

KOMENTAR

**** **ODPRTA STRAN**

https://doi.org/10.1038/s44172-024-00172-w

Trajnost materiala, okvare materiala in naložbe v material - zapletenost betona

John L. Provis[](http://orcid.org/0000-0003-3372-8922)1✉

1Paul Scherrer Institut, Laboratorij za ravnanje z odpadki, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Švica.✉ email[john.provis@psi.ch](mailto:john.provis@psi.ch)

**Nedavne odmevne okvare betonskih materialov, vključno s propadom delov javnih stavb v Združenem kraljestvu, so poudarile potrebo po naložbah v podlaganje in zagotavljanje trajnosti betona. Beton je veliko bolj kompleksen material, kot se večina ljudi zaveda, kar je treba upoštevati pri načrtovanju raziskav in praktične uporabe te ključne sestavine našega grajenega okolja.**

**Trajnost in okvare materiala**

Benjamin Franklin je dejal: "...*na tem svetu ni nič gotovo, razen smrti in davkov*"[1](#_bookmark13)- in v smislu inženirstva materialov bi lahko pojem "smrt" razumeli kot material ali komponento, ki doseže konec svoje življenjske dobe in pade pod zahtevano raven ene ali več tehničnih lastnosti. Spoznanje, da se predmet lahko obrablja - in da se sčasoma obrablja bolj ali manj vsak predmet - je verjetno staro toliko kot človeška uporaba orodij. Termodinamiki se bodo pri razlagi tega procesa seveda sklicevali na pojme, kot je entropija, kar ima to prednost, da je pravilno, vendar precej manj poetično.

Kljub globoko zakoreninjenemu razumevanju, da nič ne traja večno, bomo v tej kratki razpravi uporabili nekaj nedavnih primerov odpovedi infrastrukturnih materialov, da bi poudarili potrebo po raziskavah, naložbah in družbeni razpravi za podporo varni in učinkoviti uporabi inženirskih materialov.

Trajnost gradbenih materialov v javnem sektorju je bila nedavno v Združenem kraljestvu deležna posebne pozornosti, saj so odkrili, da so betonski elementi iz armiranega avtoklaviranega porobetona (RAAC), ki so se v 50. do 90. letih prejšnjega stoletja pogosto uporabljali pri gradnji stavb, vključno s šolami, bolnišnicami, sodišči in drugimi javnimi objekti, pri uporabi katastrofalno odpovedali[2](#_bookmark0). Jasno je, da družba ne bo tolerirala zrušenja stropov šol ali bolnišnic, kjer so otroci ali pacienti izpostavljeni nevarnosti poškodb, zato so bile stavbe, ki vsebujejo RAAC, zaprte in namenjene popravilu, zamenjavi ali posodobitvi. Te zapore so bile v nekaterih šolah uvedene tik pred načrtovanim začetkom šolskega leta 2023-24 v Angliji in so tako pridobile pozornost medijev, ki je zelo redko namenjena vprašanjem o trajnosti betona.

V britanskih medijih je bilo izraženo določeno presenečenje, kako je to - očitno čez noč - postalo tako velik problem v številnih stavbah, ne da bi na to opozorili inženirji in/ali lastniki nepremičnin. Odgovor je skoraj neizogibno, da so inženirji, ki so pred leti (ali desetletji) opravili analizo materialov, opozorili[2](#_bookmark0), vendar so lastniki sredstev (javni organi s številnimi konkurenčnimi in zahtevnimi finančnimi prednostnimi nalogami) menili, da so naložbe, potrebne za ublažitev nevarnosti, ki jo predstavljajo materiali, ki še niso odpovedali, drage in ne dovolj nujne, da bi podprli naložbe[3](#_bookmark1),[4](#_bookmark2). To še zdaleč ni problem, značilen samo za Združeno kraljestvo; zrušenje Morandijevega mostu v Genovi v Italiji[5](#_bookmark3) in zrušenje kondominija Champlain Towers South v Surfside, Florida, ZDA[6](#_bookmark4) so druge znane in tragične nedavne nesreče, poleg tega je splošno znano, da civilna infrastruktura v drugih delih sveta nujno potrebuje podrobno oceno stanja in obsežna popravila[7](#_bookmark5). Na žalost se v večini držav vladne prednostne naložbe nagibajo k popravilu (ali celo vzdrževanju) infrastrukture le takoj po nesreči, tudi če je znano, da se življenjska doba materialov ali strukturnih elementov izteka - kot v primeru popisa RAAC v Združenem kraljestvu.

