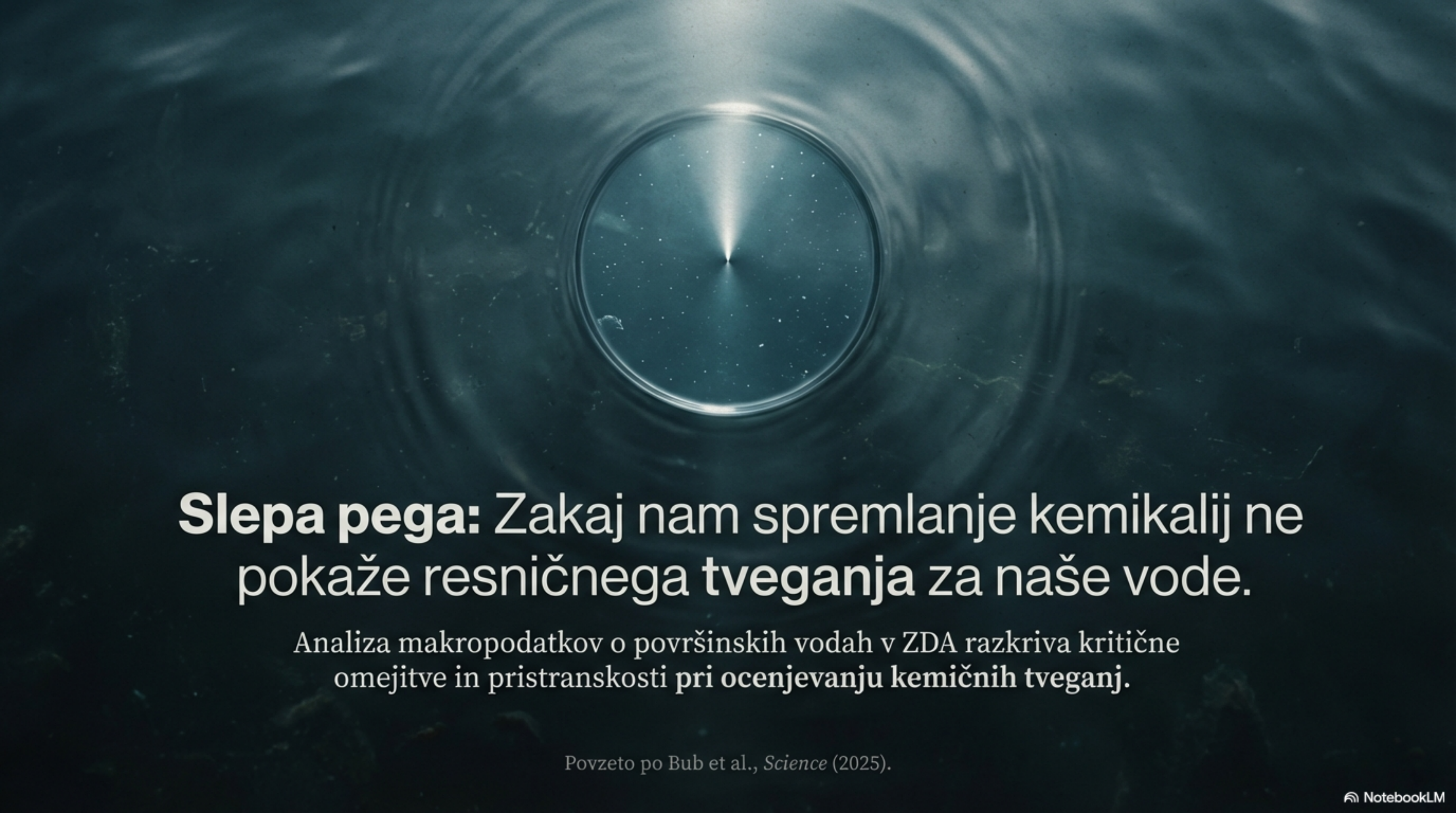




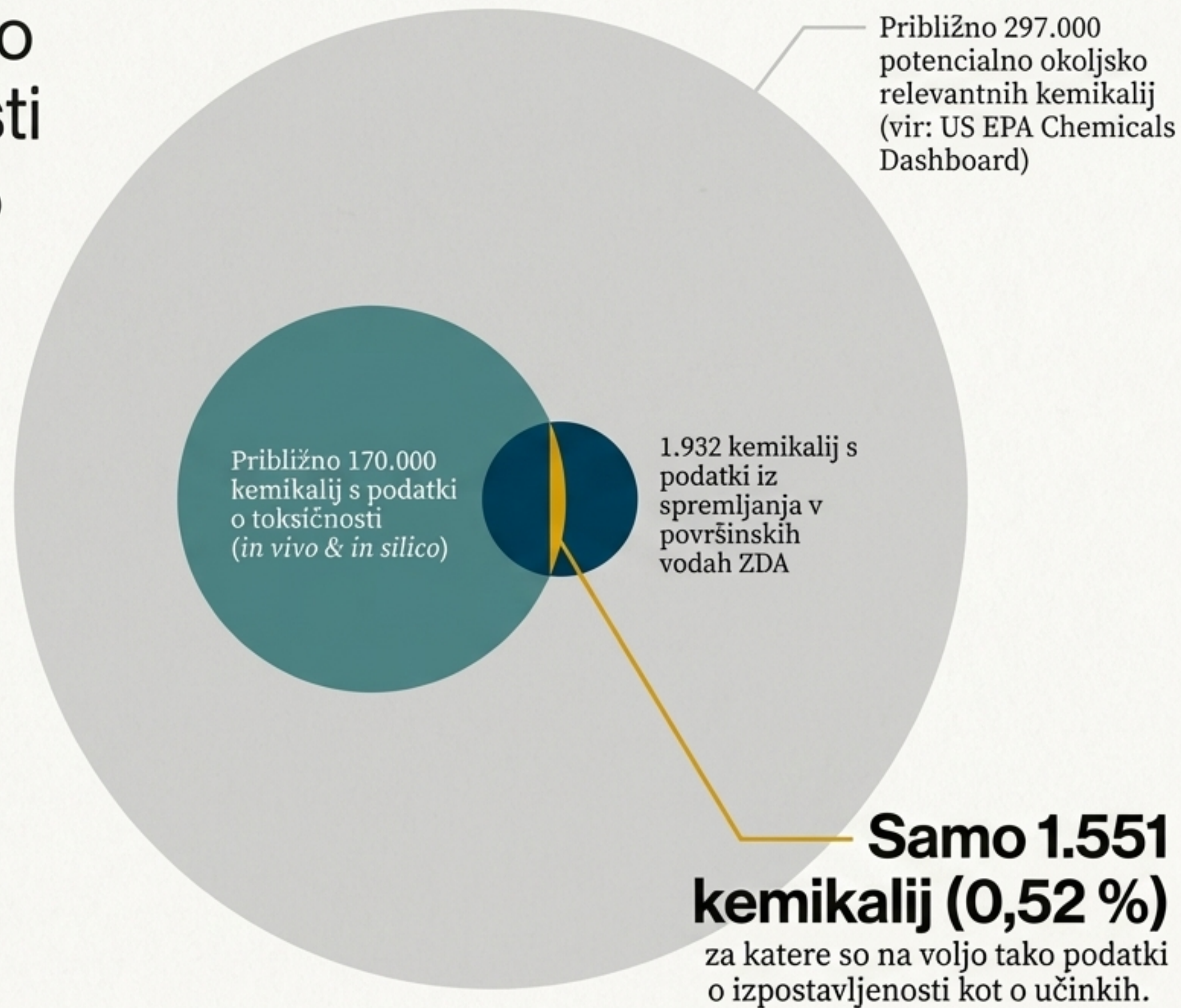
Slepa pega: Zakaj nam spremlanje kemikalij ne pokaže resničnega tveganja za naše vode.

