

Avtorica: Sabina Kramar

Vsebina

1. Uvod
2. Princip delovanja metode
3. Izvajanje meritev
4. Primeri USV-preiskav
5. Zaključek
6. Literatura in viri

1. Uvod

Uporaba ultrazvoka, natančneje hitrosti prehoda ultrazvočnega valovanja (USV, ang. ultrasound velocity), predstavlja eno izmed pomembnih metod na področju ohranjanja kulturne dediščine. Ultrazvočno preizkušanje je zelo uporabna in raznovrstna metoda v tako imenovanem NDT-merjenju (angl. non-destructive testing).

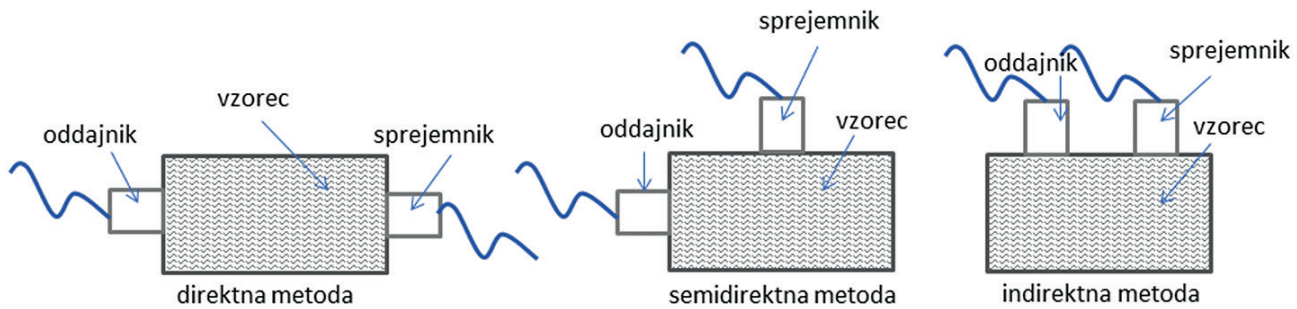
Z meritvami prehoda ultrazvočnega valovanja lahko ocenimo stanje oz. stopnjo propadanja določenega materiala in ugotavljamo učinkovitost nekega konservatorsko-restavratorskega postopka, npr. utrjevalca. Pri tem moramo objekt izmeriti pred konservatorsko-restavratorskim postopkom in po njem, da ugotovimo razlike med hitrostmi prej in potem. Meritve lahko izvajamo na laboratorijskih vzorcih ali *in situ*. Ultrazvočna metoda je občutljiva tako za površinske kot globinske efekte, ki jih lahko zazna globlje kot druge metode.

Najpogosteje s to metodo proučujemo stopnjo propadanja objektov in predmetov iz naravnega kamna, pa tudi učinkovitost različnih utrjevalcev na naravnem kamnu ali stenskih poslikavah (Myrin et al., 2008; Valdeón et al., 1992).

2. Princip delovanja metode

Ultrazvočna metoda temelji na potovanju ultrazvočnih valov skozi trdne materiale (Bray et al., 1992). Pri tem oddajnik odda signal, ki ob stiku z materialom potuje do sprejemnika. Valovanje je lahko polarizirano longitudinalno ali transverzalno. Meritve prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov nam lahko posredno nakazujejo strukturne lastnosti in s tem fizikalno-mehanske lastnosti določenega objekta oz. materiala, iz katerega je neki spomenik izdelan. Hitrost ultrazvočnega valovanja je odvisna od fizikalno-mehanskih lastnosti materiala, kot so homogenost, gostota, mineralna sestava, medzrnska stična površina, poroznost in vsebnost vlage (Bourgès, 2005). Znano je, da hitrost skozi material narašča z gostoto, tlačno trdnostjo in nasičenostjo z vodo ter pada z večanjem poroznosti (Bouineau, 1978), zmanjšanje hitrosti prehoda ultrazvočnih valov pa nakazuje prisotnost diskontinuitet ali drugih preprek za njihov prehod (Fassina et al., 1993; Papida et al., 2000).