**Kompleksnost in interdisciplinarnost**

Ključni zaplet pri obravnavanju (tj. ocenjevanju, napovedovanju ali preskušanju) trajnosti armiranega betona je, da je preiskovani material verjetno eden od kemijsko in mikrostrukturno najbolj zapletenih nebioloških materialov v sodobni družbi. Znanstveniki in inženirji, ki se ukvarjajo s kompozitnimi materiali, običajno razpravljajo o dvokomponentnih kompozitih in se čudijo kompleksnosti tri- ali štirifaznih kompozitov. Običajni armirani beton pa bi lahko realno trdili, da je kompozit 14 ali več faz, katerih fizikalne in kemijske interakcije so pomembne pri določanju inženirskih lastnosti, vključno s trdnostjo in trajnostjo:

* blago jeklo;
* grobega agregata (gramoza);
* drobni agregat (pesek);
* štiri različne faze cementnega klinkerja (trikalcijev silikat, dikalcijev silikat, trikalcijev aluminat, tetrakalcijev aluminoferit), ob predpostavki, da so se hitro reagirajoče sulfatne faze v cementu že porabile;
* vsaj štiri različne družine cementnih hidratov, ki nastanejo pri reakciji cementa z vodo (hidrat kalcijevega silikata, kalcijev hidroksid, hidrati kalcijevega sulfoaluminata s strukturo ettringita in hidrokalumitni ali hidrogarnetni hidrati kalcijevega aluminata z več anionskimi substitucijami);
* skoraj vedno en ali več dodatnih cementnih materialov (npr. apnenec, plavžna žlindra, premogov pepel, žgana glina, kremenčeva moka), ki so lahko sami mineraloško ali kemično heterogeni
* porna tekočina (koncentrirana raztopina elektrolita s pH pogosto nad 12,5);
* ujetega ali zadržanega zraka.

V betonu so verjetno prisotne tudi površinsko aktivne organske molekule, ki se dodajajo za nadzor značilnosti pretoka med mešanjem in litjem, vključevanje (ali ne) zračnih mehurčkov/praznine, uporabljajo pa se tudi za izboljšanje mletja cementa, še preden je ta vgrajen v beton. Mikrostrukture betona so heterogene in kažejo pomembne značilnosti na vseh dolžinskih lestvicah od nanometrov do centimetrov. Kot področje znanosti o materialih in inženirstva je torej beton izjemno bogat z možnimi znanstvenimi podrobnostmi in zapletenostjo, vendar se v večini akademskih programov inženirstva materialov ne obravnava kot posebej očarljiv, prav tako pa ni vrsta materiala, ki bi spremenil pravila igre in na katerega se financerji raziskav običajno usmerjajo z velikimi strateškimi naložbami. Namesto tega gre za poceni material, za katerega raziskovalci in družba na splošno domnevajo, da lahko zanesljivo opravlja svoje delo, njegove zapletenosti in kompleksnosti pa se le redko . V zvezi s to temo je avtor tega dokumenta v preteklosti nosil naziv profesor znanosti in inženirstva cementnih materialov, kar je v pogovorih - tudi s kolegi inženirji - skoraj neizogibno sprožilo vprašanja, kot so: "Zakaj sploh potrebujemo profesorja za cement? Ali ne vemo o cementu že vse?"