Analiza makropodatkov o površinskih vodah v ZDA razkriva kritične omejitve in pristranskosti pri ocenjevanju kemičnih tveganj.

Povzeto po Bub et al., *Science* (2025).

Za oceno tveganja imamo podatke o izpostavljenosti in učinkih za manj kot 1 % kemikalij.

Kemično onesnaževanje ogroža celovitost biosfere in biotsko raznovrstnost. Vendar pa je naše razumevanje tveganj močno omejeno, ker za veliko večino kemikalij nimamo podatkov o spremljanju, ki bi bili nujni za retrospektivno oceno tveganja.



Narava onesnaženja se je spremenila, naši sistemi spremljanja pa zaostajajo.

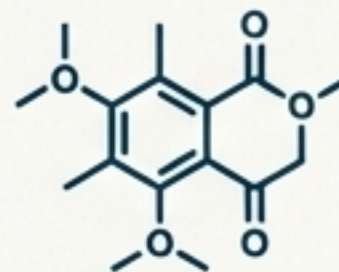
Problem sedemdesetih



Onesnaženje je bilo razširjeno, vendar so ga povzročale predvsem **majhno število** znanih, obstojnih **anorganskih** onesnaževal (npr. baker, svinec, cink).

Visoko število **preseganj** mejnih vrednosti (~10.000 primerov na leto) v velikem številu prostorskih enot (>35 %).

Sodobni izziv



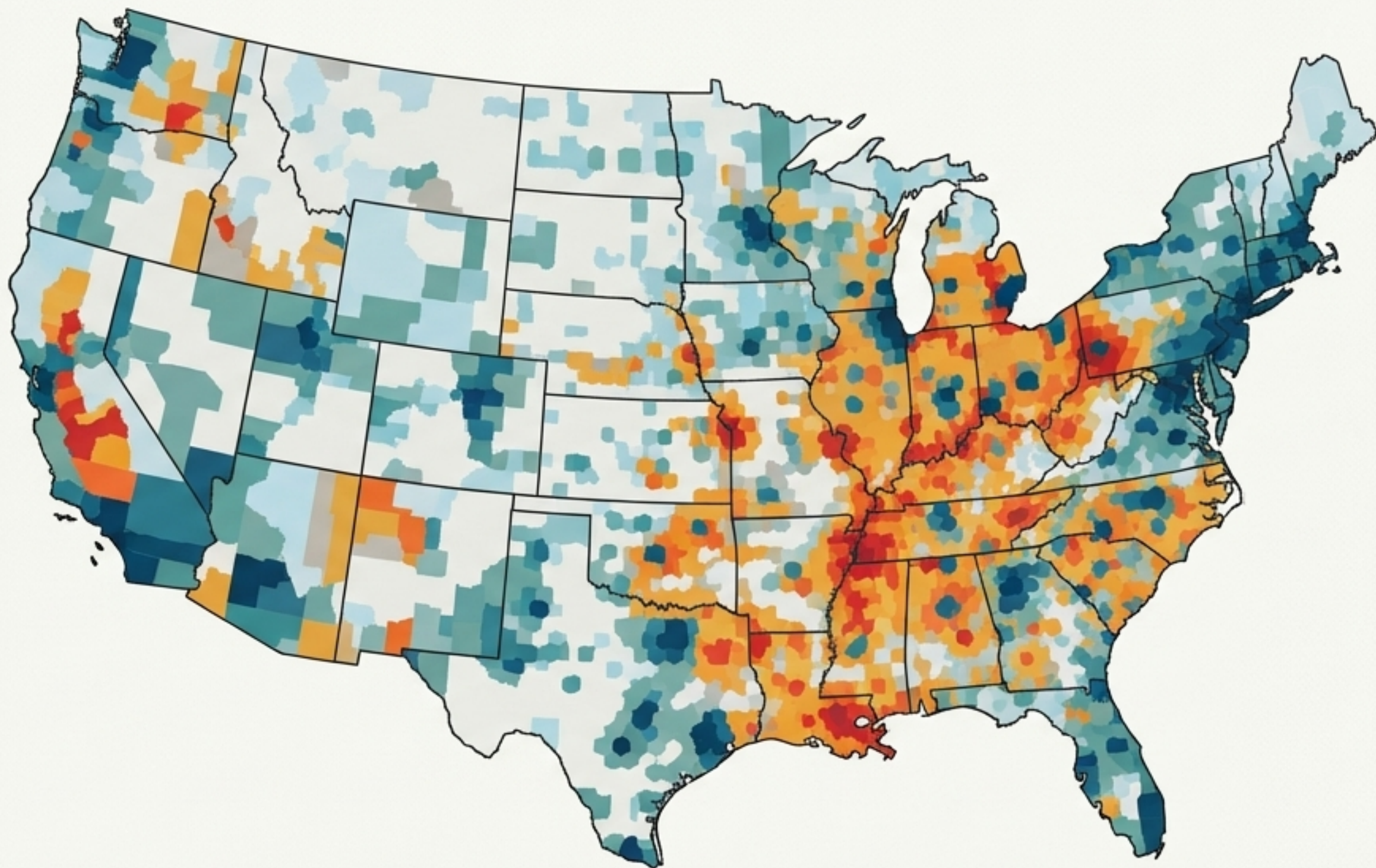
Danes se soočamo z veliko **večjim številom organskih** kemikalij in njihovih razgradnih produktov. Onesnaženje je bolj razpršeno v času, prostoru in po kemični sestavi.

