

# **ANTROPOGENI DELEŽ CO<sub>2</sub> V OZRAČJŮ (2. del)**

► Erik Margan



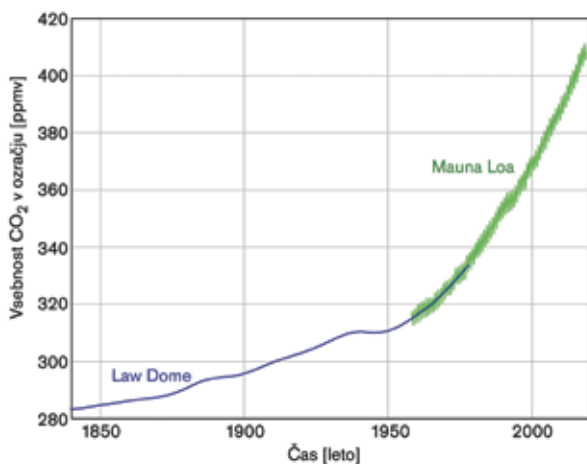
V prvem delu članka v septembrski številki revije ŽIT smo razložili, da ne obstaja medsebojna odvisnost med izmerjenimi količinami CO<sub>2</sub> v ozračju in izpustov CO<sub>2</sub>, ki so posledica človekovih dejavnosti, predvsem rabe fosilnih goriv. V nadaljevanju pa bomo namesto diferencialnih letnih količin primerjali kumulativne (integralne, dolgoročne) količine in na tej podlagi določili zgornjo mejo oziroma največji možni delež CO<sub>2</sub> v ozračju, ki je posledica človekovih dejavnosti.

ČEPRAV JE SEVEDA JASNO, DA DEL CO<sub>2</sub>, KI JE POSLEDICA ČLOVEŠKIH IZPUSTOV, brez dvoma ponikne v oceane in kopno, del pa ga ostane v ozračju, ostaja odprto vprašanje, s kakšno dinamiko se ti procesi odvijajo, kaj je pri njih prevladujoče in kaj so stranski učinki. Da bi to ugotovili, moramo najprej pogledati, kako se ti časovni poteki ujemajo v daljšem časovnem obdobju.

Žal pred letom 1958 ni bilo sistematičnega spremljanja vsebnosti CO<sub>2</sub> v ozračju, ampak le nekaj sporadičnih meritev s kemično metodo. Ker ti podatki niso dovolj zanesljivi, si moramo pomagati s približki, ki jih dobimo iz drugih naravnih virov: z analizo polarne-

ga ledu, sedimentov na dnu morja in jezer, stalaktitov v podzemnih jamah, sprememb v hitrosti rasti nekaterih dreves itn. Običajno v teh virih iščemo nekatere značilne izotope plinov iz ozračja, ki se ujamejo v druge snovi, ter nato na podlagi njihovih razmerij oziroma s primerjanjem z danes izmerjenimi koncentracijami ugotavljamo sestavo ozračja, temperaturo in druge lastnosti. Iz teh podatkov je mogoče rekonstruirati približno vsebnost CO<sub>2</sub> v ozračju tudi za tisočletja v preteklost, vendar je treba opozoriti, da gre za rekonstrukcije po različnih metodah, odvisno od vira, ter da različne metode ponujajo različne natančnosti za bližnje in časovno oddaljene dogodke. Poleg tega

je kombiniranje teh podatkov brez zanesljive medsebojne kalibracije vedno vprašljivo in je predmet sporov v znanstveni literaturi. Kljub temu pa takim rekonstrukcijam do neke mere zaupamo, zlasti kadar na podlagi več različnih metod dobimo med seboj primerljive rezultate.