To vodi do temeljne točke, ki je redko navedena, vendar je v ozadju številnih teh vprašanj: če najbolj zapletene inženirske materiale večinoma preučujejo in analizirajo raziskovalci, katerih specializacija ni znanost o materialih (npr. prevlada gradbenih inženirjev pri raziskavah betonskih materialov), ni vedno mogoče učinkovito prenesti ali uporabiti pomembnega razumevanja in znanja, specifičnega za to področje (npr. mikrostrukturne in kemijske analitične tehnike). Velja tudi obratno, kar je zgovorno opisal ugledni gradbeni inženir Adam Neville8 - znanstveniki s področja materialov svojega dela ne povezujejo vedno učinkovito z realnostjo gradbeništva v makro merilu, vključno s številnimi zahtevami, ki jih imata cement in beton pri uporabi. Interdisciplinarnost in sodelovanje med tistimi, ki so specializirani za pojave, ki se odvijajo na različnih dolžinskih lestvicah, sta pri tem ključnega pomena. Za resnično učinkovite interdisciplinarne raziskave pa je potrebno financiranje v zadostnem obsegu, usmerjeno v velike pobude, čemer je za proračunsko omejene financerje, ki pogosto delujejo v službi vladnih služb, ki iščejo zgodbe o dobrih novicah ali prelomne objave, zelo težko prepoznati, da je delo na področju trajnosti betona dovolj nujno ali kritično, da si zasluži takšno obliko podpore.

**Porušitev betona ali jekla?**

Večina praktičnih vprašanj, povezanih s trajnostjo ojačanega (ali prednapetega) betona, je povezana z dejstvom, da je mogoče vodno korozijo mehkega jekla zelo učinkovito odložiti - ne pa tudi dejansko preprečiti - tako, da ga obdamo z zelo alkalnim betonom[9](#_bookmark7). Termodinamsko gledano bi blago jeklo dejansko raje ne obstajalo; njegova najbolj stabilna trdna oblika pod bolj ali manj vsemi pogoji stika z vodo ali zrakom je oksidirana in nekovinska[10](#_bookmark8). Nepoškodovan beton lahko znatno upočasni oksidacijo (tj. korozijo/rjavenje) z zaščito in pasivacijo površine jekla, pri čemer na površini jekla nastane neprepustna oksidna plast, ki učinkovito preprečuje nadaljnje napredovanje oksidacije. Žal lahko degradacija betona zaradi vdora kloridov, karbonatizacije in/ali razpok povzroči razpad te plasti in začetek korozije - in ta proces je običajno težko ali drago diagnosticirati, ustaviti ali obrniti, zlasti če je jeklo vgrajeno v velik ali težko dostopen betonski element. To posledično pomeni tudi odgovor na vse pogosteje zastavljeno vprašanje: "Če so lahko Rimljani gradili tako trpežne betonske konstrukcije, zakaj ne naredimo tega, kar so naredili oni?". Med številnimi dejavniki, ki k temu prispevajo (vključno s pristranskostjo preživetja pri obravnavi rimskih konstrukcij, ki jih lahko opazujemo danes), je bistvena razlika med njihovimi materiali in sodobnimi armiranimi betoni dejstvo, da rimska betonska konstrukcija ni vključevala vgrajenega jekla. Sodobno inženirstvo in arhitektura se v veliki meri opirata na izjemne izboljšave upogibne in natezne trdnosti, ki jih omogoča zasnova armiranega betona kot sestavljenega materiala, in ni mogoče, da bi se vrnili k rimskim metodam, ki teh prednosti niso prinesle.

