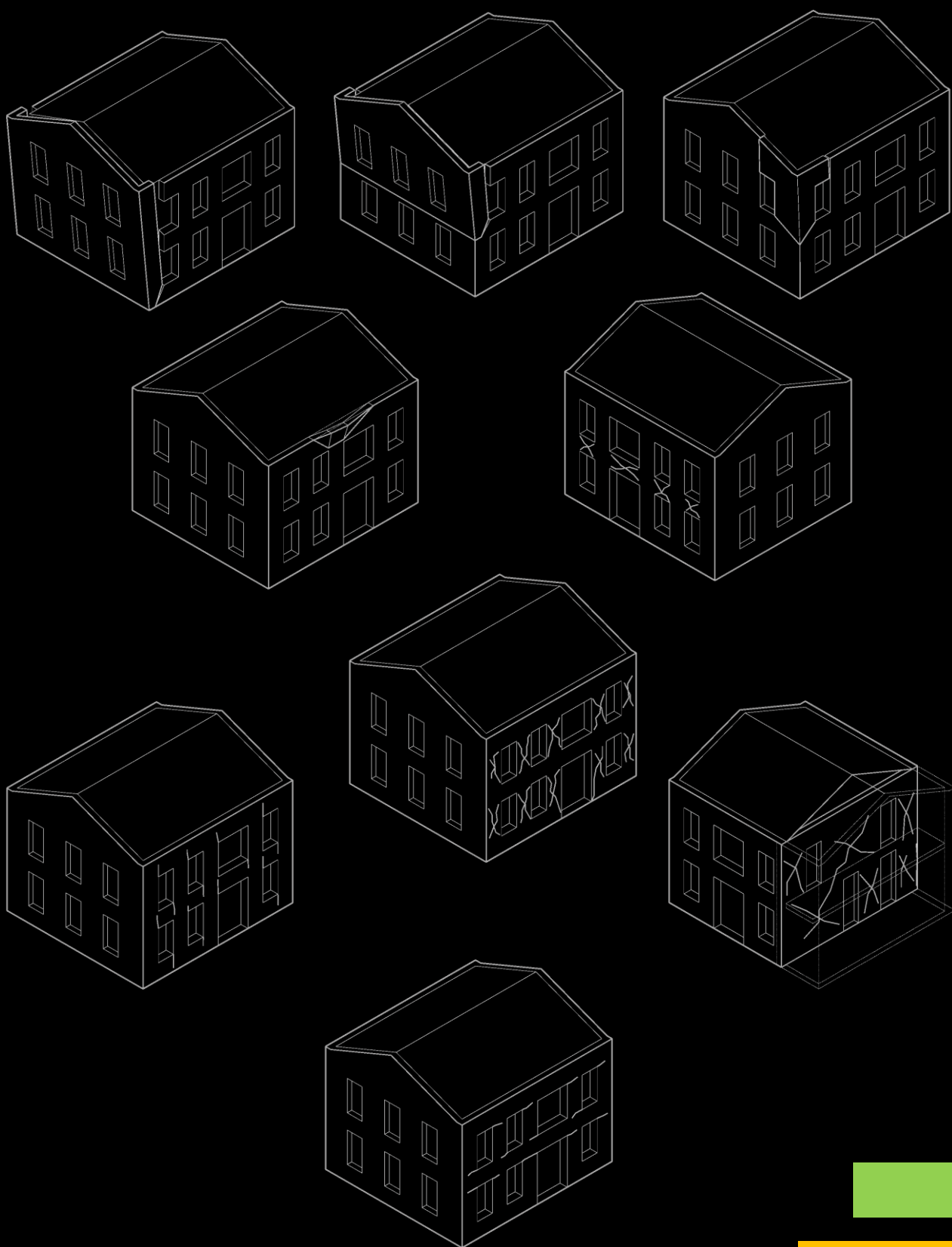




Dr.sc. Josip Galić, dipl.ing.građ.

Hrvoje Vukić, mag.ing.aedif.

Dr.sc. Davor Andrić, dipl.ing.arh.

Lucija Stepinac, mag.ing.aedif.

Tehnike popravka i pojačanja zidanih zgrada



**Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet
Zagreb, 2020. g.**

0	PREDGOVOR	3
1	OŠTEĆENJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA	4
1.1	OTKAZIVANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA	8
2	SANACIJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA	12
2.1	OPĆENITO	12
	Konvencionalne tehnike sanacija i pojačavanja	12
	Specijalne tehnike sanacija i pojačanja	14
2.2	LOKALNE INTERVENCIJE	16
2.2.1	Stropna ploča	16
2.2.1.1	Pojačanje stropnih dijafragmi sa šperpločom i daskama	16
2.2.1.2	Popravak oštećenih drvenih grednika	17
2.2.1.3	Ojačanje konstruktivnih detalja krovišta	18
2.2.1.4	Dodavanje vjetrokosnika za stabilnost krovišta	19
2.2.1.5	Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida	19
2.2.2	Lukovi i svodovi	24
2.2.3	Dimnjak	26
2.2.4	Vertikalni elementi	26
2.2.4.1	Zapunjavanje sljubnica	26
2.2.4.2	Sanacija pukotina – injektiranje i prezidavanje	28
2.2.4.3	Injektiranje šupljih zidova	31
2.2.4.4	Poprečno povezivanje zidova	32
2.2.4.5	Pojačanje zidanih stupova omotačem i ovijanjem	32
2.2.4.6	Zapunjavanje (zazidavanje) otvora u zidovima i pojačanje nadvoja	34
2.2.4.7	Pojačanje zidanih vertikalnih elemenata mrežama čeličnih traka	35
2.2.4.8	Trodimenzionalno ojačanje (omeđivanje) zidanih elemenata	35
2.3	GLOBALNE INTERVENCIJE	36
2.3.1.1	Pojačanje zidanih zidova dodavanjem armiranih cementnih slojeva	36
2.3.1.2	Pojačanje polipropilenskim mrežama	38
2.3.1.3	Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida (vidjeti 2.2.1.1 i 2.2.1.5)	39
2.3.1.4	Pojačanje građevina horizontalnim zategama	40
2.3.1.5	Pojačanje zidova pritezanjem (prednapinjanjem) i armiranjem	42
2.3.1.6	Pojačanje konstrukcije izvedbom AB serklaža	43
2.3.1.7	Pojačanje konstrukcije izvedbom novih AB i zidanih zidova	43
2.3.1.8	Pojačanje konstrukcije izvedbom AB i čeličnih okvira	44
2.3.1.9	Pojačanje konstrukcije izvedbom drvenih okvira	45
2.3.1.10	Pojačanje zidanih konstrukcija CLT-om	45
2.4	SPECIJALNE TEHNIKE	46
2.4.1	Dodatno amortiziranje	46
2.4.2	Izoliranje temelja	46
2.4.3	Pojačanje FRP-om	47
2.4.3.1	Pojačavanje drvenih konstrukcija FRP-om	48
2.4.3.2	Omatanje zgrada i povezivanje zidova	49

2.4.3.3	Povećanje nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu	51
2.4.3.4	Povećanje nosivosti lukova, svodova i kupola.....	52
2.4.3.5	Povećanje nosivosti zidova u ravnini.....	52
2.4.3.6	Ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti	54
2.4.3.7	Naknadno pritezanje (prednapinjanje) FRP-om.....	54
3	IZRADA PROJEKTA KONSTRUKCIJE POSTOJEĆE GRAĐEVINE	55
3.1	OPĆENITO	55
3.2	POVIJESNI PREGLED I PREGLED POSTOJEĆE DOKUMENTACIJE	55
3.3	SNIMAK GEOMETRIJE GRAĐEVINE	56
3.4	SNIMAK I IZMJERA GEOMETRIJE I SPOJEVA NOSIVE KONSTRUKCIJE	57
3.5	PREGLED I OBILJEŽAVANJE OŠTEĆENJA TE ANALIZA UZROKA OŠTEĆENJA	57
3.6	PROVEDBA ISPITIVANJA UKOLIKO JE MOGUĆE I POTREBNO	58
3.6.1	Geomehaničko ispitivanje tla	59
3.6.1.1	Istražne geotehničke bušotine.....	59
3.6.1.2	Geofizički istražni radovi.....	59
3.6.2	Struktura i sastav zida	59
3.6.3	Tlačna čvrstoća zidnih elemenata i sastav morta	60
3.6.4	Dodatna kontrola termokamerom	61
3.6.5	Karakteristike drvene konstrukcije	61
3.6.6	Karakteristike čelične konstrukcije	61
3.6.7	Karakteristike armiranobetonske konstrukcije	61
3.7	PRORAČUN – IZRADA 3D MODELA, ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA	61
3.8	IZBOR OPTIMALNIH POSTUPAKA SANACIJE I POJAČANJA	64
3.9	SUDJELOVANJE U IZVEDBI PROJEKTA – PROJEKTANTSKI NADZOR	64
3.10	PRAĆENJE USPJEŠNOSTI SANACIJE I POJAČANJA	65
4	SANACIJA I POJAČANJE AB KONSTRUKCIJA	66
4.1	POVEZIVANJE AB ZIDA S PUKOTINOM	66
4.2	PROMJENA STATIČKOG SUSTAVA KONSTRUKCIJE KOJI NEMA DOSTATNU NOSIVOST	66
4.3	POJAČANJE AB KONSTRUKCIJE POVEĆANJEM PRESJEKA	67
4.4	POJAČANJE AB KONSTRUKCIJE DODAVANJEM NOVIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA	72
4.5	POJAČAVANJE POPREČNIH PRESJEKA LIJEPLJENJEM LAMELA OD ČELIKA	73
4.6	POJAČAVANJE POPREČNIH PRESJEKA LIJEPLJENJEM LAMELA OD FRP-A	75
5	LITERATURA:	77

0 PREDGOVOR

U prethodnom priručniku smo prikazali oštećenja na nosivoj konstrukciji jedne uobičajene stambene zgrade u centru Zagreba, s ciljem da se shvati kako pukotine i oštećenja nisu samo kozmetičke prirode na žbuci ili podgledu već da su pokazatelj oštećenja na nosivoj konstrukciji te je nužna sanacija i pojačanje nosive konstrukcije. Također smo prikazali na konkretnom primjeru koje su to intervencije kod sanacije i pojačanja nosive konstrukcije, te koliki je njihov trošak. Zbog znanja da pojačanje nosive konstrukcije nije jeftino i jednostavno dali smo prijedlog etapne izvedbe s ciljem da svaka etapa izvedbe rezultira nekim povećanjem razine otpornosti. Također zbog kratkog roka izrade nismo bili u mogućnosti obraditi sve tehnike mogućih intervencija na predmetnoj zgradi.

U ovom priručniku cilj je dodatno proširiti znanje o uobičajenim oštećenjima u potresu na zidanim zgradama, te dati veći broj tehnika sanacija i pojačanja nosive konstrukcije. Sanacija pojedinih oštećenja kao i podizanje otpornosti može se postići na više načina s različitim tehnikama, tradicionalnim i uobičajenim koje su jednostavne za izvedbu ili suvremenim koje traže specijalističku izvedbu. U ovom priručniku prikazat ćemo neke od tih tehnika. Naravno da postoji još niz tehnika koje nismo zbog brzine izrade priručnika uspjeli obraditi, međutim svakako planiramo ovaj priručnik u narednom periodu dopuniti sa svim nama poznatim tehnikama, nekima koje možda ne znamo, ali ćemo ih otkriti od vas u ovom periodu obnove.

Važno je imati u vidu da sanacije i pojačanja nosivih konstrukcija treba izvoditi stručno u suradnji s projektantima i izvođačima. Stoga smo dali i kratki prikaz pristupa i postupka u samoj izradi projekta i optimalnog tehničkog rješenja kojeg bi se trebali pridržavati svi, tj. i vlasnici i inženjeri u provedbi obnove.

Cilj prethodnog i ovog priručnika je pomoći građanima grada Zagreba i svim inženjerima koji će sudjelovati u obnovi. Zbog želje da pomognemo u ovom teškom razdoblju svima što prije, nismo uspjeli prikazati što sve znamo te smo svjesni da možemo i bolje, ali vjerujemo da će u konačnici ovo postati dobar priručnik. Naša odluka je takva da pokušamo što brže podijeliti svoja znanja i pomoći koliko možemo.

Za sigurniji i ljepši Zagreb.

Autori

Zagreb, 05.05.2020.g.

1 OŠTEĆENJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA



Slika 1.1 Fotografije oštećene župne crkve u Granešini nastradale u potresu 22.03.2020.

Nedavno smo bili svjedoci oštećenja zidanih konstrukcija djelovanjem potresa u Zagrebu. Međutim, do oštećenja i smanjenja nosivosti može doći i zbog djelovanja niza drugih čimbenika koji mogu oslabiti zidane konstrukcije. Na konstrukcije u njihovom životnom vijeku utječe niz negativnih čimbenika, a koji mogu biti: početna neadekvatna konstrukcijska rješenja same građevine, razne pregradnje i namjerna rušenja pojedinih zidova zbog prenamjene prostora, dogradnja kata (katova), dodavanje stupova i čeličnih traverzi umjesto srušenih zidova i s tim u vezi naknadna slijeganja temelja, oštećenja uslijed manjih potresa, oštećenja uslijed gradnje susjednih zgrada, vremenom narušena trajnost pojedinih gradiva nosivih elemenata i drugo.

Najčešće korišteni tip vertikalnih elemenata zidanih građevina su zidovi od opeke. Oni preuzimaju vertikalna i horizontalna opterećenja, a zbog male vlačne otpornosti gotovo isključivo nose na tlak, dok vlačna naprezanja u njima uzrokuju pukotine.

Pod glavne nedostatke, a time i glavne razloge otkazivanja neomeđenog zida možemo navesti:



Slika 1.2 Prikaz glavnih nedostataka i razloga otkazivanja neomeđenog zida.

Općenito, oštećenja u zidanim konstrukcijama možemo podijeliti na nekonstrukcijska i konstrukcijska. Nekonstrukcijska oštećenja, koja ne narušavaju globalnu mehaničku otpornost

i stabilnost konstrukcije, su pukotine i prevrtanje zidnih parapeta, krovnih dimnjaka, balkona, padanje crjepova, oluka, vijenaca, padanje žbuke sa zidova i stropova, pukotine i prevrtanje pregradnih zidova, pukotine u staklenim panelima i sl.

Konstrukcijskim oštećenjima smatramo ona oštećenja koja mogu uzrokovati djelomični ili potpuni kolaps konstrukcije. Vlačna naprezanja koja se manifestiraju s dijagonalnim pukotinama u uglovima otvora, a ponekad i u središnjem dijelu zida mogu narušiti globalnu mehaničku otpornost i stabilnost građevine. Do konstrukcijskih oštećenja mogu dovesti i torzijsko ponašanje zgrade i izvijanje zidnih konstrukcijskih elemenata koji su posljedica nesimetrične konstrukcije. Ovakav mehanizam otkazivanja uzrokuje pojavu većih pukotina pogotovo u uglovima zgrade koja. Učestalim podrhtavanjima tla pukotine se šire, te dolazi do djelomičnog urušavanja zida uslijed popuštanja veze u sljubnicama. Zidane konstrukcije su krute i disipiraju malo potresne energije što dovodi do lošeg ponašanja u potresu.

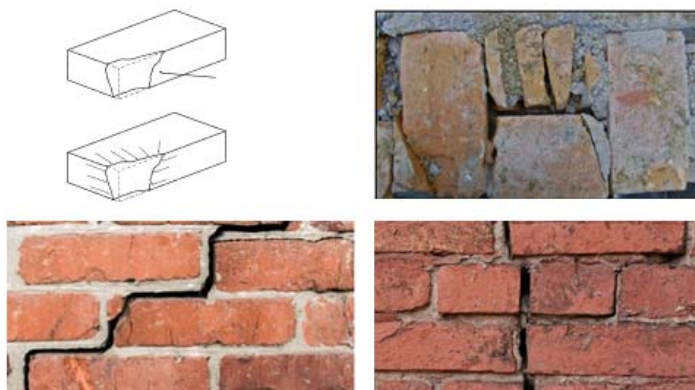
Iz navedenih oštećenja lako je iščitati da je za otpornost zidanih konstrukcija u potresu nužno ispuniti određene uvijete. Konstrukcije bi trebale biti što jednostavnije i što pravilnije u tlocrtu i po visini čime se može lako postići „efekt kutije“, odnosno podudaranje centra krutosti i centra masa i samim time izbjegavanje torzije.

Tablica 1-1 Mogući razlozi oštećenja zidanih konstrukcija

Nekvalitetna građa: opeka ili vezno spajalo (mort)

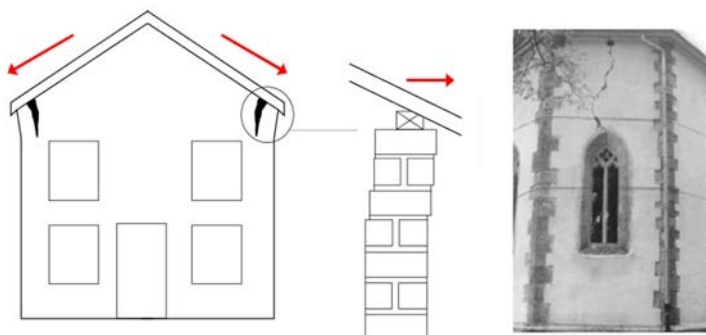
Zidani nosivi zidovi u kojima je korišteno loše vezivno sredstvo (mort) mogu uzrokovati smanjenje vlačne i posmične čvrstoće zida, potencijalni nastanak pukotina pa čak i mogućeg kolapsa tijekom potresa. Također, ako je čvrstoća gradbenog elementa manja od projektirane tada ona postaje slaba točka tijekom potresa. Oštećenje može nastati i prije potresa, npr. uslijed vlage odnosno smrzavanja i odmrzavanja.