Meritve prehoda ultrazvočnega valovanja lahko izvedemo na tri načine, s t. i. direktno, semidirektno in indirektno metodo (Akevren, 2010). Kot je prikazano na **sliki 1**, sta pri direktni metodi oddajnik in sprejemnik nameščena na nasprotnih straneh testiranega



Slika 1: Prikaz izvajanja USV-meritev pri direktni, semidirektni in indirektni metodi

vzorca, kjer se meri čas prehoda. Pri semidirektni metodi sta pretvornika nameščena pod kotom 90° , pri indirektni pa sta nameščena na isti površini merjenega objekta. Indirektno metodo uporabljamo predvsem pri meritvah *in situ*.

3. Izvajanje meritev

Za izvajanje meritev se uporabljajo prenosni inštrumenti, ki nam omogočajo ekonomsko ugodno testiranje *in situ*. Merilnik prehoda ultrazvočnega valovanja sestavljata dve sondi, in sicer oddajnik in sprejemnik (slika 2). Na ekranu se prikaže čas prehoda valovanja. Sondi imata lahko ravno površino, npr. premera 5 cm, ali pa sta točkovni. Pri izvajanju meritev je za natančen in točen rezultat pomembno, da med površino sprejemnika ali oddajnika in analizirano površino ustvarimo dober kontakt. Ponavadi za dober kontakt površini spojimo s tekočino ali posebnim gelom. To za predmete kulturne dediščine seveda ne pride v poštev, zato meritve izvajamo neposredno na površini materiala.

Izbira frekvence za izvajanje USV-meritve je odvisna od lastnosti preiskovanega materiala in minimalne lateralne dimenzije vzorca. Nekateri standardi (npr. ASTM in EN) predpisujejo, da mora biti najmanjša lateralna dimenzija vzorca zadostno večja od uporabljene valovne dolžine (npr. do



Slika 2: Merilnik prehoda ultrazvočnega valovanja

petkrat pri ASTM). Ta določba nam omogoča, da se izognemo t. i. efektu vodnega vala, ki vpliva na odčitke hitrosti.

Ultrazvočni merilniki izkoriščajo visokofrekvenčno valovanje, ki je običajno med 0,05 in 15 MHz. Valovna dolžina je tako reda nekaj milimetrov, kar zadostuje za zadostno ločljivost pri preiskavi materialov.

Meritve lahko izvajamo na površinah *in situ*, kjer naredimo testno polje z znanimi razdaljami. Pri vzorcih v laboratoriju oz. ateljeju lahko meritve izvajamo v vseh treh smereh, s čimer poleg hitrosti prehoda pridobimo še dodatne

informacije o materialu, kot sta anizotropnost in stopnja propadanja materiala.

Pri laboratorijskih vzorcih sta sprejemna in oddajna sonda pri vsaki meritvi nameščeni na dveh med seboj vzporednih stranicah vzorca. Na ta način izmerimo čas potovanja signala t_p (μs) od oddajne in sprejemne sonde. Iz znane razdalje L_p (mm) med obema ultrazvočnima sondama izračunamo hitrost potovanja vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p (km/s) skozi preizkušane v skladu z enačbo 1:

$$v_p = L_p / T_p \quad (\text{enačba 1})$$

Na podlagi hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov V_L v treh smereh se lahko v naslednjem izračunu določi (Gyudader in Denis, 1986; enačbi 2, 3):

a) celokupna anizotropnost telesa preizkušanca

$$\Delta M\% = 100 [1 - (2 V_{L1}/V_{L2} + V_{L3})]$$

(enačba 2)

b) relativna anizotropnost telesa preizkušanca, v razpoki, plastnatosti ali foliaciji

$$\Delta m\% = 100 [2 (V_{L2} - V_{L3})/V_{L2} + V_{L3}]$$

(enačba 3)

Pri tem je V_{L1} najmanjša in V_{L2} največja izmerjena hitrost.