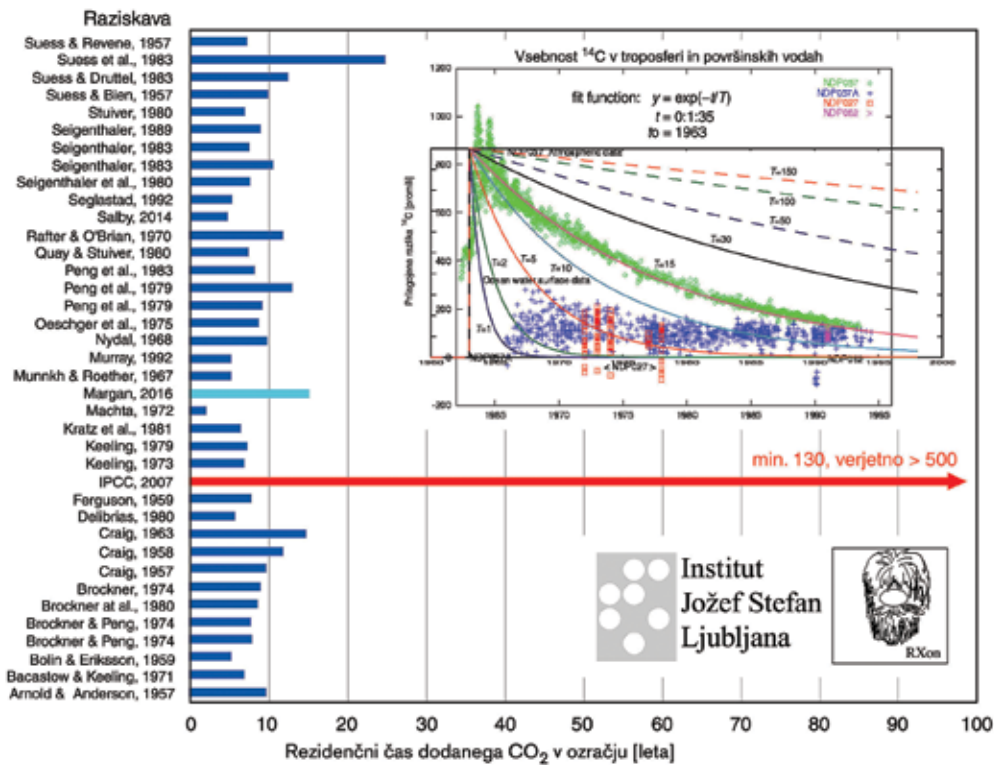
◉ Rekonstrukcija vsebnosti CO<sub>2</sub> v ozračju v letih 1840–2018; v obdobju med letoma 1958 in 1978 se neposredno izmerjene vrednosti na opazovalnici Mauna Loa na Havajih dobro ujemajo z izmerjenim deležem v zračnih mehurčkih, ujetih v polarnem ledu v vrtni Law Dome na Antarktiki. Zato pri IPCC meritve v ledu pred letom 1958 jemljejo kot razmeroma zanesljive (četudi nekateri strokovnjaki to spodbijajo in trdijo, da se ocenjena starost ujetega plina in starost ledu razlikujeta za okoli 85 let). Enako smo privzeli tudi v naši analizi, opisani v nadaljevanju.

S pomočjo teh kombiniranih podatkov zdaj lahko izvedemo primerjavo s kumulativnimi človeškimi izpusti CO<sub>2</sub> in ugotovimo, kolikšen je človeški prispevek k celotnemu naraščanju vsebnosti CO<sub>2</sub> v ozračju. A še prej moramo ugotoviti, kolikšen je v resnici rezidenčni čas izpustov v ozračju, ker je od razlike med viri in naravnimi ponori CO<sub>2</sub> odvisna tudi količina, ki se kopiči v ozračju. Rezidenčni čas je običajno določen kot čas, po katerem se količina, ki smo jo dodali ozračju,

zaradi naravnih ponorov prepolovi oziroma upade na 1/e (Eulerjevo naravno število,  $e = 2,71828\dots$ ). To je odvisno od tega, ali so avtorji modelirali skupni vpliv vseh ponorov z linearno ali eksponentno funkcijo. Literatura na tem področju je precej zajetna, opravljenih je bilo veliko raziskav in dobljeni rezultati so zelo različni. Razlike nastopajo predvsem zaradi različnih ocen deleža CO<sub>2</sub>, ki ga – tako zaradi fizikalnih kot bioloških procesov – vsrkajo tla in oceani. Dejavnikov, ki vplivajo na to, je veliko in vse raziskave niso bile narejene v enakih okoliščinah.