Uslijed samog potresa može doći do otkazivanja gradbenog elementa ili spojnog sredstva što možemo vidjeti po načinu formiranja pukotine.



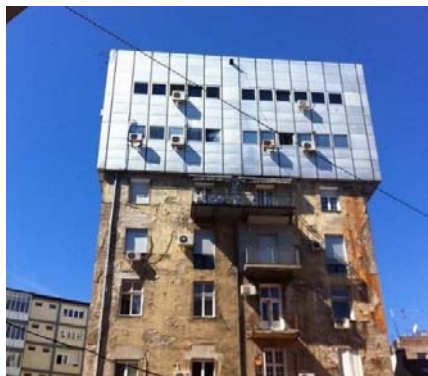
Loši konstrukcijski detalji

Jedan od razloga oštećenja zidanih konstrukcija je i izvedba loših konstrukcijskih detalja, gdje zbog nepoznavanja statičkih sustava i neprimjerenih izrada, dolazi do oštećenja uslijed mjerodavnog opterećenja. U ovom slučaju je prikazan loš detalj izvedbe nazidnice i drvene grede krovišta.

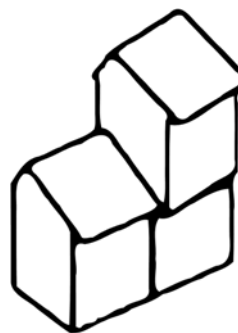


Pogreške u eksploataciji i održavanju zgrada

Promjena namjene objekta bez analize povećanje korisnog opterećenja i (ili) stalnog opterećenja,
 Promjena geometrije građevine – promjena organizacije prostora dodavanjem (ili uklanjanjem) zidova, dodavanje galerija, izrada manjih otvora i slično,
 Promjena statičkog sustava dodavanjem ili ukidanjem konstrukcijskih elemenata,
 Različiti vidovi preopterećenja kao što je nadozidavanje.

**Nepravilnosti u ravnini i izvan nje**

Konstrukcije pravilnog rasporeda u tlocrtu i po visini sigurnije su u potresu. Za stabilnost zidanih konstrukcija u potresu potreban je pravilan i simetričan položaj u dvije međusobno okomite ravnine i nužan uvjet da se prate po vertikali.

**Loše ponašanje zida u potresu**

Čak i ako je zadovoljeno sve prije navedeno, u potresu će se možda pojaviti dijagonalne X pukotine koje su nastale zbog lošeg ponašanja zidanih konstrukcijskih elemenata u posmiku (pukotina po sljubnici) pri čemu trokutovi između pukotina postaju nestabilni i mogu prouzrokovati kolaps konstrukcije.

**Slaba točka „otvori“**

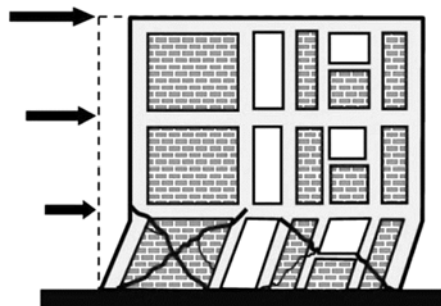
Stvaranje vertikalnih pukotina i otkazivanja zida na uglovima otvora zbog pojave zglobova uslijed pomaka konstrukcije. Iz tog razloga je dobro imati nosive vertikalne elemente na mjestu otvora poput vrata i prozora.

Također do otkazivanja može doći i uslijed neravnoteže u veličini i poziciji otvora u zidovima, koja može uzrokovati otkazivanje konstrukcije u potresu. Iz tog razloga otvori bi trebali biti pravilni i optimizirani kako bi što veći dio zida mogao preuzeti horizontalno opterećenje.



Slaba točka „meko prizemlje“

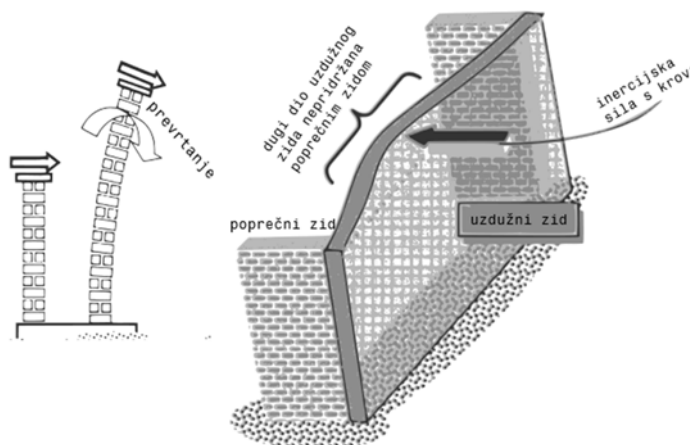
Do kolapsa prve etaže može doći zbog smanjene duktilnosti i male čvrstoće samog zida. Također, često prva etaža (prizemlje) ima manje zidova, veću visinu i veće otvore u zidovima (poslovni prostori) što dovodi do neravnomjerne raspodjele horizontalnih sila po visini konstrukcije, odnosno otkazivanja na prvoj etaži.

**Slaba točka „mjesto spoja dva zida“**

Spoj zidova mora biti kvalitetno izveden kako bi se osigurala nosivost van ravnine. Uslijed loše izvedenog spoja zidova, spoj zidova ovisi isključivo o vlačnoj čvrstoći vezivnog sredstva.

**Visoki, nepridržani, vitki zidovi**

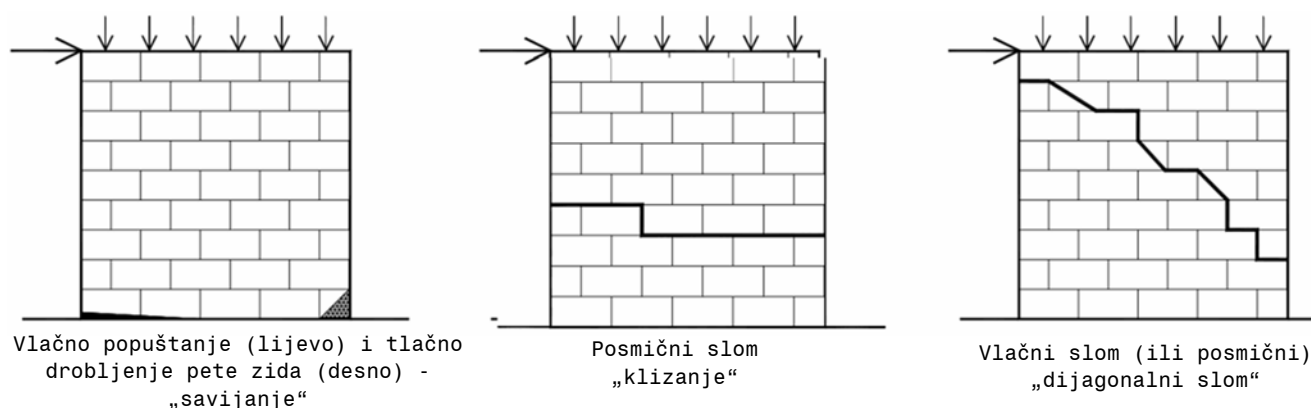
Odnosi se na neovisne konstrukcije dimnjaka ili dugačke zidove bez bočnih pridržanja, koja mogu uzrokovati otkazivanja van ravnine.



1.1 OTKAZIVANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA

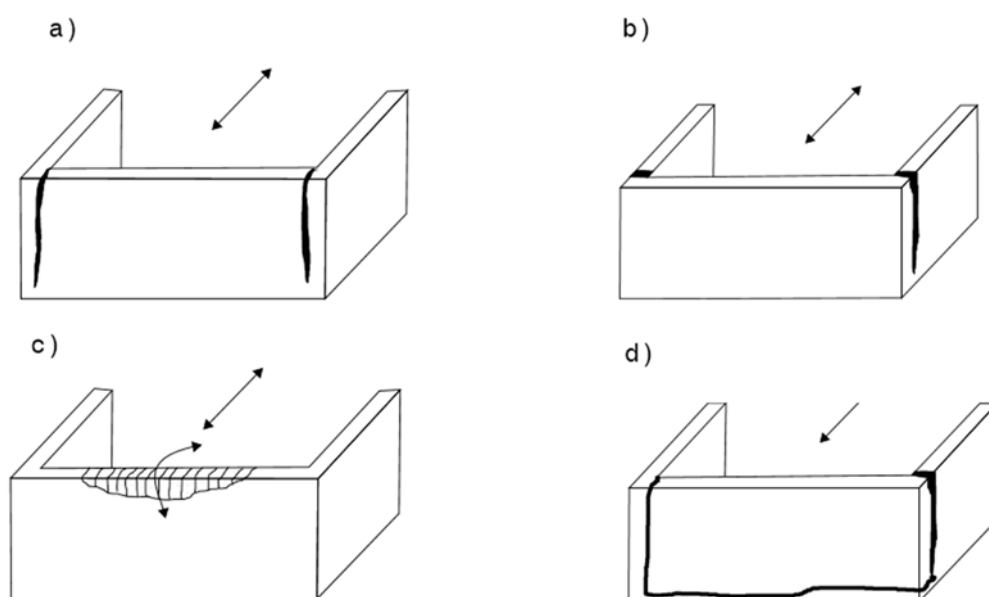
Gibanje tla tijekom potresa dovodi do povećanja sile inercije u razini tla ili u težištu mase konstrukcije. Konstrukcija će ostati stabilna ako je osigurana osnova za prijenos sile u tlo uz minimalno oštećenje. Elementi koji sudjeluju u prijenosu seizmičke sile su zidovi, ploče i temelji, a poznato je da su upravo zidovi najpodložniji oštećenjima.

Otkazivanja dužih zidova van ravnine se uglavnom manifestira pojavom horizontalnih pukotina na sredini visine zida, istovremeno s vertikalnim pukotinama. Kod kraćih je zidova češća pojava vertikalnih i dijagonalnih pukotina u sredini zida. Na idućoj slici (1.2) prikazani su mehanizmi otkazivanja zidanog panela unutar ravnine kod djelovanja horizontalnog i vertikalnog opterećenja.

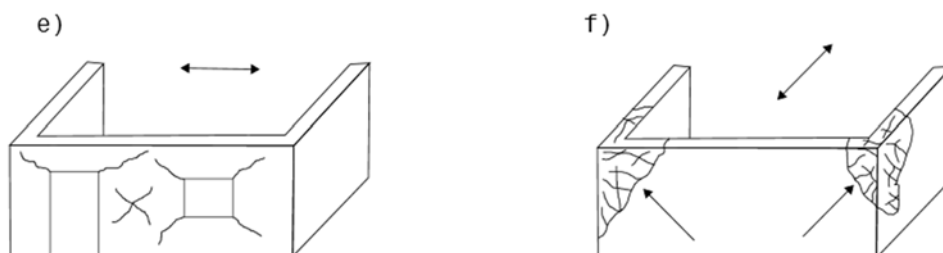


Slika 1.3 Mehanizmi otkazivanja zidanog panela unutar ravnine [1]

Osim prikazanih mehanizama otkazivanja zidnog panela unutar ravnine, moguće je otkazivanje zidnog panela i van ravnine. To je ujedno najčešći uzrok oštećenja starih zgrada koji nemaju krute i povezane stropove. Uglavnom su takvi mehanizmi otkazivanja povezani s djelovanjem horizontalne sile, odnosno potresne sile, a prikazani su na slikama 1.4 i 1.5.



Slika 1.4 Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih konstrukcija: a) posmični slom zida i vertikalna pukotina u uglu; b) vlačni slom zida i vertikalna pukotina u uglu; c) horizontalna pukotina, otkazivanje dugih zidova van ravnine; d) globalno otkazivanje zidnog panela;

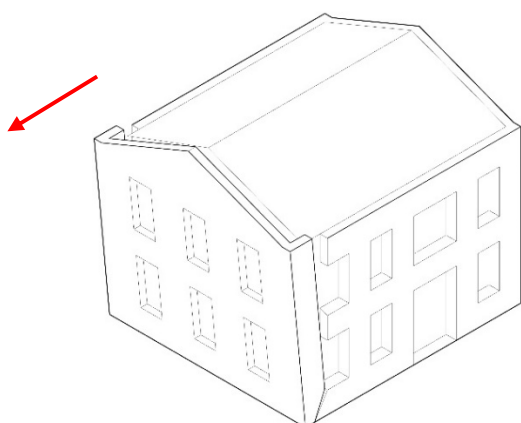


Slika 1.5 Tipični mehanizmi otkazivanja zidanih konstrukcija: e) dijagonalna pukotina uslijed djelovanja sile u ravnini zida; f) otkazivanje van ravnine uglova zida

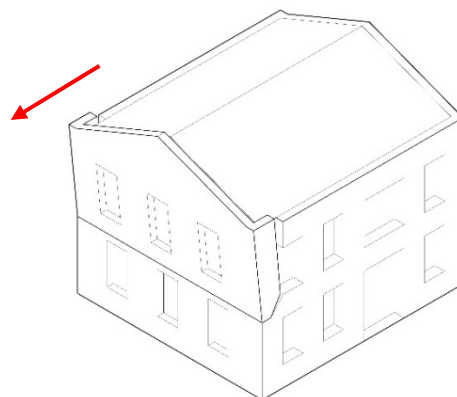
Prikazani načini otkazivanja se odnose na zidne panele (zidove). S obzirom na djelovanje potresa, postoje tipični mehanizmi otkazivanja konstruktivnih elemenata odnosno zidnih panela na zgradama u odnosu na njihovu tipologiju. Slijedi prikaz tipičnih mehanizama otkazivanja prema tipologiji za stambene zgrade.

Tablica 1-2 Oštećenja prema tipologiji za stambene zgrade

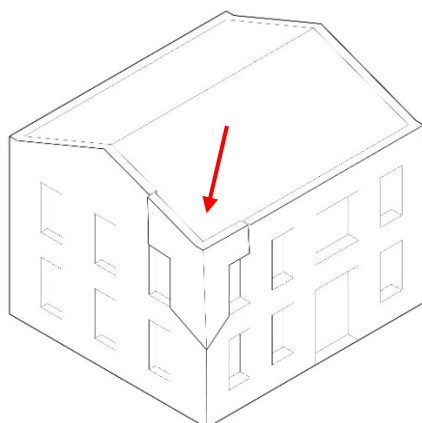
Mehanizmi otkazivanja zidova van ravnine



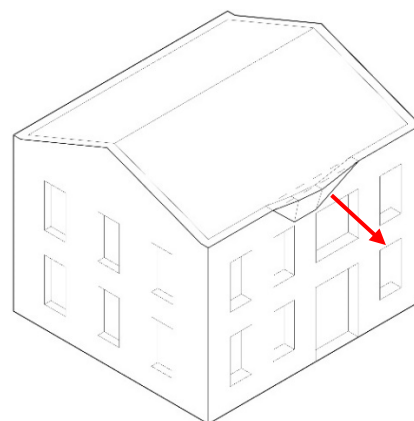
Odvajanje fasadnog (zabatnog) zida od okomitih zidova



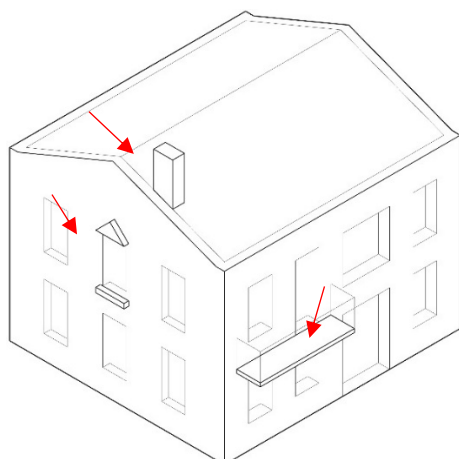
Djelomično odvajanje fasadnog zida s rotacijom u nivou stropa prizemlja



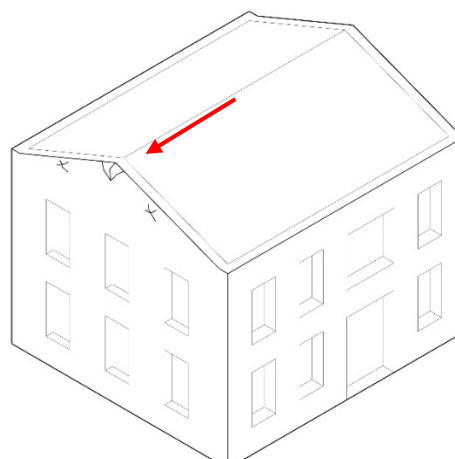
Odvajanje zidova s karakterističnim „V“ oblikom pukotina na uglovima zgrada



Odvajanje zidova u predjelu tavanjskih prostora (nazidnice)

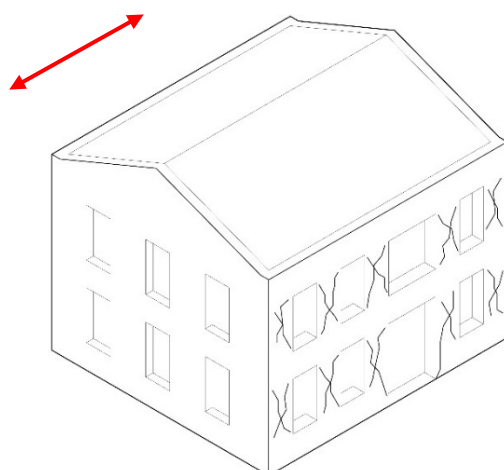


Lokalna oštećenja elemenata ili njihovo rušenje

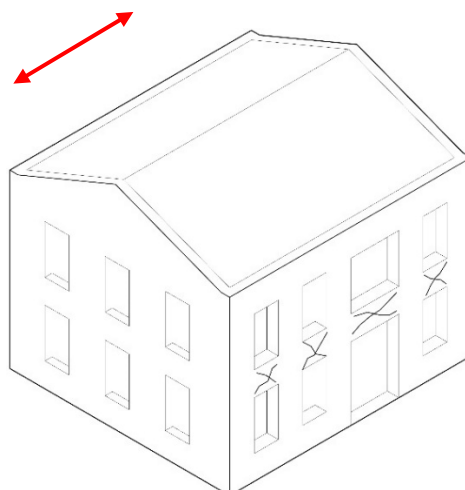


Lokalna oštećenja zabatnih zidova u nivou krovišta (ležajevi drvenih greda). Isto je moguće u razini stropova pojedinih etaža.