Stopnja propadanja določenega materiala, npr. kamnine, se lahko oceni glede na zmanjšanje prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov (Zezza in Veinale, 1988) relativno glede na sveže (V_0) in preperelo (V_w) stanje vzorcev kamnine (enačba 4):

$$K = (V_0 - V_w)/V_0 \text{ ali}$$

$$\Delta V(L)\% = 100 (V_0 - V_w)/V_0$$

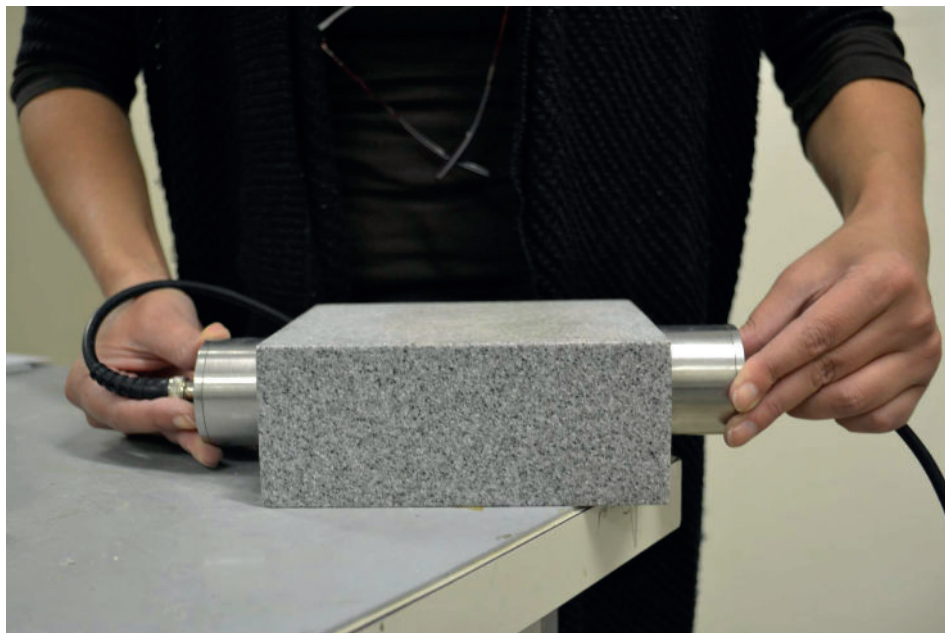
(enačba 4)

4. Primeri USV-preiskav

Laboratorijska testiranja

Pri laboratorijskih testiranjih izvajamo USV-meritve na vzorcih nekega materiala, ki mora imeti nasprotni ploskvi med seboj vzporedni. To je lahko kocka, prizma ali valj.

Z metodo lahko v prvi vrsti proučujemo razlike v lastnostih med posameznimi materiali. Tako lahko opazimo, da so vrednosti prehoda ultrazvočnega valovanja skozi neke kamnine v obratnem sorazmerju z vrednostmi poroznosti, vpijanem vode in koeficientom kapilarnega dviga ter premo sorazmerne z vrednostmi natezne trdnosti



Slika 3: Meritve prehoda ultrazvočnega valovanja na laboratorijskih vzorcih marmorja

Tabela 1: Primer prikaza rezultatov. Hitrosti vzdolžnega prehoda ultrazvočnega valovanja preiskovanega apnenca so podane pred izpostavljenostjo pospešenemu staranju in potem. Podane so povprečne vrednosti hitrosti v vseh treh smereh preizkušancev, celokupna anizotropnost ΔM (%), relativna anizotropnost Δm (%) ter stopnja propadanja ΔV_L (%).

Oznaka vzorcev		Kristalizacija soli		Zmrzovanje	
		prej	potem	prej	potem
apnenec	v1 (km/s)	5,23	4,73	5,21	4,95
	v2 (km/s)	5,16	4,98	5,04	4,99
	v3 (km/s)	5,04	4,69	4,99	4,74
	ΔM_p (%)	3,19	4,10	2,57	4,65
	Δm_p (%)	1,39	7,26	3,22	2,93
	$\Delta V(L)$ (%)		6,65		3,66

preiskovanih apnencev (Kramar et al., 2010). Kamnine z večjo poroznostjo imajo nižje vrednosti hitrosti prehoda ultrazvočnega valovanja, saj valovanje po bolj poroznem materialu potuje počasneje.

