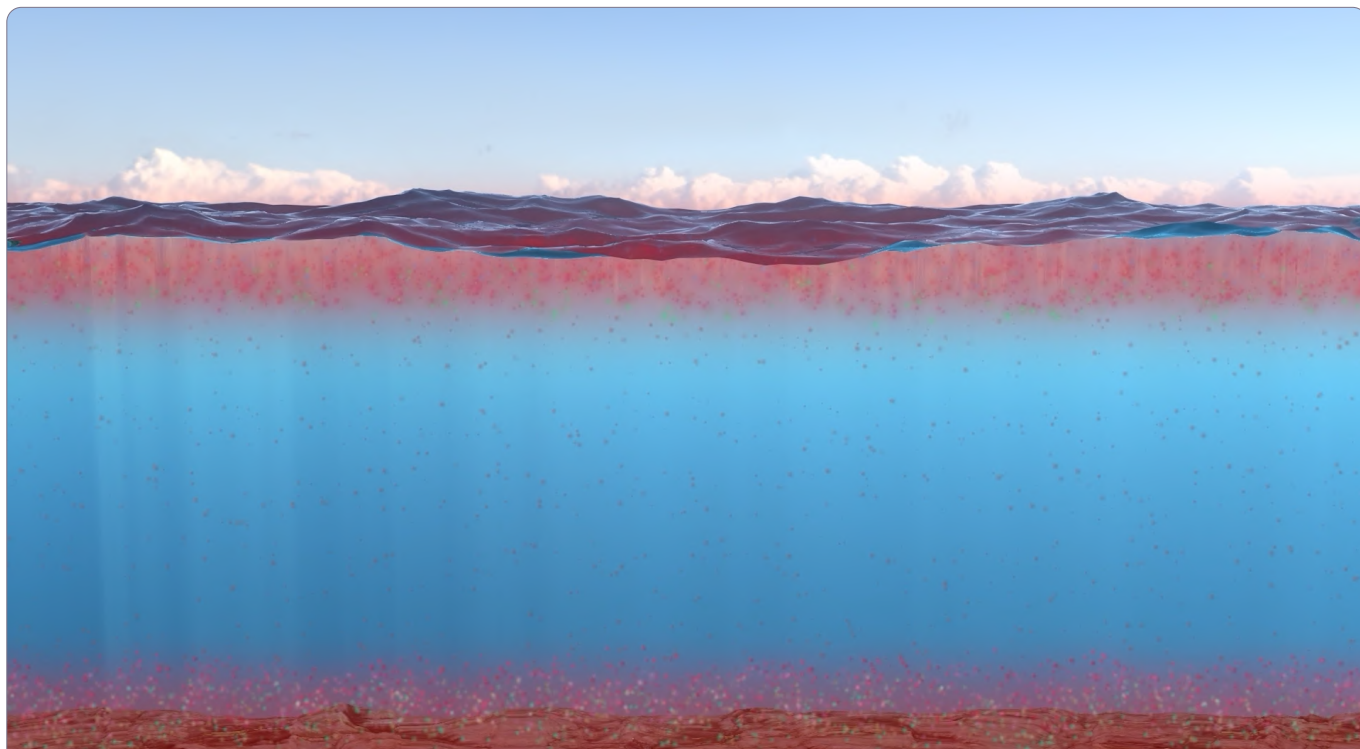
Zdroj: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Ve skutečnosti není hlavním místem hromadění mikroplastů hladina oceánu, ale hluboké mořské dno. Postupně se celé dno oceánu pokrývá vrstvou plastů. Údaje o znečištění oceánu mikroplasty jsou však pravděpodobně podhodnocené a skutečná situace může být mnohem horší. Jak poznamenává Melanie Bergmannová, biologka z Institutu Alfreda Wegenera pro polární a mořský výzkum (Německo): „Ne každý má přístup ke složitým a nákladným přístrojům pro odběr vzorků.“ Podle jejích odhadů může až 90 % mořských mikroplastových částic zůstat neodhaleno při použití standardních metod odběru, protože jejich rozměry jsou příliš malé na to, aby byly detekovány²⁸ (obr. 10).

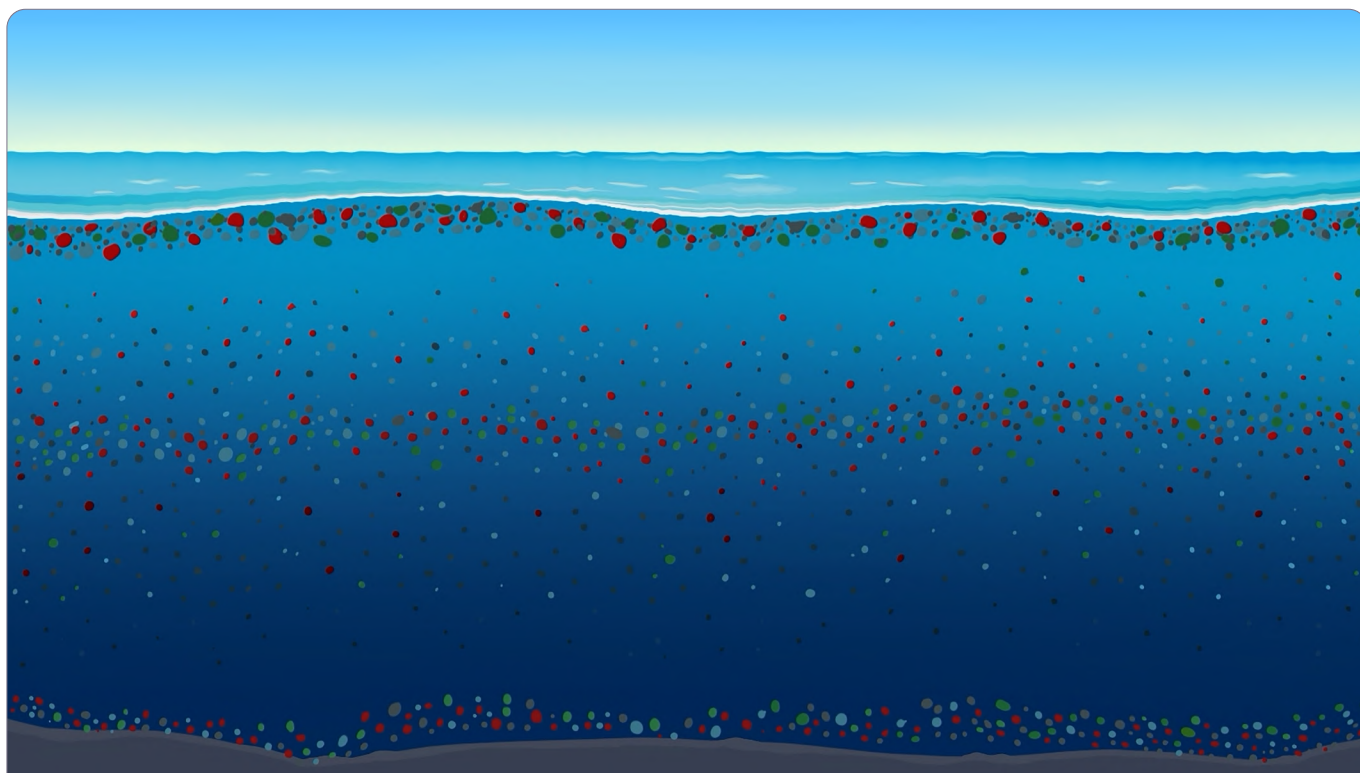


Obrázek 10 Schematické znázornění nedokonalých analytických metod zachycování mikro- a nanoplastů

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>



Obrázek 11 Schematické znázornění povrchové a spodní vrstvy znečištění mikro- a nanoplasty

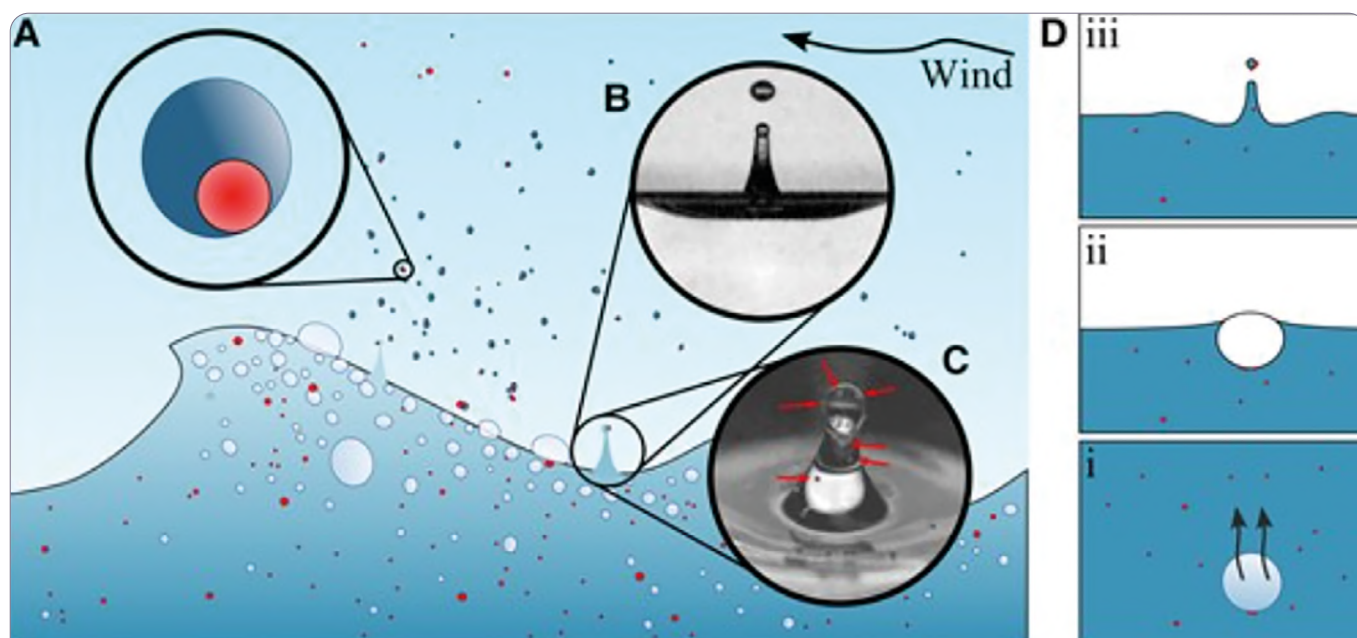


Obrázek 12 Schematické znázornění rozložení mikro- a nanoplastů v povrchové vrstvě, spodní vrstvě a v oblasti termokliny

Kromě povrchové a spodní vrstvy znečištění (obr. 11) výrazně narůstá koncentrace mikro- a nanoplastů také v oblasti termokliny²⁹ (obr. 12) – vrstvy vody, ve které dochází k prudké změně teploty. Vysoký gradient hustoty v této vrstvě způsobuje, že se částice mikro- a nanoplastů v těchto zónách zachytávají a zůstávají zde po dlouhou dobu. Oceán si lze představit jako vrstvený dort, kde každá vrstva má jedinečnou teplotu a hustotu a mikroplasty se hromadí na rozhraních mezi těmito vrstvami.

Kromě toho se mikroplasty v oceánu šíří také prostřednictvím živých organismů, které je pohlcují, tráví a následně vylučují³⁰.

Šíření MNP v životním prostředí



Obrázek 13 Znázornění příslušných procesů uvolňování mikroplastů z oceánu.

A) Mikroplasty (červený / tmavší odstín) jsou z oceánu přenášeny do atmosféry kapkami mořské vody. B) Praskající bubliny vytvářejí drobné kapky nebo aerosoly, například tryskové (jet) kapky. C) Mikroplasty přítomné v kapalině mohou být unášeny vznikajícími tryskovými kapkami. Šipky ukazují na mikroplastové částice o velikosti 100 μm . Vzniklé kapky mohou být unášeny větrem a přenášet mikroplastový materiál do atmosféry. Kapalina se nakonec odpaří a zanechá mikroplastové částice. D) Příslušné fyzikální procesy spojené s uvolňováním mikroplastů při praskání bublin začínají zachycením částic během stoupání bubliny (Di). Po dosažení hladiny (Dii) bublina nakonec zaujme svůj rovnovážný tvar, který po prasknutí soustřeďuje kapilární vlny u své základny, čímž vznikají tryskové kapky (Diii), jež přenášejí mikroplastový materiál.

Zdroj: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

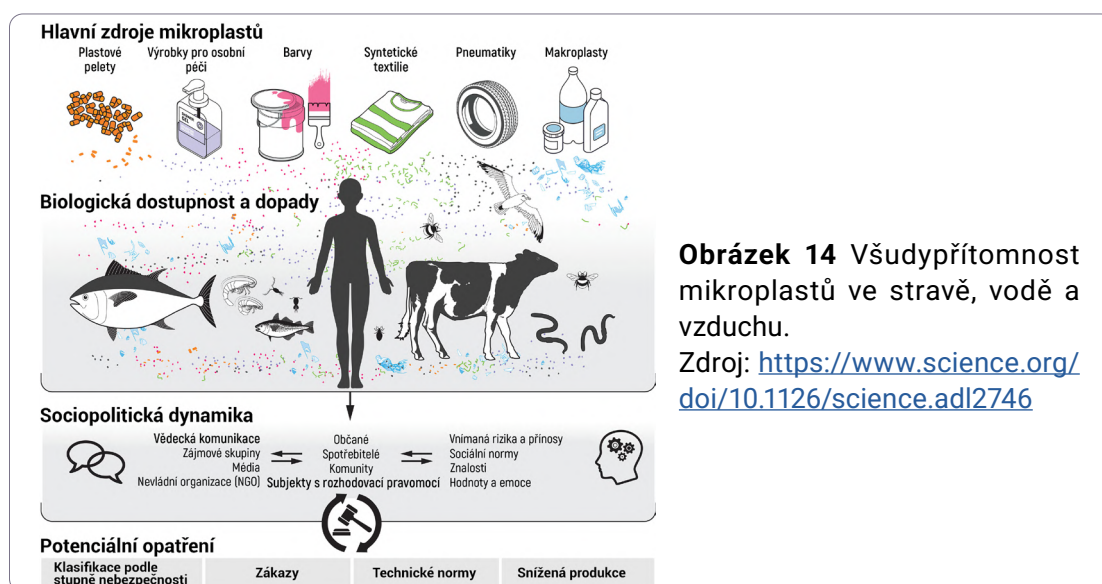
³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. Nat Commun 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Když se voda odpařuje³¹, mikroplasty stoupají z povrchu oceánu do atmosféry³². Také kombinace mořské tříště, větru a vln vytváří ve vodě vzduchové bubliny obsahující mikroplasty. Když bubliny prasknou, částice se uvolní do atmosféry (obr. 13). Každoročně je jen mořským vánkem na pobřeží přeneseno přibližně 136 tisíc tun mikroplastů³³. Až 25 milionů tun mikro- a nanoplastů ročně je přenášeno tisíce kilometrů mořským vzduchem, vodní tříští, sněhem a mlhou – přes státy, kontinenty i oceány.



„Vzduch je mnohem dynamičtějším prostředím než voda. V důsledku toho se mikro- a nanoplasty mohou mnohem rychleji dostat do nejvzdálenějších oblastí naší planety, které jsou dosud do značné míry nedotčené,“ říká doktorka Melanie Bergmann, biologka z Institutu Alfreda Wegenera v Německu. Jakmile se tam částice dostanou, mohou ovlivnit povrchové klima i zdraví místních ekosystémů³⁴.

Mikroplasty byly nalezeny na různých místech – od mořské hladiny po hlubokomořské sedimenty, od zemědělské půdy až po naše nejvyšší hory a také v mořském ledu, jezerech a řekách. Byly zjištěny u 1300 vodních i suchozemských druhů – od bezobratlých stojících na počátku potravního řetězce až po vrcholové predátory – s doloženými účinky na všech úrovních biologické organizace, od buněčné po ekosystémovou. Mikroplasty jsou široce rozšířené v potravě, kterou jíme, ve vodě, kterou pijeme, i ve vzduchu, který dýcháme (obr. 14). Byly nalezeny v mnoha lidských tkáních a orgánech a objevují se důkazy o jejich negativním působení³⁵.



Obrázek 14 Všudypřítomnost mikroplastů ve stravě, vodě a vzduchu.

Zdroj: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html>

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Přesun mikroplastů do odlehlých, a dokonce i polárních oblastí, může být tedy způsoben kombinací atmosférického a mořského přenosu. Je proto důležité porozumět interakci mezi atmosférou a oceánem, abychom zjistili, jaké velikosti částic se přenášejí a v jakém množství.

Například nedávno objevila skupina vědců v oblacích na vrcholcích hor v Japonsku plastové částice s hydrofilním (vodu přitahujícím) povrchem³⁶. Následnou analýzou vzorků dospěli k závěru, že nízko položené a hustší oblaky obsahují větší množství mikroplastů. Přítomnost polymerů jako kondenzačních jader **hraje klíčovou roli v rychlé tvorbě oblaků**, což nakonec může ovlivnit celkové klima³⁶.

Plastové částice v oblacích napomáhají zadržování většího množství vody, což zpomaluje srážky. Když však déšť začne, bývá intenzivnější, protože se v oblacích mezitím stihne nahromadit více vody. Kromě toho mají mikroplasty vystavené ultrafialovému záření a filtrované vodě z mraků drsnější povrch, což podporuje hromadění většího množství olova, rtuti a skupin obsahujících kyslík³⁷ na jejich povrchu.

Atmosféra přenáší především drobné částice mikroplastů, což z ní činí mnohem rychlejší transportní cestu, která může vést k významnému usazování v širokém spektru ekosystémů. Výzkumná data ukazují, že lesy fungují jako bariéry pro mikroplasty unášené větrem. Listy, větve a kmeny zachycují mikroplasty, které se usazují na jejich povrchu. To vede k tomu, že částice plastu přenášené větrem a srážkami zůstávají na rostlinách nebo dopadají na půdu.

Omezené větrání pod hustým lesním porostem přispívá k trvalému hromadění těchto částic v lesních oblastech. Listy korun slouží jako dlouhodobý rezervoár pro vzdušné mikroplasty³⁸. Výzkumy ukázaly, že od podzimu 2017 do léta 2019 spadlo spolu se srážkami v 11 přírodních parcích a rezervacích na západě USA více než 1 000 tun plastových částic. Toto množství by stačilo k výrobě 120 milionů plastových lahví³⁹. Podobná situace se vyskytuje i v dalších regionech světa. Například lesy dubu pilovitého (*Quercus serrata*) v Japonsku, které pokrývají plochu přibližně 32 500 km², každoročně zachytí ve svých korunách přibližně 420 bilionů částic mikroplastů přenášených vzduchem⁴⁰.

Na rozdíl od lesů se ve městech díky lepšímu proudění vzduchu a přítomnosti těžších částic z automobilových emisí a průmyslového smogu část mikro- a nanoplastů usazuje. Dnes je vzduch v lesích více nasycen nanoplasty než ve velkoměstech.

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Svět se změnil! A dnes, když se lidé koupou v oceánu, opalují se na pláži, běhají podél pobřeží nebo v parku či se procházejí v lese s cílem zlepšit své zdraví, naopak vystavují svůj organismus dalšímu působení mikroplastů. Mikroplasty pocházející z Afriky a Severní Ameriky byly nalezeny i na odlehlých a zdánlivě nedotčených místech, jako jsou francouzské Pyreneje. To svědčí o globálním šíření mikroplastů, které jsou přenášeny vzdušnými proudy a srážkami a překonávají obrovské vzdálenosti.

Mikro- a nanoplasty se dostávají do městských vodních ploch prostřednictvím dešťové kanalizace, průmyslových emisí a dešťové vody, která zachycuje částice z atmosféry. Například při jednom praní syntetických tkanin se může do odpadních vod uvolnit až 1,5 milionu částic mikroplastů⁴¹. Tyto částice se následně dostávají do řek a oceánů, kde je polykají ryby a další vodní organismy. Analýzou odpadů nalezených v řekách a okolní krajině výzkumníci zjistili, že pouhých 10 říčních systémů přenáší 88 % až 95 % plastů, které se z řek dostávají do oceánu⁴².

V rámci jiné studie vědci přehodnotili obecně přijímané předpoklady o transportu plastů v řekách a dospěli k závěru, že skutečné množství plastového odpadu v řekách může být až o 90 % vyšší, než se dříve předpokládalo⁴³.

Plasty se navíc nacházejí i ve většině velkých jezer světa. Hustota plastového odpadu v jezerech přitom může být dokonce vyšší než v největších oceánských odpadkových skvrnách – dokonce i jezera nacházející se v nedotčených oblastech obsahují značné množství odpadu. Toto bylo potvrzeno v rámci rozsáhlého mezinárodního výzkumu vedeného Barbarou Leoni a Veronikou Nava z Univerzity Milano-Bicocca⁴⁴. Podle zprávy Programu OSN pro životní prostředí (UNEP) z roku 2021 byly mikroplasty nalezeny ve všech zkoumaných sladkovodních plochách včetně řek, jezer a přehrad⁴⁵. Například vědci zjistili, že do Velkých jezer se každoročně z území Spojených států a Kanady dostane téměř 10 000 tun – tedy asi 22 milionů liber, což odpovídá přibližně 10 milionům kilogramů – plastového odpadu⁴⁶.

Nakonec se mikroplasty vracejí k člověku při konzumaci ryb nebo mořských plodů.

Italští vědci zjistili, že ovoce a zelenina rovněž obsahují miliony částic mikroplastů. Vysoká koncentrace těchto částic byla nalezena v jablkách, hruškách, mrkvi, bramborách, hlávkovém salátu a brokolici. Přitom v ovoci byla koncentrace částic 2–3krát vyšší než v zelenině: od 52 tisíc částic na gram v salátu až po 223 tisíc v jablkách⁴⁷.

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies>

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

V rámci výzkumu bylo zjištěno, že 81 % ze 159 vzorků kohoutkové vody odebraných po celém světě obsahuje mikroplasty⁴⁸. Další studie tato zjištění potvrzují a poukazují také na přítomnost mikroplastových částic v minerální vodě. Zajímavé je, že množství částic bylo přibližně stejné jak ve skleněné, tak v polyethylentereftalátové (PET) lahvi, přičemž jejich počet dosahoval až 6 292 částic na litr^{49, 50, 51}.

Vědci z Univerzity v Newcastle (Austrálie) provedli výzkum⁵² s cílem odhadnout, kolik plastu průměrně zkonzumuje současný člověk. Výsledky ukázaly, že člověk za rok sní přibližně 250 g plastů, což odpovídá 50 plastovým taškám⁵³.

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. PLoS ONE 13, e0194970 (2018).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. Water Research 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. Water Research 141, 307–316 (2018).

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. Environmental Research 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week.

<https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

DOPADY ZNEČIŠTĚNÍ MIKROPLASTY A NANOPLASTY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A KLIMA

Jak MNP narušují ekosystémy na molekulární úrovni

Plastový odpad se nachází všude – od oceánů a řek po půdu, vzduch, a dokonce i ledovce⁵⁴. Dlouhodobá pozorování potvrzují, že na rozdíl od organických rostlinných a živočišných látek se plasty aktivně nerozkládají. Zůstávají v životním prostředí, aniž by se účastnily přirozených cyklů biologického rozkladu⁵⁵. Plast, který byl vyvinut tak, aby odolával rozkladu, se stal trvalou součástí globálního ekosystému. To, co bylo kdysi považováno za technologický triumf, se nyní stalo zdrojem významného narušení životního prostředí.

Při výrobě plastů se používá více než 13 000 chemických látek. Z nich je více než 3 200, včetně monomerů, přísad a pomocných látek, potenciálně nebezpečných kvůli svým toxickým vlastnostem⁵⁶.

Vliv MNP na vlastnosti půdy a degradaci ekosystémů

Studie ukazují, že znečištění mikroplasty v suchozemských ekosystémech, zejména v zemědělských půdách, může převyšovat úroveň v oceánském prostředí 4 až 23 krát⁵⁷, což naznačuje významnou akumulaci plastů v půdách. Plasty se do půdy dostávají různými cestami, včetně čistíren odpadních vod, mulčování, atmosférických srážek a běžných spotřebních výrobků. Rozšířené používání jednorázových plastových výrobků úzce souvisí se závažným znečištěním půdy mikroplasty (MP) a nanoplasty (NP). Přírodní i lidské faktory umožňují⁵⁸ těmto drobným plastovým částicím pronikat do půdních vrstev a narušovat tak důležité environmentální procesy⁵⁹.

Pozorování potvrzují škodlivé účinky mikroplastů na ekosystémy, které ovlivňují strukturu a funkci mikroorganismů, rostlin a půdy (obr. 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

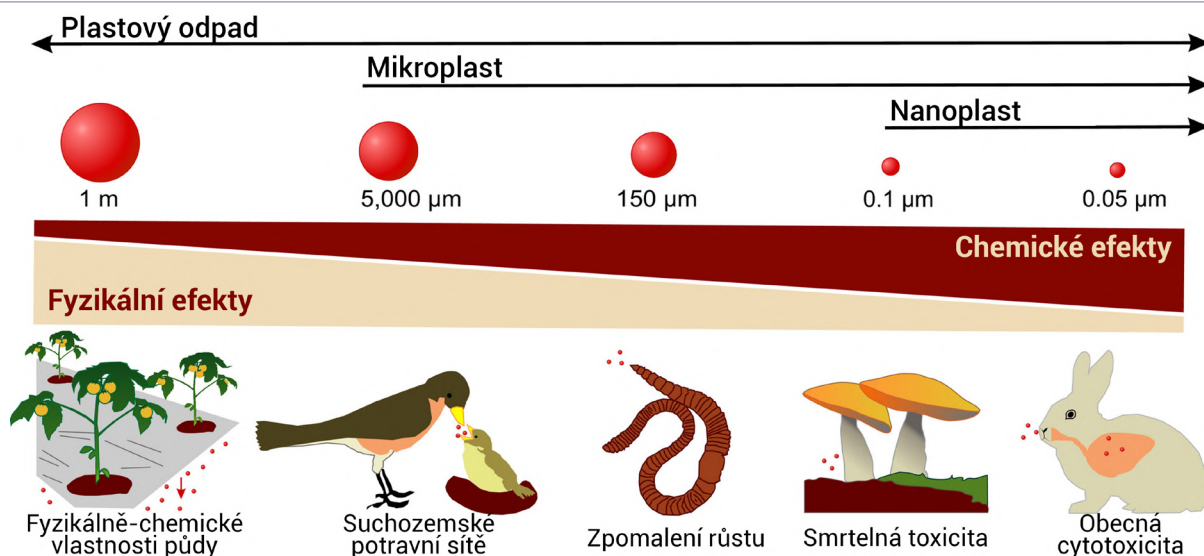
⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

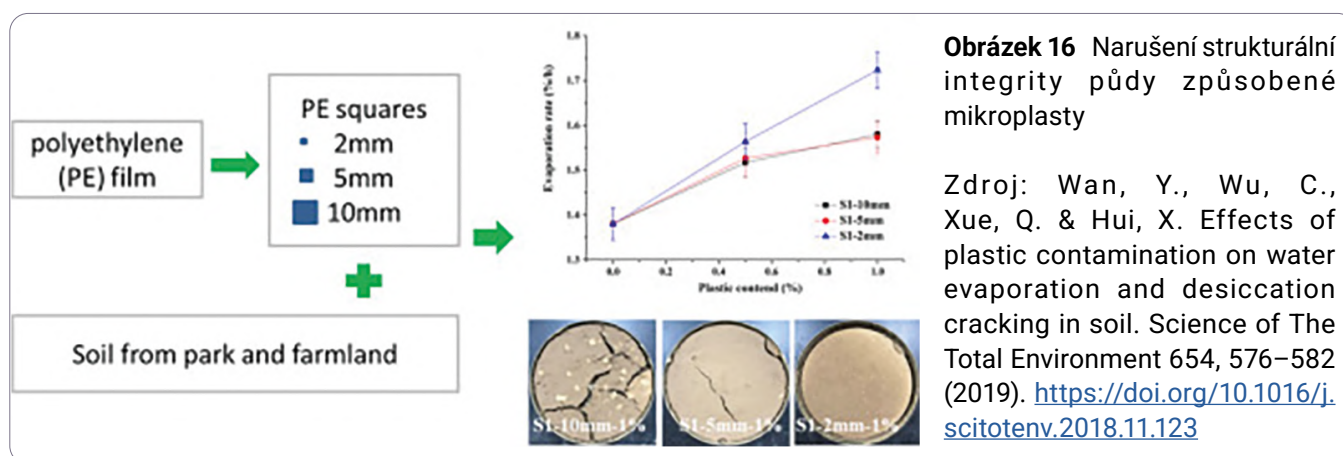


Obrázek 15 Mikroplasty jako spouštěč kombinovaných fyzikálních a chemických jevů.

Biogeochemie půdy související s mulčováním v zemědělství (Steinmetz et al., 2016), konzumací suchozemskými a kontinentálními ptáky (Gil-Delgado et al., 2017; Holland et al., 2016; Zhao et al., 2016), snížením růstu žížal (Lwanga et al., 2016), smrtelnou toxicitou pro houby (Miyazaki et al., 2014, 2015; Nomura et al., 2016), zánětem plic savců (Hamoir et al., 2003; Oberdorster, 2000; Schmid & Stoeger, 2016) a širokou cytotoxicitou nanoplastů (Forte et al., 2016; Kato et al., 2003).

Zdroj: de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

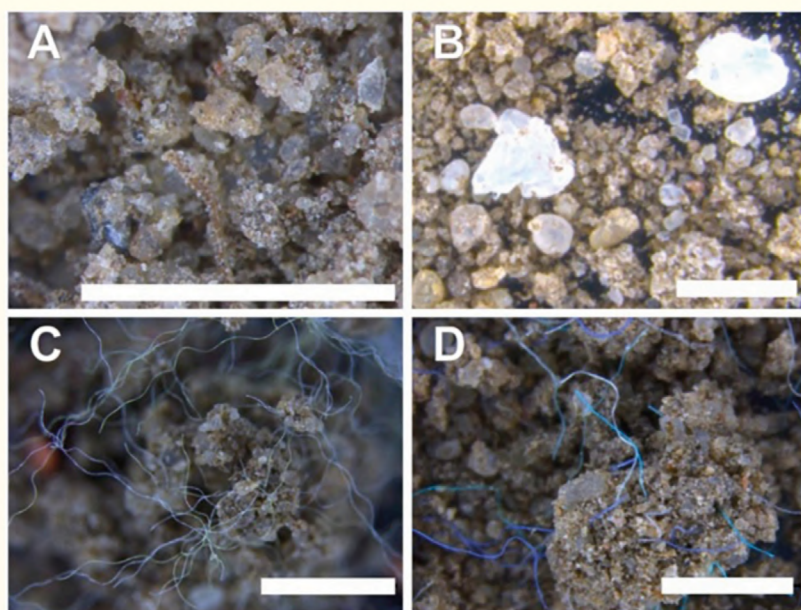
Výzkum provedený Čínskou akademií věd zjistil, že přítomnost částic plastové fólie různých velikostí v půdě významně zvyšuje rychlost odpařování vody. Tento efekt je zvláště výrazný při přidání 2mm částic. Větší plastové fragmenty (5–10 mm) způsobují praskání půdy a narušují její strukturální integritu. Tyto poznatky naznačují, že znečištění plasty narušuje vodní koloběh v půdě, což může zvětšit nedostatek vody v půdě a ovlivnit vertikální transport znečišťujících látek⁶⁰ (obr. 16–17).



Obrázek 16 Narušení strukturální integrity půdy způsobené mikroplasty

Zdroj: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>



Obrázek 17 Integrace částic mikroplastů do biofyzikálního prostředí půdy.

Struktura kontrolní půdy (A) nebyla pod stereomikroskopem vizuálně odlišitelná od půdy kontaminované polyamidovými kuličkami (SI S1D). Fragmenty polyethylenu (B) a polyesteru (C) nebo polyakrylových vláken (D) vedly k vizuálně zřetelným rysům půdy. Bílý pruh v každém poli představuje velikost 1 mm.

Zdroj: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Studie také potvrzují nepříznivé účinky plastů na půdní biotu – rozmanitou skupinu organismů, která zahrnuje mikroorganismy (například bakterie a houby) a faunu (mikroskopická i makroskopická zvířata). Tyto organismy interagují mezi sebou, s kořeny rostlin i s okolním prostředím a vytvářejí tak půdní potravní řetězce (obr. 18), které jsou nezbytné pro koloběh živin a zdraví rostlin.

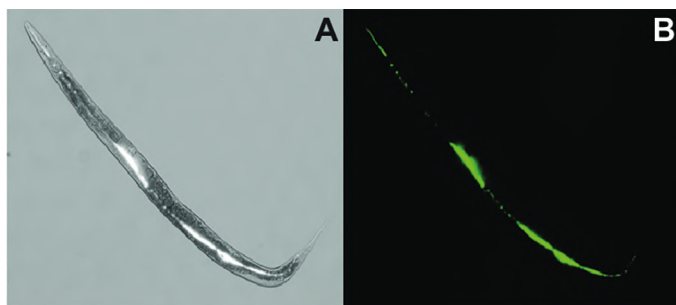


Obrázek 18 Schematické znázornění formování potravního řetězce v půdě.

Zdroj: Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Různé druhy suchozemské bioty slouží jako bioindikátory znečištění mikroplasty. Všechny analyzované vzorky obsahovaly částice mikroplastů a potenciálně toxické prvky (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) v různých koncentracích, což naznačuje⁶¹ možnou toxicitu mikroplastů⁶².

Výzkumy ukázaly, že polystyrenové kuličky mohou být pohlceny půdním hlístem *Caenorhabditis elegans* (obr. 19); to také naznačuje, že polystyrenové částice se mohou hromadit v potravním řetězci půdy⁶³.



Obrázek 19 Snímky ve světlém poli (A) a fluorescenční snímky (B) dospělého červa *Caenorhabditis elegans*, který akumuloval 0,5 µm mikročástice se žlutozelenou fluorescencí po dobu 15 minut při teplotě 20 °C. Fotografie byly pořízeny při 100násobném zvětšení.

Zdroj: Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Půdní biota je více než jen „biologický motor Země“. Je to multifunkční systém, na kterém závisí všechny suchozemské ekosystémy. Její role v udržování života na planetě je srovnatelná s rolí oceánů a atmosféry, jak potvrzují výzkumy v oblasti pedologie, ekologie a klimatologie. Jakékoli narušení způsobené toxicitou může proto mít dopad na řadu kritických procesů v půdě a jejím potravním řetězci, což může vést k ekologické nerovnováze⁶⁴.

Výsledky ukazují, že mikroplasty se díky své malé velikosti, vysokému měrnému povrchu, silné hydrofobicitě a odolnosti vůči biologickému rozkladu mohou rychle adsorbovat na povrch půdy⁶⁵. Tyto vlastnosti usnadňují jejich vstřebávání a hromadění v organismech, což představuje potenciální hrozbu pro lidské zdraví. Tento proces se neomezuje pouze na půdní vrstvu, ale zasahuje i do rostlin, kde pokračuje ve svých škodlivých účincích.

MNP v potravinových výrobcích

Antropogenní znečišťující látky mohou mít významný vliv na ekosystémy, zejména pokud se dostanou do rostlinných systémů. Bylo potvrzeno, že mikroplasty jsou absorbovány a přenášeny do různých částí rostlin.

⁶¹Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

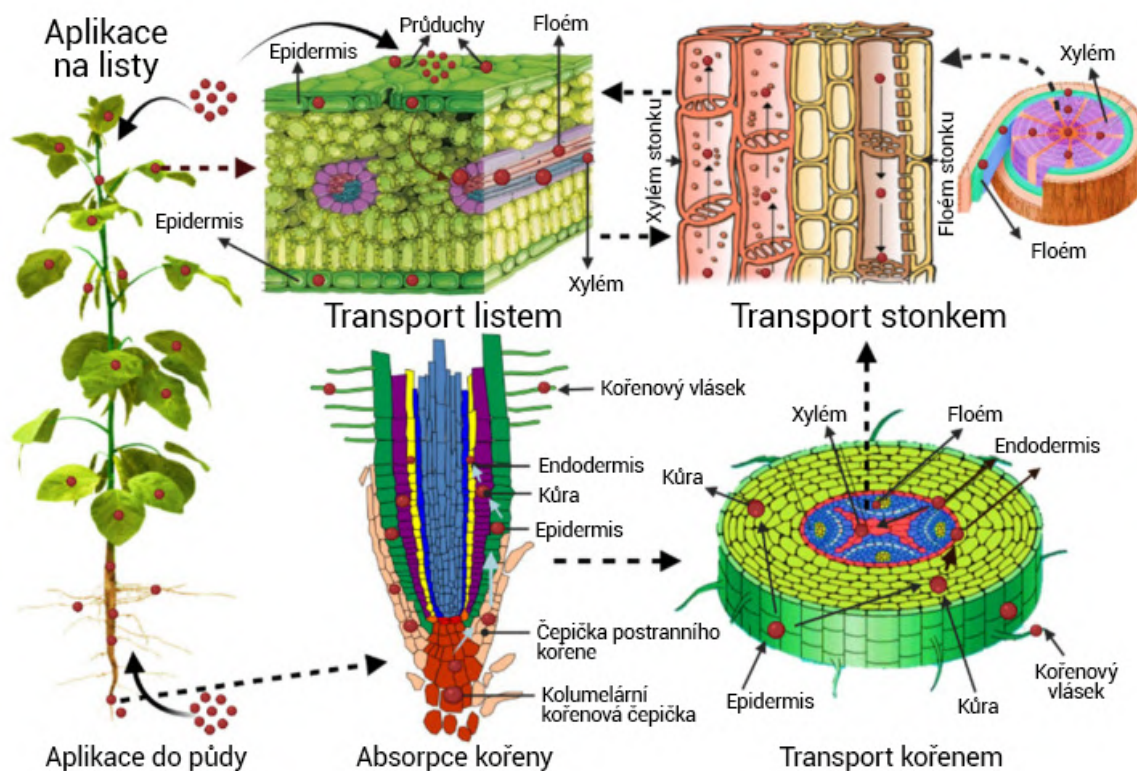
⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Výzkumy ukazují, že mikroplasty se v rostlinných systémech hromadí několika způsoby a mají škodlivé účinky na vegetaci, zemědělské plodiny a potravinové výrobky.

Díky své extrémně malé velikosti mohou nanoplasty pronikat přímo do rostlinných tkání⁶⁶. Rostliny absorbují nanoplasty z živného prostředí, poté jsou přenášeny do nadzemních částí rostliny prostřednictvím xylému – cévního systému odpovědného za transport vody a živin z kořenů do stonků a listů.

Mikroplasty, které se usazují na listech, mohou pronikat přes průduchy a poté se přes cévní svazky dostávat dolů ke kořenům. Jak mikroplasty, tak nanoplasty mají toxické účinky na fyziologické procesy a enzymatickou aktivitu zemědělských rostlin⁶⁷ (obr. 20).



Obrázek 20 Mechanismy absorpce mikroplastů a nanoplastů v rostlinách.

Mechanismus, jakým rostliny pohlcují plasty, pokud se dostanou do půdy („Aplikace do půdy“ na obrázku), prostřednictvím absorpce kořeny a transportních cest z kořenů do stonků a ze stonků do listů a plodů. Část „Aplikace na listy“ na obrázku ukazuje pronikání plasty do průduchů listů a následný přenos do dalších částí rostliny. Plná šipka označuje dostupnost plasty pro rostlinu a přerušovaná šipka označuje transport v rámci rostliny.

Zdroj: Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Transportní systém vody v rostlinách dokáže rychle přenášet nanoplasty do stonků, listů a pravděpodobně i do plodů. Podle údajů získaných při výzkumu rostlin tabáku (*Nicotiana tabacum*) částice nanoplastů o velikosti 100 nm nepronikají do rostlinných buněk, zatímco částice o velikosti 20 až 40 nm jsou úspěšně absorbovány⁶⁸.

Některé plastové částice navíc nesou vlastní náboj, což může zvyšovat jejich adsorpci v kořenech rostlin díky elektrostatické přitažlivosti, a tím ovlivňovat imobilizaci živin nebo procesy fotosyntézy⁶⁹. Negativně nabité mikroplasty s větší pravděpodobností pronikají do kůry kořene⁷⁰.

V agroekosystémech silně znečištěných plastovými částicemi je pozorováno zpomalení růstu a vývoje rostlin⁷¹, stejně jako krátkodobý a přechodný vliv na rychlost klíčení a vývoj kořenů⁷².

Výzkumy potvrzují přítomnost mikroplastů v komerčně dostupném medu vyrobeném jak průmyslově, tak lokálně. Následná analýza odhalila široké rozšíření mikroplastů v květenstvích různých druhů rostlin^{73,74}.

V posledních letech došlo k prudkému zhoršení stavu populace včel po celém světě. Výzkumy naznačují, že jednou z podceňovaných příčin tohoto jevu může být znečištění životního prostředí mikroplasty (MP) a nanoplasty (NP). Bylo zjištěno, že včely „sbírají“ mikroplasty ze vzduchu, vody, rostlin i půdy a následně je přinášejí do úlu. Včely sbírají nektar a pyl z rostlin a vodu z přírodních zdrojů – a všechny tyto složky dnes již obsahují mikroplasty. Chloupky na těle včel fungují jako „pasti“ pro plastové částice. Plastové částice se také hromadí na jejich nožkách, zejména v ohybech a mezi články, když přicházejí do kontaktu s povrchem rostlin, půdou, vodou, a dokonce i samotným úlem.



„Včela medonosná je velmi dobrým biologickým indikátorem znečištění životního prostředí, protože je rozšířená téměř všude, její tělo je pokryto chloupky zachytávajícími nečistoty a částice přítomné ve vzduchu, je citlivá na znečišťující látky, velmi pohyblivá a má mimo jiné široký letový rádius⁷⁵.“

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11122935>

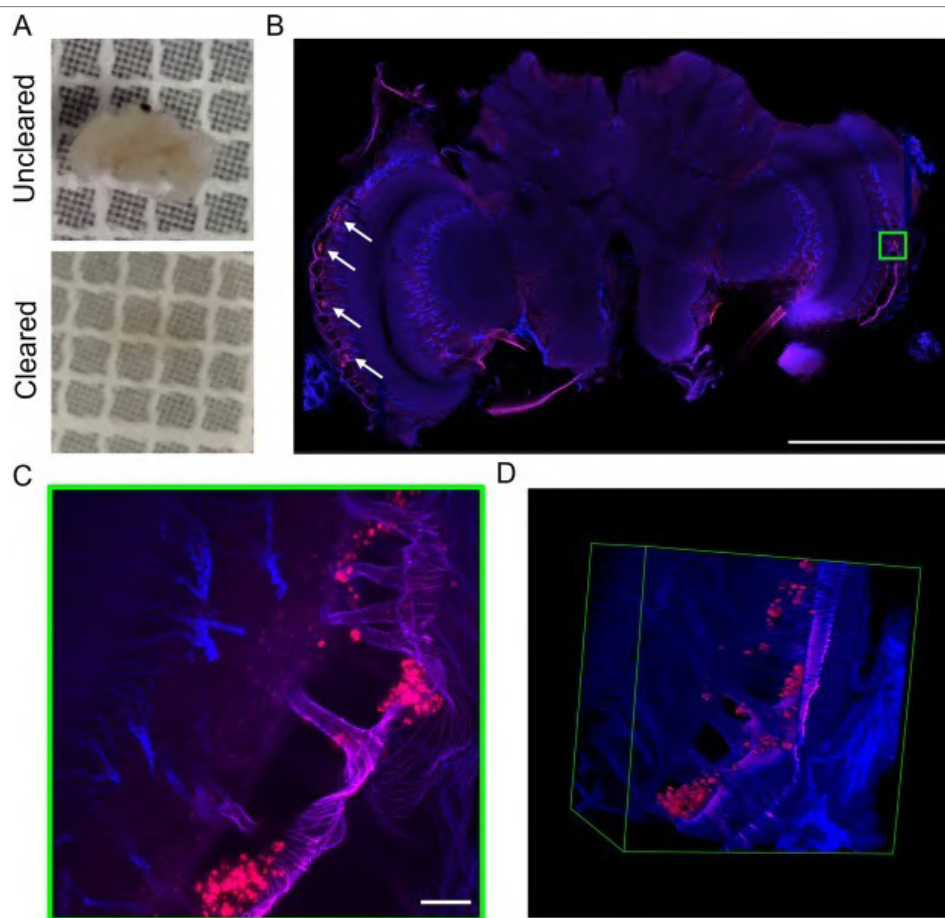
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013 <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Do těla včely pronikají mikro- a nanoplasty také skrz kutikulu (vnější ochranný obal těla). Po vstupu do těla se plastové částice dostávají do mozku včely již během tří dnů, kde způsobují poruchy paměti, orientace a kognitivních funkcí, které jsou klíčové pro vyhledávání potravy a navigaci⁷⁶. Vliv mikroplastů na mozek navíc snižuje schopnost obnovy paměti. To je kritické, protože včely se orientují podle známých orientačních bodů v prostoru. Nanoplasty v mozku včel také způsobují ztrátu schopnosti zapamatovat si, kde se nacházejí zdroje nektaru, zhoršují jejich reakce na vůně květin a včely se častěji ztrácejí na cestě zpět do úlu. Takové kognitivní poruchy přímo snižují účinnost opylování a mohou vést k destabilizaci celé kolonie⁷⁶.



Obrázek 21 Detekce významného množství mikroplastů v mozku včely medonosné.

A) Fotografie preparovaného mozku před a po zprůhlednění metodou iDISCO.

B) Jednotlivý optický řez (hloubka $\sim 200\ \mu\text{m}$) 3D rekonstrukce celého mozku získaný pomocí dvoufotonové fluorescenční mikroskopie s objektivem 10 $\times$; rozlišení – $0,51 \times 0,51 \times 2\ \mu\text{m}^3$. Modrá barva značí autofluorescenci tkáně, červená barva značí mikroplasty s červenou fluorescencí (označeno bílými šipkami). Měřítko: $1000\ \mu\text{m}$.

C) Výřez ve vysokém rozlišení ze zeleně označené oblasti na obrázku B, pořízený objektivem 63 $\times$. Snímek představuje projekci maximální intenzity z vrstvené série o hloubce $150\ \mu\text{m}$ s rozlišením $0,17 \times 0,17 \times 1\ \mu\text{m}^3$. Měřítko: $20\ \mu\text{m}$.

D) 3D vizualizace vrstvené série uvedené v C. Rozměry: $170 \times 170 \times 150\ \mu\text{m}^3$.

Zdroj: Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

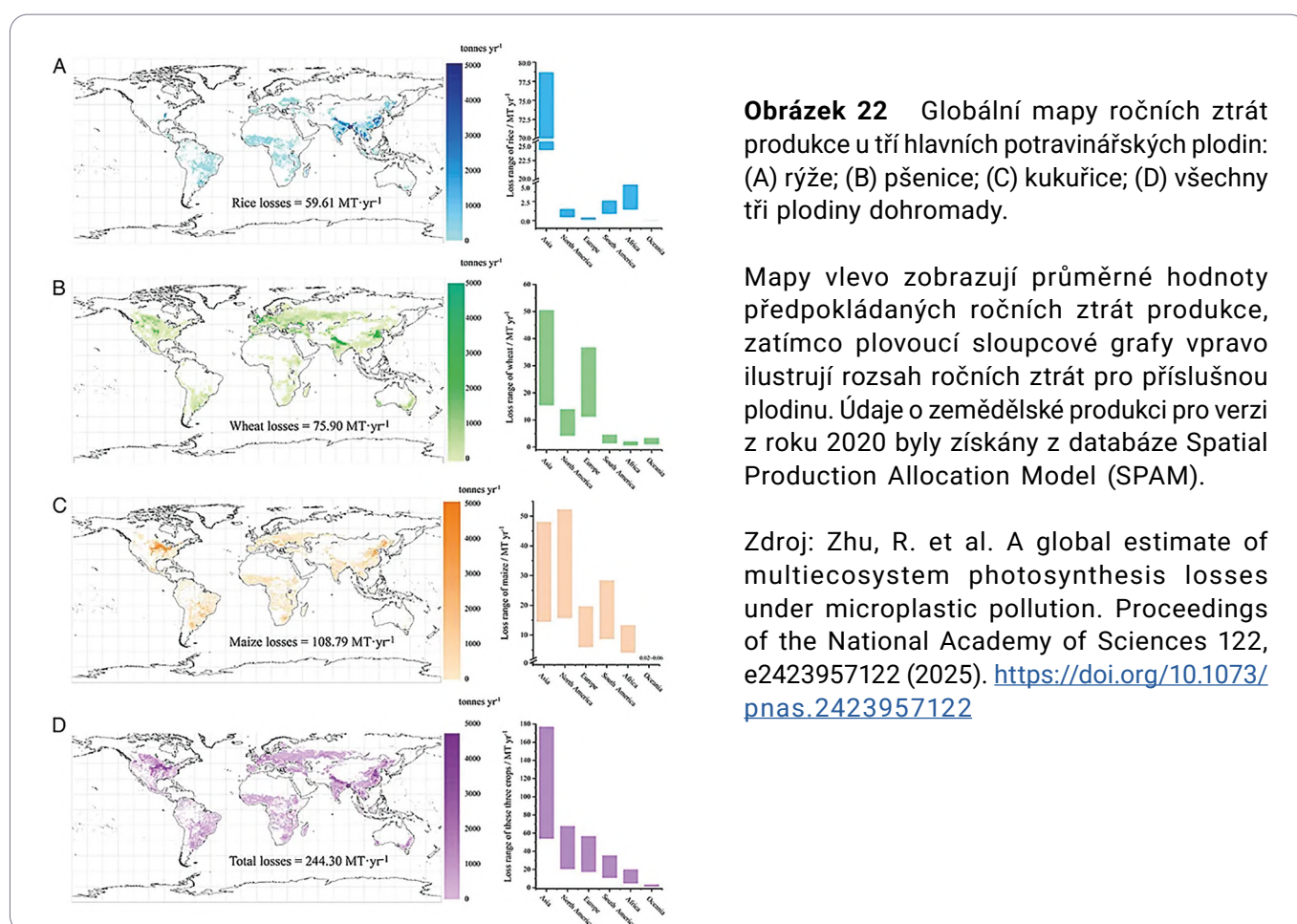
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Po proniknutí do těla včely způsobují nanoplasty rovněž poškození střev, oslabení imunitního systému a zvyšují náchylnost k virovým infekcím, což může vést k úhynu včel, a to i bez akutní toxicity plastu^{75,77}. Kromě toho se plastové částice hromadí nejen ve včelách, ale také v medu, vosku a larvách, čímž vzniká uzavřený cyklus plastového znečištění uvnitř úlu⁷⁵.

To může mít potenciálně vážné důsledky nejen pro včely, ale i pro potravinovou bezpečnost. Včely jsou klíčovými opylovači a jejich oslabení má přímý dopad na výnosy zemědělských plodin.

Poškození mozku, úbytek tělesné hmotnosti a oslabení imunity vedou ke snížení opylovací aktivity, což podle varování vědců může dále prohloubit krizi globální produkce potravin⁷⁷. Včely fungují jako aktivní bioindikátory znečištění a už nyní byly mikroplasty ve významném množství nalezeny v medu bez ohledu na zemi původu⁷⁸.

Působení mikroplastů snižuje celkový obsah chlorofylu o 5,63-17,42 %, což vede ke globálním ztrátám v produkci rýže, pšenice a kukuřice. Tyto ztráty představují 4,11-13,52 % celkového ročního celosvětového výnosu těchto plodin, což má závažné důsledky pro potravinovou bezpečnost⁷⁹ (obr. 22).



⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁸Al Nagggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Lesy jako zásobárny MNP

Analýza odhalila přítomnost nanoplastů v kořenech, stoncích, listech i jehličích ve všech zkoumaných koncentracích a časových intervalech. Koncentrace nanoplastů v kořenech byly nejméně desetkrát vyšší než v nadzemních částech rostlin.

Plastové znečištění negativně ovlivňuje fungování jak jehličnatých stromů, tak listnatých druhů stromů tím, že vyvolává oxidační stres a snižuje účinnost fotosyntézy, což může vést ke zpomalení růstu nebo dokonce k odumírání rostlin.

Výzkumy ukazují, že narušení různých fází fotosyntézy vede k hromadění přebytečné světelné energie, která – pokud se nepřemění na chemickou – způsobuje fotooxidační stres a poškození rostlinných pletiv. Na svou ochranu rostliny aktivují fotoprotektivní mechanismy, při nichž karotenoidy rozptylují přebytečnou energii ve formě tepla⁸⁰.

Znečištění plastem, které zhoršuje fotosyntézu, vyvolává oxidační stres a snižuje fyziologickou aktivitu rostlin, zvyšuje zranitelnost ekosystému vůči změně klimatu. Tato zjištění potvrzují rozsáhlý dopad znečištění plasty na rostlinná společenstva a následně vyvolávají obavy z jeho důsledků pro suchozemské živočichy, kteří jsou na těchto ekosystémech závislí.

Jak nanoplasty ničí faunu

Údaje z mnoha výzkumů ukazují, že hromadění mikro- a nanoplastů v životním prostředí včetně rostlin ovlivňuje rozvoj živočišné výroby⁸¹, zasahuje potravní řetězce a zdraví zvířat. Pozorování na mléčné farmě v Itálii ukázala, že všechny vzorky sena z jílku obsahovaly mikroplasty⁸². Výzkum v Indii odhalil znečištění mikroplasty z polyethylentereftalátu ve 100 % vzorků krmiva pro dojnice, přičemž koncentrace se pohybovala v rozmezí od 88-326 mg/kg⁸³.

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Analýza potvrdila přítomnost mikroplastů ve folikulární tekutině skotu⁸⁴, v mléce⁸⁵, ovčím trusu⁸⁶, hovězím masu a krvi⁸⁷, což poukazuje na výrazné zatížení přežvýkavců. Podle údajů tvoří plastové materiály 50–60 % cizorodých těles nalezených u poraženého skotu⁸⁸ včetně drobných přežvýkavců, jako jsou kozy a ovce. Mikroplasty byly rovněž zjištěny ve vnitřních tkáních městských psů a koček⁸⁹, ve střevech domácích kachen⁹⁰ a v plicní tkáni prasat⁹¹.

Výzkumy potvrzují, že mikroplasty škodí zvířatům nejen samy o sobě, ale i prostřednictvím aditiv používaných při jejich výrobě a znečišťujících látek, které absorbují z okolního prostředí, přičemž způsobují poškození různého rozsahu⁹². Pozorování ukazují, že mikroplasty u zvířat vyvolávají toxické účinky včetně oxidačního stresu, poškození střev, imunitní toxicity, ale také reprodukční toxicity a neurotoxicity⁹³ (obr. 23). Navíc mikroplasty slouží jako nosiče pro znečišťující látky, jako jsou těžké kovy, antibiotika, perzistentní organické sloučeniny a pesticidy, což dále zvyšuje potenciální rizika pro ekosystémy, zdraví zvířat i lidí⁹⁴.

⁸⁴Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOU.PDF>

⁸⁸Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

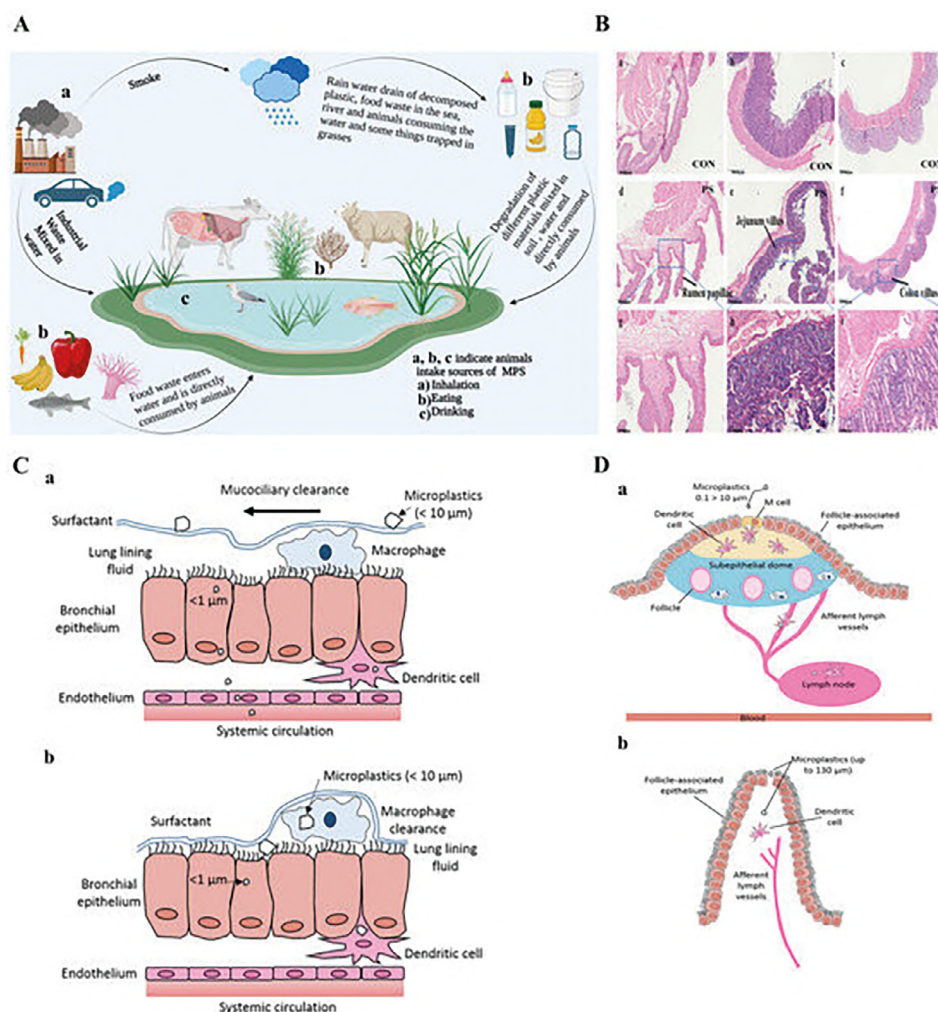
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>



Obrázek 23 Schematické znázornění vstupu mikroplastů do organismu zvířat a jejich účinku na trávicí trakt.

(A) Cesty vstupu mikroplastů (MP) do organismu zvířat.

(B) Stav trávicího traktu při působení částic polystyrenu (PS) před expozicí a po ní:

Obrázky obarvené hematoxylinem a eozinem (H&E) – bachor (a), lačník (b) a tračník (c) v kontrolní skupině (CON)

(d) H&E-obraz bachoru skupiny s částicemi polystyrenu malých rozměrů (S-PS).

(e) H&E-obraz lačníku skupiny s částicemi polystyrenu velkých rozměrů (L-PS).

(f) H&E-obraz tračníku skupiny s částicemi polystyrenu velkých rozměrů (L-PS).

(g–i) Lokálně zvětšené obrazy odpovídající (d–f).

(C) Potenciální mechanismy vstřebávání a vylučování mikroplastů (ve velikosti 0,1 až 10 μm) v plicích.

(a) V horních dýchacích cestách (centrální část plic), kde je plicní membrána silnější, snižují plicní tekutiny (surfaktant a hlen) pravděpodobnost přemístění mikroplastů. Částice větší než 1 μm jsou odstraňovány řasinkovým slizničním epitelem. Částice menší než 1 μm mohou být absorbovány epitelem.

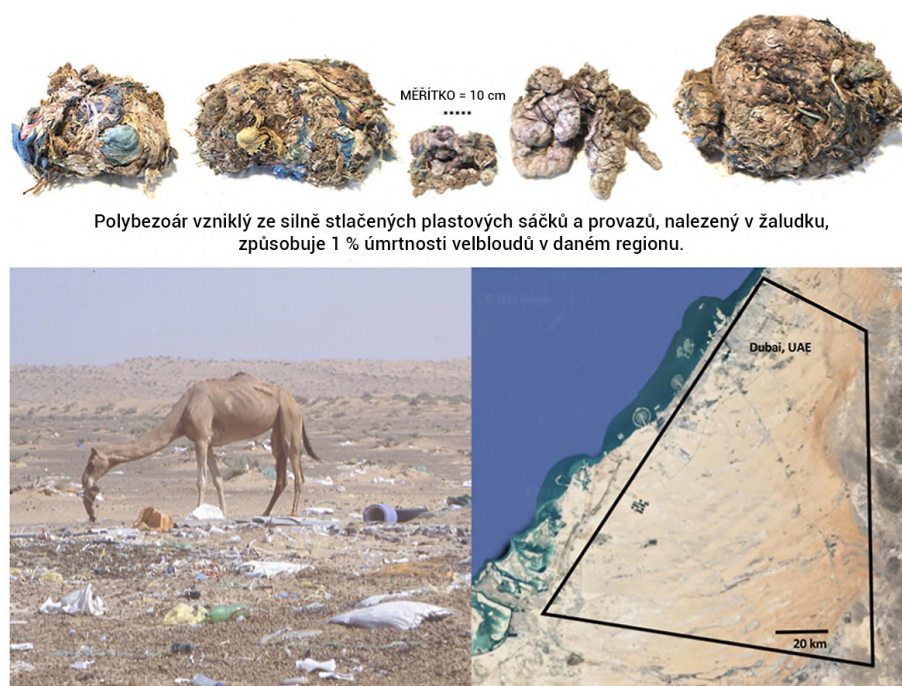
(b) Pokud aerodynamický průměr mikroplastových částic umožňuje jejich usazení hluboko v plicích, mohou proniknout přes tenčí vrstvu plicní tekutiny a dostat se do kontaktu s epitelem, odkud se dále šíří difúzí nebo aktivním vstřebáváním buňkami.

(D) Předpokládané cesty vstřebávání mikroplastů z gastrointestinálního traktu (GIT):

(a) Absorpce mikroplastů (o velikosti 0,1 až 10 μm) z lumenu gastrointestinálního traktu přes M buňky Peyerových sběrných lymfatických uzlin prostřednictvím endocytózy. M buňky odebírají vzorky a transportují částice ze střevního lumenu do slizniční lymfoidní tkáně.

(b) Mikroplasty jsou vstřebávány z lumen trávicího traktu paracelulární absorpcí. Nedegradovatelné částice, jako jsou mikroplasty, se mohou mechanicky vklínit do podkladových tkání skrze oslabená spojení v jednovrstevném epitelu. Dendritické buňky jsou schopny tyto částice zachytit a transportovat je do lymfatických cév a žil, které se nacházejí níže. Částice se poté mohou rozšířit do sekundárních tkání, včetně jater, svalů a mozku.

Pozorování ukazují, že divoká zvířata si plastový odpad často mylně pletou s potravou. To vede k jeho hromadění ve střevech. V Zimbabwe⁹⁵ a na Srí Lance⁹⁶ sloni, kteří se živil na otevřené skládce, uhynuli kvůli nestravitelnému plasty. V japonském parku Nara umírali divocí jeleni na komplikace způsobené polykáním plastového odpadu ponechaného turisty⁹⁷. Studie více než 30 000 velbloudů v blízkosti Dubaje ve Spojených arabských emirátech odhalila, že přibližně 1 % zvířat pravděpodobně uhynulo v důsledku plasty nahromaděného v jejich trávicím traktu⁹⁸. Vědci zavedli termín „polybezoár“ k popisu husté masy nestravitelných materiálů, jako je plast, provazy, odpadky a solné usazeniny, která vytváří kameni podobný konkrement v žaludku nebo střevech, zejména u přežvýkavců. Termín spojuje „poly“ (syntetická látka) a „bezoár“ (kamenné těleso). Pozorování potvrzují, že polybezoáry způsobují ucpání gastrointestinálního traktu, sepsi v důsledku růstu bakterií, dehydrataci a podvýživu (obr. 24).



Obrázek 24 Polibezoáry nalezené uvnitř mrtvých velbloudů v poušti nedaleko Dubaje. Největší z analyzovaných exemplářů v rámci nové studie vážil téměř 64 kg (141 liber).

Zdroj: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps>

⁹⁷Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags>

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Přenos MNP potravním řetězcem - od planktonu k člověku

Hromadění plastů v oceánech má významný negativní dopad na mořské ekosystémy. Vědecká pozorování za poslední čtyři desetiletí odhalila přítomnost mikroplastů téměř ve všech mořských biotopech po celém světě⁹⁹. Výzkumy potvrzují, že plastový odpad ohrožuje mořskou biodiverzitu a postihuje nejméně 690 mořských druhů včetně kytovců, ploutvonožců, mořských ptáků, želv, ryb a koryšů¹⁰⁰. Při požití plastů jsou zvířata vystavena působení dalších toxinů. Chemické látky z plastů se po požití uvolňují do organismu a přenášejí se potravním řetězcem od kořisti k predátorovi. Důsledky uváznutí nebo požití se pohybují od subletálních po smrtelné, způsobují poruchy příjmu potravy, problémy s trávením, podvýživu, nemoci, snížení reprodukční schopnosti, zpomalení růstu a zkrácení délky života¹⁰¹. Vzhledem ke své malé velikosti jsou mikroplasty pohlcovány planktonem, který je klíčovým článkem mořských potravních řetězců. Plankton je konzumován mnoha mořskými druhy a ty, které se jím přímo neživí, pohlcují organismy, které jej již pozřely. Tímto způsobem se mikroplasty stávají součástí potravních řetězců (obr. 25–26).

Analýza vzorků povrchové vody v Severním tichomořském subtropickém gyru z roku 1999 odhalila, že hmotnost plastů šestkrát přesáhla hmotnost zooplanktonu – primárního zdroje potravy ekosystému¹⁰², což zdůrazňuje převahu plastů nad živými organismy v oceánu.

Odhady založené na údajích z pozorování naznačují, že koncentrace mikroplastů roste s velikostí ryb. Data ukazují, že největší zvíře – velryba – přijímá denně až 43,6 kg plastů, přičemž 98,5 % tohoto objemu pochází z kořisti, nikoli přímo z vody, protože mikroplasty jsou již přítomny v potravě, kterou konzumuje¹⁰³.

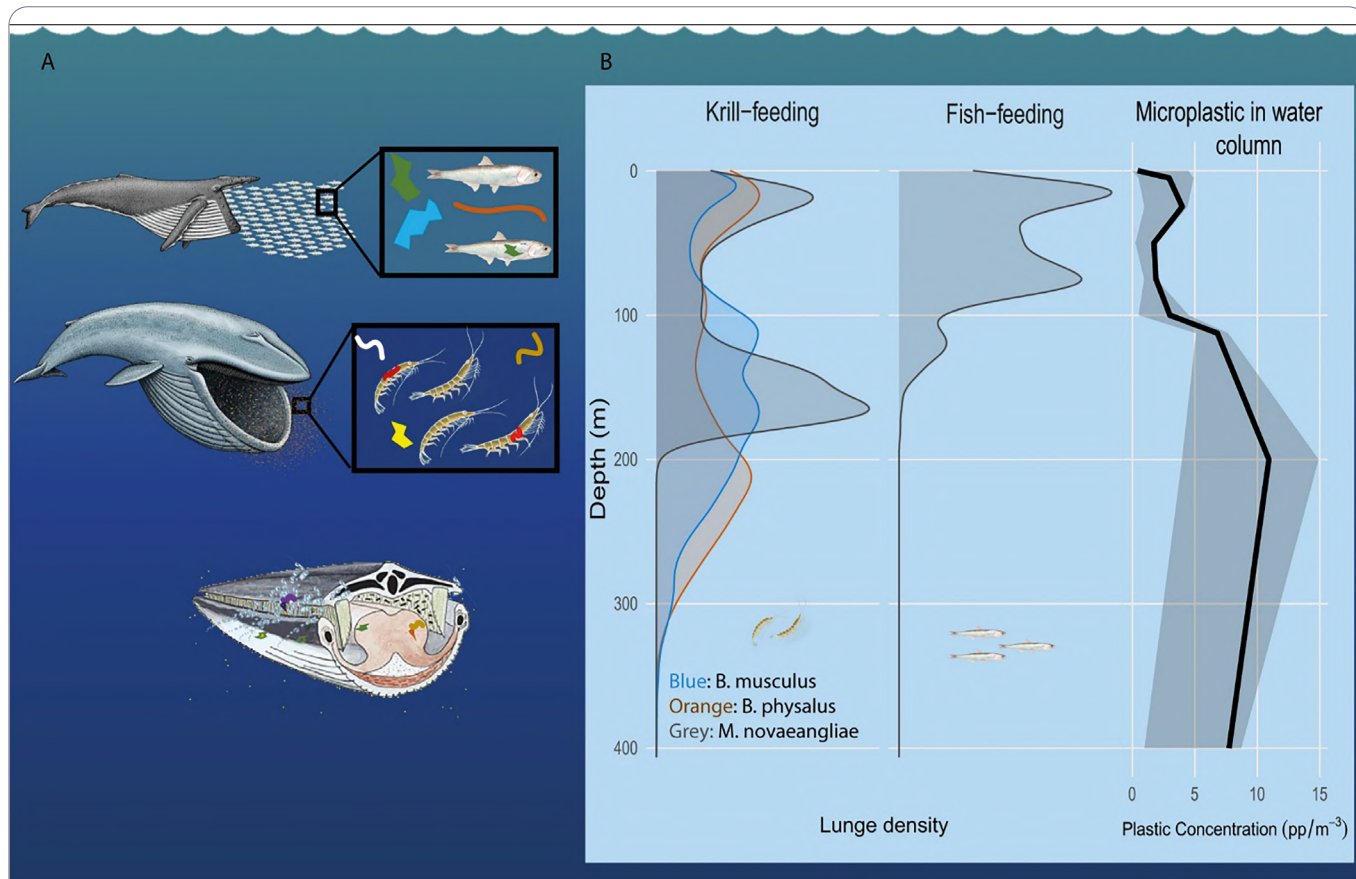
⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf>

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



Obrázek 25 Hloubka krmení plejtvákovitých velryb ve srovnání s koncentrací mikroplastů ve vodním sloupci.

a – Plasty pozřené velrybami za den, modelované jako součet (i) plastů odfiltrovaných z vody za den a (ii) plastů zkonsumovaných v kořisti za den. Vytvořili jsme tři scénáře, abychom zachytili rozsah možného rizika expozice při požití plastů: nízký, střední a vysoký, protože u některých proměnných chybí komplexní údaje; b - Hloubka ponoru při nasazení v Monterey Bay odpovídala hloubkovému profilu koncentrace plastů v Monterey Bay. Velryby a jejich kořist ilustroval Alex Boersma a schéma filtrace v řezu ilustroval Scott Landry z Centra pro pobřežní studia. Zdrojová data byla poskytnuta ve formě datového souboru.