Rezultati se med seboj precej razlikujejo, od najmanj tri leta do največ 24, toda iz nekega čudnega razloga so se pri IPCC odločili, da naj bi bil rezidenčni čas najmanj 130 let, morda celo več kot 500 let. (Iz dokumentov IPCC je mogoče sklepati, da definicijo rezidenčnega časa razumejo tako, da je enakovredno, če molekulo, ki je posledica človekovih dejavnosti in jo ocean vsrka, nadomesti molekula, ki jo ocean izloči. Tak pogled pa fizikalno ni smiseln.) Rezultat, ki ga je dobil avtor tega prispevka, je 15 let (in je drugi največji po vrsti), temelji pa na zniževanju vsebnosti radioaktivnega izotopa <sup>14</sup>C po letu 1963, ko so uveljavili prepo-ved poskusov jedrskih eksplozij v ozračju. Avtorji, ki zagovarjajo nižje vrednosti, svoje rezultate utemeljujejo z dinamiko sezonskih nihanj vsebnosti CO<sub>2</sub>, vendar se njihove ocene med seboj močno razlikujejo.

Fizikalno gledano je Hansenova domneva nevzdržna. Naravni procesi ne morejo razlikovati med pravkar izpuščeno molekulo CO<sub>2</sub> ter tisto, ki je v ozračju že dalj časa in je lahko kakršnega koli izvora. Zato ni nobene možnosti, da bi narava vsrkala



⊗ Pregled rezultatov ocene rezidenčnega časa CO<sub>2</sub> v ozračju v različnih raziskavah (priimki avtorjev so razvrščeni po abecednem redu); kot je razvidno z grafa, so se pri IPCC odločili za zelo visoko vrednost rezidenčnega časa, in sicer najmanj 130 ali morda celo več kot 500 let. To izvira iz članka, ki ga je leta 1988 objavil James Hansen, kar je dopolnil še z domnevo, da naj bi narava vsako leto takoj vsrkala 56 % človeških izpustov, preostalih 44 % pa naj bi se jih v ozračju kopičilo več kot sto let. To je upravičeval z dobrim ujemanjem tega modela z izmerjenim prirastkom CO<sub>2</sub> v ozračju – in ta rezultat je še dandanes temelj vseh dokumentov IPCC.

55 % letnih človeških izpustov, za preostanek pa naj se naslednjih 130 let ali še dlje sploh ne bi zmenila. Kot je bilo omenjeno že v prvem delu tega članka na strani 23, narava reciklira okoli 210 GtC oziroma 770 Gt CO<sub>2</sub> na leto, pri čemer so človeški izpusti le manjši del te izmenjave, ki poteka povsem naključno.

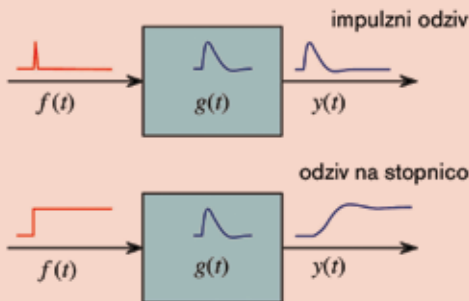
Kako lahko matematično modeliramo take procese? Matematiki so že pred več kot 250 leti odkrili rešitev tega problema (D'Alembert, 1754; za njim pa so metodo izpopolnili še številni drugi francoski matematiki, kot so Lacroix, Laplace, Fourier, Poi-

sson ...), ki jo odtlej s pridom uporabljamo v fiziki, kemiji, biologiji, računalniškem procesiranju signalov ali slik ter celo v ekonomiji in statistiki. Postopek učeno imenujemo konvolucijski integral ali krajše konvolucija (glej razlago na str. 32).

Ker so podatki za vsebnost CO<sub>2</sub> že v številski obliki, je za obdelavo podatkov smiselno uporabiti numerični program, kakršen je na primer Matlab (The MathWorks) ali GNU-Octave (ki je odprtokodna programska različica, podobna Matlabu). Ti programi že vsebujejo ukaz za konvolucijo (CONV), ki ji moramo samo

