

32. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH

IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije je v sodelovanju z IZS organiziral

32. slovenski kolokvij o betonih z naslovom Struktura betona in njen vpliv na mehanske lastnosti in obstojnost. Kolokvij je potekal 28. maja 2025 v dvorani Plečnik 1, Four Points by Sheraton Ljubljana Mons, s 111 udeleženci.

Na kolokviju so obravnavali posamezne parametre od nano do makro nivoja strukture betona kot kompozitnega materiala. Poudarek je bil na prikazu vpliva posameznega parametra kakor tudi celotne strukture na mehanske lastnosti in predvsem na obstojnost betona. Podrobnejši potek kolokvija je razviden iz programa (slika 1).

32. SLOVENSKI KOLOKVIJ O BETONIH 32 th SLOVENIAN COLLOQUIUM ON CONCRETE		PROGRAM PROGRAMME	irma inštitut za raziskavo materialov in aplikacije d.o.o.
STRUKTURA BETONA IN NJEN VPLIV NA MEHANSKE LASTNOSTI IN OBSTOJNOST / STRUCTURE OF CONCRETE AND ITS IMPACT ON MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY			
9:00	Pozdravni govor / Welcome speech: Mag. Črtomir Remec, Predsednik Inženirske zbornice Slovenije / President of the Slovenian Chamber of Engineers		
9:30	Dr. Tomaž Vuk, Dr. Andrej Ipavec, Alpacem Cement d.d., Slovenija Razvoj cementov in njihov vpliv na strukturo betona / Development of cements and their impact on the structure of concrete		
10:00	Wioletta Jackiewicz-Rek, Tomasz Benedysiuk, Prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Poland New, functional aspects of concrete surface engineering / Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin		
10:30	Prof. Dr. Luc Courard, University of Liege, Belgium, Prof. Dr. Benoit Bissonnette, Laval University, Canada Use of recycled sand and expansive agents for the production of more durable and sustainable mortars / Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt		
11:30	Odmor / Break time		
12:00	Tilen Turk, Prof. Dr. Violeta Bokan Bosiljkov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodetijo, Slovenija Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture izpostavljene zmrzovanju in solem / Impact of the type of carbonate aggregate on the durability of civil infrastructure concretes exposed to freezing and salts		
12:30	Prof. Dr. Ivana Banjad Pečur, Prof. Dr. Nina Štirmer, Dr. Jelena Šantek Bajto, Dr. Ivana Carević, Ivo Vićan, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska Sustainable development of concrete structures using waste ashes / Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela		
13:00	Doc. Dr. Marina Škondrič, Asist. Ognjen Govedarica, V. Prof. Dr. Branislava Lekić, V. Prof. Dr. Aleksandar Savić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Dr. Vera Obradović, viši naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Prof. Dr. Dragica Jevtić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija Pervious concrete paving flags – Durability challenges / Votle betonske plošče – izzivi trajnosti		
13:30	Prof. Dr. Naser Kabashi, Msc. E. Krasniqi, Prof. Asst. M. Muhaxheri, Msc. Y. Murati, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, Kosovo Influence of chemical admixtures on waterproofing and their effects on the durability of concrete / Vpliv kemičnih dodatkov na vodotesnost in njihov vpliv na obstojnost betona		
13:50	Dr. Jakob Šušteršič, Rok Ercegovič, Sandi Drolc, Teja Török Resnik, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije, Slovenija Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi / Impact of concrete and mortar structure on the correlation between long-term freeze/thaw cycling and mechanical properties		
14:10	Dr. Rok Cajzek, Dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE in Matija Zupančič, ArtRabel, Slovenija Preobrazba proizvodnje: Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja / Transforming production: the digital twin as the key to concrete batching plant management and the control point for the manager		
14:30	Delovno kosilo / Working lunch		

Slika 1. Program predavanj v okviru 32. slovenskega kolokvija o betonih.

Članki vseh predavanj so podani v Zborniku gradiv in referatov (CIP – Kataložni zapis o publikaciji, Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana, 666.972.1(082)).

Kolokvij se je začel s pozdravnim govorom predsednika IZS mag. Črtomirja Remca (slika 2). V svojem govoru je poudaril velik pomen permanentnega izobraževanja inženirskega kadra, ki je potrebno za vpeljavo novosti v vsakodnevno prakso na vseh nivojih gradbeništva. Zato so vsakoletni kolokviji o betonih primerno dopolnili programov izobraževanja IZS.



Slika 2. Pozdravni govor predsednika IZS mag. Črtomirja Remca.