Zdroj: Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

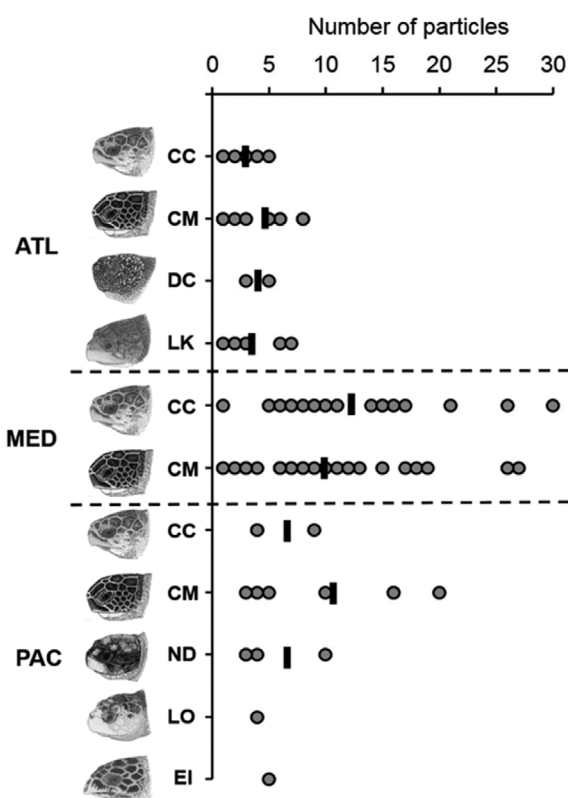


Obrázek 26 Schematické znázornění pronikání plastů do potravinových řetězců

Plast zabíjí mořské organismy

Každoročně v důsledku znečištění umírá přibližně 1 milion mořských ptáků a 100 000 mořských savců¹⁰⁴. Pozorování potvrzují souvislost mezi požitým odpadem a úmrtností mořských ptáků. Výzkum 1 733 jedinců z 51 druhů odhalil, že u 557 ptáků (32,1 %) byl nalezen mořský odpad – od 1 do 40 kusů – s maximální hmotností 3 340 mg a objemem 3 621 mm³¹⁰⁵.

Některé údaje rovněž ukazují, že určité plasty uvolňují dimethylsulfid – chemickou sloučeninu, která napodobuje čichový signál, jež mořští ptáci využívají k rozpoznání potravy¹⁰⁶. Nové výzkumy rovněž zjistily, že požití plastu způsobuje u mláďat poškození ledvin, jater a žaludku a také poškození mozku podobné Alzheimerově chorobě. To podtrhuje ničivý dopad plastového znečištění na mořskou faunu¹⁰⁷. U každého jedince všech sedmi druhů mořských želv ve třech oceánských pánvích byly nalezeny syntetické částice¹⁰⁸ (obr. 27).



Obrázek 27 Požití syntetických mikročástic všemi druhy mořských želv ze tří oceánských pánví. Celkový počet částic identifikovaných v každém dílčím vzorku o objemu 100 ml pro každý druh v každé oceánské pánvi. Černá čára označuje průměrný počet částic. Siluety lebek mořských želv použity se souhlasem WIDECAST; původní kresby Tom McFarland.

Zdroj: Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

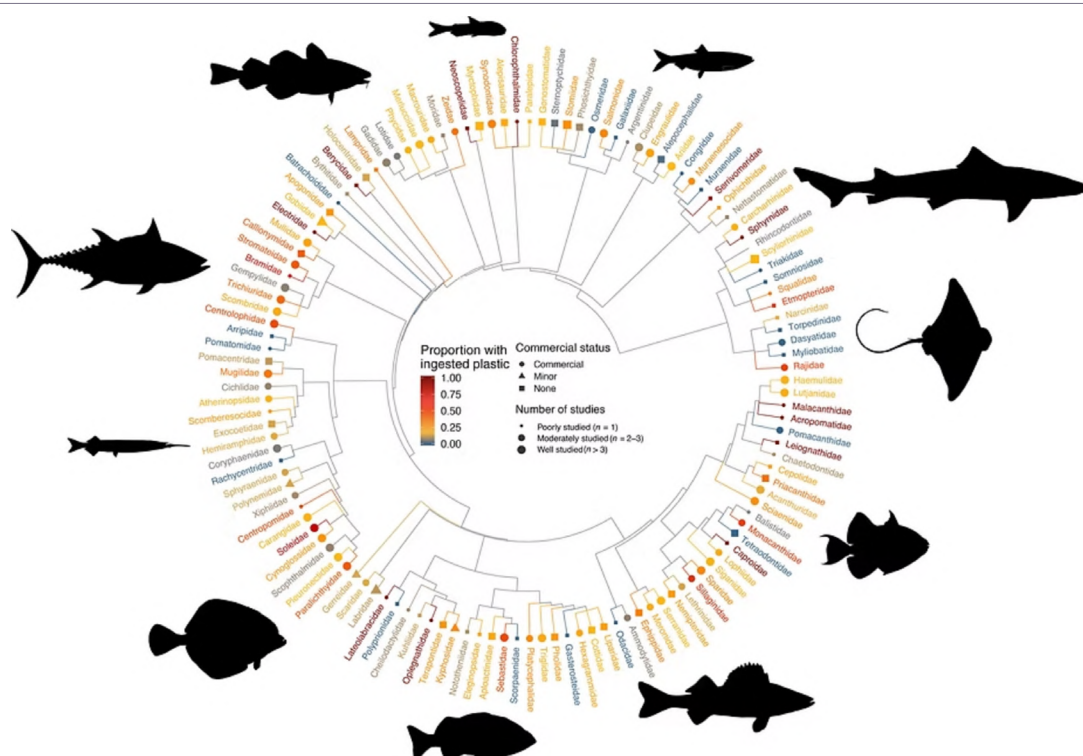
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Výzkumy 171 774 jedinců z 555 druhů mořských ryb ukazují, že 386 druhů mořských ryb, včetně 210 komerčně významných, konzumuje plastový odpad¹⁰⁹. Podle výzkumů činí četnost požití mikroplastů rybami 26 %, což představuje dvojnásobný nárůst za poslední desetiletí (obr. 28). Analýza odhalila pozitivní korelaci mezi množstvím plastů v povrchových vodách (obr. 29) a jejich konzumací mořskými organismy (obr. 30).

Laboratorní výzkumy ukazují, že plastové sloučeniny pronikající do tkání ryb snižují jejich aktivitu, narušují činnost jater, poškozují mozek, zpomalují růst a zhoršují reprodukční funkci^{109, 110, 111}.



Obrázek 28 Rybí čeledi a požití plastu.

Fylogenetické vztahy mezi čeleděmi mořských ryb (n = 131), barevně odlišené podle četnosti požití plastů. Tvar každého zakončení označuje podíl druhů v rámci čeledi v datovém souboru, které jsou loveny pro komerční účely (0 – žádné komerčně lovené druhy; nevýznamné – 25 % komerčně lovených druhů; komerční – > 25 % komerčně lovených druhů). Velikost vrcholu udává počet studií provedených na druzích v dané čeledi. To zahrnuje 15 čeledí, které jsou dobře prozkoumány (n > 10 jedinců, > 2 druhy) a zároveň vykazují vysokou četnost požití plastů (FO plastic > 0,25); 67 z těchto čeledí s doloženým požitím plastů jsou rovněž komerčně lovené.

Zdroj: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

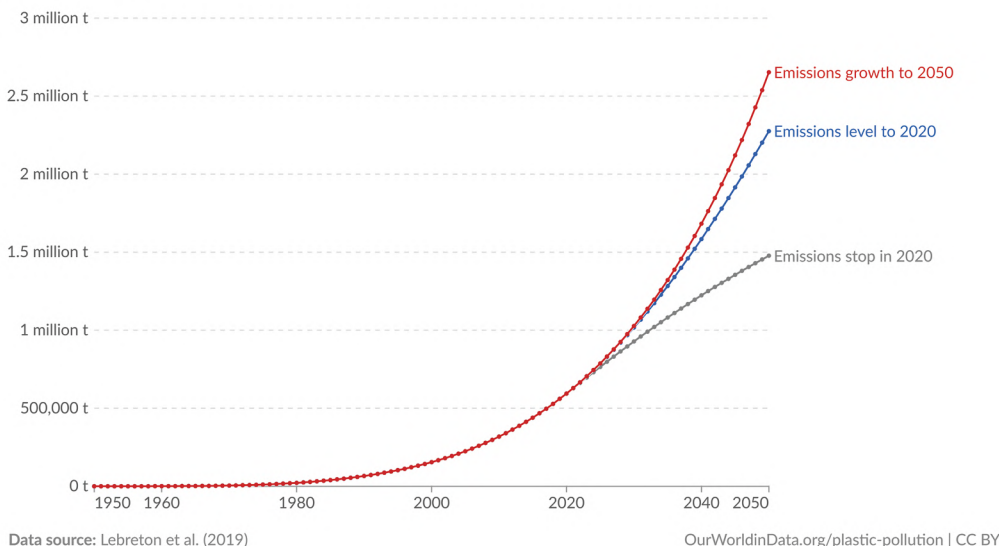
¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorb, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

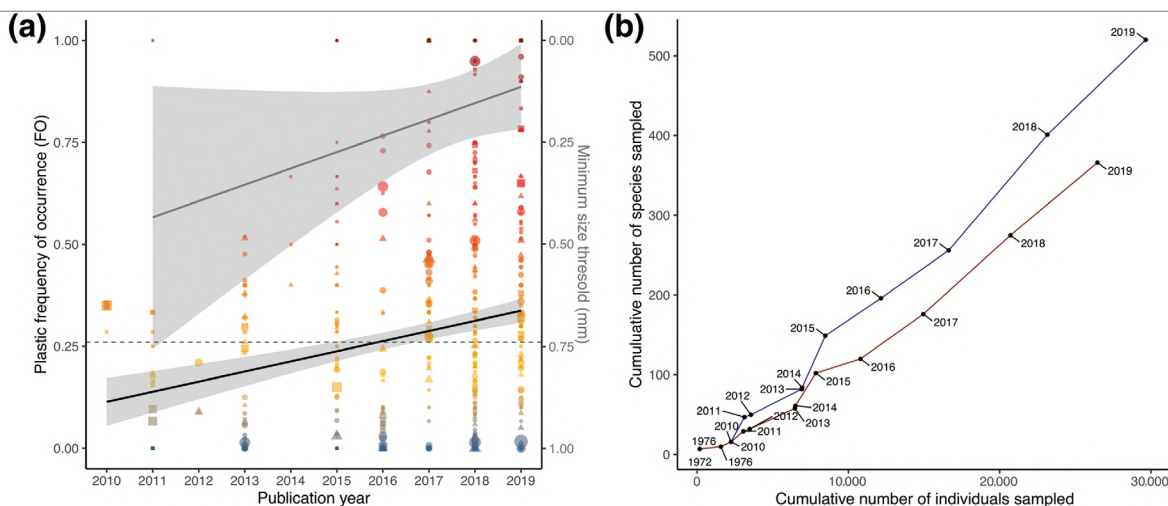
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.



Obrázek 29 Graf nárůstu množství mikroplastů na hladině oceánu s prognózou do roku 2050.

Zdroj: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Datum přístupu: 01.05.2025)

Zdroj dat: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. Sci Rep 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>



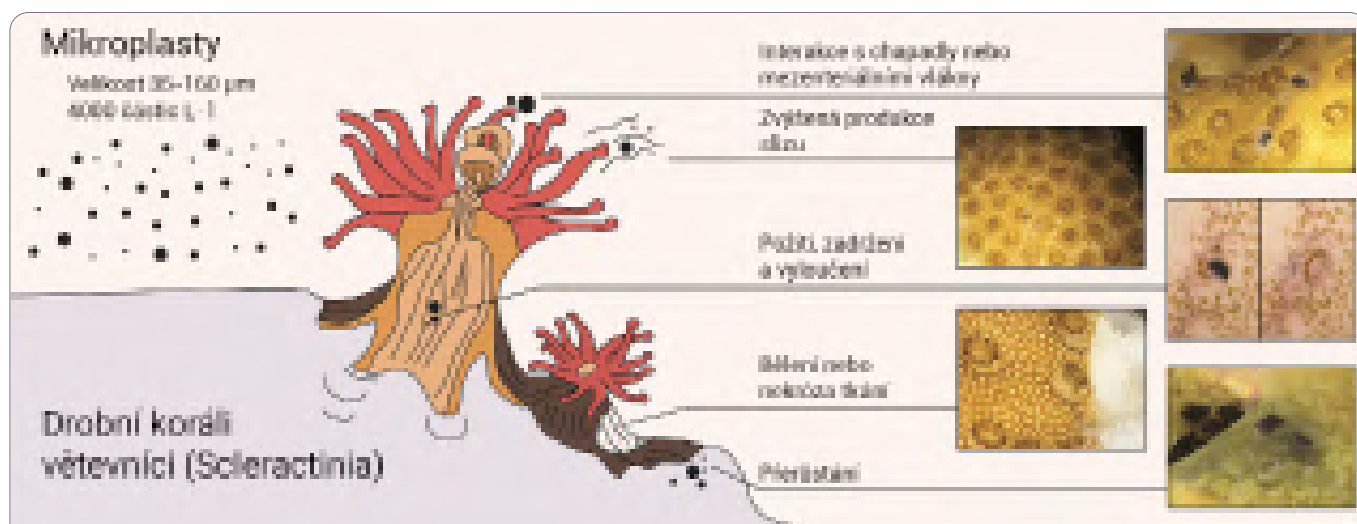
Obrázek 30 Časové trendy spotřeby plastů rybami (a) Horní šedá čára ukazuje, že od roku 2011 je patrný trend objevování stále menších částic. Dolní černá čára znázorňuje nárůst frekvence výskytu plastů (FO) u všech druhů ryb v období od roku 2010 do 2019. V tomto období spotřeba plastů významně rostla tempem 2,4 % ročně. Vodorovná tečkovaná čára představuje FO 0,26 – průměrnou frekvenci spotřeby plastů rybami na celém světě. (b) Křivka akumulace druhů, kde modrá čára označuje kumulativní počet druhů zkoumaných v průběhu času, včetně druhů, u kterých byl plast zjištěn i nezjištěn, a červená čára znázorňuje pouze druhy s prokázaným požitím plastu. Absence asymptoty na červené křivce ukazuje na vysokou pravděpodobnost, že se v následujících letech objeví další druhy, které budou plast požírat.

Zdroj: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Korály v ohrožení: mikrohrozba globálního rozsahu

Znečištění plastem představuje pro korálové útesy stále větší hrozbu, proniká do jejich potravních řetězců, zvyšuje šíření nemocí a ničí strukturu útesových společenstev. Analýza identifikovala antropogenní odpad na 77 z 84 zkoumaných útesů včetně izolovaných atolů ve střední části Tichého oceánu¹¹². U pěti ze šesti studovaných druhů byly zaznamenány negativní zdravotní dopady¹¹³, jako je bělení a nekróza tkání¹¹⁴ (obr. 31).

Větší plastové fragmenty přispívají k přenosu chorob a fyzickému poškození, čímž zvyšují zranitelnost korálů vůči patogenům¹¹⁵. Tyto účinky ovlivňují kosterní mikrobiom, který hraje klíčovou roli v udržování zdravých korálových kolonií¹¹⁶ (obr. 32). Výzkumy rovněž ukazují, že biofilmy na mikroplastech, známé jako „plastisféry“¹¹⁴, mohou vyvolávat dysbiózu mikrobiomu korálů¹¹⁷. Při kontaktu s plasty se riziko onemocnění korálů zvyšuje ze 4 % na 89 % (obr. 33). Zánik korálových útesů má významný dopad na ztrátu biologické rozmanitosti, protože útesy poskytují životní prostředí pro čtvrtinu všech mořských druhů¹¹⁵.



Obrázek 31 Vliv plastů na stav korálových útesů.

Korály mohou na částice plastů reagovat různými mechanismy čištění (např. činností řasinek, produkcí slizu nebo rozšířením tkání), zadržením částic pomocí přerůstání nebo vyloučením omylem požitých částic.

Zdroj: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

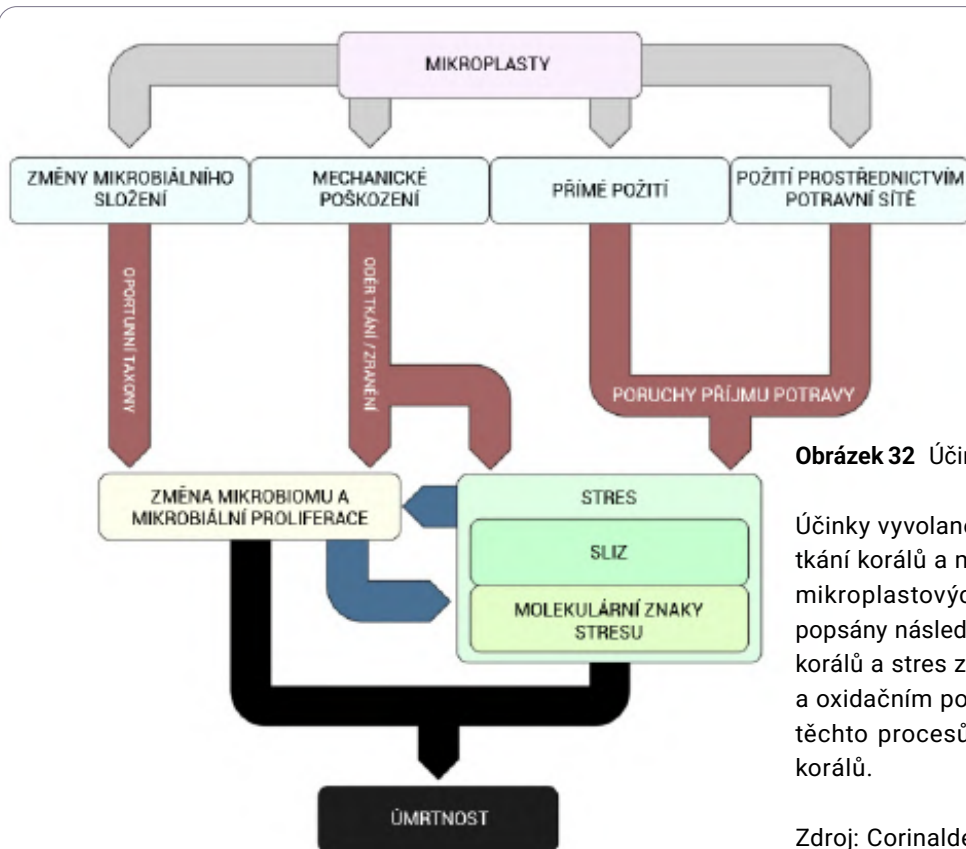
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

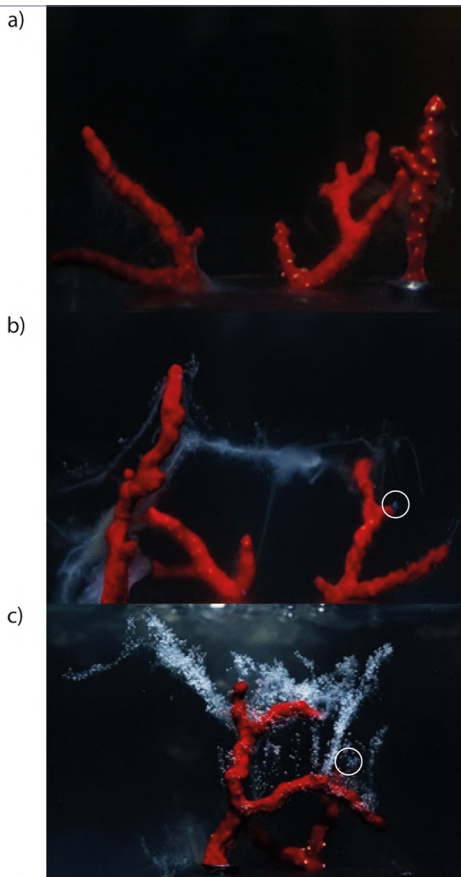
¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>



Obrázek 32 Účinky způsobené kontaktem s plasty.

Účinky vyvolané požitím, fyzickým kontaktem s tkání korálů a mikrobiální reakce na přítomnost mikroplastových částic v mořské vodě. Jsou popsány následné změny ve složení mikrobiomu korálů a stres z hlediska změn v genové expresi a oxidačním poškození DNA. Kombinace všech těchto procesů může nakonec způsobit zánik korálů.

Zdroj: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>



Obrázek 33 Vylučování slizu se zvyšuje s rostoucí koncentrací částic mikroplastů.

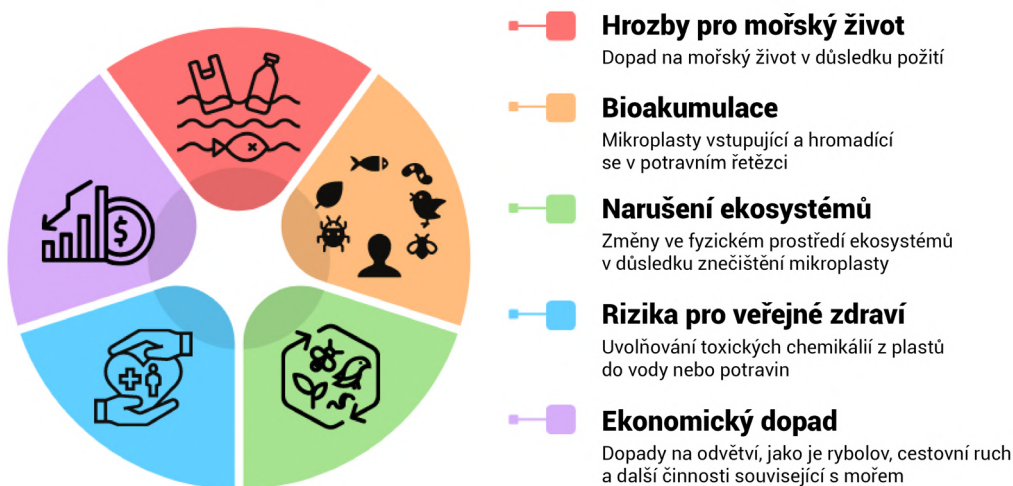
a – nízká, b – střední a c – vysoká koncentrace částic mikroplastů. Vylučování slizu se zvyšuje s rostoucí koncentrací částic mikroplastů. Bílé kruhy označují částice mikroplastů zachycené ve slizu (částice polyethylenu).

Zdroj: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Vliv MNP na kyslíkovou rovnováhu ekosystémů

Pozorování ukazují, že plasty v životním prostředí degradují převážně působením slunečního záření. Tento proces mění jejich chemické složení a strukturu. Výzkumy potvrzují, že reakce vyvolané slunečním světlem zesilují vylučování rozpuštěných organických sloučenin, což ovlivňuje biogeochemii mořské vody a stimuluje růst heterotrofních bakterií¹¹⁸ (obr. 34).

Hrozby způsobené mikroplasty v moři



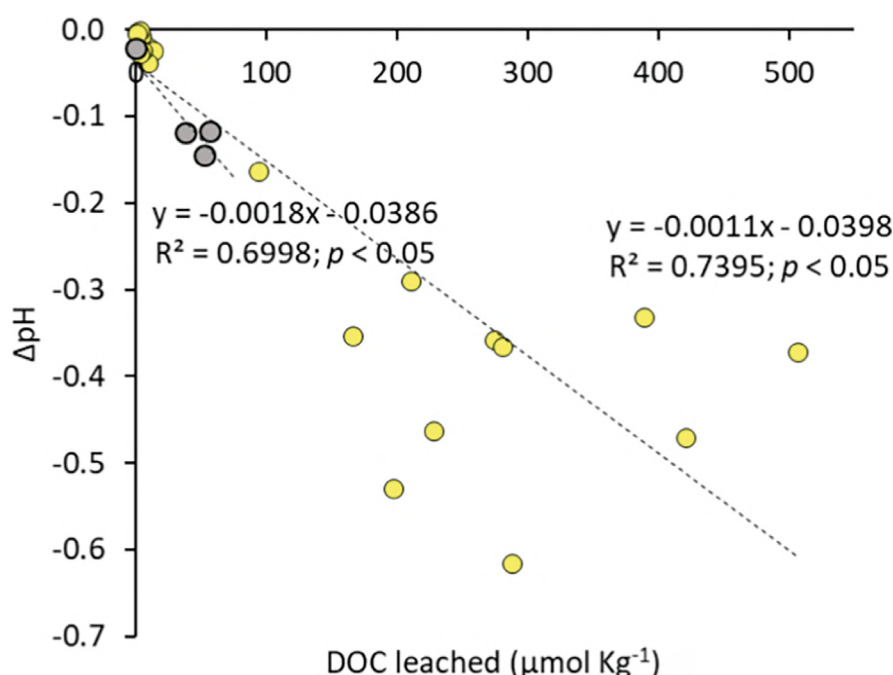
Obrázek 34 Hrozby způsobené mořskými mikroplasty.

Zdroj: Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Mnohaleté výzkumy ukazují, že chemické sloučeniny uvolňované plasty do mořské vody při jejich rozkladu pocházejí buď přímo z materiálu, nebo z příměsí používaných k zabarvení polymeru či zvýšení jeho odolnosti. Některé z těchto sloučenin jsou organické kyseliny, což vysvětluje jejich roli při snižování pH. Plasty tak přispívají k okyselování oceánu (obr. 35), což následně může výrazně narušit fungování přirozených systémů Země¹¹⁹.

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

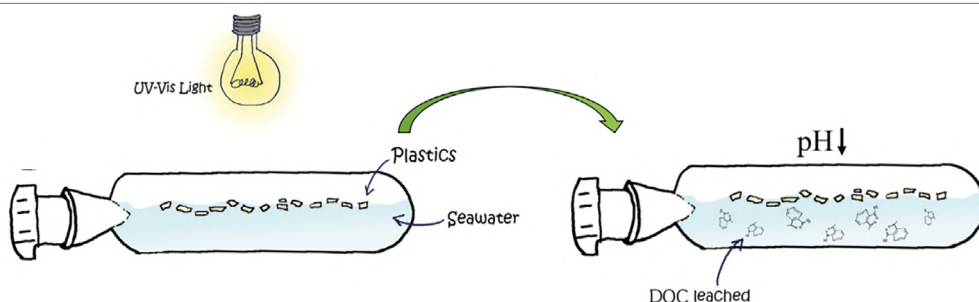


Obrázek 35 Vztahy mezi změnou pH a rozpuštěným organickým uhlíkem (DOC) vyluhovaným z plastu jsou znázorněny v grafu pro každý jednotlivý opakovaný vzorek ze všech experimentů. Zahrnuty jsou také kontrolní vzorky bez plastu pro každý experiment. Žluté body odpovídají ozařovaným vzorkům, šedé body vzorkům uchovávaným ve tmě.

Zdroj: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



„Díky tomuto výzkumu se nám podařilo prokázat, že v oblastech oceánské hladiny silně znečištěných plasty povede degradace plastů ke snížení pH až o 0,5 jednotky, což je srovnatelné s poklesem pH, který se předpokládá ve scénářích nejhorších antropogenních emisí do konce 21. století,“ uvádí Cristina Romera-Castillo, vědecká pracovnice Institutu mořských věd (ICM-CSIC) (obr. 36).¹²⁰



Obrázek 36 Vyluhování plastů může vést ke snížení pH mořské vody až o 0,5 jednotky.

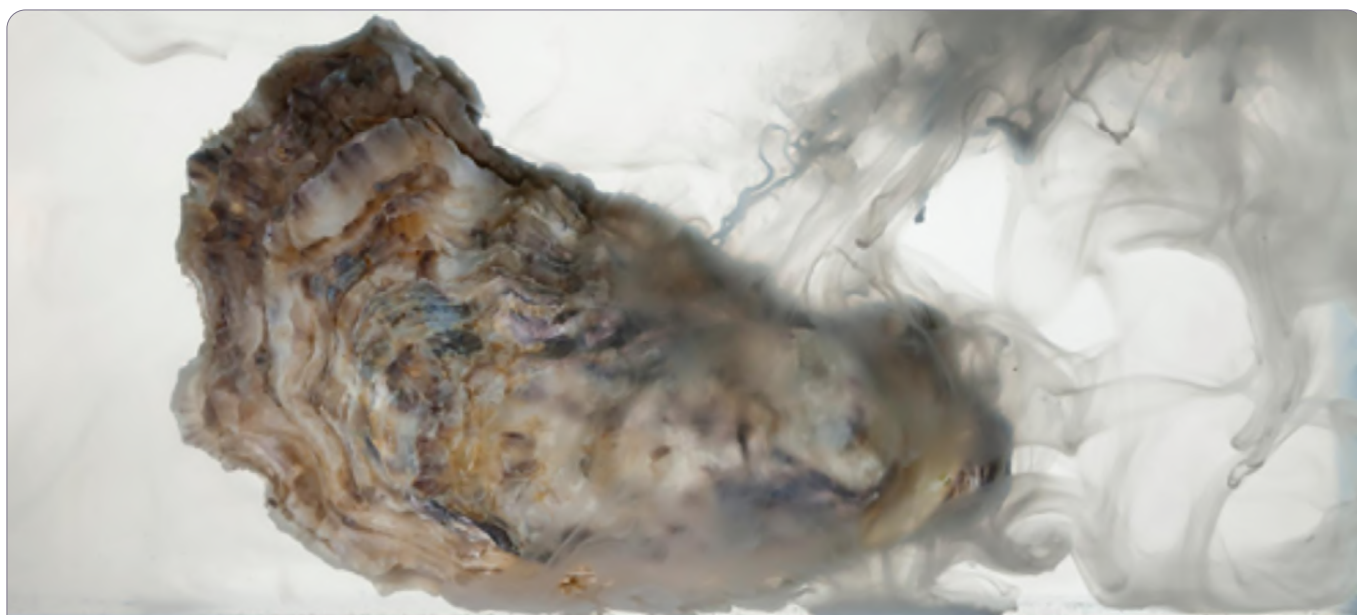
Zdroj: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025)

Okyselování oceánů představuje narušení mořského prostředí, trvalý a narůstající tlak na životní prostředí¹²¹. Důsledky pro ekosystémy se projevují desítky let, staletí i déle. Pozorování potvrzují úbytek biodiverzity v pobřežních systémech v důsledku poklesu pH^{122, 123}, což snižuje odolnost ekosystémů a ohrožuje jejich funkce – včetně životního prostředí, koloběhu živin a ukládání uhlíku¹²³.

Výzkumy ukazují, že při okyselování oceánu rostou slávky jedlé (*Mytilus edulis*) pomaleji a hůře přežívají (obr. 37). To vede k poklesu jejich populace, což snižuje schopnost filtrovat vodu a udržovat kvalitu pobřežního prostředí¹²⁴.

Současné hodnoty pH na povrchu oceánu jsou bezprecedentní, přinejmenším za posledních 26 000 let¹²⁵. Tento proces výrazně ovlivňuje korálové útesy, hlubinné ekosystémy a ekosystémy ve vyšších zeměpisných šířkách, které jsou závislé na jedinečných druzích. Tyto druhy hrají nezastupitelnou roli a jejich vymizení narušuje klíčové funkce ekosystémů, protože neexistují žádné obdobné organismy, které by je mohly nahradit¹²⁶.



Obrázek 37 Tichomořská ústřice vypouští zakalené sperma v ústřicové líhni Whiskey Creek v Oregonu. V některých pobřežních vodách již okyselování dosáhlo vážné úrovně; způsobilo zde snížení produkce na polovinu a zpomalilo růst ústřicových larev.

Zdroj: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

¹²¹Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yiNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yiNFxkALjIC&pg=PA192>

Ústřice a slávky výrazně ubývají podél gradientu klesající nasycenosti uhlíkem. Okyselování oceánu může vést k poklesu početnosti ústřic a ekosystémových služeb, které poskytují ve volné přírodě; zároveň může zhoršit jejich kvalitu jako mořských potravinových zdrojů.

Výzkumy potvrzují výrazně negativní vliv mikroplastů na biologické parametry mikrořas¹²⁷, včetně růstu, obsahu chlorofylu, aktivity fotosyntézy a úrovně reaktivních forem kyslíku^{128, 129}.

Podle výzkumu vede působení mikroplastů k celosvětovému snížení fotosyntézy u mořských a sladkovodních řas o 7,05–12,12 %¹³⁰. Fotosyntéza je přitom známá jako hlavní proces na Zemi, který produkuje molekulární kyslík (O₂), jenž se uvolňuje do atmosféry.

Kromě toho mikroplasty v mořských sedimentech mění mikrobiální společenstva a narušují koloběh dusíku, čímž mohou zhoršovat problémy způsobené člověkem, jako například toxické kvetení řas. Změny ve společenstvech planktonu na hladině oceánu mohou přispět k deoxygenaci (poklesu množství kyslíku ve vodě) způsobené změnou klimatu, což připravuje mořské organismy o kyslík¹³¹.

Data ukazují, že mezi lety 1960 a 2010 oceán ztratil 2 % rozpuštěného kyslíku v důsledku zvyšování teploty vody a hromadění znečišťujících látek včetně průmyslových, komunálních a zemědělských odpadních vod¹³². Pokles kyslíku vede k vytváření mrtvých zón – oblastí oceánu, kde mořská flóra a fauna prakticky vymizela. Pozorování ukazují, že v 60. letech 20. století se v oceánech nacházelo 45 mrtvých zón, zatímco do roku 2011 jejich počet vzrostl přibližně na 700¹³³. Podle údajů zveřejněných na webu UNDP se počet mrtvých zón od 60. let zdvojnásobuje každých deset let. Na základě tohoto trendu lze s vysokou mírou jistoty předpokládat, že do roku 2025 může jejich počet dosáhnout 1 500¹³⁴.

Znečištění plasty ovlivňuje řadu procesů v systému Země. Podle výzkumů může zesilovat akutní environmentální problémy, jako je úbytek biodiverzity a změna klimatu¹³⁵.

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathí Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jhazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Accessed May 1, 2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen decline in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025)

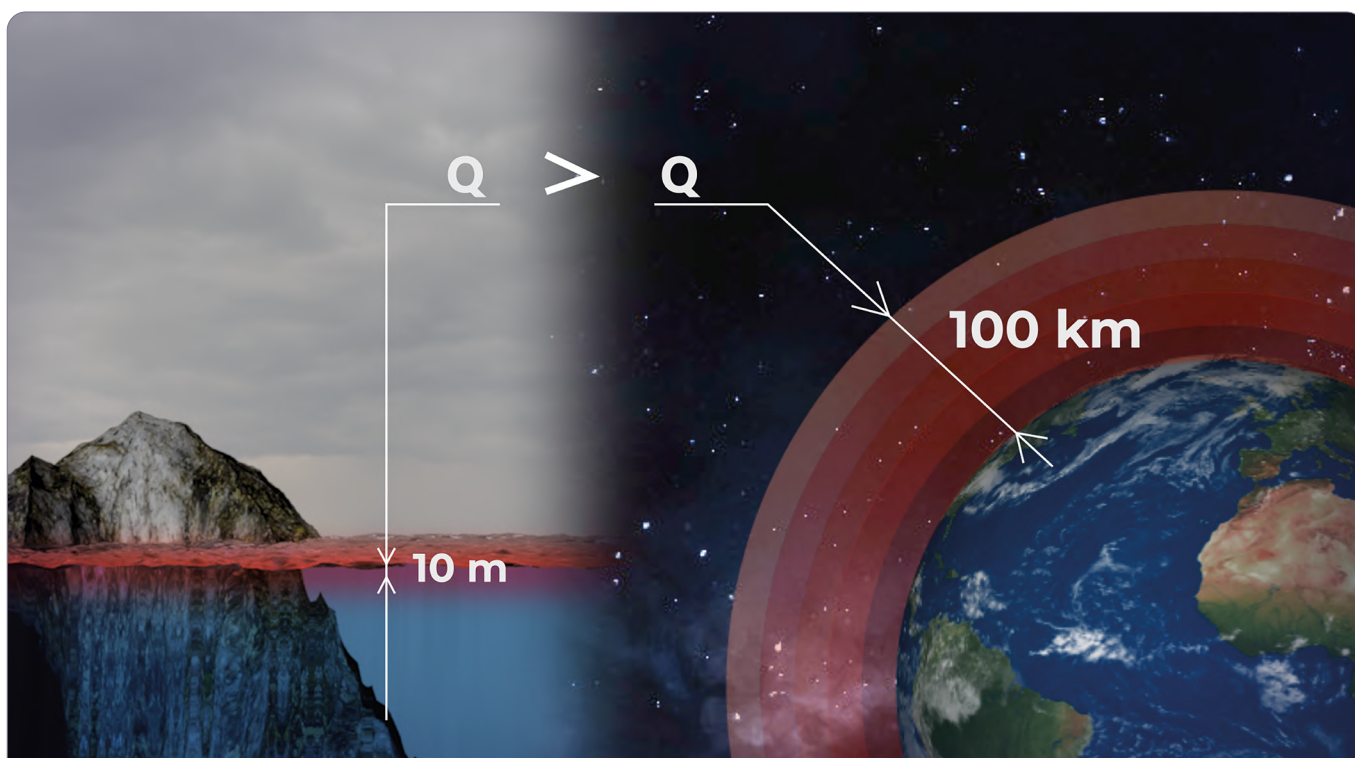
¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

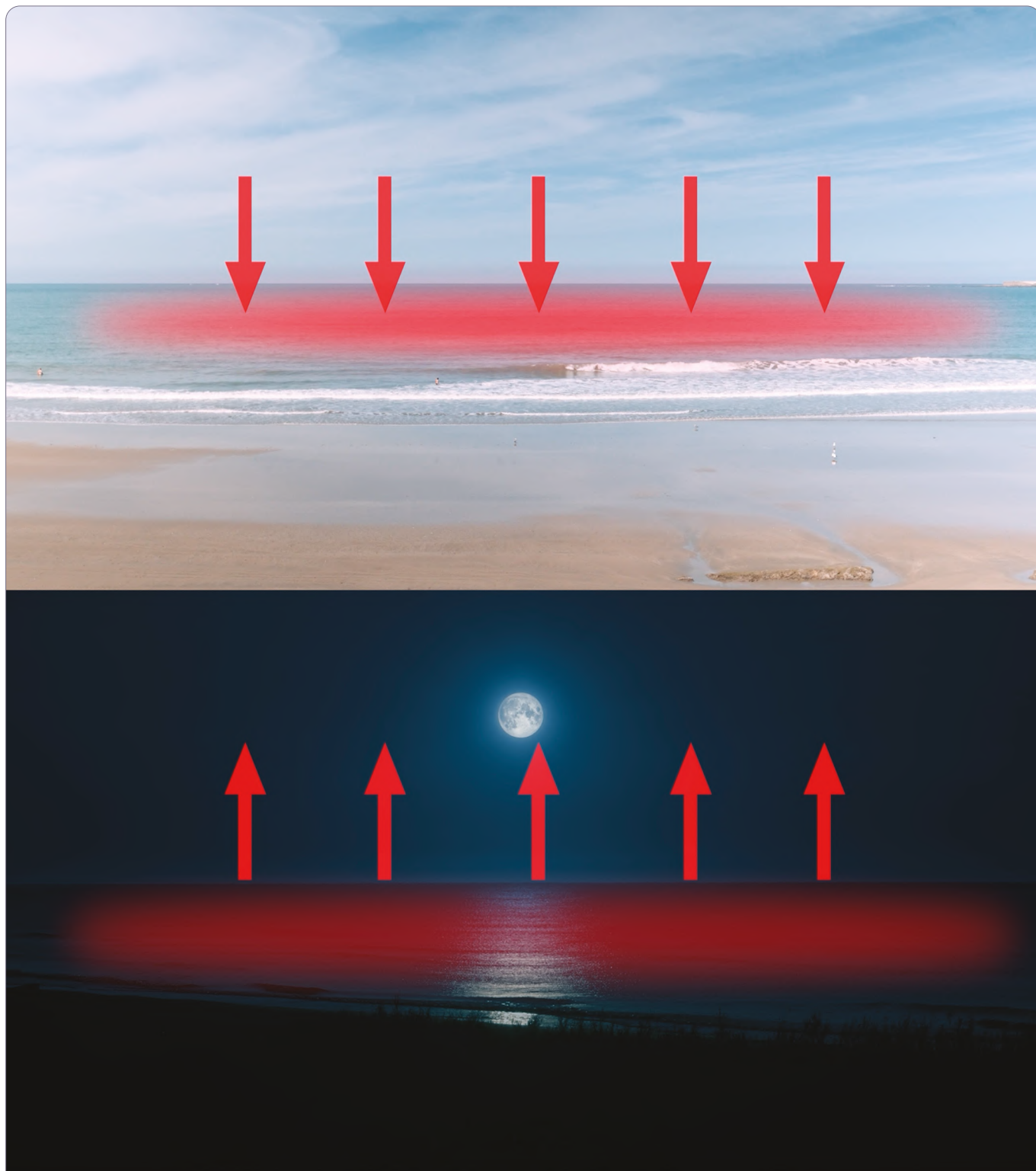
VLIV MNP NA KLIMA

Funkce oceánu

Oceán hraje klíčovou roli v udržování klimatické rovnováhy planety. Funguje jako přirozená „klimatizace“. Jeho jedinečná schopnost akumulovat a postupně uvolňovat teplo umožňuje zmírňovat teplotní výkyvy na planetě. Pouhá desetimetrová vrstva oceánské vody dokáže pohltit více tepla než celá atmosféra Země (obr. 38). Tím se snižují rozdíly teplot jak mezi dnem a nocí (obr. 39), tak mezi letním a zimním obdobím.



Obrázek 38 Schematické znázornění srovnání tepelné kapacity oceánu a atmosféry: díky menší hmotnosti vzduchu je oceán schopen akumulovat a zadržovat mnohonásobně více tepla, čímž hraje klíčovou roli v regulaci klimatu Země



Obrázek 39 Schematické znázornění denního tepelného výměnného cyklu: oceán přes den pohlcuje teplo a v noci ho uvolňuje, čímž vyrovnává teplotní výkyvy vzduchu

Oceánské proudy přenášejí teplou vodu z tropů do chladnějších oblastí, například do severních zeměpisných šířek. Tím pomáhají zmírňovat klima v pobřežních zónách. Studené proudy naopak vracejí ochlazenou vodu zpět k rovníku. Tímto způsobem oceán reguluje klima na planetě.

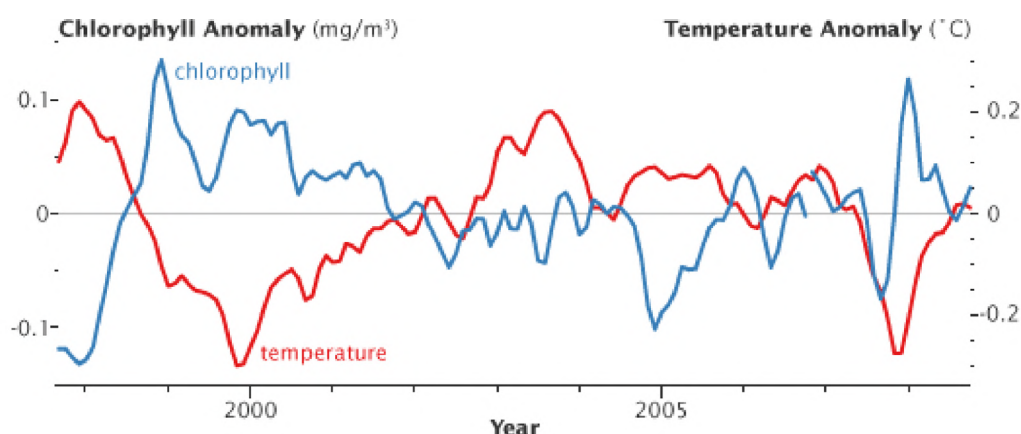
Oceán má také výrazný vliv na atmosférické procesy a hraje klíčovou roli při tvorbě mraků a srážek. Každý den se z jeho povrchu odpaří obrovské množství vody, která se následně kondenzuje v oblacích a vrací se zpět na Zemi ve formě deště nebo sněhu. Tento proces je zásadní pro doplňování sladkovodních zásob v řekách, jezerech a půdě.

Mikroskopické řasy v oceánu, jako je fytoplankton (obr. 40), produkují více než 50 % kyslíku¹³⁶. Mnohé modely chemie a biologie oceánu předpovídají, že s oteplováním povrchu oceánu v důsledku nárůstu skleníkových plynů v atmosféře bude produktivita fytoplanktonu klesat^{137, 138} (obr. 41).



Obrázek 40 Fytoplankton je mimořádně rozmanitý – od fotosyntetizujících bakterií (cyanobakterií) přes křemičité rozsivky připomínající rostliny až po schránkové kokolitoforidy (obrázky nejsou v měřítku). (Koláž upravena z ilustrací a mikrofotografií Sally Bensusen, Vědecká kancelář projektu NASA EOS.)

Zdroj: NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>



Obrázek 41 Přibližně 70 % oceánu je trvale rozčleněno do vrstev, které se mezi sebou špatně mísí. V období od konce roku 1997 do poloviny roku 2008 satelity zaznamenávaly, že teploty vyšší než průměrné (červená linie) vedly v těchto oblastech ke koncentraci chlorofylu nižší než průměrné (modrá linie). (Graf upraven podle Behrenfeld et al. 2009, Robert Simmon)

Zdroj: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

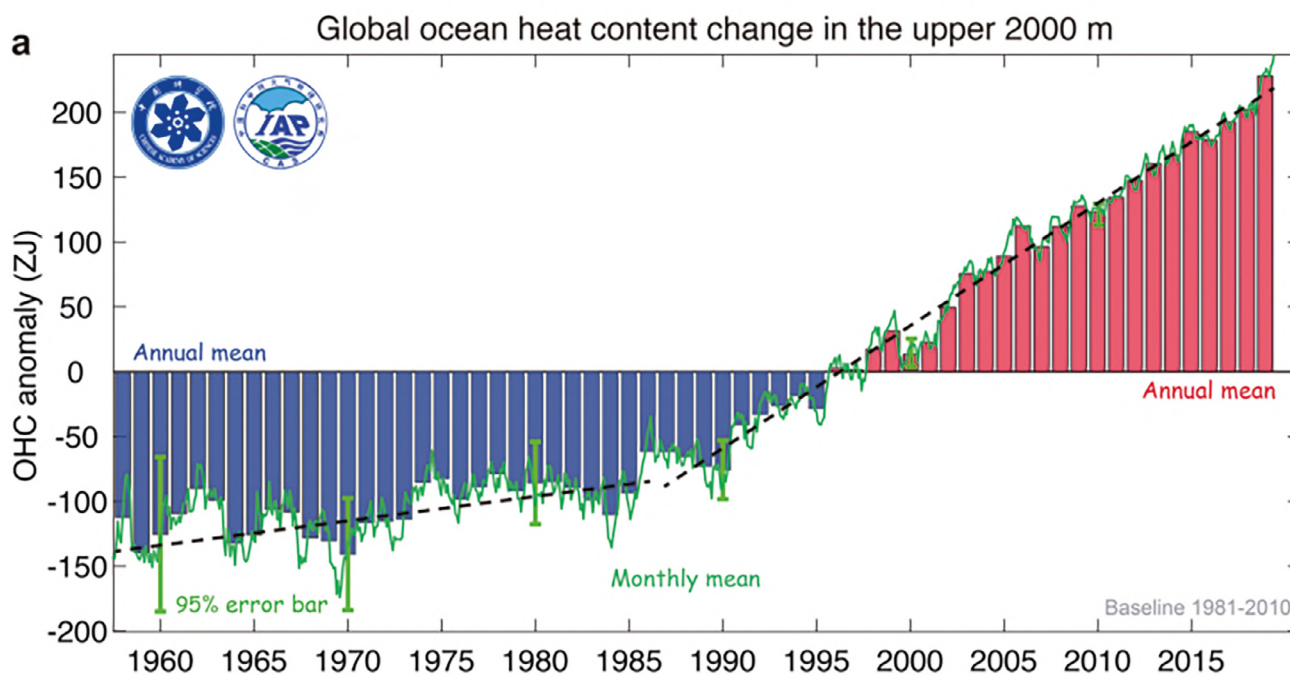
¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Změna teplotního režimu oceánu

Zpráva o stavu světového oceánu za rok 2024 ukazuje znepokojivý obraz – bezprecedentní oteplování oceánu. Výzkumy ukazují, že v období od roku 1960 do roku 1986 docházelo k postupnému nárůstu teploty oceánů. V posledních několika desetiletích se však tento proces zrychlil dvojnásobně¹³⁹ (obr. 42).



Obrázek 42 Změna tepelného obsahu v horních 2 000 metrech světového oceánu.

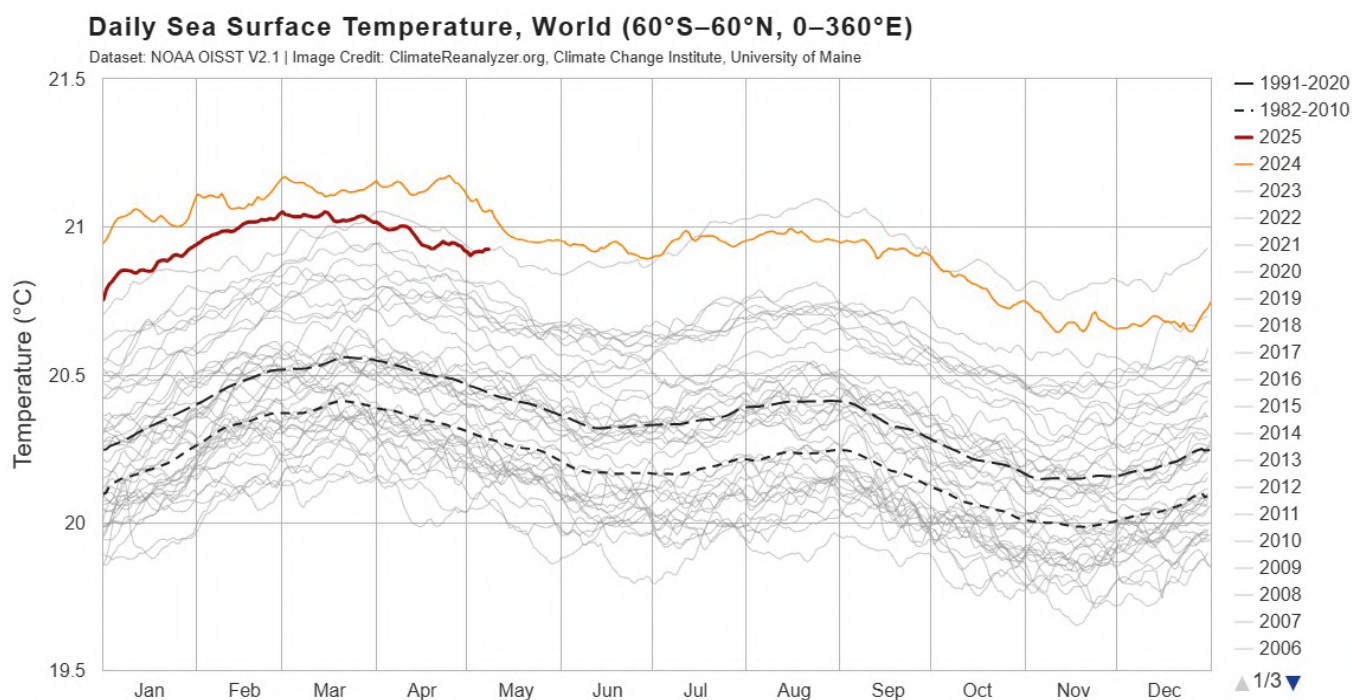
Zdroj: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Rok 2023 se stal nejteplejším rokem v celé historii měření, překonal předchozí rekord z roku 2016. Zaznamenaný byl také absolutní rekord teploty povrchu oceánu¹⁴⁰. Tento trend pokračoval – rok 2024 překonal rekordy roku 2023 (obr. 43) a stal se dosud nejteplejším rokem v celém období pozorování¹⁴¹. V tomto období zůstávala teplota povrchu oceánu rekordně vysoká po dobu 15 měsíců v řadě, což zdůrazňuje trvalost trendu oteplování.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025)

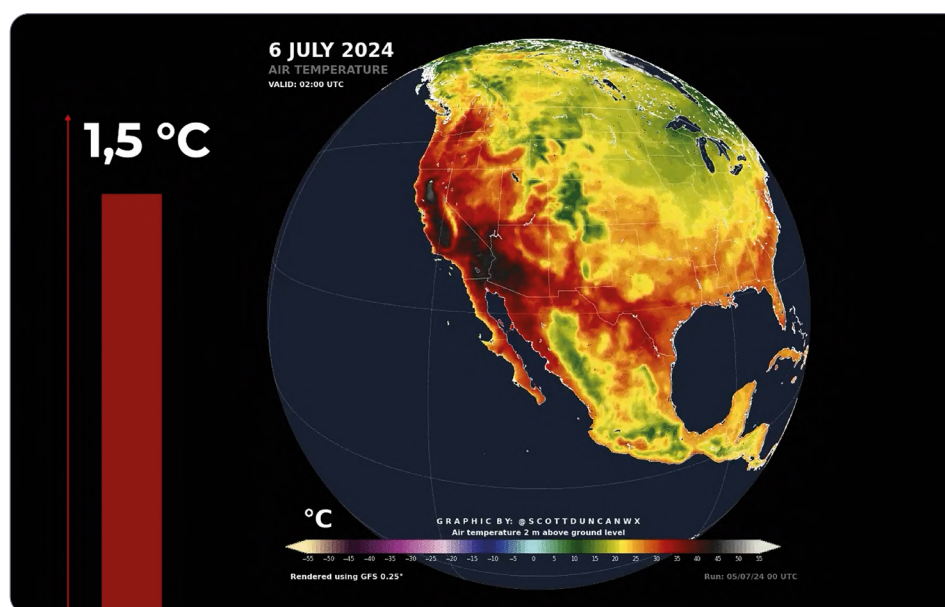
¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.



Obrázek 43 Denní hodnoty teploty mořské hladiny: grafické zobrazení změn teploty svrchní vrstvy oceánu, odrážející sezónní výkyvy v jednotlivých letech.

Zdroj: NOAA OISST V2.11 Image Credit: Climate [Reanalyzer.org](https://climateranalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine
https://climateranalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Poprvé v historii průměrná roční teplota překročila úroveň předindustriálního období o $1,5\text{ °C}$ ¹⁴² (obr. 44). Tento ukazatel je podle odborníků kritickým prahem, po jehož překročení lidstvo čekají rozsáhlé klimatické katastrofy¹⁴³.



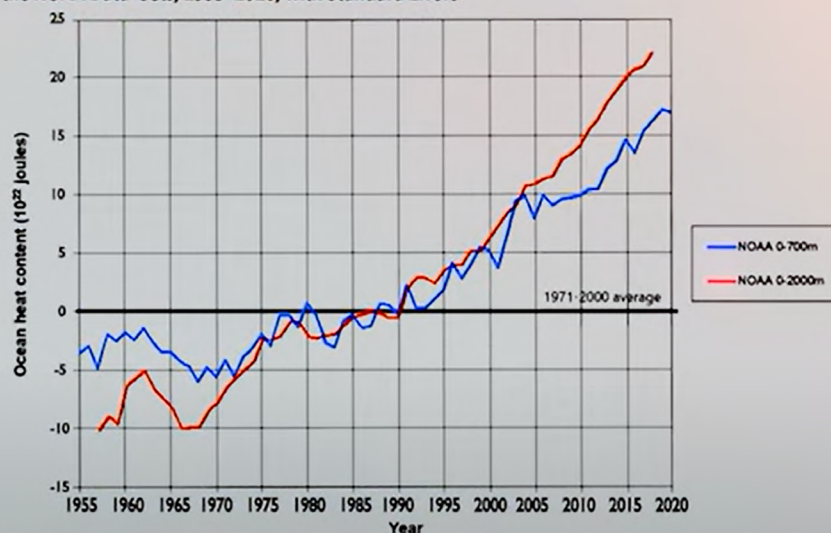
Obrázek 44 Schematické znázornění klimatického milníku: v roce 2024 průměrná globální roční teplota poprvé překročila práh $1,5\text{ °C}$ ve srovnání s předindustriální úrovní

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5 °C . (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025)

Takový nárůst teploty se očekával až v polovině 21. století¹⁴⁴, nicméně tento práh již byl překročen. Podle odhadů OSN může globální teplota, pokud budou současné tendence pokračovat, vzrůst během tohoto století téměř o 3 °C¹⁴⁴.

Figure TD-5. Ocean Heat Content in the Top 700 Meters and the Top 2,000 Meters in the NOAA Data Sets, 1955–2020, with Standard Errors



Data source: NOAA data portal: www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT.

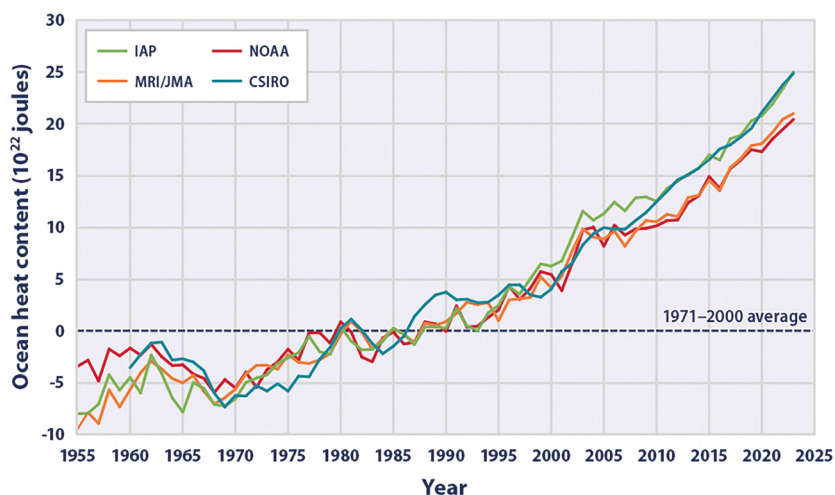
Obrázek 45 Obsah tepla v oceánu v horních 700 metrech a horních 2000 metrech. Standardní datové sady NOAA, 1955–2020.

Zdroj: datový portál NOAA
www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

Obrázek 46

Tento diagram ukazuje změny tepelného obsahu v horních 700 metrech světového oceánu v období od roku 1955 do roku 2023. Obsah tepla v oceánu je měřen v jednotkách energie – joulech a je porovnáván s průměrnou hodnotou za období 1971–2000, která je pro orientaci stanovena jako nula. Volba jiného základního období by nezměnila tvar křivek v čase. Křivky byly nezávisle vypočítány pomocí různých metod vládními organizacemi ve čtyřech zemích. Národním úřadem pro oceán a atmosféru USA (NOAA), Australskou organizací pro vědecký a průmyslový výzkum (CSIRO), Čínským institutem atmosférické fyziky (IAP) a Meteorologickým výzkumným institutem Japonské meteorologické agentury (MRI/JMA).

Zdroj: CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024

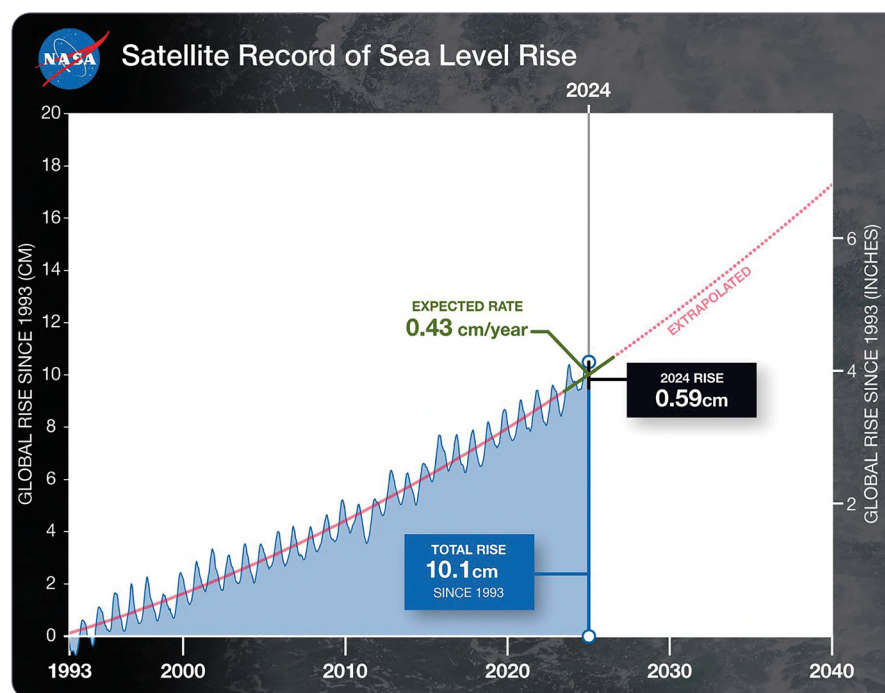


¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Za posledních 60 let se oceány ve středních hloubkách ohřívaly 15krát rychleji než za předchozích 10 000 let¹⁴⁵ (obr. 45–46). To ukazuje, že procesy globálního oteplování zasahují nejen povrchové vrstvy vody, ale i hlubší části oceánu, kam nepronikají sluneční paprsky. Ohřev vody v takových hloubkách vyžaduje obrovské množství energie, což podtrhuje rozsah problému. Podle odhadů vědců je k tomu, aby se oceán ohřívá současným tempem, potřeba uvolnění energie odpovídající výbuchu 7 atomových bomb každou sekundu po celý rok¹⁴⁶ – jde o kolosální hodnoty, které vyvolávají otázku: odkud se taková energie bere?

Zvyšování teploty vody nevyhnutelně vede k růstu hladiny světového oceánu, v důsledku čehož hrozí zatopení pobřežních oblastí. Za poslední dvě století se hladina oceánu zvedla o 21 cm, z toho za posledních 30 let o 10,1 cm¹⁴⁷. Současné tempo růstu je 2,5krát vyšší než dříve a tento trend bude pokračovat. Pokud se situace nezmění, z milionů lidí se stanou uprchlíci, kteří budou nuceni opustit své domovy a hledat útočiště daleko od pobřeží.

„Nárůst, který jsme zaznamenali v roce 2024, byl vyšší, než jsme očekávali,“ uvedl Josh Willis, výzkumník zabývající se hladinou moře v Laboratoři proudového pohonu NASA v jižní Kalifornii. **„Každý rok je trochu jiný, ale je zřejmé, že oceán stále stoupá – a rychlost tohoto růstu je čím dál vyšší“**¹⁴⁸ (obr. 47).



Obrázek 47 Tento graf ukazuje průměrnou hladinu světového moře (modře) od roku 1993, měřenou sérií pěti satelitů. Plná červená čára znázorňuje trajektorii tohoto růstu, který se za poslední tři desetiletí více než zdvojnásobil. Červená přerušovaná čára představuje předpověď budoucího zvyšování hladiny moře.

Zdroj: NASA/JPL-Caltech.
Zdroj: NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

Ohřívání oceánu rovněž přispívá k častějším a intenzivnějším extrémním povětrnostním jevům, jako jsou záplavy, tajfuny a anomální srážky. Tyto změny ohrožují ekosystémy planety a životy miliard lidí a každým rokem jsou stále citelnější.

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴⁶Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025)

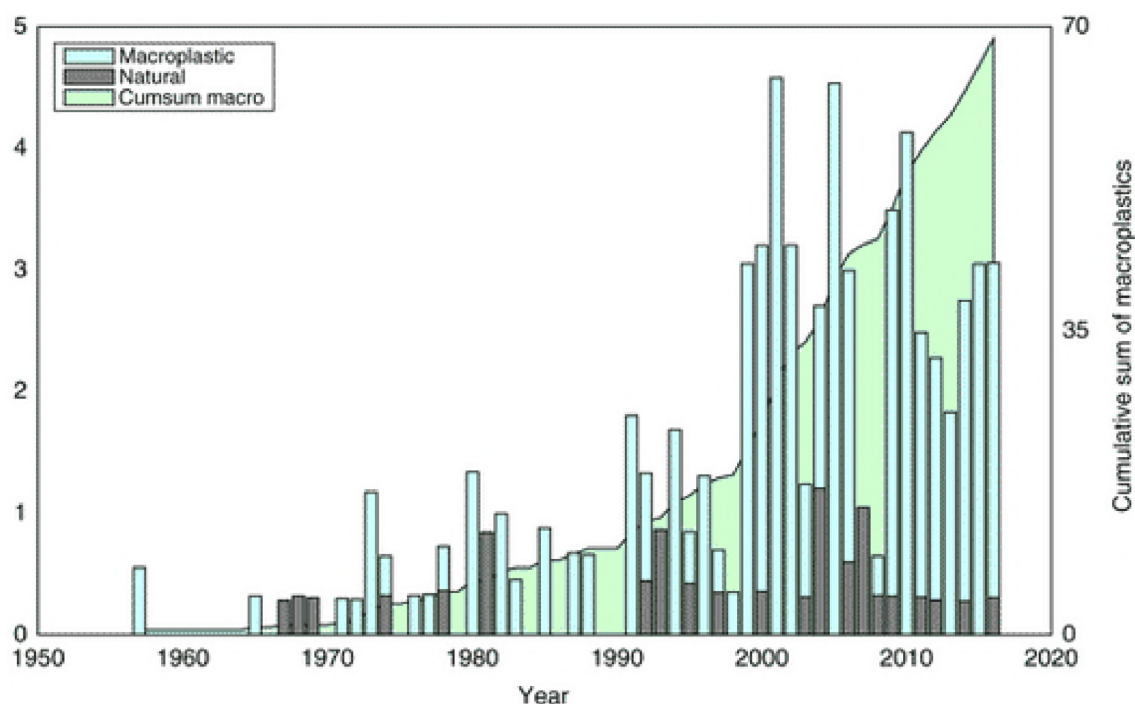
¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

Proč se oceán ohřívá? Hypotéza

Hlavními obecně uznávanými faktory, které ovlivňují ohřívání oceánu, jsou skleníkové plyny, jako je CO_2 , které zadržují teplo v atmosféře a zvyšují teplotu svrchních vrstev oceánské vody. Existují však i další faktory, které také mohou mít na tento proces významný vliv. Další faktor ohřevu oceánu bude rovněž rozebrán v kapitole „Faktor X. Vliv mikro- a nanoplastů na dynamiku cyklu přírodních katastrof“.