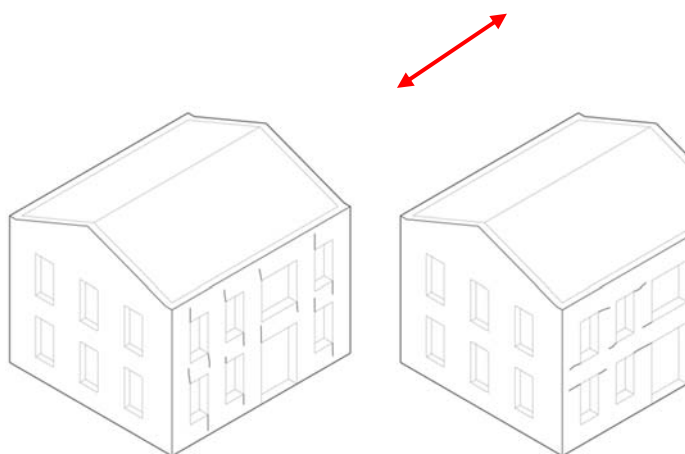
Mehanizmi otkazivanja zidova u ravnini



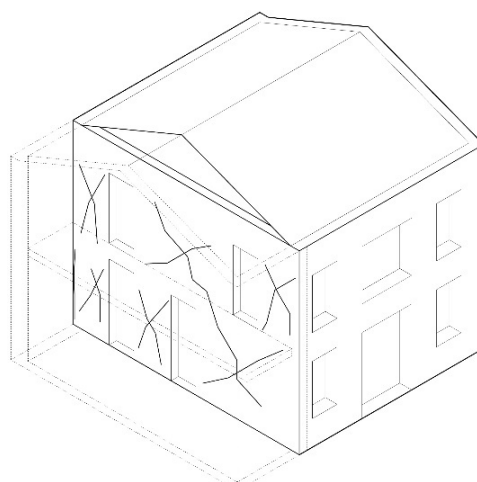
Dijagonalne pukotine



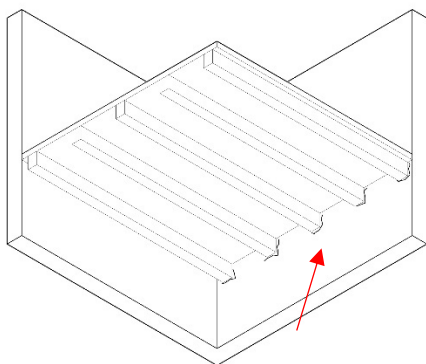
Dijagonalne pukotine nadvoja



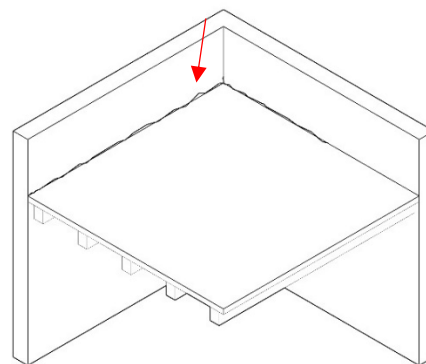
Pukotine uslijed savijanja elemenata zidnog panela unutar ravnine



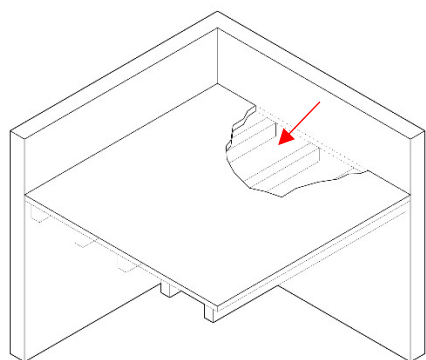
Dijagonalne pukotine unutarnjih zidova

Mehanizmi oštećenja stropnih konstrukcija

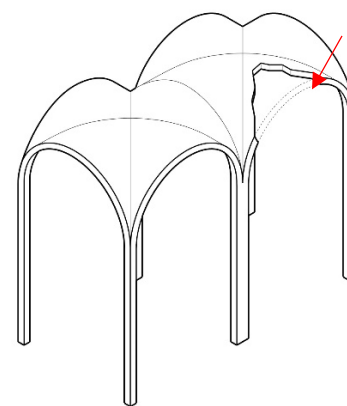
Pukotine na mjestima ležajeva drvenih grednika uslijed njihovog udara u zid



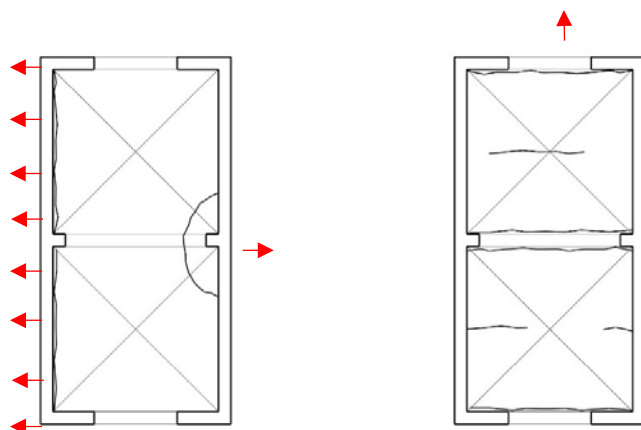
Oštećenja na mjestima spojeva stropne konstrukcije sa zidom



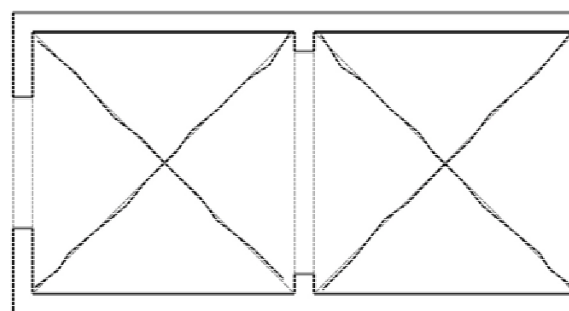
Urušavanje dijela stropa, najčešće se radi o podgledu



Urušavanje dijela svoda



Rotacija oslonca. Pukotine na dijelu svodova ili na mjestu međusobnog spajanja dva svoda ili kod spojeva sa zidom

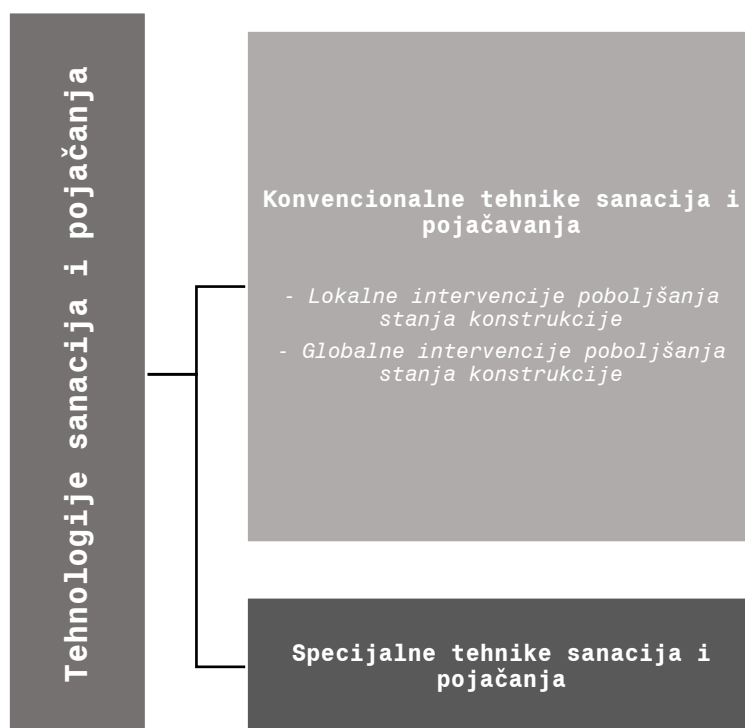


Deformacija u ravnini. Pukotine na dijelu svodova ili na mjestu međusobnog spajanja dva svoda ili kod spojeva sa zidom

2 SANACIJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA

2.1 OPĆENITO

Seizmičko pojačanje se može definirati kao modifikacija postojećih građevina za postizanje veće otpornosti na potresno djelovanje. U posljednjih nekoliko godina razvijene su metode za poboljšanje seizmičke otpornosti u postojećim konstrukcijama. Ovdje će se nastojati podrobnije prikazati pojačanja zidanih konstrukcija. Cilj sanacija ili pojačanja nosive zidane konstrukcije je, uz što manje intervencija na konstrukciji, osigurati potrebnu razinu otpornosti i sigurnosti. Kod zidanih konstrukcija, zbog velike povijesne važnosti, nužno je da su tehnike sanacija i pojačanja reverzibilne i u skladu s vremenom izgradnje građevine. Kod sanacija i pojačanja zidanih građevina nužna je uska suradnja konstruktora, arhitekata, vlasnika građevine (investitora), a često i konzervatora.



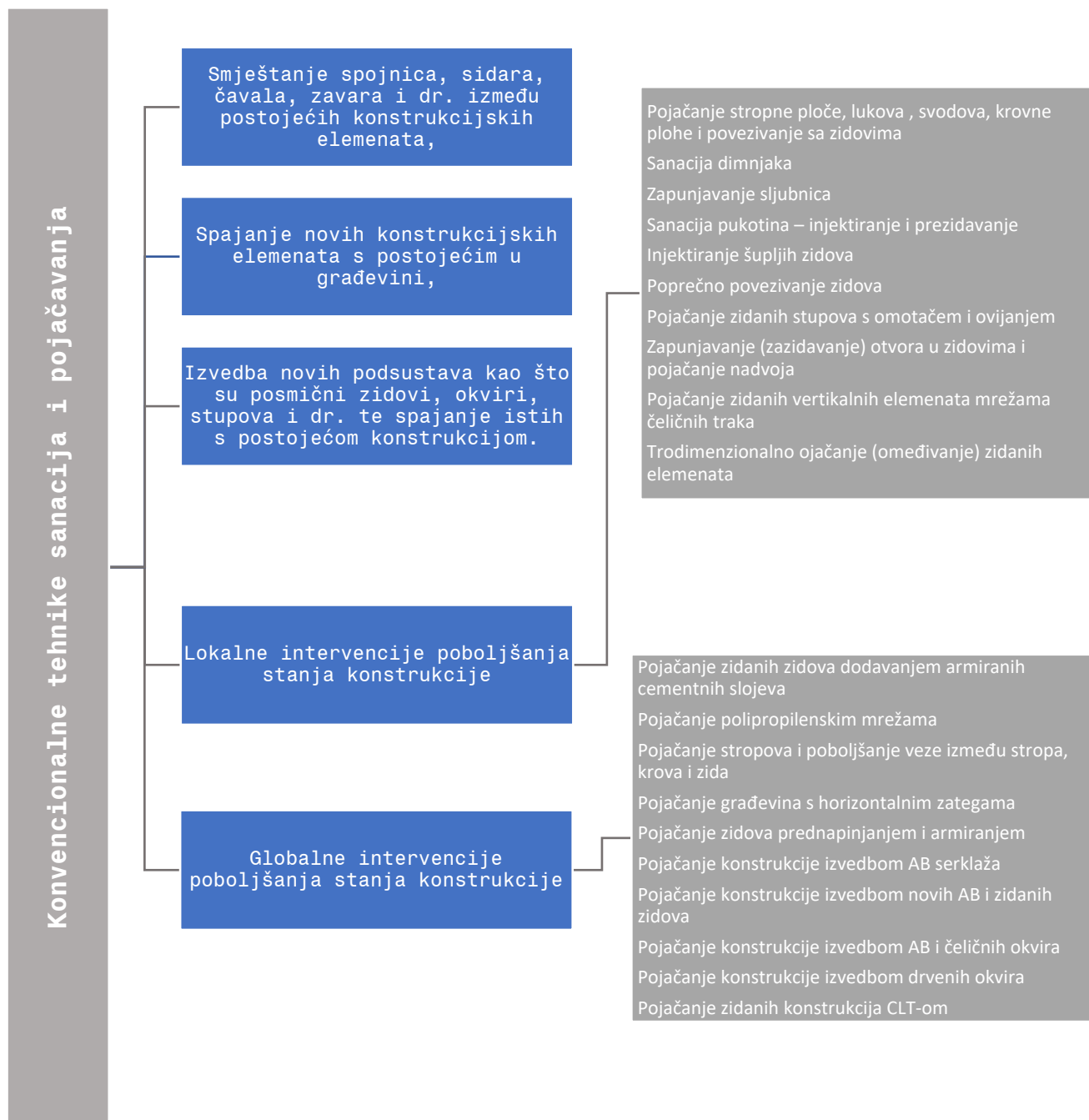
Slika 2.1 Prikaz osnovnih pristupa i tehnika sanacije i pojačanja zidanih konstrukcija

Kod izbora pojedine tehnike sanacije i pojačanja potrebno je uvijek pokušati zadržati osnovne karakteristike zgrade jer neprikladno rješenje može promijeniti seizmičke karakteristike zgrade. Premda se nekom tehnikom pojačanja na prvi pogled postiže statičko poboljšanje građevine, ono često može biti nepovoljno u pogledu ponašanja konstrukcije u potresu.

Izbor novog sustava pojačanja je, u principu, najpovoljnije rješenje ako je sukladno postojećem sustavu građevine. Budući da su zidane konstrukcije krute građevine, pojačanje s mekanim konstrukcijama kao što su duktilni okviri nisu prikladne jer za aktivaciju okvira prvo mora doći do otkazivanja zida. Moguća je zamjena zidanih zidova betonskim ili dogradnja betonskih uz postojeće zidane za povećanje seizmičke otpornosti, ali do povećanja potresne otpornosti može doći i manje invazivnim metodama o čemu će biti više riječi u nastavku.

Konvencionalne tehnike sanacija i pojačavanja

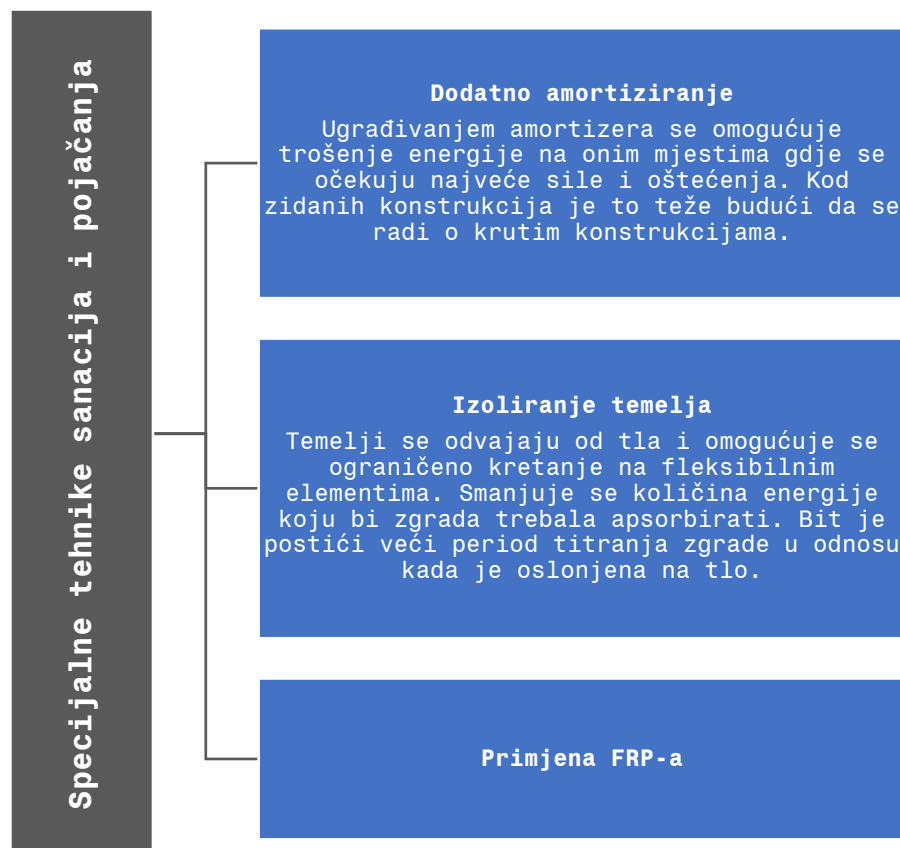
Konvencionalne tehnike ne zahtijevaju specijalne uređaje niti nove sofisticirane materijale što je razlog najčešće primjene u praksi. Dijelimo ih na lokalne i globalne intervencije.