Padec števila zabeleženih preseganj po letu 2000 ni posledica čistejšega okolja, temveč **zmanjšanega obsega spremljanja**.

Zaključek: Sistemi, zasnovani za sledenje nekaj obstojnim onesnaževalom, se težko spopadajo z današnjo kompleksnostjo izpostavljenosti.

Časovno-prostorska analiza razkriva tri različne vzorce tveganja in spremljanja po ZDA.

Z združevanjem 60-letnih podatkov o spremljanju in preseganjih mejnih vrednosti smo identificirali geografske žariščne točke. Ti vzorci so tesno povezani z glavnimi viri onesnaževanja: točkovnimi viri (mesta), rudarstvom in kmetijstvom.



Obsežno spremljanje,
občasna preseganja.

Omejeno spremljanje,
pogosta preseganja.

Omejeno spremljanje,
pogosta preseganja.

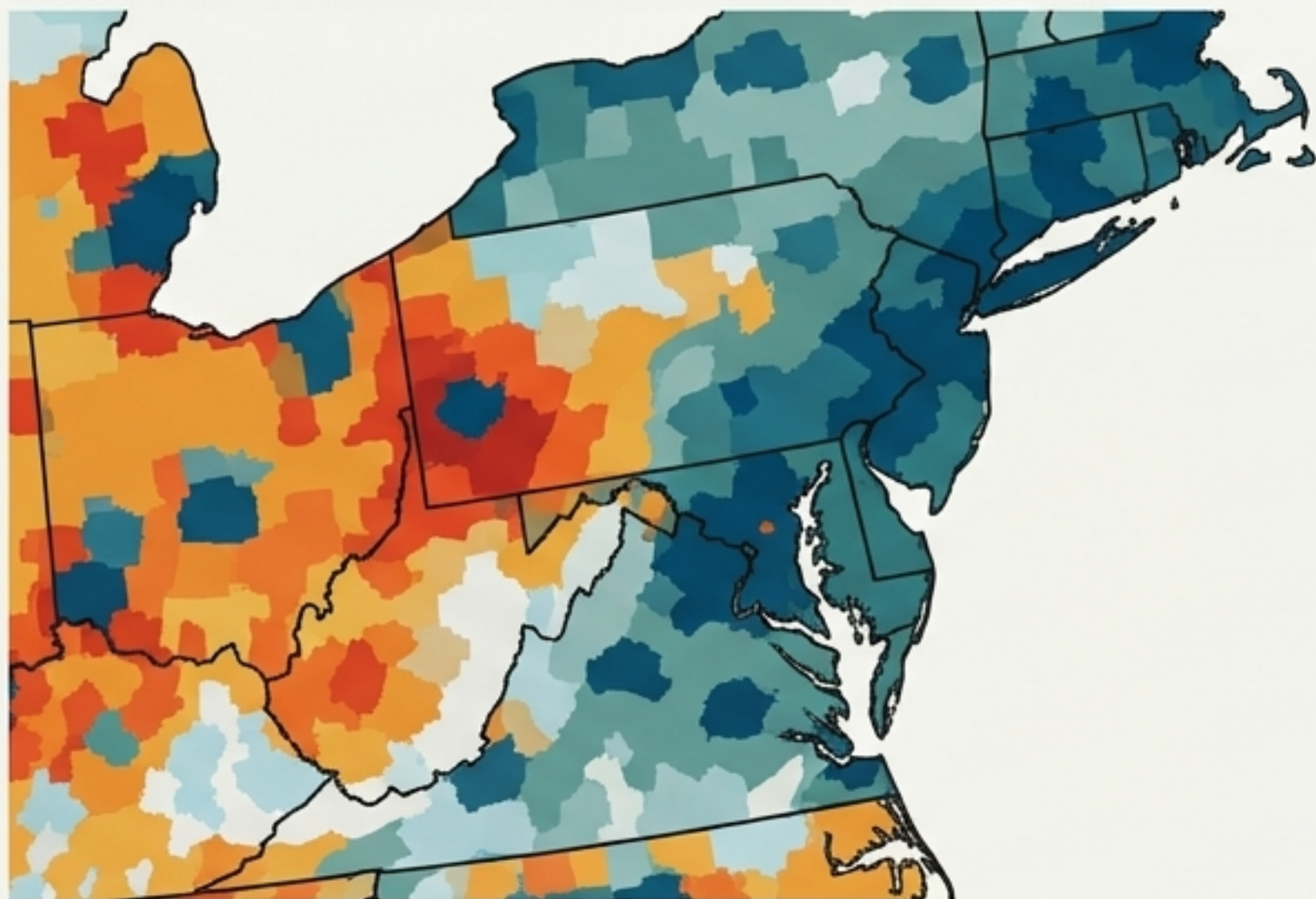
Obsežno spremljanje,
malo preseganj.