## Konvolucijski integral

Pogosto nas zanima, kako se bo nek sistem odzval na od zunaj vsiljeno spremembo. Predpostavimo, da imamo opravka z linearnim, stabilnim in kavzalnim sistemom (kavzalnost oziroma vzročnost pomeni, da velja načelo o časovnem sosledju vzroka in posledice). V primeru majhnih sprememb to lahko predpostavimo za večino sistemov. Odziv na poljubno obliko spremembe lahko izračunamo, če vemo, kako se sistem odzove na zelo kratek impulz. Impulzni odziv za preprostejše sisteme izračunamo iz znanih parametrov sistema, za zapletene pa ga lahko izmerimo. Potem je odziv na poljubno vsiljeno funkcijo enak konvolucijskemu integralu pro-



matematični izraz za konvolucijo

$$y(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) g(t-t) dt$$

### ❏ Matematični izraz in slikovni prikaz konvolucije

Če ima sistem impulzni odziv  $g(t)$  in ga vzbujamo z neko časovno funkcijo  $f(t)$ , bo odziv sistema na vzbujanje enak konvolucijskemu integralu produkta vzbujanja in impulznega odziva sistema. Analizo obnašanja sistemov pogosto opravimo s preprostimi vzbujevalnimi funkcijami, kot sta impulz ali stopnica. Potem ko poznamo odziv sistema, lahko izračunamo odziv za vzbujanje poljubne oblike. Pri izračunu moramo eno od funkcij obrniti v času ( $\tau - t$ ) ter jih nato časovno premikati od nekega začetnega časa  $t_1$  do končnega časa  $t_2$ . Običajno to lažje naredimo na impulznem odzivu sistema; pomembno je le, da se s potekom časa (pri  $t = t_1$ ) najprej srečata čeli obeh signalov.

dukta vsiljenega signala in sistemskega impulznega odziva.

V latinščini beseda *convolvere* pomeni prepogniti. Z izrazom ( $\tau - t$ ) 'prepognemo' časovni potek ene od funkcij (vseeno katere, običajno je to sistemski impulzni odziv) okoli časovnega izhodišča ( $t_1$ ). Časovno konstanto  $t$  izberemo dovolj veliko, da se impulzni odziv sistema popolnoma izteče in vsa morebitna nihanja izzvenijo. S prepogibanjem dosežemo, da se ob poteku časa najprej srečata čeli obeh funkcij. Z nadaljnjim potekom časa, denimo za en korak ( $dt$ ), se bosta funkciji za malenkost prekrivali. Zmnožek obeh funkcij v območju prekrivanja bo prvi vzorec izhodne funkcije, ki bo različen od nič. Nato funkciji premaknemo za naslednji korak  $dt$  in prekrivajoče se dele pri istem času zmnožimo. Ker pa imamo zdaj prekrivanje za dva časovna koraka, oba zmnožka seštejemo (integriranje pomeni seštevanje) in ta vsota bo drugi vzorec izhodne funkcije. Časovno premikanje nadaljujemo ter prekrite dele funkcij množimo in zmnožke seštevamo, dokler časovna spremenljivka  $t$  ne doseže končnega časa  $t_2$ .

Ob tem je treba paziti, da se začetne in končne vrednosti odziva in vsiljene funkcije ujemajo. Ali drugače povedano: želimo, da ima naš sistem ojačenje enako 1. To dosežemo tako, da vsak vzorec impulznega odziva sistema delimo z vsoto vseh njegovih vzorcev. Če pa ima obravnavani sistem morda neko večje ojačenje ali slabljenje, tako normirani impulzni odziv preprosto pomnožimo z ustreznim faktorjem, ki bo večji oziroma manjši od 1.

Dober opis konvolucije ter animacije preprostih primerov je mogoče najti tudi na spletu [7].

priskrbeti ustrezne časovne funkcije v obliki časovne preglednice.