Slika 2.2 Prikaz konvencionalnih tehnika sanacija i pojačanja zidanih konstrukcija

Specijalne tehnike sanacija i pojačanja

Tehnike razvijene u novije doba koje uključuju posebno razvijene sustave pojačanja i nove materijale. U praksi postoji niz specijalnih tehnika sanacija i pojačanja zidanih zgrada. Najčešće je riječ o sljedećim tehnikama:

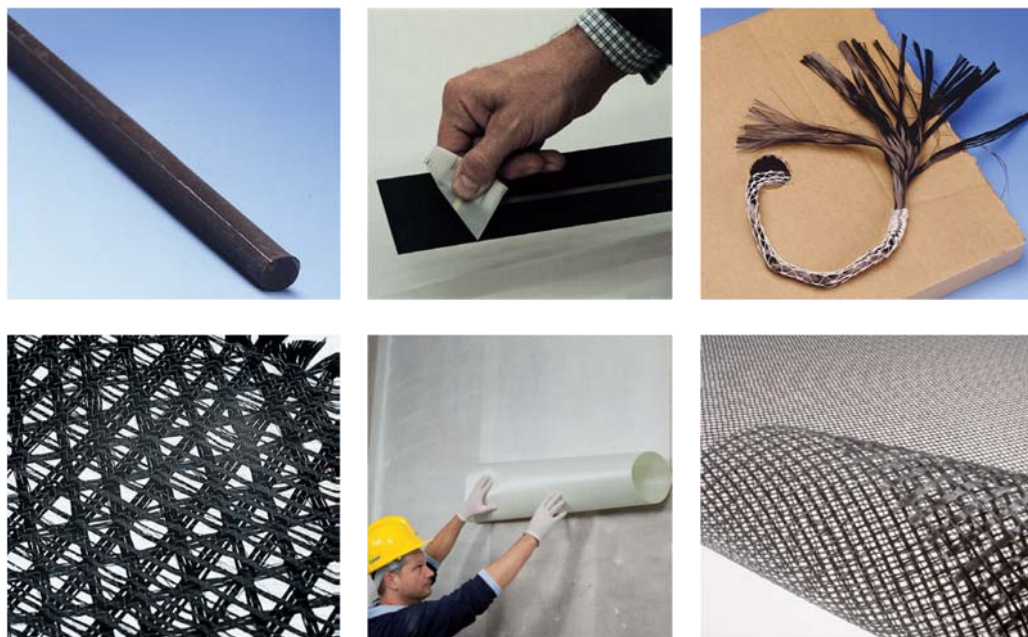


Slika 2.3 Prikaz specijalnih tehnika sanacija i pojačanja zidanih konstrukcija

FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) je materijal koji sve više privlači pažnju posljednjih godina kako za potrebe ojačanja postojeće konstrukcije tako i kao konstrukcijski samostalni materijal. Najvažnija svojstva FRP-a su neosjetljivost na koroziju, velika vlačna čvrstoća u smjeru vlakana, mala zapreminska težina (oko 6 puta manja od čelika), dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem (70% vrijednosti početne čvrstoće nakon 2 milijuna ciklusa), ne provodi struju. Međutim, neki od nedostataka su linearno – elastično ponašanje do sloma (neduktilnost), koeficijent toplinskog širenja je znatno manji nego kod betona (osim GFRP), nisu otporni na visoke temperature, tlačna čvrstoća iznosi oko 50% vlačne čvrstoće.

Kod zidanih konstrukcija nedostaci FRP-a uglavnom nisu toliko presudni, kao kod betonskih konstrukcija jer: slom pojačanih zidanih konstrukcija uglavnom nastupa degradacijom zida. Budući da nije potreban velik modul elastičnosti, mogu se koristiti jeftiniji materijali na bazi staklenih i bazaltnih vlakana.

FRP je nužno zaštititi žbukom, odnosno zapuniti sljubnice mortom ako se postavljaju šipke u prethodno bušene utore. FRP proizvodi koje koristimo za pojačanja zidanih konstrukcija možemo podijeliti na šipke, lamele (5, 10 cm), užad, tkanine, tanke tkanine, mreže (Slika 2.4).



Slika 2.4 proizvodi od FRP-a: šipke; lamele; užad; tkanine i mreže

FRP preuzima isključivo vlačna naprezanja i treba se postavljati u vlačnom području. Kod tlaka, FRP proizvodi ne povećavaju učinkovitost pojačanog elementa jer imaju manju nosivost na tlak, ali i zbog malih dimenzija često dolazi do lokalne nestabilnosti i odvajanja.

Pojačanje zidane konstrukcije FRP-om se ostvaruje lijepljenjem na zidane elemente ili eventualno mehaničkim sidrenjem pomoću mehaničkih uređaja.

Načini otkazivanja ziđa pojačanog FRP-om uglavnom nastupa uslijed:

- Pretjerano raspucavanje ziđa zbog velikih vlačnih naprezanja,
- Drobljenje ziđa,
- Slom FRP-a dosežanjem vlačne čvrstoće,
- Odljepljivanjem FRP-a sa ziđa (*debonding*). Odljepljivanje u vlačnoj zoni dovodi do krtoog sloma.



Slika 2.5 Načini otkazivanja ziđa pojačanog FRP-om [2]

Najčešće je to kombinacija odljepljivanje i još jednog moda otkazivanja.

Područja primjene FRP-a u zidanim konstrukcijama je kod pojačavanja stropnih dijafragmi i drvene krovne konstrukcije, međusobnog povezivanja zidova i povezivanja s drvenom stropnom konstrukcijom, povećanja kapaciteta nosivosti zidova u ravnini i na savijanje okomito na ravninu, povećanja kapaciteta nosivosti lukova, svodova i kupola, te ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti.

2.2 LOKALNE INTERVENCIJE

2.2.1 Stropna ploča

2.2.1.1 Pojačanje stropnih dijafragmi sa šperpločom i daskama

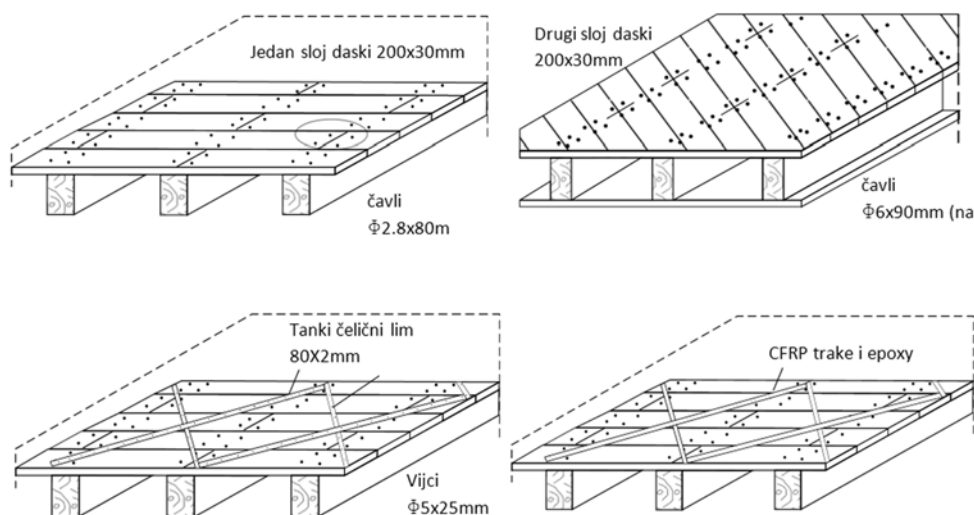
Postavljanjem drvene oplata od šperploče (OSB ploča) ili dasaka na postojeću stropnu konstrukciju, odnosno drvene grednike, postiže se dvostruki efekt pojačanja. Postiže se pojačanje na vertikalno opterećenje, ali i na horizontalno djelovanje ako su elementi koji tvore dijafragmu propisno međusobno povezani za preuzimanje posmičnog opterećenja.

Stropne konstrukcije je potrebno povezati sa zidovima kako ne bi došlo do odvajanja tijekom horizontalnih djelovanja sile potresa, ali i da bi se omogućila pravilna raspodjela seizmičke sile na pojedine zidove. Pojačanje se može izvesti na nekoliko načina:

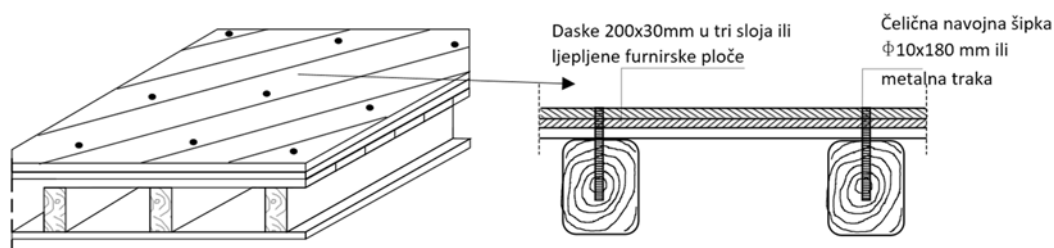
- Postavljanjem daske u jednom smjeru i to okomito na smjer nošenja grednika. Svaka daska se čavla s minimalno dva čavla i poželjno je da su daske izvedene na pero-utor.
- Postavljanjem dasaka u dva smjera tako da se postave u dva sloja. Prvi sloj se postavi pod kutom od 45° u odnosu na grednik, a drugi sloj se postavi pod kutom od 90° u odnosu na prvi pri čemu se svaka daska čavla s minimalno dva čavla.
- Postavljanje dasaka u više slojeva. Daske mogu biti različite debljine i različite orijentacije, ali najbolji je da su dva sloja okomito na grede i jedan sloj u smjeru greda.
- Postavljanje slojeva šperploče u tri sloja.
- Postavljanje krute CLT ploče

Postavljaju li se na postojeći drveni pod ploče (daske) koje se čavljaju ili spajaju vijcima za drvo u postojeću oplatu poda, i spajaju direktno u utore u rubne drvene grednike (bez čavljanja), tada će se nova stropna konstrukcija ponašati kao kruti konstrukcijski panel.

Ako se pak zahtjeva jača i čvršća stropna konstrukcija, tada je panele potrebno poslagati preko postojećih dasaka te ju je potrebno čavlati za postojeće drvene grednike i postojeće daske (slika 2.6 i 2.7).



Slika 2.6 Postavljanje drvenih ploča (dasaka) i traka na postojeću oplatu poda



Slika 2.7 Postavljanje drvenih ploča (dasaka) na postojeću oplatu poda

Ako nije moguć pristup drvenim gredama s gornje strane, moguće je daskanje u podgledu (strop etaže ispod), a za dodatno ukrućenje moguće je izvesti rešetku u horizontalnoj ravnini pomoću tankih čeličnih limova ili CFRP traka (Slika 2.7).



Slika 2.8 Postavljanje šperploče ispod grednih nosača

Pravo pojačanje na vertikalno opterećenje se može postići potpunim sprezanjem preko čeličnih šipki sidrenih epoksidnim ljepilom ili vijcima za drvo (postoje specijalni vijci za sprezanje drvo-drvo).

2.2.1.2 Popravak oštećenih drvenih grednika

Tijekom životnog vijeka konstrukcije potrebno je raditi određene intervencije na drvenim grednicima koji zbog negativnih utjecaja vlage, insekata ili izvanrednog djelovanja potresa mogu biti oštećeni. Radi se o tehnici popravka važnih konstruktivnih elementa starih zidanih građevina.

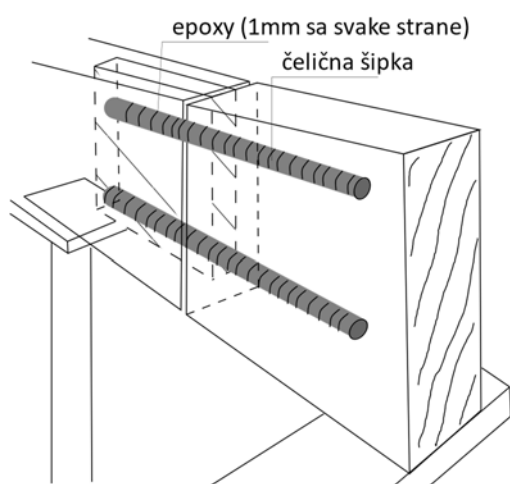
Osnovni problem kod ovakvih oštećenja i popravka je što često nije moguće napraviti zamjenu cijelog elementa koji je oštećen jer to bi značilo uklanjanje kompletne oplate (dasaka) s gornje i donje strane drvenih grednika.

Stoga se uglavnom primjenjuju tehnike zamjene oštećenog dijela grede, a to su obično dijelovi uz oslonce na zidane zidove ili u dijelovima sanitarija, koji su zbog vlage više oštećeni, ili se radi pojačanje oštećenog dijela.

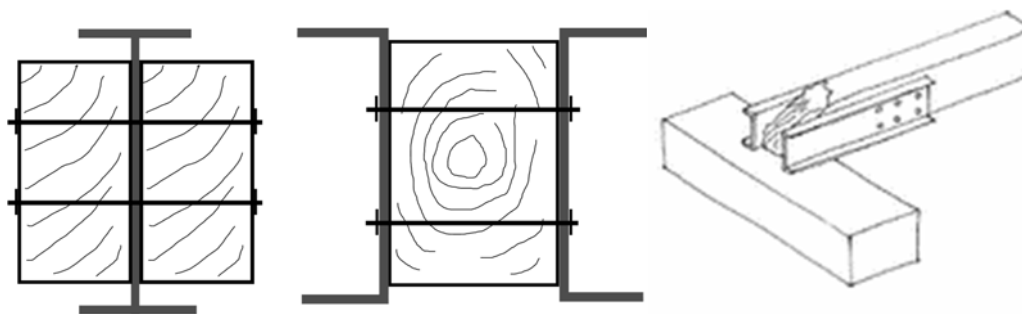
Najčešće tehnike su pojačanje oštećenog dijela s čeličnim elementima (profili i ploče) ili zamjena s novim drvenim segmentom koji se na zdravu dio grede pričvršćuje čavlima, vijcima za drvo ili epoksidnim ljepilom. Ovdje će se ukratko prikazati najčešće korištene tehnike budući su drveni stropovi samo dio zidanih građevina.

Obično se naprave utori u zdravom dijelu drvenog grednika i novom segmentu te se postavljaju čelične šipke ili trnovi, a prostor se zapuni epoksidnim mortom (ljepilom) sličnih svojstava kao drvene grede (Slika 2.9). Rupa se predbuši s tolerancijom od 2mm tako da sloj epoksijsa sa svake strane bude 1mm. Budući je izvedba in-situ, uvijek je nužno uz lijepljenje epoksidnim mortom imati i mehaničko spajalo u vidu trnova i sl. Nekada se radi jednostavnosti izvedbe rade utori na bočnoj strani.

Primjer sanacije i pojačanja dodavanjem čeličnih elemenata C ili L profila koji se vijčano ili lijepljenjem povezuju za zdravu dio grede prikazan je na slici 2.10. O specijalnim metodama pojačanja drvenih grednika bit će više u poglavlju 2.4.3.1.



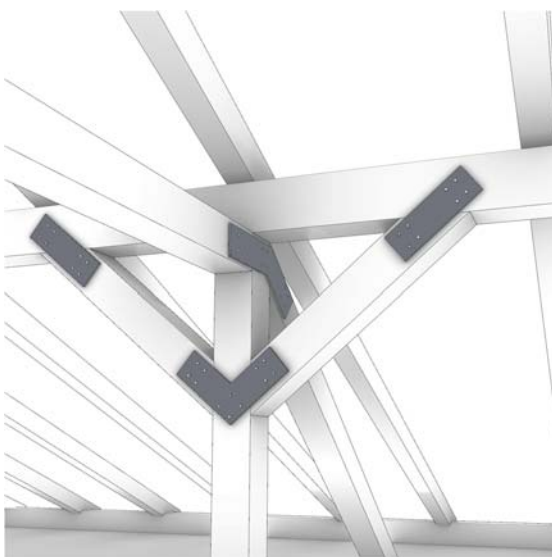
Slika 2.9 Sanacija drvenih greda čeličnih šipkama i epoksidnim mortom



Slika 2.10 Sanacija i pojačanje drvenih elemenata dodavanjem čeličnih elemenata

2.2.1.3 Ojačanje konstruktivnih detalja krovišta

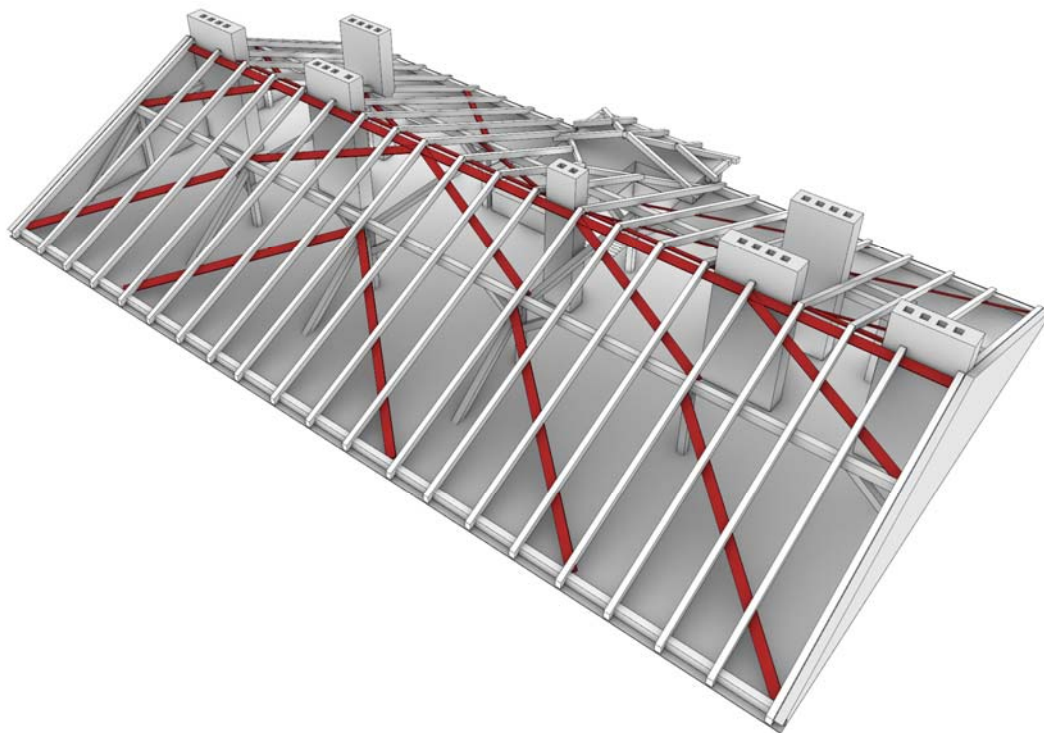
U zidanim konstrukcijama najčešći su sustavi drvenih krovišta. Drveni elementi se ojačavaju na istom principu kao što je gore prikazano, a ukoliko su potrebni popravci ili ojačavanje spojeva drvenih elemenata krovišta moguće je dodavanjem metalnih pločica spojenih vijcima za drvo (Slika 2.11).