Prvo predavanje z naslovom Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture izpostavljene zmrzovanju in solem je podala dekanja UL FGG prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov (slika 3), ki ga je pripravila skupaj s Tilnom Turkom. Povzetek njunega predavanja: Obstojnost pospešeno starih cementnih kompozitov z dolomitnim ali apnenčastim agregatom je bila sistematično preizkušena v primeru izpostavljenosti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Spremembo mase in elastičnega modula so merili po vsakem pe-



Slika 3. Prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, dekanja UL FGG, je podala prvo predavanje z naslovom Vpliv vrste karbonatnega agregata na obstojnost betonov javne infrastrukture, izpostavljene zmrzovanju in solem.

tem ciklu zmrzovanja in tajanja, tlačno in upogibno trdnost po vsakem desetem ciklu, spremembo skupne poroznosti pa po 30 ciklih. Rezultati preiskav so pokazali, da so v splošnem vzorci izgubljali maso zaradi luščenja površine, zmanjšali sta se njihova tlačna in upogibna trdnost, poroznost pa se je povečala. Je pa bilo poslabšanje lastnosti različno veliko. Ugotovili so, da stranski produkti alkalno-karbonatne reakcije (ACR) s kloridnimi ioni kemijsko ne reagirajo. Poleg tega se zdi, da je oblikovanje hidrotalcita med potekom ACR prednostna reakcija, pred karbonatizacijo faze AFm, in pozitivno vpliva na odpornost cementnih kompozitov z dolomitom, ki so izpostavljeni zmrzovanju in solem. Kemična analiza je pokazala nastanek mono-karboaluminatne faze v cementnih kompozitih z apnenčevim agregatom, kar bi lahko pojasnilo njihovo slabšo odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli v primerjavi z dolomitnimi kompoziti.

Drugo predavanje z naslovom Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin je podal prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Poljska (slika 4). Soavtorja sta Wioletta Jackiewicz-Rek in Tomasz Benedysiuk. Povzetek njihovega predavanja: Površinski inženiring je znanstveni in tehnološki pristop, povezan z načrtovanjem, izdelavo in uporabo površinskih plasti za izboljšanje lastnosti podlage, zlasti odpornosti proti koroziji in obrabi, pa tudi estetskih lastnosti. Uporablja se za številne konstrukcijske materiale, kot so kovinske zlitine, vključno z intermetali in nanomateriali. V tem članku je predstavljena uporaba površinskega inženiringa za ustvarjanje površinskih lastnosti betonskih površin, tj. arhitekturnih in fotokatalitskih betonov.



Slika 4. Prof. Andrzej Garbacz, Ph.D., D.Sc., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, je imel predavanje z naslovom Novi, funkcionalni vidiki inženirstva betonskih površin.

Tretje predavanje z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt sta pripravila prof. dr. Luc Courard, University of Liège, Belgija (slika 5), in prof. dr. Benoit Bissonnette, Laval University, Kanada (slika 6). Povzetek njunega predavanja: Razpoložljivost virov za gradbeno industrijo postaja vse bolj negotova, hkrati pa se povečuje količina gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov. Usklajevanje potreb in sekundarnih virov ter

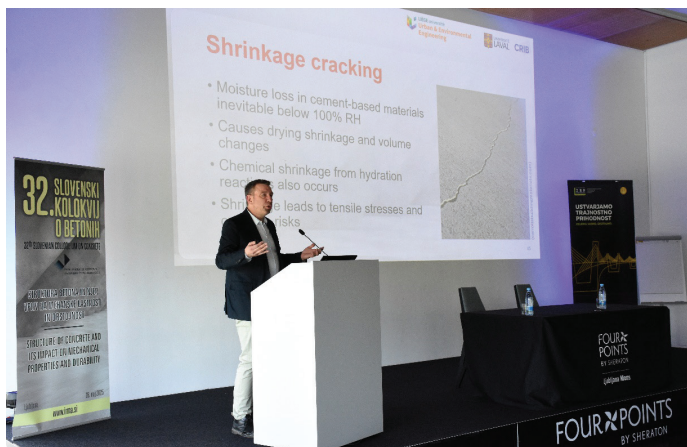
prispevanje k ponovni uporabi je koristen in spodbuden znanstveni izziv. Da bi omogočili resnično krožno gospodarstvo v gradbeništvu, je treba premagati pravne in regulativne ovire. Delo na lokalni ravni in razvoj ustrezne obdelave gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja dajeja prednost predelavi in plemenitjenju sekundarnih materialov za prefabrikate, 3D-tiskani beton ali materiale za sanacijo. Vse težje je zagotoviti razpoložljivost kakovostnega peska za proizvodnjo betona. Recikliran betonski pesek je lahko ob ustrezni proizvodnji resna alternativa za malte in betone nizke do srednje zahtevnosti. Analizirane so tehnične lastnosti recikliranih peskov in podani predlogi za povečanje obsega dodajanja v malte. Hkrati so predlagane minimalne zahteve za uporabo recikliranega peska v 3D-maltah. Osnovne lastnosti se primerjajo s klasičnimi materiali, analizira pa se tudi trajnost končnih izdelkov. Zdi se, da pospešeni proces karbonatizacije izboljša lastnosti recikliranih peskov (pred proizvodnjo betona in/ali po njej). Ekspanzijski dodatki lahko pomagajo tudi pri obvladovanju različnih vrst krčenja, ki se lahko pri mešanicah z recikliranimi peski še poveča. Širša in bolj