Ampak kako naj dobimo impulzni odziv tako zapletenega sistema, kot je Zemlja? Na srečo (ali kar na nesrečo?) smo ta odziv že izmerili, ko smo ugotavljali posledice jedrskih eksplozij v ozračju po drugi svetovni vojni. Zaradi poskusov v ozračju se je ob močnem sevanju ustvarilo veliko radioaktivnih izotopov ogljika  $^{14}\text{C}$ . Ta izotop sicer nenehno nastaja v vrhnjih plasteh ozračja zaradi kozmičnega sevanja (ko termični nevtron trči z jedrom atoma dušika  $^{14}\text{N}$ ) in je njegova koncentracija v ozračju razmeroma enakomerna. Zaradi dolge razpolovne dobe 5740 let in dejstva, da radioaktivni razpad zelo natančno merimo, smo celo razvili metodo datiranja arheoloških vzorcev biološkega izvora do več milijonov let v preteklost. A kmalu po drugi svetovni vojni so arheologi začeli zaznavati močno zvišanje koncentracije  $^{14}\text{C}$ . Ta se je skoraj podvojila, kar je bil znak za alarm. Stekla so politična pogajanja in že leta 1963 so ZDA, Sovjetska zveza in Velika Britanija sklenile sporazum o prenehanju jedrskih poskusov v ozračju. Temu so se takoj pridružile še vse manjše jedrske sile, razen Francije in Kitajske, ti sta izvedli še nekaj poskusov, potem pa sta se več let pozneje pod pritiskom drugih jedrskih sil naposled še sami pridružili omenjenemu sporazumu.

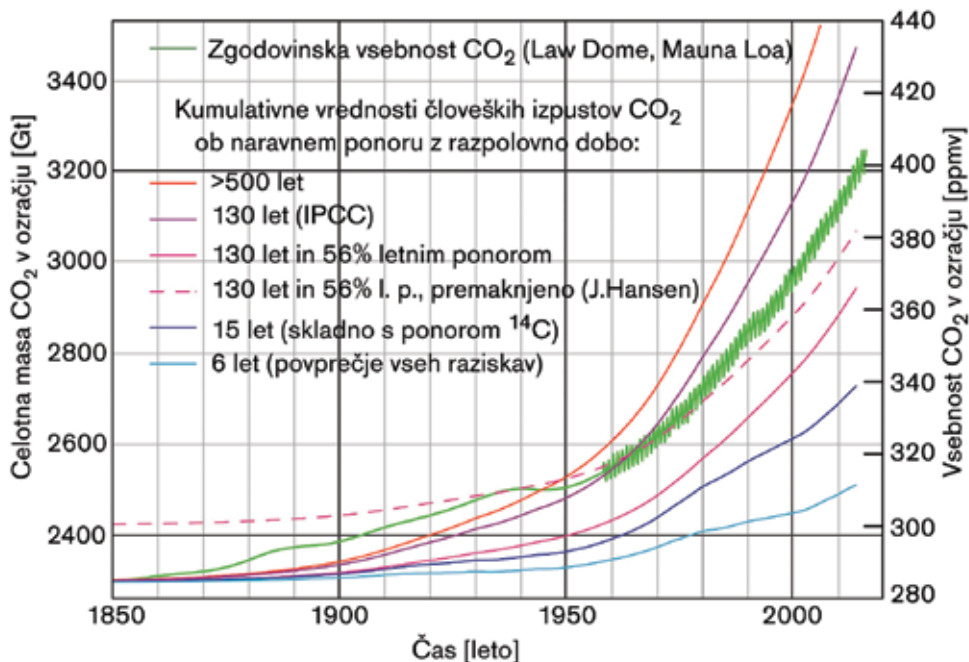
Rezultat številnih jedrskih poskusov v ozračju je, da smo v kratkem času podvojili koncentracijo  $^{14}\text{C}$ , ki je z običajnih 1000 poskočila na 2000 atomov  $^{14}\text{C}$  na milijon milijard ( $10^{15}$ ) navadnih atomov  $^{12}\text{C}$ . Toda po letu 1963 je koncentracija začela postopoma upadati in je do leta 2000 že dosegla naravno vred-

nost. Koncentracija  $^{14}\text{C}$  upada po preprosti eksponentni funkciji  $e(-t/T)$ . Če kot čas  $t$  vstavimo obdobje po letu 1963 in za  $T$  vsakokratne različne časovne vrednosti od 1 do 100, dobimo družino krivulj, ki nam pomaga oceniti, kako hitro je padala koncentracija  $^{14}\text{C}$ . Izkaže se, da se izmerjenim podatkom najbolje prilaga krivulja, izračunana pri  $T = 15$  let.

Potem ko sem leta 2016 prvič opravil podobne izračune, sem ugotovil, da je prof. Murry Salby enak postopek uporabil že leta 2014 (ali celo prej), vendar je ob upoštevanju dinamike sezonskih nihanj koncentracije  $\text{CO}_2$  dobil še krajši rezidenčni čas  $T$ , in sicer samo 4–6 let. Dejstvo je, da se vrednost šest let približno ujema s povprečjem vseh rezultatov iz literature.