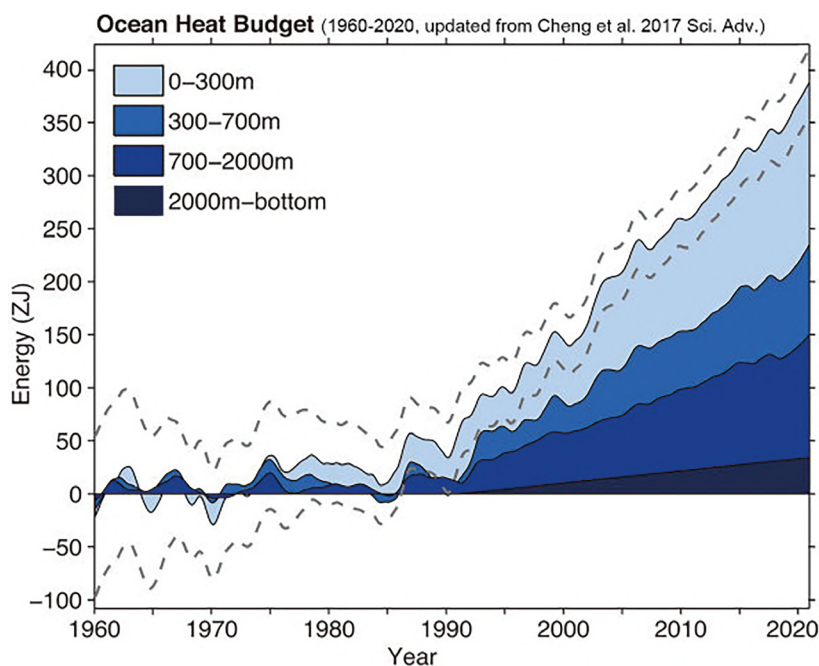
Od druhé poloviny 20. století je pozorován prudký nárůst množství plastů v oceánech, což časově odpovídá období zrychleného průmyslového rozvoje a masové výroby plastových výrobků (obr. 48). Od roku 1960 do roku 2019 je rovněž patrná změna teploty oceánu. Graf (obr. 49) ukazuje souběžný růst průměrné teploty mořské hladiny, který je také pozorován od poloviny 20. století

Při porovnání dvou grafů (obr. 48–49) lze zaznamenat korelaci mezi růstem koncentrace plastů v oceánech a zvyšováním teploty vody. To umožňuje předpokládat, že znečištění oceánů plasty může být jedním z významných, avšak nedostatečně prozkoumaných faktorů ovlivňujících ohřívání oceánské vody.



Obrázek 48 Graf nárůstu koncentrace plastů v oceánech za poslední desetiletí. Kumulativní součet makroplastů zachycených v oceánu a údaje pro jednotlivé roky.

Zdroj: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>



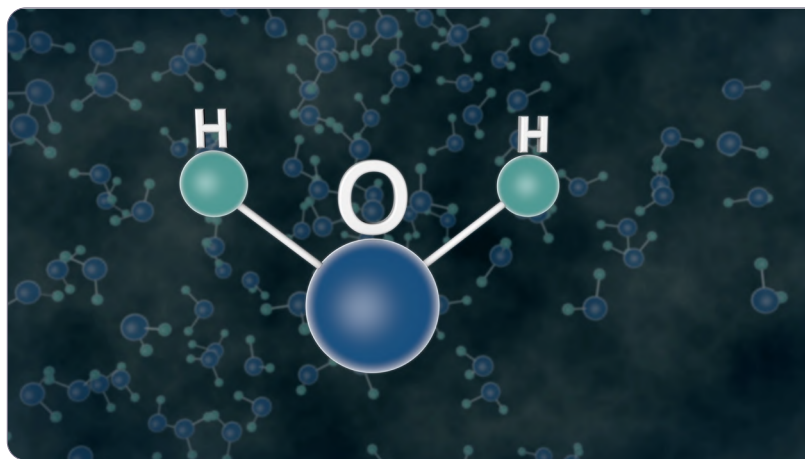
Obrázek 49 Graf změny obsahu tepla ve světovém oceánu za stejné období (1960–2019)

Zdroj: (Purkey and Johnson, 2010; se zaktualizováním údajů Cheng a ostatní, 2017) Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Adv. Atmos. Sci. 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Pro další zkoumání této otázky je důležité pochopit, zda plasty mohou ovlivňovat fyzikální vlastnosti oceánské vody, jako je tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. A mohly by tyto změny přispět ke zvyšování teploty oceánu? Abychom tyto procesy lépe pochopili, ponořme se do základních charakteristik vody a její interakce se znečišťujícími látkami.

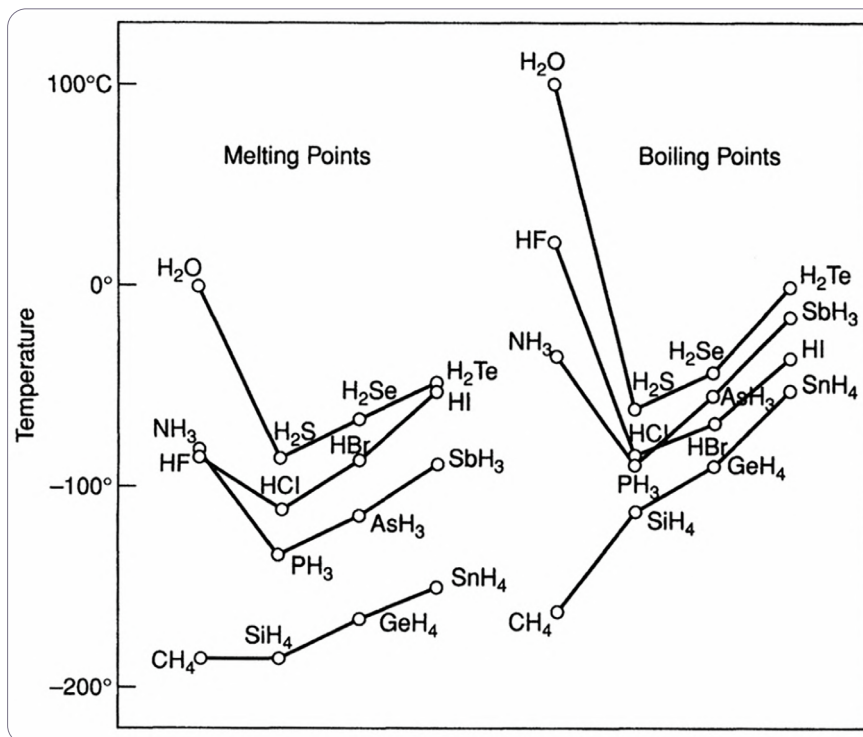
Základní charakteristiky vody

Molekula vody má symetrický tvar písmene V, přičemž dva atomy vodíku jsou umístěny na jedné straně vůči většímu atomu kyslíku (obr. 50).



Obrázek 50 Schematické znázornění molekuly vody: dva atomy vodíku (H) jsou spojeny s jedním atomem kyslíku (O) v úhlu přibližně 104,5°, čímž vzniká dipól s kladným a záporným nábojem

Tato struktura se liší od lineárních molekul, například CO_2 , kde jsou všechny atomy uspořádány v řetězci. Tento tvar molekuly vody ji činí výjimečnou a zásadní pro mnoho procesů na Zemi. Specifické vlastnosti molekul vody umožňují, aby voda zůstala v kapalném stavu i při teplotách, za kterých by jiné tříatomové molekuly běžně přecházely do plynného skupenství (obr. 51).



Obrázek 51 Teploty tání (vlevo) a varu (vpravo) izoelektronových řad hybridních molekul. Teploty pro vodu jsou výrazně vyšší, než by odpovídalo extrapolaci teplot obdobných sloučenin.

Zdroj: Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Toto je možné díky vodíkovým vazbám¹⁴⁹, které propojují molekuly vody a vytvářejí pevnou a uspořádanou strukturu.

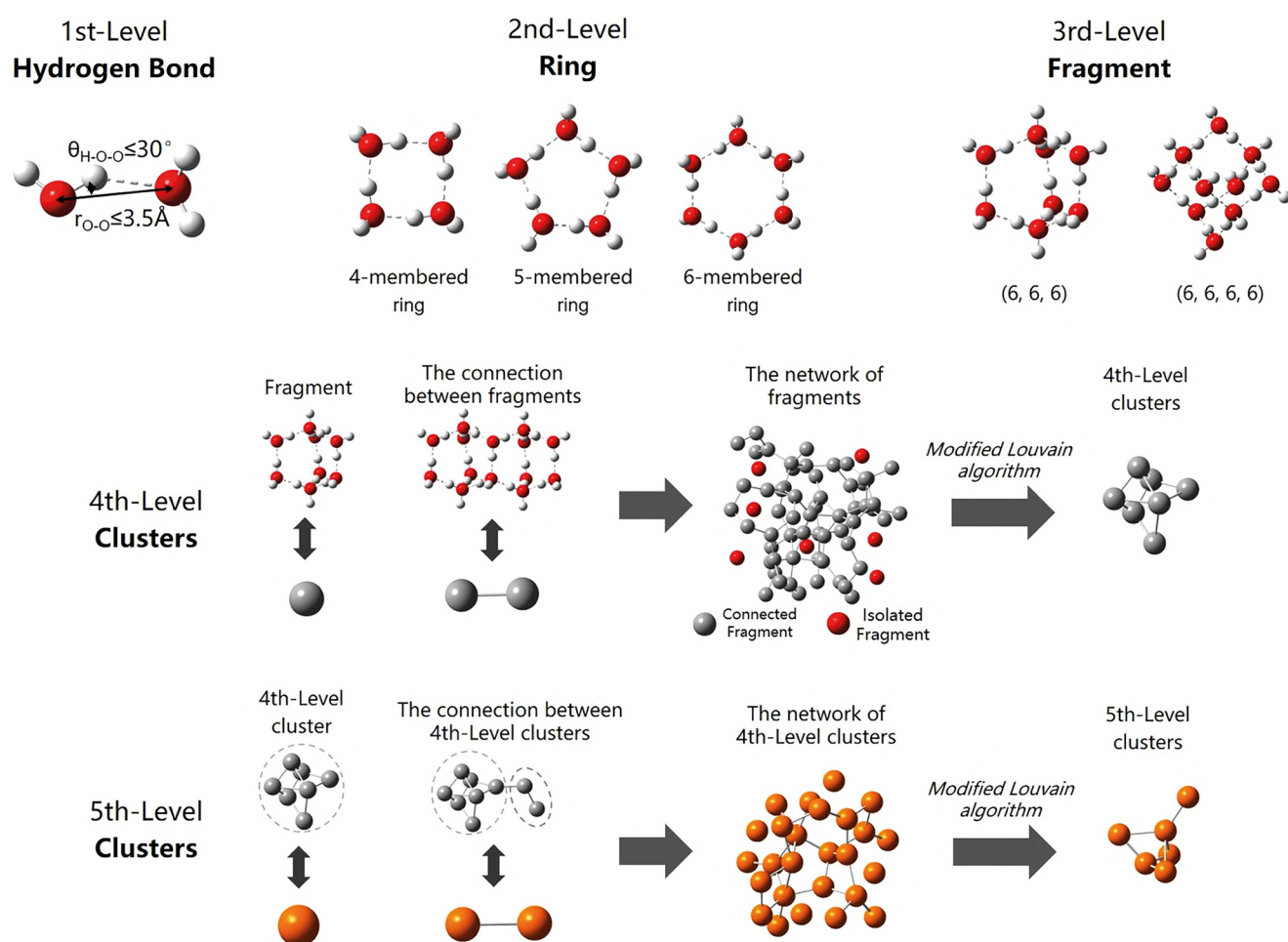
Většina vodíkových vazeb představuje slabé přitažlivé síly s pevností přibližně jedné desetiny síly běžné kovalentní vazby. Přesto jsou nesmírně důležité. Bez nich by se všechny dřevěné konstrukce zhroutily, cement by se rozpadl, oceány by se vypařily a veškerý život by se rozložil na neživou hmotu¹⁵⁰.

Voda proto vykazuje schopnost tvořit klastry, což vysvětluje její anomální vlastnosti (obr. 52–53). Klastry vody mohou zahrnovat více než 95 % sítě vodíkových vazeb, přičemž některé klastry zahrnují maximálně tisíce molekul a sahají za hranici 3,0 nm¹⁵¹.

¹⁴⁹ Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

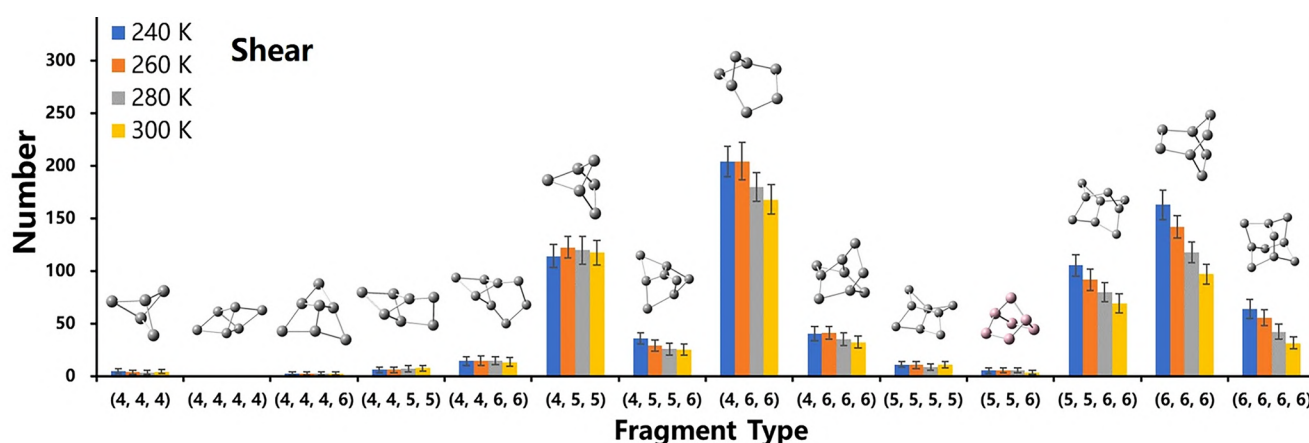
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>



Obrázek 52 Schémata metody hierarchické klasifikace klastrů. Vodíkové vazby, kruhové struktury a fragmenty jsou považovány za struktury 1., 2. a 3. úrovně, které jsou z chemického hlediska znázorněny jako kuličkově-tyčinkové modely; červené a bílé koule představují atomy kyslíku a vodíku. Plné a přerušované tyčinky označují kovalentní vazby O–H a vodíkové vazby. Klastrové struktury 4. a 5. úrovně jsou zobrazeny z topologického hlediska. Koule znázorňují strukturu posledních úrovní. Struktury na obrázku představují pouze výběr z těch, které byly zpracovány klasifikačním algoritmem.

Zdroj: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>



Obrázek 53 Rozložení fragmentů (struktury 3. úrovně) při různých teplotách. Všimněte si, že (4, 4, 4) označuje symbol fragmentu, který je složen ze tří čtyřčlenných kruhů.

Zdroj: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a hustota vody a jejich funkční význam

1. Vysoká měrná tepelná kapacita vody

Voda má za normálních podmínek nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu mezi kapalinami a pevnými látkami, s výjimkou některých plynů, jako je vodík¹⁵². To znamená, že je schopna absorbovat, uchovávat a přenášet velké množství tepelné energie při relativně malé změně vlastní teploty.

Tepelná kapacita vody je definována jako množství tepla potřebného k ohřevu 1 gramu vody o 1 °C a za standardních podmínek činí přibližně 4,18 J/(g·°C). Tato vlastnost je jedním z klíčových faktorů klimatické regulace: voda v oceánech akumuluje teplo během dne a pomalu ho uvolňuje v noci. V létě oceán pohlcuje přebytečné teplo, které se v zimě postupně uvolňuje, čímž funguje jako obří termostat a zmírňuje výkyvy teplot na planetě.

2. Tepelná vodivost vody

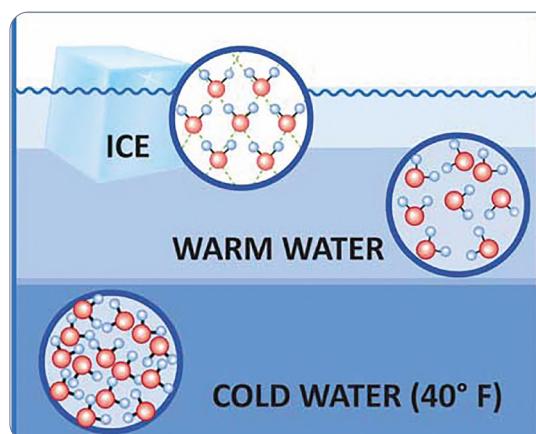
Voda má ve srovnání s kovy poměrně nízkou tepelnou vodivost, avšak vyšší než mnoho jiných kapalin. Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost látky přenášet teplo z jedné její části do druhé bez pohybu samotné hmoty. Tepelná vodivost vody činí přibližně 0,6 W/(m·K) za standardních podmínek (25 °C), což z ní činí účinný vodič tepla v přírodních procesech, jako je rozložení tepla v oceánech a dalších vodních plochách.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Pozorování ukazují, že tepelná vodivost vody se zvyšuje s rostoucí teplotou až do určité hranice¹⁵². Kromě toho se tato hodnota může měnit v přítomnosti nečistot nebo rozpuštěných látek^{153, 154}. Tyto vlastnosti ovlivňují způsob, jakým je teplo distribuováno ve vodě, což je klíčové pro pochopení interakcí mezi oceánem a atmosférou.

3. Anomální chování hustoty vody

Na rozdíl od většiny látek se hustota vody při změně teploty chová neobvykle. Při ochlazování na 4 °C se její hustota zvyšuje, ale při dalším ochlazování (od 4 °C do 0 °C) začne hustota klesat (obr. 54). Když voda zmrzne, její hustota se sníží o 8–9 %. To vysvětluje, proč led neklesá ke dnu, ale zůstává na hladině. Tento jev je pro život ve vodních nádržích zásadní, protože led chrání vodu a živé organismy před úplným promrznutím – zabraňuje zamrznutí vody až ke dnu.



Obrázek 54 Schematické znázornění změny hustoty vody při ochlazování: s klesající teplotou se molekuly vody přibližují, čímž se zvyšuje hustota a dosahuje maxima při 4 °C. Při dalším ochlazování začínají převažovat vodíkové vazby, molekuly vody se uspořádávají do krystalické struktury ledu, což vede k roztažení vody a snížení hustoty ledu, který je přibližně o 10 % méně hustý než kapalná voda.

Zdroj: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Vliv vlastností vody na klima a ekosystémy

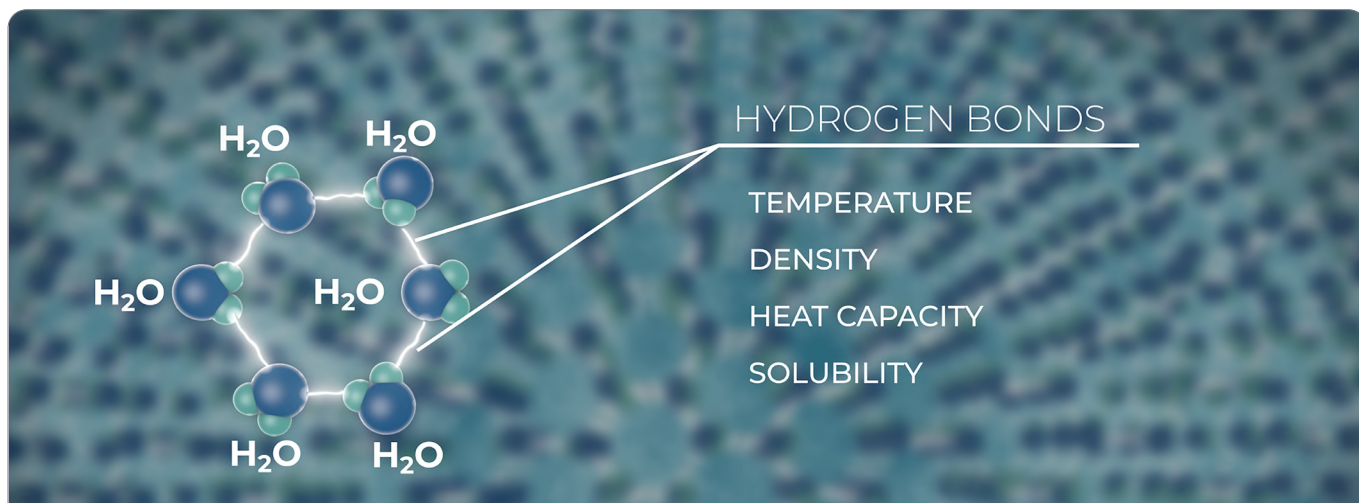
Změny teploty vody mohou výrazně ovlivnit tepelnou bilanci světového oceánu a jeho schopnost akumulovat a přenášet teplo. To se následně projeví na klimatickém systému Země.

Fyzikálně-chemické vlastnosti vody, zejména její měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost, tak hrají důležitou roli při udržování ekologické rovnováhy na planetě a regulaci klimatických procesů (obr. 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

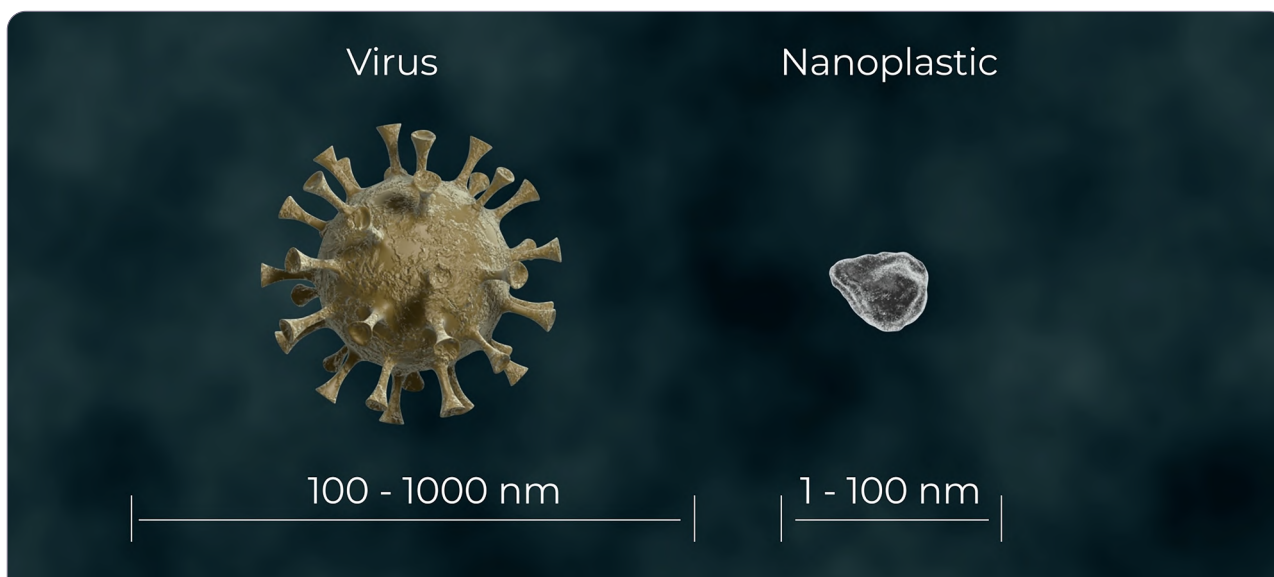
¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)



Obrázek 55 Schematické znázornění vodíkových vazeb v molekulách vody a jejich vlivu na klíčové vlastnosti vody: vodíkové vazby přispívají k vysoké měrné tepelné kapacitě vody, což jí umožňuje efektivně pohlcovat a uchovávat teplo. Tyto vazby rovněž určují hustotu vody, která je nejvyšší při 4 °C, a její schopnost rozpouštět polární a iontové látky, díky čemuž je voda univerzálním rozpouštědlem.

Role MNP ve změně fyzikálních vlastností mořské vody

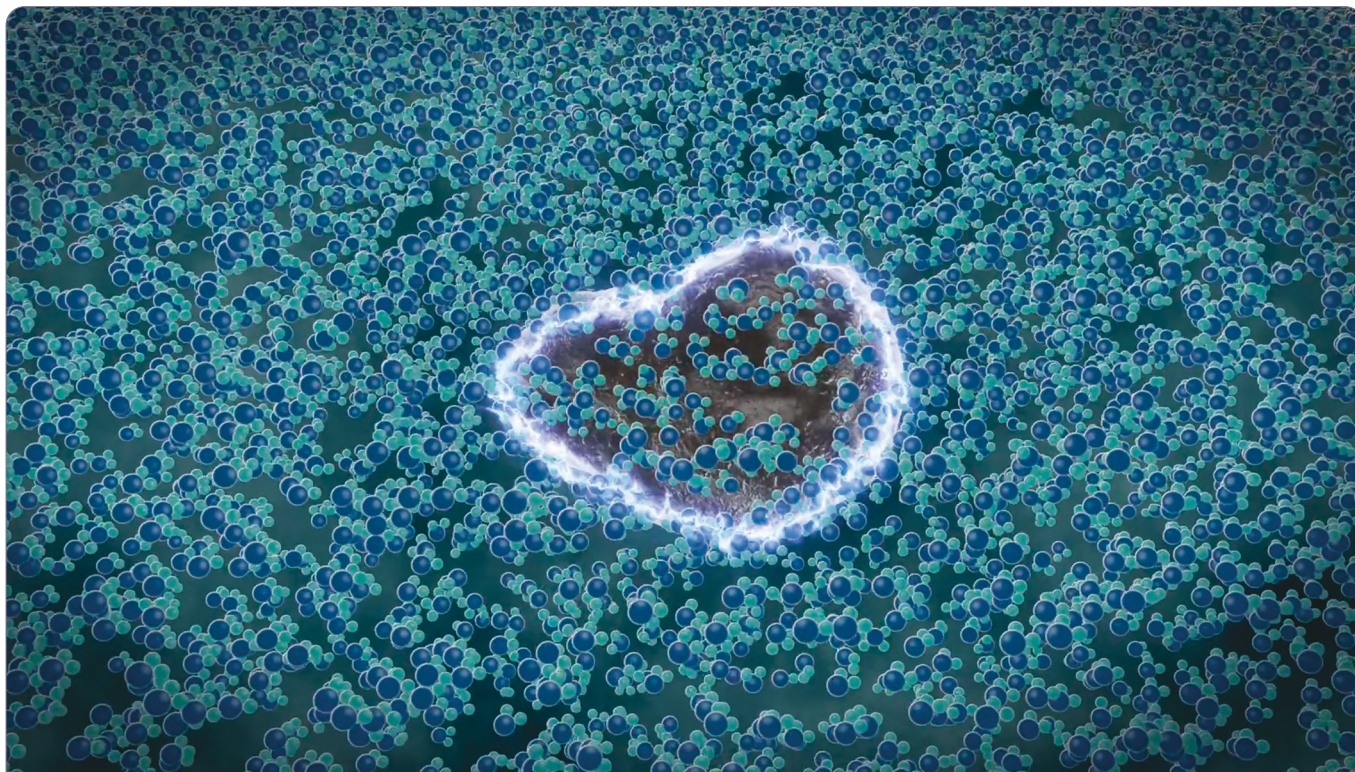
Plasty, jakožto produkt petrochemického průmyslu, se v přírodě nerozkládají, ale rozpadají se na menší částice, jako jsou mikro- a nanoplasty¹⁵⁵. Tyto částice, zejména nanoplasty, mohou významně ovlivňovat fyzikálně-chemické vlastnosti vody, což se následně může promítnout do ekosystémů a klimatických procesů. Nanoplasty jsou částice o velikosti nanometrů, tedy menší než viry (obr. 56).



Obrázek 56 Schematické srovnání velikostí viru a částice nanoplastu.

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Například nanoplasty z nylonu (polyamidu), které obsahují dusík a kyslík, jsou schopny vytvářet vodíkové vazby s vodou¹⁵⁶. Když se částice nanoplastů dostanou do vody, narušují uspořádanou strukturu vody založenou na vodíkových vazbách mezi molekulami vody, což může měnit její fyzikálně-chemické vlastnosti (obr. 57). Zejména molekuly vody ztrácejí pohyblivost, což snižuje jejich schopnost účinně se podílet na procesech výměny tepla. Kromě toho částice nanoplastů ve vodných roztocích bohatých na různé látky mohou získat elektrický náboj¹⁵⁷.



Obrázek 57 Schematické znázornění nabitých nanočástic plastů ve vodě: při působení nestabilních vodních podmínek – jako je přítomnost organických nebo syntetických nečistot, změna pH, teploty nebo salinity – se povrch nanoplastů stává potenciálně aktivním a schopným generovat elektrické náboje ve vodním prostředí.

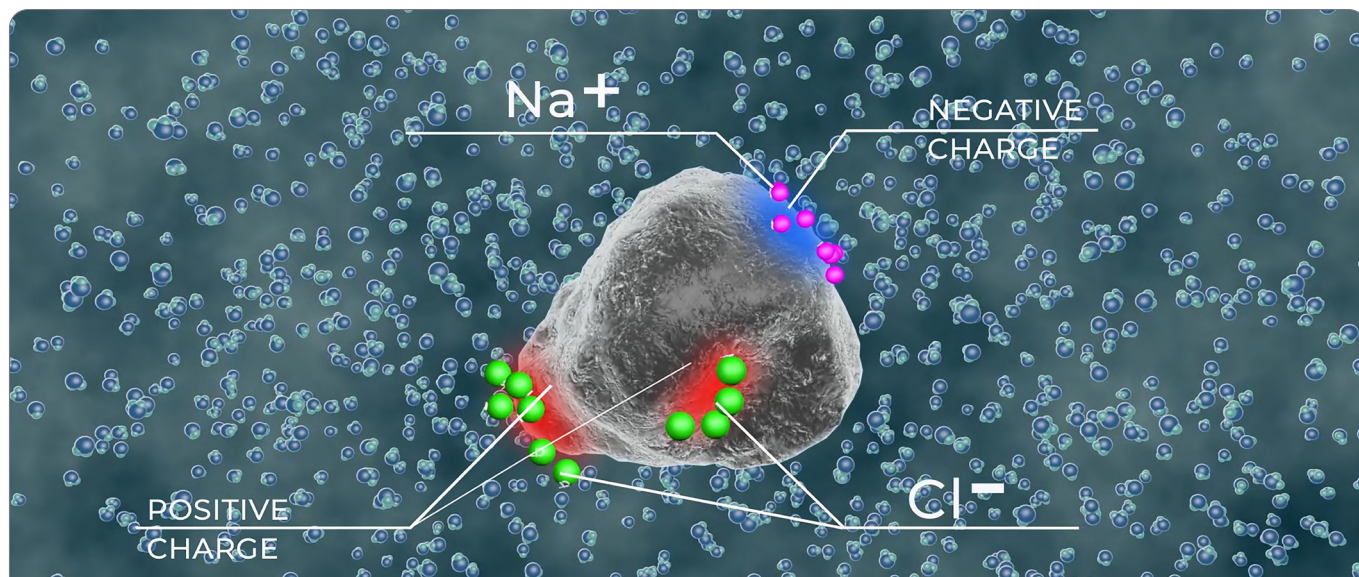
Zdroj: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

K tomu dochází v důsledku chemických změn na jejich povrchu, jako je oxidace, a také v důsledku adsorpce iontů, například sodíku (Na^+) a chloru (Cl^-) v mořské vodě. Nabité nanočástice plastu, obklopené ionty, přitahují molekuly vody a vytváří kolem sebe hydratační obal¹⁵⁸ (obr. 58).

¹⁵⁶Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

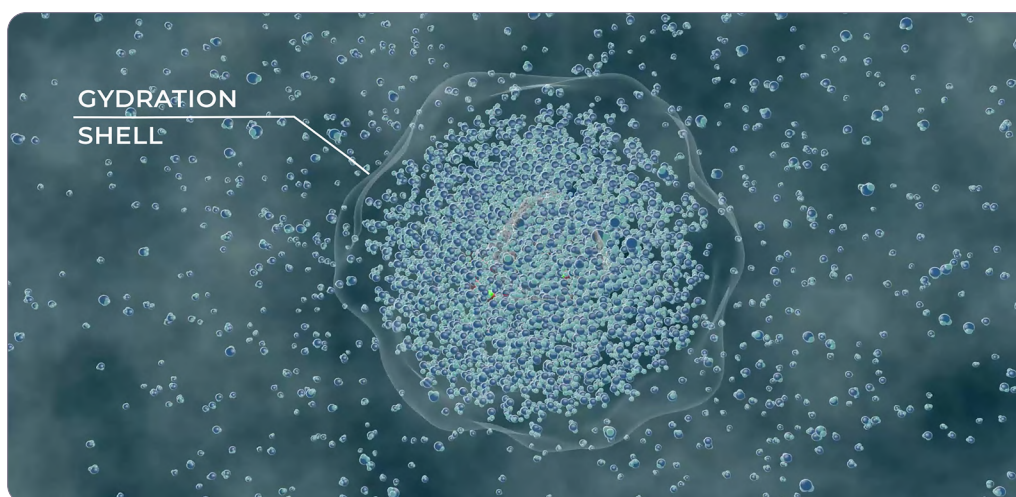
¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>



Obrázek 58 Schematické znázornění procesu tvorby hydratačního obalu kolem nabitých nanočástic plastu: v tomto procesu nanočástice díky svému náboji přitahují ionty, což napomáhá shlukování molekul vody kolem nich, a tím vytváření ochranného hydratačního obalu.

Zdroj: Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Vědci z Polytechnické školy v Lausanne se rozhodli zjistit, jak velký je hydratační obal u iontů, tedy kolik molekul vody na iont reaguje. Ukázalo se, že jeden iont může ovlivnit přibližně milion molekul vody, které ho obklopují. Tento efekt se zesiluje, pokud má částice velký povrchový náboj a vysokou koncentraci adsorbovaných iontů. Výsledkem je, že jedna částice nanoplastu může změnit vlastnosti milionů molekul vody¹⁵⁸ (obr. 59). Molekuly vázané v hydratačním obalu jsou méně pohyblivé¹⁵⁹. V důsledku toho se snižuje celková tepelná kapacita vody^{160, 161}.



Obrázek 59 Schematické znázornění hydratačního obalu kolem částice nanoplastu

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

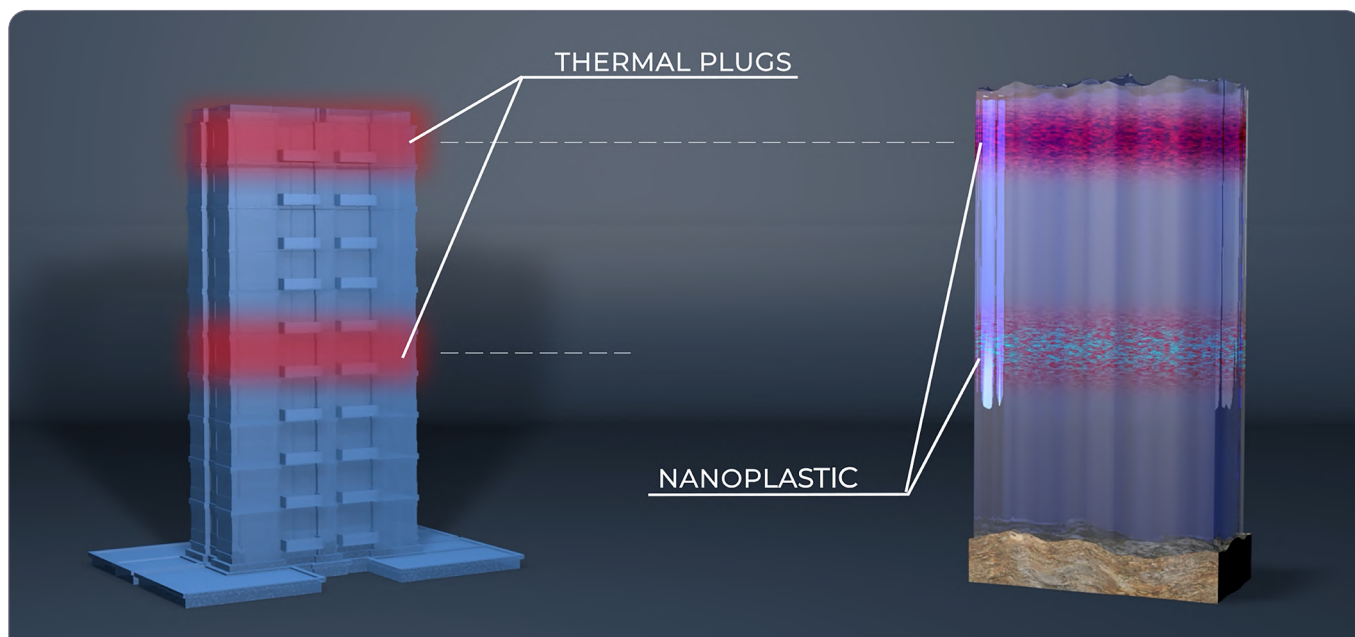
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

Narušení struktury vodíkových vazeb rovněž vede ke snížení tepelné vodivosti¹⁶². V důsledku toho může voda v blízkosti nanoplastů zůstat zahřátá, protože ztrácí schopnost efektivně přenášet teplo.

Zóny zvýšené koncentrace mikro- a nanoplastů v oceánu

Mikro- a nanoplasty se mohou díky oceánským proudům rozšířit po celém oceánu, zatímco hustší částice nebo znečištěné plasty mohou klesat na mořské dno. Hromadění nanoplastů je rovněž pozorováno v oblastech termokliny – přechodové vrstvy mezi teplými povrchovými vodami a chladnějšími hlubinnými vrstvami¹⁶³ (obr. 60).

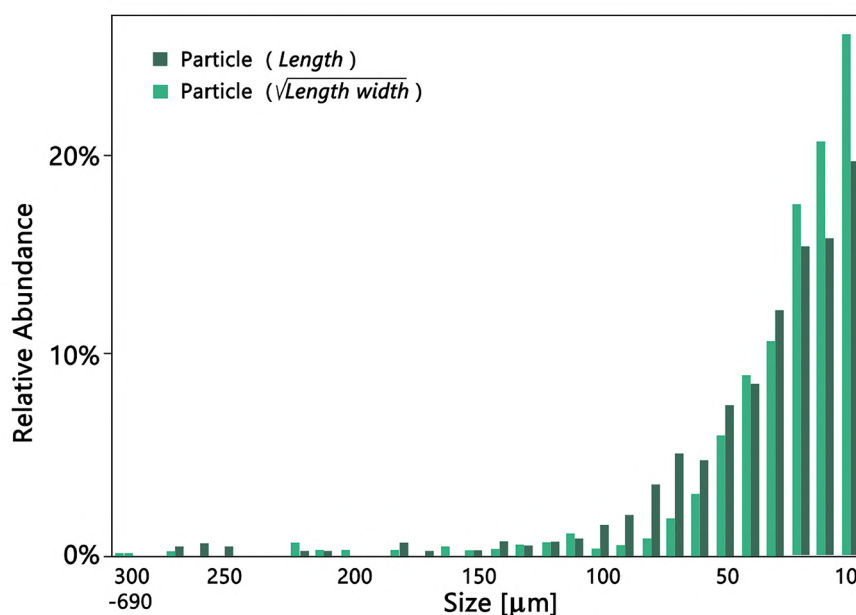


Obrázek 60 Na ilustraci je obrazné přirovnání zón zvýšené koncentrace mikro- a nanoplastů v oceánu k vícepodlažní budově s tepelnými blokádami v 5. a 10. patře. Tyto blokády brání normální výměně tepla a místo rovnoměrného rozložení se teplo hromadí právě v těchto patrech. Termokamera ukáže, že teplota uvnitř budovy je výrazně vyšší než ve stejné budově bez těchto blokády. Podobně i nanoplasty ve vodě narušují přirozené mechanismy výměny tepla a vytváří v oceánu „tepelné blokády“.

Zvyšování koncentrace nanoplastů v oceánech může vést ke změnám globální tepelné bilance. To může ovlivnit zvyšování teploty oceánů a následně vyvolat změny klimatu. Je důležité poznamenat, že i nepatrné množství nanoplastů může mít výrazný dopad na ekosystémy. Zvyšování teploty oceánské hladiny urychluje fragmentaci plastového odpadu na mikro- a nanoplasty (obr. 61). V důsledku toho narůstá množství těchto částic, které se spolu s vodní párou dostávají do atmosféry. Přítomnost mikro- a nanoplastů v atmosféře přispívá k jejímu dodatečnému ohřevu, což následně dále zvyšuje teplotu oceánu. Tím se vytváří začarovaný kruh, v němž se jednotlivé procesy vzájemně posilují.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>



Obrázek 61 Relativní rozložení částic mikroplastů podle velikosti na všech analyzovaných stanicích (np = 543). Na snímce jsou zobrazeny nejmenší (vpravo) a největší (vlevo) částice mikroplastů, které byly detekovány a potvrzeny pomocí Ramanovy mikrospektrometrie.

Zdroj: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Souvislost mezi elektrostatickým nábojem MNP a atmosférickými jevy

Mikro- a nanoplasty se do atmosféry dostávají různými způsoby. Vodní pára, která se odpařuje z povrchu oceánů a dalších vodních ploch, unáší mikročástice do ovzduší¹⁶⁴. Na pevnině jsou hlavními zdroji atmosférických plastů továrny, spalovny odpadu a skládky. Kromě toho se mikroplasty dostávají do vzduchu, když zemědělská hnojiva a plastové mulčovací fólie vysychají a jsou roznášeny větrem. Mikročástice plastů se uvolňují také třením automobilových pneumatik.

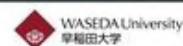
Tyto a mnohé další zdroje významně přispívají ke znečištění atmosféry. Tyto procesy podporují hromadění a šíření mikroplastů v atmosféře, čímž vytvářejí vážné ekologické a klimatické hrozby. Jakmile se mikro- a nanoplastové částice dostanou do atmosféry, mohou sloužit jako kondenzační jádra pro vodní páru. Čím více takových jader existuje, tím rychleji dochází ke kondenzaci vodní páry do kapek. Vzorky vody z mraků odebrané na vrcholcích hor v Japonsku obsahovaly mikroplasty přenášené vzduchem¹⁶⁵ (obr. 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation
Wang et al. (2023) | *Environmental Chemistry Letters* | DOI: 10.1007/s10311-023-01626-x



Obrázek 62 Vzdušné hydrofilní mikroplasty v oblacích ve velkých výškách a jejich úloha při tvorbě oblaků.

Zdroj: Hiroshi Okochi from Waseda University

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>



„Ve znečištěném životním prostředí s velkým množstvím aerosolových částic, jako jsou mikroplasty, se veškerá voda rozdělí mezi toto velké množství aerosolových částic, čímž kolem každé z nich vznikají menší kapičky. Když je kapek více, vzniká méně srážek. Ale protože kapky spadnou až tehdy, když dosáhnou dostatečné velikosti, v oblaku se nahromadí více vody. V důsledku toho pak dochází k vydatnějším srážkám,” uvedla Miriam Friedman, profesorka chemie z katedry meteorologie a atmosférických věd Pensylvánské státní univerzity¹⁶⁶.

To vysvětluje, proč byly v posledních letech v různých regionech pozorovány anomální srážky.

¹⁶⁶The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024)
<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

Elektrické náboje v oblacích

Atmosféra Země je složitým elektrickým systémem, v němž hrají důležitou roli molekuly vody. Od roku 1752, kdy Benjamin Franklin poprvé prokázal, že atmosféra je elektrifikovaná a že bouřky mají elektrickou povahu, je zřejmé, že interakce vody (ve formě páry, kapaliny a ledu) hraje v těchto procesech klíčovou roli. Voda je ve své čisté podobě neutrální, ale během fázových přechodů, jako je tání a mrznutí, a také při srážkách molekul, může předávat ionty jiným částicím, což vede k elektrickým jevům.

V atmosféře způsobují srážky mezi ledovými krystalky, podchlazenými vodními kapkami a dalšími částicemi, zejména za přítomnosti přirozených elektrických polí, oddělení nábojů. Tento proces hraje klíčovou roli při vzniku atmosférické elektřiny včetně bouřkových oblaků. Tento jev je důležitý pro tvorbu oblaků a srážek. Nabité kapky se začnou vzájemně přitahovat, čímž se urychluje jejich slučování do větších kapek, což nakonec vede k tvorbě oblaků schopných vyvolat srážky, jako je déšť, sníh nebo kroupy.



„Náboje jsou opravdu důležité a při tvorbě oblaků jsou náboje prakticky vším. Zjistili jsme, že náboje hrají klíčovou roli,“ uvedl Gerald H. Pollack, Ph.D., profesor bioinženýrství na Washingtonské univerzitě, šéfredaktor a zakladatel interdisciplinárního vědeckého časopisu WATER¹⁶⁷.

V roce 1843 Michael Faraday rovněž objevil, že elektřina vzniká třením kapek vody o kov, což vodu elektrizuje. Tento objev vedl k dalšímu výzkumu nabíjení vody při tření, fázových přechodech a kontaktní elektrizaci a také k pokusům využít tento jev pro vytváření nových zdrojů energie.

Je známo, že vlhký vzduch může neutralizovat povrchový náboj vytvořením tenkého vodního filmu, který umožňuje pohyb iontů a rozptylování nahromaděného náboje. V některých případech však mohou povrchy, které adsorbují vodu, naopak náboj z vlhké atmosféry akumulovat, což rovněž ovlivňuje elektrický stav okolního prostředí¹⁶⁸. Výzkumy ukázaly, že těžké kovy se mohou snadno vázat na mikroplasty a že tato kombinace může potenciálně poškodit ekosystémy planety.

¹⁶⁷AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Mikroplasty a směsi látek na jejich povrchu mohou navíc nejen ulpívat na dalších znečišťujících látkách, ale také s nimi vzájemně reagovat a měnit jejich chemické vlastnosti¹⁶⁹. Když do atmosféry proniknou mikro- a nanoplastové částice, mohou narušit křehkou rovnováhu atmosférických procesů. Plastové částice mohou nést elektrický náboj, který zvyšuje přitažlivost polárních molekul vody, čímž napomáhá tvorbě kapek. Částice plastu se tak stávají nejen běžnými kondenzačními jádry, jako je pyl, mořská sůl nebo saze, ale mohou shlukovat kapky účinněji než neutrální částice¹⁷⁰.

To znamená, že kolem nabitých částic se kapky vody začínají tvořit rychleji, což ovlivňuje strukturu oblaků a může vést ke vzniku větších kapek, a dokonce i anomálně velkých krystalů ledu¹⁷¹. Například nedávno objevila skupina výzkumníků v oblacích na horských vrcholech v Japonsku plastové granule s povrchem, který přitahuje vodu¹⁷².

Vliv na tvorbu oblaků a srážek

Mikroplasty mohou ovlivnit povahu srážek, předpověď počasí, modelování klimatu a dokonce i bezpečnost letů, protože zasahují do procesu, jak krystaly atmosférického ledu formují oblaka.

Výzkum ukázal¹⁷³, že kapky vody obsahující mikroplasty zamrzají při teplotě o 4–10 °C vyšší než kapky bez něj, tedy v nižších výškách. Obvykle kapka vody bez jakýchkoliv nečistot zmrzne při teplotě kolem –38 °C. V případě přítomnosti mikroplastů však 50 % kapek zmrzlo již při teplotách od –18 °C do –24 °C v závislosti na typu plastu.

Kapky vody obsahující mikroplasty zamrzají rychleji a vytvářejí větší ledové částice. Tyto částice jsou unášeny vzhůru stoupavými proudy vzduchu, opakovaně se pokrývají vrstvami ledu a následně dopadají na zem. Tento jev může vést ke zvětšení velikosti krup (obr. 63–64), k zesílení jejich ničivého dopadu a také k aktivaci procesu tvorby ledových oblaků. Výsledkem je změna četnosti a intenzity srážek včetně dešťů a sněžení. To může vyvolat kaskádové efekty, které zasahují klima, hydrologický cyklus a ekosystémy.

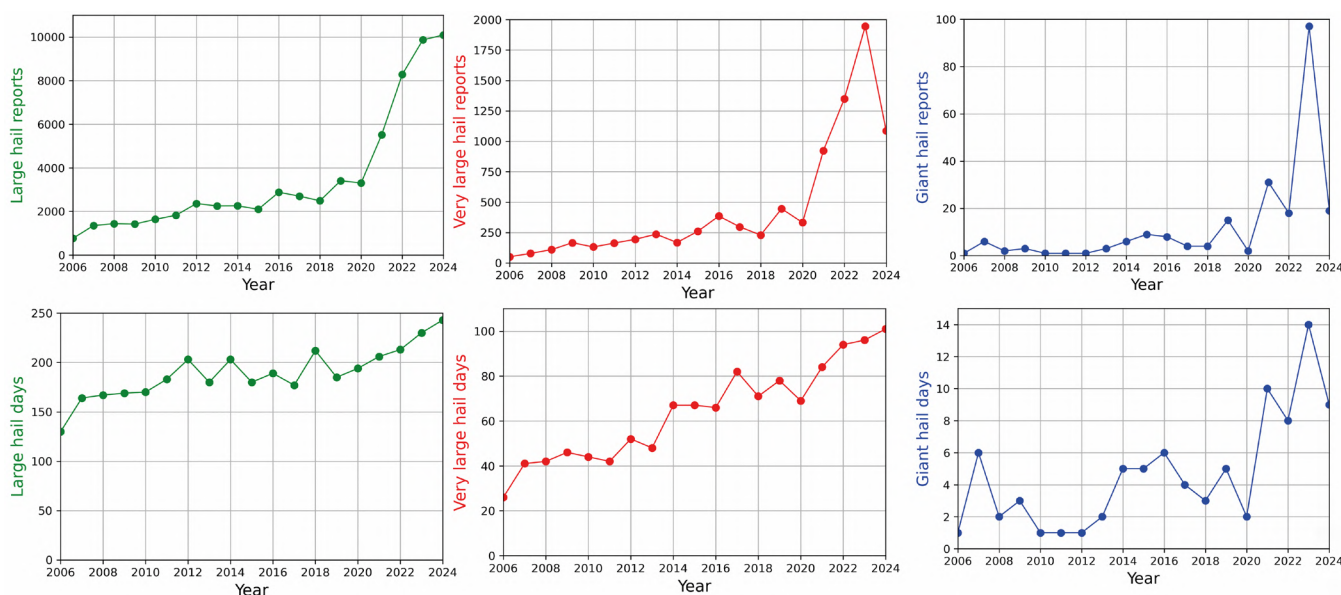
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

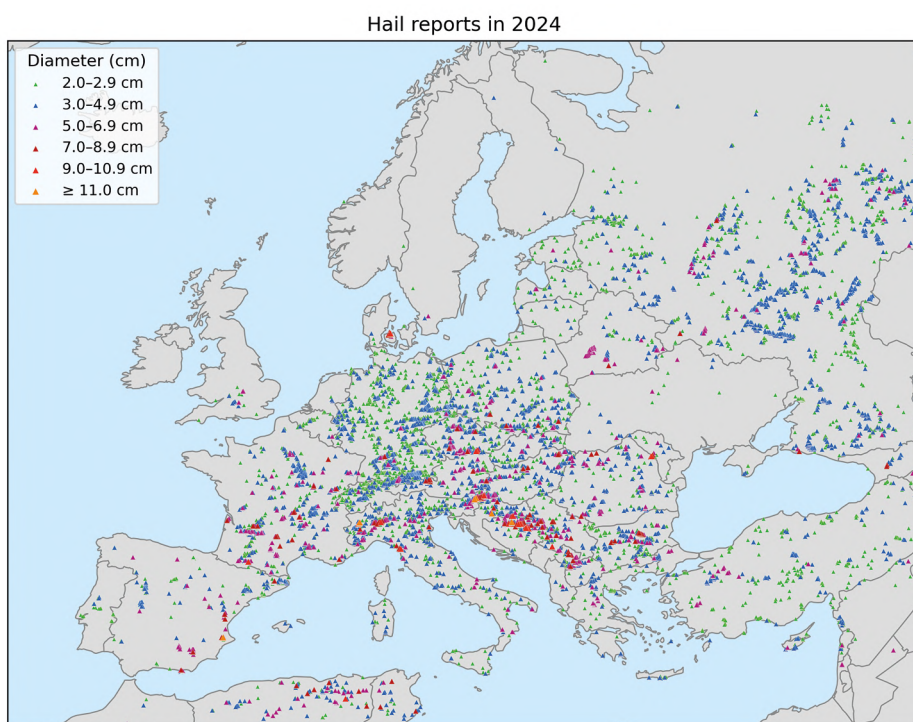
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS ES&T Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>



Obrázek 63 Počet hlášení a dní s velkými (2+ cm), velmi velkými (5+ cm) a obrovskými (10+ cm) kroupami v období od roku 2006 do roku 2024.

Zdroj: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>



Source: ESSL, European Severe Weather Database: www.eswd.eu

Obrázek 64 Prostorové rozložení hlášení o výskytu velkých kroup v Evropě a přilehlých oblastech v roce 2024.

Zdroj: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Když jsou v atmosféře přítomny částice nanoplastů, oblaka se začínají tvořit v nižších výškách – obvykle pod 2 km. To způsobuje, že oblaka jsou méně pohyblivá, což narušuje běžné rozložení srážek. Výsledkem může být, že v některých oblastech nastává sucho, zatímco v jiných dochází k nadměrným srážkám.

Role MNP v narušení klimatické rovnováhy planety

Hustší oblaka začínají zadržovat teplo ve spodních vrstvách atmosféry, podobně jako příkrývka pohlcují a vracejí část tepelného záření zpět k povrchu Země. Tím se snižuje únik tepla do vesmíru a podporuje se ohřívání atmosféry. Zvýšení teploty podporuje další odpařování vody z oceánů a větší množství vlhkosti v atmosféře vede k dalšímu oteplování. Vzniká tak začarovaný kruh. Je důležité poznamenat, že na každý stupeň oteplení se množství vlhkosti ve vzduchu zvyšuje přibližně o 7 %¹⁷⁴ a frekvence blesků narůstá o 12 %¹⁷⁵.



Jak poznamenává Kevin Trenberth, uznávaný klimatolog z amerického Národního centra pro výzkum atmosféry (NCAR) a hlavní autor zpráv IPCC: „**Kombinace zvýšené teploty a vyššího obsahu vodní páry v atmosféře způsobuje její větší nestabilitu. To vede k zesílení konvekce a nárůstu počtu bouří. Některé z nich, ty nejsilnější, přecházejí v elektrické bouře. Za těchto podmínek roste riziko výskytu silných elektrických bouří.**

Když se bouřky začnou spojovat a vzájemně posilovat, jak se to děje u tropických bouří, mohou přerůst v silnější hurikány. Všechny tyto faktory se sčítají a zvyšují riziko výskytu takového typu bouří, jako jsou silné elektrické bouře a zejména supercely, které způsobují kroupy, a na některých místech za vhodných podmínek mohou vyvolat tornáda.“

Tímto způsobem extrémní ohřívání oceánu, nadbytek elektřiny a tepla v atmosféře zhoršují klimatickou situaci a vedou k ničivějším klimatickým jevům, jako jsou silné bouře, hurikány, blesky a sprity.

Plasty v atmosféře nejen znečišťují životní prostředí, ale také mění klimatické procesy, protože ovlivňují tvorbu oblaků a srážek. Zesilují elektrostatický náboj v atmosféře, urychlují kondenzaci vodní páry a ovlivňují hustotu oblaků, což může vést ke zvýšení intenzity vichřic, bouří a dalších ničivých přírodních jevů. Stojíme na prahu porozumění rozsáhlým důsledkům tohoto vlivu na klima, což vyžaduje naléhavá a komplexní opatření ke snížení znečištění plastovými částicemi v oceánech a atmosféře.

¹⁷⁴NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

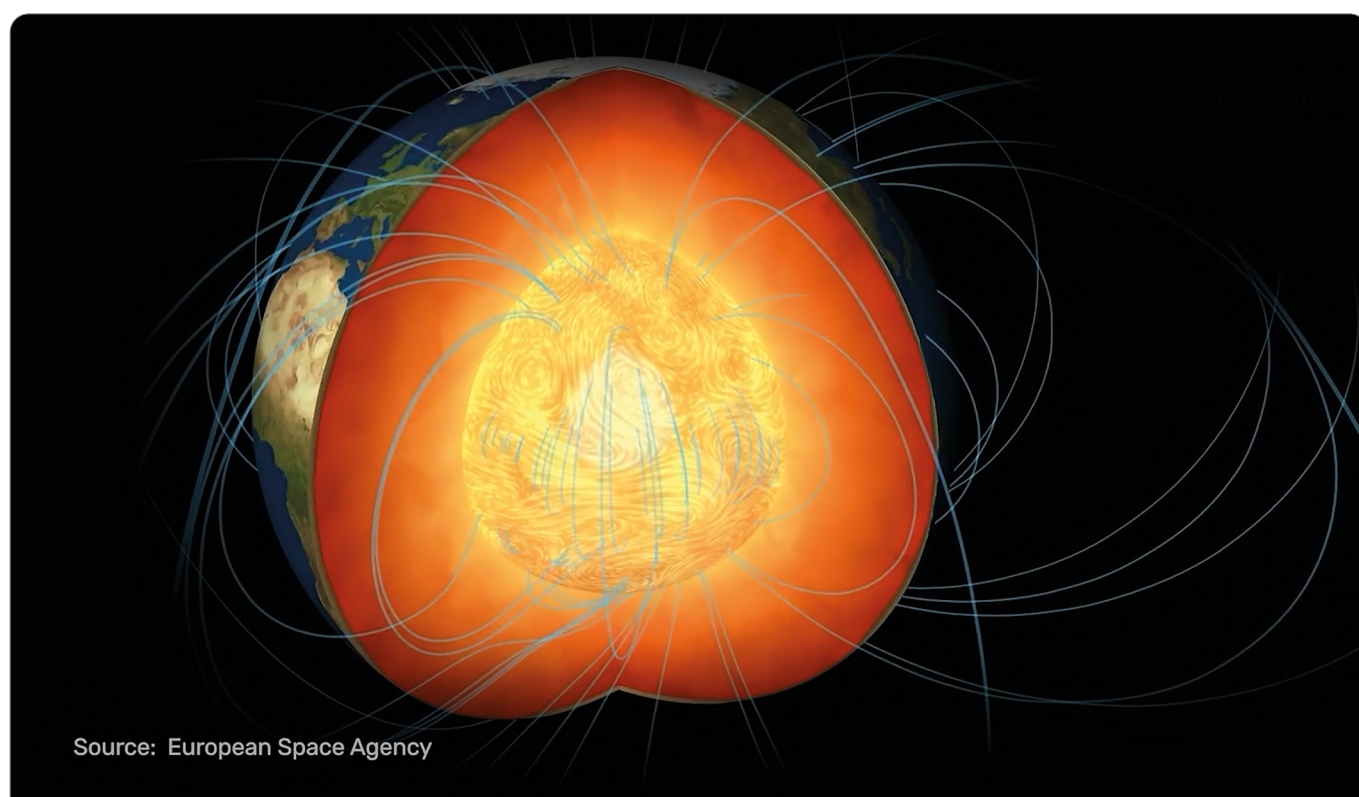
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵ Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Interakce oceánu s magnetickým polem Země

Oceány pokrývají přibližně 70 % zemského povrchu a představují nejen obrovskou zásobárnu vody, ale hrají i klíčovou roli v rámci složitých elektrických procesů planety. Interagují s magnetickým polem Země a podílejí se na jejích elektromagnetických procesech.

Magnetické pole Země chrání povrch planety před slunečním větrem a kosmickým zářením a funguje jako přirozený štít. Bez tohoto pole by byla atmosféra zničena. Geomagnetické pole vzniká v nitru planety, kde se kapalné vnější jádro složené z kovů pohybuje kolem pevného vnitřního jádra a vytváří přirozený generátor – proces známý jako geodynamo (obr. 65).



Obrázek 65 Schematické znázornění procesu vzniku geomagnetického pole: kapalné vnější jádro Země se otáčí kolem pevného vnitřního jádra a vytváří přirozený generátor – geodynamo, díky němuž vzniká magnetické pole planety.

Zdroj: European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

Magnetické pole Země interaguje s elektrickými jevy v oceánech a atmosféře. Mořská voda má díky obsahu solí a rozpuštěných iontů výraznou elektrickou vodivost, což jí umožňuje vést elektrický proud. Tento proud pak interaguje s magnetickým polem a vytváří složité elektromagnetické procesy, které hrají roli v dynamice planetárního magnetického pole.

Jak již bylo uvedeno, znečištění oceánů – zejména mikro- a nanoplasty – může měnit chemické a elektrické vlastnosti vody. Čím vyšší je koncentrace znečišťujících látek, tím více jsou narušovány přirozené elektromagnetické procesy.

Při odpařování znečištěné vody mohou mikroskopické kapky a aerosoly přenášet mikro- a nanoplasty, těžké kovy¹⁷⁶ a další látky do atmosféry, což může ovlivňovat lokální elektromagnetické procesy. Podobá se to situaci, kdy kovový předmět umístěný v blízkosti magnetu mění rozložení magnetického pole a oslabuje jeho sílu v určité oblasti.

Vliv znečištění oceánů na magnetické pole Země si vyžaduje další výzkum, zejména v kontextu globálních klimatických změn. Porozumění těmto procesům může pomoci posoudit jejich potenciální dopad na klimatický systém a ekosystémy planety.



¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

DOPAD MIKRO- A NANOPLASTŮ NA LIDSKÉ ZDRAVÍ



„Plasty znečišťují nejen naše oceány a vodní toky a zabíjejí mořský život – jsou přítomny v nás všech a nelze se vyhnout jejich konzumaci. Globální opatření jsou naléhavá a nezbytná pro řešení této krize.“

Marco Lambertini
generální ředitel WWF International

Mikro- a nanoplasty jako nový rizikový faktor pro vznik epidemií 21. století

Za posledních 30 let je patrný nepřetržitý nárůst výskytu infarktů, mozkové mrtvice, onkologických onemocnění, cukrovky, alergií a zánětlivých onemocnění střev. Pokles imunity je pozorován jak u dětí, tak u dospělých po celém světě. Roste výskyt neplodnosti. Přestože jsou údaje o počtu neplodných lidí a párů omezené, podle odhadu Světové zdravotnické organizace čelí problémům s plodností přibližně 17,5 % dospělých¹⁷⁷, tedy zhruba každý šestý člověk na světě.

Od roku 2010 je pozorován pokles intelektuálních schopností u lidí. Dokonce i v rozvinutých zemích si 25 % dospělých nedokáže poradit se základními matematickými úlohami; například v USA tento podíl dosahuje 35 %. Klesá schopnost soustředění, logického myšlení a řešení jednoduchých úloh. Stále častěji se vyskytují různé formy demence a poruch kognitivních funkcí¹⁷⁸.

Nárůst psychických poruch překonává v růstu fyzická onemocnění¹⁷⁹. Úzkostné poruchy, autismus, deprese a bipolární porucha, syndrom poruchy pozornosti s hyperaktivitou (ADHD) nabývají rozměrů pandemie.

Stále více důkazů naznačuje, že mikro- a nanoplasty se podílejí na patogenezi různých onemocnění.

¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023)

<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

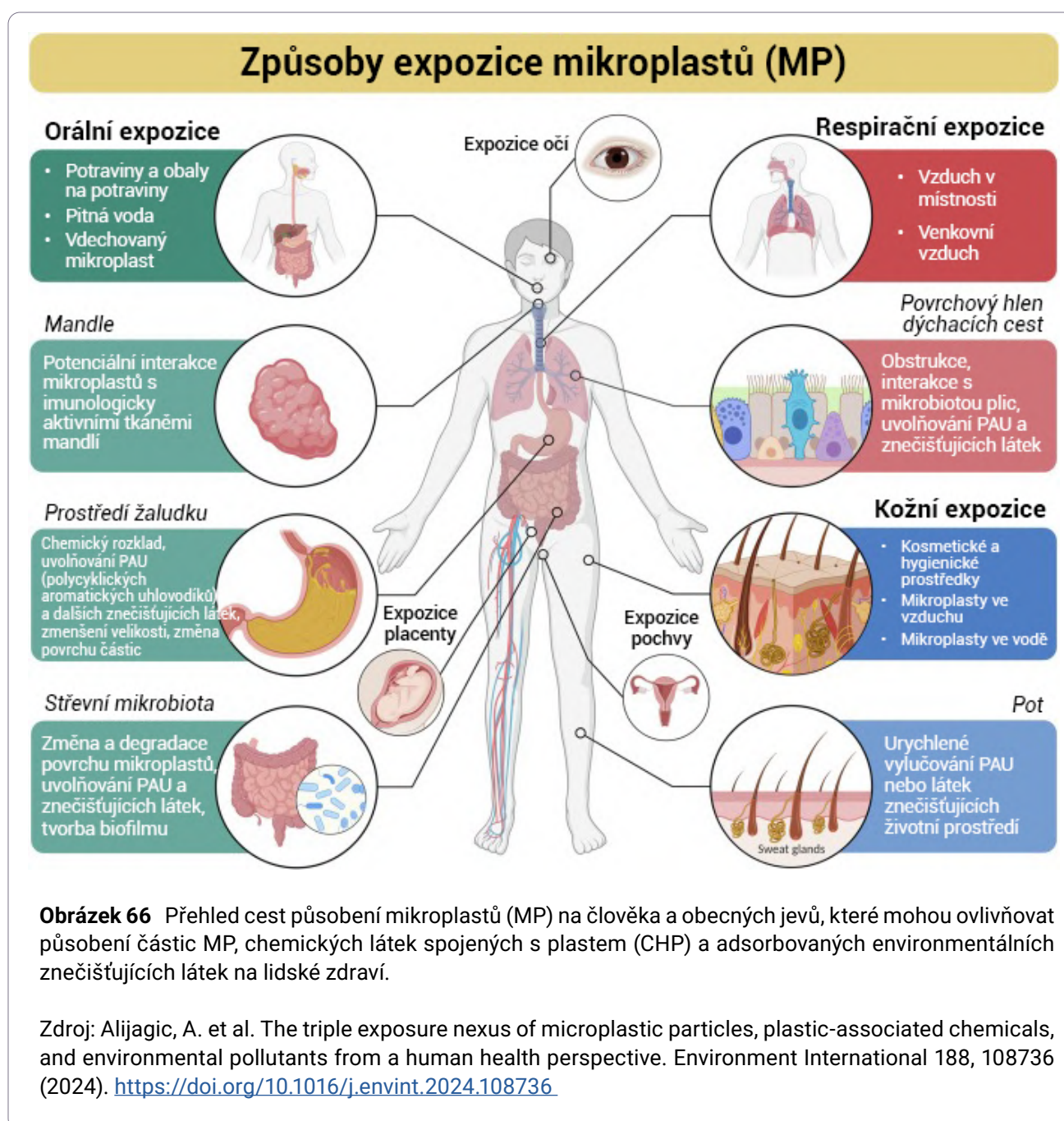
¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (accessed 1 May 2025).

Molekulární mechanismy toxicity MNP.

Poškození DNA, mitochondrií a buněčných membrán

Mikro- a nanoplasty (MNP) patří k nejrozšířenějším formám antropogenního znečištění životního prostředí. Díky svým fyzikálně-chemickým vlastnostem jsou plastové částice schopny putovat na značné vzdálenosti a překonávat geografické i ekologické bariéry. Hlavními cestami, kterými mikro- a nanoplasty pronikají do lidského organismu, jsou požití (s vodou a jídlem), vdechování vzduchem a absorpce kůží¹⁸⁰ (obr. 66).



¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. Front. Cell. Infect. Microbiol. 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Jak bylo uvedeno v části „*Důsledky plastového znečištění: mikro- a nanoplast (MNP) jako nový faktor planetární krize*“, mořské prostředí je významným zdrojem sekundárních mikroplastů. Podle odhadů přináší mořský vánek do pobřežních oblastí přibližně 136 tisíc tun mikroplastů ročně. Kromě toho se otevřené vodní plochy v urbanizovaných oblastech, včetně kanalizačních a dešťových systémů, stávají významnými centry akumulace a dalšího šíření plastových částic, jejichž množství může překračovat dřívější odhady až o 90 %.

Potraviny představují důležitou cestu vstupu MNP do lidského organismu. Rostliny dokážou akumulovat nanoplasty prostřednictvím kořenového systému: při zavlažování nebo během srážek pronikají částice do půdy a jsou vstřebávány spolu s vodou, putují cévními svazky (xylémem) a hromadí se v pletivech listů a plodů¹⁸¹. Nejvyšší obsah plastových částic byl zjištěn v takových plodinách, jako jsou jablka, hrušky, mrkev a brokolice.