sistematična uporaba recikliranih materialov dolgoročno zahteva prilagojene predpise in specifikacije; to je pomembno za znatno zmanjšanje vpliva gradbeništvu na okolje.

Četrto predavanje z naslovom Trajnostne inovacije v portlandskem cementu: priložnosti in izzivi so pripravili dr. Tomaž Vuk, dr. Andrej Ipavec in Sašo Seljak, Alpacem Cement, d. d. Predaval je Sašo Seljak (slika 7). Povzetek predavanja: Globalna industrija betona in cementa doživlja preobrazbo v smeri trajnosti, ki jo spodbuja nujnost zmanjšanja emisij CO₂ in povečanje materialne učinkovitosti. Članek preučuje ključne napredke v tehnologiji portlandskega cementa s poudarkom na strategijah zmanjševanja klinkerja, energetske učinkovitosti mletju in prilagojenih kemijskih dodatkih. Tehnična SWOT-analiza ocenjuje izvedljivost inovativnih cementov, kot sta CEM II/C cement in LC³ (cement iz kalcinirane gline in apnenca). Članek se zaključi s konkretnimi priporočili za deležnike v industriji in vključuje študijo primera, ki prikazuje dejanski vpliv teh inovacij na odpornost proti kloridom.



Slika 5. Prof. dr. Luc Courard, University of Liège, je podal prvi del predavanja z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt.



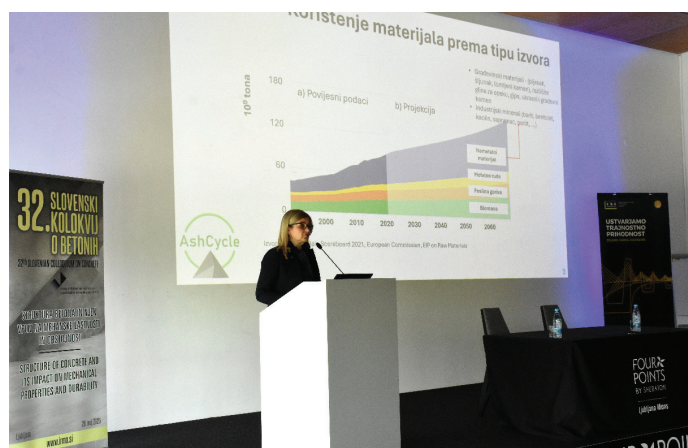
Slika 6. Drugi del predavanja z naslovom Uporaba recikliranega peska in ekspanzijskih dodatkov za izdelavo trajnejših in trajnostnih malt je podal prof. dr. Benoit Bissonnette, Laval University.



Slika 7. Sašo Seljak, Alpacem Cement, d. d., je imel predavanje z naslovom Trajnostne inovacije v portlandskem cementu: priložnosti in izzivi.

Prof. dr. Ivana Banjad Pečur, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska (slika 8), je podala peto predavanje z naslovom Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela. Soavtorji so bili prof. dr. Nina Štirmar, dr. Jelena Šantek Bajto, dr. Ivana Carević in Ivo Vićan. Povzetek njihovega predavanja: Kontinuirana rast gradbene industrije je tesno povezana s povečano porabo energije, emisijami toplogrednih plinov ter nastankom velikih količin gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov, kar vse prispeva k velikim okoljskim izzivom. Zaradi vse večje okoljske ogroženosti so nujno potrebni inovativni pristopi, ki uporabljajo reciklirane gradbene materiale ter surovine in sekundarne materiale, ki so učinkoviti z vidika virov. Kot odgovor na to se je v betonski industriji razmahnilo vključevanje nizkoogljičnih alternativ, kot je pepel iz sežiganja odpadkov. Ta študija se osredotoča na vključevanje pepela iz lesne biomase in blata iz čistilnih naprav kot delnega nadomestka za naravne agregate v betonskih mešanicah s ciljem zmanjšati odvisnost od kamnolomov in podpreti bolj trajnostne prakse pridobivanja agregatov. Z upoštevanjem načel krožnega gospodarstva je cilj te strategije ne le zmanjšati one-