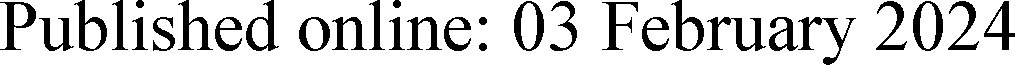
Dodaten dejavnik, ki otežuje to vprašanje, je, da je obstoječa raven razumevanja korozije jekla v betonu nepopolna, da prihaja do neskladja med laboratorijskimi in terenskimi podatki ter da so potrebna zelo velika vlaganja v raziskave, da se razvije globok vpogled, ki je potreben za popolno podporo sodobni inženirski praksi[11](#_bookmark9). Verjetnostni vidiki odpovedi, ki jo povzroča korozija, so bistveni - napovedovanje življenjske dobe armiranega betonskega elementa je dejansko mogoče izvesti z določeno natančnostjo, vsaj v verjetnostnem smislu, z določitvijo osnove zmogljivosti in določenega odstotka tveganja odpovedi[12](#_bookmark10) kot merila za opredelitev konca življenjske dobe in potrebe po posegu za oceno, popravilo, zamenjavo ali posodobitev. Ker pa so dovoljeni odstotki odpovedi zelo nizki za varnostno kritične inženirske elemente[11](#_bookmark9),[13](#_bookmark11) bo večina posegov uporabljena za elementi, ki so še vedno v varnem in funkcionalnem stanju - kar vodi v razpravo "zakaj zapravljamo denar za popravljanje stvari, ki jih ni treba popravljati?" in spodbuja potrebo po močno izboljšanih protokolih za neporušno preskušanje, da bi ocenili, kateri elementi dejansko potrebujejo inženirski poseg. V primeru britanskega sistema RAAC je bilo ugotavljanje, katere plošče potrebujejo poseg, oteženo zaradi omejitev pri uporabi standardnih tehnik ocenjevanja betona (npr. merjenje z jedri, prevlečnimi merilniki in radarskimi tehnikami) za penaste materiale in ob prisotnosti toplotnoizolacijskih plasti, ki so lahko podprte s kovinskimi folijami, ter na mestih, ki lahko vsebujejo azbest[4](#_bookmark2).

**Sklepne ugotovitve**

To je v marsičem samoumevno - a je treba to tudi redno ponavljati - da je treba za resnično rešitev problema najprej razumeti njegove vzroke. Na žalost nesistematičen pristop k naložbam v raziskave trajnosti betona in betonskih elementov (vključno s povezanimi znanji in infrastrukturo) v delih sveta pomeni, da še vedno ne obstajajo pomembni temeljni deli znanosti, ki bi podpirali inženirstvo, ki ga je nujno treba opraviti v korist človeške družbe. V mnogih pogledih so tukajšnje ugotovitve podobne ugotovitvam iz poročila Nacionalnega raziskovalnega sveta ZDA iz leta 1987 z naslovom "Concrete Durability: A Multibillion Dollar Opportunity"[14](#_bookmark12). Glede na to, da je od objave tega poročila minilo 35 let in da sta digitalna revolucija in pojav podnebnih sprememb v javnosti tako močno spremenila delovanje raziskav (in širše družbe), je presenetljivo videti, kako so ključna sporočila poročila še vedno tako aktualna. Očitno moramo oblikovati materiale, ki so odporni na podnebne spremembe - tako pri službi kot pri vplivu na okolje med proizvodnjo - in ta prizadevanja morajo pripeljati tudi do materialov, ki so dokazano trajni v obliki armiranobetonskega kompozita. Ključno sporočilo tega komentarja je, da materiali niso večni, zlasti kompozitni materiali z jeklom - in armirani beton je kompozit z jeklom - in da potrebujemo boljša orodja (fizična in intelektualna), ki nam bodo omogočila ustreznejše in učinkovitejše reševanje ključnih problemov trajnosti materialov pred tem, ko povzročijo škodo ljudem, in ne po tem, ko jo povzročijo.

Preventivno vzdrževanje konstrukcij in elementov, ki so dosegli konec svoje določene (ali načrtovane) življenjske dobe, je lahko drago in moteče, vendar če se ne izvaja, pride do katastrofičnih okvar. Zato je veliko dražje (pri čemer niti ne omenjamo ogromnih človeških stroškov nekaterih strukturnih okvar!) ignorirati znanost o materialih in inženirstvo, kot pa ju ustrezno financirati in posredovati, ko je posredovanje najprej potrebno.