Mořské plody jsou rovněž jednou z cest přenosu MNP. Požití mikroplastů mořskými organismy je zaznamenáno na všech úrovních potravního řetězce. Podle studie Newcastleké univerzity může průměrný člověk zkonzumovat až 250 g mikroplastů ročně, což odpovídá přibližně 5 g týdně – tedy hmotnosti jedné plastové karty. Kromě toho se při ohřívání plastových obalů, včetně dětské stravy, v mikrovlnných troubách může do potravin uvolnit více než 2 miliardy nanočástic a 4 miliony mikročástic plastů na každý čtvereční centimetr povrchu.

Mikroplasty jsou široce rozšířeny v pitné vodě. Výzkumy ukazují, že až 90 % vzorků vodovodní vody v USA obsahuje částice MNP. Hlavními cestami jejich vstupu do vodních systémů jsou odpadní vody, průmyslové emise a atmosférické srážky obsahující plast zachycený ze vzduchu. Při odpařování kontaminované vody se plastové částice mohou dostávat do atmosféry a následně padat s deštěm nebo sněhem. V rámci výzkumu provedeného v 11 amerických národních parcích bylo za 14 měsíců zaznamenáno usazení více než 1 000 tun plastových částic ze srážek – objem, který by stačil k výrobě 120 milionů plastových lahví.

Aerosolové šíření MNP patří k nejnebezpečnějším mechanismům jeho působení na člověka. Plastové částice se zvedají z povrchu moří a vodních ploch, jsou unášeny vzdušnými masami a stávají se součástí atmosférického aerosolu. Odhady ukazují, že v podmínkách velkoměsta může dospělý člověk během dvouhodinové procházky vdechnout až 106 tisíc částic mikroplastu, přičemž v oblastech u vodních ploch tato hodnota stoupá až desetinásobně.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Nová studie představená na konferenci *Americké kardiologické společnosti* (ACC.25) odhalila, že vyšší expozice mikroplastům, které mohou být nevědomky zkonsumovány nebo vdechnuty, souvisí s vyšším výskytem chronických neinfekčních onemocnění. Výzkum ukázal, že v komunitách nacházejících se podél východního a západního pobřeží USA, podél Mexického zálivu a břehů určitých jezer v USA jsou vyšší koncentrace mikroplastů v životním prostředí spojeny se zvýšeným výskytem chronických neinfekčních onemocnění, jako je hypertenze, cukrovka a mozková mrtvice.



„Tato studie přináší první důkazy o tom, že expozice mikroplastům ovlivňuje zdraví kardiovaskulárního systému, zejména pokud jde o chronická neinfekční onemocnění, jako je vysoký krevní tlak, cukrovka a mrtvice,“ uvedl Sai Rahul Ponnana, MA, výzkumný pracovník v oblasti datové analýzy na Lékařské fakultě Case Western Reserve v Ohiu a hlavní autor studie. **„Když jsme do naší analýzy zahrnuli 154 různých socioekonomických a environmentálních charakteristik, nečekali jsme, že se mikroplasty dostanou mezi deset nejvýznamnějších faktorů predikujících výskyt chronických neinfekčních onemocnění¹⁸².“**

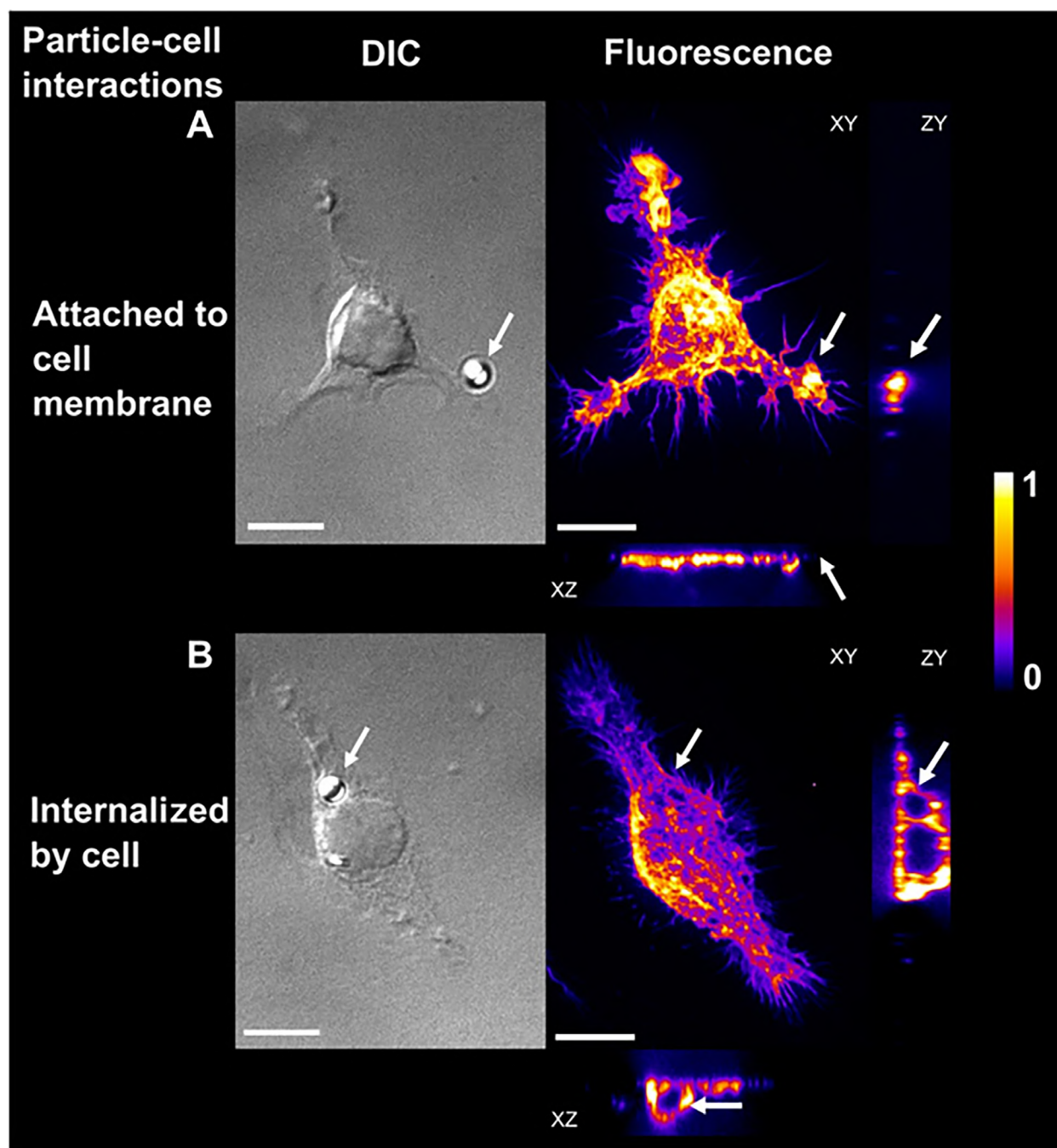
Mikro- a nanoplasty jsou schopny pronikat biologickými bariérami, včetně střevní, plicní, hematoencefalické bariéry a placenty¹⁸³. Mikroplasty vystavené sladké nebo mořské vodě snáze pronikají do buněk (obr. 67) díky usazování biomolekul na jejich povrchu. Tyto biomolekuly vytvářejí povlak (eko-korunu), který usnadňuje jeho průchod trávicím traktem a začlenění mikroplastů do tkání. Takový povlak funguje jako mechanismus, který napomáhá průniku plastů do buněk – podobně jako trojský kůň¹⁸⁴.

¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saqib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. *Front. Toxicol.* 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>



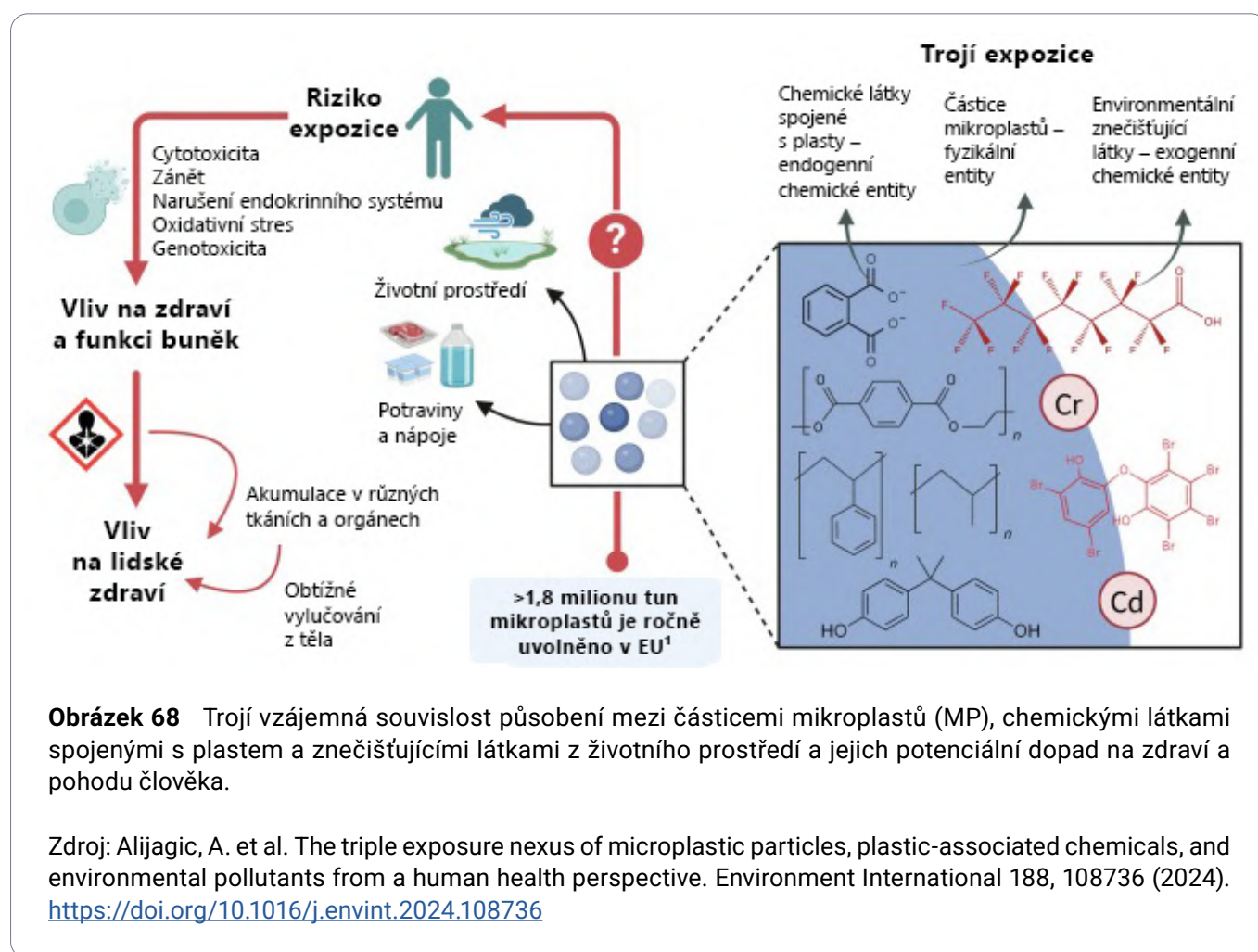
Obrázek 67 Zobrazení interakce částic mikroplastu, které byly po dobu 2 týdnů vystaveny působení sladké vody, s buňkou.

DIC: Diferenciální interferenční kontrastní mikroskopické snímky interakcí částic a buněk. Fluorescence: Snímky buněk z konfokální mikroskopie s rotujícím diskem s fluorescenčně značeným vláknitým aktinem (obrázek v nepravých barvách, maximální projekce intenzity znázorňující relativní jednotky). Projekce XY, YZ a XZ trojrozměrných konfokálních obrazů umožňují rozlišit mikroplastové částice (A), které jsou přichyceny k buněčným membránám, nebo (B) internalizované mikroplastové částice. Šipky označují polohu mikroplastových částic. Měřítka: 10 μm .

Zdroj: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Toxicita mikroplastů závisí na celé řadě faktorů: velikosti, tvaru, povrchovém náboji, procesu stárnutí, době expozice, složení příměsí a dalších vlastnostech¹⁸⁵. Menší částice snáze pronikají do buněk a vyvolávají výraznější oxidační stres. Povrchový náboj mikroplastů je klíčovým parametrem určujícím účinnost buněčného pohlcování (má vliv na adhezi). Mikroplasty navíc obsahují polymery a různé příměsi, které zesilují jejich negativní dopad¹⁸⁶.

Mikro- a nanoplastové částice, chemické sloučeniny obsažené v plastech a znečišťující látky z okolního prostředí, které plasty absorbují, působí komplexně¹⁸⁷ negativně na lidské zdraví (obr. 68) a představují vážné ohrožení.



¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸⁷Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

1 gram mikroplastů může obsahovat až 24 000 nanogramů perzistentních organických polutantů¹⁸⁷. Tyto látky jsou vysoce toxické, hromadí se v organismech a mohou škodit i při velmi nízkých koncentracích.

Mikroplasty mohou zvýšit škodlivost jiných znečišťujících látek¹⁸⁸, protože jak samotné mikroplasty, tak směs látek na jejich povrchu se mohou nejen přichytávat k jiným znečišťujícím látkám, ale také s nimi vzájemně reagovat a měnit jejich chemické vlastnosti.

Výzkumy ukazují, že expozice mikro- a nanoplastům vyvolává toxické účinky na různé biologické organismy včetně:

- **makromolekuly:** poškození DNA, narušení genové exprese a změny v transkripci proteinů
- **buňky a orgány:** poruchy buněčného dělení, cytotoxicita, apoptóza, oxidační stres, rozvrat metabolismu a zvýšená intracelulární koncentrace vápníku
- **tkáň:** zánětlivé procesy, fibróza, osteolýza kostní tkáně
- **orgány:** imunitní reakce, orgánová dysfunkce, neurotoxická, karcinogeneze, změny metabolismu a energetické rovnováhy
- **zvířecí a lidské populace:** snížená plodnost, zpomalený růst, depopulace

Tyto účinky zdůrazňují víceúrovňové působení mikro- a nanoplastů na biologické systémy¹⁸⁹.

1. Narušení buněčných funkcí

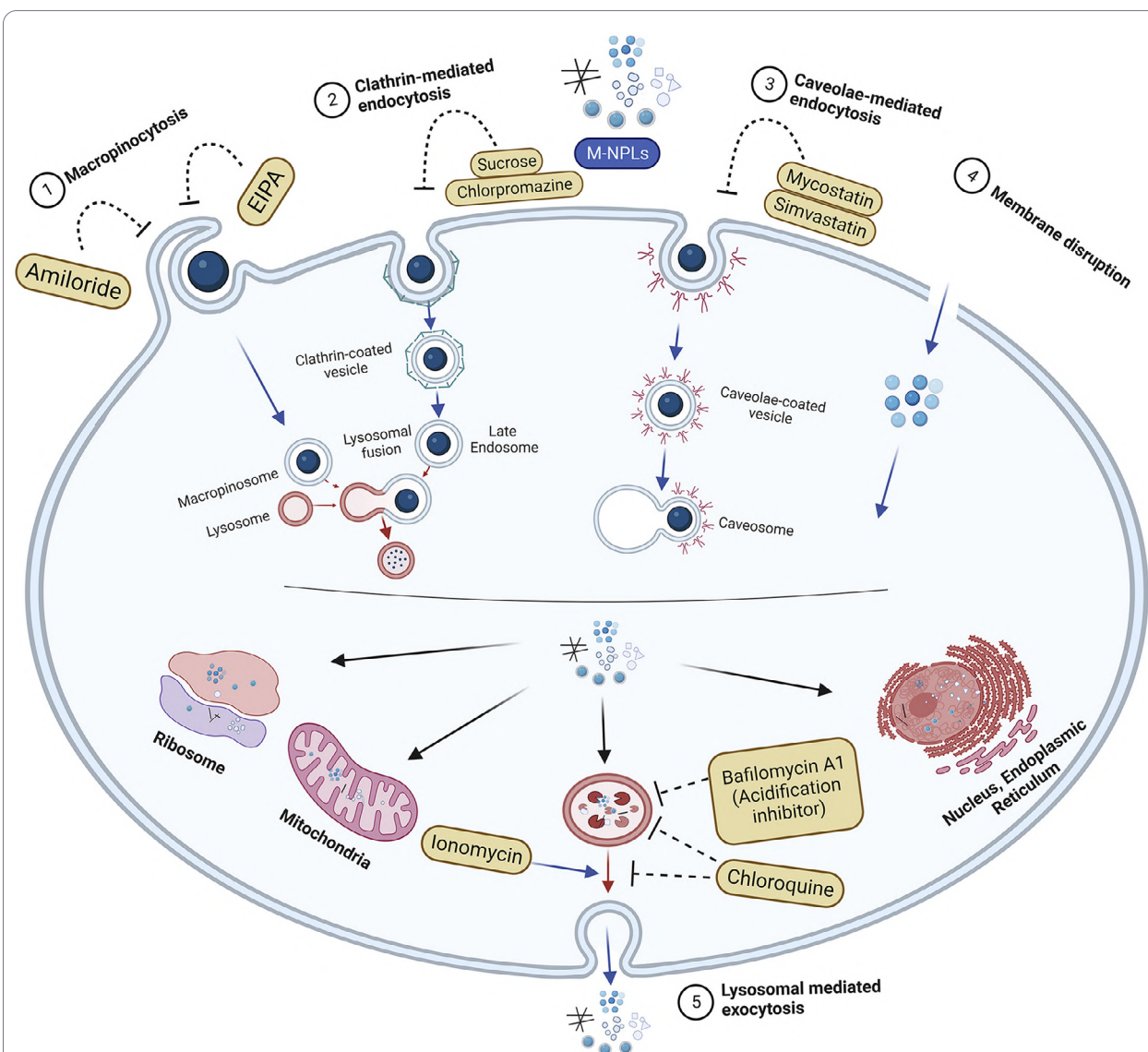
Poškození organismu vlivem mikro- a nanoplastů začíná na buněčné úrovni¹⁹⁰. MNP interagují s buněčnými membránami prostřednictvím různých mechanismů včetně vodíkových a halogenových vazeb, dále hydrofobních, van der Waalsových a elektrostatických interakcí. Mikro- a nanoplasty působí jako destabilizační faktor, narušují integritu a funkci buněčných membrán (obr. 69).

¹⁸⁷ Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>



Obrázek 69 Buněčné pohlcování a uvolňování M-NPL. M-NPL využívají různé typy endocytózy.

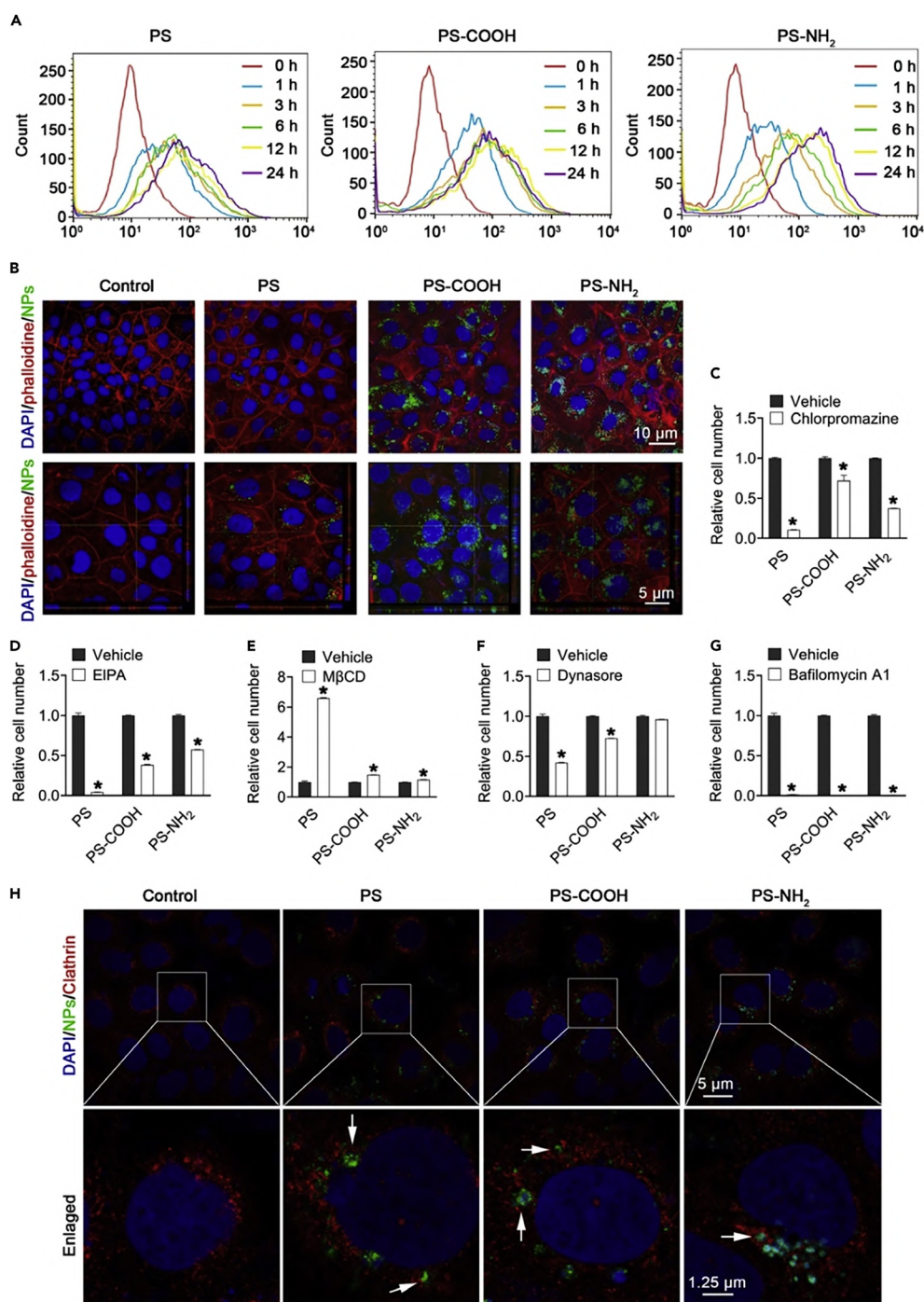
(1) Makropinocytózu, (2) endocytózu zprostředkovanou klatrinem, (3) endocytózu zprostředkovanou kaveolami a narušení buněčné membrány pro internalizaci. M-NPL jsou z buněk uvolňovány prostřednictvím (4) endocytózy zprostředkované lysozomy.

Zdroj: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Díky své malé velikosti jsou MNP schopny snadno pronikat do lidských buněk (obr. 70). Jejich malé rozměry a elektrostatický náboj, který se na MNP hromadí, podmiňují jejich systémové působení na organismus¹⁹¹.

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>



Obrázek 70 Buňky Caco-2 internalizující nanoplasty.

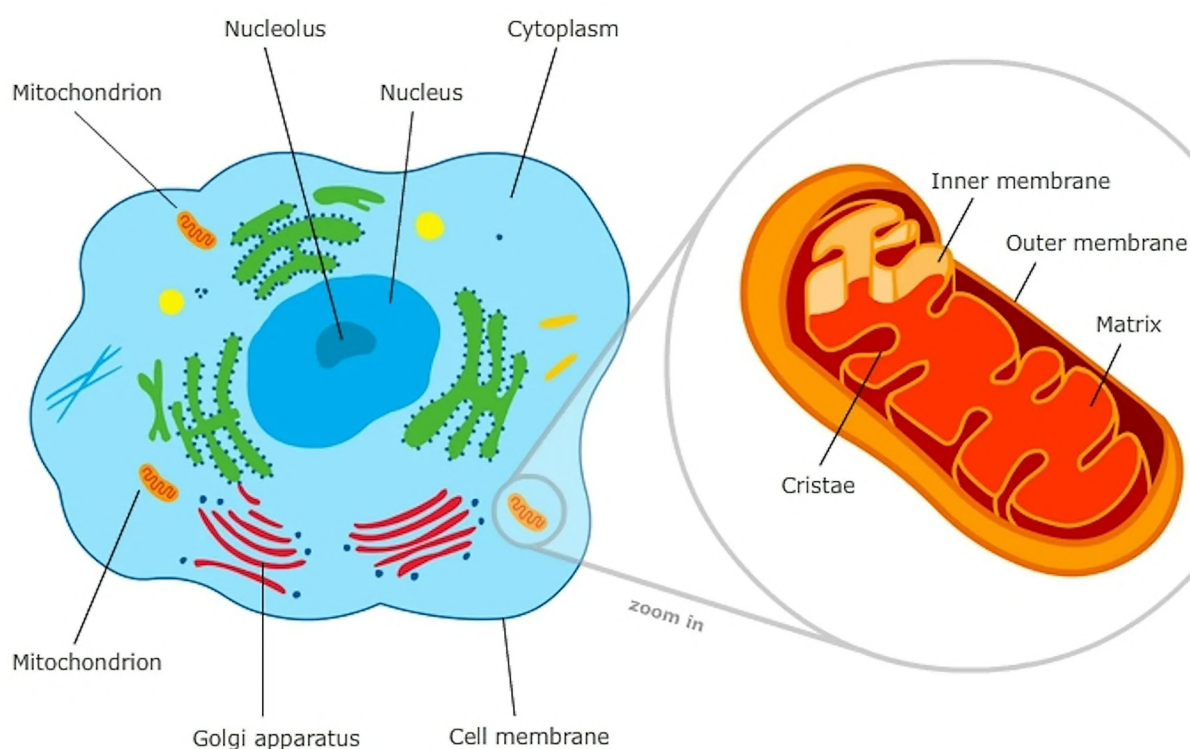
(A–G) Analýza internalizace nanoplastů buňkami Caco-2 pomocí průtokové cytometrie (A) a konfokální mikroskopie (B). Analýza průtokové cytometrie buněk Caco-2 předem ošetřených po dobu 1 hodiny chlorpromazinem (C), EIPA (D), M β CD (E), dynasorem (F) a bafilomycinem A1 (G), následovaná expozicí nanoplastům po dobu 24 hodin. Lokalizace NP ve váčcích zprostředkovaných klatrinem zkoumaná pomocí konfokální mikroskopie (H).

Zdroj: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Klíčovým mechanismem destruktivního působení na buněčné úrovni je poškození buněčných membrán, mitochondrií a narušení DNA. Elektrostaticky nabitě částice mikro- a nanoplastů dokážou destabilizovat membránový potenciál buněk, zejména neuronů, což vede ke spontánním elektrickým signálům, poruchám v přenosu informací mezi buňkami nebo buněčné smrti.

Uvnitř buňky je hlavním terčem destruktivního působení nanoplastů mitochondrie – klíčová organela zajišťující přežití a regeneraci buňky (obr. 71). Mitochondrie, kromě své úlohy „energetických elektráren“, plní i mnohé další funkce, které určují zdraví organismu, odolnost vůči stresu, rozvoj chronických onemocnění a procesy stárnutí.



© 2007-2011 The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

Obrázek 71 Schematické znázornění buňky a mitochondrie

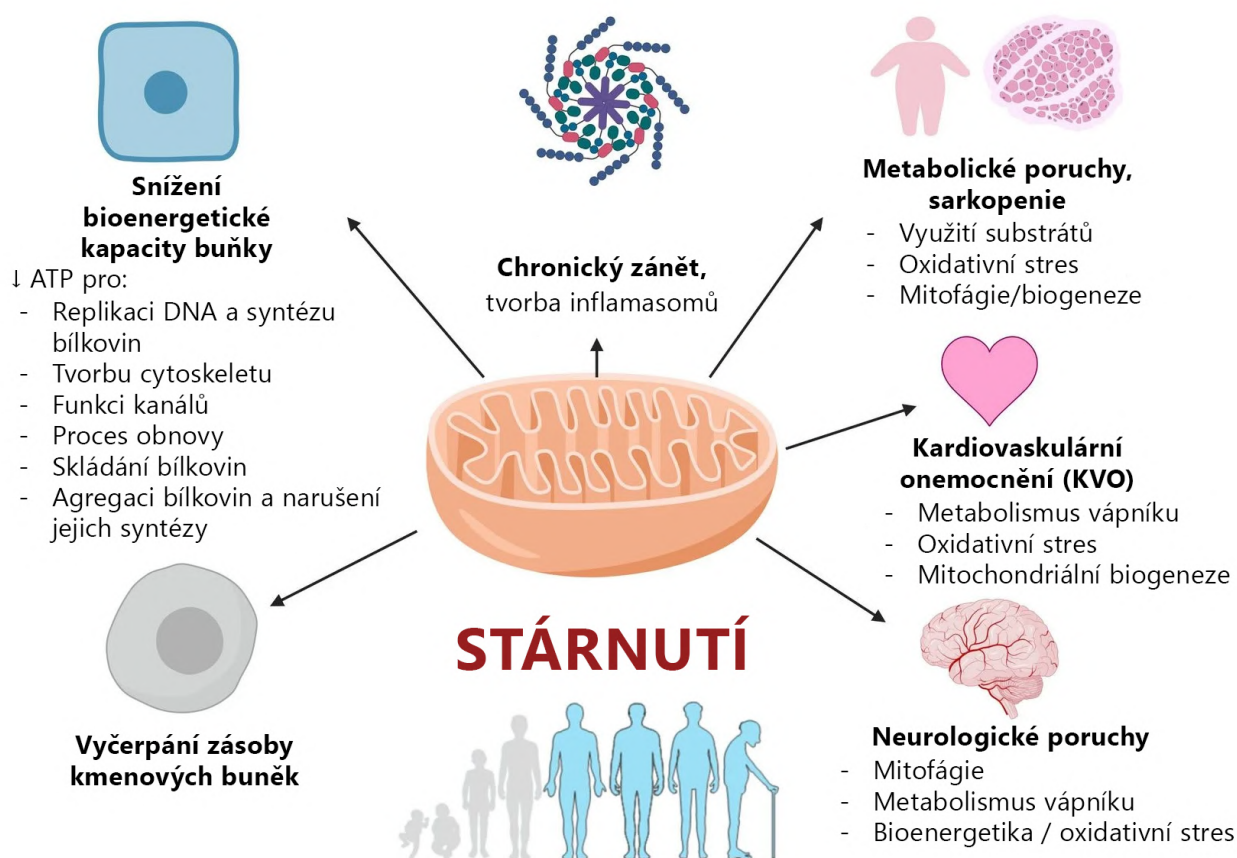
Správné fungování mitochondrií je klíčové pro přežití buněk, udržení homeostázy a bioenergetiku. Struktura a funkce mitochondrií jsou udržovány systémem kontroly kvality mitochondrií, který zahrnuje procesy mitochondriální biogeneze, mitochondriální dynamiky (fúze/dělení), mitofagie a mitochondriální odpovědi na nesbalené proteiny (UPR^{MT}). Dysfunkce nebo poškození mitochondrií souvisí se vznikem a rozvojem řady lidských onemocnění, včetně neurodegenerativních, kardiovaskulárních a věkem podmíněných chorob, diabetu a rakoviny. Environmentální stres a znečišťující látky mohou zvyšovat citlivost mitochondrií k poškození, což vede k mitochondriální dysfunkci. Přibývá důkazů o vlivu nanoplastů a mikroplastů na zdraví a funkci mitochondrií. Bylo prokázáno, že mikro- a nanoplasty vyvolávají oxidační stres a tvorbu reaktivních forem kyslíku, což nakonec mění potenciál mitochondriální membrány. MNP mohou pronikat biologickými bariérami v lidském těle a být vstřebávány buňkami, přičemž potenciálně narušují mitochondriální dynamiku, bioenergetiku a signální dráhy, a tím ovlivňují buněčný metabolismus a funkce.

Vzhledem ke klíčové roli mitochondrií ve zdraví buněk i celého organismu představují MNP významnou hrozbu pro zdraví a funkci mitochondrií. Dosavadní poznatky zdůrazňují naléhavost řešení komplexního problému znečištění MNP – nejen za účelem ochrany životního prostředí, ale i lidského zdraví¹⁹².

Mitochondrie syntetizují ATP – univerzální molekulu energie, která zajišťuje energii pro všechny biologické procesy: od svalových kontrakcí a přenosu nervových impulzů až po syntézu hormonů a dělení buněk. Podílejí se na metabolismu sacharidů, tuků a aminokyselin a udržují metabolickou rovnováhu v těle.

Mitochondrie regulují buněčnou smrt (apoptózu) – kriticky důležitý proces, který zabraňuje hromadění poškozených nebo potenciálně nebezpečných buněk. Poruchy tohoto systému jsou spojeny s rozvojem onkologických, autoimunitních a neurodegenerativních onemocnění. Mitochondrie hrají klíčovou roli v antioxidační ochraně, protože regulují hladinu reaktivních forem kyslíku (ROS). Při narušení této rovnováhy dochází k hromadění poškození, urychluje se stárnutí a zvyšuje se riziko chronických zánětů a nemocí (obr. 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>



Obrázek 72 Porucha funkce mitochondrií způsobená znečištěním životního prostředí může vést k rozvoji různých onemocnění.

Zdroj: Borisova, O. Mitochondria medicine. Open Longevity. (2019)
https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (K datu: 1. 5. 2025).

Mitochondrie mají vlastní DNA, která se dědí po mateřské linii, což z nich činí jedinečné účastníky dědičných onemocnění. Regulují aktivitu jaderných genů a umožňují buňkám přizpůsobovat se změnám vnějšího prostředí. Podílejí se také na syntéze steroidních hormonů – kortizolu, estrogenů a testosteronu. Právě narušení mitochondriálních funkcí v důsledku působení nanoplastů stojí na počátku kaskády patologických procesů, které mohou vést k vážným a potenciálně nevratným následkům – jak v činnosti jednotlivých orgánů a systémů, tak i celého organismu (Tabulka 1).

Neurologická onemocnění	Parkinsonova choroba, Alzheimerova choroba, Amyotrofická laterální skleróza (ALS), Epilepsie, Migrény, Mitochondriální encefalomyopatie (například syndrom MELAS)
Kardiovaskulární onemocnění	Kardiomyopatie, Srdeční selhání, Ateroskleróza (prostřednictvím oxidačního stresu)
Imunitní a zánětlivá onemocnění	Autoimunitní onemocnění (např. systémový lupus erythematoses), Chronické zánětlivé stavy (v důsledku dysfunkce ROS a cytokinové signalizace)
Metabolické poruchy	Cukrovka 2. typu, Obezita, Metabolický syndrom, Poruchy metabolismu mastných kyselin a laktátu
Onkologická onemocnění	Při mitochondriální dysfunkci dochází ke zvýšenému riziku mutací a maligních transformací buněk
Svalová onemocnění	Mitochondriální myopatie, Chronická svalová slabost a únava
Onemocnění smyslových orgánů	Pigmentová retinopatie, Leberova optická neuropatie (dědičná ztráta zraku)
Genetické mitochondriální syndromy	Leighův syndrom, Kearns-Sayreův syndrom, Barthův syndrom

Tabulka 1 Přehled některých onemocnění spojených s mitochondriální dysfunkcí

Účast nanoplastů v mechanismech předčasného stárnutí a onkogeneze

Působení nanoplastů může vyvolávat předčasné stárnutí tím, že narušuje činnost mitochondrií a zasahuje do genetických programů organismu. Poškození mitochondrií vede k nadměrné produkci reaktivních forem kyslíku, které způsobují oxidační stres. Ten poškozuje DNA, narušuje genetickou stabilitu, aktivuje zánětlivé procesy a urychluje stárnutí tkání. Kromě toho nanoplasty přispívají ke zkracování telomer, čímž omezují schopnost buněk se dále dělit.



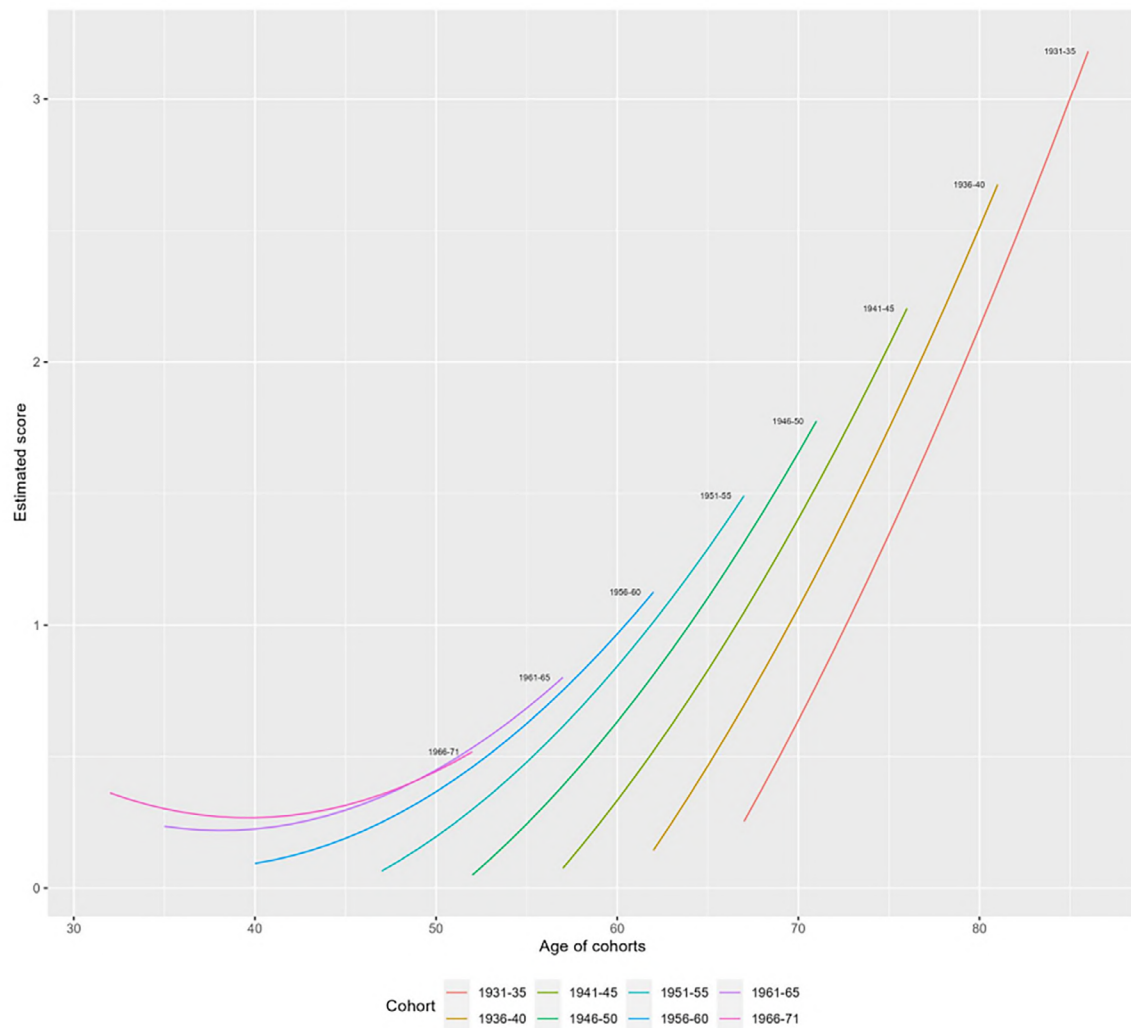
„Podařilo se nám rovněž prokázat, že u lidí může i jediná změna nukleotidu v mitochondriální DNA, spojená se zhoršenou funkcí mitochondrií a dětskými mitochondriálními onemocněními, urychlit procesy stárnutí,” uvedl Taosheng Huang, MD, PhD, profesor a vedoucí oddělení genetiky na katedře pediatrie Lékařské a biomedicínské fakulty Jacobse na Univerzitě v Buffalu. **„Zjistili jsme, že reaktivní formy kyslíku v důsledku špatné funkce mitochondrií vedou časem k narůstajícímu poškození DNA¹⁹³.”**

Epigenetické stárnutí představuje změny v genové regulaci, které probíhají na úrovni DNA-modifikací (zapínání/vypínání genů), aniž by došlo ke změně samotné DNA. Jde o jemný „molekulární časovač“, který lze měřit – a může běžet rychleji či pomaleji než běžné stárnutí. Vysoká aktivita mitochondriální DNA je spojena se zrychleným epigenetickým stárnutím. U některých lidí může být biologický věk buněk již ve 20–30 letech výrazně vyšší než věk chronologický – tedy tělo stárne rychleji, než by mělo.

Lidé s mitochondriálními poruchami často trpí nemocemi typickými pro stáří už v mladém věku, například demencí, kardiovaskulárními onemocněními, arytmiemi či srdečním selháním. Skotští vědci zjistili, že čím později se člověk narodil, tím vyšší je u něj riziko onemocnění do 50 let. Například lidé narození v letech 1956–1960 mají v průměru více nemocí než ti, kteří se narodili dříve – v letech 1951–1955 nebo 1946–1950¹⁹⁴ (obr. 73).

¹⁹³Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>



Obrázek 73 Předpokládané ukazatele multimorbidity podle kohort a věku.

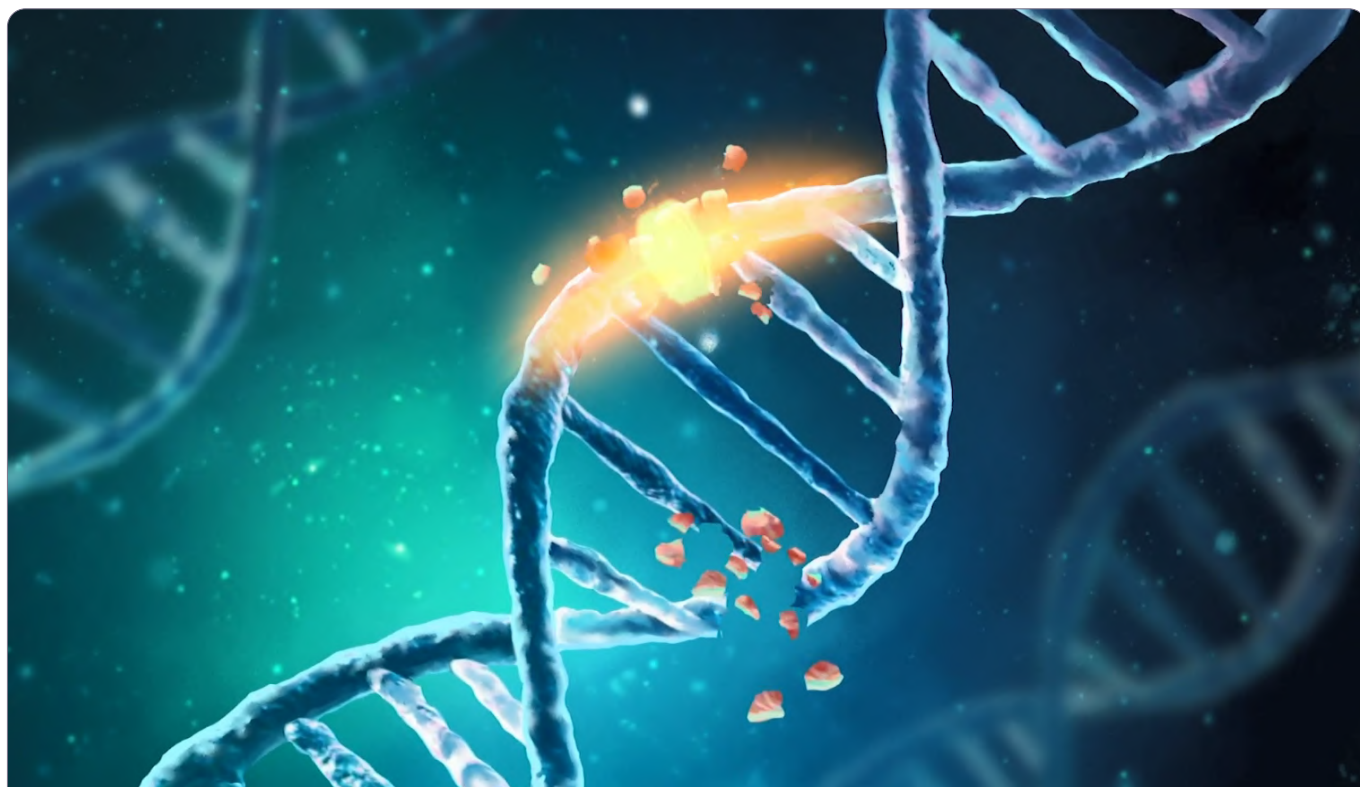
Zdroj: Skotská longitudinální studie – Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K.
Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study.
European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Mutace mitochondriální DNA při stárnutí a rakovině

Klíčové mechanismy, které stojí za stárnutím a rozvojem onkologických onemocnění, se do značné míry překrývají. Jedním z ústředních článků je porucha funkce mitochondrií – buněčných organel odpovědných za produkci energie. S věkem se v lidských tkáních hromadí mutace mitochondriální DNA (mtDNA) a podobné změny byly již dávno zjištěny u různých forem rakoviny¹⁹⁵.

Když v buňce dojde k mutaci, může to změnit její fungování. Například mutovaná buňka začne rychleji růst a dělit se, neodumírá, i když by měla, stává se „neviditelnou“ pro imunitní systém, lépe snáší nedostatek kyslíku nebo živin.

Takové buňky získávají výhodu nad normálními – žijí déle, častěji se dělí, zabírají stále více prostoru a začínají dominovat nad ostatními. Když se takových buněk nahromadí větší množství, může začít vznik nádoru.



Obrázek 74 Poškození DNA vedoucí k mutacím

K poškození mitochondrií jsou obzvláště citlivé postmitotické buňky – neurony, kardiomyocyty a některé svalové buňky. Tyto buňky se nedělí, a proto mutace nahromaděné s věkem, zejména v mitochondriální DNA (obr. 74), zůstávají v buňce po celý její život.

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022).
<https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Postmitotické buňky jsou velmi aktivní: neurony spotřebovávají velké množství energie pro přenos signálů a buňky srdce neustále pumpují krev. To znamená, že mitochondrie pracují na hranici svých možností a produkují velké množství reaktivních forem kyslíku (RFK). Reaktivní formy kyslíku poškozují mitochondrie, čímž zvyšují produkci dalších RFK a spouštějí začarovaný kruh destrukce.

Poškození se hromadí, což může vést ke spuštění patologických procesů (např. neurodegenerativních, kardiovaskulárních onemocnění, onkologie), a dokonce i ke smrti.

Je možné, že právě tím se vysvětluje, proč jsou kardiovaskulární onemocnění, infarkty, mrtvice a onkologická onemocnění hlavními příčinami úmrtí mezi všemi ostatními chorobami. A toxické působení nanoplastů na lidský organismus, které se za posledních 10–20 let mnohonásobně zvýšilo, objasňuje, proč tato onemocnění postihují čím dál více mladší osoby a nabyla rozměrů pandemie, která si každoročně vyžádá miliony lidských životů. Nanoplasty totiž v první řadě narušují funkci mitochondrií, vyvolávají oxidační stres a mutace v mitochondriální i jaderné DNA.

Destabilizace hormonálního systému pod vlivem MNP

Při výrobě plastů se používají chemické látky, které narušují činnost endokrinního systému a hormonální rovnováhu. Tyto látky dokáží napodobovat, blokovat nebo měnit účinek přirozených hormonů, což může vést k nejrůznějším zdravotním problémům.

V lidském organismu bylo zjištěno více než 3 000 chemických látek používaných v obalových materiálech¹⁹⁶. Přibližně 100 z těchto chemikálií je klasifikováno jako látky s „vysokým zdravotním rizikem“ pro člověka.

Bisfenol A

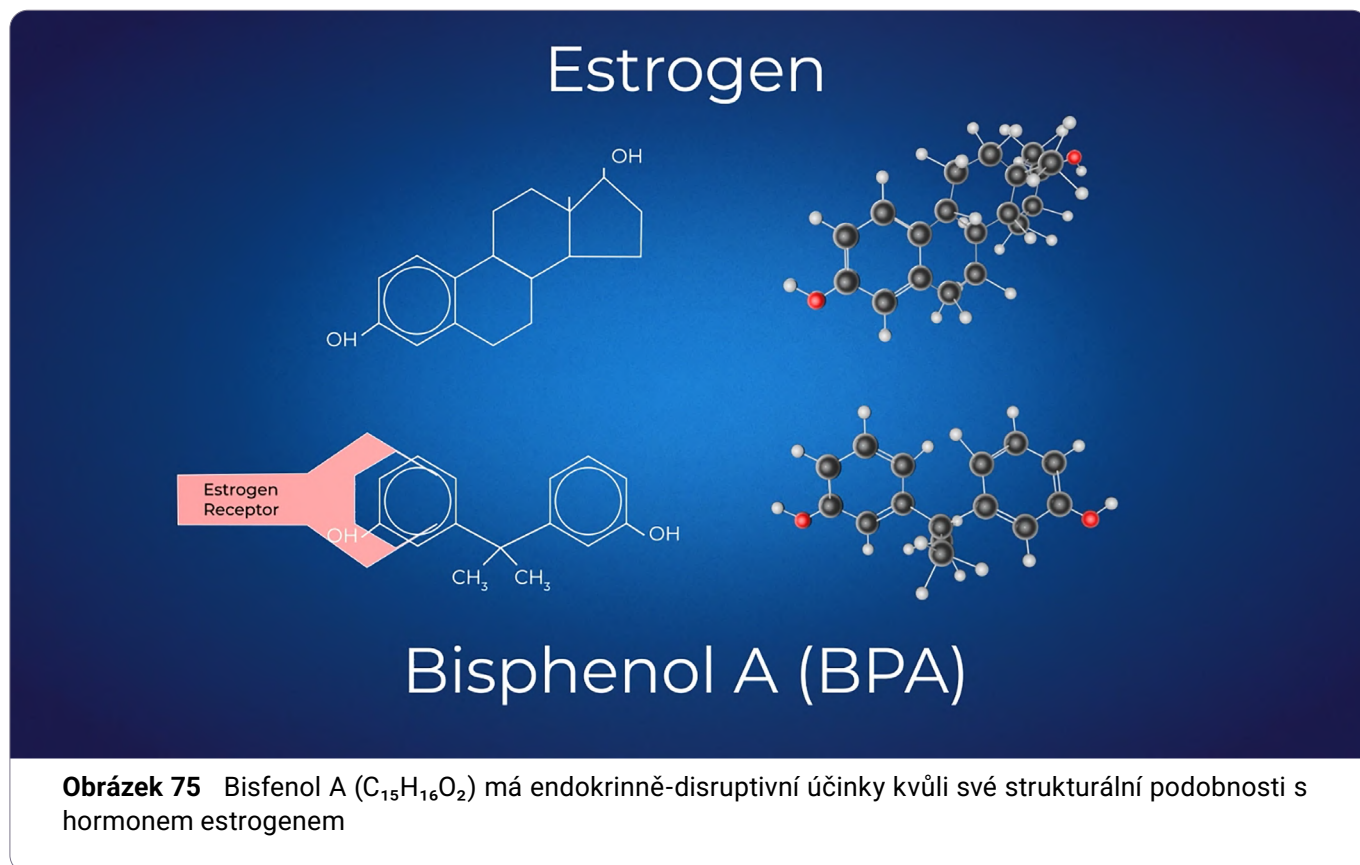
Bisfenol A (BPA) je syntetické změkčovaadlo, které se široce využívá v polykarbonátových plastech (lahve, nádoby), epoxidových pryskyřicích (vnitřní povrch konzerv) a zdravotnických pomůckách.

Při zahřívání přechází BPA do potravin a nápojů.

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>



„BPA působí jako ‚nekontrolovaný‘ hormon, který vytlačuje přirozený hormon běžně zapojený do tohoto mechanismu,“ uvedl profesor Ian Rae, odborník na environmentální chemikálie ze Školy chemie Melbournské univerzity¹⁹⁷ (obr. 75).



Každoročně se na celém světě vyrobí 8 milionů tun bisfenolu A a přibližně 100 tun se každoročně uvolní do biosféry¹⁹⁸.

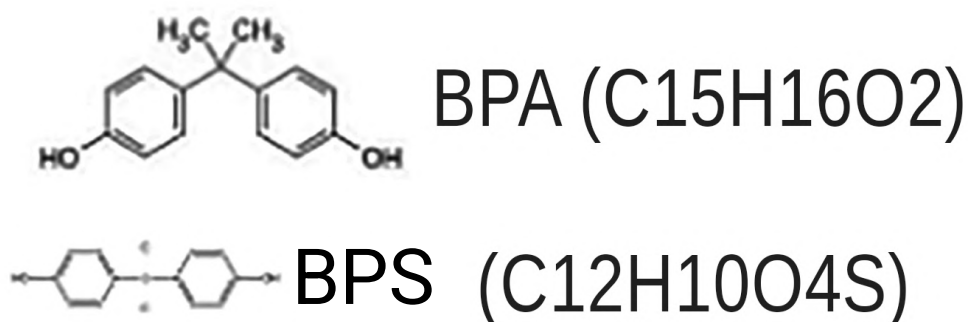
Výzkumy ukazují, že BPA a jeho náhrada – bisfenol S (BPS) – narušují koordinaci excitačních a inhibičních signálů v nervovém systému¹⁹⁹. Obě sloučeniny ve vysokých koncentracích vyvolávají podobné patologické účinky (obr. 76). Experimenty s mozgovými buňkami odhalily, že i nízké dávky BPA/BPS při měsíčním působení mění chemický i elektrický přenos signálů přes synapse²⁰⁰.

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (accessed 1 May 2025).

¹⁹⁹Schirmer, E., Schuster, S. & Machnik, P. Bisphenols exert detrimental effects on neuronal signaling in mature vertebrate brains. *Commun Biol* 4, 465 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01966-w>

²⁰⁰News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).



Obrázek 76 Molekulární struktury a chemické vzorce bisfenolu A (BPA) a bisfenolu S (BPS)

V roce 2023 bylo během výzkumu zjištěno, že děti se syndromem deficitu pozornosti s hyperaktivitou měly vyšší hladiny bisfenolu A a ftalátů ve srovnání s dětmi, které tímto stavem netrpěly²⁰¹.

Vědci z Institutu neurologie a duševního zdraví Florey v Melbourne odhalili šestinásobně vyšší riziko vzniku autismu do 11 let u chlapců, jejichž matky měly v pozdním stádiu těhotenství vysokou hladinu BPA²⁰².

66

„BPA může narušit hormonálně řízený vývoj mozku mužského plodu několika způsoby, včetně potlačení klíčového enzymu aromatázy, který řídí neurohormony a je obzvláště důležitý pro vývoj mozku mužského plodu,“ uvedla profesorka Ponsonby.

„Zdá se, že je to součást puzzle autismu¹⁹⁷.“

Potlačení enzymu aromatázy může vysvětlit pohlavní nepoměr u autismu: na jednu dívku připadá 4–5 chlapců²⁰³. Dívky onemocní autismem méně často, ale když se u nich projeví, mívá těžší průběh²⁰⁴.

Bisfenol A (BPA) rovněž přispívá k rozvoji diabetu 2. typu tím, že vyvolává hyperglykémii a inzulinovou rezistenci²⁰⁵. Celosvětová úmrtnost na cukrovku stále neúprosně roste (obr. 77).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

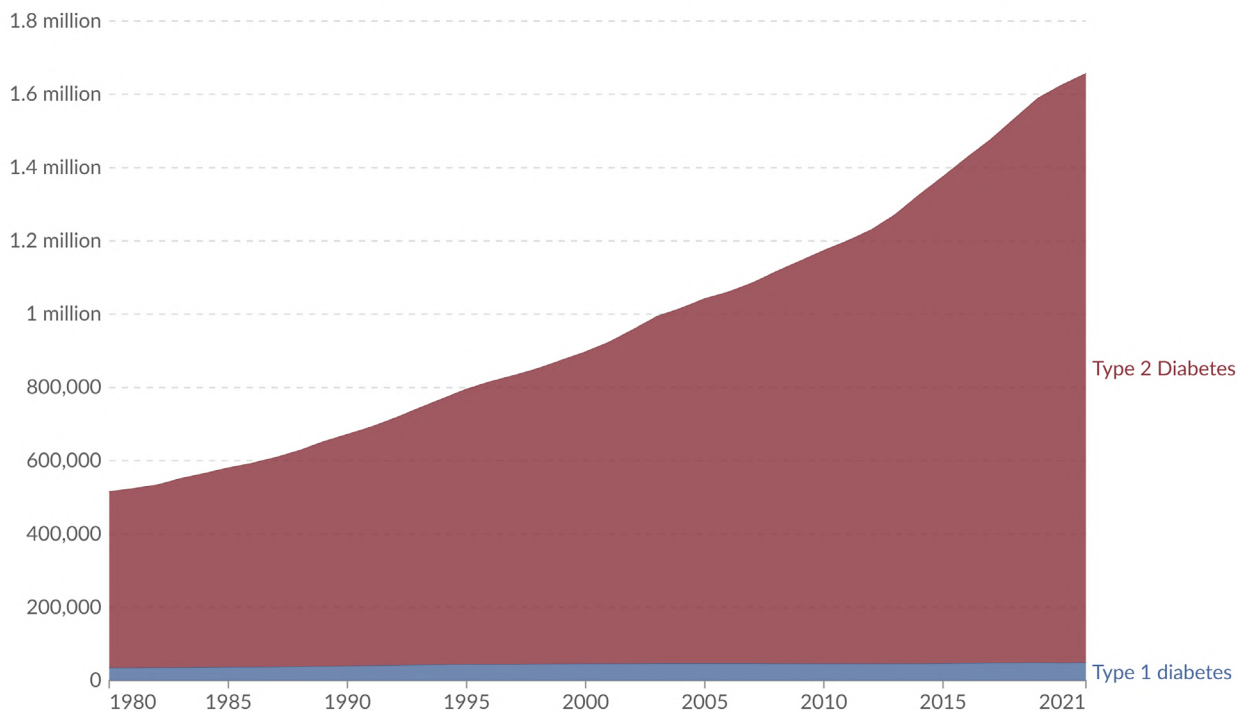
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Obrázek 77 Úmrtnost na cukrovku podle typu, svět, 1980–2021.

Zdroj: <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

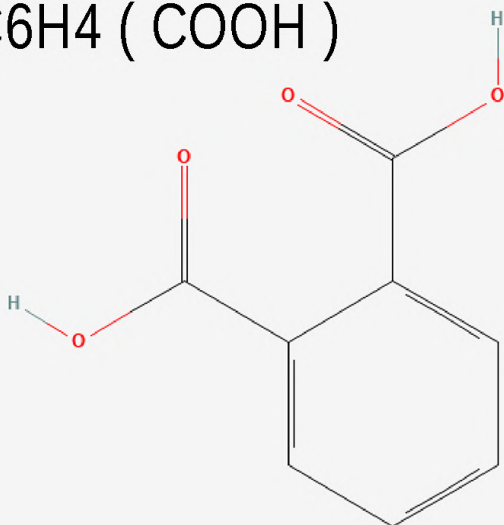
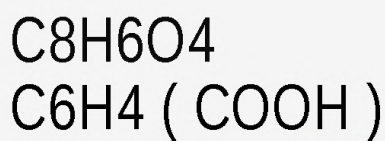
Ftaláty

Ftaláty jsou skupina chemických sloučenin, které se používají především jako změkčovadla – tedy látky, jež činí plasty, jako je polyvinylchlorid (PVC), pružnějšími, měkčími a trvanlivějšími.

Ftaláty se široce používají v průmyslu i v každodenním životě, avšak jejich schopnost zasahovat do činnosti endokrinního systému vyvolává obavy²⁰⁶.

Molekulární vzorec (obr. 78). Ftaláty nejsou hormony, ale mohou potlačovat účinek androgenů (například testosteronu), což je obzvlášť kritické pro mužský vývoj. Při jejich působení dochází ke snížení pohyblivosti spermií a k vývojovým vadám pohlavních orgánů (například kryptorchismu u novorozenců). U mužů, kteří byli diagnostikováni jako neplodní, byla zjištěna vyšší koncentrace ftalátů.

²⁰⁶ Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>



Obrázek 78 Znázornění chemické struktury.

Zdroj: PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure>
(K datu: 1. 5. 2025).

U žen dochází k poruchám menstruačního cyklu, zvyšuje se riziko potratů a předčasných porodů. Působení na plod během těhotenství může vést ke zpomalenému vývoji mozku, snížení IQ a problémům s chováním²⁰⁷.

Vědci prokázali příčinnou souvislost mezi ftaláty v životním prostředí (toxickými chemikáliemi obsaženými v běžném spotřebním zboží) a zvýšeným výskytem děložních myomů, nejčastějších nádorů u žen²⁰⁸.

Riziko rakoviny u dětí vystavených ftalátům v plastech se zvyšuje o 20 %, přičemž výskyt zhoubných nádorů kostí narůstá trojnásobně a výskyt lymfomů se zdvojnásobuje²⁰⁹.

Studie s účastí více než 5000 amerických matek ukázala, že ftaláty jsou spojeny s rizikem porodu dětí s nízkou porodní hmotností a předčasně narozených dětí²¹⁰. Tyto faktory mírně zvyšují pravděpodobnost úmrtí kojenců a mohou mít také vliv na školní výkony dětí i na zvýšené riziko srdečních onemocnění a diabetu stejně jako duševních poruch, jako je autismus a ADHD²¹¹.

²⁰⁷ Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸ Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

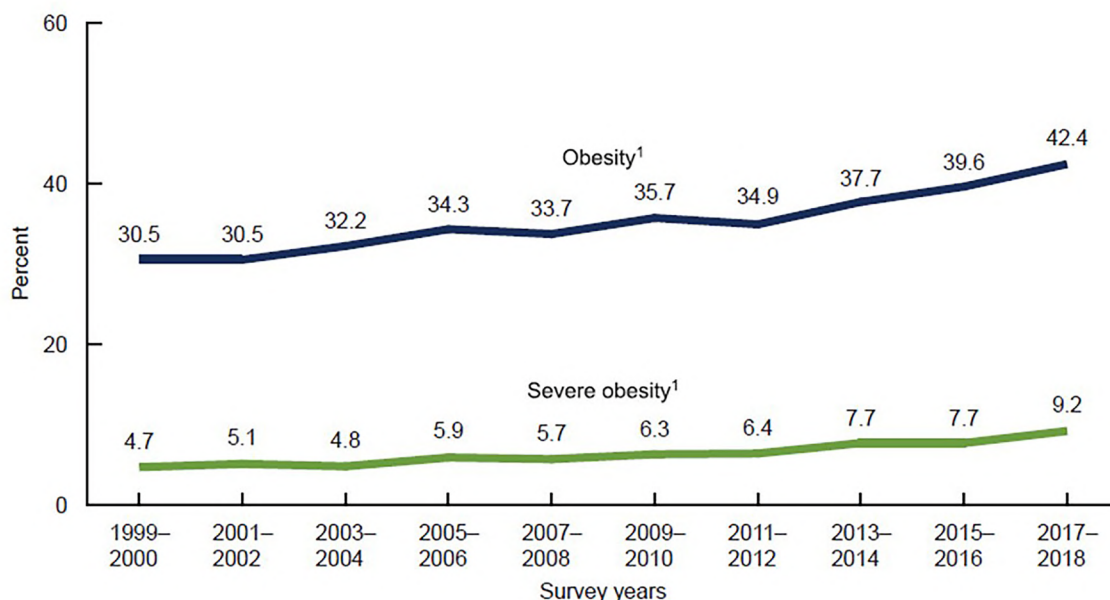
²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹ Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

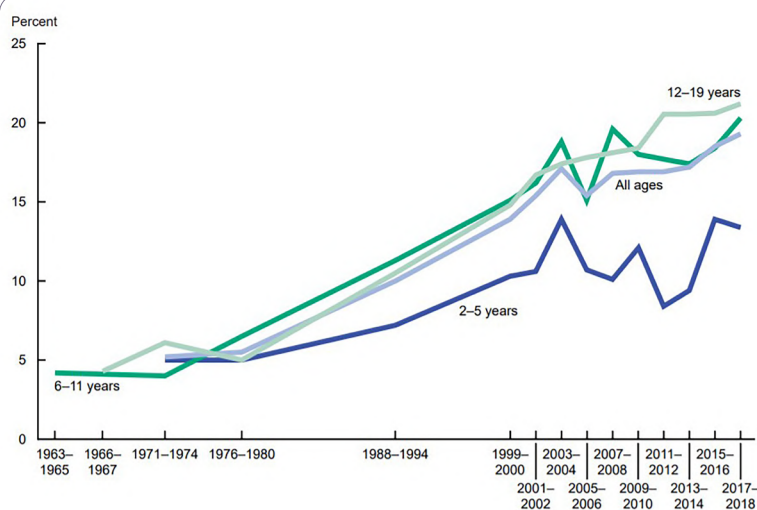
Chemické přísady v plastech přispívají k rozvoji obezity²¹². Podle údajů Světové zdravotnické organizace (WHO) se v letech 1990 až 2020 celosvětová míra obezity u dospělých více než zdvojnásobila, zatímco u adolescentů se zvýšila čtyřnásobně²¹³.

Trendy obezity u dospělých a mládeže ve Spojených státech (obr. 79–80)



Obrázek 79 Trendy v rozšířenosti obezity a těžké obezity mezi dospělými ve věku 20 let a více s věkovou korekcí: Spojené státy, 1999–2000 až 2017–2018.

Zdroj: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (K datu: 1. 5. 2025).



Obrázek 80 Trendy výskytu obezity mezi dětmi a dospívajícími ve věku 2–19 let podle věkových skupin: USA, 1963–1965 až 2017–2018.

Zdroj: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (K datu: 1. 5. 2025).

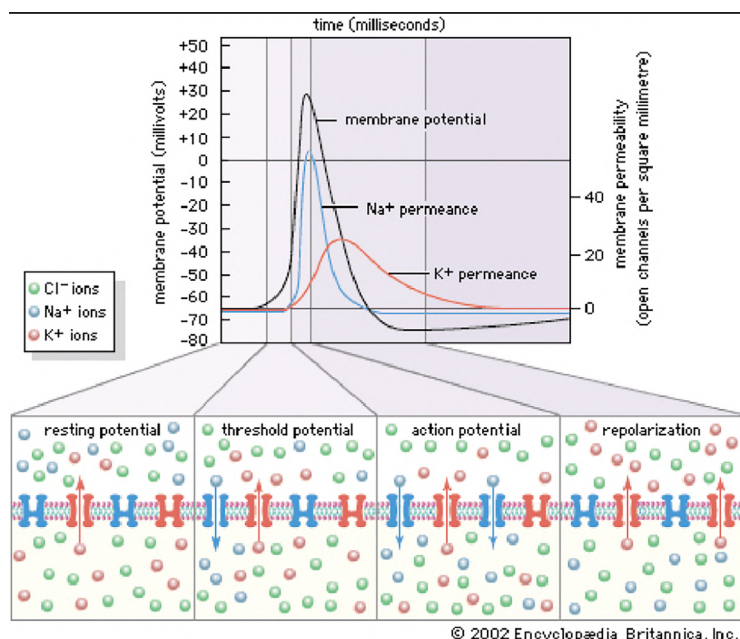
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

Elektrostatický náboj nanoplastů jako klíčový faktor jeho zvýšené toxicity pro lidský organismus

Lidský organismus neustále produkuje bioelektrickou energii. Všechny fyziologické procesy – od činnosti srdce a smyslového vnímání až po vyšší kognitivní funkce – jsou podmíněny chemickými reakcemi, které jsou iniciovány pohybem elektrických nábojů. Intracelulární i extracelulární tekutiny obsahující proteiny jsou tvořeny především vodou, která má polární elektrické vlastnosti. V tomto kontextu hrají elektrostatické interakce, včetně vodíkových vazeb, iontových vazeb a hydrofobního uspořádání, klíčovou roli při formování struktury buněčných bílkovin, které jsou nezbytné pro jejich funkci a tím i pro udržení životních funkcí organismu²¹⁴.