snaževanje okolja in emisije toplogrednih plinov, temveč tudi čim bolj zmanjšati nastajanje odpadkov. Poleg tega uporaba alternativnih materialov spodbuja ohranjanje virov, podpira ohranjanje ekosistemov in spodbuja razvoj novih trgov. V tej raziskavi so bili opravljeni preskusi na svežem in strjenem betonu, proizvedenem v industrijskih pogojih, da bi ocenili učinke premalo izkoriščenega pepela iz sežiganja odpadkov kot delnega nadomestka za pesek. Rezultati dokazujejo potencial alternativnih materialov za izpolnjevanje mehanskih zahtev in zahtev glede trajnosti montažnih betonskih izdelkov, hkrati pa podpirajo ravnanje z industrijskimi stranskimi proizvodi in optimizirajo dolgoročno razpoložljivost materialov, kar so ključni dejavniki za povečanje trajnosti v betonskem sektorju.



Slika 8. Prof. dr. Ivana Banjad Pečur, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, je podala predavanje z naslovom *Trajnostni razvoj betonskih konstrukcij z uporabo odpadnega pepela*.

Šesto predavanje z naslovom *Votle betonske plošče – izzivi trajnosti* so pripravili kolegi iz Beograda: doc. dr. Marina Škondrić, asist. Ognjen Govedarica, v. prof. dr. Branislava Lekić, v. prof. dr. Aleksandar Savić, dr. Vera Obradović in prof. dr. Dragica Jevtić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija. Predavala je doc. dr. Marina Škondrić (slika 9), ki se je na začetku svojega predavanja spomnila na preminulega kolega prof. dr. Dimitrija Zakića, ki je bil zadnjih deset let redni in aktivni udeleženec kolokvijev. Povzetek njihovega predavanja: Prepustne prometne površine se pogosto obravnavajo kot ena od rešitev za urbana območja, saj lahko izboljšajo infiltracijo padavinske vode in zmanjšajo učinek mestnega toplotnega otoka. V okviru predstavljene raziskave so bile preiskane votle betonske plošče kot ena od vrst prepustnih prometnih površin in možnost njihove uporabe v hladnem podnebju. Tri vrste mešanic (ena referenčna mešanica in dve betonski mešanici, ki vsebujeta elektrofiltrski pepel kot delni nadomestek cementa) so bile preiskane glede odpornosti proti zmrzovanju s prisotnostjo soli za tajanje in brez nje. Vzorci so bili za vsak preskus razdeljeni v dve skupini, pri čemer je bilo v eni skupini dreniranje plošč dovoljeno, v drugi pa omejeno. Masa vzorcev in hitrost ultrazvočnih impulzov sta bili izmerjeni med cikli zamrzovanja in tavanja, upogibna in tlačna trdnost vzorcev pa sta bili izmerjeni po končanih preskusih. Rezultati so pokazali,

da imajo preskušene votle betonske plošče dobro zmrzlinško odpornost. Pri testiranju, ki je vključevalo nasičenje vzorcev s solno raztopino, so rezultati pokazali, da plošče ne prenesejo več kot sedem ciklov zamrzovanja in tavanja, če je drenaža omejena. Pri vzorcih, ki so se drenirali, se je upogibna trdnost v primerjavi z referenčnimi vzorci zmanjšala, vendar so bile vrednosti tlačne trdnosti podobne ali višje.



Slika 9. Predavanje z naslovom *Votle betonske plošče – izzivi trajnosti* je podala doc. dr. Marina Škondrić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.