Obsežno spremljanje,
malo preseganj.

Omejeno spremljanje,
malo preseganj.

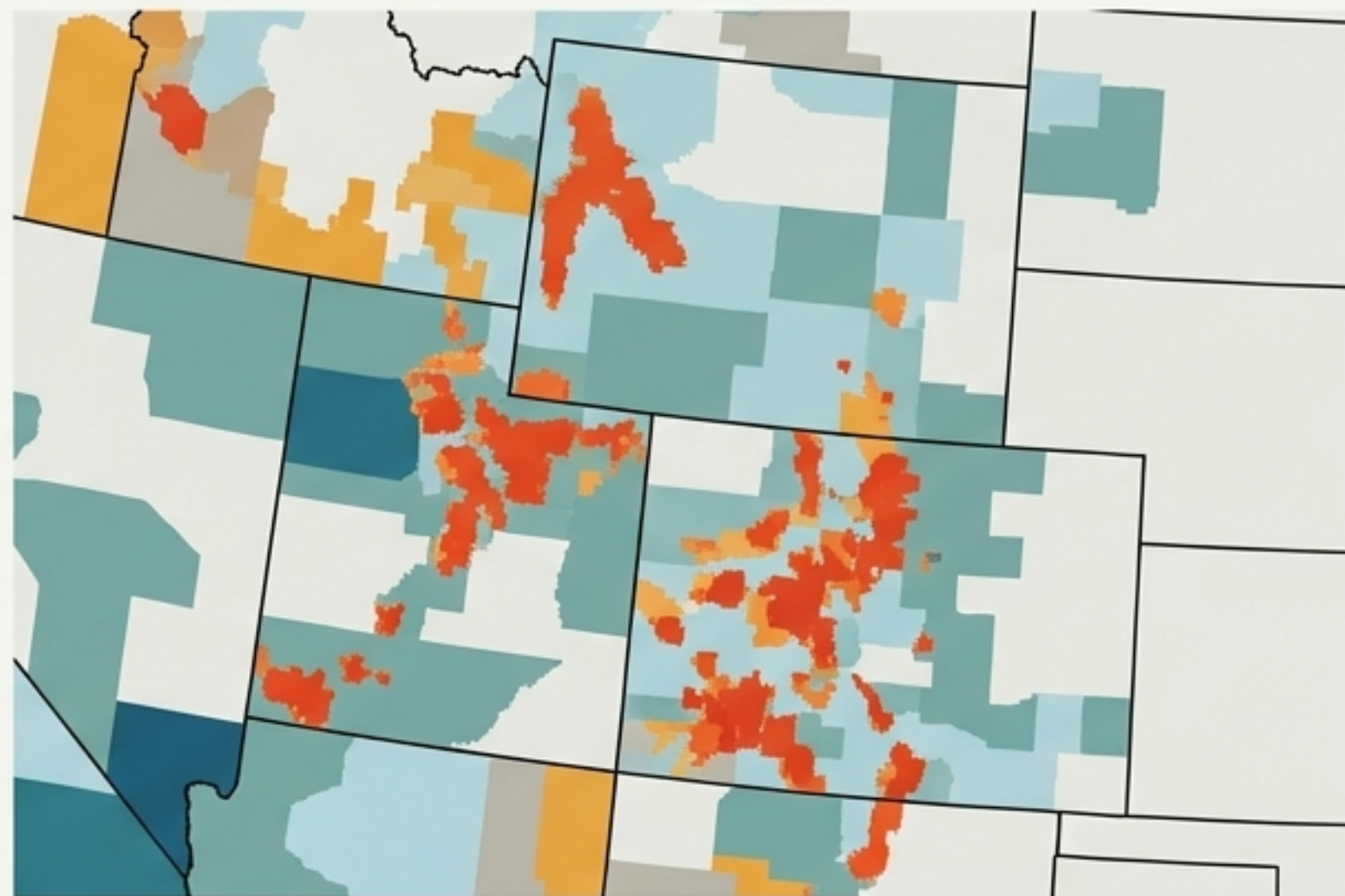
V urbanih in rudarskih območjih podatki potrjujejo pričakovanja: kjer iščemo, tam najdemo.

Panel 1: Točkovni viri (Mesta in industrija)