Slika 2.11 Ojačanje elemenata krovišta metalnim pločicama

2.2.1.4 Dodavanje vjetrokosnika za stabilnost krovišta

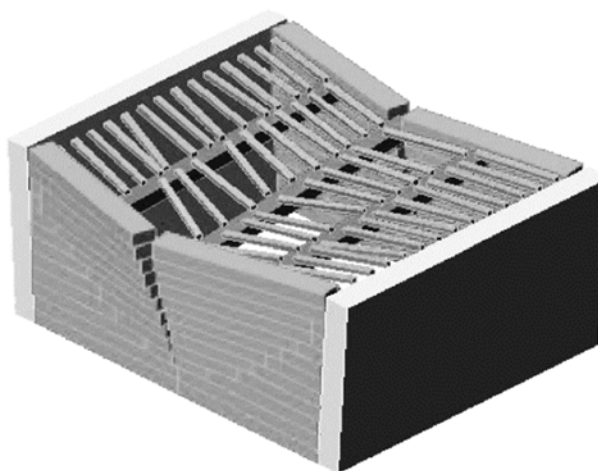
Dodatna horizontalna stabilizacija kosnicima u krovu postiže se dodavanjem drvenih elemenata (daske dim.3x10cm) takozvanih kosnika koji se spajaju na rogove, a kojima se postiže horizontalna krutost i stabilnost krovišta (Slika 2.12).



Slika 2.12 Stabiliziranje krovne konstrukcije kosnicima

2.2.1.5 Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida

Stropovi starih zgrada (skoro sve do 1960 g.) se sastoje od drvenih grednika iznad kojih je daščana oplata i šuta. Takvi stropovi su nepovezani i većinom fleksibilni u svojoj ravnini, a osim toga su u pravilu nepovezani sa zidanim zidovima na koje se oslanjaju što u potresu uzrokuje slom gubitkom cjelovitosti građevine.



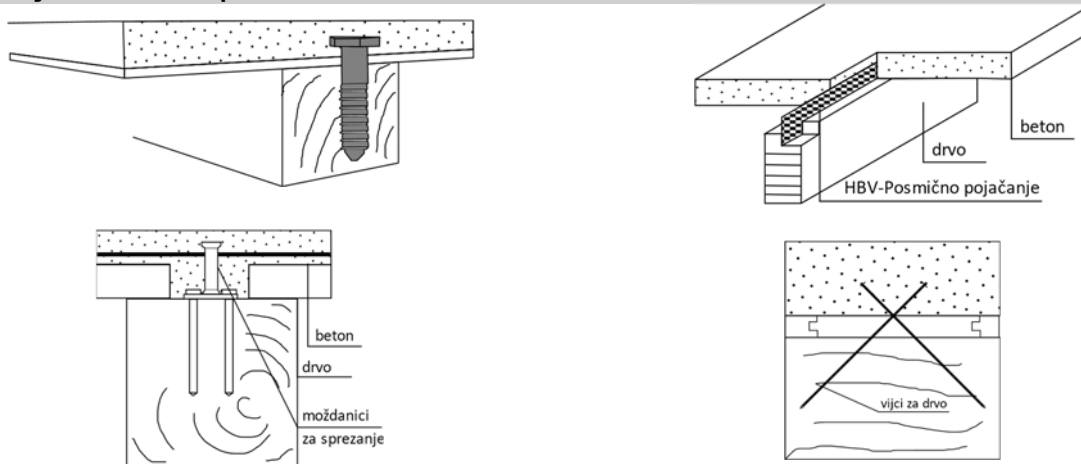
Slika 2.13 Gubitak cjelovitosti zidane konstrukcije sa stropovima od drvenih grednika [3]

Postoji način da se postojeći stropovi zamjene novim AB pločama ili polumontažnim sustavima kao što je „Bijeli strop”.

Svako uklanjanje greda dodatno oštećuje konstrukciju pa se najboljim pokazalo sprežanje postojećih grednika s AB tlačnim pločama debljine 6-8 cm. U postojeće drvene grede se

postavljaju moždanici za sprezanje različitih oblika i sustava. Sprezanjem se bitno povećava nosivost i krutost okomito na ravninu, ali u ravnini se dobiva kruti disk.

Sprezanje AB tlačne ploče



AB tlačna ploča i povezivanje sa zidovima

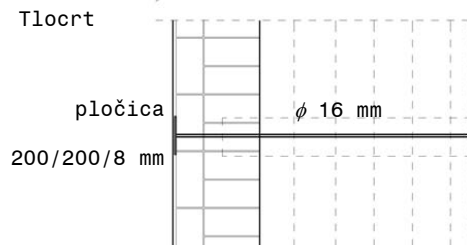
Presjek



Presjek

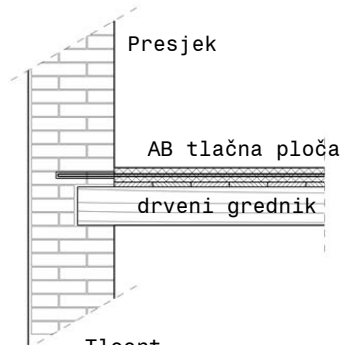


Tlocrt

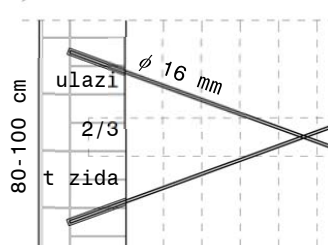


Moguće sidriti s vanjske strane

Presjek



Tlocrt



Nemoguće sidriti s vanjske strane

Izvodi se tlačna betonska ploča u međukatnoj konstrukciji uz sprezanje s drvenim grednicima nadzemnih etaža i čeličnim profilima u svodovima podruma.



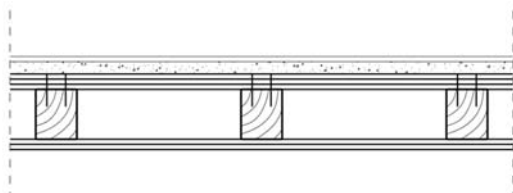
Slika 2.14 Različite varijante sprezanja i izgled stropa

Osim izvedbe tlačne AB ploče moguća je izvedba i drvenih tlačnih ploča koje se lijepljenjem ili vijcima povezuju za drvene grednike. Drvene tlačne ploče mogu činiti daske u tri sloja, tako da je prvi okomit na grednike, a drugi i treći sloj se zakreću za 45° odnosno 135° (vidi poglavlje 2.2.1.1).

Kod izvedbe drvene tlačne ploče (slika 2.6, 2.7 i 2.15) za osiguranje potpune učinkovitosti, ploču je potrebno povezati sa zidovima. Između podne dijafragme i zidova postoje veze (metalne pločice) koje mogu prenijeti unutarnje sile s krova na zid i ograničavati vanjske pomake zidova.

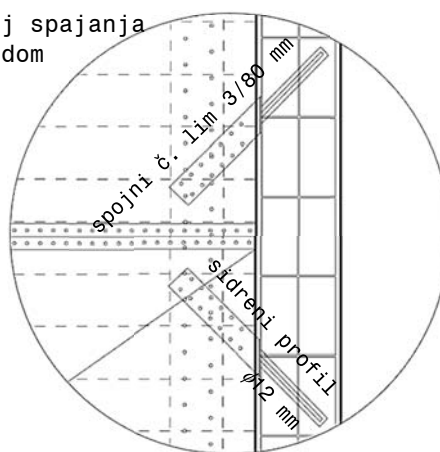
Postavljanjem dijagonalnih metalnih traka odnosno horizontalne stabilizacije postiže se kruta konstrukcija koja realno odgovara AB stropnim pločama (prikazano na slikama u nastavku).

Izvedba drvene tlačne ploče i povezivanje sa zidovima

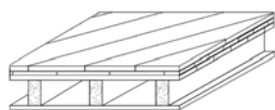
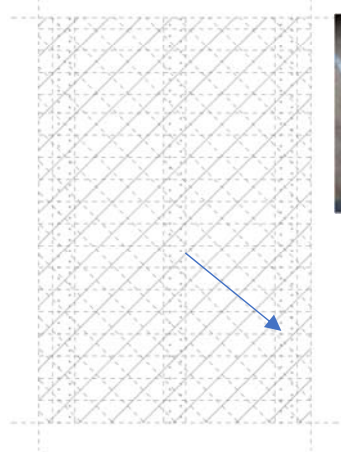


Tri sloja dasaka u tri smjera (daskanje pod kutevima 45° i 135° na postojeći prvi sloj) ili drvene ploče od slojevitog furnira (ploče međusobno potrebno povezati limom). Cilj je dobiti (djelomično) krutu dijafragmu koja će poslužiti za preuzimanje horizontalnih i vertikalnih sila. Daske, odnosno ploče se povezuju u drvene grednike i međusobno. Sidrena šipka koja je zavarena na metalnu pločicu se sidri u prethodno izbušenu rupu u zidu i zapunjava mortom.

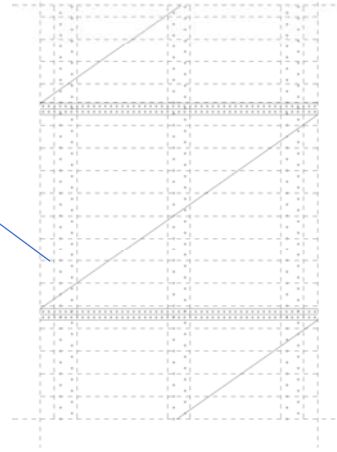
Detalj spajanja sa zidom



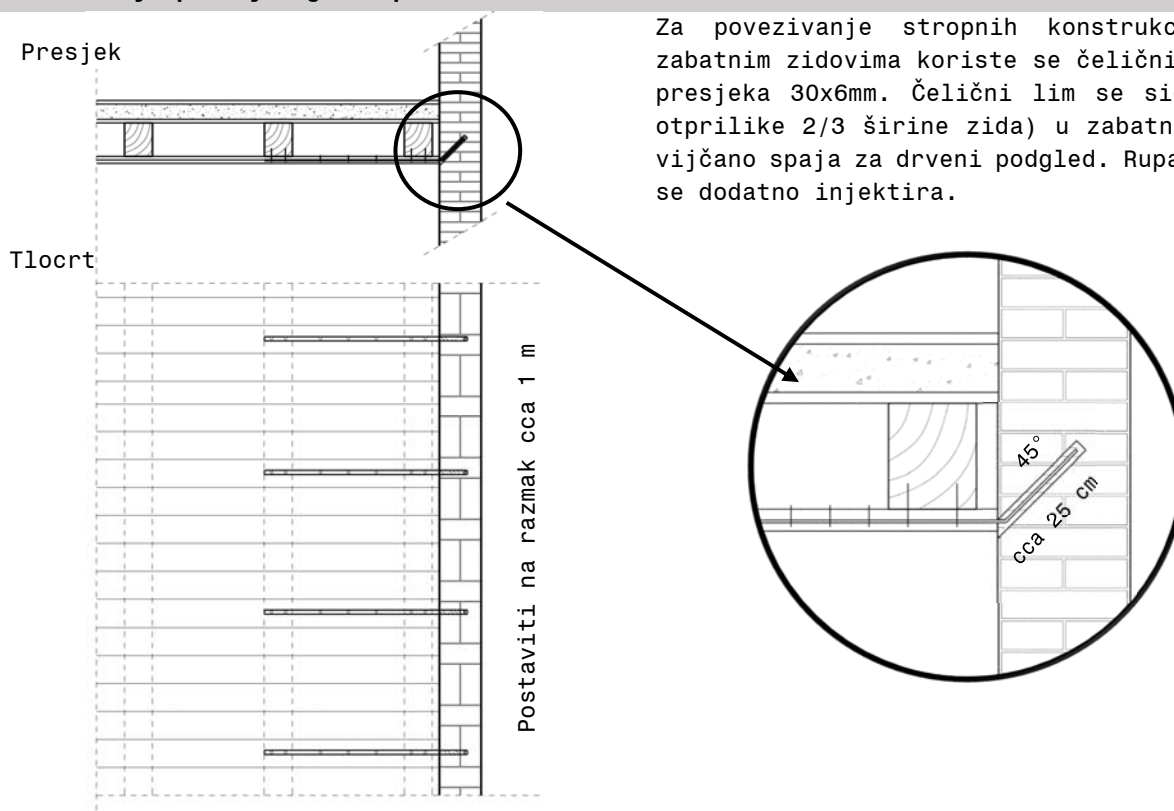
Tri sloja dasaka u 3 smjera



Drvene ploče od slojevitog furnira

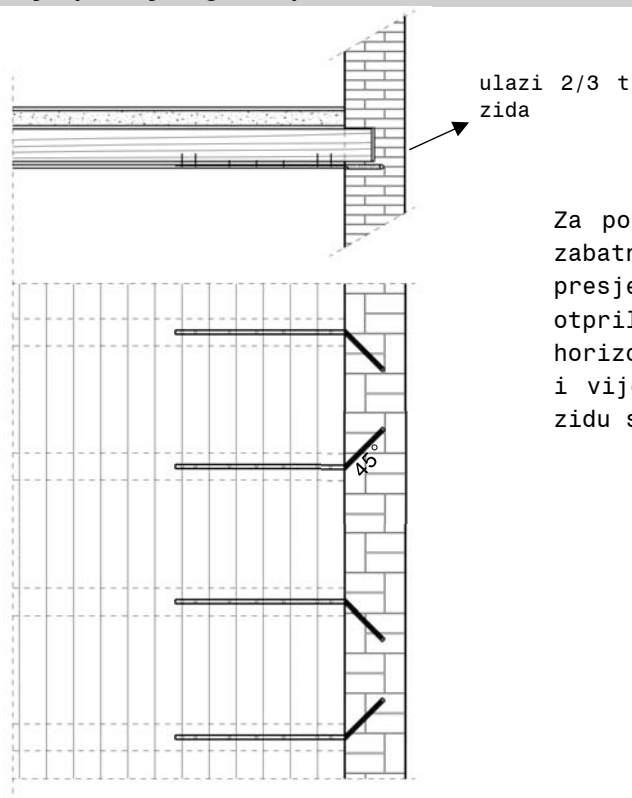


Slika 2.15 Ukrucenje AB ili drvenom tlačnom pločom i povezivanje sa zidovima

Povezivanje postojećeg stropa sa zabatnim zidom

Za povezivanje stropnih konstrukcija sa zabatnim zidovima koriste se čelični limovi presjeka 30x6mm. Čelični lim se sidri (do otprilike 2/3 širine zida) u zabatni zid i vijčano spaja za drveni podgled. Rupa u zidu se dodatno injektira.