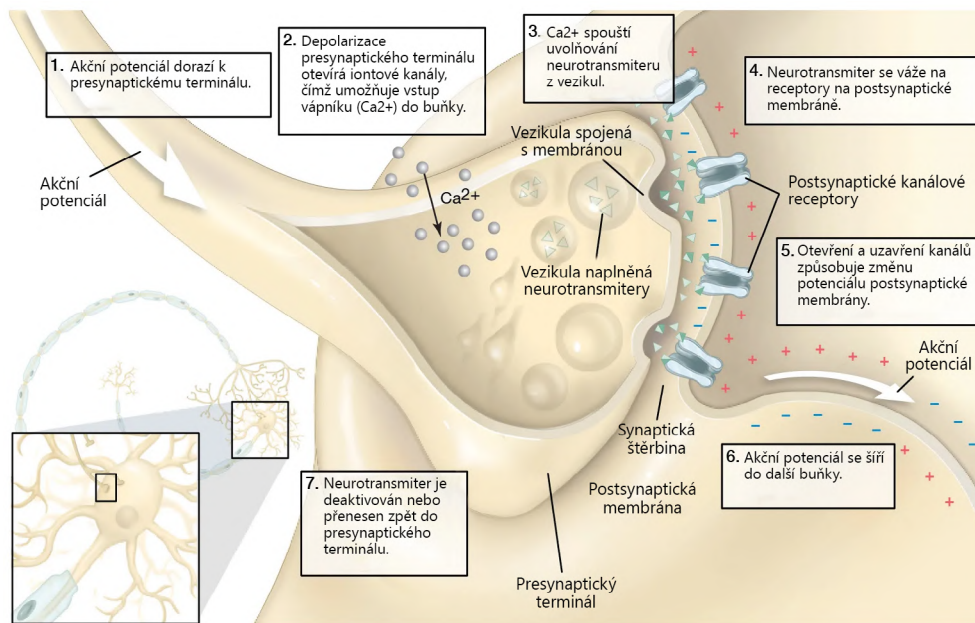
Bioelektrina hraje bezprostřední roli ve fungování buněk prostřednictvím interakce iontových kanálů a membránových potenciálů. Každá buňka udržuje rozdíl elektrických potenciálů mezi svým vnitřním a vnějším prostředím – tzv. klidový membránový potenciál, který je zajištěn rozdílnou koncentrací iontů uvnitř a vně buňky (obr. 81). Hlavní typy iontových kanálů, které jsou přítomny v lidském těle, jsou sodné, draselné, kalciové a chloridové kanály. Tyto kanály společně s membránovým potenciálem zajišťují klíčové funkce různých typů buněk (obr. 82, 83).



Obrázek 81 Iontová propustnost a akční potenciál. Změny iontové propustnosti jako základ akčního potenciálu. Elektrický potenciál je na levé ose udáván v milivoltech, iontová propustnost na pravé ose ve formě počtu otevřených kanálů na čtvereční milimetr. V klidovém stavu je membránový potenciál blízký hodnotě E_K , tedy rovnovážnému potenciálu draslíku K^+ . Když se otevírají sodíkové kanály, dochází k depolarizaci membrány. Jakmile depolarizace dosáhne prahového potenciálu, je spuštěn akční potenciál. Vznik akčního potenciálu přibližuje membránový potenciál k E_{Na^+} rovnovážnému potenciálu Na^+ . Když se sodíkové kanály uzavírají (snížení propustnosti pro Na^+) a současně se otevírají kanály draselné (zvýšení propustnosti pro K^+), dochází k repolarizaci membrány.

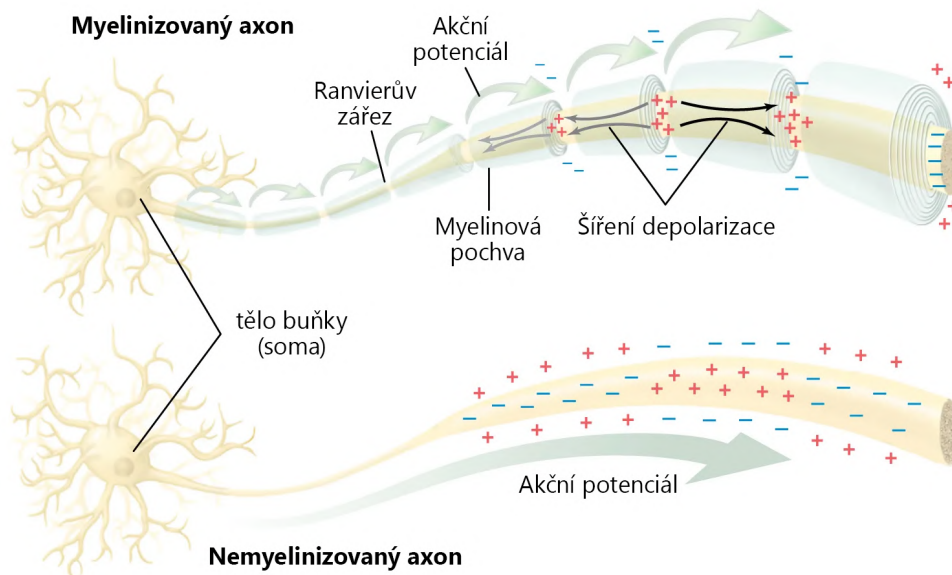
Zdroj: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

²¹⁴Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).



Obrázek 82 Synapse. Chemický přenos nervového vzruchu v synapsi. Příchod nervového impulsu do presynaptického zakončení stimuluje uvolnění neurotransmiterů do synaptické štěrby. Vazba neurotransmiterů na receptory na postsynaptické membráně stimuluje regeneraci akčního potenciálu v postsynaptickém neuronu.

Zdroj: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>



Obrázek 83 Neuron: vedení akčního potenciálu.

V myelinizovaném axonu brání myelinová pochva lokálnímu proudu (malé černé šipky) v průchodu membránou. To nutí proud putovat po nervovém vlákne k nemyelinizovaným Ranvierovým uzlům, které mají vysokou koncentraci iontových kanálů. Po stimulaci tyto iontové kanály šíří akční potenciál (velké zelené šipky) do dalšího uzlu. Akční potenciál tak skáče podél vlákna, protože se regeneruje v každém uzlu, což je proces nazývaný saltatorní vedení. V nemyelinizovaném axonu se akční potenciál šíří podél celé membrány a slábne, jak se šíří zpět přes membránu do původní depolarizované oblasti.

Zdroj: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

Bioelektřina, která vzniká v lidském těle (například při svalové činnosti nebo přenosu nervových impulsů), není pro člověka škodlivá, protože je přirozenou součástí fyziologických procesů. Mikro- a nanoplasty však při proniknutí do organismu přinášejí elektrostatický náboj, který jsou schopny udržet po dlouhou dobu. A právě tento náboj může ohrozit zdraví tím, že zasahuje do všech biologických procesů.

Nanoplasty představují plastové částice menší než 1 mikrometr, které díky své unikátní struktuře vykazují schopnost akumulovat elektrostatické náboje – právě to z nich činí objekt intenzivního zájmu vědců.

Když se částice mikro- a nanoplastů elektrizují v důsledku *triboelektrického jevu* (při kontaktu a tření s jinými povrchy), získávají elektrostatický náboj – kladný nebo záporný. Tento náboj ovlivňuje jejich chování v lidském těle i v životním prostředí.

Jedinečná struktura částic nanoplastů jim umožňuje adsorbovat znečišťující látky, ionty a organické molekuly, což zvyšuje jejich roli jako nosičů toxinů v ekosystémech^{215, 216}.

Chemické složení nanoplastů hraje klíčovou roli při utváření jeho elektrostatických vlastností. Polymery jako polystyren (PS), polyethylen (PE) nebo polypropylen (PP) často obsahují funkční skupiny – karboxylové (-COOH), sulfonové (-SO₃H) nebo aminové (-NH₂), které se mohou ionizovat v závislosti na podmínkách prostředí. Například studie publikovaná v časopise *Langmuir* ukázala, že polystyrenové nanočástice s karboxylovými skupinami (PS-COOH) vykazují záporný zeta potenciál, zatímco částice s aminovými skupinami (PS-NH₂) mají kladný náboj, což potvrzuje vliv funkčních skupin na elektrický náboj nanoplastů²¹⁷.

Proces akumulace náboje není omezen pouze na chemické vlastnosti. Během výroby nebo při mechanickém působení, například tření, můžou nanoplasty získávat náboj prostřednictvím kontaktní elektrizace. Studie provedená na plastových obalech ukázala, že polystyren je schopen akumulovat náboj až do -10 kV, který se udrží po dlouhou dobu a přitahuje opačně nabitě částice, jako je prach nebo spory bakterií²¹⁸. Navíc variace ve struktuře polymeru – například přítomnost polárních skupin – umožňují, aby nanoplasty nesly jak kladný, tak záporný náboj v závislosti na pH prostředí. V kyselém prostředí mohou aminové skupiny dodat částicím kladný náboj, zatímco v zásaditém prostředí převažují záporné náboje díky karboxylovým skupinám, jak potvrdily studie na rostlinách *Arabidopsis thaliana*²¹⁹.

²¹⁵Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Proto porozumění struktuře nanoplastů a jejich elektrostatickým vlastnostem nejen odhaluje jejich fyzikální podstatu, ale zároveň vytváří základ pro analýzu toho, jak tyto částice mohou ovlivňovat ekosystémy a živé organismy – což bude dále rozebráno v kontextu jejich patogenních mechanismů.

Díky vysoké dielektrické permitivitě (schopnosti udržet elektrický náboj) nanoplasty i po proniknutí do organismu dále akumulují nové škodlivé náboje, které se za normálních okolností neutralizují nebo rozptylují přirozenými vodivými systémy těla.

Tím narušují procesy samoregulace organismu a vytvářejí riziko pro buněčné struktury v důsledku dlouhodobého působení anomální elektrostatické energie.

Pro posouzení rozsahu hrozby, kterou představují nanoplasty pronikající do organismu, je vhodné znovu se obrátit k bioelektrickým systémům těla – složitým mechanismům, v nichž elektrické impulzy slouží jako jazyk mezibuněčné komunikace.

Každý pohyb i myšlenka jsou možné díky neviditelným signálům, které předávají pokyny buňkám. Neurony si vyměňují informace prostřednictvím elektrických impulzů, svaly se stahují v reakci na tyto signály a mozek zpracovává data pomocí kombinace bioelektrických a chemických procesů. Dokonce i dýchání, reflexy, zrak a sluch závisí na drobných elektrických výbojích, které řídí činnost jednotlivých orgánů

Tyto neviditelné proudy, zdokonalované miliony let evoluce, proměňují bioelektrické impulzy v jazyk života. Jejich harmonii však narušují cizorodé prvky – mikroskopické částice nanoplastů.

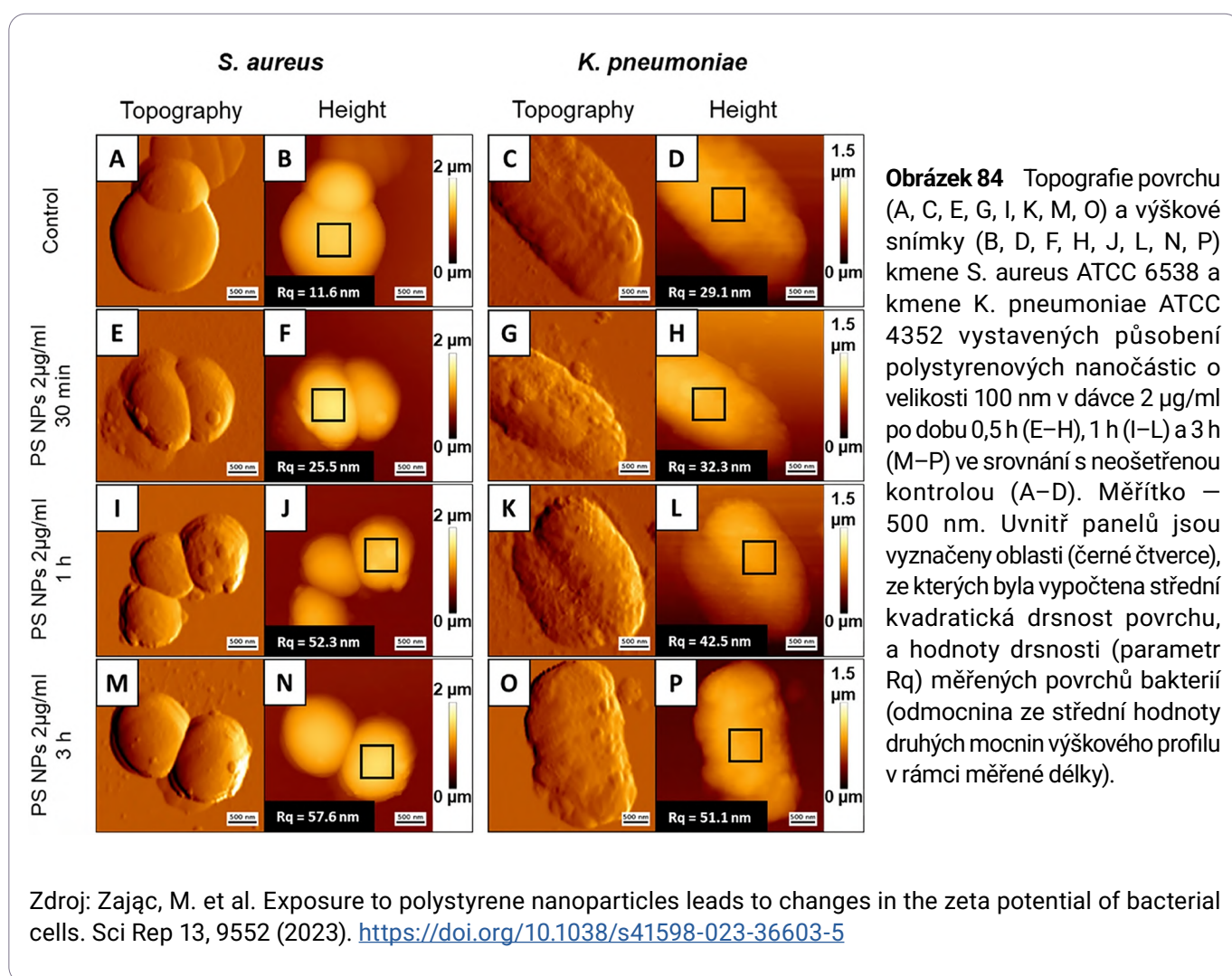
Nanoplasty po proniknutí do organismu dokážou adsorbovat ionty a vytvářet oblasti s anomální vodivostí, čímž narušují přirozenou iontovou rovnováhu a procesy neutralizace lokálních nábojů, které jsou za normálních okolností regulovány mezibuněčnou tekutinou. Adsorpce iontů na povrchu nanoplastů vede k hromadění elektrostatického náboje na těchto částicích. Tento jev může vyvolávat oxidační stres prostřednictvím tvorby reaktivních forem kyslíku (ROS) a zároveň narušovat elektrochemickou komunikaci mezi buňkami, což negativně ovlivňuje jejich funkce.

To potvrzuje studie²²⁰, v níž částice polystyrenu o velikosti 100 nm i za přítomnosti sodných iontů (Na^+) zůstávaly stabilní a adsorbovaly se na povrchu bakterií, navzdory jejich zápornému náboji. Například experimenty s *Staphylococcus aureus* a *Klebsiella pneumoniae* prokázaly, že nanoplasty významně mění zeta potenciál bakteriálních buněk – činí jejich povrch ještě negativnějším, což narušuje přirozenou elektrostatickou rovnováhu.

²²⁰Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Nabité nanoplastové částice mohou ovlivňovat elektrická pole kolem buněk a narušovat přenos signálů. Je to podobné jako rušení v rádiové komunikaci: místo jasných příkazů dochází k chaotickému šumu, který narušuje výměnu informací mezi buňkami. Přestože přímé účinky na nervové buňky nebyly studovány a závěry o dopadu na člověka jsou zatím předběžné a vyžadují další výzkum, pozorované změny v povrchovém náboji bakterií naznačují, že nanoplasty mohou měnit elektrochemické vlastnosti buněčných membrán. Například při koncentracích nad 64 mikrogramů na mililitr způsobují polystyrenové částice významné změny v zeta potenciálu, což by mohlo potenciálně narušit funkci iontových kanálů nebo receptorů, které jsou důležité pro mezibuněčnou komunikaci.

Schopnost nanočástic „ulpívat“ na površích, jak ukazuje atomová mikroskopie ve výše zmíněné studii (obr. 84), představuje riziko dlouhodobé expozice. Jakmile se částice dostanou do tkáně, mohou vytvářet trvalé elektrostatické anomálie, které ionty sodíku a draslíku nedokážou zcela neutralizovat, zejména pokud nanočástice proniknou dovnitř buněk a obejdou ochranné mechanismy mezibuněčné tekutiny.



Nebezpečí patogenního náboje nahromaděného na nanoplastech spočívá také v jeho schopnosti vytvářet elektrické rušení kolem imunitních buněk. Potvrzuje to studie²²¹, která ukazuje, že kladně nabitě nanoplasty (PS-NH₂) významně snižují životaschopnost imunitních buněk a stabilitu lysozomálních membrán ve srovnání s negativně nabitými (PS-COOH), což zdůrazňuje kritickou roli povrchového náboje v jejich interakcích s buňkami.

Elektrostaticky nabitě částice MNP vykazují zvýšenou schopnost adsorbovat se na buněčné membrány, tkáně a jiné biologické povrchy, doslova se na ně lepí. Tato adheze zvyšuje riziko mechanického i chemického poškození buněk, narušuje jejich strukturu a funkci.

Takové náboje mohou také usnadnit pronikání částic MNP přes složité biologické bariéry, jako je hematoencefalická bariéra nebo hematoplacentární bariéra. V důsledku toho se toxiny mohou dostat do mozku nebo vyvíjejícího se plodu, což zvyšuje riziko neurotoxických účinků a poruch vývoje plodu.

Elektrostatický vliv nanoplastů může narušovat strukturu a funkci proteinů, iontových kanálů a buněčných receptorů, což zase narušuje buněčnou signalizaci, vyvolává oxidační stres a oslabuje imunitní obranu.

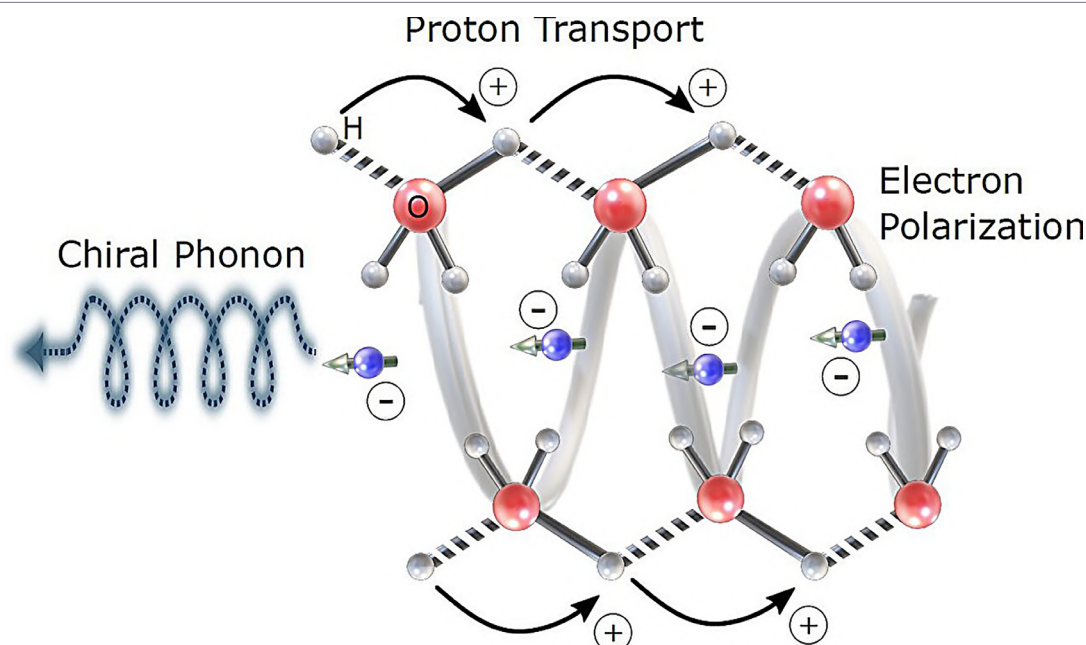
Tyto poruchy mohou vyvolat řadu patologických procesů, včetně chronického zánětu, neurodegenerativních poruch, vzniku zhoubných nádorů a systémové dysfunkce, což výrazně zvyšuje riziko závažných onemocnění.

Akumulace elektrostatického náboje na nanoplastech tedy není pouhým fyzikálním jevem – je to mechanismus, který zesiluje nebezpečí mikro- a nanoplastů. To je obzvláště kritické vzhledem k tomu, že elektrostatický náboj může na MNP přetrvávat po dlouhou dobu a že tyto částice jsou extrémně odolné vůči eliminaci z lidského těla.

Studium tohoto jevu je nyní nanejvýš důležité, protože vede k hlubšímu pochopení toho, jak se patogenní elektrické náboje nahromaděné na nanoplastech mohou vyvinout v makroskopickou hrozbu pro přežití samotného lidského druhu.

Donedávna se věřilo, že základ buněčné energie – transport protonů – je řízen čistě chemickými procesy: protony údajně „skáčou“ z jedné molekuly vody na druhou. Nová studie publikovaná v časopise *Proceedings of the National Academy of Sciences* však tento názor radikálně mění. Ukazuje se, že transport protonů v živých organismech závisí nejen na chemických vlastnostech, ale také na kvantových faktorech – konkrétně na spinu elektronů a chiralitě biologických molekul (obr. 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>



Obrázek 85 Schematický model. Transport protonů je doprovázen polarizací elektronů v chirálních médiích. V důsledku CISS efektu tato elektrická polarizace vyvolává spinovou polarizaci. Zachování úhlového momentu generuje chirální fonony, které zesilují transport protonů.

Zdroj: Goren, N. et al. Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Studie provedená izraelskými vědci z Hebrejské univerzity odhalila, že v proteinech, jako je lysozym, se přenos protonů výrazně zrychluje, když jsou zavedeny elektrony se „správným“ spinem, a zpomaluje se, když je spin opačný. Je to způsobeno tím, že protony a elektrony v živých systémech fungují jako koordinovaný kvantový mechanismus. I minimální změny v orientaci jejich spinu mohou ovlivnit základní biologické procesy – produkci energie, metabolismus a intracelulární regulaci.

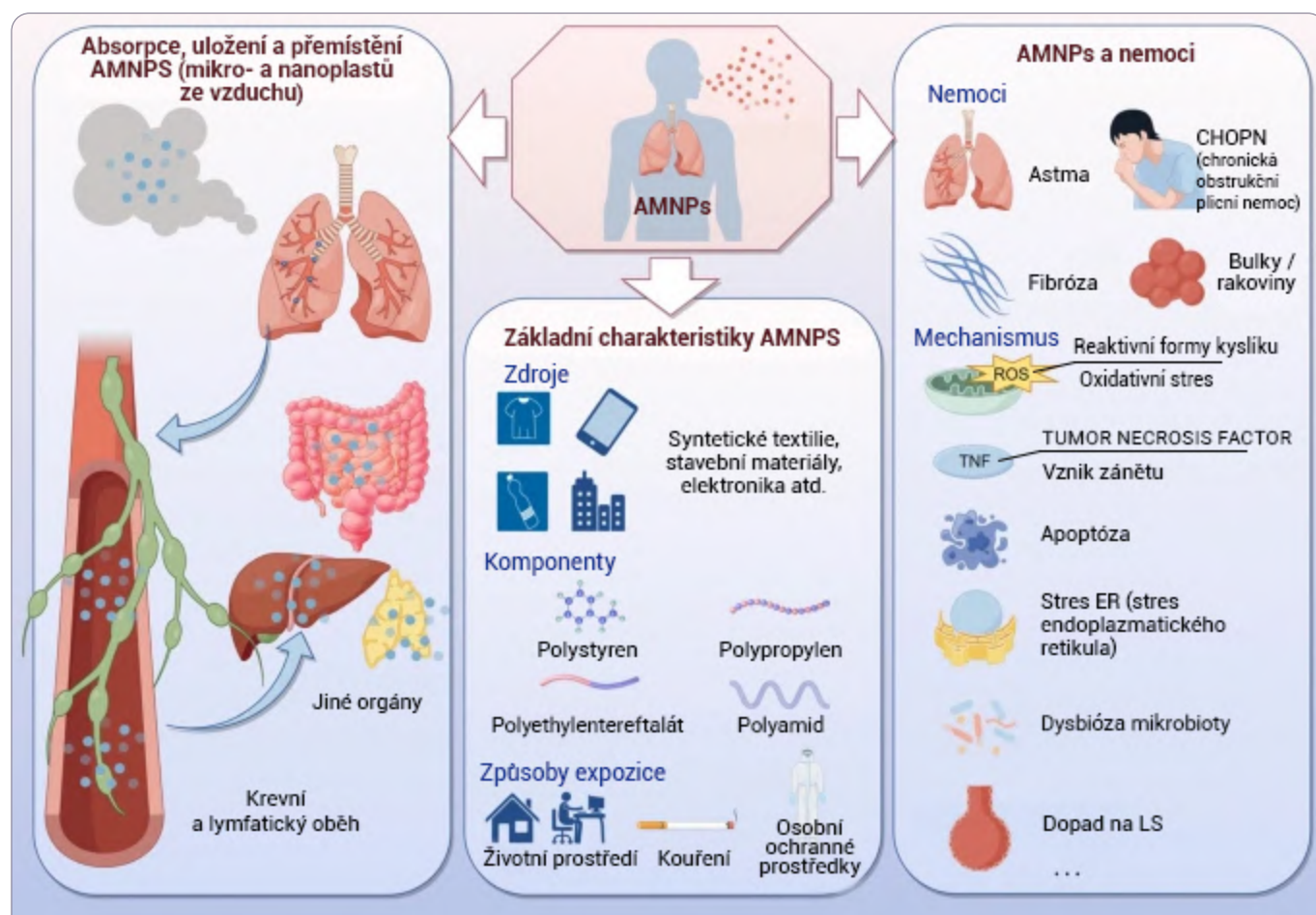


Jak poznamenala vedoucí výzkumná pracovnice studie Naama Gorenová: **„Naše zjištění ukazují, že způsob, jakým se protony pohybují v biologických systémech, nesouvisejí pouze s chemií, ale také s kvantovou fyzikou.“** To naznačuje, že i sebemenší narušení elektrického náboje nebo magnetické orientace může ovlivnit buněčný metabolismus, produkci energie a celkové zdraví²²².

²²²Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

Systémové účinky MNP na lidské orgány a funkční systémy

Jakmile se mikroplasty a nanoplasty (MNP) dostanou do lidského těla, cirkulují v krevním řečišti a dostávají se do všech orgánů a tkání (obr. 86). Plastové částice byly detekovány v lidské krvi, srdci, kostní tkáni, mozku, placentě, plicích, játrech a dalších orgánech²²³.



Obrázek 86 Vdechování MNP a jejich toxické účinky na lidský organismus.

Zdroj: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Poškození dýchacího systému v důsledku vdechnutí MNP

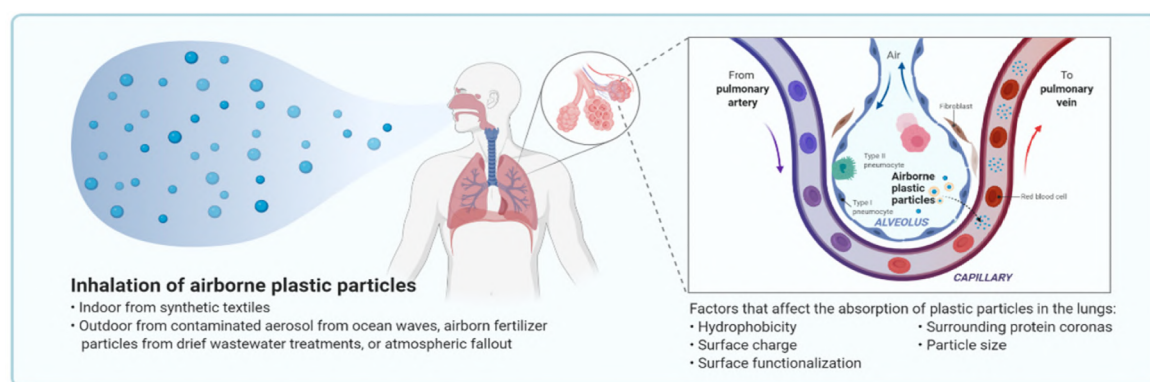
Jednou z hlavních cest, jak se MNP dostávají do lidského těla, je vdechování.

Výzkum provedený čínskými vědci²²⁴ odhalil, že během dvou hodin aktivního pobytu venku vdechnou dospělí přibližně 106 000 mikroplastových částic, zatímco děti vdechnou asi 73 700 částic.

Díky svým termodynamickým vlastnostem se částice menší než 0,1 mikrometru mohou účinně usazovat v celém dýchacím traktu, od horních dýchacích cest až po plicní sklípky²²⁵.

Plíce mají rozsáhlý povrch alveol (přibližně 150 m²) a tenkou tkáňovou bariéru (méně než 1 mikrometr), což umožňuje nanoplastům snadno pronikat do krevního řečiště (obr. 87).

Mikroplasty byly detekovány ve 13 z 20 vzorků lidské plicní tkáně²²⁶.



Obrázek 87 Inhalační cesta vniknutí plastových částic do lidského organismu²²⁷

Podle studie zahrnující 22 pacientů s respiračními onemocněními byly mikroplasty nalezeny ve všech vzorcích sputa²²⁸, v množství od 18,75 do 91,75 částic na 10 ml²²⁹. Byla také prokázána souvislost mezi alergickou rýmou a mikroplasty²³⁰.

MNP jsou úzce spojeny s nástupem a progresí různých respiračních onemocnění, včetně astmatu, plicní fibrózy, chronické obstrukční plicní nemoci a nádorů²²⁹. Výzkum odhalil, že 97 % maligních vzorků plic obsahovalo mikroplastová vlákna²³¹.

²²⁴Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Huang, X., Saha, S. C., Saha, G., Francis, I. & Luo, Z. Transport and deposition of microplastics and nanoplastics in the human respiratory tract. Environmental Advances 16, 100525 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100525>

²³⁰Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Mezi možné mechanismy patří oxidační stres, zánět a narušení mikrobiomu plic. Mikro- a nanoplasty mohou vyvolat plicní zánět²³².

Podle zprávy WHO zůstávají infekce dolních cest dýchacích nejčastější infekční chorobou na světě a jsou pátou nejčastější příčinou úmrtí. Navíc vzrostl počet úmrtí na rakovinu průdušnice, průdušek a plic, která je nyní šestou nejčastější příčinou úmrtí²³³.

Neurotoxické účinky MNP: poškození centrálního a periferního nervového systému

Výzkumy potvrzují, že neurologické poruchy jsou celosvětově hlavní příčinou fyzického a kognitivního postižení, které v současné době postihuje přibližně 3,4 miliardy lidí. Absolutní počet pacientů se za posledních 30 let výrazně zvýšil²³⁴. Navíc se očekává, že zátěž chronických neurodegenerativních onemocnění se v příštích dvou desetiletích nejméně zdvojnásobí. Podle údajů WHO trpí duševní poruchou jeden z osmi lidí na celém světě²³⁵.

Prevalence bipolární poruchy u adolescentů a mladých lidí na celém světě vzrostla ze 79,21 na 100 000 lidí v roce 1990 na 84,97 na 100 000 v roce 2019²³⁶. Za poslední tři desetiletí se nemocnost zvýšila jak u mužů, tak u žen (obr. 88). Nedávné studie ukazují nárůst duševních poruch u dětí a dospívajících. Podle zprávy National Healthcare Quality and Disparities Report z roku 2022 se v letech 2016 až 2019 zvýšil počet návštěv pohotovosti s hlavní diagnózou související s duševním zdravím u věkové skupiny 0–17 let, a to ze 784,1 na 869,3 na 100 000 obyvatel. Kromě toho se v letech 2008 až 2020 celková míra úmrtí v důsledku sebevraždy u osob ve věku 12 let a starších zvýšila o 16 %, a ze 14,0 na 16,3 na 100 000 obyvatel²³⁷.

Zpráva zdravotní pojišťovny *Blue Cross Blue Shield* odhaluje, že diagnózy klinické deprese, známé také jako těžká deprese, vzrostly od roku 2013 o 33 %. Některé odborné publikace již začínají předpovídat, že do roku 2030 bude deprese hlavní příčinou ztráty dlouhověkosti nebo života. Zpráva uvádí, že ženy a muži trpící depresí mohou v průměru ztratit až 9,6 let zdravého života²³⁸.

²³²Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

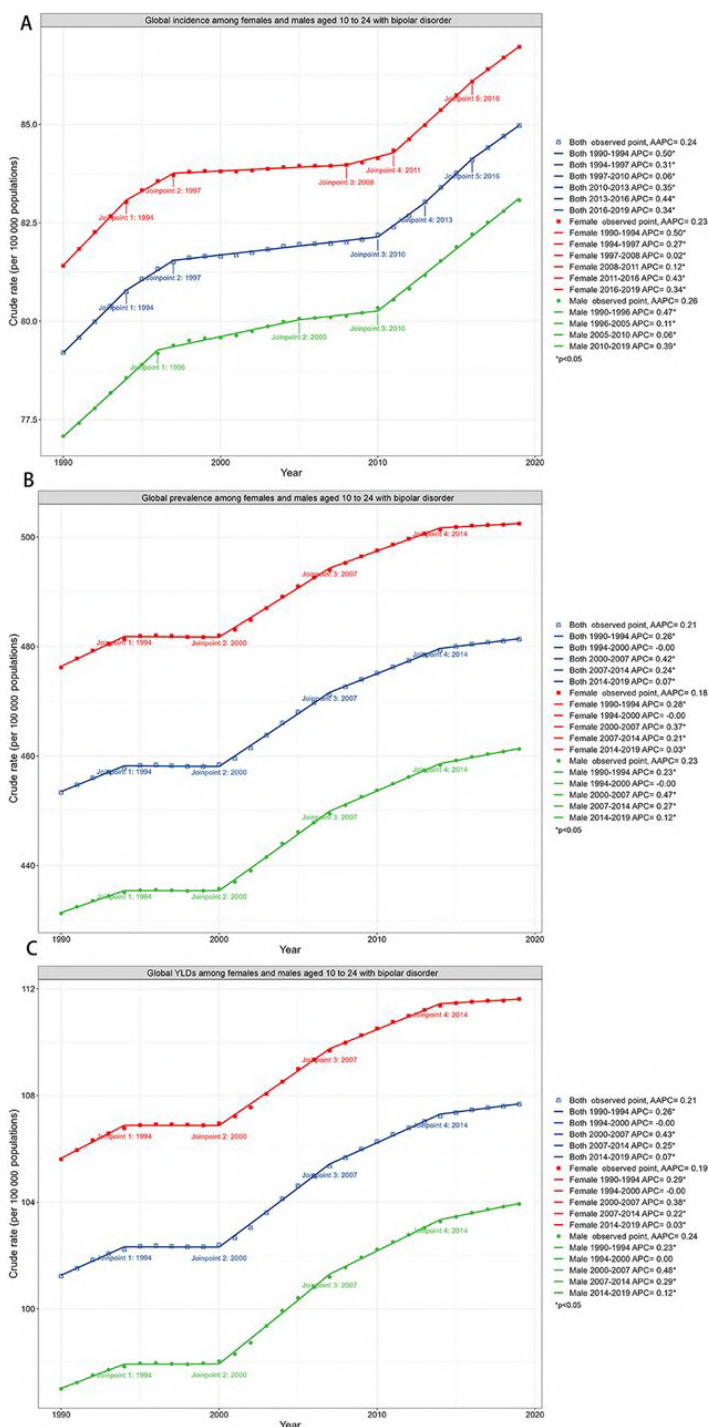
²³⁴World Health Organization. Over 1 in 3 people affected by neurological conditions, the leading cause of illness and disability worldwide. (2024) <https://www.who.int/news/item/14-03-2024-over-1-in-3-people-affected-by-neurological-conditions--the-leading-cause-of-illness-and-disability-worldwide> (accessed 1 May 2025).

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

²³⁸Blue Cross Blue Shield. Major depression: The impact on overall health. Report. (2018) <https://www.bcbs.com/news-and-insights/report/major-depression-the-impact-on-overall-health> (accessed 1 May 2025).



Obrázek 88 Regresní analýza bodů souvislosti globální nemocnosti bipolární poruchou, prevalence a let života s postižením (YLDs) mezi všemi dospívajícími a mladými lidmi ve věku 10–24 let v období od roku 1990 do roku 2019. * $p < 0,05$; AAPC – průměrná roční procentní změna; APC – roční procentní změna; YLDs – roky života s postižením.

Zdroj: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

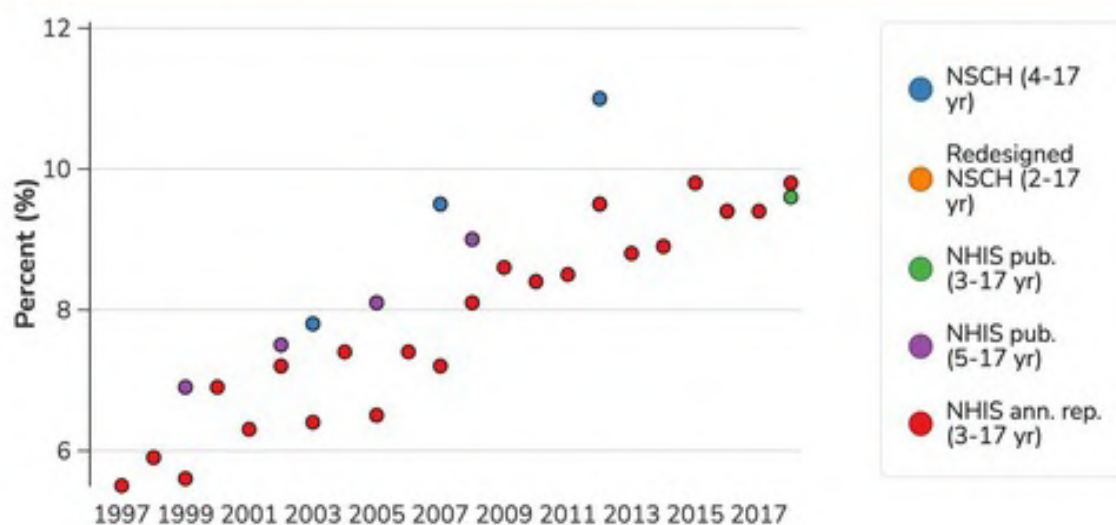
V posledních několika desetiletích se počet diagnóz poruchy pozornosti s hyperaktivitou (ADHD) neustále zvyšuje. Národní průzkumy ve Spojených státech ukazují nárůst výskytu z 6,1 % na 10,2 % za dvacetileté období od roku 1997 do roku 2016²³⁹ (obr. 89).

Přehled z roku 2023, který zahrnoval 31 zemí, ukázal, že úroveň gramotnosti a početních dovedností klesá²⁴⁰ (obr. 90).

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).

Procento dětí s diagnózou ADHD podle informací od rodičů

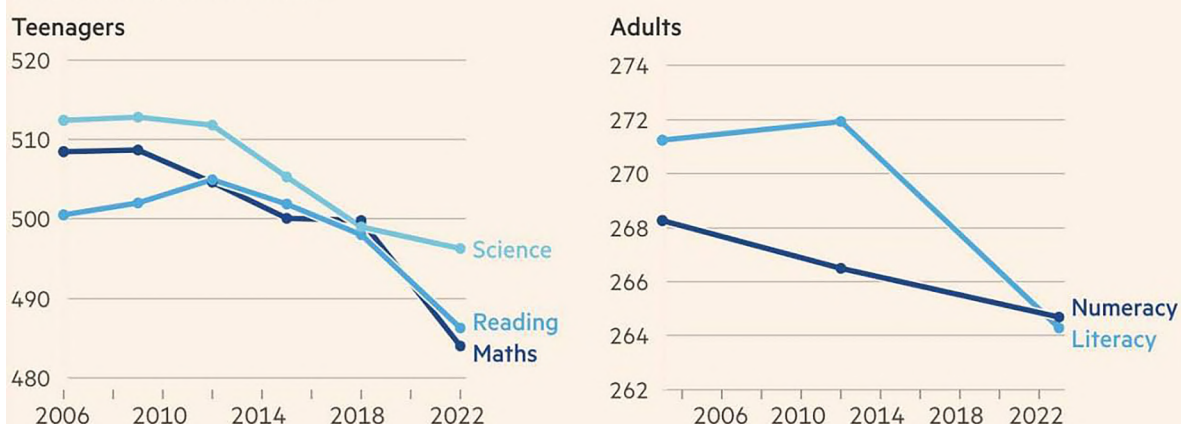


Obrázek 89 Graf růstu ADHD v letech 1997–2016.

Zdroj: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)



Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
 FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch
 ©FT

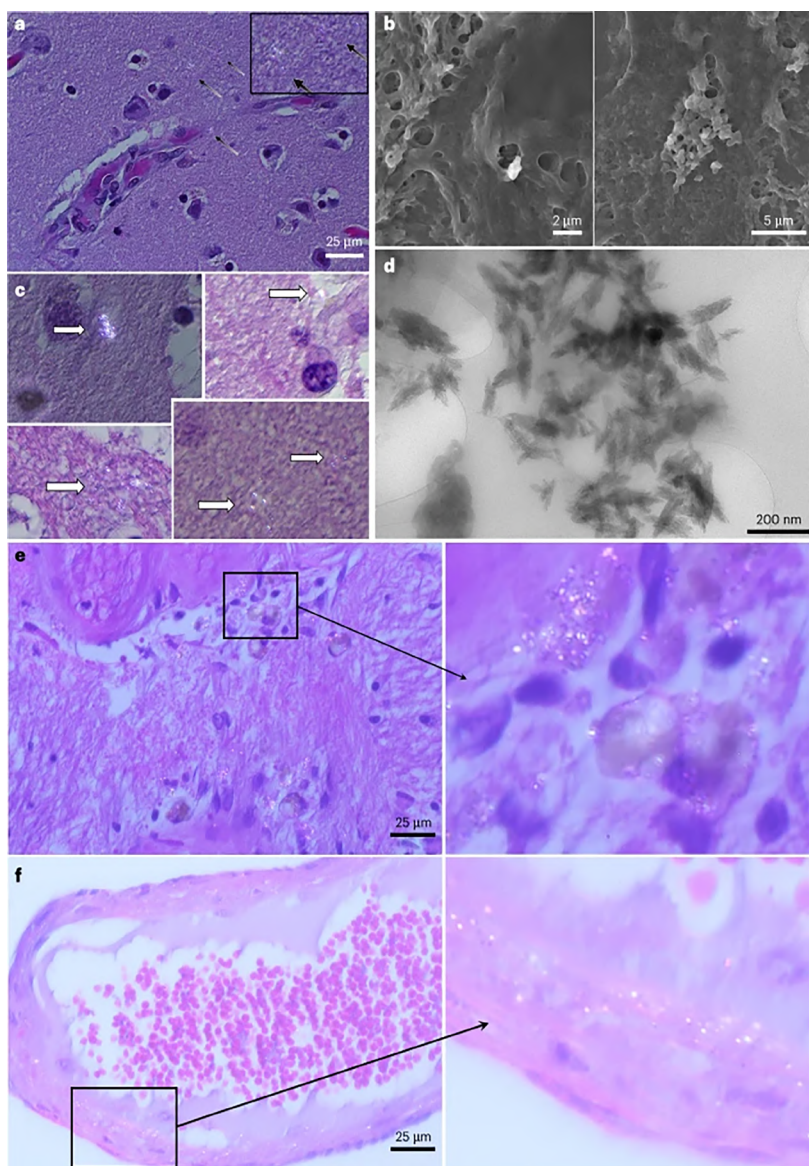
Obrázek 90 Výkonnost v testech logického myšlení a řešení úloh klesá.

Zdroj: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
 FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Trendy ve vzestupu neurodegenerativních a neuropsychiatrických poruch jasně korelují s rostoucí přítomností plastů v životním prostředí (obr. 96–97).

Nejvyšší koncentrace nanoplastů byly nalezeny v lidské mozkové tkáni – 7 až 30krát vyšší než v játrech nebo ledvinách. Vzorky mozkové tkáně od osob s diagnostikovanou demencí vykazovaly ještě vyšší přítomnost MNP – až 10krát vyšší – než mozková tkáň lidí bez demence²⁴¹ (obr. 91).

Převládajícími částicemi v mozku byly drobné fragmenty nebo vločky polyethylenu, jednoho z nejčastěji používaných plastů v obalech.



Obrázek 91 Polarizační vlnová mikroskopie (a, černé šipky označují refrakterní inkluze; vložka je digitální zvětšení pro větší přehlednost) a SEM (b, zorné pole má šířku 15,4 a 20,1 μm) byly použity ke skenování řezů mozku ze vzorků zesnulých lidí. c, Velké ($>1 \mu\text{m}$) inkluze nebyly pozorovány; další příklady polarizačních vln jsou zvýrazněny (bílé šipky zvýrazňují submikronové refrakterní inkluze). Omezení rozlišení těchto technologií vedlo k použití TEM k vyšetření extraktů z pelet použitých pro Py-GC/MS. d, Příklad TEM snímků, které po disperzi dokáží rozlišit nespočet pevných částic ve formě úlomků nebo vloček, jejichž rozměry byly převážně $<200 \text{ nm}$ na délku a $<40 \text{ nm}$ na šířku. e, f, Polarizační vlnová mikroskopie odhalila podstatně více refrakterní inkluzí v případech demence, zejména v oblastech s akumulací imunitních buněk (e) a podél cévních stěn (f). Všechny snímky byly pořízeny u malé podskupiny účastníků ($n = 10$ u normálních mozků; $n = 3$ u případů demence), aby poskytly vizuální důkazy na podporu analytické chemie.

Zdroj: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

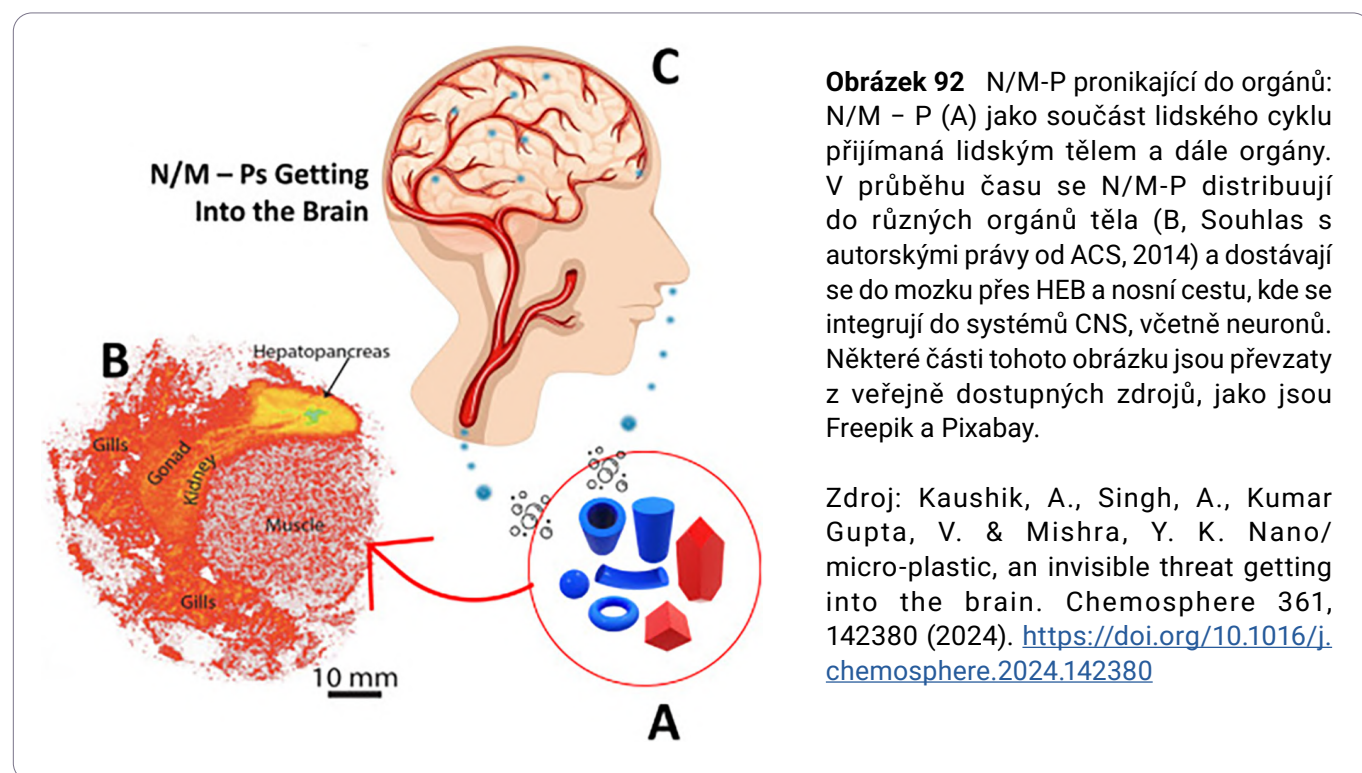
Nové údaje potvrzují, že v období od roku 2016 do roku 2024, tedy za osm let, se množství plastů v lidském mozku zvýšilo o 50 %²⁴¹.



„Koncentrace, které jsme zaznamenali v mozkové tkáni zdravých jedinců ve věku kolem 45 až 50 let, činily 4 800 mikrogramů na gram. (...) Celá plastová lžice – přibližně tolik mikroplastu se nachází v našem mozku. To znamená, že naše mozky jsou dnes z 99,5 % tvořeny mozkem a zbytek je plast,“ uvedl spoluautor studie Matthew Campen z University of New Mexico²⁴².

Vzhledem k rostoucí koncentraci plastových částic v atmosféře, vodě a potravinách je jisté, že množství nanoplastů v našich tělech bude i nadále růst. Pokud tento trend bude pokračovat, obsah plastů v mozku by se mohl během příštích čtyř let zvýšit o dalších 50 %.

Mikro- a nanoplasty pronikají do mozku krevním oběhem, přechodem přes hematoencefalickou bariéru (HEB), a také vdechnutím přes čichové nervy (obr. 92).



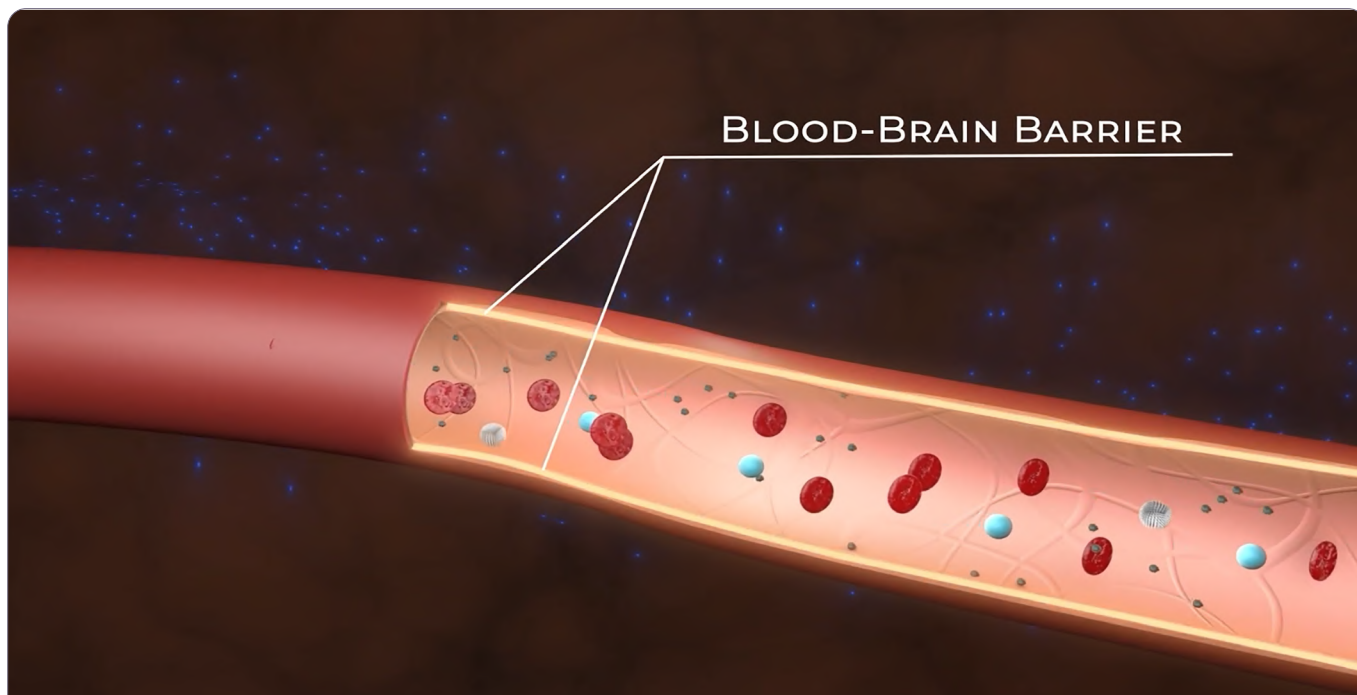
Obrázek 92 N/M-P pronikající do orgánů: N/M – P (A) jako součást lidského cyklu přijímaná lidským tělem a dále orgány. V průběhu času se N/M-P distribuují do různých orgánů těla (B, Souhlas s autorskými právy od ACS, 2014) a dostávají se do mozku přes HEB a nosní cestu, kde se integrují do systémů CNS, včetně neuronů. Některé části tohoto obrázku jsou převzaty z veřejně dostupných zdrojů, jako jsou Freepik a Pixabay.

Zdroj: Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

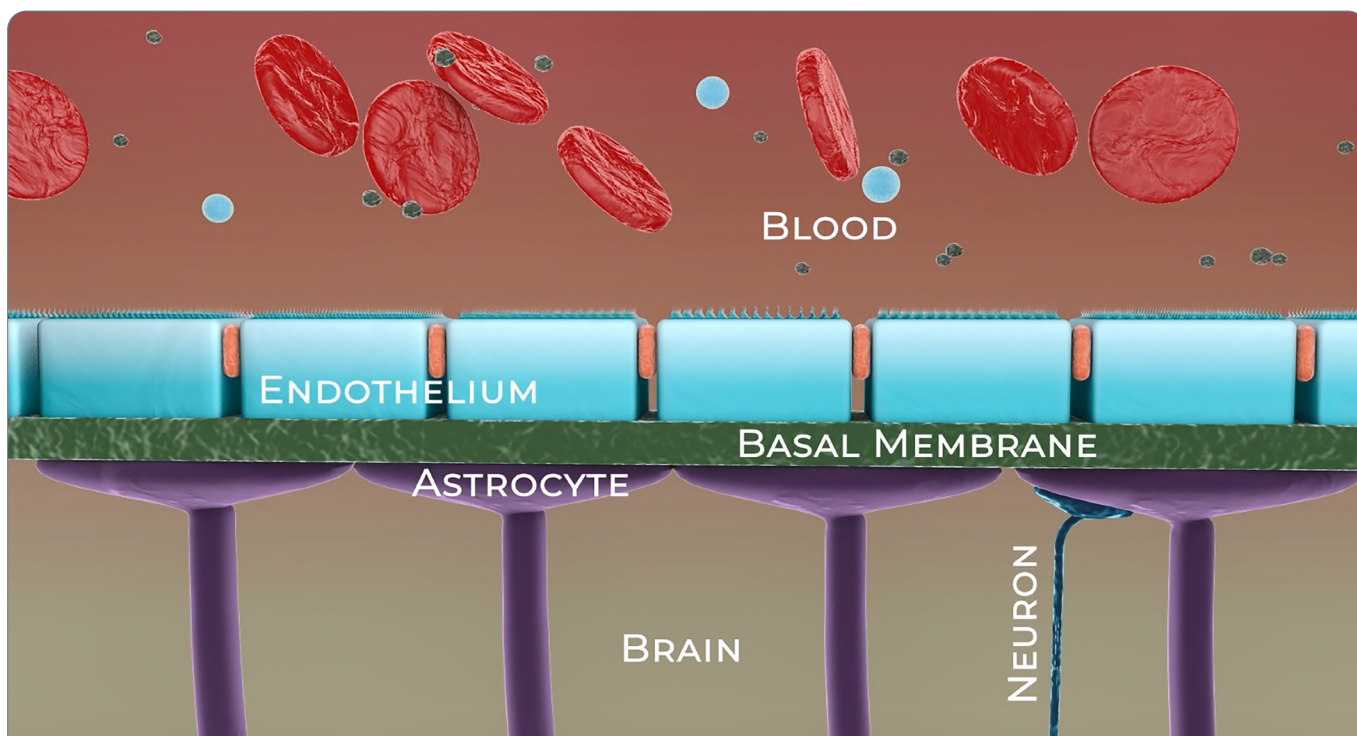
²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).

Hematoencefalická bariéra je specializovaný fyziologický systém, který reguluje přenos látek z krevního řečiště do centrálního nervového systému (obr. 93). Selektivně propouští živiny a kyslík, zatímco blokuje toxiny a patogeny (obr. 94). Tento mechanismus zajišťuje kritickou ochranu mozku a udržuje homeostázu neuronálního prostředí.



Obrázek 93 Schematické znázornění krevní cévy v mozku



Obrázek 94 Schematické znázornění hematoencefalické bariéry

Díky své submikronové velikosti a fyzikálně-chemickým vlastnostem mohou plastové nanočástice proniknout do mozku již během dvou hodin po vstupu do těla²⁴³.

Při vdechnutí putují plastové nanočástice přes čichové nervy přímo do oblasti mozku odpovědné za zpracování pachů²⁴⁴ (obr. 95). Výsledkem je, že se do mozku dostávají kratší a přímější cestou než do jiných orgánů.



Obrázek 95 Pronikání nanočástic přes čichové nervy do mozku

Jakmile nanoplasty proniknou do mozku, narušují funkci mozkových buněk – neuronů. Bylo zjištěno, že povrch nanočástic a jejich elektrický náboj mohou výrazně ovlivňovat interakci s neurony a přenos nervových impulsů.

Elektrostatický náboj nanoplastů umožňuje volně zasahovat do funkce každé buňky v lidském těle, pronikat do buněk, způsobovat oxidační stres a chronický zánět, narušovat funkci mitochondrií a potenciálně vést k destrukci mitochondrií k zániku samotné buňky.

Studie²⁴⁵ prokázala, že negativně nabitě nanočástice mohou vyvolat depolarizaci neuronových membrán a změnit jejich elektrickou aktivitu.

²⁴³Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>

Experimenty odhalily, že záporně nabitě nanoplastové částice se selektivně vážou na neurony, které se aktivně podílejí na přenosu nervových impulsů. Tyto částice ulpívají na neuronech, dendritech a synaptických štěrbinách, zatímco gliové buňky, které nemají elektrickou aktivitu, s nimi neinteragují.

Elektrická aktivita neuronů tedy slouží jako primární spouštěč vazby záporně nabitých nanoplastů na buněčné membrány.

Výzkumy ukazují, že mikro- a nanoplasty mají tendenci se hromadit v lipidově bohaté myelinové pochvě mozku, která obklopuje neurony a usnadňuje vedení nervových signálů²⁴⁶. Nanoplasty spouštějí degradaci myelinové pochvy kolem axonů^{247,248}, čímž narušují přenos nervových impulsů mezi neurony.

Vliv nanoplastů na neurony

Nanoplasty mohou ovlivňovat neurony prostřednictvím následujících mechanismů:

1. Vliv na membránový potenciál neuronů

Neurony fungují na základě rozdílu elektrického potenciálu prostřednictvím jejich membrány (v klidu kolem -70 mV), který je udržován iontovými gradienty (Na^+ , K^+ , Cl^- atd.) a aktivitou iontových kanálů. Když se nabitá nanoplastová částice nachází v blízkosti neuronové membrány, může změnit elektrické pole a destabilizovat membránový potenciál. To může vést k depolarizaci nebo hyperpolarizaci a v závažných případech ke spontánní aktivaci neuronů nebo blokování signálu.

2. Elektrostatická interakce s iontovými kanály

Iontové kanály v membráně neuronu obsahují nabitě aminokyseliny, zejména v oblasti „brány“ kanálu. Nanoplastová částice se silným záporným nebo kladným nábojem může elektrostaticky interagovat s těmito místy a změnit konfiguraci kanálu. To může způsobit blokádu kanálu nebo nesprávnou aktivaci, což naruší normální funkci neuronů.

3. Narušení synaptické funkce

Synapse závisí na přesné činnosti iontů Ca^{2+} , Na^+ a neurotransmiterů²⁴⁹. Elektrostaticky nabitě nanoplastové částice mohou narušovat uvolňování neurotransmiterů nebo generovat falešné signály, což může narušit přenos nervových impulsů.

²⁴⁶Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Oxidativní stres a zánět

Nabité nanoplasty mohou zvyšovat hladinu reaktivních forem kyslíku, což vede k oxidativnímu stresu. Oxidativní stres v neuronech nastává, když reaktivní formy kyslíku překročí schopnost buňky je neutralizovat. To poškozuje DNA a buněčné struktury, jako jsou membrány, proteiny a mitochondrie, a narušuje normální funkci neuronů. V důsledku toho buňka ztrácí schopnost účinně přenášet nervové impulsy, což vede k její degradaci a nakonec ke smrti. Vzhledem k tomu, že neurony mají omezenou regenerační schopnost, je poškození způsobené oxidačním stresem často nevratné a může vést k postupnému zhoršování paměti, pozornosti a dalších kognitivních funkcí.

5. Dopad na funkci mitochondrií

Kladně nabité nanoplasty mohou pronikat do buněk a hromadit se v mitochondriích, čímž narušují jejich membránový potenciál. To narušuje dýchací řetězec a způsobuje únik elektronů, které reagují s kyslíkem a vytvářejí reaktivní formy kyslíku, zejména superoxidové anionty. Jejich nadměrné hromadění zesiluje oxidační stres a může poškodit buněčné struktury.

6. Mitochondriální mutace

Nanoplastové částice mohou poškodit mitochondriální DNA a narušit tak normální funkci mitochondrií. To ovlivňuje klíčové buněčné procesy, jako je produkce energie, regulace oxidačního stresu, programovaná buněčná smrt nebo metabolismus. Narušení těchto systémů může vytvořit podmínky, které podporují rozvoj nemocí.

7. Reaktivní vlastnosti povrchů nanoplastů

Vysoký měrný povrch nanoplastů je jedním z klíčových faktorů, které ovlivňují jejich zvýšenou chemickou reaktivitu a schopnost generovat reaktivní formy kyslíku. Ve srovnání s mikroplasty mají nanočástice povrchovou plochu na jednotku hmotnosti desetkrát nebo dokonce stokrát větší, což významně zlepšuje jejich interakce s biomolekulami a okolním prostředím.

Elektrostatický náboj na plastových částicích může narušit funkci neuronů tím, že blokuje nebo zkresluje přenos nervových impulsů. To vede k poruchám nervového systému a může vyvolat celou řadu patologických stavů v těle. Tyto účinky se projevují jako různé neurologické, autonomní, kognitivní a psychiatrické poruchy (tabulka 2).

Účinky expozice nanoplastům na nervové buňky souvisejí s celou řadou poruch, včetně roztroušené sklerózy, amyotrofické laterální sklerózy, Alzheimerovy choroby, Parkinsonovy choroby, autoimunitních poruch, epilepsie, ischemické a hemoragické cévní mozkové příhody, deprese, úzkosti a kognitivních poruch, schizofrenie, bipolární poruchy, autismu a dalších.

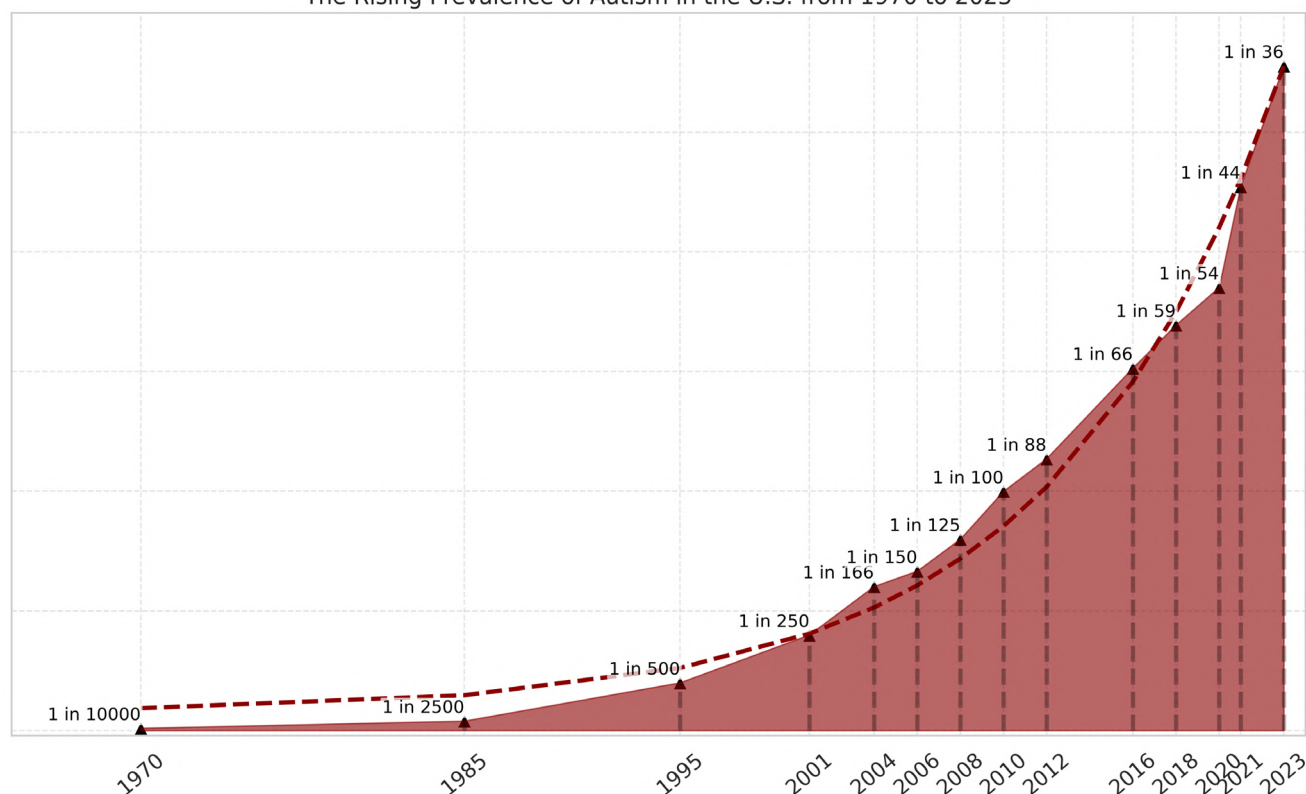
Kategorie	Projevy	Příčiny / Mechanismus
Pohybové poruchy	Ochrnutí	Porucha přenosu pohybových impulzů z centrální nervové soustavy do svalů
	Křečové stavy	Nerovnováha mezi excitačními a inhibičními nervovými signály
	Ztráta citlivosti	Selhání ve fungování sensorických nervových drah přenášejících informace z receptorů do mozku
	Porucha koordinace pohybů	Poškození vodivých drah mozečku nebo míchy
Senzorické poruchy	Poruchy řeči, zraku a sluchu	Poškození nervových drah spojených se sensorickými a motorickými centry mozku
Vegetativní poruchy	Dysfunkce dýchání, srdeční činnosti a trávení	Porucha činnosti autonomního (vegetativního) nervového systému
	Poruchy termoregulace a narušená činnost vnitřních orgánů	Dysfunkce vegetativních regulačních center
Kognitivní poruchy	Poruchy paměti a pozornosti	Strukturní nebo funkční změny v mozkové kůře
	Poruchy vědomí, kóma	Poškození retikulární formace mozku, která hraje klíčovou roli v regulaci bdělosti a úrovně vědomí
Psychoemocionální poruchy	Úzkost, deprese, poruchy nálady	Nerovnováha neurotransmiterů, poškození emočních center mozku

Tabulka 2 Spektrum patologických stavů způsobených vlivem nanoplastů na neurony

Mikroplasty a nanoplasty jako rizikový faktor pro poruchy autistického spektra

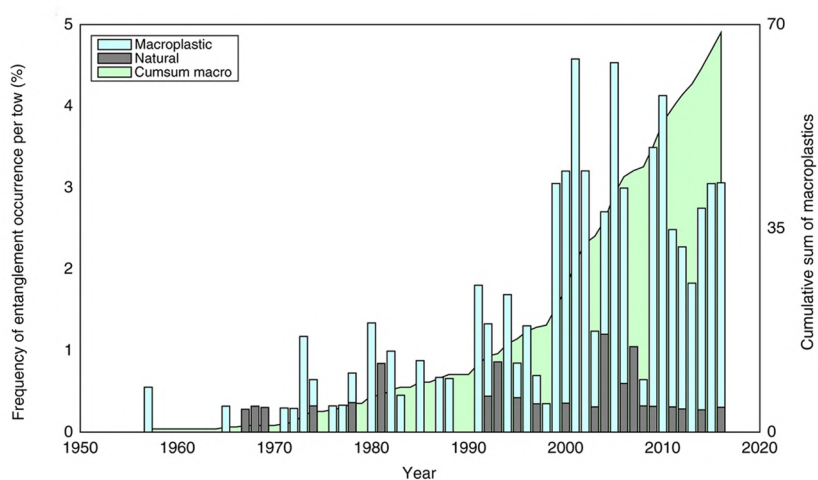
Spolu s nárůstem znečištění životního prostředí plasty došlo také k nárůstu prevalence poruch autistického spektra (ASD) (obr. 96–97).