Ponavadi nas zanima stopnja propadanja določene kamnine ali drugega poroznega materiala ali to, kako je neki material odporen proti določeni vrsti propadanja. V tem primeru lahko materiale izpostavimo različnim pospešenim testom staranja, potem pa

ugotavljamo spremembe v stanju materiala. Pri tem moramo vzorce izmeriti pred postopki staranja in potem, nato pa vrednosti hitrosti prehoda primerjamo med seboj in vidimo, ali so se po testih pospešenega staranja zmanjšale ali povečale (slika 3).

Tako smo metodo uporabili npr. za ugotavljanje stopnje propadanja nekaterih izbranih slovenskih apnencev, ki so bili v preteklosti uporabljeni pri izdelavi pomembnih spomenikov (Kramar et al., 2010). Hitrosti prehoda ultrazvočnega

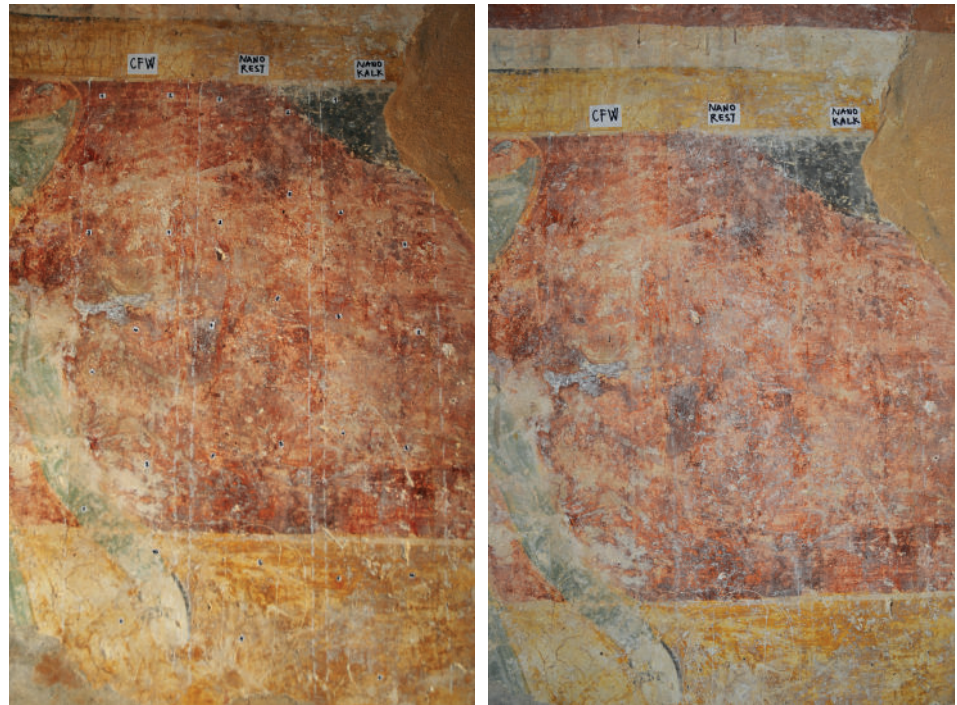
valovanja so bile izmerjene na svežih preizkušancih pred staranjem in po testu laboratorijske simulacije zmrzovanja in kristalizacije soli.

Hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov po kristalizaciji soli in zmrzovanju v primeru vseh apnencev se zmanjšajo (**tabela 1**), kar lahko pomeni povečanje dekohezije med zrnji. Celokupna anizotropnost (M) se poveča po laboratorijski simulaciji kristalizacije soli in zmrzovanja pri vseh preiskovanih apnencih. Načeloma se poveča tudi strukturna anizotropnost vzorcev po zmrzovanju in testu kristalizacije soli. Nekatere študije (Cultrone et al., 2008) prav tako navajajo povečanje hitrosti in povečanje anizotropnosti po testu kristalizacije soli. Stopnja propadanja V (%) preskušancev je za obe kamnini večja pri laboratorijski simulaciji kristalizacije soli v primerjavi z zmrzovanjem.

Najpogosteje nas zanima, kakšna je učinkovitost določenega konservatorko-restavratorskega postopka, predno ga uporabimo na določenem umetniškem predmetu. Metoda je primerna za ugotavljanje posledic postopkov čiščenja ali učinkovitosti utrjevanja materiala (Kikelj et al., 2011; Dragan, 2016). V tem primeru hitrosti prehoda ultrazvočnega valovanja merimo pred postopkom in po njem, npr. nanosom utrjevalca. Povečanje hitrosti prehoda pove, da je utrjevalec pripomogel k ponovni vzpostavitvi kohezije med zrnji materiala.