Slika 2.16 Povezivanje postojećeg stropa sa zabatnim zidom

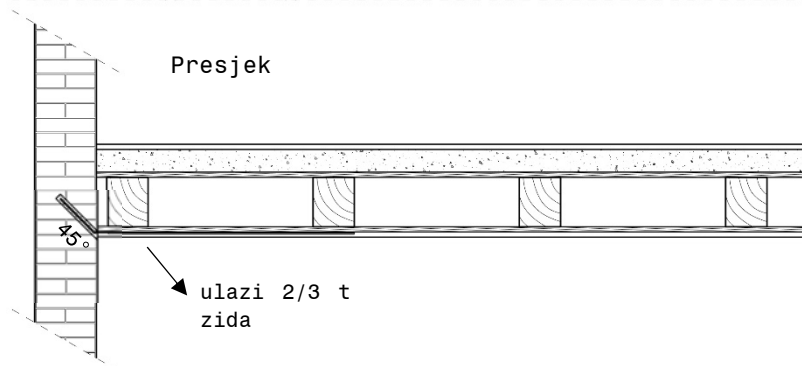
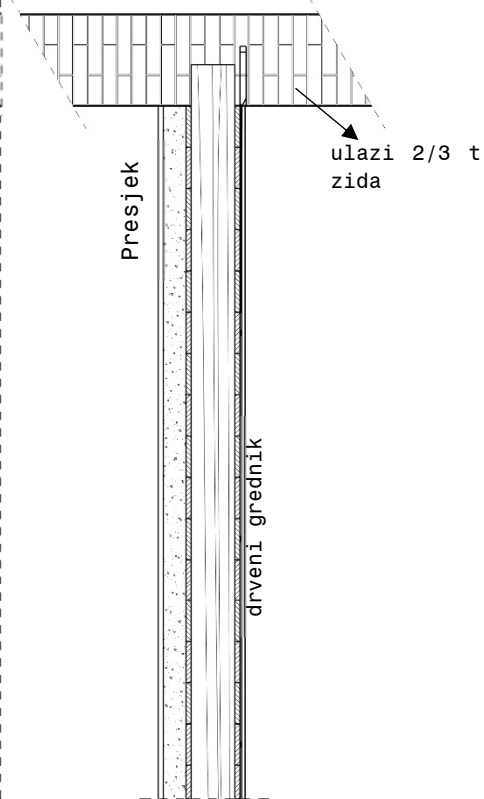
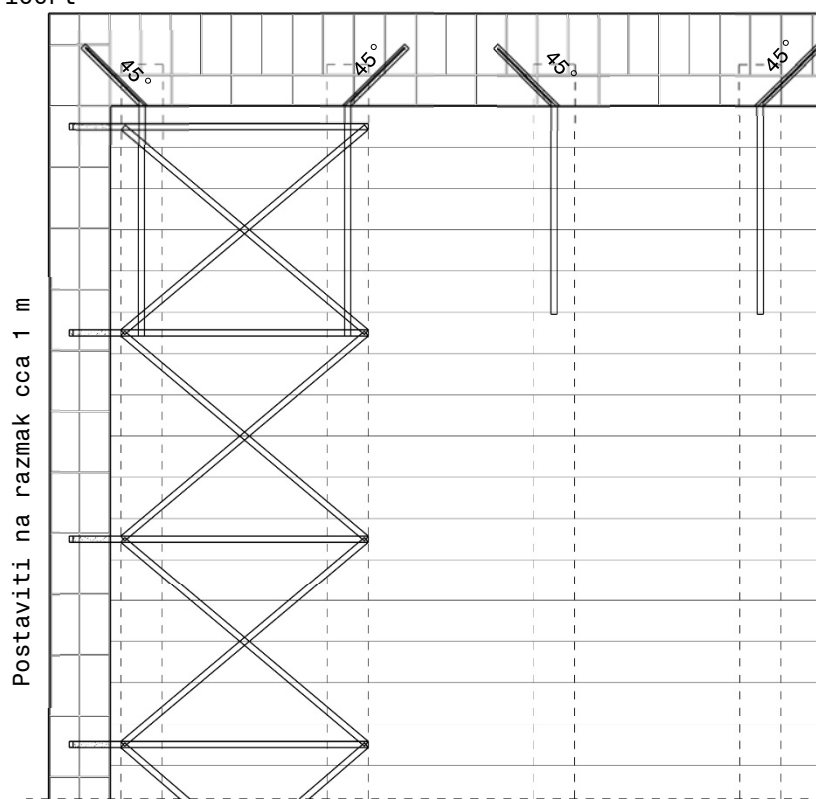
Povezivanje postojećeg stropa s nosivim zidom

Za povezivanje stropnih konstrukcija sa zabatnim zidovima koriste se čelični limovi presjeka 30x6mm. Čelični lim se sidri (do otprilike 2/3 širine zida) pod kutem od 45° u horizontalnoj ravnini stropa u zabatni zid i vijčano spaja za drveni podgled. Rupa u zidu se dodatno injektira.

Slika 2.17 Povezivanje postojećeg stropa s nosivim zidom

Horizontalna stabilizacija

Tlocrt

**Izvođenje horizontale rešetke i povezivanje svih zidova sa stropnom konstrukcijom**

Horizontalno ukrućenje drvenih grednih stropova, ako nije potrebno povećanje nosivosti na vertikalno opterećenje, može se postići izvedbom zatega ispod ili iznad stropa ili čak spregova i povezivanjem sa zidovima (preko L kutnika) ili sidrenjem vertikalne horizontalnog sprega u zid(kao što je vidljivo na slici iznad).

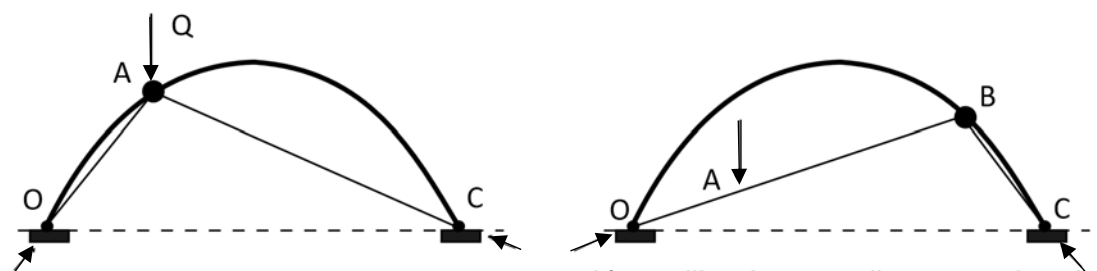


Slika 2.18 Horizontalna rešetka od metalnih traka ili FRP lamela

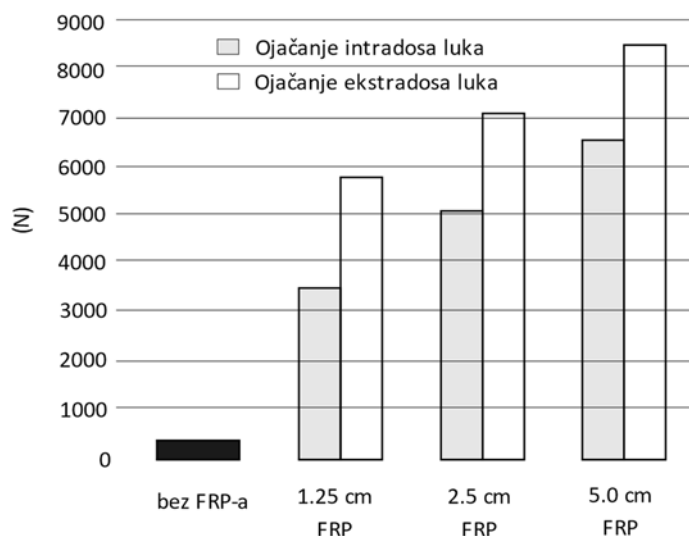
2.2.2 Lukovi i svodovi

Konstruktivni elementi s jednostrukom ili dvostrukom zakrivljenosti općenito otkazuju uslijed formiranja dovoljnog broja zglobova koji rezultiraju mehanizmom. Dovoljan broj zglobova nije teško postići budući da zidane konstrukcije imaju zanemarivu vlačnu čvrstoću.

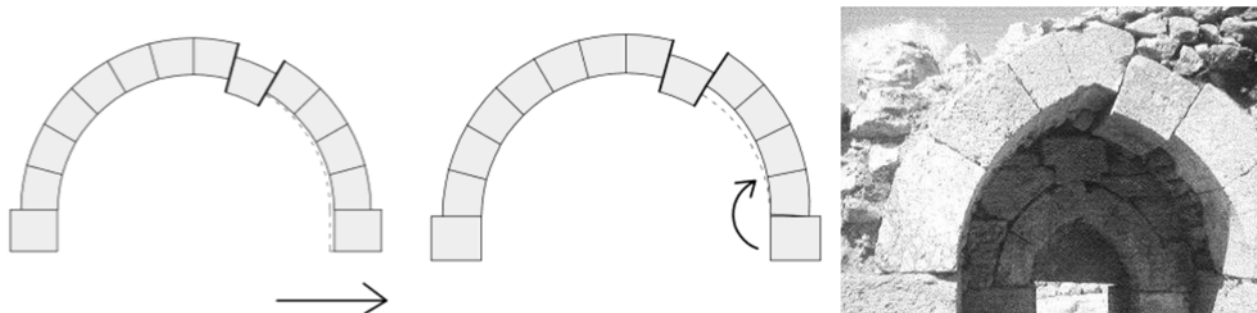
- a) Kod zidanih lukova dovoljno je pojačati samo intrados ili ekstrados (
 b) Slika 2.19).



Slika 2.19 Statička shema ojačanja luka (ekstrados lijevo, intrados desno)

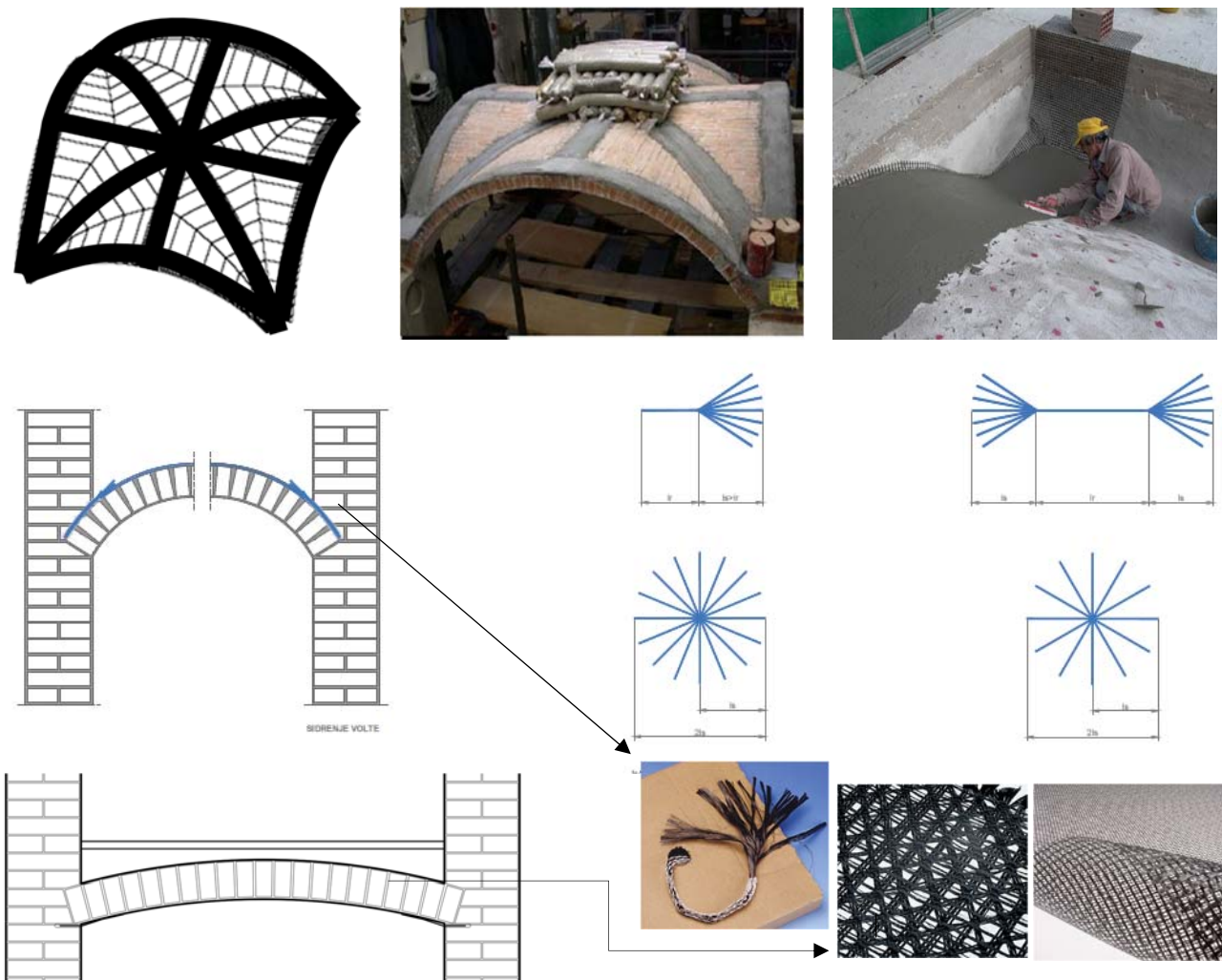


Slika 2.20 Odnos ojačanja ekstradosa ili intradosa različitim metodama ojačanja



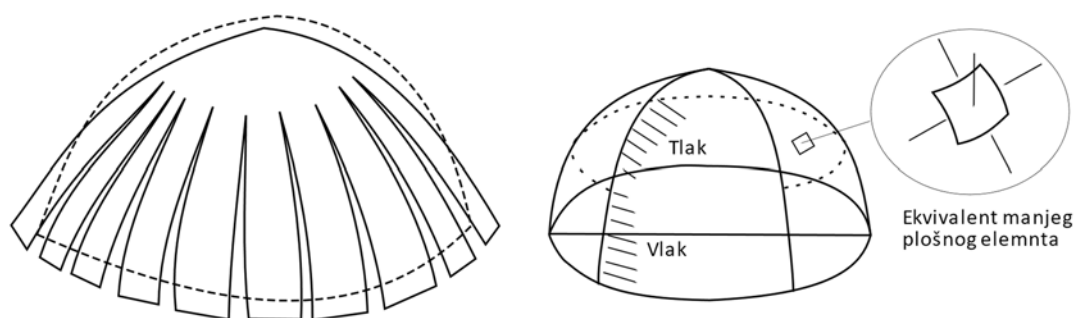
Slika 2.21 Otkazivanje luka ili svoda unutar ravnine, pukotina okomita na raspon

- c) Kod svodova, slično kao i kod lukova, preporuka je pojačati obje strane. Pojačanja mogu biti različita; tkanine i mreže su najpraktičnije uz kombinaciju sidrenja s užadi.



Slika 2.22 Pojačanje kupola FRP-om

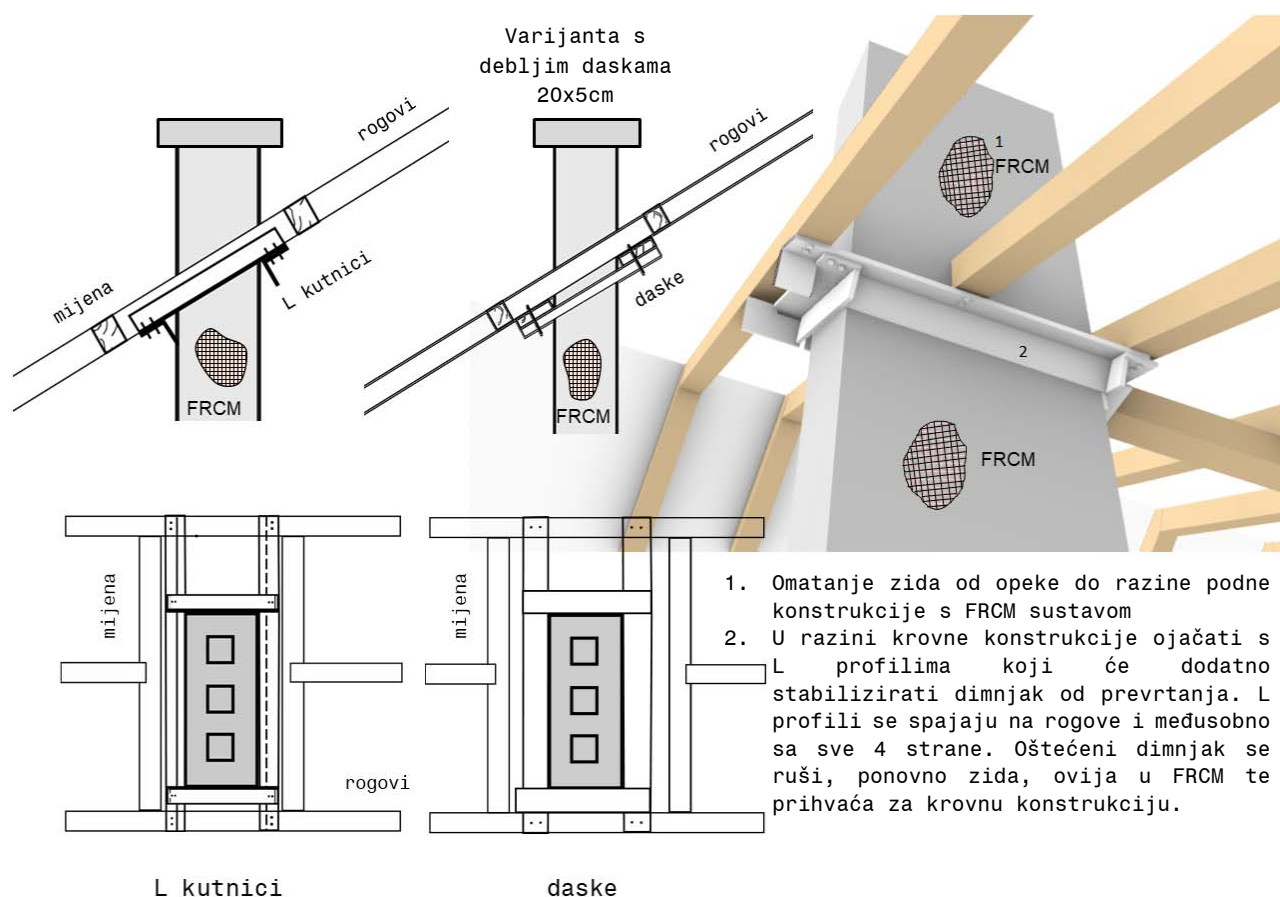
- d) Kupole služe za prihvat vlačnih prstenastih sila. Važno je napomenuti da kod lukova i svodova postavljanje FRP-a ne podrazumijeva može bitno uklanjanje zatege i elemenata koji prihvaćaju horizontalne sile luka.



Slika 2.23 Naprezanje u kupolama

2.2.3 Dimnjak

Dimnjak, kao sekundarna konstrukcija, zahtjeva sanaciju ako prijeti mogućnost urušavanja i ako kao takav predstavlja opasnost za konstrukciju i ljude. Zidani dimnjak je dimnjak koji se zida na gradilištu od punih opeka. Konstrukcija dimnjaka oštećena od potresa ili drugih vanjskih utjecaja može se sanirati na sljedeći način:



Slika 2.24 Ojačanje dimnjaka FRCM sustavom, L kutnicima ili daskama

Na slici 2.24 opisan je postupak pridržanja dimnjaka - u prvoj varijanti se koriste L kutnici, a u drugoj deblja daska 20x5 cm. Prikazan je i slučaj (3D) kad L profili prolaze jedan kroz drugi (zbog blizine rogova nije moguće postaviti L kutnike jedan na drugi). Također uz bočno pridržanje dimnjaka, neizostavno je ojačanje s FRCM sustavom.