The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023



Obrázek 96 Nárůst prevalence autismu v USA v letech 1970 až 2023.

Zdroj dat: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (K datu: 1. 5. 2025).



Obrázek 97 Nárůst množství plastu v oceánu v letech 1957 až 2020.

Zdroj: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Podle dat CDC pro monitorování autismu a vývojových poruch (ADDM) bylo v roce 2020 v USA diagnostikováno ASD u 1 z 36 dětí, což představuje nárůst případů o 317 % od roku 2000^{250, 251}.

Lidský nervový systém se vyvíjí od embryonálního stádia až po rané dětství. Studie naznačují možnou souvislost mezi expozicí mikroplastům a nanoplastům (MNP) a rozvojem ASD. Experimentální data korejských vědců ukazují, že prenatální a postnatální expozice MNP může přispívat k poruchám neurologického vývoje²⁵².

Studie molekulárních účinků polystyrenových nanoplastů na lidské nervové kmenové buňky ukázala, že expozice nanoplastům může vést k poškození tkání a nemocem, které jsou spojené s neurologickým vývojem²⁵³.

Výzkumy na hlodavcích²⁵⁴ ukázaly, že působení mikro- a nanoplastů na matku během těhotenství a laktace může narušovat neurogenezi v hipokampu potomstva a také vést ke zmenšení objemu mozkových struktur, včetně motorické kůry, hipokampu, hypotalamu, prodloužené míchy a čichového bulbu.

Je dobře známo, že změny ve struktuře a funkci proteinů nervové tkáně hrají klíčovou roli ve vývoji řady onemocnění, včetně autismu²⁵⁵.

Nedávné studie ukázaly, že nanoplasty interagují s proteiny především prostřednictvím slabých interakcí, jako jsou hydrofobní interakce, vodíkové vazby, Van der Waalsovy přitažlivé síly a elektrostatické síly²⁵⁶. Tyto interakce způsobují strukturální deformace proteinových molekul a narušují jejich funkčnost. Vzhledem k roli bílkovin při formování neuronových sítí a synaptického přenosu mohou takové změny ovlivňovat rozvoj poruch autistického spektra (PAS).

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

²⁵¹Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

²⁵²Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Role MNP v patogenezi kardiovaskulárních onemocnění

Částice plastů nejen cirkulují v krevním řečišti, ale mohou se také usazovat na cévních stěnách, což spouští řadu patologických změn. Zvláště znepokojující je detekce mikroplastů v aterosklerotických plátech²⁵⁷. Nedávná studie zjistila, že pacienti s mikroplasty v krčních tepnách měli 4,5krát vyšší riziko infarktu, mrtvice a úmrtí. To naznačuje, že plastové fragmenty aktivně přispívají k tvorbě a destabilizaci aterosklerotických plátů, podporují jejich prasknutí a tvorbu trombů²⁵⁸. MNP také narušují integritu endotelu, kritické vrstvy buněk lemující vnitřní povrch cév, která reguluje cévní tonus, zabraňuje tvorbě trombů a zmírňuje zánětlivé reakce. Poškození endotelu způsobené plastovými částicemi vede k chronickému zánětu a zvýšenému riziku trombózy, což je obzvláště nebezpečné v tepnách zásobujících srdce a mozek²⁵⁹. Mikroplasty interagují s krevními elementy, jako jsou trombocyty a erytrocyty. Podporují agregaci trombocytů a spouštějí proces tvorby trombů. Kromě toho může povrch mikroplastů způsobovat mechanické poškození buněk a aktivovat kaskády srážení krve, což může z dlouhodobého hlediska vést k chronické hyperkoagulaci a mikrocévním poruchám.

Imunitní buňky mohou pohlcovat mikroplastové částice, ale nemají mechanismy k jejich úplnému rozložení, což vede k deformaci buněk a zvětšení jejich velikosti. Hromadění takto změněných buněk v malých cévách mozku přispívá k tvorbě mikrotrombu, což zhoršuje průtok krve mozkem a zvyšuje riziko cévní mozkové příhody, a to i u mladších jedinců²⁶⁰. Chronické snížení přísunu kyslíku do mozku (hypoxie) vede k odumírání neuronů a rozvoji neurodegenerativních změn, včetně atrofie mozkové tkáně²⁶¹. Dlouhodobé vystavení těmto procesům může snížit objem specifických mozkových struktur.

Díky svému elektrostatickému náboji MNP aktivně interagují s buněčnými membránami a narušují jejich elektrický potenciál. To zase ovlivňuje vaskulární kontraktilitu, přenos signálů v kardiomyocytech a srdeční rytmus. Úmrtnost na kardiovaskulární onemocnění celosvětově neustále roste (obr. 98). Zvláštní pozornost je třeba věnovat syndromu náhlé srdeční smrti u mladých lidí ve věku 25–44 let²⁶² (obr. 99), který je považován za jednu z hlavních příčin úmrtí ve Spojených státech v této věkové kategorii. V posledních dvou desetiletích počet případů dramaticky vzrostl. Vzhledem k širokému rozšíření MNP nelze vyloučit jejich potenciální roli v těchto tragických událostech.

²⁵⁷Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

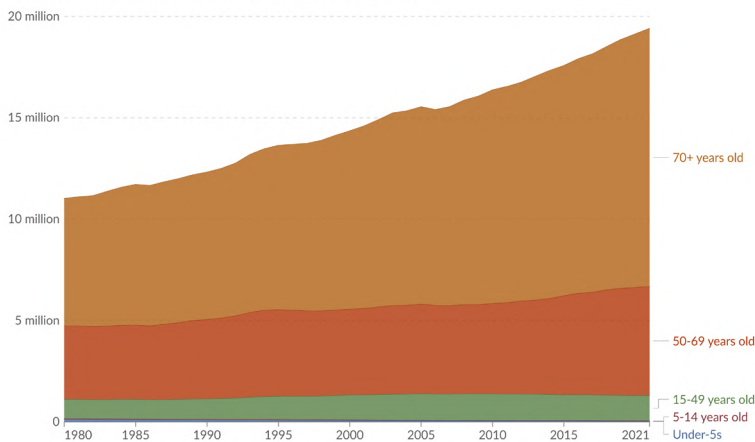
²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases¹ in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration².



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

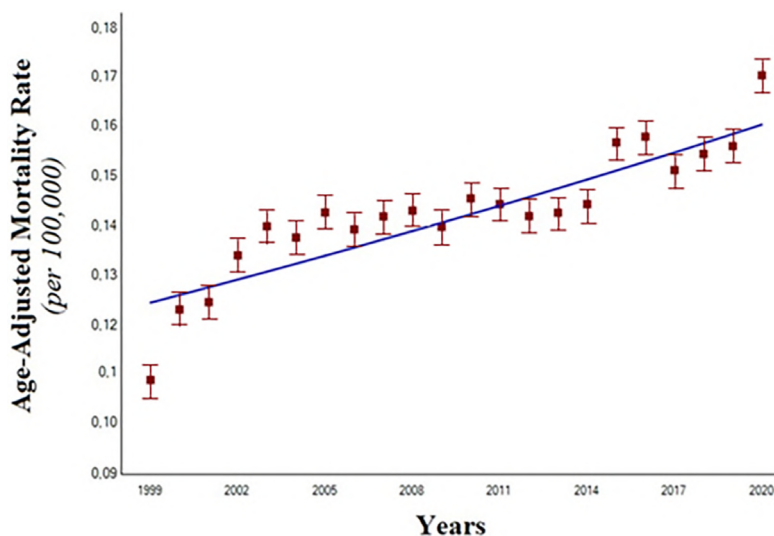
1. **Cardiovascular disease:** Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially when people have risk factors like high blood pressure, smoking, alcohol use, poor diet, and air pollution.

2. **Civil Registration and Vital Statistics system:** A Civil Registration and Vital Statistics system (CRVS) is an administrative system in a country that manages information on births, marriages, deaths and divorces. It generates and stores 'vital records' and legal documents such as birth certificates and death certificates. You can read more about how deaths are registered around the world in our article: How are causes of death registered around the world?

Obrázek 98 Počet úmrtí na kardiovaskulární onemocnění podle věku. Svět.

Zdroj: Our World in Data

<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>



Obrázek 99 Trendy ve věkově upravených ukazatelích úmrtnosti v důsledku náhlé srdeční smrti s příslušnými 95% intervaly spolehlivosti u mladých dospělých ve Spojených státech ve věku 25 až 44 let v letech 1999 až 2020.

Zdroj: Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

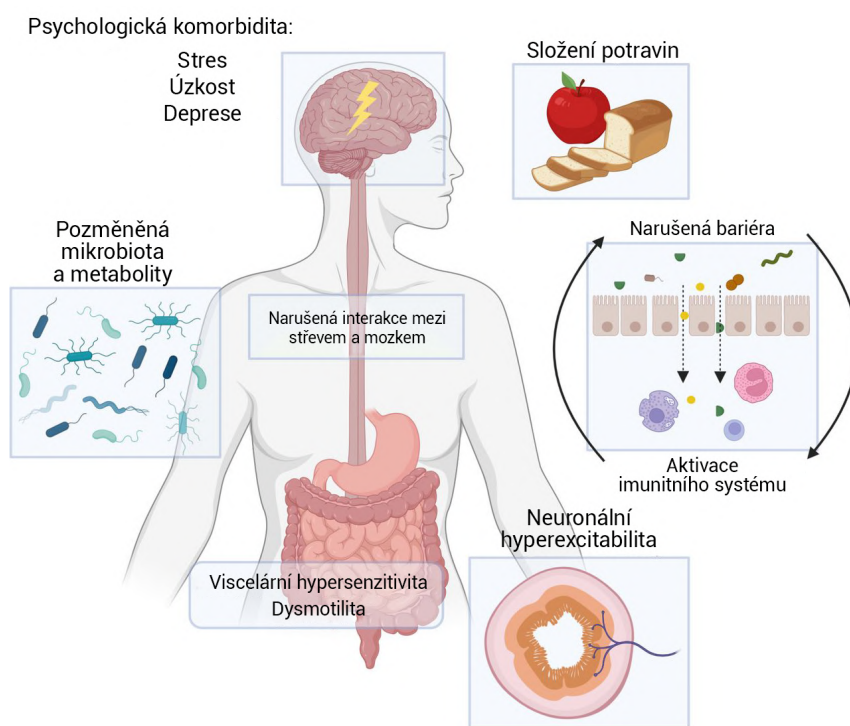
Dalším kritickým problémem je nárůst syndromu náhlého úmrtí kojenců (SIDS). Jen ve Spojených státech se míra SIDS mezi lety 2019 a 2020 zvýšila o 15 % a posunula se ze čtvrté na třetí příčku v úmrtnosti kojenců²⁶³. Přestože přesné příčiny SIDS zůstávají nejasné, mnoho vědců se domnívá, že klíčovou roli mohou hrát faktory narušující regulaci srdečního rytmu a cévního tonusu u kojenců. Nanoplasty, které jsou schopné procházet placentou a hromadit se v tkáních vyvíjejícího se plodu, jsou považovány za jeden z pravděpodobných rizikových faktorů. Vědci se stále více shodují na názoru, že nanoplasty mohou být klíčovým kandidátem na roli „neviditelného zabijáka“.

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Srdce, jeden z orgánů těla s nejvyšší energetickou náročností, je pro pokrytí svých energetických potřeb kriticky závislé na efektivním fungování mitochondrií. Expozice mikroplastovým částicím narušuje mitochondriální procesy, což může vést k energetickému deficitu v myokardu a v důsledku toho k poruchám srdeční funkce.

Gastrointestinální dysfunkce způsobená expozicí MNP

Střevo je největším imunitním orgánem těla, v němž se nachází přibližně 70 % všech imunitních buněk, kolem 500 milionů neuronů a více než 100 bilionů mikroorganismů²⁶⁴. Střevní mikrobiota hraje zásadní roli v udržování imunitního zdraví a její nerovnováha může oslabit imunitu a přispět k rozvoji různých onemocnění. Střevo, které je často označováno jako „druhý mozek“ kvůli své husté neuronové síti a schopnosti komunikovat s centrálním nervovým systémem²⁶⁵, se podílí na komplexní biochemické signalizaci s mozkem prostřednictvím „osy střevo-mozek“, která významně ovlivňuje jak fyzické, tak psycho-emocionální zdraví (obr. 100).



Obrázek 100 Patofyziologické mechanismy poruch interakce mezi střevem a mozkem.

Zdroj: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Vagal sensory neurons and gut-brain signaling. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁵Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Zdravá střevní bariéra brání mikrobům a cizím látkám propouštět částice z lumen střeva do krevního řečiště²⁶⁵. Mikroplasty a nanoplasty narušují tuto bariéru a zvyšují propustnost střevní stěny. To vede k zánětu střeva a dalších orgánů a oslabení imunity²⁶⁶. Zároveň MNP mění složení střevní mikroflóry, což způsobuje nerovnováhu mezi prospěšnými a patogenními mikroorganismy. Trávení je narušené, snižuje schopnost těla rozkládat potravinové alergeny a zvyšuje riziko potravinových alergií²⁶⁷.

Vzniká začarovaný kruh: plasty narušují střevní mikroflóru, zvyšují zánětlivost a ohrožují integritu střevní stěny. V důsledku toho se toxiny, bakterie a plastové částice začínají dostávat do krevního řečiště. Jejich přítomnost v krvi vyvolává imunitní reakci, která vede k chronickému zánětu v celém těle. Z krevního řečiště mohou tyto toxiny, bakterie a nanoplasty překročit hematoencefalickou bariéru a dostat se do mozku, kde vyvolávají zánětlivé reakce. Tyto procesy zase narušují imunitní reakci, zvyšují stresovou reakci organismu a mohou negativně ovlivňovat střevní mikroflóru prostřednictvím neuroendokrinních mechanismů, čímž uzavírají začarovaný kruh podél osy „střevo–mozek“.

Narušení interakce mezi střevním mikrobiomem a centrálním nervovým systémem je přímo spojeno s neurologickými poruchami. Například děti s poruchami autistického spektra vykazují významnou nerovnováhu mikrobioty, což potvrzují mikrobiologické analýzy a hodnocení funkce trávicího systému²⁶⁸.

Studie pacientů s zánětlivým onemocněním střev ukazují pozitivní korelaci mezi závažností onemocnění a koncentrací mikroplastů ve stolici. Pacienti se zánětlivým onemocněním střev mají vyšší hladiny mikroplastů (41,8 částic/g) ve srovnání se zdravými jedinci (28,0 částic/g). Kromě toho byla u těchto pacientů pozorována významná akumulace mikroplastů v ulcerózních lézích sliznice konečníku²⁶⁹.

Mikroplasty, které zůstávají ve střevech, navíc i dlouho po svém vstupu do těla nadále vykazují škodlivé účinky.

²⁶⁵Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

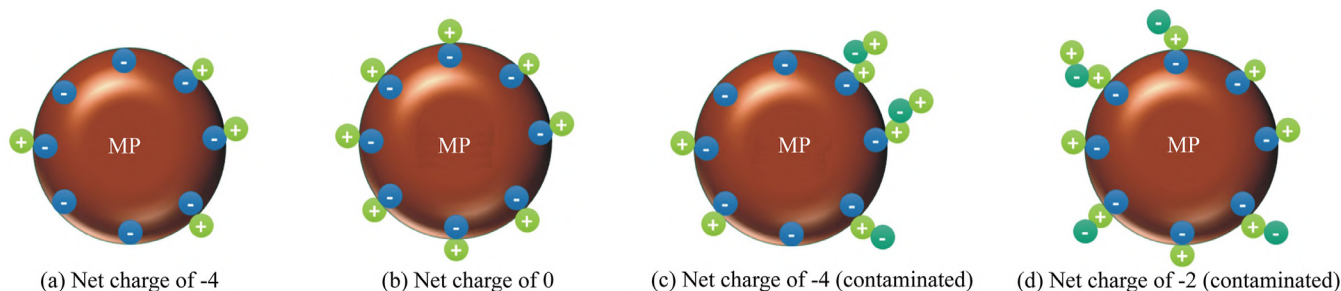
²⁶⁷Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹Yan, Z. et al. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environ. Sci. Technol.* 56, 414–421 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>

Vliv MNP na imunitní systém

MNP narušují imunitní reakci v těle a vytvářejí podmínky příznivé pro množení patogenů. Nabité MNP snadněji přitahují jiné molekuly, jako jsou toxiny, soli těžkých kovů, bakterie a viry (obr. 101). To z nich činí jakousi „transportní platformu“ pro toxické sloučeniny, která zesiluje biologickou aktivitu a toxicitu těchto látek. Elektrostatický náboj nanoplastů představuje jakýsi zdroj energie či „dobíjení“, díky němuž si bakterie a viry déle zachovávají svou životaschopnost.



Obrázek 101 Ilustrace účinku povrchových nábojů mikroplastu způsobených znečišťujícími látkami ve vodě.

Zdroj: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Kromě toho mohou nabité mikro- a nanoplastové částice zůstat ve vodě a vzduchu v suspenzi po delší dobu. Snadněji se dostávají do aerosolů a vstupují do dýchacího systému, což zvyšuje pravděpodobnost jejich absorpce do lidského těla.

Kumulativní účinky MNP na mikrobiom, patogeny a imunitní systém představují komplexní zdravotní rizika.

Imunitní buňky, které přicházejí do styku s mikroplasty, umírají přibližně třikrát rychleji než ty, které se s nimi nesesetkávají²⁷⁰.

Částice mikroplastů jsou schopny adsorbovat na svém povrchu viry díky elektrostatickým a hydrofobním interakcím, a tím prodlužovat jejich životaschopnost²⁷¹.

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Viry na povrchu mikroplastů zůstávají aktivní až tři dny – to stačí k tomu, aby urazily cestu například od čistíren odpadních vod až na pláže²⁷².

Mikroplasty usnadňují šíření patogenů a mohou přispívat k jejich genetické rekombinaci. Studie ukázala, že částice plastů nejen zhoršují účinek léčiv, ale také mohou napomáhat rozvoji bakterií odolných vůči antibiotikům²⁷³.

Nabité částice MNP slouží jako platforma pro kolonizaci mikroorganismů²⁷⁴. Bakterie a houby, využívající elektrostatické pole nanoplastu, vykazují zrychlený růst. Výzkumy na *dafniích* zjistily, že působení nanoplastů vyvolává oxidační stres a zvyšuje výskyt mykotických infekcí (druh *Metschnikowia*) 11krát²⁷⁵. To je v souladu s globálním rozšiřováním areálu a odolnosti mykotických onemocnění, které WHO označila za rostoucí hrozbu pro veřejné zdraví.



„Ze stínů pandemie antimikrobiální rezistence bakterií se vynořují mykotické infekce, které se šíří a stávají se stále odolnějšími vůči léčbě, čímž se stávají problémem pro veřejné zdraví na celém světě,“ uvedl Dr. Hanan Balkhi, asistent generálního ředitele WHO pro oblast antimikrobiální rezistence²⁷⁶.

Metabolity hub, vylučované v přítomnosti MNP, jsou spojovány s růstem nádorů²⁷⁷ a chronickým zánětem. DNA hub byla nalezena v některých typech rakoviny, což naznačuje možnou roli MNP v onkogenezi²⁷⁸.

²⁷²University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

²⁷³Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

²⁷⁷Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

Onkogenní působení MNP

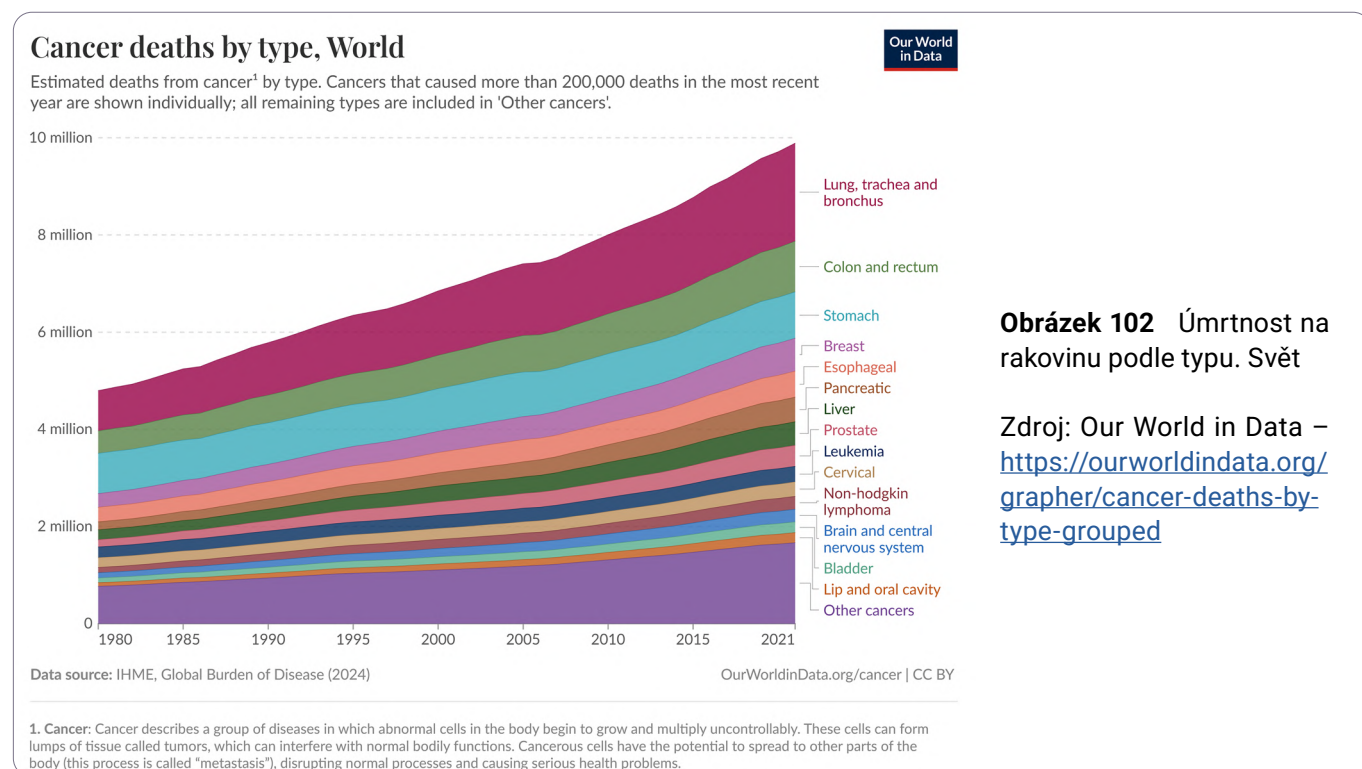
Mechanismy mutací a rozvoje metastáz

Podle výše uvedených informací jsou mikro- a nanoplasty významným faktorem ve vývoji zhoubných nádorů, a to s ohledem na jejich negativní vliv na buněčné a systémové úrovni.

Výzkumy ukazují, že mikro- a nanoplasty mohou hrát roli skrytých katalyzátorů rozvoje rakoviny, zesilovat migraci buněk a podporovat metastazování²⁷⁹. Bylo také zjištěno, že částice MNP mohou přetrvávat uvnitř buněk po dlouhou dobu a předávat se dceřiným buňkám během dělení.

V současné době úmrtnost na onkologická onemocnění ve světě nadále roste (obr. 102).

Předpokládá se, že do roku 2050 se počet nových případů rakoviny zvýší o 77 %²⁸⁰.



²⁷⁹Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. Chemosphere 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

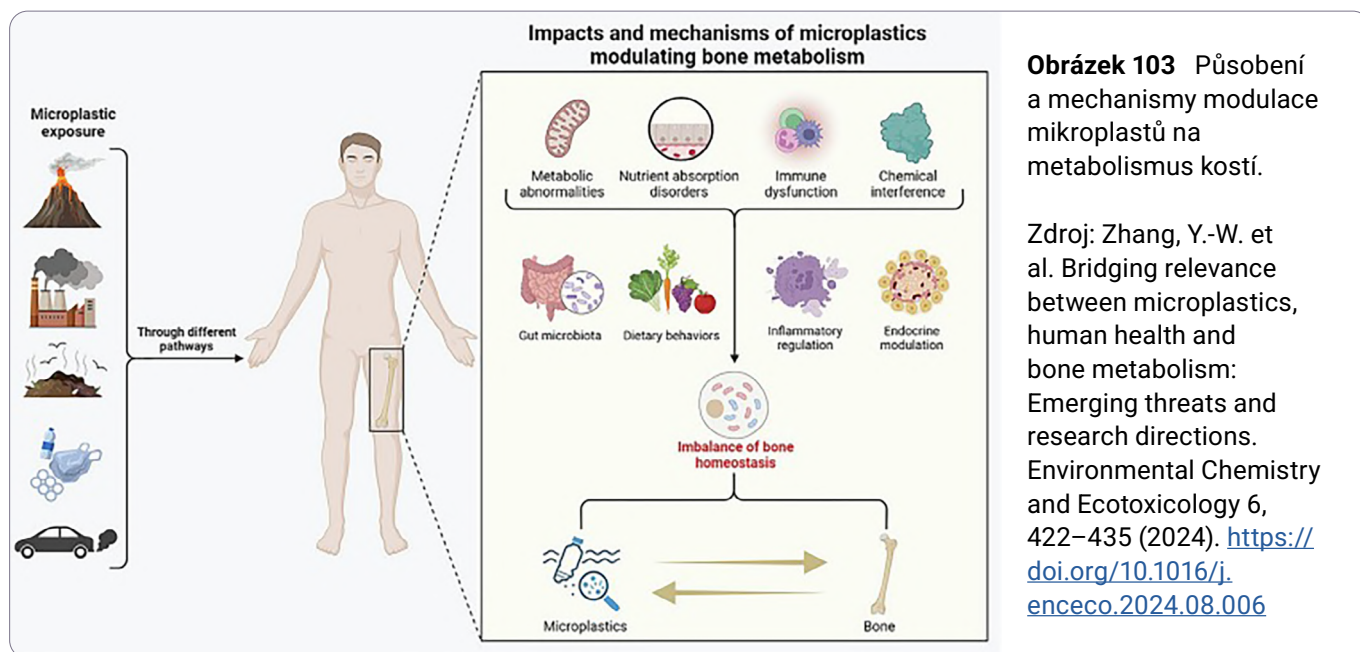
²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

Vliv MNP na metabolismus vápníku a strukturu kostí

Plastové částice jsou schopny pronikat dokonce i do pohybového aparátu – základu fyzického fungování člověka (obr. 103). Tam, kde panuje přesná rovnováha mezi destrukcí a tvorbou, kde se kosti denně obnovují, klouby tlumí tření a svaly zajišťují pohyb a teplo, mohou mikroplasty – mimo jiné díky svému elektrostatickému náboji – nahrazovat stavební molekuly a spouštět pomalé, destruktivní procesy.

Výzkumy ukazují, že mikroplasty jsou schopny pronikat do kostní tkáně, kde jim jejich molekulární struktura umožňuje napodobovat vápník a další minerály nezbytné pro kostní metabolismus. Výsledkem je, že plasty mohou být organismem mylně považovány za stavební materiál pro kosti. Organismus doslova začíná „stavět“ kosti z plastů.

Toto narušení molekulárního rozpoznávání je spojeno s řadou negativních následků: mikroplasty mohou narušovat funkce osteoblastů a osteoklastů, ovlivňovat metabolismus vápníku a fosforu, a tím přispívat k rozvoji osteoporózy. Spouští se zánětlivé kaskády, dochází k poruchám exprese genů a kostní tkáň ztrácí hustotu a pevnost. Kromě toho může přítomnost nanoplastů vyvolávat chronický zánět, který poškozuje kloubní chrupavku a kostní tkáň, což je spojeno se zvýšeným rizikem osteoartrózy, bolestivého syndromu a ztuhlosti pohybů^{281, 282}.



Obrázek 103 Působení a mechanismy modulae mikroplastů na metabolismus kostí.

Zdroj: Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025). <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).

Výzkum na hlodavcích prokázal, že u myší, které dostávaly polystyrenové mikroplasty, se množství osteoblastů výrazně snížilo²⁸⁰.

Neméně závažnou hrozbu představuje plast i pro kosterní svalstvo. Výzkumy ukazují, že nanoplasty jsou schopny pronikat do svalových buněk a narušovat činnost mitochondrií. Vzniká energetický deficit, aktivují se agresivní formy reaktivních kyslíkových radikálů, což urychluje stárnutí buněk, narušuje regeneraci svalů po zátěži a přispívá k jejich atrofii. Zvláště ohroženi jsou starší lidé a pacienti s chronickými onemocněními.

Mikro- a nanoplasty se hromadí v kostní dřeni²⁸³, kde narušují tvorbu kmenových buněk (hematopoetických a mezenchymálních)²⁸⁴, z nichž vznikají erytrocyty, leukocyty, trombocyty, osteocyty, chondrocyty a adipocyty. Jejich dysfunkce způsobuje systémové poškození organismu.

Reprodukční poruchy spojené s působením MNP

Neplodnost a erektilní dysfunkce

Snížení plodnosti

Podle prognóz se do roku 2045 svět stane zcela neplodným²⁸⁵.

Již v roce 2018 vyzvala skupina předních lékařů a vědců na **XIII. mezinárodním sympoziu o spermatologii** ve Stockholmu vlády, aby uznaly pokles mužské plodnosti za závažný problém veřejného zdraví a aby uznaly význam mužského reprodukčního zdraví pro přežití lidského druhu²⁸⁶.

Reprodukční zdraví, navzdory rozšířenému názoru, není určováno pouze hormonální rovnováhou, dědičností a životním stylem. Stále více vědeckých studií poukazuje na zásadní roli mitochondrií v procesech početí a vývoje embrya. Tyto drobné organely, zodpovědné za tvorbu energie potřebné pro všechny životní procesy, hrají klíčovou roli v plodnosti jak u mužů, tak u žen a jejich význam pro reprodukční funkci člověka se ukazuje být mnohem hlubší.

Poruchy funkce mitochondrií mohou být příčinou neplodnosti jak u žen, tak u mužů. U mužů jsou mitochondrie umístěné v ocasní části spermie zodpovědné za pohyblivost potřebnou k oplodnění. Poruchy jejich činnosti snižují pohyblivost spermií a mohou způsobovat anomálie.

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

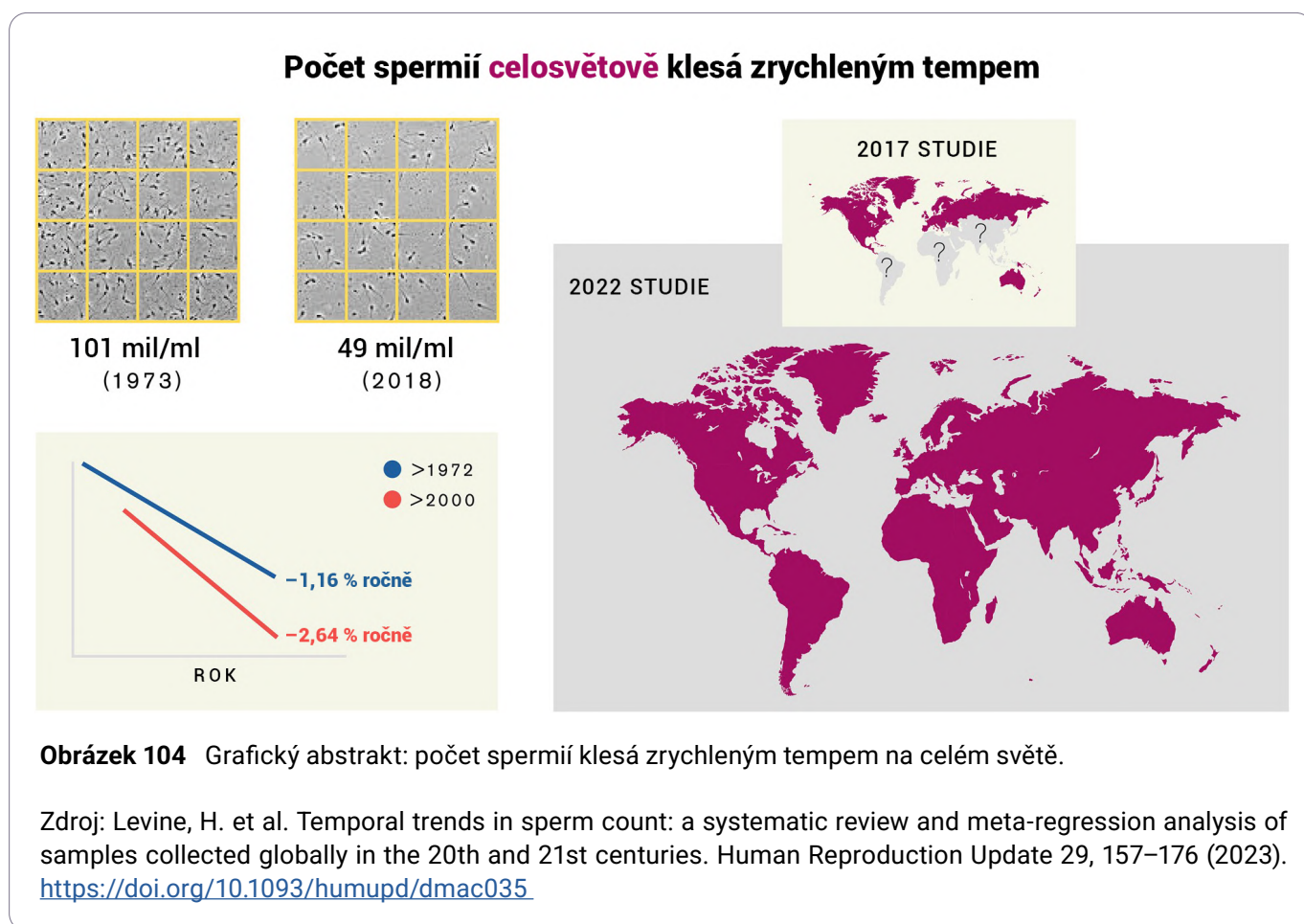
²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

Ve studiích provedených čínskými vědci byly mikroplasty nalezeny ve všech vzorcích spermatu – v průměru dvě částice o velikosti do 7 μm , nejčastěji polystyren²⁸⁷. Jeho přítomnost je spojena s morfologickými poruchami spermií a zkrácením telomer.

Díky mikroskopickým rozměrům a náboji jsou nanoplasty schopny překonávat hemato–testikulární bariéru a pronikat do pohlavních orgánů, a tím narušovat jejich funkce.

Zvláštní znepokojení vyvolává pozorovaná tendence poklesu celkového počtu spermií u mužů o 62,3 % v období od roku 1973 do roku 2018²⁸⁸ (obr. 104).

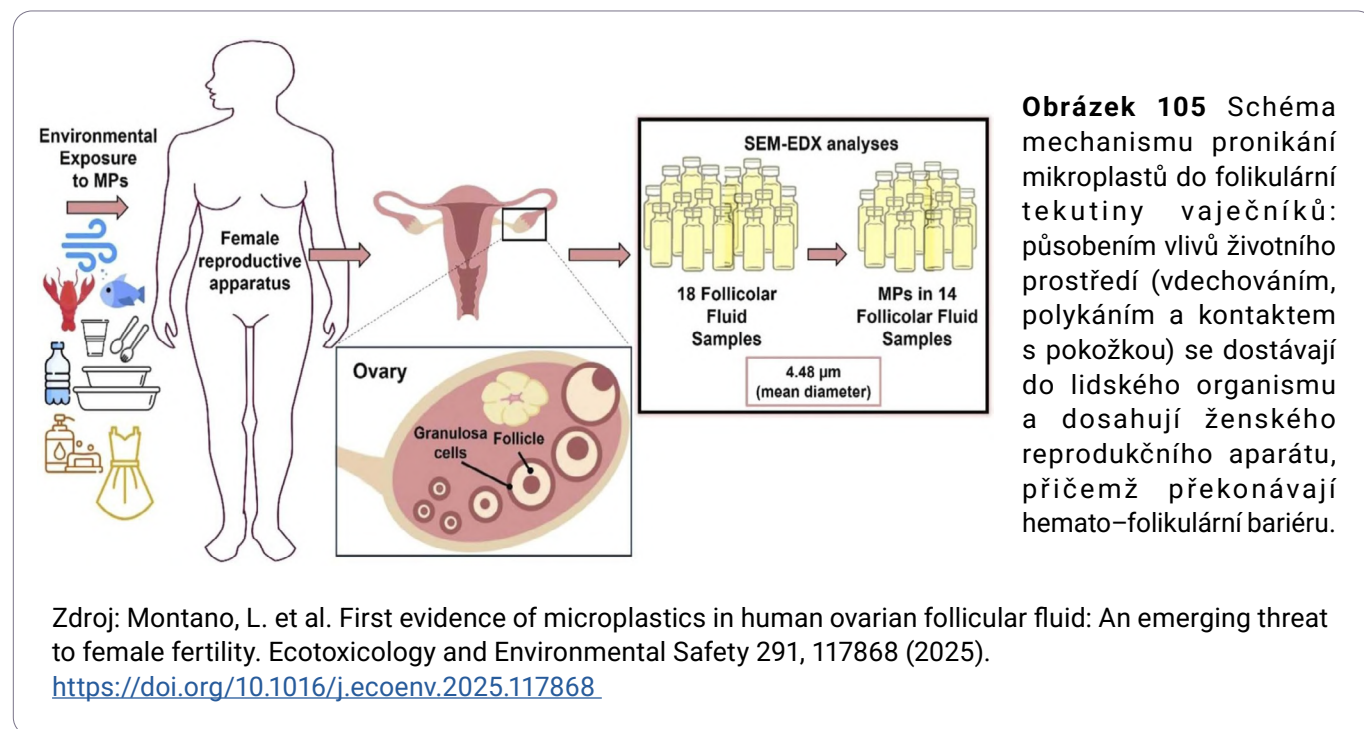


Ačkoli má na plodnost vliv mnoho faktorů, stále více vědců se přiklání k názoru, že chemické sloučeniny obsažené v plastech hrají v tomto procesu jednu z klíčových rolí. Ftaláty, používané k dodání pružnosti plastům, narušují hormonální rovnováhu, snižují libido a mohou přispívat k předčasné pohlavní dospělosti a poruše funkce varlat.

²⁸⁷Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Neméně znepokojivá je i situace v oblasti ženské plodnosti. Studie z roku 2025 odhalila přítomnost částic mikroplastů ve folikulární tekutině vaječníků u 14 z 18 žen, v průměru více než 2 000 částic na mililitr, z nichž většina měla průměr menší než 5 μm ²⁸⁹ (obr. 105).



Tato data svědčí o schopnosti plastových částic překonávat hemato–folikulární bariéru ve vaječnících. Na buněčné úrovni mohou mikro- a nanoplasty poškozovat DNA, narušovat dělení buněk a vyvolávat zánět. Bylo prokázáno jejich zasahování do hormonální regulace, narušení funkcí placenty, vliv na angiogenezi a souvislost s rozvojem myomu dělohy.

Erektilní dysfunkce

Výsledky národního výzkumu v Japonsku ukázaly, že erektilní funkce a sexuální aktivita u mladé generace klesají²⁹⁰. Hodnocení na základě EHS odhalilo prevalenci ED ve výši 30,9 %, která postihla přibližně 14 milionů mužů, a že sexuální touha, tvrdost erekce, orgasmus a spokojenost byly u mladých japonských mužů, zejména ve věku 20–24 let, nižší, než se očekávalo, ačkoliv tyto mívaly tendenci se zhoršovat s věkem. Za pozornost stojí především to, že míra prevalence ve věkové skupině 20–24 let činila 26,6 %, což je téměř stejné jako u věkové skupiny 50–54 let (27,8 %) (obr. 106, 107).

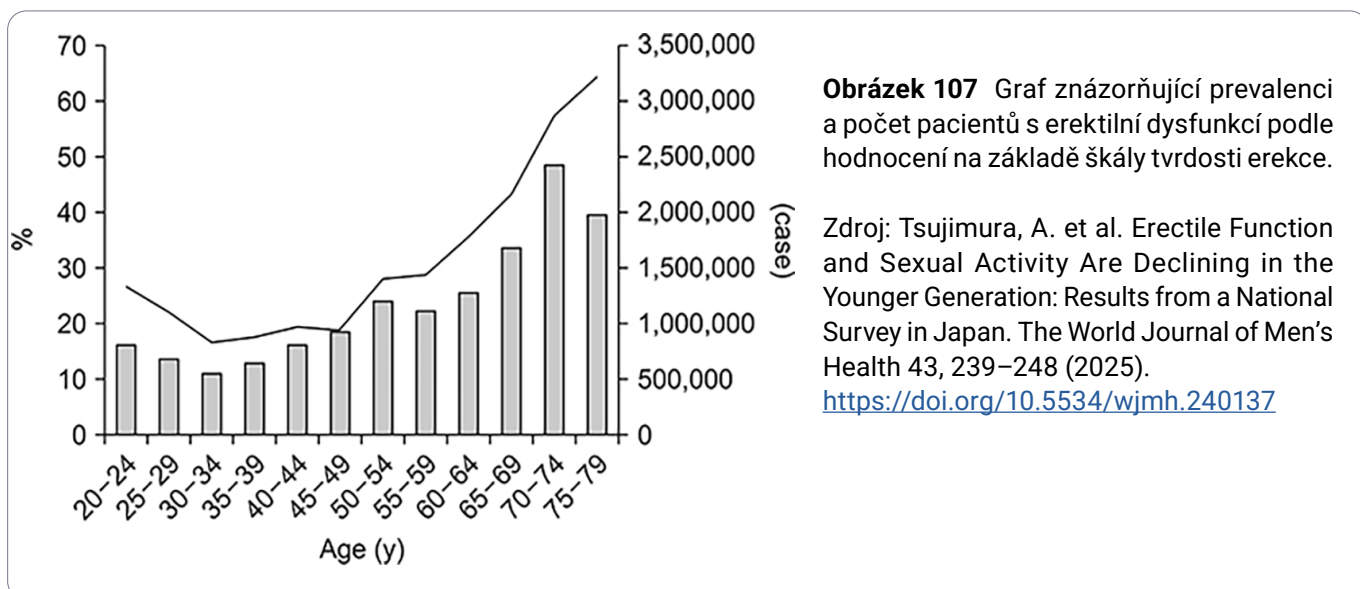
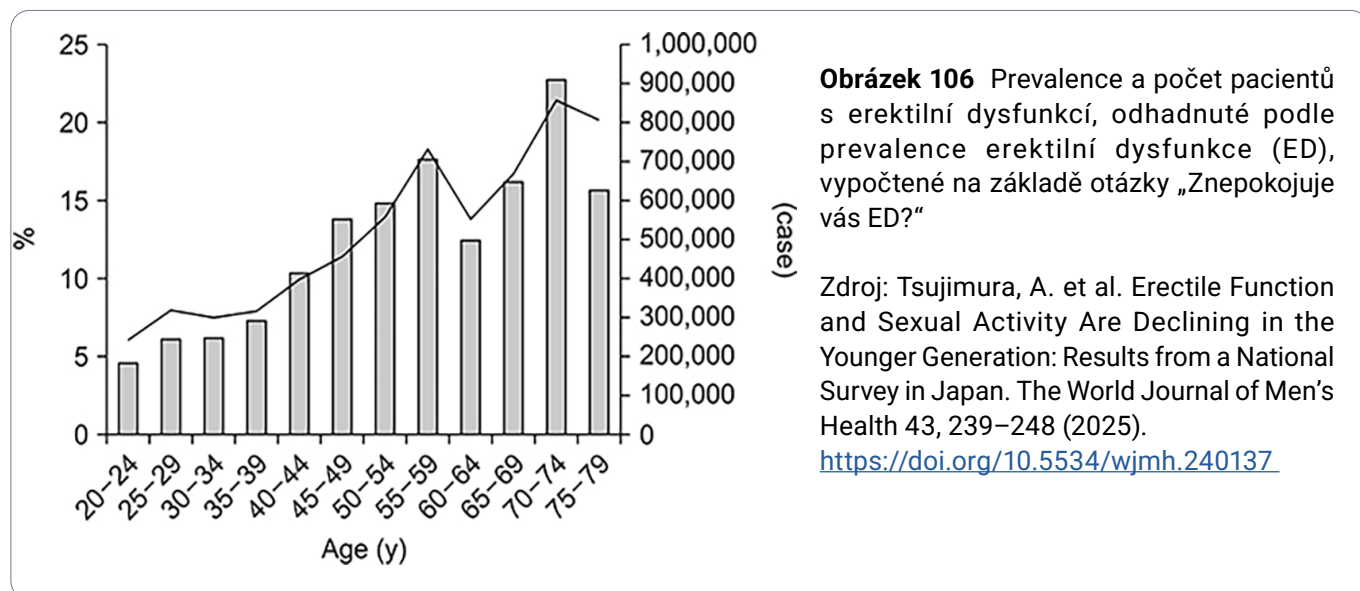
²⁸⁹Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Kromě toho se v jiné studii provedené po celém světě uvádí, že u tří čtvrtin mužů se projevují symptomy ED, což svědčí o tom, že ED není vzácným jevem a může postihnout kteréhokoli muže.

První oficiální národní studie sexuální funkce v Japonsku, provedená v roce 1998, odhadla, že se tam nachází přibližně 11,3 milionu pacientů se středně těžkou nebo úplnou ED. Kromě toho národní studie mužské neplodnosti v Japonsku, provedené v letech 1996 a 2015, odhalily překvapující údaje. Ve studii z roku 2015 se 13,5 % mužů potýkalo s mužskou neplodností z důvodu ED jako hlavní příčiny, což je téměř čtyřikrát více než v roce 1996.

Souhrn současných vědeckých poznatků ukazuje, že mikro- a nanoplasty v organismu představují jednu ze skrytých, avšak významných příčin zhoršení reprodukčního zdraví. Tyto částice pronikají do pohlavních orgánů, narušují funkce mitochondrií, vyvolávají záněty, hormonální poruchy a poškození DNA, snižují pohyblivost a morfologickou kvalitu spermií. Jsou nalézány ve spermatu i folikulární tekutině, což svědčí o překonání biologických bariér a hlubokém systémovém působení. To vše ohrožuje nejen individuální zdraví, ale i budoucí reprodukční schopnost lidstva jako celku.



Pronikání MNP přes placentární bariéru a jejich vliv na vyvíjející se organismus

Prenatální expozice mikro- a nanoplastů na plod

Těhotné ženy vykazují zvláštní zranitelnost vůči působení mikroplastů²⁹¹. Po proniknutí do organismu matky jsou plastové částice schopny dosáhnout plodu přes placentu, zasahovat do sekrece hormonů regulujících těhotenství a zvyšovat riziko předčasného porodu, potratu a vývojových poruch plodu (obr. 108). Podle odhadů se v roce 2020 narodilo 13,4 milionu dětí (1 z 10) předčasně (<37 týdnů), což zůstává hlavní příčinou dětské úmrtnosti. Děti, které přežijí, mají zvýšené riziko závažných onemocnění a chronických stavů²⁹².

Vyvíjející se endokrinní systém dětí je rovněž mimořádně citlivý na chemické látky obsažené v plastech, které mohou napodobovat nebo blokovat hormony²⁹³ (obr. 109). Expozice u kojenců může nastat dokonce i prostřednictvím mateřského mléka. Kromě toho mohou nanoplasty působit s časovým odstupem, narušovat procesy tvorby pohlavních buněk v dětství a dospívání a snižovat plodnost v dospělosti.

Placentární bariéra hraje klíčovou roli v regulaci výměny látek mezi matkou a plodem a chrání jej před škodlivými látkami. Výzkumy však ukazují, že mikro- a nanoplasty mohou placentární bariéru překonávat.

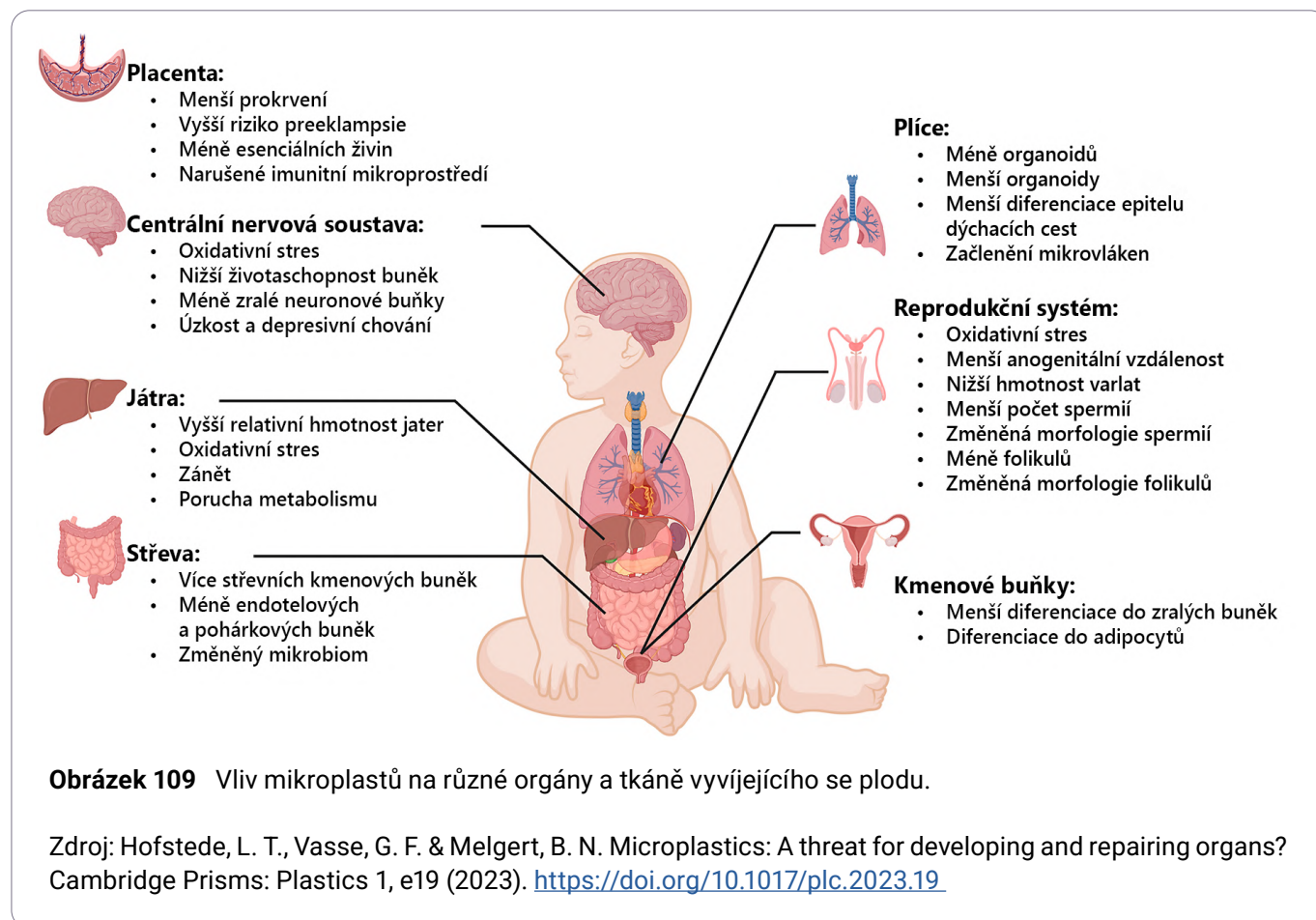
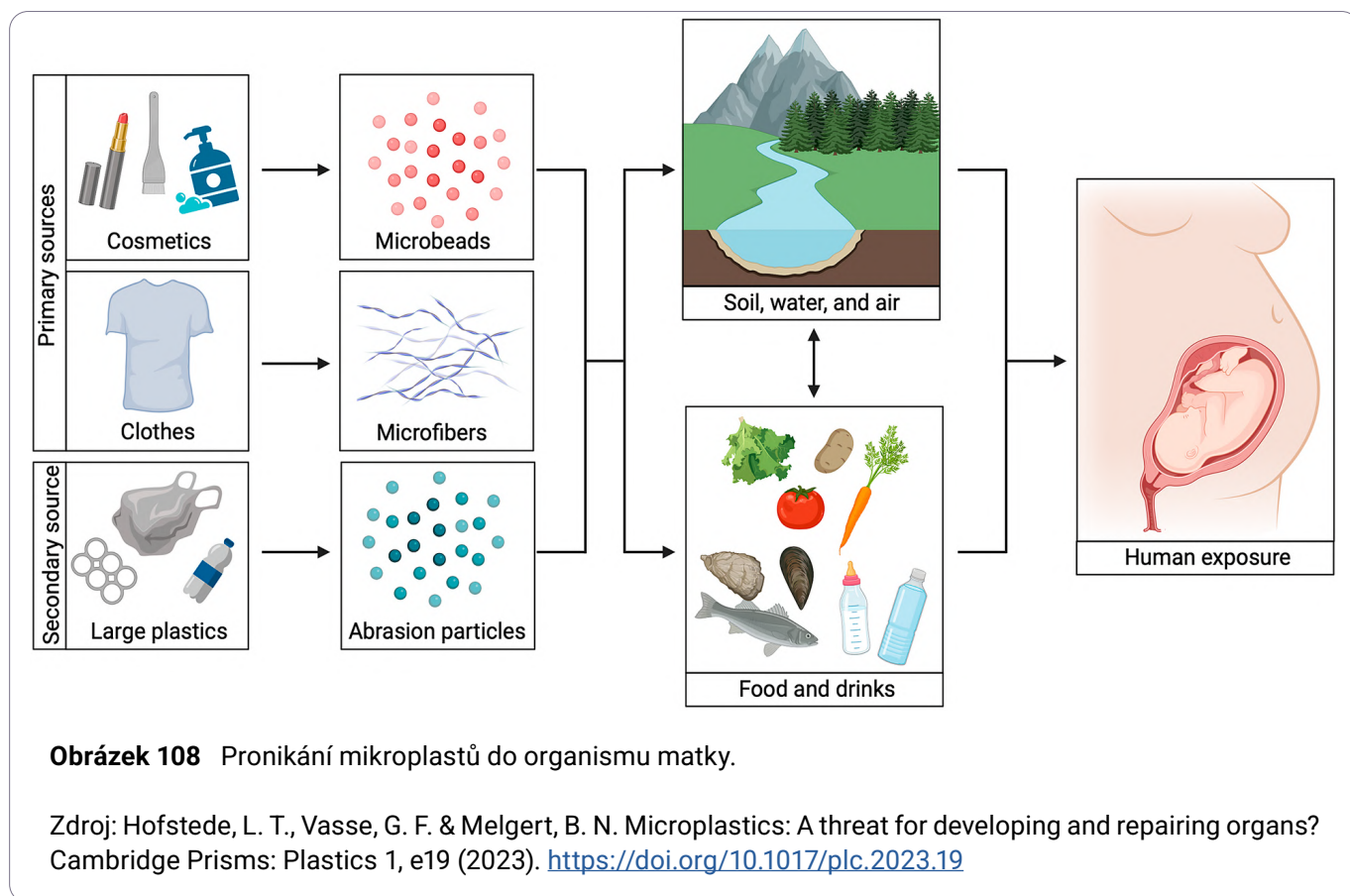
V roce 2020 studie vedená Antoniem Raguzou s využitím Ramanovy mikrospektroskopie (metody založené na analýze rozptylu světla k určení chemického složení materiálů) odhalila přítomnost mikroplastů v placentách čtyř z šesti vyšetřovaných žen s normálním průběhem těhotenství. V odebraných vzorcích bylo nalezeno po 12 částicích o velikosti 5–10 µm, včetně polypropylenu a pigmentů používaných v kosmetice, barvách, lepidlech a hygienických prostředcích²⁹⁴.

²⁹¹Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

²⁹²World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early-with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).

²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>



Studie provedená Univerzitou v Novém Mexiku ukázala, že koncentrace mikro- a nanoplastů v placentách předčasně narozených dětí je vyšší než u dětí donošených. Analýza 158 placent s využitím hmotnostní spektrometrie odhalila, že u žen, které porodily předčasně, docházelo k hromadění plastových částic ve větším rozsahu²⁹⁵.



„Nanočástice zřejmě působí nepřímo na dítě v děloze matky tím, že prostřednictvím signálních látek potlačují tvorbu krevních cév,“ říká biologka Tina Bürki²⁹⁶.

Nanočástice polystyrenu mohou způsobovat poruchy vývoje mozku plodu, zejména kognitivní deficit²⁹⁷.

Podle výzkumů může expozice mikroplastům během těhotenství a v prvních měsících života vést k nevratným změnám reprodukčního a centrálního nervového systému u potomstva různých druhů²⁹⁸.

Postnatální expozice mikroplastům a nanoplastům u kojenců

Novorozenci jsou neustále vystaveni expozici MNP z prostředí.

Studie z roku 2020²⁹⁹ zjistila, že kojenci mohou denně přijmout až 4,5 milionu plastových částic pouze z polypropylenových lahví, které tvoří většinu dětských lahví používaných po celém světě.

Kojenci mohou mikroplasty přijímat také prostřednictvím mateřského mléka. V roce 2022 byla při analýze mateřského mléka od 34 zdravých žen zjištěna přítomnost mikroplastů v 76 % vzorků³⁰⁰ (obr. 110). MNP mohou mít opožděné účinky a narušovat vývoj reprodukčních buněk během dětství a dospívání, což může snížit plodnost v dospělosti.

²⁹⁵ Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

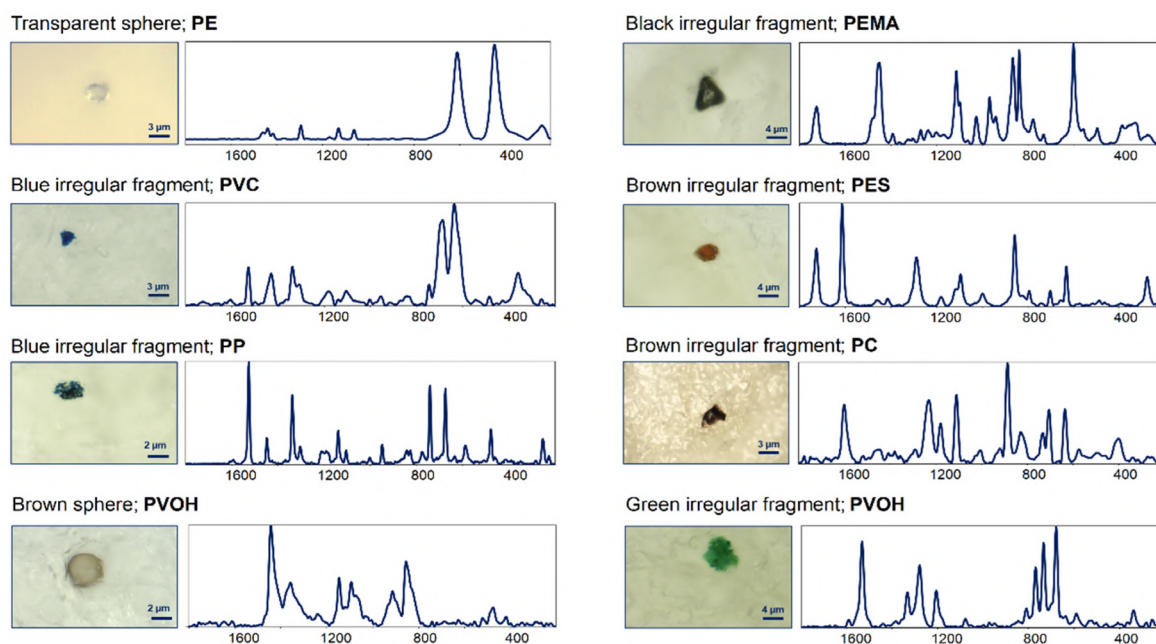
²⁹⁶ Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

²⁹⁷ Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸ Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹ Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰ Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>



Obrázek 110 Mikrofotografie a spektra Ramanova rozptylu (vlnová čísla, cm^{-1}) některých vybraných mikroplastů zjištěných v analyzovaných vzorcích mateřského mléka. PE: polyetylen; PVC: polyvinylchlorid; PP: polypropylen; PVOH: polyvinylalkohol; PEVA: poly(etylen–ko–vinylacetát); PEMA: poly(etylmethakrylát); PES: polyester a PC: polykarbonát.

Zdroj: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Další údaje ukazují, že hladiny MNP v kojenecké stolici jsou 14krát vyšší než u dospělých³⁰¹.

Nanoplasty a související chemické látky narušují molekulární strukturu a funkčnost mateřského mléka. Tyto sloučeniny mohou měnit bílkoviny v mateřském mléce a kojenecké výživě, což může vést k problémům s vývojem v pozdějším životě^{302, 303}.

Vysoké koncentrace MNP mají kumulativní toxický účinek na vyvíjející se organismus. Nanoplasty pronikají do buněk, kde mohou způsobit strukturální poškození DNA a narušit metabolické procesy. Tyto účinky zvyšují riziko genetických mutací a dlouhodobých patologií, což představuje hrozbu pro zdraví budoucích generací.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

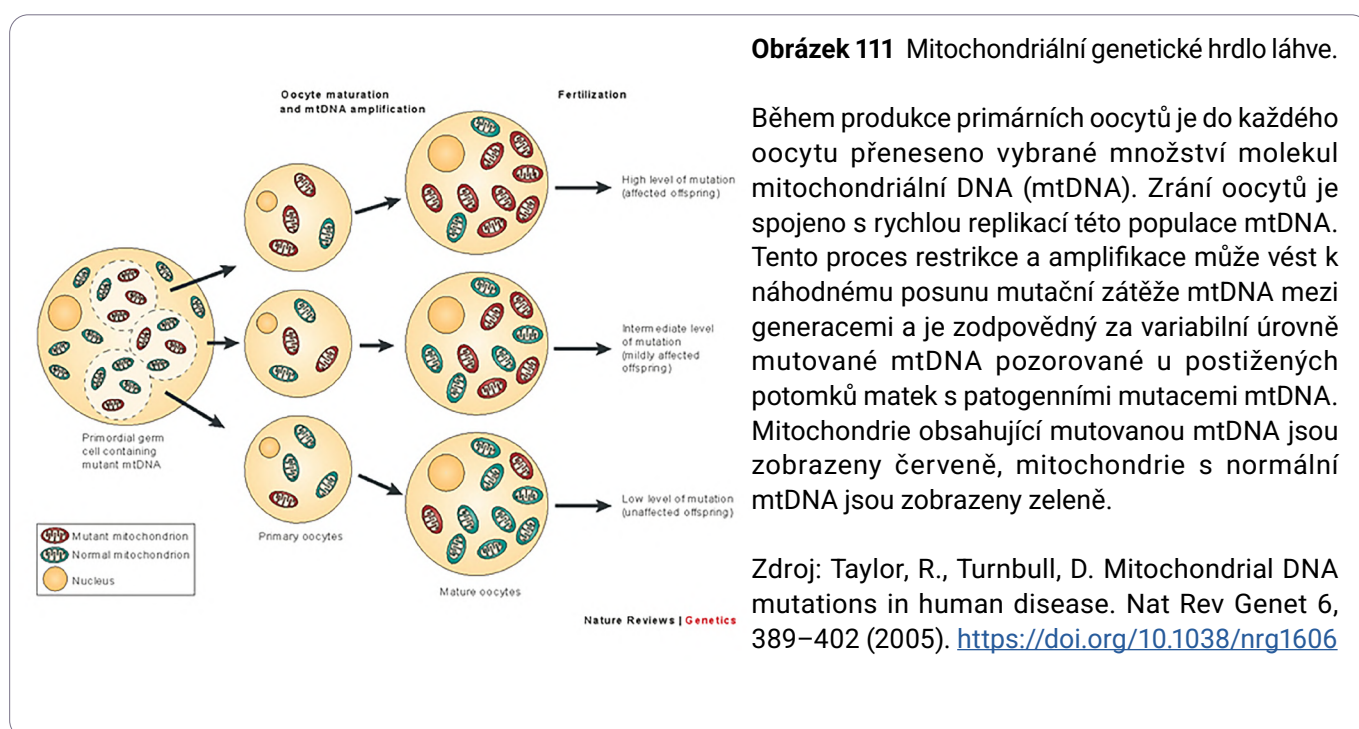
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Účinky expozice MNP a jejich souvislost s vrozenými vadami

Kromě schopnosti pronikat do tkání a buněk mají MNP ještě jednu nebezpečnou vlastnost: mohou být „zděděny“ budoucími generacemi. Během buněčného dělení se fragmenty MNP přenášejí z jedné buňky do druhé. Díky své nepatrné velikosti a elektrostatickému náboji mohou tyto částice snadno překonat hemoplacentární bariéru a proniknout do tkání a buněk plodu, kde mají škodlivé účinky na vyvíjející se organismus. A především, jak již bylo v této zprávě opakovaně zdůrazněno, mikro- a nanoplasty vedou k mitochondriální dysfunkci.

Nedávná mandelovská randomizační studie poskytla přesvědčivé důkazy o příčinné souvislosti mezi expresí mitochondriálních proteinů a rizikem vrozených anomálií. Studie použila genetické varianty jako instrumentální proměnné ke snížení zkreslení, které je obvykle spojeno s použitím naměřených dat. Mezi 66 zkoumanými mitochondriálními proteinovými znaky byly nalezeny významné souvislosti s vývojovými vadami srdce, uší, nervového systému, urogenitálního systému a končetin. Tyto výsledky podporují hypotézu, že mitochondriální aktivita hraje klíčovou roli v embryonální morfogenezi³⁰⁴.

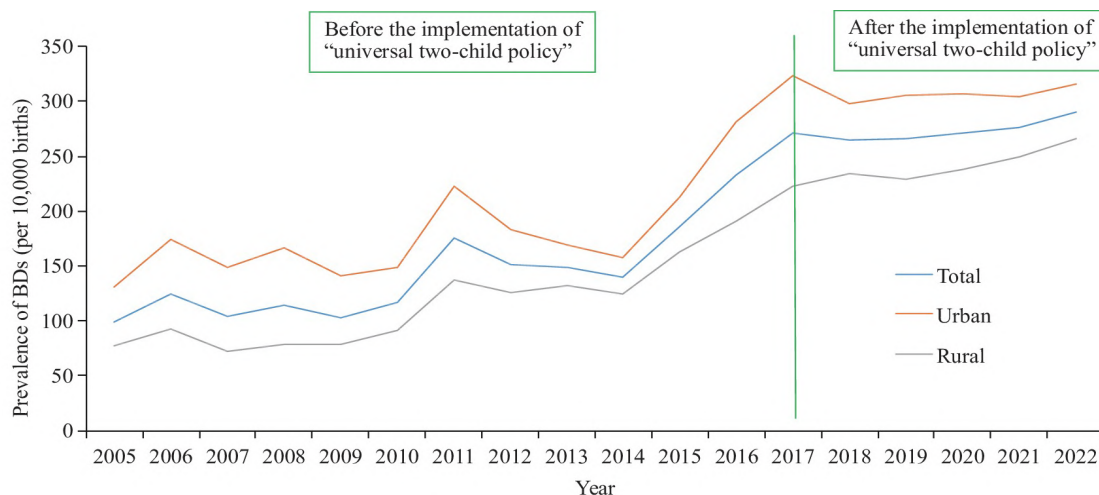
Mutace v mitochondriální DNA (mtDNA), ať už dědičné nebo vzniklé *de novo*, jsou příčinou celé řady klinických syndromů, včetně MELAS, MERRF, NARP, Leighova syndromu a dalších. Tyto mutace postihují především orgány s vysokou energetickou náročností, jako jsou srdce, mozek, svaly a oči. Přenos se uskutečňuje výhradně po mateřské linii kvůli mitochondriálnímu původu oocyty (obr. 111). Tyto poruchy se často projevují v raném věku a jsou charakterizovány závažnými neurologickými a metabolickými poruchami.



³⁰⁴Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Děti s mitochondriálními poruchami často trpí opožděným vývojem, svalovou slabostí, kognitivními poruchami a problémy s koordinací. Onemocnění jako Kearns-Sayreův syndrom, Barthův syndrom, Alpersova choroba a další mohou mít závažné následky, včetně invalidity, nebo dokonce smrti.