Preiskave in situ

Če želimo preveriti učinkovitost določenega konservatorsko-restavratorskega postopka *in situ*, moramo na želenem mestu narediti testno polje, kjer označimo razdalje med točkami (**sliki 4 in 5**), se pravi, da naredimo mrežo. To se ponavadi



Slika 4: Testno polje na stenski poslikavi pred nanosom utrjevalcev in potem



Slika 5: Testno polje z označenimi meritvenimi točkami na stenski poslikavi

izvaja na ravnih površinah, kot so stenske poslikave (Kikelj et al., 2011; Pondelak et al., 2015a, 15b), v nekaterih primerih pa se propadanje materiala ali učinkovitost utrjevanja preverja tudi na kipih.

Meritve izvajamo pred nanosom določenega utrjevalca in potem in opazujemo, ali se je hitrost povečala

ali ne (**slike 6–8**). Z metodo lahko spremljamo spremembe tudi v različnih časovnih intervalih, npr. po 1 mesecu, 3 mesecih ali pol leta, in vidimo, kdaj se je postopek utrjevanja zaključil oz. kakšna je kinetika delovanja utrjevalca (**slika 9**).

Načeloma se po nanosu povečajo



Slika 6: Izvajanje USV-meritev na stenski poslikavi



Slika 7: Izvajanje USV-meritev in situ pred nanosom utrjevalca na stenske poslikave



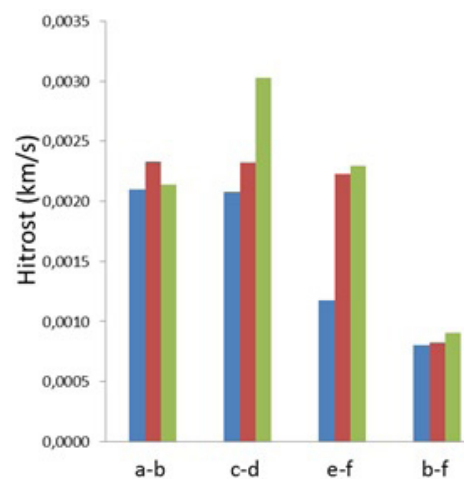
Slika 8: Izvajanje USV-meritev in situ

vrednosti površinske trdote in hitrosti prehoda ultrazvočnih valov, kar nam govori, da je utrjevalec učinkovit.

5. Zaključek

Meritve prehoda ultrazvočnega valovanja so nedestruktivna metoda, s katero lahko na

področju kulturne dediščine ocenjujemo stanje materialov, proučujemo stopnjo propadanja ali vpliv različnih dejavnikov na njihovo propadanje ter določamo učinkovitost določenega konservatorsko-restavratorskega postopka. Najpogosteje se metoda uporablja za proučevanje naravnega kamna in stenskih poslikav.



■ hitrost (km/s) pred utrjevanjem
 ■ hitrost (km/s) 1 mesec po utrjevanju
 ■ hitrost (km/s) 3 mesece po utrjevanju

Slika 9: Prikaz rezultatov USV-meritev (hitrost ultrazvočnega valovanja) pred utrjevanjem in potem v različnih časovnih intervalih