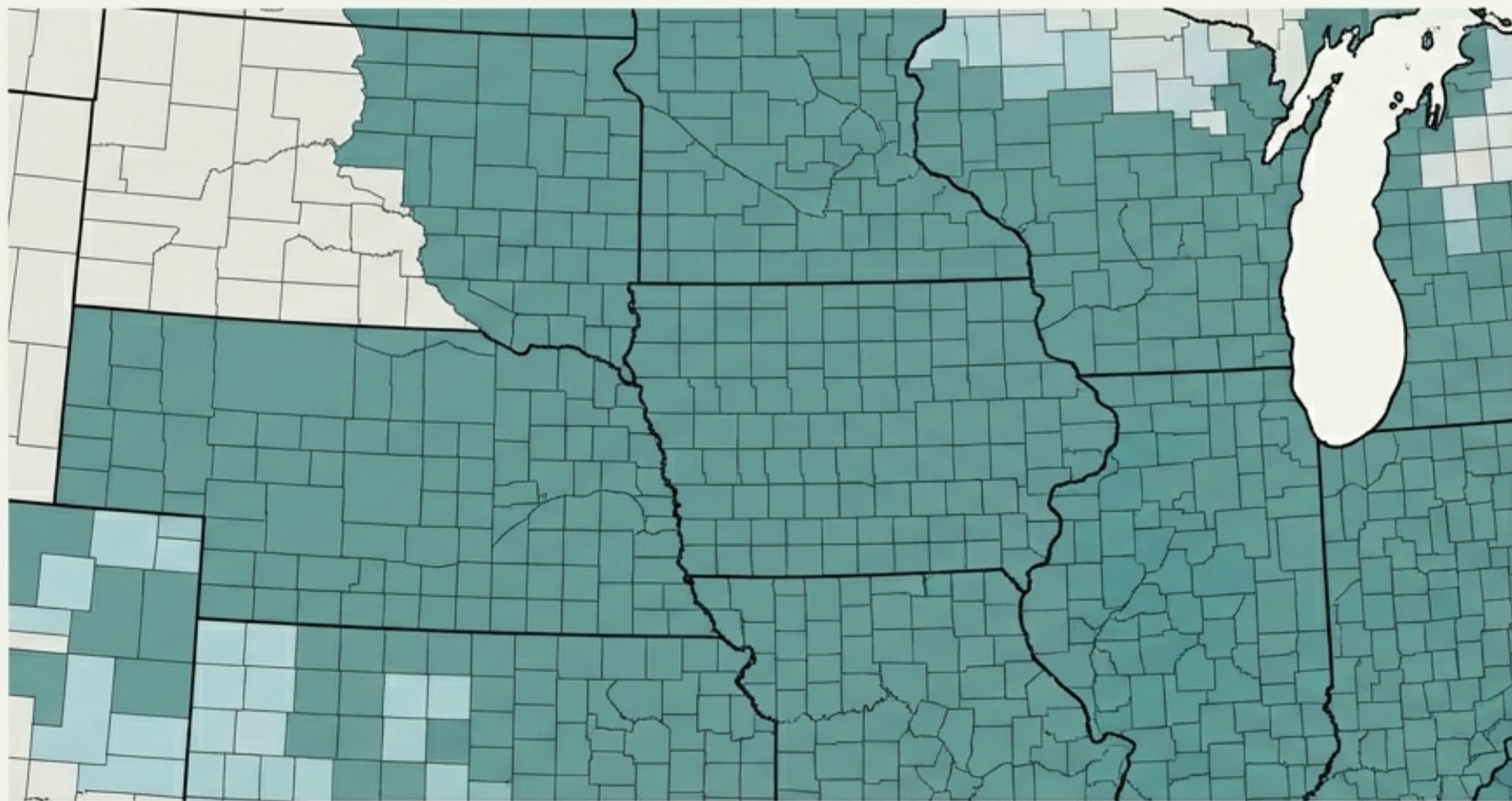
Ta območja imajo **najvišjo intenzivnost spremljanja** in so hkrati med tistimi z **najpogostejše zabeleženimi preseganji**. To je logično zaradi stalnega izpusta kompleksne mešanice kemikalij (npr. iz čistilnih naprav).

Panel 2: Rudarska območja



Kljub **sorazmerno omejenemu spremljanju** se tu odkrije **relativno veliko preseganj**. Onesnaženje je običajno povezano z omejenim številom anorganskih spojin (kovin).

Paradoks kmetijskih območij: Zakaj območja z visoko uporabo pesticidov kažejo presenetljivo nizko tveganje?



Pričakovanje

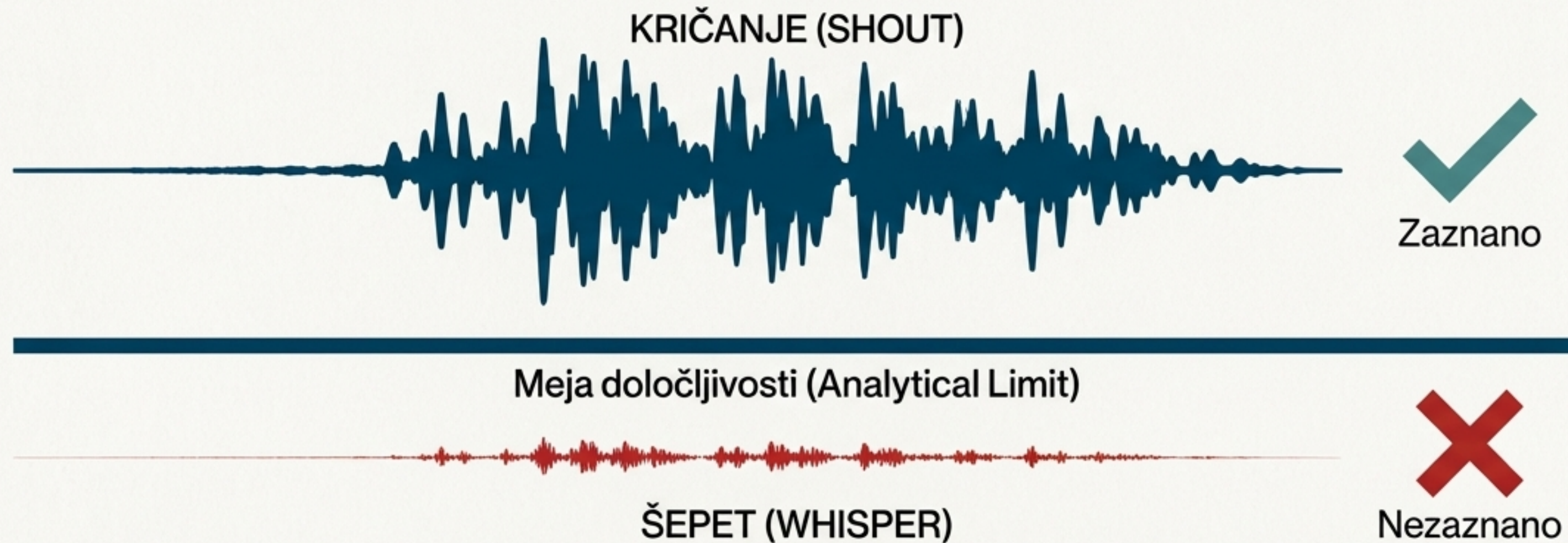
Kmetijska območja so izpostavljena široki uporabi pesticidov
široki uporabi pesticidov (>500 aktivnih snovi v ZDA), ki so po definiciji zasnovani tako, da so zelo strupeni. Zato bi pričakovali visoko število preseganj mejnih vrednosti.