V posledních dvou desetiletích lékaři zaznamenávají znepokojivý nárůst vrozených vad u novorozenců. Jen v Číně se incidence téměř ztrojnásobila – z 99,15 na 10 000 narozených v roce 2005 na 290,27 na 10 000 narozených v roce 2022³⁰⁵ (obr. 112). Podobné trendy byly zaznamenány i v jiných zemích. Ačkoli je tento nárůst způsoben mnoha faktory, stále více vědeckých důkazů poukazuje na novou a rychle se zhoršující hrozbu: mikroplasty a zejména nanoplasty jsou schopny pronikat do embryonálních tkání a zasahovat do procesů formování orgánů a biologických systémů.



Obrázek 112 Prevalence vrozených vad v městských a venkovských oblastech v letech 2005 až 2020.

Zdroj: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Elektrostatický náboj nanoplastů představuje závažnou hrozbu pro embryonální tkáň, kde i jediná chyba může vést k vývojové anomálii. Tyto částice vykazují zvýšenou adhezi k povrchu buněk, včetně buněk neurální lišty – klíčových hráčů při tvorbě srdce, cév a kraniofaciálních struktur. V experimentálních studiích na kuřecích embryích vyvolaly nanoplasty závažné vady, včetně malformací srdce a hlavních cév. Jednou z nejrychleji narůstajících abnormalit je gastroschisis – vývojová vada přední břišní stěny, při které vyčnívají orgány plodu z těla otvorem v kůži a svaly (obr. 113, 114, 115). Podle mezinárodních údajů se prevalence tohoto onemocnění za poslední tři desetiletí zvýšila o 161 %, přičemž u matek mladších 20 let se míra výskytu zvýšila několikanásobně³⁰⁶. Předpokládá se, že nanoplasty narušují vývoj břišní stěny v raném stádiu těhotenství (4.–8. týden), vyvolávají zánět a narušují uzavření ventrální stěny těla.

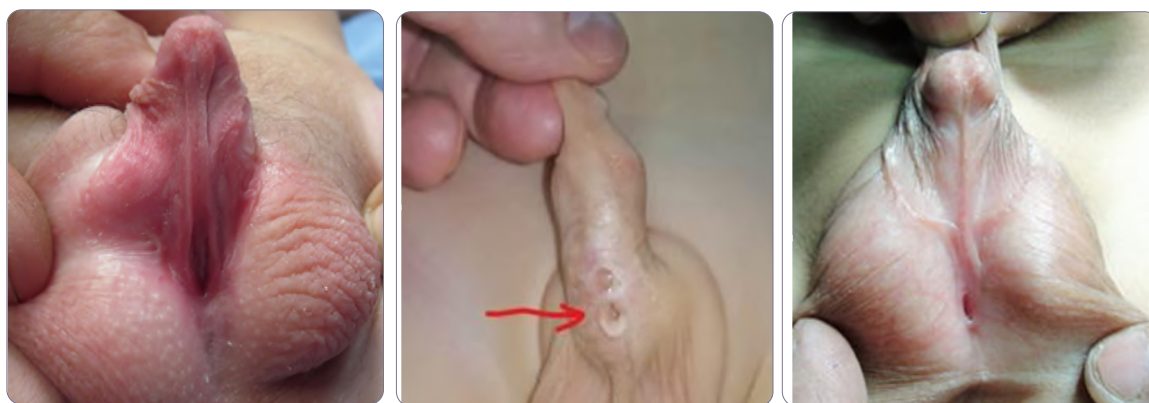
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Obrázky 113-115 Gastroschíza

Další vada, hypospadie, je anomálie, při níž se močová trubice u chlapců otevírá na nesprávném místě³⁰⁷ a která rovněž vykazuje trvalý nárůst (obr. 116, 117, 118). Například v USA v letech 1997 až 2018 činil nárůst případů přibližně 1,06 na 1 000 živě narozených chlapců (z 6,1 na 7,16 na 1 000) a procentuální přírůstek dosáhl zhruba 17 %³⁰⁸. Výzkumy na zvířecích modelech ukázaly, že expozice ftalátům, které jsou často přítomny v mikroplastech, narušuje syntézu testosteronu u samčích plodů.



Obrázky 116-118 Hypospadie

Tyto látky se vážou na nabitý povrch nanoplastů a snadno se dostávají do krevního řečiště a placenty, čímž zesilují hormonální poruchy během kritických období pohlavní diferenciaci. V této souvislosti došlo k nárůstu výskytu Downova syndromu, trizomie, atrioventrikulárních srdečních vad a dalších závažných onemocnění, a to z 12,78 na 10 000 živě narozených dětí v letech 1999–2001 na 15,55 na 10 000 v letech 2016–2020³⁰⁹.

Současně dochází k nárůstu neuropsychiatrických problémů u dětí, včetně úzkostných poruch a kognitivních deficitů. Přestože přímá příčinná souvislost s mikroplasty je stále předmětem výzkumu, známé mechanismy – jako zánět, epigenetická modulace a mitochondriální dysfunkce – poskytují důvody k podezření, že mikroplasty jsou jedním z přispívajících faktorů^{307, 310}.

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

³⁰⁸Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

³¹⁰Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Závěry a perspektivy

Je možné snížit vliv MNP na lidské zdraví?

Souhrnná analýza dat ukazuje, že mikroplasty a nanoplasty představují významný a podceňovaný rizikový faktor pro lidské zdraví. Současné vědecké důkazy jasně naznačují, že MNP jsou nedílnou součástí globální toxické zátěže lidského organismu. Díky své schopnosti překonávat biologické bariéry a hromadit se v různých tkáních – včetně mozku, srdce, plic a placenty – mají MNP toxické účinky na molekulární, buněčné a systémové úrovni. V kombinaci s chemickými přísadami a environmentálními znečišťujícími látkami adsorbovanými na jejich povrchu působí plastové částice jako spouštěče chronického zánětu, oxidačního stresu, mitochondriální dysfunkce a mutací DNA – procesů, které jsou základem široké škály onemocnění, včetně neurodegenerativních, onkologických, kardiovaskulárních, endokrinních a autoimunitních poruch. Zvláště alarmující je skutečnost, že částice MNP jsou prakticky nevylučitelné, hromadí se v těle s věkem a zesilují svůj kumulativní dopad.

Současné důkazy potvrzují, že vyhnout se expozici MNP je prakticky nemožné: jsou přítomny ve vzduchu, který dýcháme, ve vodě, kterou pijeme, v potravinách, které jíme, a dokonce i v buňkách zvířat a rostlin, které konzumujeme. Výsledkem je, že expozice člověka plastovým částicím je všudypřítomná a nepřetržitá, od prenatálního vývoje až po poslední fáze života. Zvláště znepokojující je vdechování, protože nanočástice mohou procházet hematoencefalickou bariérou a hromadit se přímo v mozkové tkáni, což činí centrální nervový systém jedním z nejzranitelnějších cílů.

Další biologické riziko vyplývá z elektrostatické aktivity částic MNP, která zvyšuje jejich interakci s biologickými strukturami a narušuje buněčnou homeostázu. Kromě toho mohou MNP působit jako nosiče patogenů a mikroorganismů odolných vůči antibiotikům, což dává plastovému znečištění výrazný interdisciplinární rozměr – rozměr, který se protíná s ekologií, toxikologií, imunologií, neurologií a reprodukční medicínou.

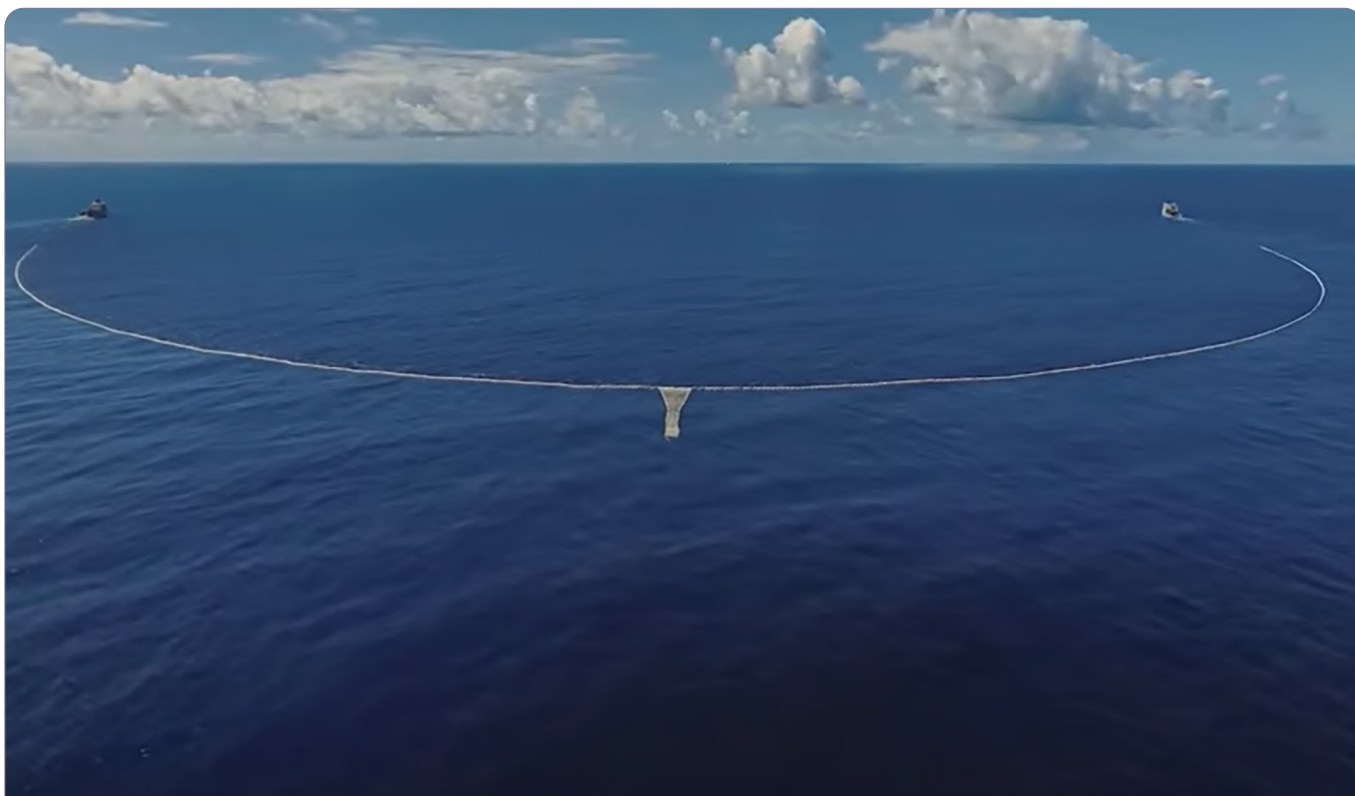
ALLATRA navrhuje v rámci širšího úsilí v boji proti hrozbě MNP několik strategických směrů. Jedním z nich je vývoj metod neutralizace nebo stínění elektrostatického náboje nanoplastů. Snížení elektrostatické aktivity těchto částic by mohlo významně snížit jejich škodlivé účinky a zpomalit jejich hromadění v těle. Podle autorů této zprávy mohou metody stínění nebo neutralizace náboje snížit potenciální rizika spojená s MNP nejméně o 50 %. To by mohlo poskytnout rozhodující čas pro vývoj komplexnějších strategií pro diagnostiku, prevenci a odstranění MNP z těla. V této souvislosti se stává obzvláště důležitý další výzkum v oblastech biofyziky, nanotechnologie a molekulární toxikologie.

Navzdory rostoucímu počtu vědeckých publikací na toto téma zůstává vliv MNP na lidské zdraví stále málo prozkoumán a nedostatečně zohledněn při vývoji strategií v oblasti veřejného zdraví a ochrany životního prostředí. Vzhledem k rozsahu znečištění plasty, biologické aktivitě částic a potenciálně nevratným důsledkům jejich účinků vyžaduje tato oblast naléhavou pozornost vědecké obce a zdravotnických orgánů. Vyžaduje také systematizaci stávajících údajů, vývoj standardizovaných rámců pro posuzování rizik a rozšíření mezivládní a mezinárodní vědecké spolupráce.

ANALÝZA SOUČASNÝCH PŘÍSTUPŮ K MINIMALIZACI PLASTOVÉHO ZNEČIŠTĚNÍ

Technologie odstraňování velkých plastů z vodních ekosystémů

Iniciativy na zmírnění dopadů znečištění oceánů se zaměřují především na odstraňování viditelného velkého odpadu z hladiny vody. V současnosti je jedním z nejrozsáhlejších projektů zaměřených na sběr plastů a dalších druhů plovoucího odpadu iniciativa The Ocean Cleanup. Jejich plovoucí systémy zachycují odpad z hladiny (obr. 119), který je následně tříděn a balen k dalšímu zpracování nebo likvidaci.



Obrázek 119 Na snímku je zobrazena technologie Ocean Cleanup v akci. Dlouhá plovoucí bariéra ve tvaru písmene U z pevného materiálu sbírá plastový odpad z hladiny oceánu.

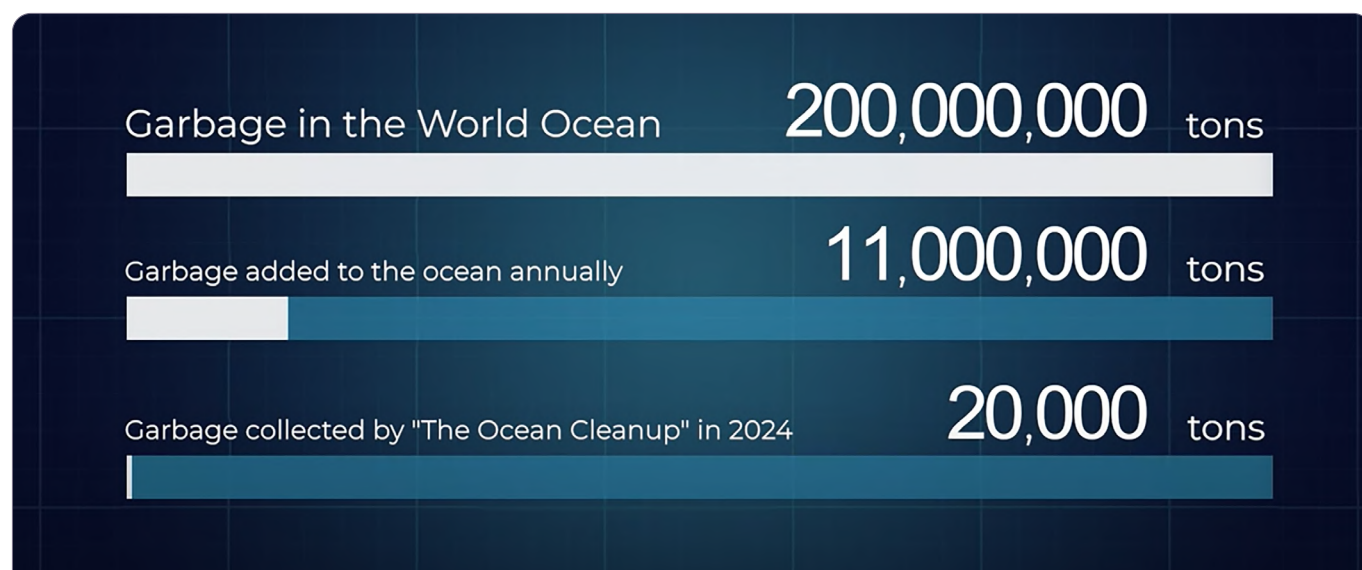
Zdroj: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (K datu: 01.05.2025).

Ačkoli se tato metoda jeví jako slibná, je důležité zohlednit několik aspektů, které vyžadují pozornost:

1. Proces sběru odpadu není selektivní a spolu s plastem se do pastí dostávají i živé organismy, jako jsou mikroskopické řasy, rybí larvy či medúzy. V současnosti chybějí kvantitativní odhady objemu vedlejšího výlovu, avšak případné rozsáhlé odstraňování těchto organismů může mít negativní dopady na mořské ekosystémy narušením přirozených potravních řetězců. Navzdory přijatým opatřením k zajištění bezpečnosti mořských živočichů zůstává tento problém nevyřešen.

2. Aktivisté se upřímně snaží vyčistit oceán, ale současné úsilí je stále nedostatečné k dosažení významných výsledků.

K listopadu 2024 bylo v rámci iniciativy The Ocean Cleanup odstraněno ze světového oceánu přibližně 20 000 tun plastového odpadu. To je bezpochyby významný výsledek. Avšak v kontextu globálního problému to představuje jen 0,01 % z celkového objemu plastového odpadu v oceánu, který se odhaduje přibližně na 200 milionů tun. Je přitom nutné zohlednit i přísun nového odpadu, jenž činí zhruba 11 milionů tun ročně (obr. 120). Tato data zdůrazňují neúměrnost mezi snahami o čištění a rozsahem problému.



Obrázek 120 Graf porovnává tři klíčové metriky spojené s plastovým znečištěním oceánů: množství plovoucího plastového odpadu, každoročně vypouštěného plastu do oceánu a objemy jeho odstraňování iniciativou Ocean Cleanup

Zdroj dat: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (K datu: 1.5.2025).

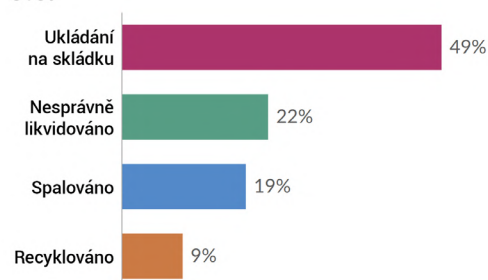
3. Klíčovou otázkou zůstává další osud vytěženého plastu. Současné celosvětové ukazatele recyklace plastového odpadu nepřesahují 9 % (viz obr. 121). V této souvislosti existuje pravděpodobnost, že významná část sebraného plastu může skončit na skládkách, což problém znečištění v dlouhodobé perspektivě neřeší.

Podíl plastového odpadu, který je recyklován, ukládán na skládky, spalován a nesprávně likvidován, 2019

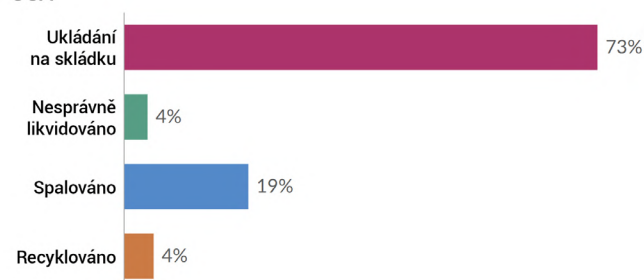
Our World in Data

Nevhodná likvidace plastového odpadu zahrnuje materiály spalované v otevřených jámách, vyhazované do moří nebo otevřených vod nebo ukládané na nehygienické skládky a smetiště.

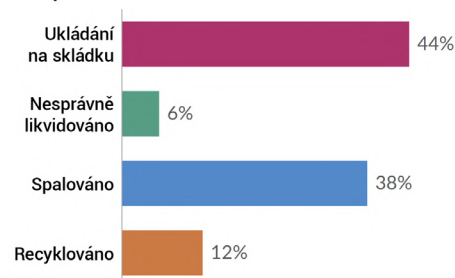
Svět



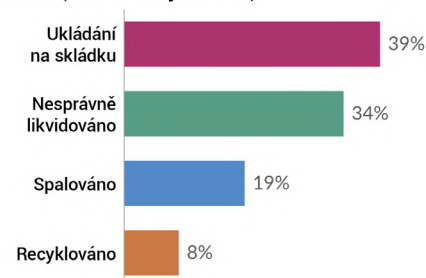
USA



Evropa



Asie (kromě Číny a Indie)



Zdroj dat: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Poznámka: Souhrnné hodnoty v regionech byly vypočteny organizací Our World in Data a vycházejí z údajů OECD.

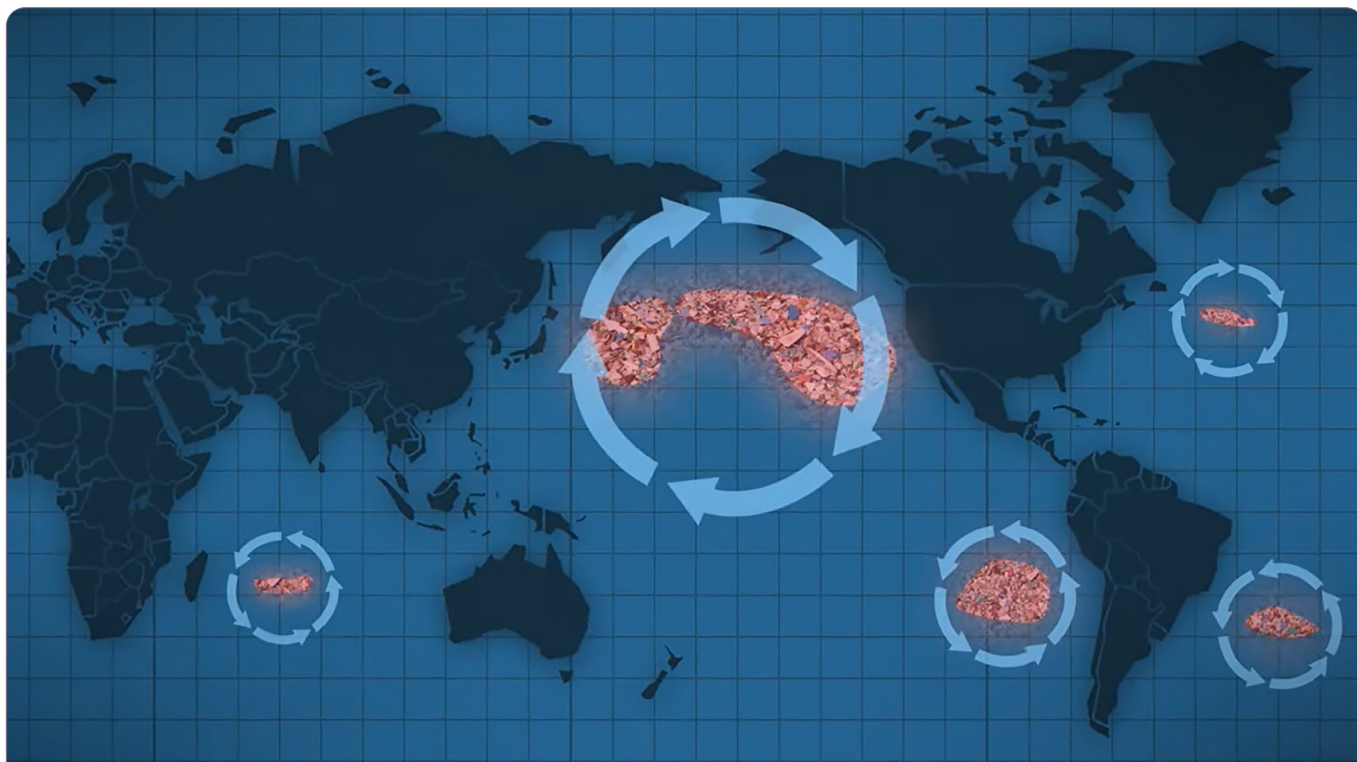
1. OECD regions: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Obrázek 121 Podíl plastového odpadu, který je recyklován, ukládán na skládky, spalován a nesprávně likvidován, rok 2019. Nesprávně likvidovaný plastový odpad zahrnuje materiály spalované v otevřených jámách, vypouštěné do moří nebo otevřených vodních ploch či ukládané na nehygienické skládky a úložiště.

Zdroj dat: Regionální souhrnné údaje byly vypočteny společností Our World in Data a vycházejí ze souhrnných údajů stanovených OECD. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY

<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

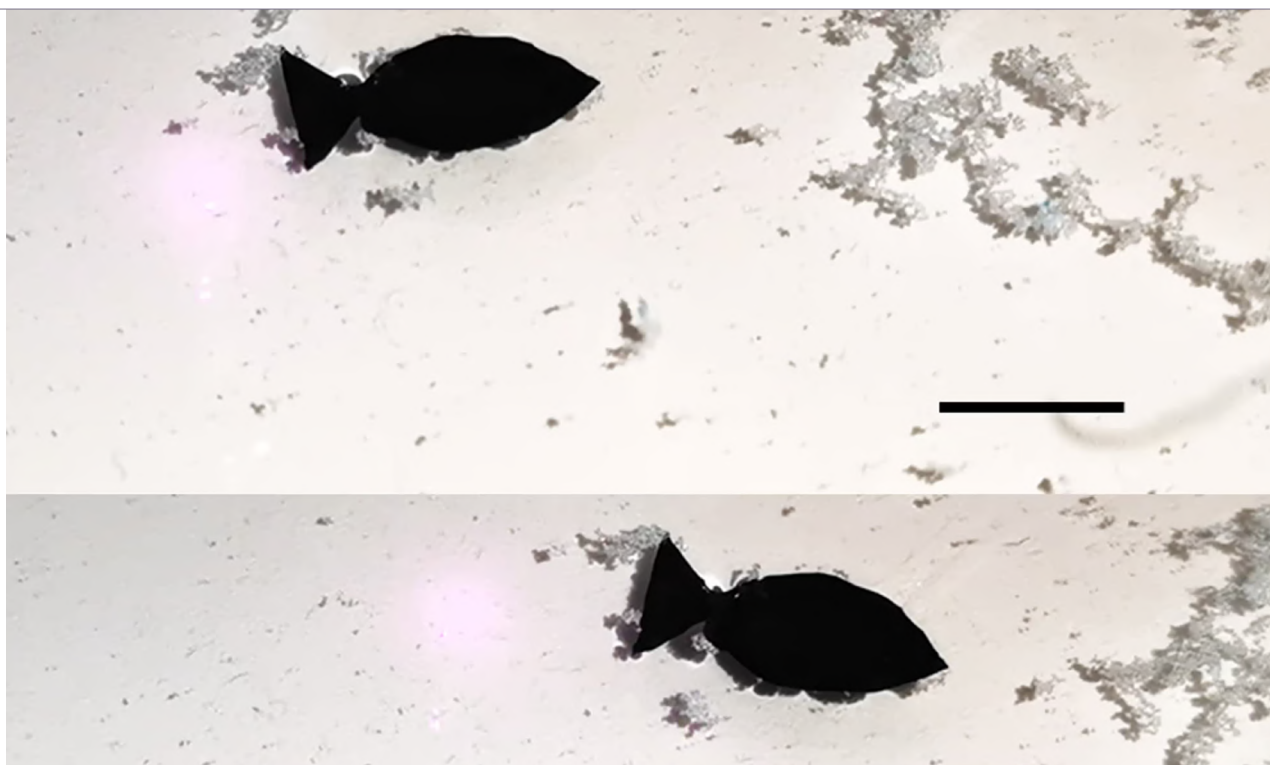
Navíc jsou operace spojené s čištěním oceánu provázeny značnými finančními náklady. Například odlehlost Velké tichomořské odpadkové skvrny od teritoriálních vod jakýchkoli států vytváří situaci, kdy není určena odpovědnost za financování a provádění čistících opatření. Podle odhadu Charlese Moora – oceánografa a badatele, objevitele Velké tichomořské odpadkové skvrny – by „plnohodnotné vyčištění Velké tichomořské odpadkové skvrny přivedlo ke krachu kterýkoli stát, jenž by se o podobné úsilí pokusil.“ Je třeba poznamenat, že v rámci světového oceánu bylo identifikováno pět podobných odpadkových skvrn (viz obr. 122), což problém dále zhoršuje.



Obrázek 122 Schematické znázornění umístění pěti hlavních odpadkových skvrn ve světovém oceánu

Je důležité poznamenat, že viditelný velký odpad představuje pouze část celkového problému plastového znečištění oceánu. Podle Melanie Bergmannové, mořské biologky z Alfred-Wegener-Institutu, „jde jen o plasty na povrchu oceánu, a to jen o malou část, méně než 1 % z toho, co se ve skutečnosti v oceánu nachází“.

S fragmentací plastů na mikro- a nanočástice se úkol vyčištění oceánu od tohoto typu znečištění výrazně komplikuje. Některé experimentální technologie pro odstraňování mikroplastů z vody již existují. Například výzkumníci ze S'-čchuanské univerzity vyvinuli miniaturní rybku-robotu (viz obr. 123), která je schopna plavat ve vodním prostředí a adsorbovat volně se vznášející kousky mikroplastů³¹¹. Tento bionický robot o délce 13 mm efektivně sbírá částice mikroplastů díky pevným chemickým vazbám a elektrostatickým interakcím mezi materiály jeho těla a složkami mikroplastů, jako jsou organická barviva, antibiotika a těžké kovy.



Obrázek 123 Na obrázku je znázorněna miniaturní rybka-robot, vyvinutá výzkumníky ze S'-čchuanské univerzity. Kompaktní zařízení, připomínající skutečnou rybu, plave ve vodním prostředí a aktivně adsorbuje volně se vznášející kousky mikroplastů.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Nicméně navzdory těmto inovacím je praktické využití podobných technologií v globálním měřítku v současnosti omezené. Miniaturní roboti adsorbují mikroplast pouze ve své bezprostřední blízkosti, což činí proces lokálním, a ani ve velkém množství nejsou schopni obsáhnout objemy světového oceánu. Kromě toho se sami mohou stát součástí potravního řetězce. Nejistota panuje také ohledně schopnosti robotů fungovat ve složitých podmínkách oceánu (proudy, tlak, salinita). Proto jsou stávající řešení zatím nedostatečně účinná a narážejí na obtíže při rozšiřování.

³¹¹Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Současné metody čištění od mikro- a nanoplastů

Stále intenzivněji se zvažuje potenciál využití mikroorganismů, zejména bakterií, pro enzymatický rozklad syntetických polymerů, především polyetylentereftalátu (PET). Tato technologie je prezentována jako potenciálně ekologicky bezpečná alternativa k tradiční metodě likvidace plastového odpadu – spalování. Avšak dosud nashromážděná empirická data vyvolávají pochybnosti o její účinnosti, bezpečnosti a použitelnosti v průmyslovém měřítku.

V roce 2016 objevila skupina japonských vědců pod vedením Šósuke Ody bakterii *Ideonella sakaiensis* schopnou rozkládat polyetylentereftalát pomocí produkce dvou enzymů – PETázy a METázy. To byla významná událost v mikrobiologii³¹². Laboratorní výzkumy však ukázaly, že proces rozkladu je mimořádně pomalý: rozložení plastové fólie o hmotnosti 20 g trvalo bakteriím přibližně sedm týdnů za optimálních podmínek. Je zřejmé, že taková rychlost rozkladu nemůže být považována za uspokojivou pro řešení problému plastového znečištění. V měřítku světového znečištění, kdy se miliony tun plastů dostávají každoročně do přírody, je taková rychlost srovnatelná s pokusem vylít oceán čajovou lžičkou.

Vědecké úsilí se soustředilo na modifikaci enzymu PETázy, který bakterie využívá k rozkladu plastů. Jak však sami výzkumníci přiznávají, enzym *Ideonella sakaiensis* se nachází v raném stadiu evoluce. Jeho účinnost je nízká, stabilita omezená a urychlení reakce vyžaduje teploty, které nejsou vlastní přirozenému prostředí. Ani genetické inženýrství zatím nedokáže předpovědět, které mutace skutečně povedou ke zlepšení. Pokrok jde o „dva kroky vpřed, jeden zpět“, jak se vyjádřila Elizabeth Bellová z National Renewable Energy Laboratory v USA.

Kromě toho není enzymatický rozklad zdaleka univerzální. Pouze některé typy plastů (například PET) jsou teoreticky rozložitelné tímto způsobem. Polyetylen, polypropylen a další široce používané materiály zůstávají pro mikroorganismy prakticky nerozložitelné. A vědci v časopise *Nature* tvrdí, že většina plastů je příliš energeticky náročná pro efektivní biochemický rozklad.

I kdybychom si představili, že by se takto vysoce účinný mikrob objevil, vyvstává mnohem znepokojivější otázka: Lze jej bezpečně vypustit do životního prostředí? **Každá geneticky modifikovaná bakterie je potenciálním zdrojem ekologické katastrofy. V současnosti téměř všechny země přísně regulují nebo zcela zakazují vypouštění takových organismů do volné přírody.**

Důvody jsou zřejmé: není známo, jak by se bakterie chovala po „splnění svého poslání“. Nezačne rozkládat i jiné důležité organické sloučeniny? Nevytlačí jiné mikroby? Nepovede k mutacím s ještě nepředvídatelnějšími důsledky?

Tímto způsobem může být jeden ekologický problém snadno nahrazen jiným – mnohem nepředvídatelnějším a ničivějším.

Navzdory nepochybné hodnotě základního výzkumu v oblasti bakteriální recyklace plastů nelze tuto technologii v současné fázi považovat za účinné, široce použitelné a bezpečné řešení problému plastového znečištění.

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Výzkum vlivu převařování vody na odstranění mikroplastů: účinnost a rizika

Odborníci v oblasti biomedicínského inženýrství a výzkumu mikroplastů z Lékařské univerzity Guangzhou a z Univerzity Jinan (Kanton, Čína) provedli studii³¹³. Experiment byl zaměřen na zkoumání vlivu převařování vody se zvýšeným obsahem vápenatých solí (tvrdé vody) na odstranění mikroplastů.

Pro výzkum byly odebrány vzorky kohoutkové vody různé tvrdosti z města Kanton. Do vody byly přidány tři druhy plastových částic: polystyren, polyetylen a polypropylen o velikosti od 0,1 do 150 mikrometrů. Vzorky byly převařovány po dobu 5 minut, poté ochlazeny a změřen zbytkový obsah mikroplastů.

Při převařování tvrdé vody, nasycené vápenatými solemi, vzniká nerozpustný uhličitán vápenatý (CaCO_3), známý jako vodní kámen. Výzkumníci předpokládali, že částice mikroplastů se mohou vázat na krystaly uhličitanu vápenatého a vypadávat do usazeniny, což vysvětluje snížení koncentrace mikroplastů v převařené vodě.

Účinnost čištění byla nejvyšší u vzorků s vysokou tvrdostí (300 mg CaCO_3 na litr), kde převaření umožnilo odstranit až 90 % mikroplastů. U vzorků s měkkou vodou (méně než 60 mg CaCO_3 na litr) byl účinek výrazně nižší: odstranilo se pouze 25 % plastových částic.

Nicméně navzdory určitému pozitivnímu efektu převařování tvrdé vody vyvstává důležitá otázka: možnost uvolňování mikro- a nanoplastů do vzduchu. Při převařování vody se totiž uvolňuje vodní pára, s níž se částice mikroplastů dostávají do ovzduší. Vdechování těchto částic představuje závažnější hrozbu než jejich přijímání potravou nebo vodou.

Výzkumy ukazují, že při vdechování mohou nanoplasty během 2 hodin proniknout do mozku, zatímco při vstupu do trávicího systému se mikroplasty částečně z těla vylučují. Vniknutí plastu do mozku je spojeno s dlouhodobými riziky, protože odstranění takových částic z mozkové tkáně není možné.

Tímto způsobem může metoda převařování vody potenciálně zvýšit riziko znečištění ovzduší mikroplasty, což může být pro lidské zdraví ještě nebezpečnější. To zdůrazňuje nutnost vývoje bezpečnějších a účinnějších metod čištění vody.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Pyrolýza jako metoda zpracování plastů: účinnost a rizika

Pyrolýza představuje jednu z technologií zpracování plastů, založenou na jejich termickém rozkladu při vysokých teplotách v prostředí s omezeným přístupem kyslíku. Proces obvykle probíhá při teplotách od 300 do 800 °C a umožňuje získávat plynné a kapalné uhlovodíkové sloučeniny, stejně jako pevný zbytek ve formě uhlíku.

Při vysokoteplotním rozkladu se polymerní řetězce plastů rozpadají a vzniká směs uhlovodíků, kterou lze využít jako palivo. Tento způsob je však, podobně jako tradiční spalování plastů, provázen značnými ekologickými riziky spojenými s emisemi nanoplastů.

Působením vysokých teplot se plast rozkládá na nejmenší částice, včetně nanoplastů (o velikosti menší než 100 nanometrů). Tyto částice jsou natolik malé, že moderní filtrační systémy je nedokážou zcela zachytit, a proto pronikají do atmosféry.

Spalování plastů je navíc provázeno uvolňováním dioxinů a furanů – vysoce toxických sloučenin s prokázaným karcinogenním účinkem³¹⁴.

Používání pyrolýzy a využívání plastů jako paliva je tedy spojeno se značným rizikem emisí do ovzduší, což představuje hrozbu nejen pro životní prostředí, ale i pro lidské zdraví. Tento způsob likvidace plastů nemůže být považován za bezpečné a udržitelné řešení problému znečištění životního prostředí. Cena takového paliva představuje hrozbu pro život a zdraví lidí.

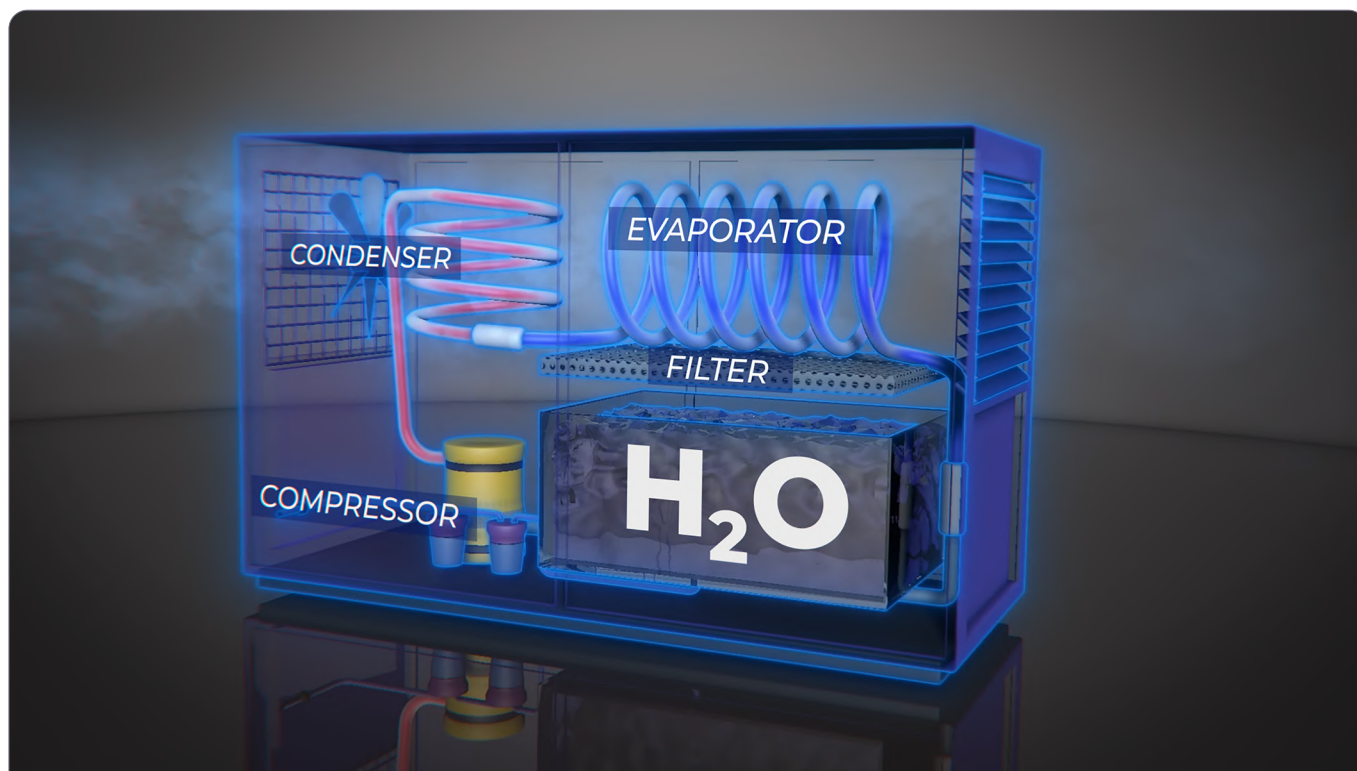
³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

PŘÍSTUPY VĚDECKÉ KOMUNITY ALLATRA K BOJI S EPIDEMIÍ MIKRO- A NANOPLASTŮ

Technologie generátorů atmosférické vody (GAV) pro čištění oceánu od MNP

Obnovení ekologické rovnováhy vyžaduje masové zavádění inovativních technologií, jako jsou generátory atmosférické vody (GAV). V současnosti jsou taková zařízení dostupná v širokém spektru – od domácích po průmyslové modely. Tato zařízení jsou schopna vyrábět pitnou vodu ze vzduchu a účinně odstraňovat znečišťující látky, včetně mikroplastů (obr. 124). Pro zlepšení chuti a kvality může být voda také mineralizována.

Princip činnosti generátorů je založen na kondenzaci vlhkosti obsažené ve vzduchu.



Obrázek 124 Na obrázku je schematicky znázorněn generátor atmosférické vody, ilustrující jeho součásti a princip fungování

GAV fungují na dvou základních technologiích:

1. **Technologie založená na kondenzaci.** Tento způsob nasává okolní vzduch do zařízení a vystavuje jej působení chladného povrchu/chladicí spirály, v důsledku čehož se vodní pára kondenzuje na kapalinu. Tento proces je podobný tomu, když se na studeném předmětu vytaženém z mrazničky tvoří vlhkost. Kondenzanční GAV pracují nejlépe v teplém a vlhkém prostředí.

2. **Technologie založená na adsorpci.** K zachycování vlhkosti ze vzduchu se používají vlhkost pohlcující materiály, jako je silikagel, zeolity nebo kovově-organické struktury. Pohlčená voda se pak uvolňuje při zahřátí materiálu.

Dnes se taková zařízení lokálně využívají k zajištění obyvatelstva pitnou vodou, a to i v situacích spojených s klimatickými katastrofami.

Širokospektrální využití GAV k uspokojení potřeb jak průmyslu, tak i obyvatelstva může během několika let vést k výraznému snížení úrovně znečištění oceánů.

V současné době slouží jako zdroj vody pro domácí potřeby, včetně přípravy jídla, vodní nádrže, které často obsahují vysoké koncentrace mikro- a nanoplastů. Tato voda přispívá k hromadění plastů v lidském organismu. Přechod k získávání vody ze vzduchu, a nikoli ze znečištěných zdrojů, může podstatně zlepšit kvalitu konzumované vody.

Obnova ekosystémů prostřednictvím přirozené filtrace a generátorů atmosférické vody

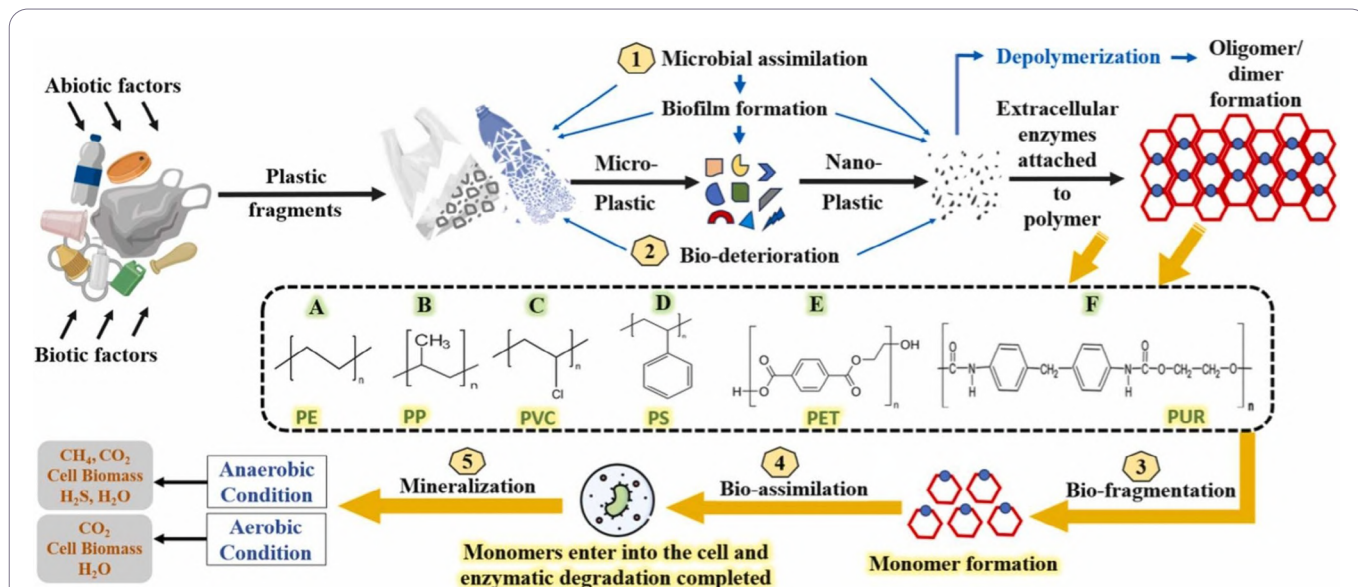
Pro účinné odstranění mikroplastů z použité vody je nutné využívat inovativní technologie, moderní filtrační a asimilační systémy. Dále je důležité znovu vybavit čističky odpadních vod tak, aby se použitá voda po vyčištění nevypouštěla do vodních nádrží, ale aby se odváděla do půdy, protože v půdě žijí mikroorganismy, které jsou schopny plast přirozeně rozkládat³¹⁵.

Tyto organismy se zásadně liší od geneticky modifikovaných nebo uměle vytvořených v laboratorních podmínkách. Jejich přítomnost v ekosystémech zůstává přirozená a v daném prostředí nevykazují znaky invazivních druhů.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Výzkumy³¹⁶ ukazují, že řada půdních mikroorganismů žijících v přirozeném prostředí³¹⁷ vykazuje významnou účinnost při rozkladu polymerů³¹⁸, jako je polyetylen³¹⁹ a polyethyltereftalát³²⁰. Například nejvyšší aktivita houbové degradace – průměrné snížení hmotnosti polyethylenu o $36,4 \pm 5,53 \%$ za 16 týdnů – byla zaznamenána u kmene *Aspergillus oryzae* A5,1.

Schopnost mikroorganismů k biodegradaci polymerů je podmíněna tím, že produkují enzymy, které jim umožňují štěpit složité molekulární struktury plastů³¹⁷.



Obrázek 125 Rozklad mikro- a nanoplastů bakteriálními enzymy.

Zdroj: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Tato data, potvrzená experimentálními pozorováními, poukazují na potenciál využití přírodních mikrobiálních společenství ke snižování úrovně znečištění životního prostředí mikro- a nanoplasty.

„Mezi několika metodami rekultivace, které jsou dnes k dispozici, vykazuje mikrobiální rekultivace nejlepší perspektivy pro rozklad nebo udržitelné odstranění mikroplastů z prostředí,“ uvádí se v přehledové studii³¹⁸.

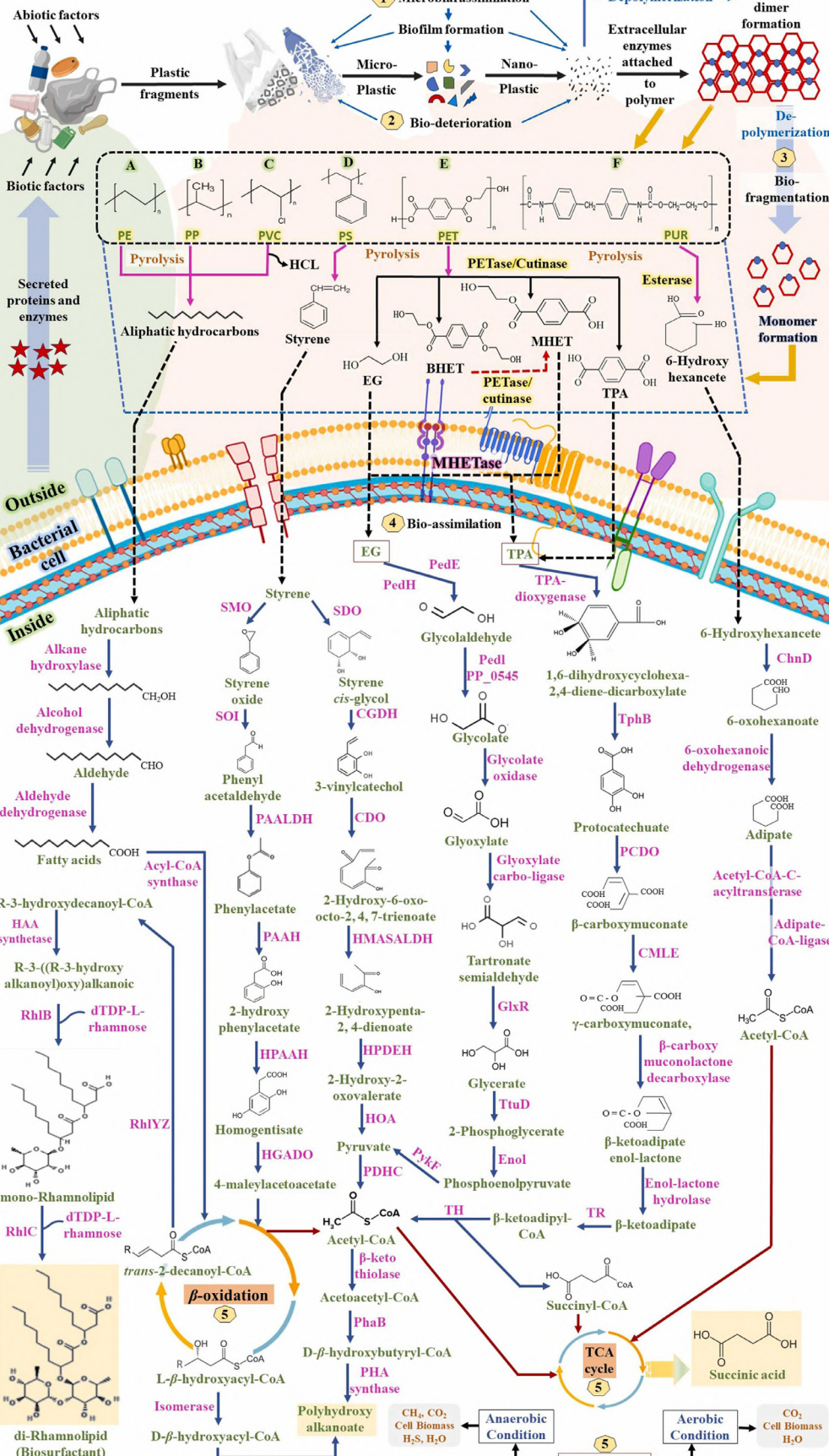
³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

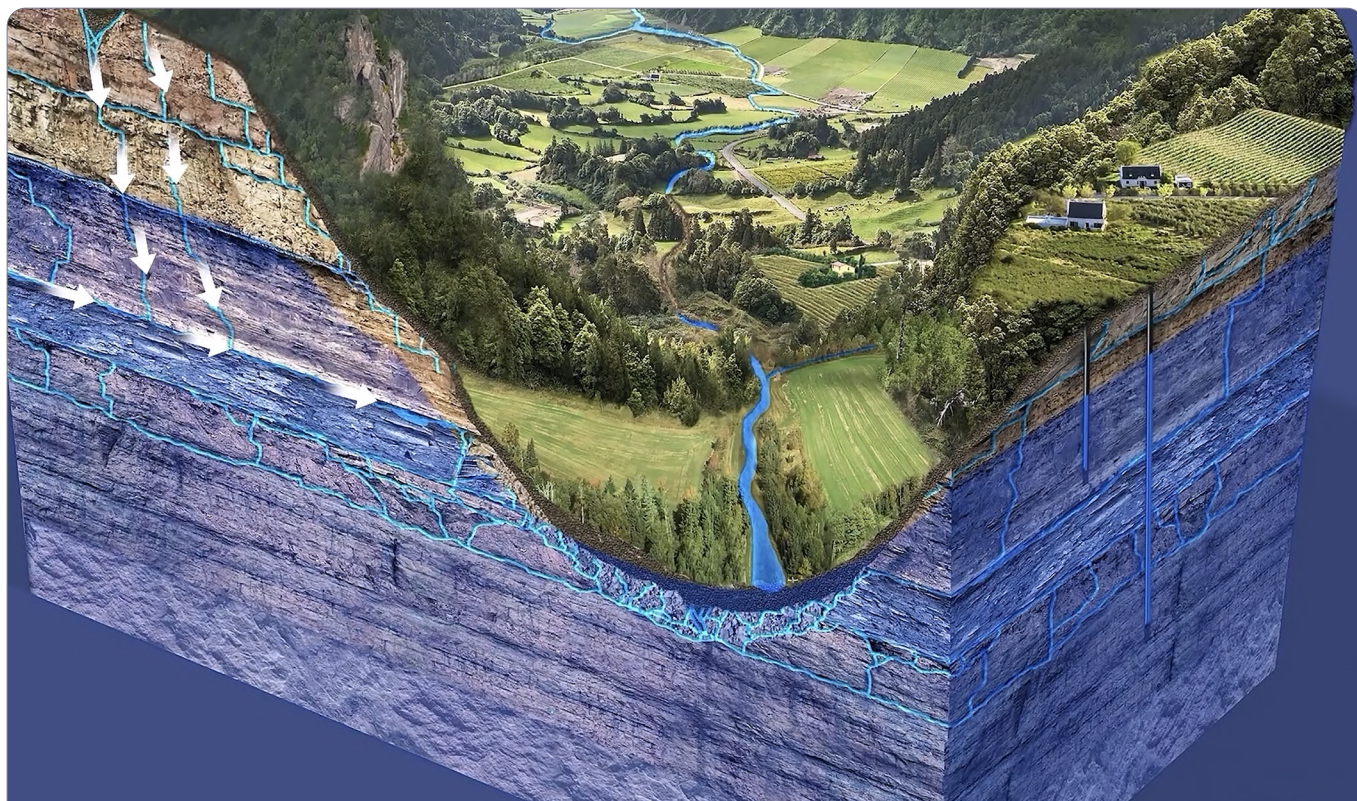


Obrázek 126 Plastový odpad se rozkládá na MNP vlivem různých abiotických a biotických faktorů.

Zdroj: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Přechod na technologii získávání vody ze vzduchu tak výrazně zlepší kvalitu konzumované vody a v kombinaci s technologií mikrobiální rekultivace přispěje k významnému snížení mikro- a nanoplastového znečištění v životním prostředí.

V povrchových vrstvách půdy, stejně jako ve vodních nádržích, bude koncentrace plastu po určitou dobu zůstat vysoká. Avšak s pronikáním vody do větší hloubky dojde k samočištění (obr. 127). Mikroorganismy žijící v půdě budou napomáhat rozkladu drobných částic nanoplastů.



Obrázek 127 Schematické znázornění procesu biologického dočišťování vody, vsakující se do půdy, prostřednictvím geologických vrstev. Šipky ukazují cestu odpadní vody procházející vrstvami půdy a hornin, kde mikroorganismy a filtrační materiály odstraňují znečišťující látky. Vrstvy podloží jsou označeny různými barvami: hnědá – půda, šedá – písek a štěrk.

Zvýšení objemu použité vody, která je po vyčištění v čističkách vypouštěna do půdy, podporuje rozmnožování mikroorganismů, včetně bakterií, hub a archeí, které hrají zásadní roli při formování zdravé půdy, koloběhu živin a odolnosti ekosystémů. Následně se vyčištěná voda bude vsakovat do hlubších vrstev a vracet se do oceánů.

Umístění zařízení generátorů atmosférické vody v pouštních oblastech a navracení použité vody do půdy se jeví jako perspektivní řešení pro překonání vodní krize a boj s desertifikací, protože aktivuje

procesy podporující obnovu vegetace³²¹ a ekosystémů. Využití GAV povede ke zlepšení kvality života místního obyvatelstva a vyřeší problém nedostatku pitné vody.

V kombinaci s mikrobiální rekultivací se aplikace GAV může stát důležitým krokem k udržitelnému hospodaření s vodními zdroji a obnově degradovaných území.

Úplný přechod na GAV předpokládá využívání atmosférické vody pro všechny potřeby obyvatelstva, včetně domácích, průmyslových i zemědělských. Zavedení této technologie v globálním měřítku povede k intenzivnějšímu odpařování, což způsobí ochlazení oceánu a zároveň urychlí jeho čištění. Kromě toho snížení přebytkové vlhkosti v atmosféře pomocí GAV omezí množství extrémních srážek a větrů, což může zmírnit ničivý dopad přírodních katastrof (podrobněji ve filmu „Voda ze vzduchu. Cesta k záchraně lidstva“).

Výzvy a rizika spojená s používáním generátorů atmosférické vody

Nicméně existuje i odvrácená strana globálního využívání GAV. Problém spočívá v tom, že v kontextu použití technologií atmosférické výroby vody se přímo nezohledňuje jejich vliv na člověka. Ačkoli nasazení této technologie může skutečně přispět k čištění oceánských vod a zlepšení tepelné vodivosti, rozsáhlé využití GAV může rovněž vést k výraznému zvýšení koncentrace mikroplastů v atmosféře.

Mechanismus fungování GAV zahrnuje kondenzaci vlhkosti z atmosféry, která se následně doplňuje odpařováním z oceánských vod. Protože tyto vody obsahují vysoké koncentrace mikro- a nanoplastů, vlhkost uvolňovaná do atmosféry v tomto procesu může přenášet mikroskopické plastové částice. V důsledku toho mohou v regionech, kde se budou tyto technologie využívat, včetně velkých metropolí, dosáhnout hladiny nanoplastů vdechovaných s ovzduším stejných hodnot, jaké jsou v současnosti zaznamenávány v pobřežních zónách. To vytváří riziko zvýšení koncentrace nanoplastů ve vzduchu, což představuje hrozbu pro lidské zdraví. Vdechování nanoplastů totiž přispívá k jejich hromadění v organismu, včetně mozku.

A to je klíčový moment. Je nutné chápat, že samotná myšlenka využití GAV jako prostředku pro čištění oceánských vod byla vědci ALLATRA předložena už před více než 20 lety – v době, kdy koncentrace mikroplastů v atmosféře byla ještě velice nízká. V tomto období mohla realizace podobných technologií skutečně přinést znatelný ekologický přínos bez vážného rizika pro člověka. Dnes se však situace radikálně změnila. Za současných podmínek je mnohem pravděpodobnější, že rozsáhlé nasazení AWG povede ke zvýšení koncentrací mikro- a nanoplastů ve vzduchu. Nyní, kdy jsou hladiny MNP v atmosféře již vysoké, může být přidávání dalších objemů prostřednictvím GAV fatální pro lidské zdraví.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Tímto způsobem se technologie, kdysi perspektivní a inovativní, stala neaktuální. My jako lidstvo jsme propásli ten kriticky důležitý okamžik, kdy GAV mohly být záchranou. Časový faktor hraje v otázkách klimatu a znečištění životního prostředí rozhodující roli. To, co mohlo před dvěma desetiletími zachovat zdraví milionů a skutečně očistit planetu, je dnes potenciálně nebezpečné.

GAV už nejsou technologií budoucnosti, ale připomínkou zmeškané příležitosti. V dnešní realitě musí být prioritou vývoj technologií, které umožní odstranit MNP nejen z atmosféry, ale i z lidského organismu. V první řadě potřebujeme získat čas.

Inovativní vědecký přístup ke snižování toxicity mikro- a nanoplastů

S ohledem na předložená data o víceúrovňových a kumulativních dopadech mikroplastů, a zejména nanoplastů, na lidské zdraví je zřejmé, že moderní civilizace čelí ekologické a biomedicínské výzvě, která překračuje tradiční chápání znečištění životního prostředí. Tento problém se dotýká nejen jednotlivých biosfér, ale i dlouhodobé stability populace *Homo sapiens*.

V současnosti se prakticky veškerý vyrobený plast – více než 9 miliard tun – nadále hromadí v životním prostředí a podléhá fragmentaci na mikro- a nanočástice, které vykazují vysokou chemickou a biologickou aktivitu. Mikro- a nanoplasty se nacházejí v půdě, vodě, vzduchu i ve všech hlavních kategoriích potravin – od ovoce a zeleniny až po maso, ryby, med, mléko a sůl. To ukazuje na totální pronikání plastových částic do potravních řetězců, což zásadně mění tradiční představu o „bezpečné“ či „zdravé“ potravě.

Cesta vstupu částic do lidského organismu do značné míry určuje jejich biologické chování a distribuci. Zatímco plasty, které se dostávají do těla přes trávicí trakt, mohou být částečně vylučovány, inhalační cesta je charakterizována výrazně vyšší mírou rizika. Vdechované nanoplasty se usazují v plicní tkáni, překonávají hematoencefalickou bariéru a mohou tak pronikat přímo do mozku, kde se hromadí s prodlouženou dobou setrvání. Přitom přirozené detoxikační mechanismy (játra, ledviny) nedisponují účinnými prostředky pro rozpoznání a odstranění takových částic.

Nejvyšší hustota mikroplastů je zaznamenávána v blízkosti vodních ploch, pobřežních zón a lesních masivů – zejména v podmínkách zvýšené vlhkosti a teploty. V těchto typech krajiny se plast zadržuje déle, podílí se na aerosolovém přenosu, vyvolává oxidační stres u rostlin a snižuje účinnost fotosyntetických procesů. Pobyt na pobřeží, dříve považovaný za příznivý z hlediska ozdravení, je dnes spojen s dodatečnou inhalační zátěží: podle odhadů může objem vdechovaného plastu v blízkosti otevřených vodních ploch mnohonásobně převyšovat ukazatele městského prostředí.

Epidemiologické studie ukazují trvalou souvislost mezi úrovní znečištění MNP a rozšířeností chronických neinfekčních onemocnění – včetně arteriální hypertenze, cukrovky, mrtvice, depresivních a kognitivních poruch. Díky schopnosti překonávat biologické bariéry a hromadit se v různých tkáních, včetně mozku, srdce, plic a placenty, působí MNP toxicky na molekulární, buněčné i orgánové úrovni. Plast se při akumulaci v organismu vyvolává imunosupresivní, zánětlivé a genotoxické účinky. Navzdory pokroku v identifikaci rizik dosud nebyly vyvinuty účinné mechanismy neutralizace a vylučování MNP z lidského těla.

Jednou z nejkritičtějších vlastností nanoplastů, která má systémový biologický dopad, je jejich schopnost udržovat elektrostatický náboj. Na rozdíl od inertních částic nanoplast aktivně interaguje s buněčnými povrchy, proteiny, receptory a dokonce i s genetickým materiálem, čímž vytváří stabilní vazby na molekulární úrovni. Tato vlastnost nejen posiluje průnik částic nanoplastů přes biologické bariéry, včetně hematoencefalické, ale také komplikuje jejich následné vylučování, což podporuje dlouhodobé setrvávání v tkáních, zejména v mozku. Elektrostatická interakce spouští kaskádu buněčných poruch, včetně depolarizace membrán, mitochondriálních dysfunkcí, oxidačního stresu a apoptózy, což významně zvyšuje toxicitu i při minimálních koncentracích částic nanoplastu.

Autoři této zprávy předkládají hypotézu, že řešení spočívající v neutralizaci nebo odstínění elektrostatického náboje mikro- a nanoplastů by mohlo znamenat zásadní průlom, který by výrazně snížil biologickou aktivitu nanoplastů a zpomalil tempo jejich akumulace v životně důležitých orgánech. Podle odhadů autorů zprávy by odstínění nebo neutralizace elektrostatického náboje mohly snížit potenciální nebezpečí MNP nejméně o 50 %, což činí tento směr výzkumu kriticky důležitým. Takové řešení by mohlo vědecké komunitě poskytnout potřebný časový prostor k vývoji komplexnějších metod pro diagnostiku, detoxikaci a prevenci účinků spojených s MNP. V tomto ohledu nabývají výzkumy v oblasti biofyziky, nanomateriálového inženýrství a molekulární toxikologie prioritního významu. Jakékoli prodlení zde může znamenat potenciální urychlení degradačních procesů.

Paralelně s biomedicínskými řešeními je zapotřebí vědecky podložená strategie bezpečného nakládání s plastovým odpadem. Současný systém likvidace není schopen zabránit další fragmentaci a pronikání mikroplastů do biosféry. V podmínkách globalizace je nezbytný vývoj mezinárodní technologické platformy pro vytváření, zavádění a rozšiřování bezpečných metod sběru a zpracování plastů. Taková opatření mohou být realizována výhradně za předpokladu institucionální podpory, přeshraniční regulace a vědecké diplomacie.

Zvyšování povědomí mezi vědeckou komunitou, zdravotníky i širokou veřejností se stalo obzvlášť důležitým. V současnosti si většina lidí neuvědomuje rozsah působení MNP a nadále nevědomky přispívá k jejich šíření.

Problematika mikro- a nanoplastů přestala být potenciální hrozbou a proměnila se v systémový rizikový faktor. Tato oblast nyní vyžaduje prioritní pozornost vědecké komunity a zdravotnických autorit, systematizaci dat, tvorbu standardů pro hodnocení rizik a posílení mezivládní i mezinárodní spolupráce. K vytvoření účinných řešení, která zajistí biologickou bezpečnost v krátkodobém i dlouhodobém horizontu, je nezbytný interdisciplinární přístup, institucionální uznání a mezinárodní koordinace úsilí.

FAKTOR X. VLIV MIKRO- A NANOPLASTŮ NA DYNAMIKU CYKLU PŘÍRODNÍCH KATAKLYZMAT

Jak již bylo uvedeno v kapitole „Vliv mikro- a nanoplastů na klima“, částice mikro- a nanoplastů snižují tepelně vodivou funkci oceánské vody, což vede k hromadění tepla v oceánu a následně ke kritickému nárůstu jeho teploty. Samotné mikro- a nanoplasty však nejsou zdrojem oteplování oceánu.

Od jara 2023 po dobu více než jednoho roku průměrná teplota povrchu světového oceánu denně překonávala historická maxima, což se stalo bezprecedentním jevem v celé historii měření (obr. 128). Vědci po celém světě vyjadřují vážné znepokojení nad tímto anomálním nárůstem.



Doktor Brian McNoldy, hlavní vědecký pracovník Fakulty oceánologie na Univerzitě v Miami, poznamenává: **„Nejde jen o rekordní teploty oceánu, které jsou pozorovány už celý rok – důležité je, o kolik tyto nové rekordy převyšují ty předchozí. Současné hodnoty jsou značně vzdálené od dřívějších rekordů³²².“**



Tuto obavu sdílí doktor Rob Larter, britský mořský geofyzik: **„Je to skutečně znepokojující, mimo jiné proto, že jsem neslyšel ani od jednoho vědce přesvědčivé vysvětlení, proč dochází k tak silné odchylce. Ale nyní vzniká dojem, že se vše vyvíjí mnohem intenzivněji a rychleji, než jsme očekávali³²³.“**

Podle klimatických výzkumů současné modely předpovídají postupné zvyšování teploty povrchu oceánu, avšak pozorovaná rychlost tohoto procesu výrazně převyšuje všechny prognózy. Vědci se domnívají, že antropogenní změna klimatu hraje určitou roli, ale nemůže zcela vysvětlit pozorovaný fenomén.

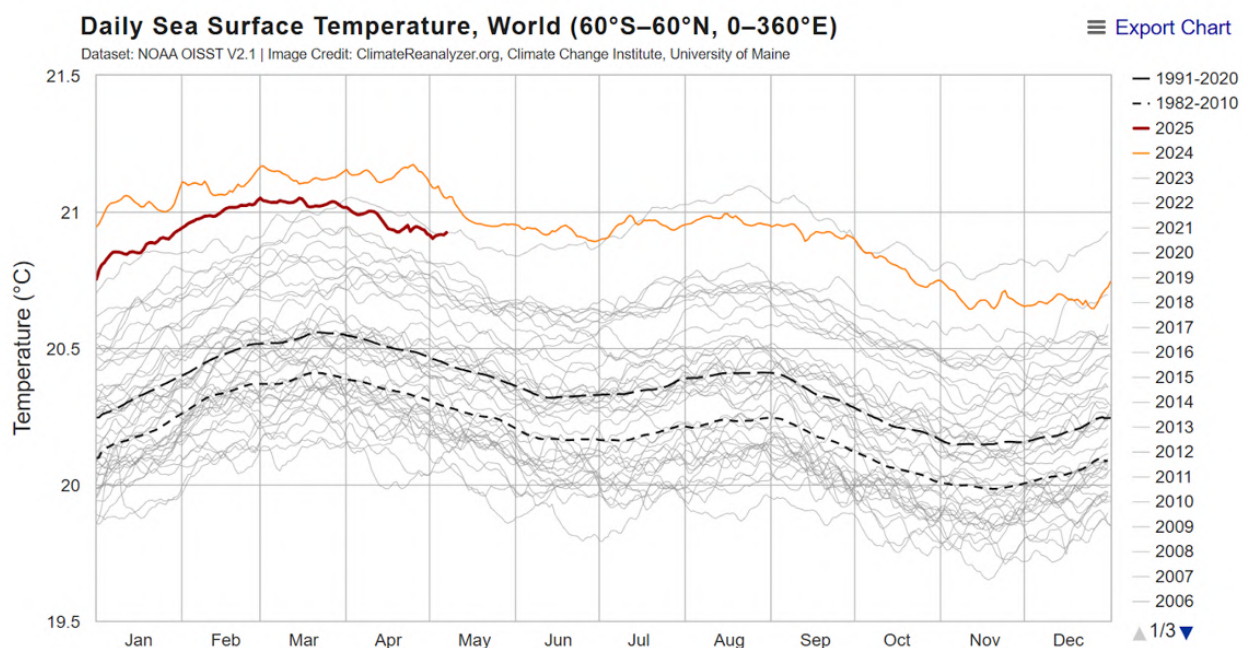
³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)

<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (Accessed May 1, 2025).