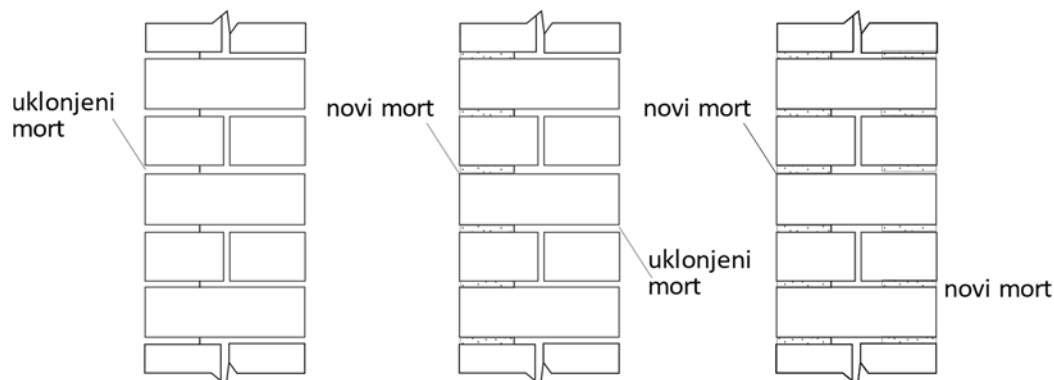
2.2.4 Vertikalni elementi

2.2.4.1 Zapunjavanje sljubnica

Tehnika se sastoji od uklanjanja postojeće oštećene žbuke (čišćenja i ispiranja sljubnice te zapunjavanja novim mortom). Najbolje je mort ukloniti vodom s visokim tlakom od oko 40 bara, a dubina uklanjanja morta je maksimalno do trećine debljine zida. Novi mort mora biti u skladu sa postojećim zidom, tj. trebao bi imati slična mehanička svojstva kao i postojeći mort, ali sa svojstvima da je otporniji na uzročnike propadanja.

Ako je postojeći zid zidan vapnenim mortom potrebno je da i novi mort sadrži visoki udio vapna. Nije dobro kod starih zgrada koristiti klasični cementni mort jer zbog

nekompatibilnosti sa opekam i postojećim mortom može uzrokovati oštećenja u potresu. Glavni ciljevi ove tehnike su poboljšanje izgleda, ali i povećanje tlačne i posmične čvrstoće te smanjenje deformacija.



Slika 2.25 Čišćenja i ispiranja sljubnice te zapunjavanja novim mortom

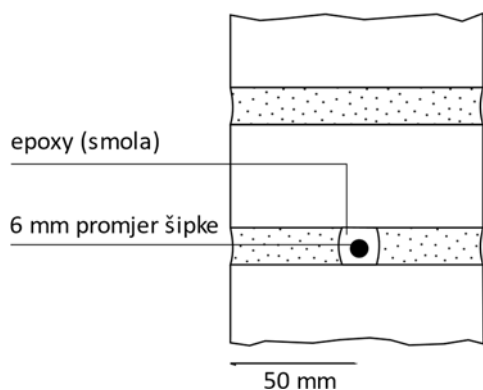
Danas postoje razni proizvođači mortova za sanacije starih građevina ovisno o tipu morta, zahtijevanoj boji morta kao i vrsti zidnih elemenata. Kod čišćenja je potrebno paziti da se ne ošteti opeka i da mort bude kvalitetno očišćen. Moguće je oblikovati i razne vrste profilacija.



Slika 2.26 Postupak sanacije i izvedbe

Često se s popravkom morta opečnih zidanih zidova zid dodatno pojačava tako da se u sljubnicu postavi čelična šipka (Slika 2.27).

Poželjno je da se koristi šipka s epoksidnim premazom kako ne bi došlo do korozije armature. Moguće su varijante šipki na bazi plastike i FRP-a. Ako je cilj samo pojačati zid onda se mogu koristiti i šipke u epoksi mortu koji može biti dodatno zaštićen.



Slika 2.27 Postavljanje čeličnih šipki u popravljene sljubnice

2.2.4.2 Sanacija pukotina – injektiranje i prezidavanje

Sanacija pukotina se provodi s ciljem da se povрати postojeća čvrstoća i cjelovitost zidanog zida. Najčešće se to provodi injektiranjem pukotina, a sam postupak kao i materijal za injektiranje ovisi o tipu зида i širini pukotina. Izrazito uske pukotine širine do 0,5 mm, injektiraju se u pravilu odvija epoksi mortom (ljepilom) ili sličnim materijalom.

Ako se radi o pukotinama od 0,5 mm do 10 mm onda se koristi smjesa morta u odgovarajućem omjeru vapna, cementa i pijeska odgovarajuće granulacije, a pukotine širine veće od 10 mm najčešće ekspanzijskim materijalima uz dodatak pojačanja ili se vrši prezidavanje zida na tom dijelu.

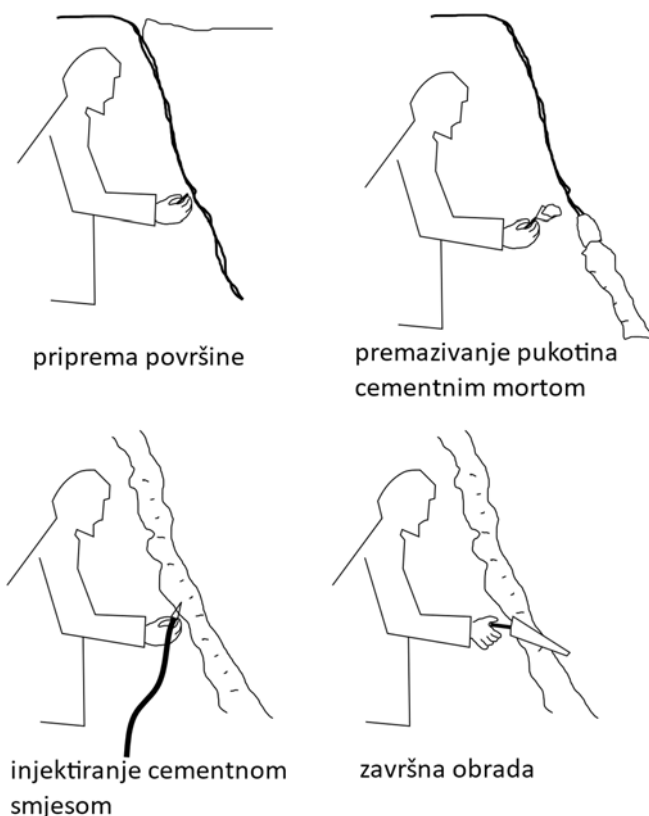
Postupak injektiranja zidanih zidova provodi se u principu na sljedeći način da se sa svake strane pukotine u širini od 50-60 cm zid očisti od žbuke i prašine. Zatim se uzduž pukotine na razmacima 30 do 50 cm izbuše rupe u koje se postave cijevi promjera 12 mm (najčešće s injektorima). Cjevčice se učvrste cementnim ili eventualno epoksi mortom. Pukotine se zatvore cementnim mortom s obje strane zida po cijeloj duljini (između cjevčica). Cjevčice se začepi, a zatim se otvaranjem cjevčica u parovima pukotine isperu vodom i ispušu zrakom. Nakon toga slijedi faza injektiranja. Pukotine se injektiraju odozdo prema gore i to uglavnom s manjim tlakom od nekih 0,03 N/mm².

Ovisno o korištenom procesu postoji nekoliko rješenja za injektiranje:

- Injektiranje pod tlakom – najčešće se koristi (Slika 2.28).
- Gravitacijsko injektiranje – koristi se kod jako oštećenih zidova.
- Vakuumsko injektiranje se koristi kod manjih intervencija uglavnom kod manjih pukotina (npr. kod statua). Injekcijska smjesa mora biti izrazito tekuća.

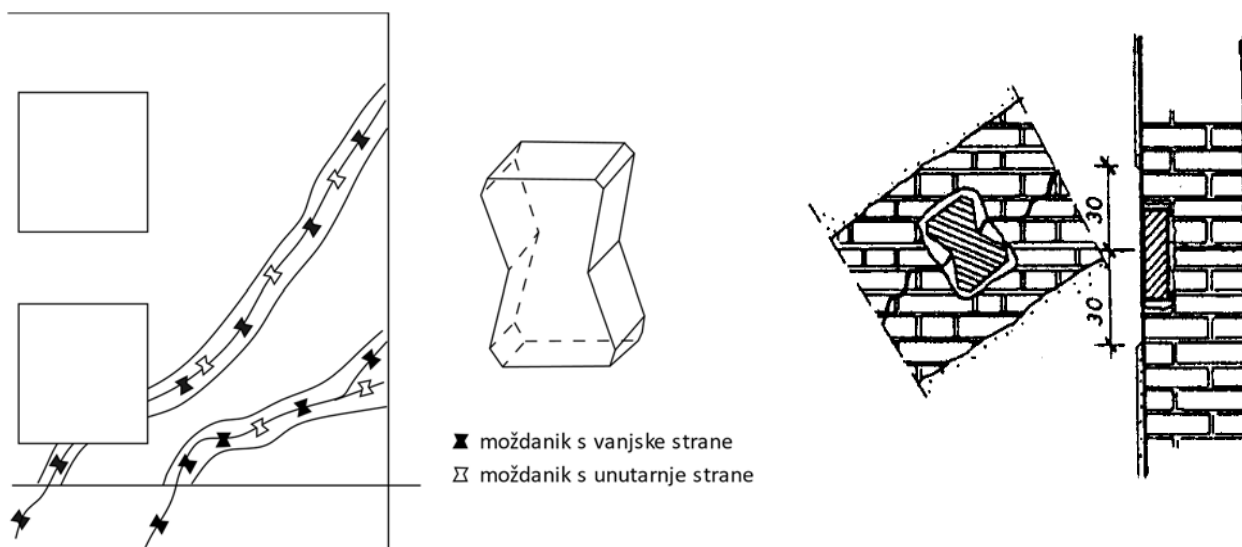
Kod starih građevina poželjno je da se koristi anorganska smjesa i to slična vapnenom mortu radi kompatibilnosti.

Organske mortove (polimerni mortovi i epoksi) treba koristiti gdje je potrebna izrazito kruta i otporna veza.



Slika 2.28 Postupak injektiranja zidanih zidova (lijevo) i fotografija injektiranja (desno)

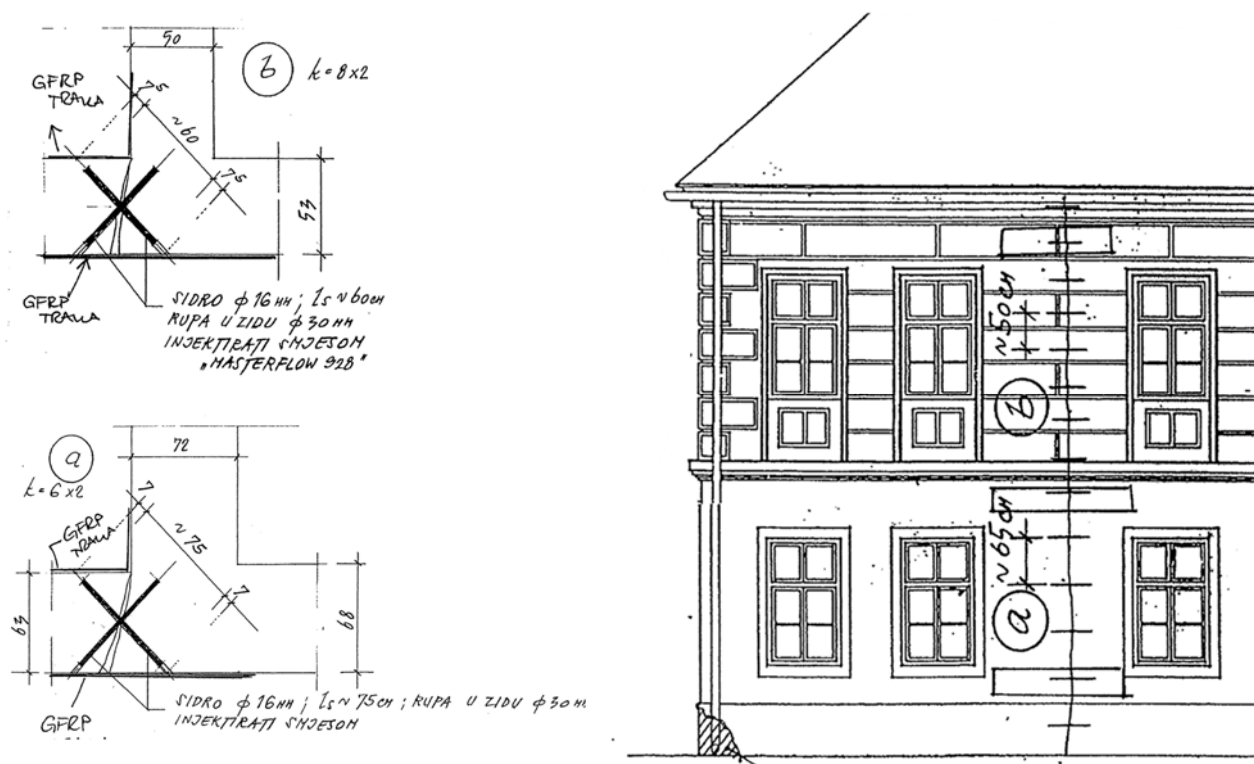
Ako su pukotine veće od 6-10 mm, onda se uz injektiranje pukotine radi i pojačanje pukotine ubacivanjem betonskih moždanika (Slika 2.29) ili čeličnih šipki.



Slika 2.29 Pojačanje pukotine moždanicima

Armiranobetonski X-moždanici se ugrađuju uzduž pukotine i to naizmjenično na obje strane zida na razmaku 50-100 cm. Ugrađuju se u pripremljene rupe i onda zapune mortom.

Slično se radi i s čeličnim šipkama koje se postavljaju pod kutom od 45° u odnosu na pravac pukotine.

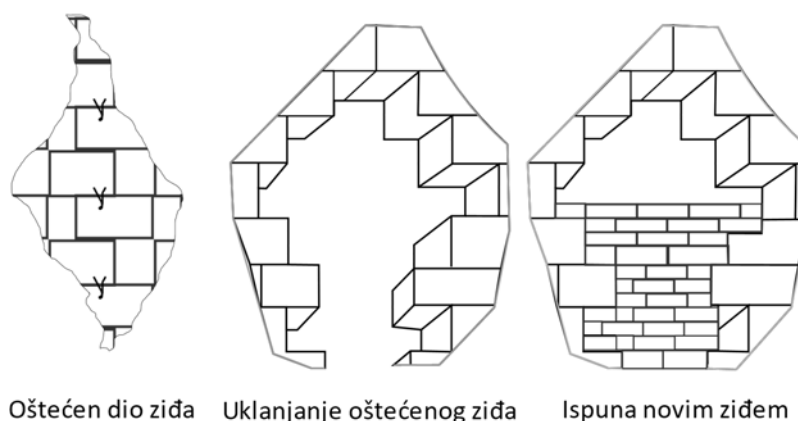


Slika 2.30 Pojačanje pukotine čeličnim šipkama

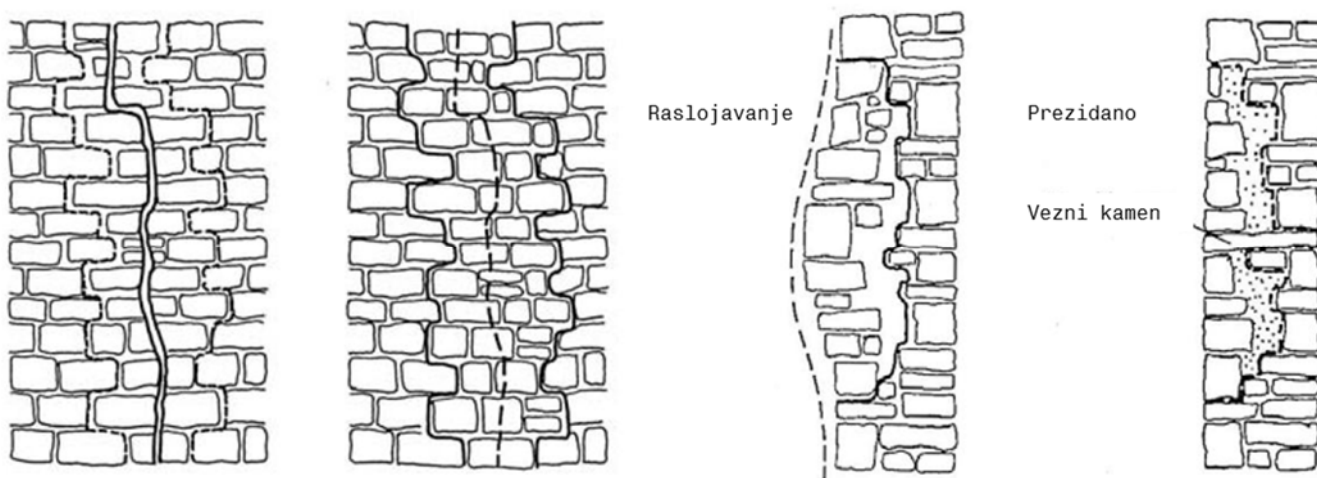
Ako su pukotine velike i uz to je došlo do oštećenja zidnih elemenata onda je najbolje te dijelove zida prezidati što je češći slučaj kod kamenog зида, ali i kod opečnog.