Opazovanje

Podatki kažejo, da imajo ta območja **obsežen obseg kemičnega spremljanja**, vendar v povprečju le **malo zabeleženih preseganj**.

*Ali je **tveganje resnično nizko** ali pa ga **sistemično spregledamo**?
Ta neskladnost kaže na bolj sistematičen vzrok.*

Razkritje: Nevarnost se skriva v koncentracijah, ki jih naši testi ne morejo zaznati.

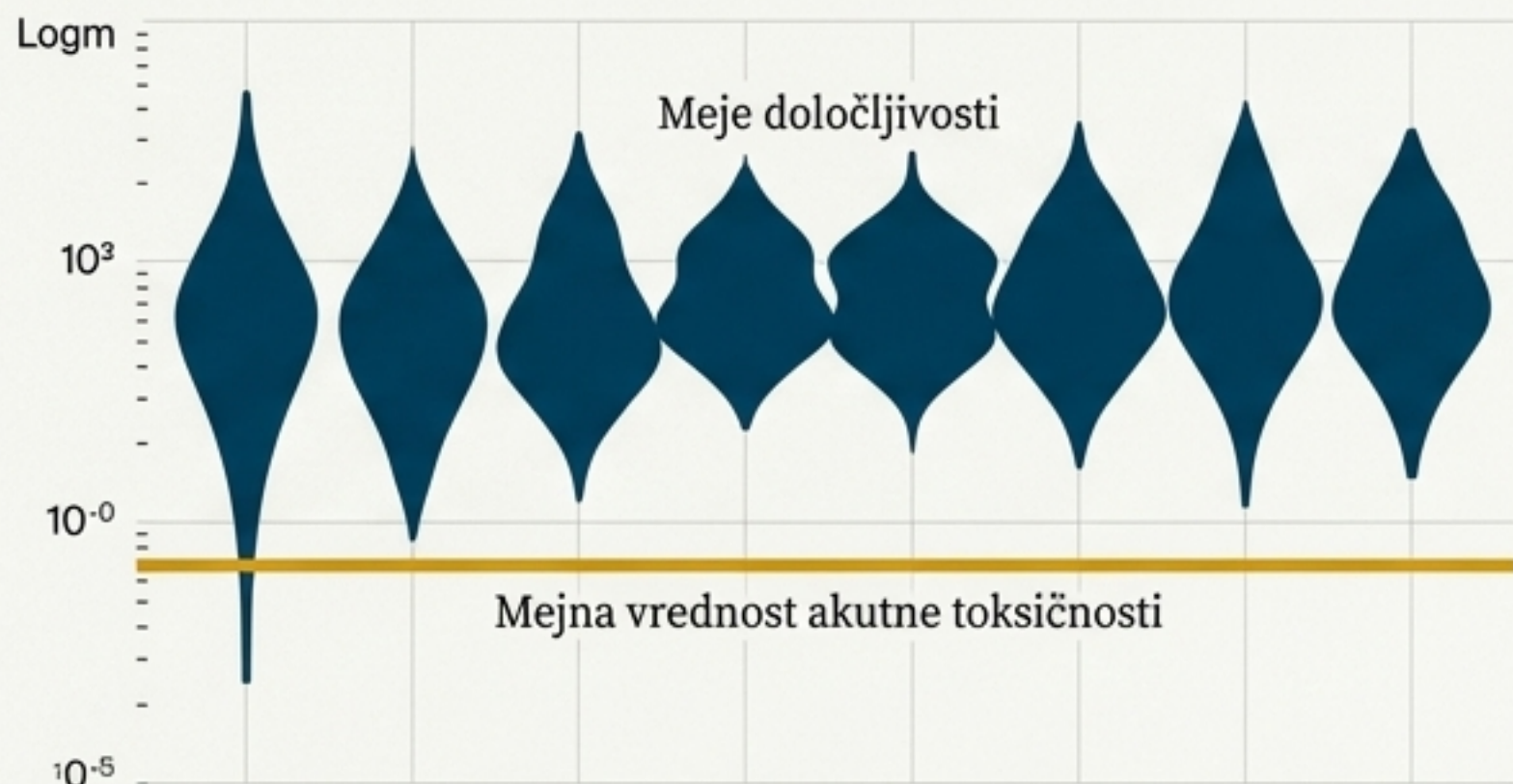


Za številne najnevarnejše kemikalije, zlasti sodobne pesticide, je koncentracija, ki škoduje organizmom (mejna vrednost toksičnosti), **nižja** od najnižje koncentracije, ki jo standardne laboratorijske metode lahko zanesljivo izmerijo (meja določljivosti).