Toda ostanimo pri preprostem in zanesljivo izmerjenem rezidenčnem času  $T = 15$  let. Rezultate izračunov bomo primerjali še za nekatere druge vrednosti  $T$ . Naša vhodna funkcija bo torej vsota vseh izpustov  $\text{CO}_2$ , za sistemski impulzni odziv pa bomo uporabili eksponentno padajočo funkcijo z vrednostjo  $T$  od 500, 130, 15 in 6 let. Konvolucijo vseh teh primerov bomo nato primerjali z izmerjenim časovnim potekom vsebnosti  $\text{CO}_2$  v ozračju za podaljšano časovno obdobje od leta 1850 do danes. Rezultate te primerjave vidimo na spodnji sliki.

Takoj lahko zavržemo rezultate, ki se nanašajo na dolge rezidenčne čase, ker bodisi močno presega jo izmerjeno celotno količino  $\text{CO}_2$  v ozračju bodisi se ne ujemajo z zgodovinskim časovnim potekom – razen morda v razmeroma kratkem obdobju med letoma 1960 in 1980. Pred letom 1950 je celotna količina  $\text{CO}_2$  naraščala hitreje od vseh človeških



⚠ Rezultat konvolucije človeških izpustov s sistemsko funkcijo za različne vrednosti rezidenčnega časa  $T$  v primerjavi z izmerjenim časovnim potekom vsebnosti  $\text{CO}_2$ ; navpični lestvici sta podani o v masi ( $\text{Gt CO}_2$ ) in tudi v volumski koncentraciji (ppmv). Vidimo, da pri vrednostih  $T = 500$  in  $130$  let rezultat presega celotno vrednost  $\text{CO}_2$  v ozračju že od leta 1960 ali 1965 naprej, kar pomeni, da ne more biti pravilen. Rezultat, ki ga dobimo za  $T = 130$  let in pri 56-odstotnem letnem ponoru – kot je predlagal J. Hansen –, narašča približno tako kot izmerjene vrednosti, vendar je po dejanskih vrednostih ustrezna le, če za izhodišče priznamo koncentracijo 301 ppmv (namesto 283), a tudi v tem primeru opazno odstopa že po letu 1980, zato tudi ta ne more biti pravilna. Rezultata za  $T = 15$  in  $T = 6$  let pa nakazujeta, da je kumulativni delež izpustov  $\text{CO}_2$  mnogo manjši od skupne spremembe vsebnosti  $\text{CO}_2$  v celotnem časovnem obdobju.

izpustov tudi ob neskončnem rezidenčnem času, zato je v tem obdobju potek prirastka mogoče pripisati izključno naravnim procesom. Po letu 1950 pa so rezultati za realistične vrednosti rezidenčnega časa zelo nizke (leta 2014 dosegajo samo 30 % celotnega prirastka v primeru  $T = 15$  let oziroma 12 % v primeru  $T = 6$  let).

Kako naj si razlagamo te rezultate? Tudi če ne bi poznali vseh tistih raziskav, ki so dobile čase, krajše od 15 let, bi domnevo o dolgem rezidenčnem času lahko mirne vesti odpisali kot fizikalno neutemeljeno. Naravni procesi morajo zajeti celo-

tno ozračje in četudi človeški izpusti nastajajo pretežno pri tleh (razen v letalstvu), je razpršitev  $\text{CO}_2$  v ozračju zelo hitra; že v enem ali dveh dneh se dodana količina porazdeli tako po okolici vira kot tudi po višinskem stolpcu ozračja skladno z zračnim pritiskom. Pri zgorevanju nastali  $\text{CO}_2$  se hkrati s toplim zrakom hitro dviguje in se potem hitro premeša (razen v primerih, ki so pogosti na primer nad Ljubljansko kotlino, ko se ob talni temperaturni inverziji dvigovanje toplega zraka ustavi že kakih 300 m nad tlemi, vendar na tej ravni ostajajo pretežno saje, ne pa  $\text{CO}_2$ ). Zaradi tako hitrega meša-

nja potem ni mogoče trditi, da se na površju ozemlja in oceanov najprej absorbirajo neposredni izpusti. Torej tudi razlago J. Hansena lahko zavrne kot arbitrarno privzeto in brez tehtne utemeljitve – razen da se je v nekem kratkem zgodovinskem obdobju naključno ujemala z izmerjenimi podatki, oziroma obratno, je bila tem podatkom prirejena.