Profesor John Abraham z Univerzity sv. Tomáše, který se zabývá studiem teploty oceánu, vyslovil předpoklad o existenci dříve neznámých faktorů, jež mohou ovlivňovat dlouhodobé změny teploty povrchu oceánu³²². Upozornil, že tyto faktory nebyly zohledněny v předchozích prognózách. Autoři této zprávy předkládají hypotézu potenciálního „faktoru X“, který může být zodpovědný za dodatečné oteplování oceánu a atmosféry.



Obrázek 128 Průměrná denní teplota povrchu oceánu, 1981–2025.

Zdroj dat: Dataset NOAA OISST V2.1 | Zdroj zobrazení: [ClimateReanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST. https://climate.reanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Mohou být mikro- a nanoplasty v oceánu neprozkoumaným faktorem X?

Analýza možnosti, že právě mikro- a nanoplasty jsou hlavní příčinou současného oteplování oceánů, odhaluje vážný rozpor. Nanoplasty skutečně zhoršují schopnost oceánu odvádět teplo. Avšak nevytváří tepelnou energii – pouze brání jejímu úniku z oceánu.

Za posledních 60 let se průměrné hloubky oceánu ohřívaly patnáctkrát rychleji než za předchozích 10 000 let^{324, 325} a tento proces se jen zrychluje. Rychlost nárůstu se rok od roku zvyšuje. Ke zvýšení teploty v takových hloubkách, kam už sluneční paprsky nepronikají^{326, 327}, je zapotřebí obrovské množství energie.

Naopak, masivní přísun mikro- a nanoplastů do oceánu začal poměrně nedávno – zhruba před 30 lety, zatímco zrychlení oteplování oceánských hloubek je pozorováno už posledních 60 let. Plasty tedy nemohou vysvětlit dlouhodobý a narůstající trend oteplování středních hloubek oceánu, který začal dávno před výrazným výskytem těchto znečišťujících látek v oceánu.

Tento ohřev nemůže vysvětlit ani sluneční radiace, protože sluneční paprsky pronikají do hloubky maximálně 200 m. Voda se může ohřívat Sluncem nanejvýš do 700 m v důsledku promíchávání³²⁸.

Pro ohřev hlubinných vrstev, kam sluneční paprsky nepronikají, je zapotřebí kolosální množství energie. To znamená, že nahromaděné teplo v oceánu musí pocházet z jiného zdroje, zatímco přítomnost nanoplastů způsobuje, že toto teplo se „uzamyká“ uvnitř oceánu.

Vzhledem k tomu, že ohřev od Slunce nevysvětluje příčiny exponenciálního růstu teplot oceánu, vědci předložili hypotézu o existenci dalších zdrojů oteplování oceánu v jeho různých částech.

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

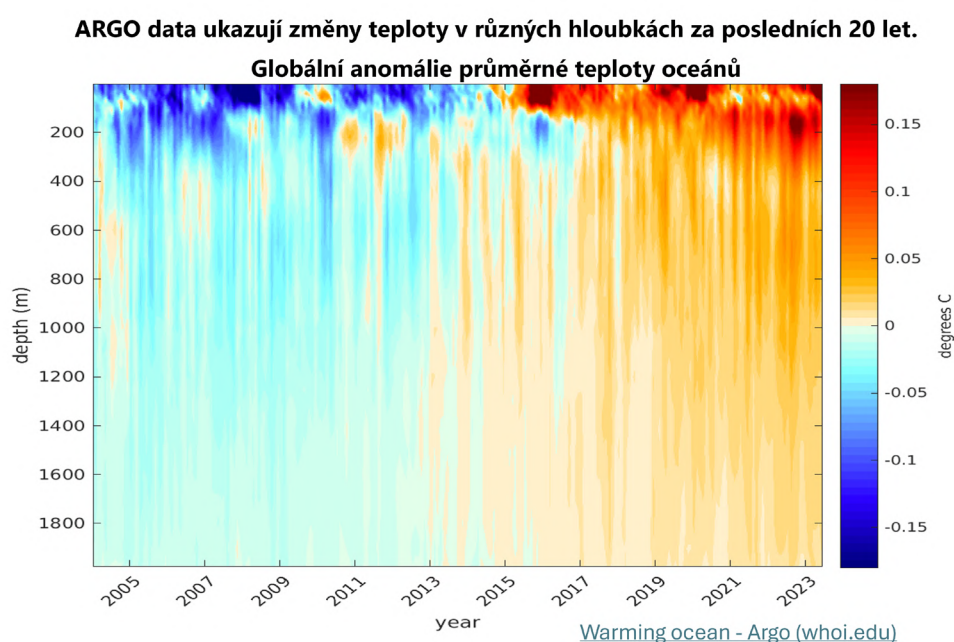
³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

Vertikální rozložení teplotních anomálií

Analýza údajů systému Argo o globálních výkyvech teploty v různých hloubkách za poslední dvě desetiletí odhalila řadu teplotních anomálií, které nejsou v souladu s tradičním modelem sestupného přenosu tepla z povrchu do hlubinných vrstev oceánu^{329, 330}.

Byly zaznamenány statisticky významné případy inverze teplotního gradientu, kdy se teplejší vodní masy nacházejí pod relativně chladnými povrchovými vrstvami (obr. 129). Tento typ teplotní stratifikace je fyzikálně nemožný při striktně shora-dolů probíhajícím přenosu tepla, protože tepelná energie podle fyzikálních zákonů nemůže z horní vrstvy projít přes chladnější mezivrstvu.



Obrázek 129 Globální teplotní anomálie oceánu v hloubkách 0–1 900 m od roku 2004.

Zdroj: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Nedávné studie vědců z Ocean University of China³³¹ potvrzují přítomnost tepelných anomálií uvnitř oceánských vodních sloupců, které se na hladině vůbec neprojeví. Výzkum ukázal, že třetina mořských vln veder nezanechává na povrchu oceánu žádnou stopu a téměř u poloviny jsou projevy během jejich životního cyklu viditelné jen částečně.

Roční počet těchto podpovrchových mořských vln veder v posledních třech desetiletích výrazně vzrostl v důsledku pokračujícího oteplování oceánu. Skutečnost, že významná část mořských vln veder je na povrchu zcela nedetekovatelná, jasně ukazuje, že nemohou být způsobeny pouze atmosférickým teplem.

³²⁹Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Výzkum zdrojů ohřevu na dně oceánu

Výzkumy a pravidelné monitorování teploty na dně oceánu jsou dnes mimořádně vzácné a omezené. Věda si po dlouhou dobu nekladla za cíl sledovat změny právě v těchto hloubkách. Moderní monitorovací systémy, jako je síť bójí ARGO, umožňují shromažďovat data pouze z 0,03 % plochy oceánu, přičemž většina bójí se ponořuje jen do poloviny průměrné hloubky a nedosahuje dna oceánu³³².

Lidstvo ve skutečnosti prozkoumalo pouze asi 3–3,5 % povrchu dna oceánu³³³. To souvisí s řadou závažných důvodů. Zaprvé, velká část světového oceánu se nachází v hloubkách 3 000–6 000 m. Konstrukce hlubokomořských přístrojů schopných odolat kolosálnímu tlaku v hloubkách až 6 000 m vyžaduje obrovské finanční a technologické zdroje.

Zadruhé, samotné expedice jsou nesmírně složité a nákladné: za celou historii bylo postaveno jen osm specializovaných přístrojů pro podobné výzkumy. Z tohoto důvodu jsme dnes v některých ohledech prozkoumali vesmír dokonce důkladněji než nejdlehlší zákoutí světového oceánu.

Zároveň je stále zřejmější, že geologické procesy na dně oceánu mohou hrát významnou roli ve změně klimatu a utváření tepelné bilance oceánů. Na dně se nacházejí miliony unikátních geologických objektů – sopky, zlomy a hydrotermální prameny, které disponují obrovskou energií. Avšak kvůli jejich obtížné dostupnosti a nedostatečnému pokrytí monitorováním zůstává rozsah jejich potenciálního vlivu dosud z velké části pro vědu záhadou.

Přesto se výzkumy oceánského dna provádějí a celá řada z nich ukazuje na oteplování oceánské vody na dně.

Tak například **ve dvou hlubokých oblastech Argentinské pánve**³³⁴, v hloubkách přes 4 500 m, byly zaznamenány výrazné tendence oteplování: $0,02\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ za desetiletí v období 2009–2019. Jde o kolosální množství energie, které je zapotřebí k ohřátí takového objemu studené vody na dně.

Přímo u břehů Západní Antarktidy dochází k anomálnímu oteplování hlubokých vod Weddellova moře³³⁵, zatímco horních 700 m vod se téměř neohřívá. V hlubších oblastech je pozorován trvalý nárůst teploty. Na jedné straně Weddellovo moře lemuje Západoantarktický rift a na druhé podmorský vulkanický hřbet s Jižními Sandwichovými ostrovy.

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

³³³Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

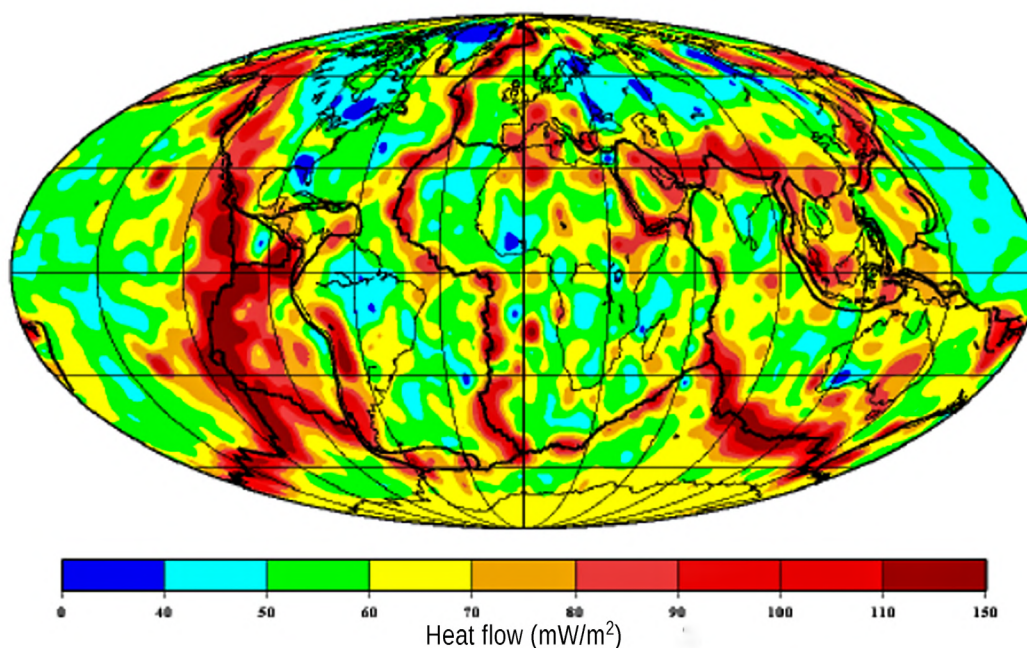
³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Role geotermálního tepelného toku, tektonických procesů a sopečných erupcí na dně oceánu

V kontextu pozorovaných anomálií ohřevu hlubokomořských vrstev, kde je vliv atmosféry minimální, je logické uvažovat o geotermálním toku z nitra Země jako o možném zdroji dodatečného tepla. V klimatických modelech se tradičně geotermální tok přicházející zdola považuje za konstantní a rovnající se přibližně $0,09 \text{ W/m}^2$ (nebo 90 mW/m^2)³³⁶, což je o několik řádů méně než sluneční tok^{337,338}.

Nicméně rostoucí objem vědeckých údajů poukazuje na význam tohoto podceňovaného zdroje tepla. Rozsáhlé geotermální výzkumy ukázaly, že intenzita tepelného toku, který vystupuje skrze dno oceánu, závisí na stáří oceánské kůry: je maximální v mladých riftových zónách a minimální ve starých oceánských pánvích³³⁹ (obr. 130). Takové lokální anomálie mohou ovlivňovat vertikální strukturu teploty vody, oslabovat termoklinu a podporovat promíchávání vodních mas, což má vliv na cirkulaci, bioproduktivitu, a dokonce i na stabilitu ledovců v přípolárních oblastech.



Obrázek 130 Globální rozložení tepelného toku.

Ilustrace z článku: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993).

<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011).

<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Geotermální tepelný tok je množství tepelné energie, které přichází z nitra Země přes jednotku plochy povrchu za jednotku času, měřené v miliwattech na metr čtvereční (mW/m²).

Zatímco průměrná energie geotermálního toku pro kontinenty činí 40–60 mW/m² a pro oceánské dno přibližně 100 mW/m², v některých regionech jsou zaznamenávány hodnoty, které tyto ukazatele několikanásobně převyšují. Nejextrémnější hodnoty geotermálního tepelného toku byly zjištěny v tektonicky a vulkanicky aktivních zónách: například v oblastech středooceánských hřbetů a aktivních riftových zón může tok přesahovat 200–1 000 mW/m² ³⁴⁰.

Zvláště vysoký tepelný tok je zaznamenáván v oblastech hydrotermálních polí – jde o zóny vývěru horkých kapalin na dně oceánu, kde teplota vody dosahuje 350–400 °C. Tyto systémy vytvářejí jedinečné ekosystémy a zajišťují lokální anomálie tepelného toku, které významně ovlivňují tepelný režim spodních vod.

Hlavní dobře prozkoumanou oblastí zvýšeného geotermálního tepelného toku na dně oceánu jsou středooceánské hřbety – zóny rozpínání litosférických desek, kde probíhá aktivní formování nové oceánské kůry. Tento globální systém podmořských hřbetů má celkovou délku přibližně 60 000 km³⁴¹ a obepíná celou Zemi podobně jako švy na baseballovém míči. Středooceánské hřbety se vyznačují vysokou koncentrací hydrotermálních pramenů, podmořských sopek a aktivních zlomů, jimiž do oceánu proniká značné množství tepelné energie z pláště Země³⁴².

Tepelný tok v těchto zónách je 10–100krát vyšší než průměrné ukazatele pro zbytek oceánského dna³²⁶, což z nich činí klíčové oblasti výměny tepla mezi vnitřními vrstvami Země a světovým oceánem.

Profesor z Univerzity v Marylandu Arthur Viterito zjistil nárůst počtu zemětřesení na dně oceánu podél středooceánských hřbetů od roku 1995 (obr. 131)³⁴³. S korelačním koeficientem 0,7 tento nárůst odpovídá růstu globálních teplot. Přitom vzestup teploty nastává s dvouletým zpožděním po zvýšení seismické aktivity. Zvýšení seismické aktivity v těchto zónách souvisí se stoupáním magmatu, které vytváří novou oceánskou kůru.

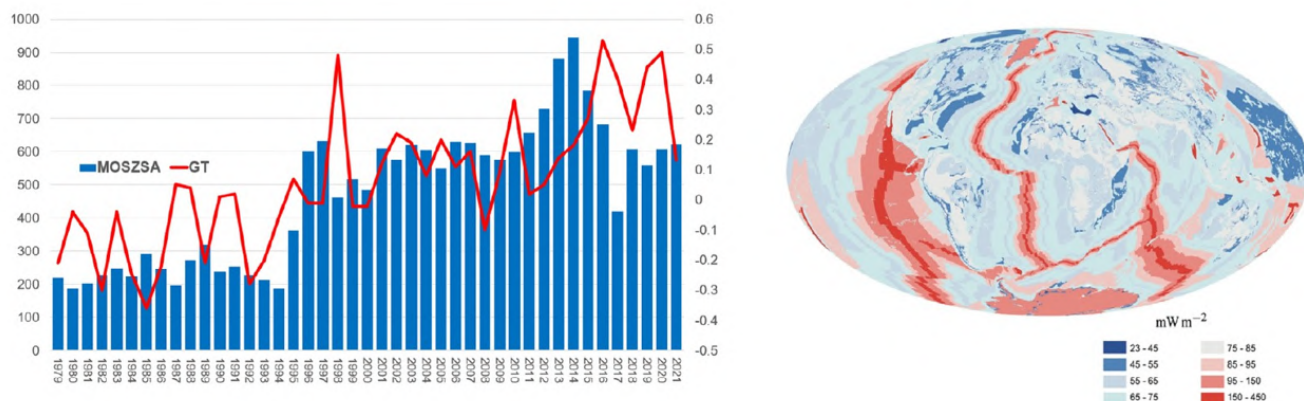
³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376.
<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³⁴³Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022).
<https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Zvýšení počtu zemětřesení na dně oceánu podél středooceánských hřbetů



Obrázek 131 Současný nárůst počtu zemětřesení s magnitudem 4,0–6,0 na dně oceánu a globálních teplot atmosféry.

Zdroj: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Ačkoli přímá měření objemů stoupajícího magmatu chybí, globální síť seismického monitoringu umožňuje o rozsahu těchto procesů usuzovat nepřímo – podle počtu a intenzity seismických událostí, které narůstají nezávisle na množství seismických dat. Podle Viteritovy hypotézy vede seismická a vulkanická aktivita podél středooceánských hřbetů ke zvýšení intenzity hydrotermálních výronů a k ohřívání vod, což následně způsobuje emise skleníkových plynů a oteplování atmosféry. Viterito tedy ukazuje: oceány se ohřívají nejen shora, ale i zdola – v důsledku geologických procesů.

Podmořský vulkanismus může rovněž hrát důležitou roli při formování tepelného režimu oceánského dna. Současná data ukazují, že přibližně 75 % všech sopečných erupcí na Zemi probíhá pod vodou³⁴⁴. Dříve se předpokládalo, že podmořské erupce probíhají klidným vytékáním lávy a že výbušné erupce nejsou možné kvůli tlaku vodního sloupce. Proto se soudilo, že podmořské sopky nemohou ohřívát vodní masu – vytékající láva téměř okamžitě tuhne. Avšak nedávné výzkumy změnily chápání mechanismu erupcí podmořských sopek.

Tlak magmatu dosahuje 10 000 – 30 000 barů, zatímco tlak vodního sloupce v nejhlubších částech oceánu činí jen asi 1 000 barů.

Při průniku magmatu dochází k okamžitému varu vody s rozpadem molekul H_2O , čímž se vytváří plynovodní dutina s tlakem stovek až tisíců barů³⁴⁵, což vede k mohutným explozivním erupcím.

Tyto erupce jsou doprovázeny uvolněním tefry a hydrotermálními výrony – obřími gejzíry přehřáté vody, jejichž objem může dosahovat ekvivalentu 40 milionů olympijských plaveckých bazénů. Takové emise mohou narušit tepelnou rovnováhu oceánu nejen lokálně, ale i v globálním měřítku.

³⁴⁴Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Výzkumy Univerzity v Leedsu odhalily kilometrová pole vulkanické tefry na dně Tichého oceánu³⁴⁶, což potvrzuje mocné explozivní podmořské erupce. Jedna taková erupce může uvolnit tepelný výkon řádu 1 TW, což je dvakrát více než spotřeba energie ve Spojených státech.



Podíl explozivních erupcí na ohřívání oceánu potvrzuje profesor Bernd Zimanowski z Univerzity Julia Maximiliána v Bavorsku³⁴⁷:

„Při podmořských lávových erupcích trvá poměrně dlouho, než se teplo lávy přenesení do vody. Při explozivních erupcích však dochází k rozdrobení magmatu na drobné částice. Mohou tak vznikat silné tepelné impulsy vedoucí k narušení proudění udržující tepelnou rovnováhu v oceánech – lokálně, nebo dokonce globálně³⁴⁸.“

Podle současných odhadů činí počet hydrotermálně aktivních podmořských útvarů 100 tisíc až 10 milionů^{349, 350}, což naznačuje, že podíl hydrotermální aktivity na tepelnou bilanci oceánu je pravděpodobně podceněn. Explozivní erupce magmatu vedou k formování mocných tepelných impulzů, schopných narušovat tepelné proudy v oceánech lokálně. Avšak s ohledem na rozlohu oceánu ani tak silné podmořské erupce nestačí k jeho celkovému ohřátí. Sopky nejsou rozloženy všude, jejich erupce jsou epizodické a jejich energie není dostatečná k ohřevu celého oceánu. Může jí však být dost k vyvolání lokálních vln veder v oceánu.

Jedním z konkrétních příkladů takových lokálních tepelných anomálií jsou mořské vlny veder, tedy lokálně dlouhodobě ohřátá voda v oceánu. Tyto jevy bývají dále označovány jako bloby (teplé skvrny). Jde o obrovské oblasti povrchové vody s anomálně vysokými teplotami. Od roku 1995 se počet blobů výrazně zvýšil³⁵¹ a začaly se častěji objevovat v různých částech světového oceánu, mimo jiné u břehů Nového Zélandu, jihozápadní Afriky a v jižní části Indického oceánu.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürrig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (accessed 1 May 2025).

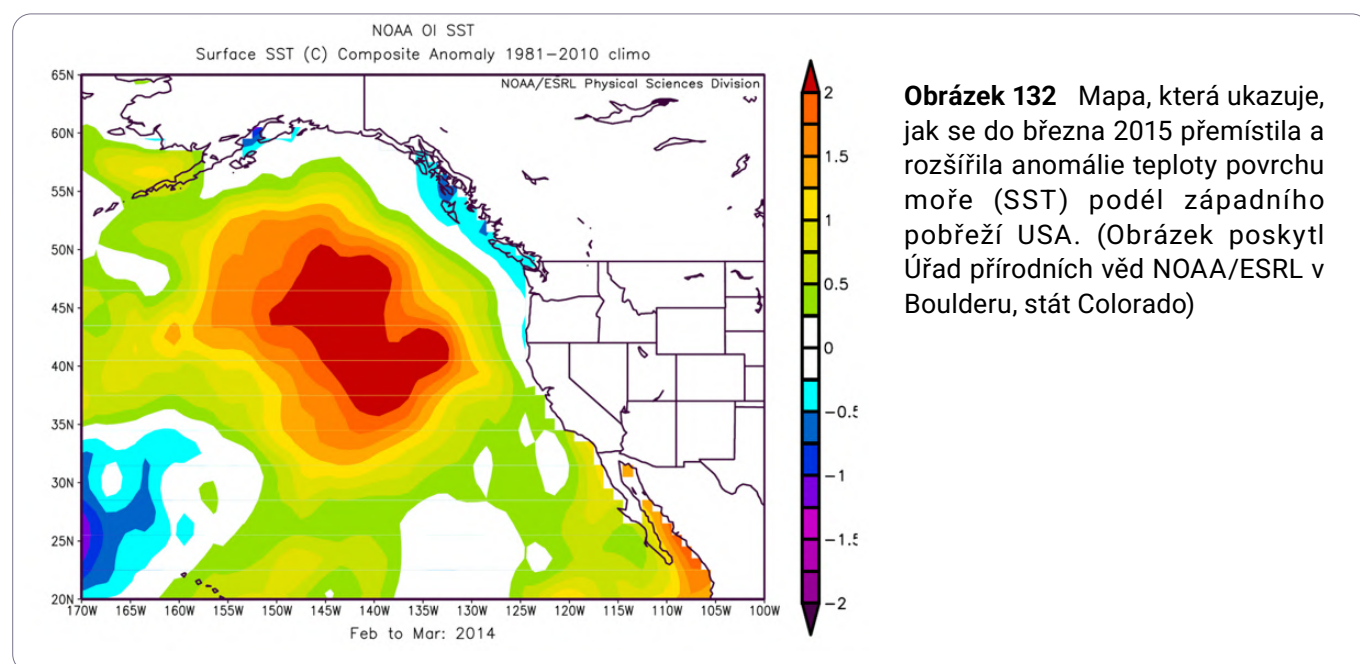
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snews.explores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

³⁵¹Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. Science 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

Jeden z nejznámějších a nejrozsáhlejších blobů se vytvořil v Aljašském zálivu v roce 2013 a rychle se rozšířil po Tichém oceánu. Jeho plocha přesáhla 4 miliony km² (což je více než rozloha Indie) a teplota vody na některých místech překročila průměr o 5–6 °C (obr. 132). Blob se po oceánu pohyboval od Aljašky až k Mexiku po dobu tří let, do roku 2016. Tento jev negativně ovlivnil mořský ekosystém i klima v regionu.

Příčinou vzniku blobu byl s největší pravděpodobností aktivní vulkanismus u pobřeží Aljašky a magmatický chochol Cobb³⁵², které ohřály vodu na dně oceánu a ta v tak obrovském objemu vystoupila na povrch.



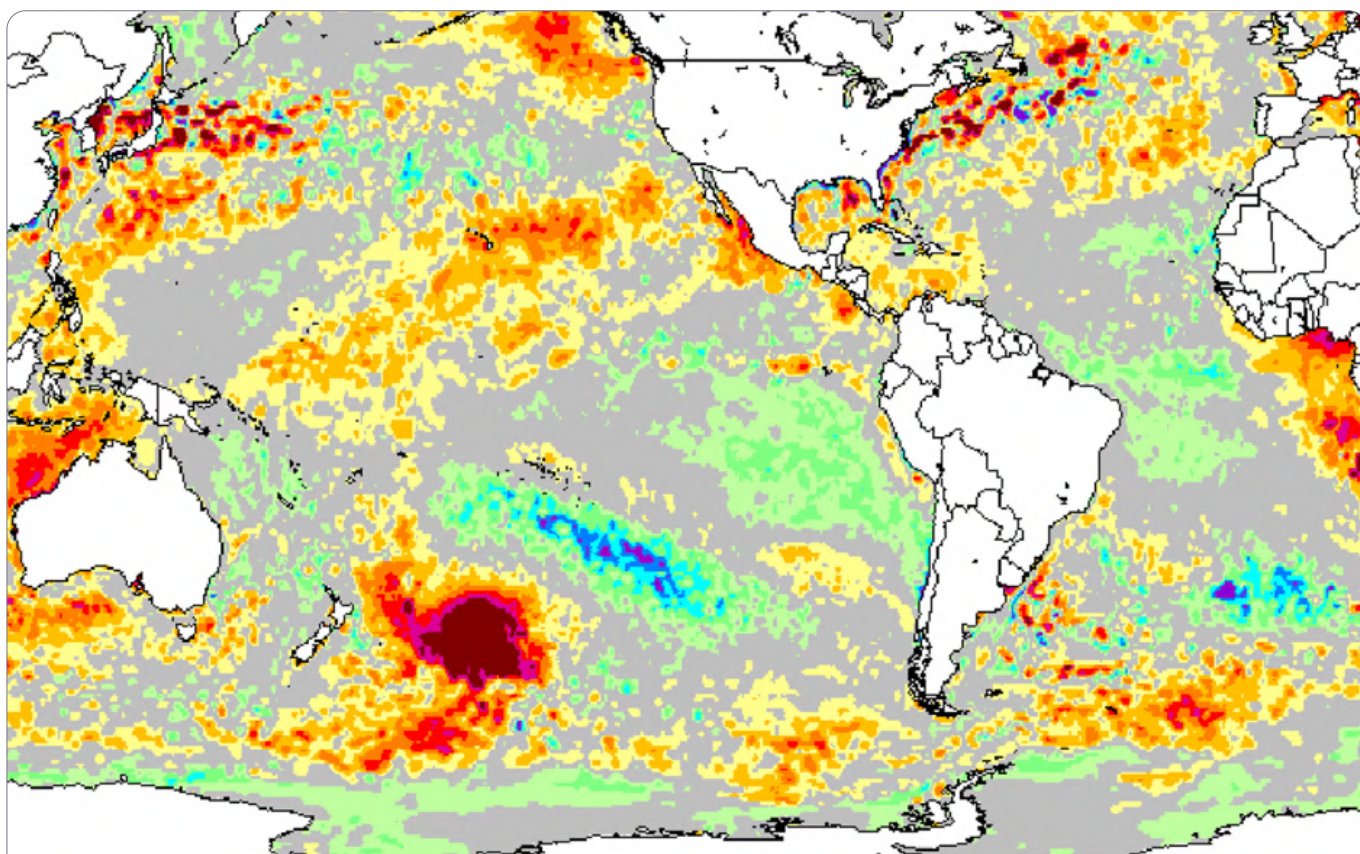
Na východ od Nového Zélandu, v jižní části Tichého oceánu, se v prosinci 2019 objevil blob, jehož teplota byla v některých dnech o 6 °C vyšší než průměrné hodnoty. Blob měl rozlohu více než 1 000 000 km², což odpovídá 1,5násobku rozlohy Texasu nebo čtyřnásobku rozlohy Nového Zélandu (obr. 133). V té době to byl podle zpráv největší blob ve světovém oceánu. Navíc tato „kapka“ byla druhou největší událostí za celou historii pozorování v tomto regionu.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

James Renwick, profesor katedry geografie, ekologie a věd o Zemi na Viktoriině univerzitě ve Wellingtonu, poznamenal:

„To je největší zóna anomálního oteplování na planetě. Obvykle je tam teplota vody kolem 15 °C, a teď – asi 20 °C³⁵³“.



Obrázek 133 Anomálie teploty povrchu moře v jižní části Tichého oceánu dne 25. prosince 2019.

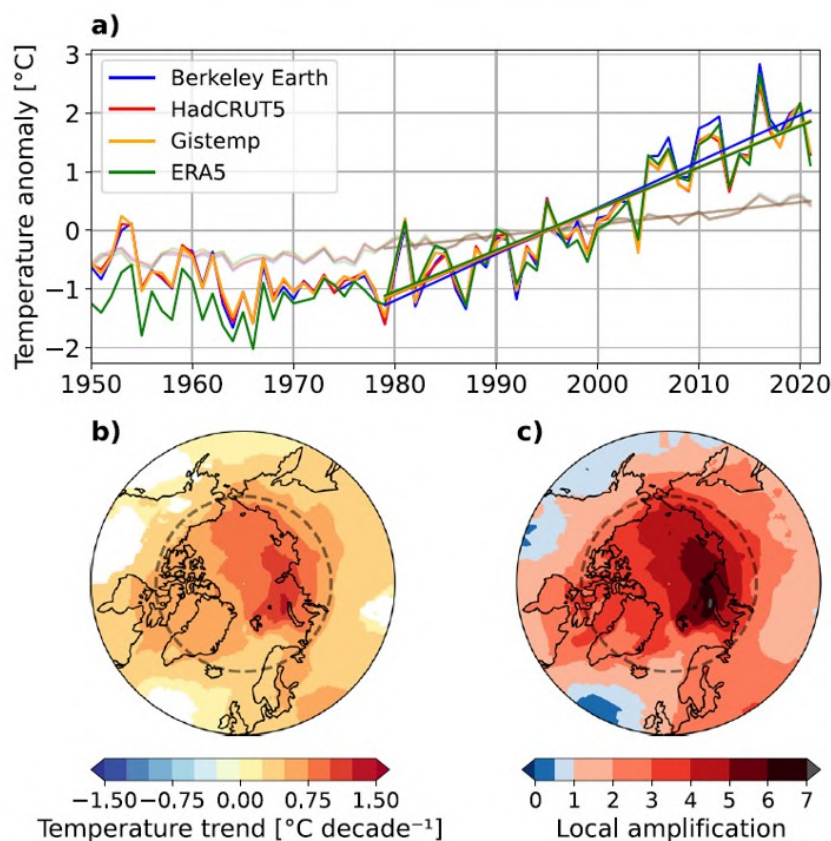
Zdroj: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019)
<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (K datu: 11. května 2025)

Pravděpodobnou příčinou vzniku tohoto blobu byla aktivita starověké vulkanické plošiny u pobřeží Nového Zélandu³⁵⁴.

³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019)
<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Dalším konkrétním příkladem vlivu geotermálního tepla na zvyšování teploty oceánských vod v důsledku magmatických procesů je anomální ohřev arktických moří podél pobřeží Sibiře. Podle výzkumu z roku 2022 se sibiřská Arktida otepluje téměř čtyřikrát rychleji než celosvětový průměr – tempem výrazně vyšším, než s jakým počítaly dosavadní klimatické modely, což vědce zásadně překvapilo³⁵⁵ (obr. 134).

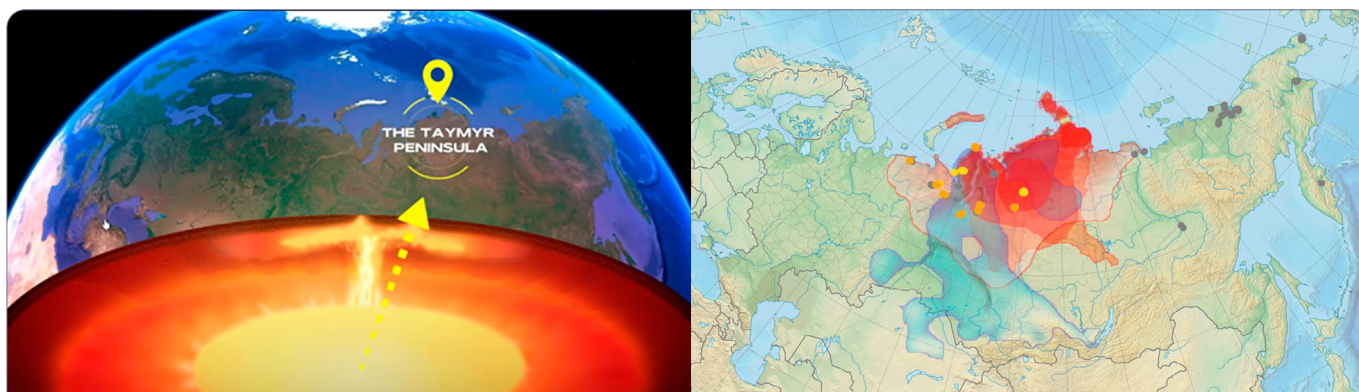


Obrázek 134 Vývoj průměrné roční teploty v Arktidě. (a) Průměrné roční teplotní anomálie v Arktidě 66,5°–90° s. š. (tmavé barvy) a v globálním měřítku (světlé barvy) za období 1950–2021, získané z různých pozorovacích datových souborů. Teplotní anomálie jsou vypočteny vzhledem ke standardnímu 30letému období 1981–2010. Čárkovaná čára na grafech (b) a (c) označuje severní polární kruh (zeměpisná šířka 66,5° s. š.).

Zdroj: Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

V této konkrétní oblasti světa – poblíž poloostrova Tajmyr – pozorujeme aktivaci sibiřského magmatického chocholu, který nyní rapidně stoupá v té samé oblasti, kde před 250 miliony let vybuchly Sibiřské trapy. Vše nasvědčuje tomu, že hlava chocholu v současnosti aktivně narušuje Východosibiřský kraton a magma se rozlévá pod celou jeho plochou (obr. 135). Podle předběžných odhadů může oblast rozlévání magmatických proudů pod Sibiří dosahovat průměru 2 500–3 000 km, což je srovnatelné s rozlohou Austrálie.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>



Obrázek 135 Lokalizace umístění chocholu podle výsledků různých výzkumů

Je důležité poznamenat, že takto intenzivní oteplování Arktických moří probíhá právě v oblasti poloostrova Tajmyr. Tuto anomálii právě v oceánské zóně Sibiře lze vysvětlit tím, že oceánská kůra je tenčí a rychleji vede teplo, zatímco voda má vyšší tepelnou kapacitu než atmosféra. Proto to je právě oceánská voda, která intenzivně akumuluje a zadržuje teplo z vystupujícího magmatického chocholu, přestože jeho vzestup probíhá pod kontinentální kůrou v relativní vzdálenosti od pobřeží.



Podrobnější informace o sibiřském magmatickém chocholu a jeho vlivu na klimatický systém, jakož i o hrozbách, které tato geologická struktura představuje, a možných řešeních najdete ve zprávě

„O HROZBĚ PRŮLOMU MAGMATICKÉHO CHOCHOLU NA SIBIŘI A ZPŮSOBECH ŘEŠENÍ TÉTO PROBLEMATIKY“

Souhrn všech těchto údajů svědčí o tom, že geologické procesy na dně oceánu představují významný faktor globálního oteplování. Nárůst seismické a vulkanické aktivity na dně oceánu koreluje s růstem globálních teplot, což naznačuje možný vztah příčiny a následku. Podmořské erupce, zejména explozivního charakteru, jsou schopny vytvářet mocné tepelné impulzy, které narušují lokální, a dokonce i globální tepelnou rovnováhu.

Hydrotermální systémy a vulkanické procesy vytvářejí velkoplošné anomálie, jako jsou bloby, které mají výrazný vliv na oceánské ekosystémy a klima, a magmatické procesy vyvolávají anomální oteplování arktických moří.

Tímto způsobem se oceán ohřívá nejen shora, vlivem atmosféry, ale i zdola – díky dynamickým procesům v zemských hlubinách. To vyžaduje přehodnocení stávajících klimatických modelů a hlubší zkoumání podmořské geologické aktivity jako významné složky celkové tepelné bilance planety.

Nicméně vyvstává jedna otázka, která má klíčový význam: proč právě v tomto období dochází k nárůstu magmatických a tektonických procesů na Zemi?

Stručný popis geodynamického modelu změny klimatu na Zemi v současném období

Za posledních 30 let dochází na Zemi k bezprecedentnímu a synchronnímu nárůstu nejen klimatických změn, ale také anomálií ve všech vrstvách planety a jejích geofyzikálních parametrech. Růst těchto změn probíhá exponenciálně. Komplexní analýza vědeckých dat ukazuje, že hlavní příčinou jsou astronomické cykly, které se opakují každých 12 000 let.

Hypotéza o vlivu kosmických faktorů je potvrzována podobnými změnami, které současně se Zemí začaly probíhat i na jiných planetách Sluneční soustavy a jejich měsících. Například na Uranu³⁵⁶, Jupiteru³⁵⁷ a Venuši³⁵⁸ se zvyšuje rychlost větru a rozšiřují se zóny hurikánů. Na Marsu je pozorováno tání ledových čepiček na pólech³⁵⁹ a vulkanická aktivita na Venuši³⁶⁰ i Marsu³⁶¹ nadále roste. Kromě toho se na Marsu, mrtvé planetě, zesilují zemětřesení³⁶², což svědčí o výskytu anomální aktivity v jeho nitru.

Kritické změny v systému Země se začaly projevovat od roku 1995, kdy byly zaznamenány významné geofyzikální anomálie, jako je prudké zrychlení rotace Země, posun její osy a začátek driftu severního magnetického pólu (obr. 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

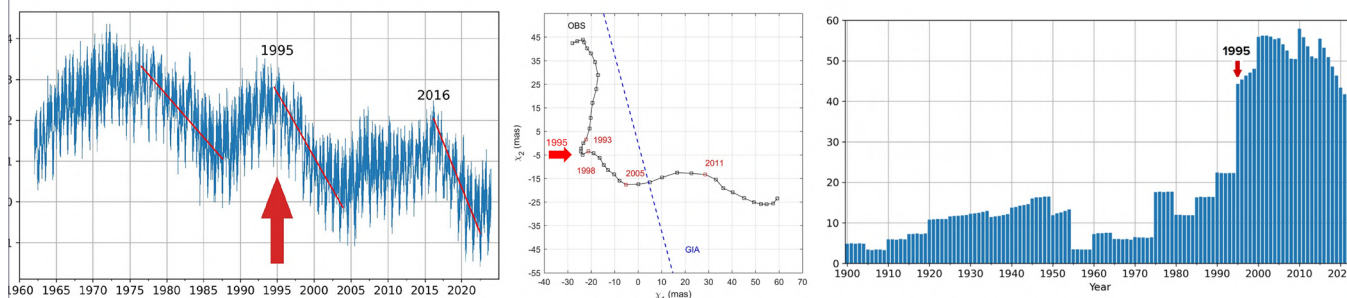
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Náhlé a prudké zrychlení rotace planety, zaznamenané Centrem orientace Země Pařížské observatoře.

Zdroj dat: IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW/IAU1980-LOD&id=223

Anomální změny osy rotace Země: prudká změna směru jejího driftu a zvýšení rychlosti pohybu 17krát.

Zdroj: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Pohyb severního magnetického pólu, který se dříve posouval rychlostí 10 km/rok, se náhle zrychlil na 55 km/rok a změnil svou trajektorii směrem k poloostrovu Tajmyr na Sibiři.

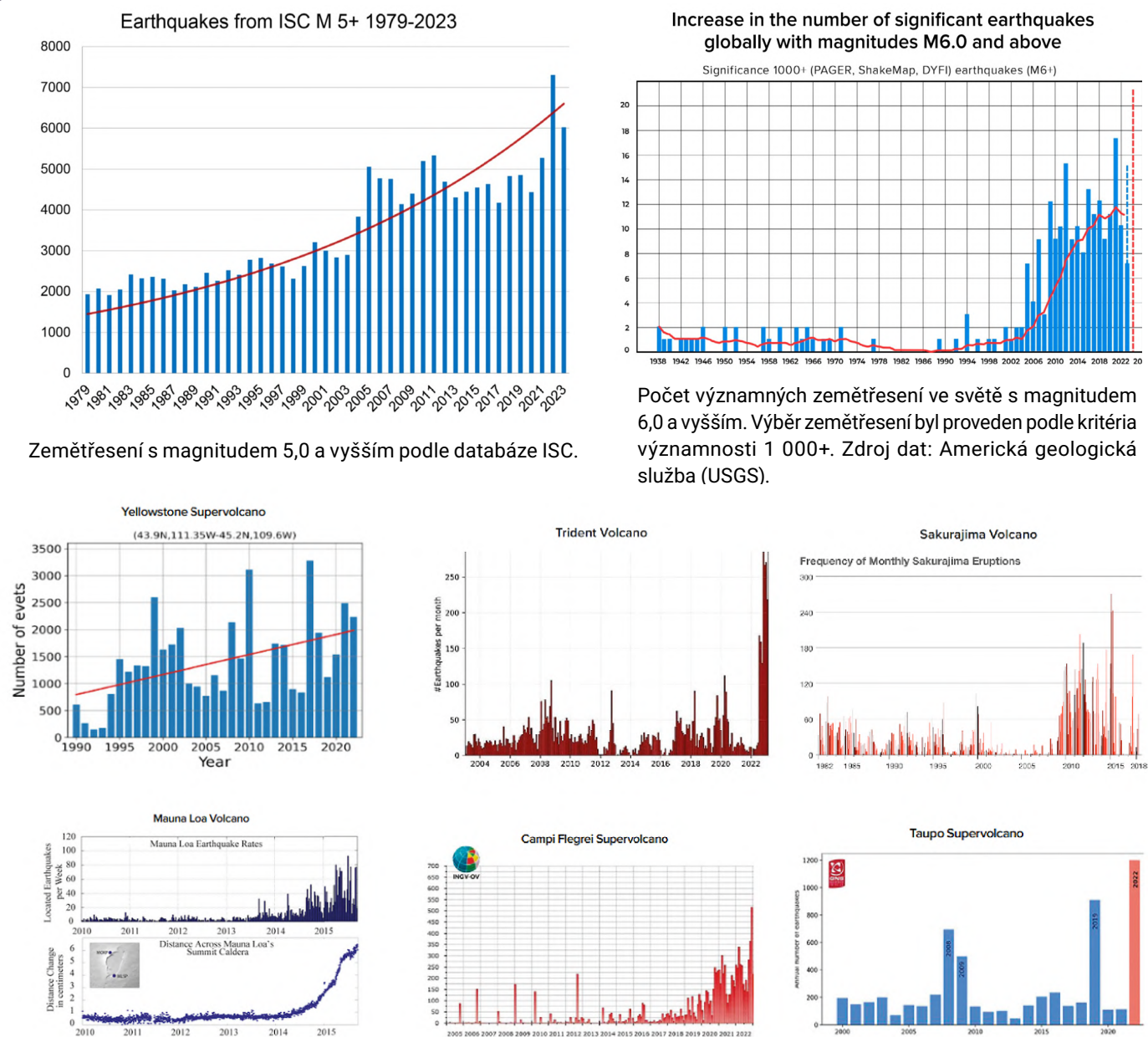
Zdroj dat: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Obrázek 136 Změny geofyzikálních parametrů Země v roce 1995

Tyto anomálie ukazují na hluboké změny v jádru Země, které vyžadují energii o kvadriliony krát větší, než kolik lidstvo vyprodukovalo za celou historii civilizace. Příčinou je vnější kosmické působení, které ovlivňuje zemské jádro stejně jako jádra ostatních planet Sluneční soustavy. Toto vnější působení zesiluje tavení pláště, což vede k jeho přibližování k povrchu. Výsledkem je spuštění řetězové reakce: zesiluje se vulkanická a seismická aktivita, zvyšuje se ohřev z nitra a roste počet přírodních katastrof po celém světě.

Od roku 1995 je pozorován výrazný nárůst seismické aktivity, který se vyznačuje zvýšením četnosti, síly a energie zemětřesení. Tento trend je patrný jak na souši, tak v oceánech, včetně oblastí, kde dříve seismická aktivita prakticky nebyla zaznamenávána. To vše ukazuje na globální rozsah změn. Je důležité zdůraznit, že nárůst počtu zemětřesení s magnitudem 5,0 a vyšším nesouvisí s rozšířením sítě nebo zvýšením citlivosti senzorů, ale skutečně odráží změny v geodynamice Země. Podle souhrnných údajů Mezinárodního seismologického centra se počet takových zemětřesení za posledních 25 let výrazně zvýšil a nadále roste (obr. 137).

Kromě toho roste seismická aktivita v blízkosti sopek včetně supervulkánů, jako je Yellowstone v USA, Flegrejská pole v Itálii³⁶³ a Taupo na Novém Zélandu³⁶⁴ a také dalších sopek, jejichž erupce probíhaly v předchozích 12tisíciletých cyklech (obr. 137).



Obrázek 137 Nárůst seismické aktivity celkově na planetě a v blízkosti sopek a supervulkánů

Stále více dní v roce jsou zaznamenávány sopečné erupce, přičemž vyvrhovaná láva často vykazuje anomální vlastnosti: je přehřátá a má neobvyklé chemické složení, charakteristické pro magma přicházející z hlubokých vrstev pláště.

³⁶³Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023)

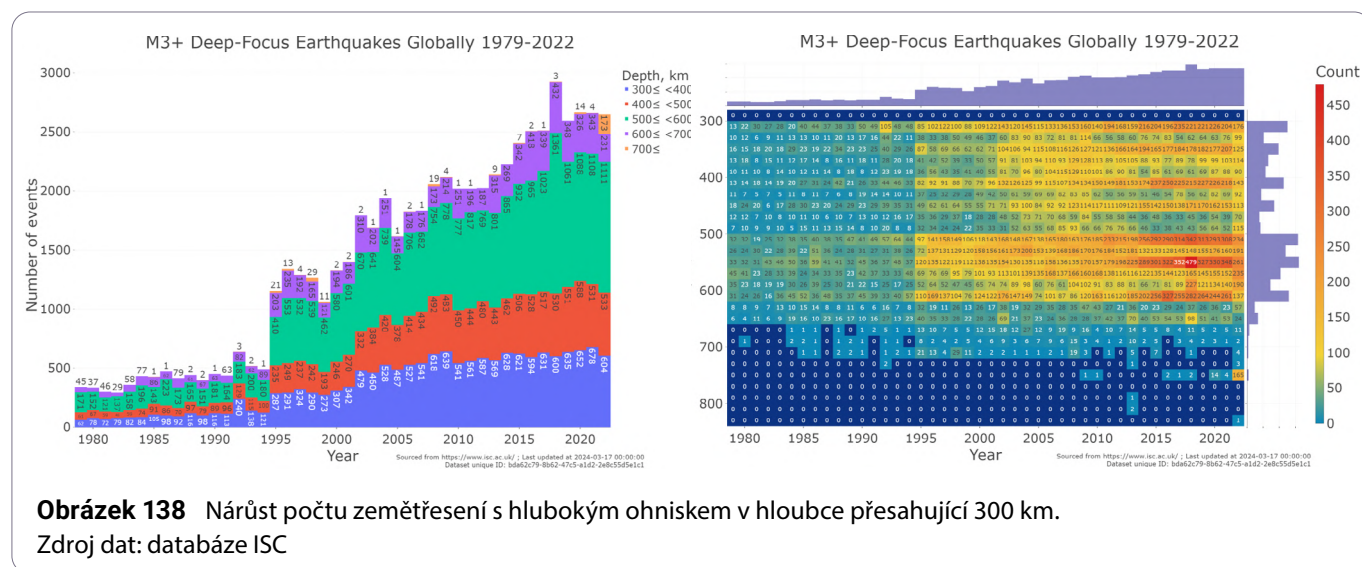
<https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022)

<https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Zvláštní obavy vyvolává nárůst počtu zemětřesení s hlubokým ohniskem, k nimž dochází v hloubkách větších než 300 km, někdy až do 750 km pod povrchem Země. Tyto jevy vznikají nikoli v zemské kůře, ale v plášti, kde materiál pláště nepraská, ale deformuje se jako plastelína, což činí povahu takových zemětřesení krajně neobvyklou. Protože tato zemětřesení probíhají za podmínek extrémního tlaku a vysokých teplot, lze usuzovat, že tyto mocné výbuchy v plášti jsou srovnatelné s jednorázovou detonací mnoha atomových bomb uvnitř zemského pláště.

Kromě toho zemětřesení s hlubokým ohniskem často iniciují silné seismické otřesy v zemské kůře a zesilují jejich ničivý účinek. Od roku 1995 je pozorován prudký nárůst počtu zemětřesení s hlubokým ohniskem (obr. 138), což se shoduje s dalšími geodynamickými anomáliemi, které začaly ve stejném období. Růst počtu těchto vnitroplášťových explozí ukazuje na zvýšení energie v hlubinách planety a intenzivní tavení pláště, což může vést k rozsáhlým sopečným erupcím.



Obrázek 138 Nárůst počtu zemětřesení s hlubokým ohniskem v hloubce přesahující 300 km.

Zdroj dat: databáze ISC

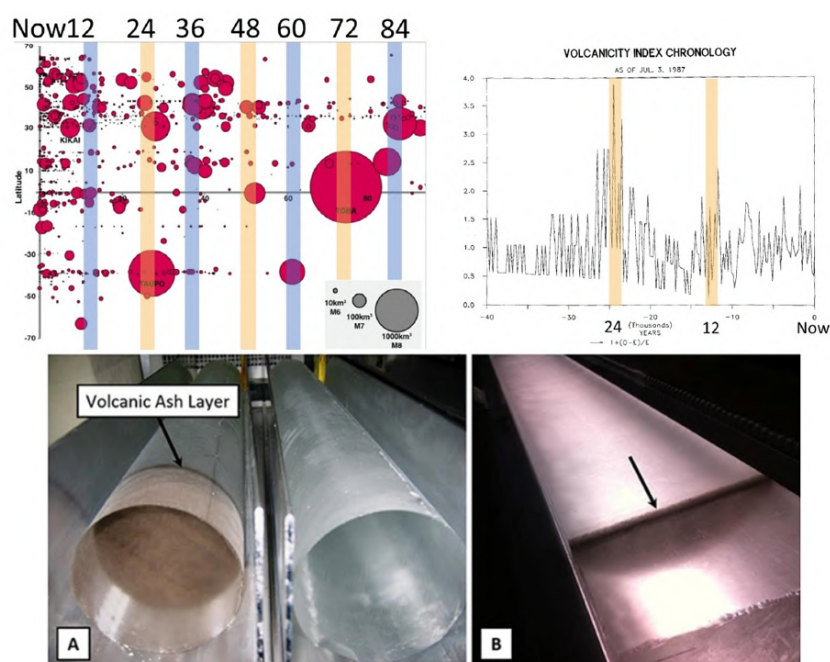
Působením odstředivých sil začalo roztavené magma v plášti od roku 1995 aktivně vystupovat k povrchu Země, čímž zevnitř více než obvykle narušuje a zesiluje ohřev litosféry. Tento vzestup magmatu vede ke zvýšení geotermálního toku z nitra planety a aktivuje magmatické chocholy pod ledovci západní Antarktidy, středního Grónska a Sibiře. V důsledku toho začínají ledovce a permafrost zrychleně tát odspodu nahoru^{365, 366, 367}.

Jednou z klíčových příčin ohřevu oceánu je tedy stoupající magma, které obzvláště silně zahřívá oceánskou kůru, jež je tenčí a zranitelnější ve srovnání s kontinentální. Historické údaje z geologických a ledových jader svědčí o tom, že Země prochází podobnými katastrofickými cykly přibližně každých 12 000 let. Každý druhý cyklus, tedy každých 24 000 let, mají planetární katastrofy ničivější charakter (obr. 139).

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>



Obrázek 139 Grafy ilustrují katastrofickou vulkanickou aktivitu, k níž dochází každých 12 000 let a ještě intenzivnější události každých 24 000 let.

Zdroj: Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Bryson, R. A. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989).

<https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Právě do takového cyklu nyní Země vstupuje. Tentokrát však v důsledku antropogenního znečištění oceánu mikro- a nanoplasty zesílila tepelná nerovnováha v plášti, což vede k nárůstu počtu zemětřesení s hlubokým ohniskem, vzniku nových magmatických krbů a celkové nestabilitě planety. Právě proto kataklyzmata nyní narůstají mnohem rychleji a silněji než v předchozích cyklech. Ve skutečnosti se znečištění oceánu stalo hlavní příčinou toho, že Země se s tímto cyklem nemusí vyrovnat. Je důležité chápat, že vyřešení problému se znečištěním oceánu mikro- a nanoplasty může zpomalit rozvoj kataklyzmat, ale nezastaví je.



Podrobnější informace o aktuální geodynamické aktivitě zemského nitra, 12 000letém cyklu kataklyzmat a možných řešeních tohoto problému lze nalézt ve zprávě

**„O PROGRESI KLIMATICKÝCH
KATAKLYZMAT NA ZEMI A JEJICH
KATASTROFÁLNÍCH DŮSLEDKÁCH“**

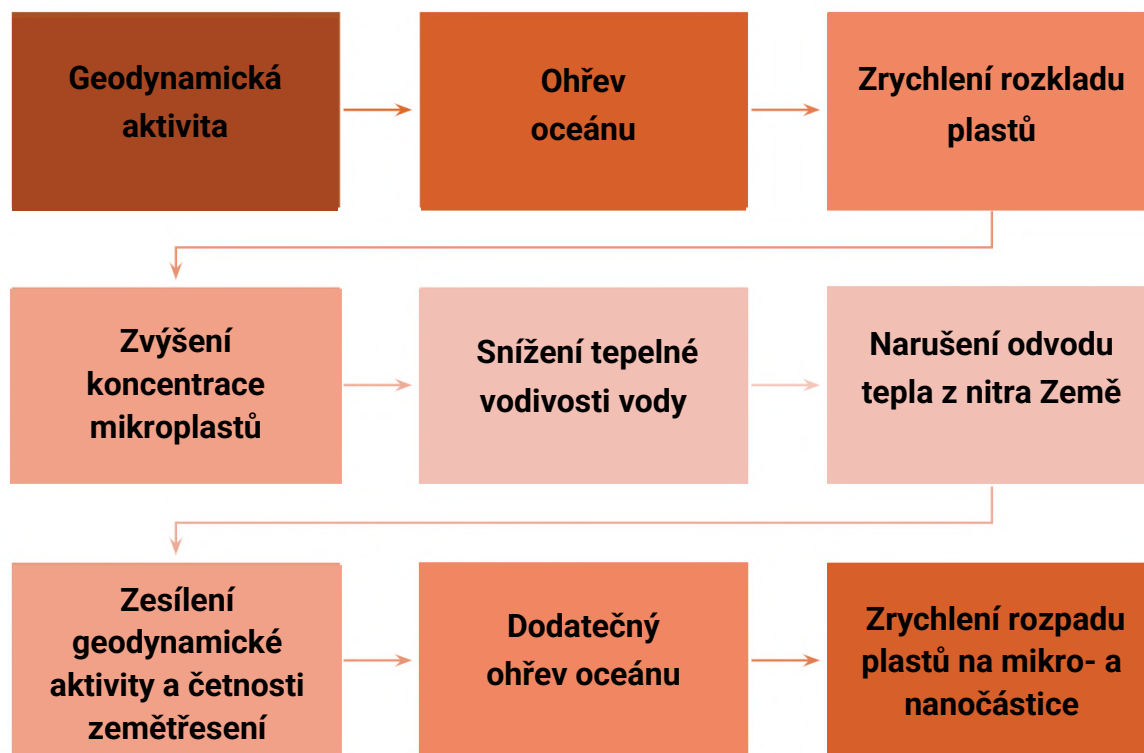
Jak ukázaly mnohaleté mezioborové výzkumy geodynamických změn v cyklu 12 000 let, příčinou prvotního ohřevu oceánu je stoupající magma, které obzvláště silně působí na oceánskou kůru, jež je tenčí a zranitelnější ve srovnání s kontinentální. Znečištění světového oceánu plasty a hromadění částic mikro- a nanoplastů se stává kritickým faktorem, který mění tepelné vlastnosti oceánu. Přítomnost těchto syntetických částic v oceánské vodě podstatně snižuje její schopnost vést teplo, což narušuje přirozené procesy výměny tepla mezi hlubinnými vrstvami oceánu a jeho povrchem, ale co je ještě kritičtější – narušuje odvod tepla z litosférických desek.

Za podmínek zvýšené geodynamické aktivity v průběhu 12tisíciletého cyklu kritická změna tepelné vodivosti oceánské vody zvyšuje nejen ohřev oceánu a atmosféry, ale i ohřev v zemských hlubinách. To vede k intenzivnějšímu tavení pláště a v důsledku toho k ještě silnější geodynamické aktivitě.

To vyvolává hromadění přebytečné energie v nitru Země, což vede k nárůstu počtu zemětřesení s hlubokým ohniskem a urychlenému formování nových magmatických krbů. Tyto procesy pak ještě více zhoršují nestabilitu planety a urychlují ohřev oceánu.

Formuje se nebezpečný uzavřený cyklus:

geodynamická aktivita ohřívá oceán → ohřev urychluje rozklad plastů → zvýšení koncentrace mikroplastů snižuje tepelnou vodivost vody → narušuje se odvod tepla z nitra → zesiluje se geodynamická aktivita a četnost zemětřesení → oceán se ještě více ohřívá, a tím se ještě více urychluje proces rozpadu plastů na mikro- a nanočástice.



To vede k růstu četnosti a síly extrémních povětrnostních jevů a přírodních katastrof, jako jsou záplavy, hurikány a tropické cyklóny, které dnes dosahují bezprecedentní intenzity.

Znečištění oceánů mikro- a nanoplasty tak má nejen destruktivní vliv na lidské zdraví, ekosystémy, biosféru a klimatický systém tím, že zesiluje oteplování oceánů, ale také působí jako zesilující faktor již tak extrémních katastrof spojených s 24 000letým cyklem, do kterého Země nyní vstoupila. To vytváří bezprecedentní rizika nejen pro přežití lidstva, ale i samotné planety Země.

Řešení globální ekologické, klimatické a geodynamické krize vyžaduje mezinárodní spolupráci vědců různých disciplín pro urgentní vypracování a realizaci komplexních opatření. Tato řešení by měla zahrnovat nejen čištění oceánu od mikro- a nanoplastů a snižování jejich negativního vlivu na lidské zdraví, ale také vypracování zásadních řešení k odstranění geodynamických hrozeb.

Seznámit se s navrženými řešeními je možné v příslušných zprávách:



ZPRÁVA

**„O PROGRESI KLIMATICKÝCH
KATAKLYZMAT NA ZEMI A JEJICH
KATASTROFÁLNÍCH DŮSLEDČÍCH“**



ZPRÁVA

**„O HROZBĚ PRŮLOMU MAGMATICKÉHO
CHOCHOLU NA SIBIŘI A ZPŮSOBECH
ŘEŠENÍ TOHOTO PROBLÉMU“**

ZÁVĚRY. NANOPLASTY – VÝZVA, KTEROU NELZE IGNOROVAT

Problém plastového znečištění, zejména v podobě mikro- a nanoplastů, překročil rámec lokálních ekologických následků a získal charakter mnohostranné globální hrozby. Současné výzkumy potvrzují jak přímý, tak i nepřímý vliv MNP na klimatický systém, stabilitu ekosystémů a zdraví člověka. Částice mikroplastů jsou schopny pronikat do živých organismů, vyvolávat zánětlivé reakce, narušovat hormonální rovnováhu, funkce imunitního a reprodukčního systému, stejně jako měnit fyzikálně-chemické vlastnosti životního prostředí – od mořské vody až po atmosféru.

Před více než 10 lety představitelé mezinárodního vědeckého společenství ALLATRA vyslovili předpoklad o rostoucím vlivu plastového znečištění na klimatické anomálie a zhoršování problémů veřejného zdraví. Dnes tyto hypotézy nacházejí potvrzení v nezávislých výzkumech prováděných předními vědeckými institucemi. Rychlé hromadění údajů o ekologických a biologických účincích MNP otevírá nové obzory pro analýzu, včetně analýzy klimatických vzorců, změn v hydrosféře a nárůstu systémových rizik pro udržitelný rozvoj.

Zvláštní obavy vyvolává skutečnost, že i mikroskopické koncentrace nanoplastů mohou spouštět kaskádové efekty v biosféře a klimatu. Plast přestal být pouze pevným odpadem – stává se aktivním činitelem transformace životního prostředí i lidského organismu. Následky jeho rozšíření se projevují již dnes. Problém MNP se netýká jen ekologie a medicíny, ale vyžaduje také uchopení v kontextu národní bezpečnosti, makroekonomie a mezinárodních vztahů.

V rámci strategie ochrany proti této hrozbě navrhlo hnutí ALLATRA dva klíčové směry, které mají jak praktický, tak prognostický potenciál. Prvním z nich je rozsáhlé zavádění technologií generátorů atmosférické vody (GAV), které jsou schopny řešit současně problém nedostatku sladké vody a přispívat k čištění atmosféry a oceánů od mikroplastových částic. Realizace GAV-technologií však vyžaduje zohlednění možných rizik – zejména zvýšení koncentrace MNP ve vzduchu a v důsledku toho zesílení inhalačního působení na člověka. To určuje nezbytnost paralelního vývoje vysoce účinných filtračních a ochranných systémů.

Druhým strategickým směrem, rovněž navrženým hnutím ALLATRA, je vývoj metod neutralizace nebo odstínění elektrostatického náboje nanoplastů – jednoho z hlavních faktorů jeho toxicity. Nabité částice nanoplastů aktivně interagují s buněčnými membránami, proteiny a genetickým materiálem, vytvářejí stabilní molekulární vazby. Takové částice pronikají přes biologické bariéry, včetně hematoencefalické, hromadí se v tkáních a spouštějí kaskádu buněčných poruch – od oxidačního stresu až po apoptózu. Snížení elektrostatické aktivity mikro- a nanoplastů může výrazně omezit jejich škodlivost a zpomalit hromadění v organismu.

Podle odhadů autorů zprávy je odstínění nebo neutralizace elektrostatického náboje schopna snížit potenciální nebezpečí MNP nejméně o 50 %, což činí tento směr výzkumu kriticky důležitým. To vytvoří potřebnou časovou rezervu pro vypracování komplexnějších strategií diagnostiky, prevence a vylučování MNP z lidského organismu a pro čištění biosféry. V tomto kontextu nabývají zvláštního významu výzkumy v oblastech biofyziky, nanotechnologií a molekulární toxikologie.

Efektivní reakce na hrozbu MNP nevyžaduje dílčí opatření, ale globální a mezioborový přístup. Je nutná koordinace úsilí v oblasti vědeckého výzkumu, technologických řešení, normativní regulace a mezinárodní spolupráce. Plastové znečištění je třeba vnímat ne jako úzký ekologický problém, ale jako systémovou výzvu, která zasahuje zdraví, bezpečnost, zajištění zdrojů a stabilitu sociální infrastruktury.

Jedinečnost této zprávy spočívá v komplexním mezioborovém přístupu, který spojuje údaje z fyziky, chemie, biologie a medicíny. Taková syntéza umožňuje nahlížet na problém MNP jako na civilizační výzvu, která vyžaduje řešení na mnoha úrovních. V současné době si světové společenství postupně uvědomuje skutečný rozsah této hrozby. Navzdory absenci univerzálního řešení je to právě úsilí o jeho nalezení a rozvoj vědecké spolupráce, co může určit cestu k překonání krize. Hlavní výzvou není absence řešení, ale schopnost nalézt ho dříve, než dosáhneme kritického bodu.

Zdroje

- Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Accessed May 1, 2025).
- Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>
- Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. Environmental Pollution 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>
- Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>
- Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Accessed May 1, 2025)
- Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>
- AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).
- Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Al Naggari, Y. et al. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. Toxics 11, 100 (2023). <https://doi.org/10.3390/toxics11020100>
- Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Accessed May 1, 2025).

Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Accessed May 1, 2025).

Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).

Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

- Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>
- Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).
- Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>
- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).
- Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.
- Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>
- Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

Blue Cross Blue Shield. Major depression: The impact on overall health. Report. (2018) <https://www.bcbs.com/news-and-insights/report/major-depression-the-impact-on-overall-health> (accessed 1 May 2025).

Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).
- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).
- [Climate.gov](https://www.climate.gov/). 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

[ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).

Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>
- EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025).
- Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>
- Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Accessed May 1, 2025).
- Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>
- Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>
- Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Accessed May 1, 2025)

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 2025).

Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. Geophysical Research Letters 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329-340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. JDS Communications 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Accessed May 1, 2025)

Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgI> (Accessed May 1, 2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (accessed 1 May 2025).
- Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>
- Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>
- Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>
- Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Accessed May 1, 2025).
- Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>
- Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Accessed May 1, 2025)
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Accessed May 1, 2025)

Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. Sci. Adv. 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. IJERPH 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

Huang, X., Saha, S. C., Saha, G., Francis, I. & Luo, Z. Transport and deposition of microplastics and nanoplastics in the human respiratory tract. Environmental Advances 16, 100525 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100525>

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Accessed May 1, 2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. Proceedings of the National Academy of Sciences 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025).

IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025).

Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (accessed 1 May 2025).

Irigoiien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. Earth-Science Reviews 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. Environmental Pollution 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

- Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>
- James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjN-FxkALjIC&pg=PA192>
- Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)
- Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>
- Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>
- Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>
- Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.
- Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>
- Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>
- Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Accessed May 1, 2025)
- Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>
- Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>
- Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>
- Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

- Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>
- Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>
- Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>
- Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona’s Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>
- Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>
- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2025.01.002>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>
- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

- Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>
- Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>
- Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>
- Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>
- Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>
- NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).
- National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Accessed May 1, 2025).
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Accessed May 1, 2025).
- Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>
- NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 10, 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 1, 2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

[Nippon.com](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>

Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Accessed May 1, 2025).
- Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2689>
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rath, Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
- Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).
- Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>
- Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>
- Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>
- Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swhbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).
- Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>
- Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>
- Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

- Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>
- Sheng, D., Jing, S., He, X. et al. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52734-3>
- Schirmer, E., Schuster, S. & Machnik, P. Bisphenols exert detrimental effects on neuronal signaling in mature vertebrate brains. *Commun Biol* 4, 465 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01966-w>
- Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>
- Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>
- Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>
- Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>
- Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>
- Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>
- Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>
- Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Accessed May 1, 2025).

Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Shanna Swan: ‘Most couples may have to use assisted reproduction by 2045’. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025).

The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024) <https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (accessed 1 May 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Accessed May 1, 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Accessed May 1, 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? *Science* 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025).

United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025).

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Accessed May 1, 2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025).

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (accessed 1 May 2025).

Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf> (Accessed May 1, 2025).

Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).

Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>
- Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>
- Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>
- Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics’ Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>
- Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>
- Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
- Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter’s Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Accessed May 1, 2025).

World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. Over 1 in 3 people affected by neurological conditions, the leading cause of illness and disability worldwide. (2024) <https://www.who.int/news/item/14-03-2024-over-1-in-3-people-affected-by-neurological-conditions--the-leading-cause-of-illness-and-disability-worldwide> (accessed 1 May 2025).

World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025).

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

- WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025).
- Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>
- Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>
- Yan, Z. et al. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environ. Sci. Technol.* 56, 414–421 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>
- Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *Nanomaterials* 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>
- Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. *Cambridge Prisms: Plastics* 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>
- Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>
- Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Vagal sensory neurons and gut-brain signaling. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>
- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>