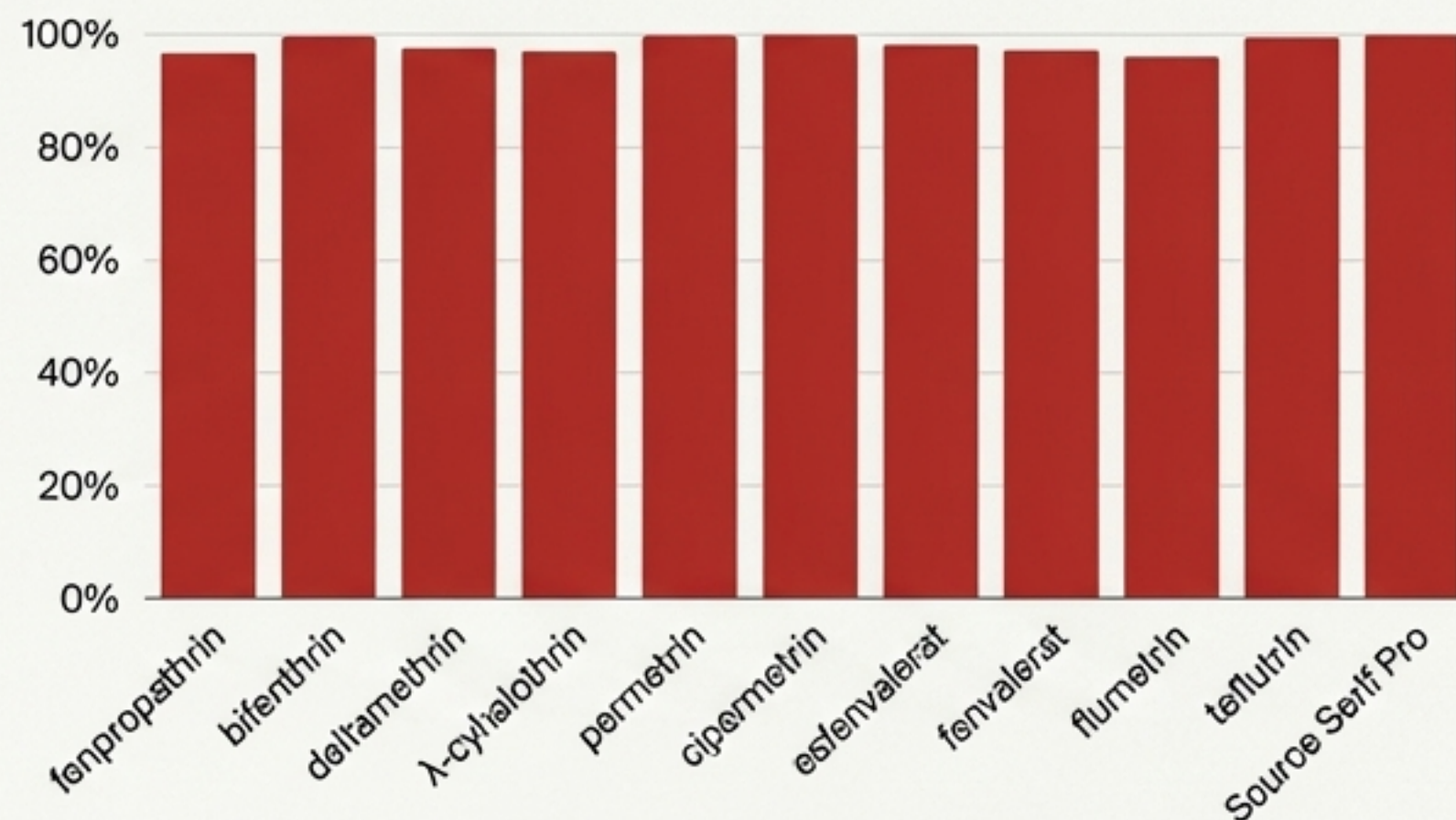
Implikacija: Tveganje ni nujno odsotno, ampak je pogosto **nevidno** za naše sisteme spremljanja.

Piretroidi: Študija primera o nevidnem tveganju

Porazdelitev mej določljivosti (npr. λ -cihalotrin)



Analitične meje nad toksičnostjo (%)



Ključna ugotovitev: Za večino piretroidov so praktično vse sporočene meje določljivosti višje od njihovih mejnih vrednosti toksičnosti. To pomeni, da številne okoljsko relevantne koncentracije ostanejo nezaznane in se jih poroča kot 'ni bilo mogoče določiti'.

Če je piretroid najden v vzorcu, je verjetnost, da njegova koncentracija presega mejno vrednost toksičnosti, zelo visoka.

Posledica nevidnosti: Ocenjuje se, da je 81 % celotne uporabljene toksičnosti piretroidov prikrite.

81 %

Ocenjeni delež 'celotne uporabljene toksičnosti' (Total Applied Toxicity - TAT) piretroidov za vodne nevretenčarje, ki je v okolju potencialno prikrit zaradi previsokih analitičnih mej določljivosti.

Piretroidi so postali najpomembnejša skupina insekticidov v kmetijstvu ZDA glede na toksičnost za vodne organizme. Njihova visoka učinkovitost pri nizkih koncentracijah je razlog, da se strm porast njihove uporabe (+198 % TAT za nevretenčarje) ne odraža v podatkih o preseganjih mejnih vrednosti v kmetijskih regijah.

Odgovor na paradoks: Tveganje v kmetijskih območjih ni nizko. Je ekotoksikološko učinkovito pri koncentracijah, ki jih s trenutnim standardnim spremljanjem komajda zaznamo.

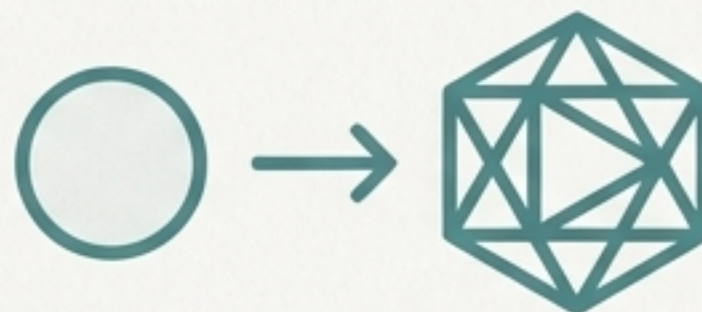
Sinteza ugotovitev: Tri temeljne pomanjkjivosti našega trenutnega pristopa.

1. Ogromna podatkovna vrzel (The Data Gap)



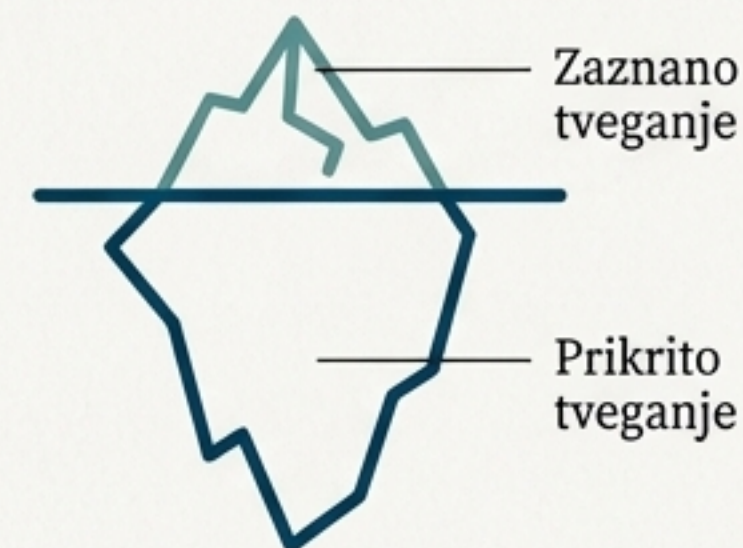
Za več kot 99 % potencialno nevarnih kemikalij nimamo hkrati podatkov o izpostavljenosti (spremljanje) in učinkih (toksičnost), kar onemogoča celovito oceno tveganja.