Sedmo predavanje z naslovom *Vpliv kemičnih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na vodotesnost in trajnost betona* je podal prof. dr. Naser Kabashi, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, Kosovo (slika 10). Soavtorji predavanja so bili msc. Enes Krasniqi, prof. asst. Milot Muhaxheri in msc. Ylli Murati. Povzetek njihovega predavanja: V tej študiji je predstavljena celostna ocena vpliva kristaliničnih kemijskih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na mehanske lastnosti, trajnost in trajnostnost betona. Načrtovani sta bili dve eksperimentalni fazi. Prva faza se je osredotočila na povečanje trajnosti z uporabo kristaliničnih dodatkov za vodotesnost, pri čemer je bilo 36 vzorcev testiranih na tlačno trdnost, prepustnost in mikrostrukturo. Druga faza je vključevala 24 vzorcev betona v osmih različnih sestavah mešanic, ki so vsebovale spremenljivo vsebnost elektrofiltrskega pepela in zmanjšano količino cementa. Te mešanice so bile ocenjene glede trdnosti, prodora vode in vpliva na okolje z uporabo kazalnikov ocene življenjskega cikla (LCA), vključno s potencialom globalnega segrevanja (GWP) in kumulativnim povpraševanjem po energiji (CED). Rezultati prve faze so pokazali, da so kristalinični dodatki znatno izboljšali neprepustnost in mehansko trdnost. Mikroskopska analiza je potrdila gostejšo notranjo strukturo in učinek blokiranja por. V drugi fazi so mešanice z do 30-odstotno zamenjavo elektrofiltrskega pepela pokazale večjo trajnostnost ob omejenem zmanjšanju učinkovitosti. Predvsem MIX IV in MIX V sta zagotavljala najboljše razmerje med strukturno celovitostjo in okoljsko učinkovitostjo. MIX VIII je dosegel najnižji GWP in CED, vendar z manjšo tlačno trdnostjo. Ta dvojni pristop potrjuje, da je mogoče s kombinirano uporabo dodatkov za vodotesnost in optimiziranih dopolnilnih cementnih materialov doseči zmogljivostno usmerjeno in okoljsko ozaveščeno zasnovo betona.



Slika 10. Prof. dr. Naser Kabashi, University of Prishtina, Department of Civil Engineering, je podal predavanje z naslovom Vpliv kemičnih dodatkov in elektrofiltrskega pepela na vodotesnost in trajnost betona.

Osmo predavanje z naslovom Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi so pripravili dr. Jakob Šušteršič, Rok Ercegovič, Sandi Drolc, Teja Török Resnik, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije. Predaval je dr. Jakob Šušteršič (slika 11). Povzetek predavanja: V članku sta predstavljena dva sklopa preiskav. V prvem sklopu so podani in obravnavani rezultati preiskav betonov z dobro zgoščeno in homogeno strukturo, v drugem pa rezultati preiskav cementno-apnenih malt z olajšano in porozno strukturo zaradi dodanega ekspandiranega vermikulita. Betoni in malte so se preiskovali glede na tlačno trdnost in statični modul elastičnosti pri različnih starostih ter notranjo odpornost proti zmrzovanju/tajanju do 1000 ciklov. Vsi betoni in malte izkazujejo odpornost proti dolgotrajnemu cikličnemu zmrzovanju/tajanju. Pri tem pa dosegajo betoni visoke tlačne trdnosti in statične module elastičnosti, malte pa dosti manjše, odvisno od dodane količine ekspandiranega vermikulita.



Slika 11. Predavanje dr. Jakoba Šušteršiča, IRMA, z naslovom Vpliv strukture betona in malte na korelacijo med dolgotrajnim cikličnim zmrzovanjem/taljenjem in mehanskimi lastnostmi.

Deveto, zadnje predavanje na letošnjem kolokviyu z naslovom Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja je podala dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE, d. o. o. (slika 12). Soavtorji so bili Domen Šprajc in dr. Rok Cajzek, GIC GRADNJE, d. o. o., in Matija Zupančič, ArtRabel. Povzetek njihovega predavanja: Prispevek obravnava digitalni dvojček (DT) kot ključno orodje za upravljanje betonarn in kot osrednjo nadzorno točko za upravitelje. Digitalni dvojček omogoča celovit nadzor nad proizvodnimi, logističnimi, infrastrukturnimi in kadrovskimi procesi s pomočjo realno časovnih podatkov, analitike in 3D-modela objekta. Temelji na informacijskem modelu gradnje (BIM), ki povezuje geometrijske in procesne podatke z nadzornimi sistemi (SCADA, ERP, IoT), ter vključuje funkcionalnosti za spremljanje kakovosti, vzdrževanja, varnosti in skladnosti. Na primeru Betonarne Negenje 2.0 prispevek prikazuje, kako digitalni dvojček postane strateški upravljavski sistem – ne le za tehnično spremljanje proizvodnje, temveč tudi za podporo odločanju, optimizaciji virov in dolgoročno vodenje obrata. Predstavljena rešitev se umešča v širši kontekst Industrije 4.0 in potrjuje, da sta za uspešno uvedbo digitalnega dvojčka ključna podpora vodstva in dobro sodelovanje interdisciplinarnih strokovnjakov, gradbeno-digitalnega ekosistema.



Slika 12. Dr. Tjaša Zupančič Hartner, GIC GRADNJE, d. o. o., je podala predavanje z naslovom Digitalni dvojček kot ključ za upravljanje betonarn in nadzorna točka za upravitelja.

dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.