Prejeto: 20. november 2023; sprejeto: 23. januar 2024;



Reference

1. Franklin, B*.* Pismo gospodu Leroyu iz Pariza "O francoskih zadevah" (13. november 1789). V: "Franko Franko" (Franko Franko): Franklin, W. T.) 265-266 (Henry Colburn, London 1817).
2. Currie, R. J. & Matthews, S. L. *Reinforced Autoclaved Aerated Concrete Planks Designed Before 1980* (BRE Report IP 10/96). (Bracknell, Združeno kraljestvo, 1996).
3. Reuben, A. & Cuffe, R. *RAAC: Kako dolgo že vemo za nevaren beton v šolah?* (*BBC Preveri,* september 2023).
4. Liddell, M., Read, R., Palmer, M., Robertson, D. in Goodier, C. *Plošče iz armiranega avtoklaviranega porobetona (RAAC):* [(https://hdl.handle.net/2134/24153246.v1)](https://hdl.handle.net/2134/24153246.v1):14. (London, 2022)
5. Calvi, G. M. et al. Once upon a time in Italy: the tale of the Morandi Bridge (Bilo je nekoč v Italiji: zgodba o Morandijevem mostu). *Struktura. Eng. Int.* 29, 198-217 (2019).
6. Simons, R., Xiao, Y., Evenchik, A. & Barreto, A. Champlain towers south collapse: frequency, governance and liability issues. *J. Sustain. Real Estate* 14, 57-74 (2022).
7. ASCE, *Poročilo o* ameriški *infrastrukturi* [(](https://infrastructurereportcard.org/)https://infrastructurereportcard.org/) (Reston, VA, ZDA, 2021).
8. Neville, A. M. *Neville on Concrete (2. izdaja*) (Booksurge, Charleston, SC, 2006).
9. Angst, U. M. Izzivi in priložnosti pri koroziji jekla v betonu. *Mater. Struct.* 2018. 51, 4 (2018).
10. Pourbaix, M. *Atlas elektrokemijskih ravnotežij v vodnih raztopinah, 2. izdaja*. 644. (Bruselj, CEBELCOR, 1974).
11. Angst, U. M. Napovedovanje časa do začetka korozije v armiranobetonskih konstrukcijah, izpostavljenih kloridom. *Cem. Concr. Res.* 115, 559-567 (2019).
12. Alexander, M. & Beushausen, H. Trajnost, napovedovanje življenjske dobe in modeliranje armiranobetonskih konstrukcij - pregled in kritika. *Cem. Concr. Res.* 122, 17-29 (2019).
13. Mednarodna organizacija za standardizacijo, ISO 2394. *Splošna načela zanesljivosti za konstrukcije*. (Mednarodna organizacija za standardizacijo, Ženeva, 2015).
14. Nacionalni raziskovalni svet. *Concrete Durability: a Multibillion-Dollar Opportunity (Trajnost betona: večmilijardna priložnost)*. 106 str. (The National Academies Press, Washington, DC, 1987).

Zahvala

To delo ni bilo financirano s strani nobene agencije ali sponzorja.

Konkurenčni interesi

Avtor ne navaja nobenih konkurenčnih interesov.

Dodatne informacije

Korespondenco in zahteve za gradivo naslovite na Johna L. Provisa.

Informacije o recenziji *Komunikacijska tehnika* se zahvaljuje anonimnim recenzentom njihov prispevek k recenziji tega dela. Glavni urednik: Rosamund Daw.

Informacije o ponatisih in dovoljenju so na voljo na spletni strani <http://www.nature.com/reprints>.

Opomba založnika Springer Nature ostaja nevtralen glede jurisdikcijskih zahtev v objavljenih zemljevidih in institucionalnih pripadnostih.

Odprti dostop Ta članek je licenciran pod mednarodno licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0, ki dovoljuje uporabo, deljenje, prilagajanje, razširjanje in razmnoževanje v katerem koli mediju ali formatu, če ustrezno navedete avtorja(-e) izvirnika in vir, zagotovite povezavo do licence Creative Commons in navedete, ali so bile opravljene spremembe. Slike ali drugo gradivo tretjih oseb v tem članku so vključene v licenco Creative Commons, razen če je v vrstici z navedbo zaslona pri gradivu navedeno drugače. Če gradivo ni vključeno v licenco Creative Commons članka in vaša nameravana uporaba ni dovoljena z zakonskimi predpisi ali presega dovoljeno uporabo, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic. Če si želite ogledati kopijo te licence, obiščite [http://creativecommons.org/ licenses/by/4.0/](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



© Avtor(i) 2024