6. Literatura in viri

- 1 Akevren, S. *Non-destructive examination of stone masonry historic structures – quantitative IR thermography and ultrasonic testing*, 2010.
- 2 Bouineau, A. *L'interet des essais non-destructifs utilises pour l'etude de la restauration des monuments et sculptures. Alteration et protection des monuments en pierres*. Pariz : RILEM, 1978, str. 1–29.
- 3 Bourgès, A. *Holistic Correlation of Physical and Mechanical Properties of Selected Natural Stones for Assessing Durability and Weathering in the Natural Environment* : PhD dissertation. München, 2006, 201 str.
- 4 Bray, D. E. and D. McBride. *Nondestructive Testing Techniques*. Wiley. New York, 1992.
- 5 Cultrone, G., Russo, L. G., Calabró, C., Urošević, M., in Pezzino, A. *Influence of pore system characteristics on limestone vulnerability: a laboratory study*. *Environmental Geology*, 2008, vol. 54, str. 1271–1281.
- 6 Dragan, B. *Utrjevanje kamnitih kipov z metodo biomineralizacije*, diplomsko delo, 2016.
- 7 Fassina, V., Rosseti, M., Fumo, G., Zezza, F., in Macri, F. *The marble decay of Pilastris Acritani and problems of conservation*. V *Conservation of Stone and other Materials*, Proceedings of the International RILEM/UNESCO congress. Editor: M. J. Thiel. Paris, 1993, str. 75–82.
- 8 Guydader, J., in Denis, J.A. *Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers*. *Bulletin of the Engineering Geology*, 1986, vol. 33, str. 49–55.
- 9 Kikelj-Lesar, M., Kramar, S., Mladenovič, A., Mauko, A. *Izbira najprimernejšega utrjevalca pri obnovi Langusovih stenskih poslikav v cerkvi Marijinega oznanjenja v Ljubljani* = Selection of the most suitable consolidant in the restoration of Langus's wall paintings in the Church of the Annunciation in Ljubljana. *Varstvo spomenikov*, 2011, 46, str. 195–223.
- 10 Kramar, S., Mladenovič, A., Kozamernik, M., Mirtič, B. *Durability evaluation of some Slovenian building limestones* = Vrednotenje obstojnosti izbranih slovenskih apnencev kot naravnega kamna. *RMZ – Materials and geoenvironment*, 2010, 57, 3, str. 331–346.
- 11 Myrin, M., Malaga, K. *Evaluation of consolidation treatment of sandstone by use of ultrasound pulse velocity*. In: *International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, 11, 2008. Torun (Polônia). *Proceedings ... Torun: 2008*. v. 1, str. 441–448.
- 12 Papida, S., Murphy, W., May, E.. *The use of sound velocity determination for the non-destructive estimation of physical and microbial weathering of limestones and dolomites*. In: *International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, 9, 2000. Venice (Itália). *Proceedings ... Venice: Elsevier*, 2000. v. 1, str. 609–617.
- 13 Pondelak, A., Škrlep, L., Kramar, S., Kikelj-Lesar, M., Sever-Škapin, A. *In situ and laboratory testing of efficiency of newly developed commercially available consolidants* = In situ i laboratorijska ispitivanja učinkovitosti novo razvijenih i komercialno dostupnih učvršćivača. V: *Contemporary experiences in conservation of wall paintings* : book of abstracts = Suvremena iskustva u restauriranju zidnih slika : knjiga sažetaka, *International Scientific Professional Conference on the Conservation of Wall Paintings* = Međunarodni znanstvenostručni skup iz područja konzerviranja-restauriranja zidnih slika, *Draguč*, 8. – 10. srpnja 2015. Zagreb: Hrvatski restauratorski zavod, 2015, str. 36–37.
- 14 Pondelak, A., Kramar, S., Škrlep, L., Sever-Škapin, A. *Preiskave učinkovitosti utrjevanja stenskih poslikav in situ*. V: NEMEČEK, Nataša (ur.). *Konservator - restavrador : povzetki strokovnega srečanja 2015*. Ljubljana: Skupnost muzejev Slovenije: Društvo restavradorjev Slovenije, 2015, str. 94, ilustr.
- 15 Valdeón, L. et al. *Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stones*. In: *International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, 7, 1992. Lisbon (Portugal). *Proceedings ... Lisbon: Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 1992. v. 2, str. 697–704.
- 16 Zezza, U., in Vienale, F. *Ultrasonic investigations on quarry- and free-stones of historical monuments in Lombardy, Italy*. V: *Proceedings of the Vth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lausanne : Presses Polytechniques Romandes, 1988, vol. 2, str. 303–312.
- 17 SIST EN SIST EN 14579: *Preskušanje naravnega kamna - Ugotaavljanje hitrosti širjenja zvoka*.
- 18 ASTM E494 - 15 *Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials*.

Avtorji slik

Sabina Kramar: slike 1 in 8

Andreja Pondelak: slike 2, 3 in 9

Toni Šaina: 4, 5, 6, in 7