2. Spremenjena narava groženj (The Evolving Threat)



Spremljanje se ni prilagodilo prehodu z nekaj anorganskih onesnaževal na današnjo kompleksno mešanico tisočih organskih kemikalij.

3. Problem nevidnosti (The Invisibility Problem)



Analitične meje so za najnevarnejše sodobne kemikalije (npr. piretroide) previsoke, kar ustvarja lažen občutek varnosti in prikriva velik del dejanskega tveganja.

Pot naprej: Od slepega spremljanja k ciljno usmerjenemu predvidevanju.

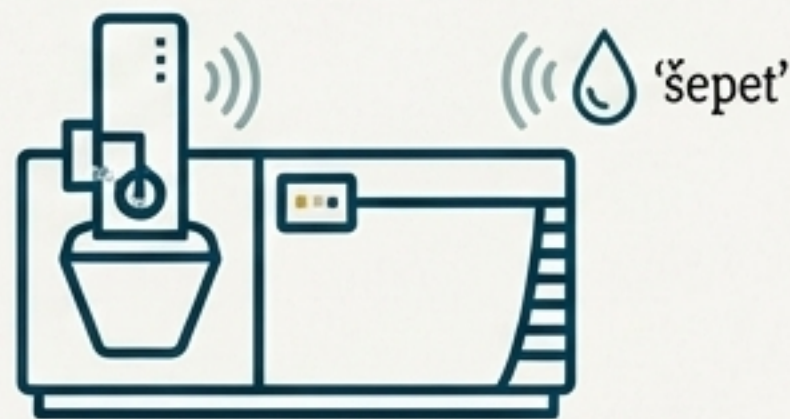
Nadaljevanje s širokim, ponavljajočim se spremljanjem manj relevantnih situacij ni več zadostno. Potrebujemo prehod k bolj inteligentnemu pristopu.

1. Ciljno usmerjeni programi spremljanja (Targeted Monitoring Programs)



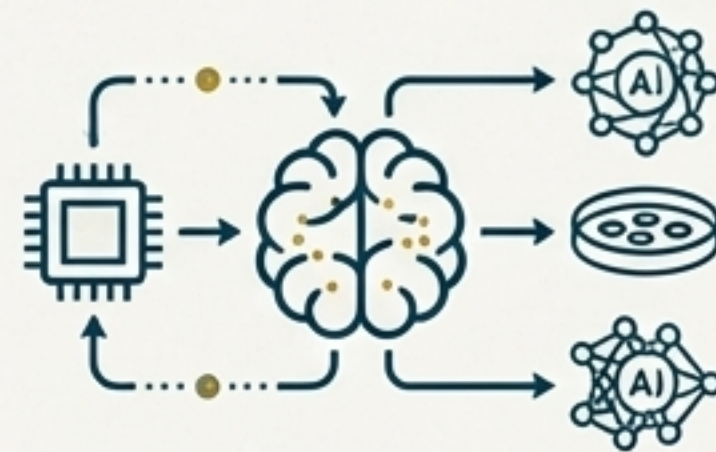
Namesto splošnega spremljanja se moramo osredotočiti na območja in snovi z najvišjim pričakovanim tveganjem, na podlagi parametrov, kot je 'celotna uporabljena toksičnost' (TAT).

2. Vlaganje v napredne analitične metode (Investment in Advanced Analytics)



Nujno je sprejetje in širša uporaba vrhunskih analitičnih metod, ki lahko zaznajo okoljsko relevantne koncentracije visoko toksičnih kemikalij ('šepet').

3. Vključevanje novih podatkovnih pristopov (Integration of New Data Approaches)



Uporaba modeliranja (*in silico*), bioesejev (*in vitro*) in umetne inteligence za boljše postavljanje prednostnih nalog in zapolnjevanje podatkovnih vrzeli, kjer spremljanje ni izvedljivo.

Jasen pogled je predpogoj za učinkovito ukrepanje na globalni ravni.

Izzivi, ugotovljeni v ZDA, veljajo tudi globalno, pogosto v regijah z manj obsežnimi programi spremljanja in pomanjkljivo dostopnostjo podatkov. Brez zanesljivih podatkov o izpostavljenosti ostajajo prizadevanja za zmanjšanje onesnaževanja neučinkovita.

Planetarne meje (Planetary Boundaries)

Kemično onesnaževanje je ena od ključnih groženj celovitosti biosfere. Natančna ocena je ključna za določitev, ali smo presegli varen operativni prostor.

Konvencija o biotski raznovrstnosti (Convention on Biological Diversity)

Doseganje cilja zmanjšanja onesnaževanja je odvisno od naše zmožnosti, da najprej pravilno izmerimo in razumemo problem.

Prihodnost makroekotoksikologije mora razviti orodja za preseganje problema manjkajočih podatkov, da bi lahko naslovili pereč globalni problem kemičnega onesnaženja.

Vir in dodatne informacije

Polna citacija

Bub, S., Petschick, L. L., Stehle, S., Wolfram, J., & Schulz, R. (2025). Limitations of chemical monitoring hinder aquatic risk evaluations on the macroscale. *Science*.

Povezava



science.org/doi/10.1126/science.adn5356

Zahvale

Podatki temeljijo na delu številnih znanstvenikov, ki so v zadnjih sedmih desetletjih zbirali in analizirali vzorce ter vnašali podatke v ameriški portal o kakovosti voda (US Water Quality Portal).