Pri fizikalno utemeljeni razlagi pa dobimo zelo nizke rezultate: 60 ppmv (340–280) prirastka v primeru  $T = 15$  let pomeni samo okoli 30 % celotnega prirastka, ki dosega 190 ppmv (410–280). V primeru  $T = 6$  let je prirastek komaj 12 %, vendar moramo ta podatek vseeno vzeti z določenim zadržkom. Ali drugače povedano, v primerjavi s celotno letno, v naravi izmenjano količino  $\text{CO}_2$  (770 Gt) pomenijo celotni človeški izpusti (33 Gt) zgolj 4,3-odstotni delež. Zato že malenkostno neravnovesje med naravnimi viri in ponori lahko na daljši rok popolnoma preseže človeški vpliv. In če bi ob tem upoštevali še dinamiko sezonske izmenjave  $\text{CO}_2$ , kot je to storil prof. Murry Salby [8], bi bile številke še nižje. O nizkem deležu antropogenega  $\text{CO}_2$  lahko sklepamo tudi iz meritev [9].

#### ► SKLEP

Močno pretirano je kriviti človeške izpuste  $\text{CO}_2$  za povečanje vsebnosti  $\text{CO}_2$  v ozračju. Neki majhen vpliv seveda obstaja, vendar tudi, če privzamemo, da ima  $\text{CO}_2$  tak vpliv na temperaturo ozračja, kot zatrjujejo pri IPCC, lahko ugotovimo, da je človeški delež vpliva na podnebje praktično zanemarljiv.

To seveda ne pomeni, da lahko zanemarimo vse človeške izpuste

v okolje! Prizadevati si moramo za čim manjše onesnaževanje, vendar se je treba osredotočiti na resnično nevarne snovi, ne pa na  $\text{CO}_2$ . Znižanje izpustov  $\text{CO}_2$  namreč ne bo preprečilo nadaljnjih naravnih sprememb  $\text{CO}_2$  v ozračju in tudi ne bo prav nič vplivalo na njegovo temperaturo.  $\text{CO}_2$  ne moremo šteti med nevarne polutante, ker je nujen za fotosintezo in rast rastlin; kolikor več ga bo v ozračju, toliko več poljščin bomo lahko pridelali. Kritične ravni  $\text{CO}_2$  pa nam ne bo uspelo doseči, niti če bi naenkrat porabili vse znane zaloge nafte. Verjetno bi dosegli okoli 600 ppmv, kar pomeni, da današnje vsebnosti v ozračju ne bi niti podvojili. Zato se mora politika čim prej odpovedati pavšalnemu davku na  $\text{CO}_2$  in trgovanju s kvotami izpustov, ker ti ukrepi prav nič ne zmanjšujejo onesnaževanja, kvečjemu povzročajo njegovo selitev v manj razvite države. Stroški, ki pri tem nastajajo v vseh gospodarskih panogah, pa so v seštevku velikanski in zmanjšujejo našo gospodarsko konkurenčnost.

#### VIRI IN LITERATURA

- [7] Wikipedia, "Convolution": [en.wikipedia.org/wiki/Convolution](http://en.wikipedia.org/wiki/Convolution)
- [8] Posnetek predavanja prof. M. Salbyja v Hamburgu, oktobra 2018
- [www.youtube.com/watch?v=b1cGqL9y548](http://www.youtube.com/watch?v=b1cGqL9y548)
- [9] Simulating the integrated summertime  $\Delta 14\text{CO}_2$  signature from anthropogenic emissions over Western Europe. D. Bozhinova, M. K. van der Molen, I. R. van der Velde, M. C. Krol, S. van der Laan, H. A. J. Meijer, and W. Peters; Atmos. Chem. Phys., 14, 7273–7290, 2014

#### SPLETNI NASLOVI

- [www.atmos-chem-phys.net/14/7273/2014/](http://www.atmos-chem-phys.net/14/7273/2014/)