Prezidavanje je poželjno napraviti po mogućnosti originalnim materijalom. Ako ne postoji mogućnost da se oštećenje prezida ili obnovi s originalnim materijalom onda je potrebno pokušati pronaći što sličniji materijal i svakako osigurati vezu starog i novog zida čeličnim vezama ili zaklinjavanjem (Slika 2.31).

Važno je napomenuti da betoniranje segmenata zida nije dopušteno zbog štetnih posljedica u potresu.



Slika 2.31 Prezidavanje oštećenja novim tipom зида

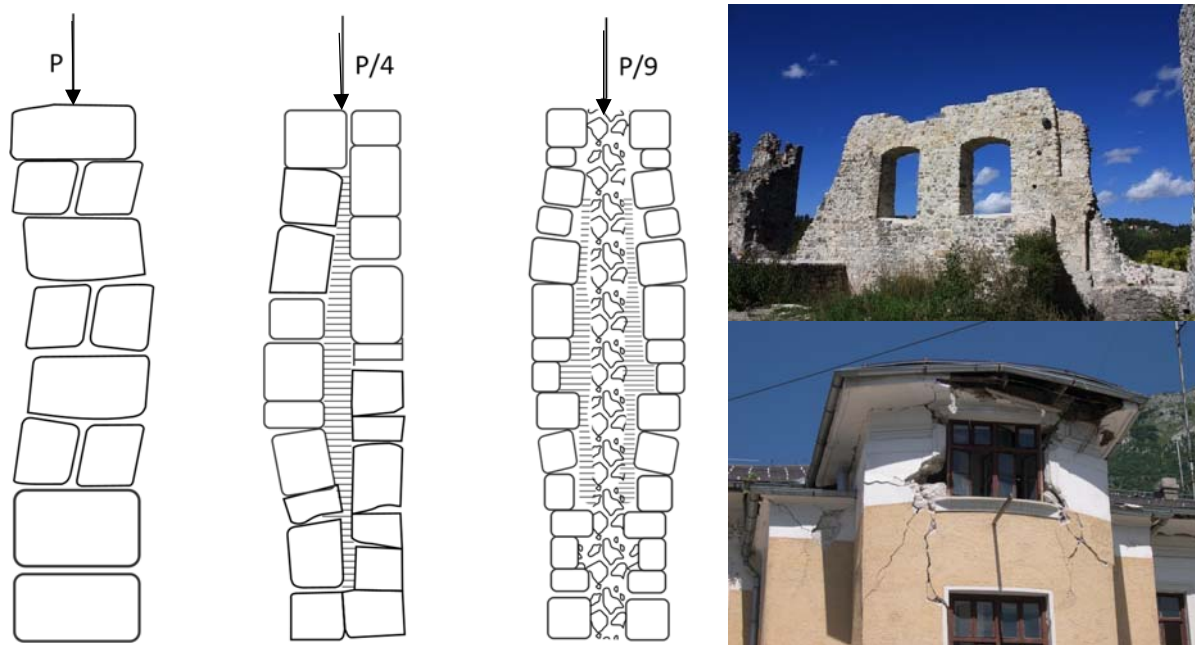


Slika 2.32 Prezidavanje raslojenog зида s originalnim materijalom

Osim prikazanih tehnika sanacija, pukotinu je moguće sanirati pomoću FRM sustava opisanog u poglavlju specijalnih tehnika pojačanja (2.4.3).

2.2.4.3 Injektiranje šupljih zidova

Zidovi kod starih građevina su često izvedeni kao višeslojni zidovi. Takvi zidovi redovito imaju nepravilne zidne vezove na vanjskim stranama, a između njih je kameni nabačaj s većim brojem šupljina. Ti zidovi su osjetljivi i na vertikalno opterećenje, ali i u potresu. Prikaz oštećenja uslijed vertikalnog opterećenja i potresa (Slika 2.33).



Slika 2.33 Oštećenja zida uslijed vertikalnog opterećenja i potresa



Slika 2.34 Fotografija izvedbe injektiranja zidova i prikaz učinka injektiranja na nosivost

Problem nepovezanosti materijala u takvim zidovima se najčešće rješava injektiranjem cementnom injekcijskom smjesom (90% Portland cement i 10% pucolana).

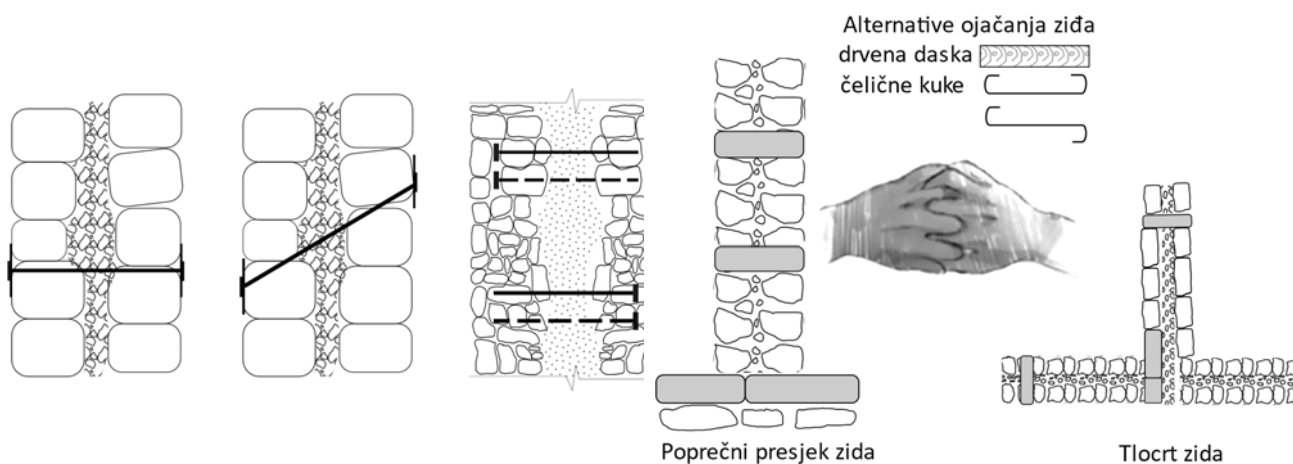
Ovisno o količini šupljina priredi se injekcijska smjesa i kroz pukotine se zapune sve šupljine unutar zida čime se postiže odgovarajuća kompaktnost i povećana nosivost.

Postupak injektiranja se najčešće provodi jednostrano, a kod iznimno debelih zidova i dvostrano. Razmak između mjesta injektiranja je približno 50 cm (4 kom na m²). Cijevi za injektiranje moraju biti duboke oko 2/3 debljine zida. Zidovi se pune injekcijskom smjesom sve dok u prvoj cijevi iznad injekcijska smjesa ne počne izlaziti. Puna se pod niskim tlakom i to često gravitacijski.

2.2.4.4 Poprečno povezivanje zidova

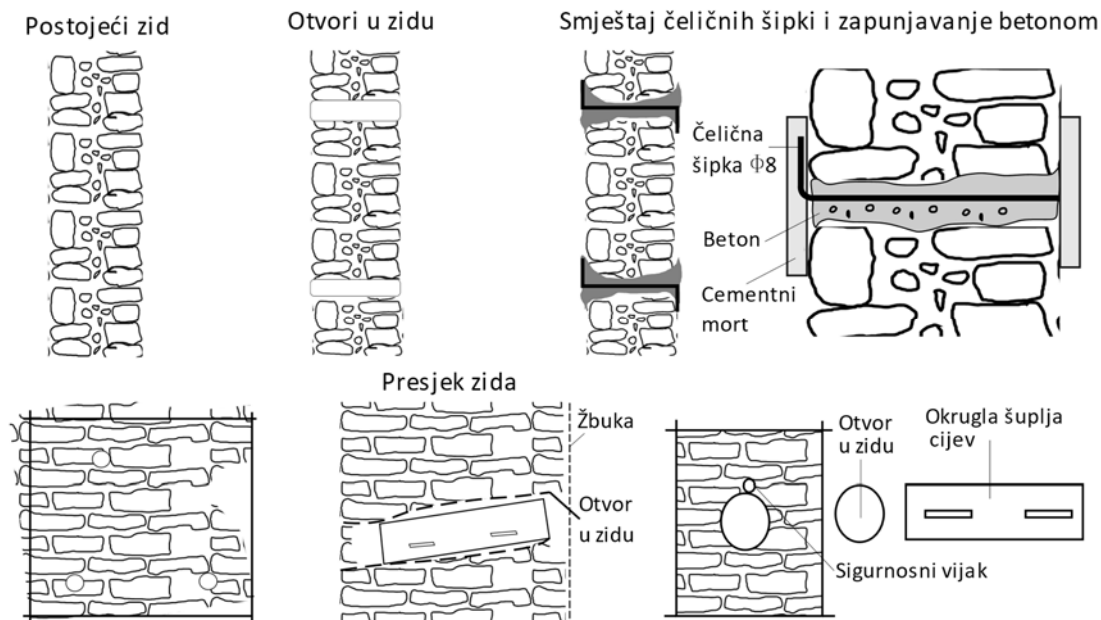
Metoda za bolje povezivanje dva sloja zida (kod višeslojnih zidova) kako bi se izbjeglo odvajanje od središnje jezgre koja je od grubljeg i slabijeg materijala. Ova metoda koristi se samostalno ili u kombinaciji s injektiranjem.

Poprečno povezivanje se ostvaruje metalnim sidrima koja prolaze kroz zid (Slika 2.35 lijevo), a kod kamenih zidova može se ostvariti i pomoću veznih kamenih elemenata (Slika 2.35 desno).



Slika 2.35 Poprečno povezivanje metalnim sidrima (lijevo) i veznim kamenim elementima (desno)

Pojačanja se mogu izvesti i s betonskim vezama.



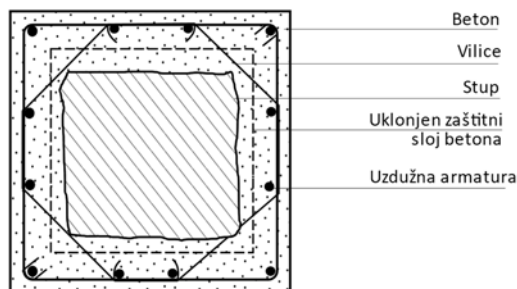
Slika 2.36 Pojačanje zida betonskim vezama

2.2.4.5 Pojačanje zidanih stupova omotačem i ovijanjem

Često imamo situaciju da su zidani ili kameni stupovi fizički oštećeni (otkrhnuti ili degradirani), imaju pukotine koje ugrožavaju mehaničku otpornost i stabilnost ili je jednostavno u rekonstrukciji utvrđeno da nemaju potrebnu nosivost. Često smo skloni postojeće stupove zamijeniti novima armiranobetonskima ili novim kamenim, međutim to često rezultira skupim podupiranjem i duljim vremenom izvedbe.

Izvedbom AB obloge, slično kao kod postupka povećanja presjeka AB elementa, može se osigurati kompaktnost stupa i povećanje nosivosti. Moguća su oštećenja zida u vidu rubnog drobljenja zida ili razvoja vertikalne pukotine.

Najjednostavnije je obući zidani zid u AB stup (Slika 2.37) čime se povećava tlačne čvrstoća i duktilnosti, ali se zadire u prostor.



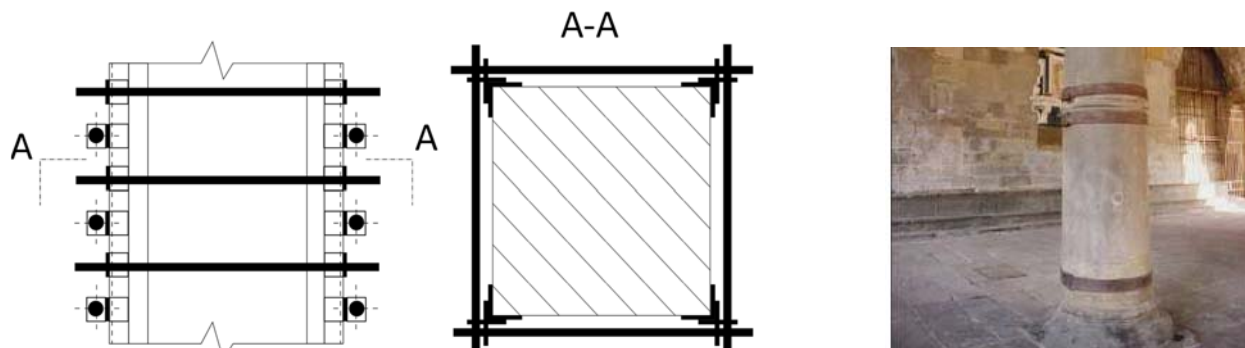
Slika 2.37 Objašnjenje zidnog zida u AB stupu

Pojačanje se može postići i postavljanjem čeličnih omči (Slika 2.39). Isto vrijedi i za pojačanje AB stupova.

Kameni stupovi se često pojačavaju na vrhu i dnu s čeličnim omčama. To su inače mjesta gdje se najčešće pojavljuju pukotine zbog zakretanja elemenata koja se oslanjaju na stupove.



Slika 2.38 Oštećenje zidanih stupova



Slika 2.39 Pojačanje kvadratnih i kružnih presjeka čeličnim omčama

Kod zidanih stupova, ako je potrebno da ostane vidljiva opeka, pojačanje se može osigurati i postavljanjem čeličnih šipki u sljubnice.

Osim prikazanih pojačanja stupova, moguće je također izvesti i pojačanje ferocementnom oblogom ili FRP-om. Ferocement obloga je tanka obloga koja se sastoji od tankog sloja cementnog morta i tankih čeličnih žica.



Slika 2.40 Primjer pojačanja stupova ferocementnom oblogom, CFRP-om i prikaz sanacije kiparskih elemenata

2.2.4.6 Zapunjavanje (zazidavanje) otvora u zidovima i pojačanje nadvoja

Često u rekonstrukcijama ili sanacijama imamo potrebu za izvedbom novih otvora ili proširenjem postojećih. Najjednostavniji način je izvedba novog nadvoja postavljanjem čeličnih profila. Najbolji način je da se nadvoj izvodi iz više profila kako bi se omogućila izvedba bez podupiranja.

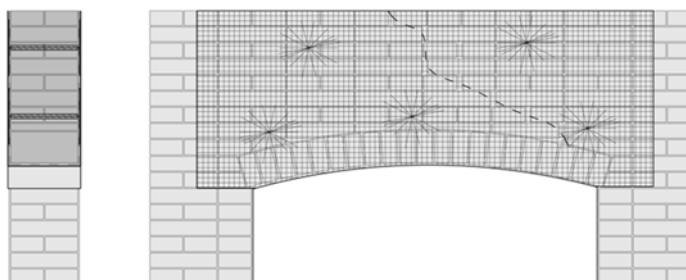
Umjesto čeličnih nadvoja mogu se izvesti i AB grede koje se u pravilu izvode kao dvije grede jedna pored druge. Uvijek oslonac mora biti: čelični lim ili betonska papučica.

Prema potrebi kod otvora koji se ne koriste ili kod nekih zaostalih niša otvori bi se mogli zazidati (Slika 2.41). Tako se povećava nosivost i zida zbog veće površine s tim da materijal kojim se zida treba biti sličan postojećem okolnom i potrebno je osigurati povezivanje.



Slika 2.41 Zazidani otvor u zidu

Pojačanje nadvoja može se izvesti i IMG metodom (*Inorganic Matrix Grid*), odnosno FRP mrežama, takozvanim FRCM sustavom. Prednost ove vrste ojačanja je u tome što se ne mijenja masa ni krutost konstrukcija, a povećava se posmična čvrstoća i duktilnost.



Slika 2.42 Ojačanje nadvoja FRCM sustavom

2.2.4.7 Pojačanje zidanih vertikalnih elemenata mrežama čeličnih traka

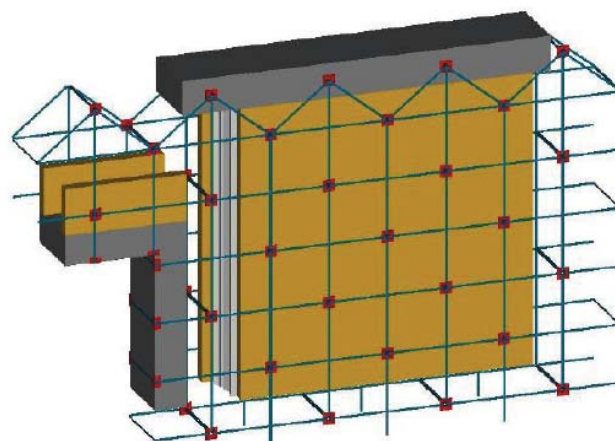
Pojačanje mrežama čeličnih traka je jednostavna i učinkovita metoda ojačanja zidanih elemenata pri čemu se osigurava povećanje nosivosti зида ili vraćanje u prvobitno stanje. Najveća prednost je jednostavna montaža u pogledu materijala i izvedbe te ova metoda ne zahtijeva posebne kvalifikacije ni specijalne tehnologije.



Slika 2.43 Grid od čeličnih traka u dva ortogonalna smjera

2.2.4.8 Trodimenzionalno ojačanje (omeđivanje) zidanih elemenata

Trodimenziionalna mreža čeličnih traka može se koristiti za povezivanje i prednapinjanje зида. Jedna od takvih metoda se naziva CAM (*Active Confinement of Masonry*) gdje se čeličnim trakama debljine 0,8mm i širine 20mm stvori mreža vertikala i horizontala. Razlog zašto je smatramo trodimenziionalnom je taj što obavija zid i u trećem ortogonalnom smjeru penetrirajući u debljinu зида. U trakama se ostvaruje djelomično prednapinjanje čime se omogućuje povećanje i tlačne i posmične otpornosti зида.

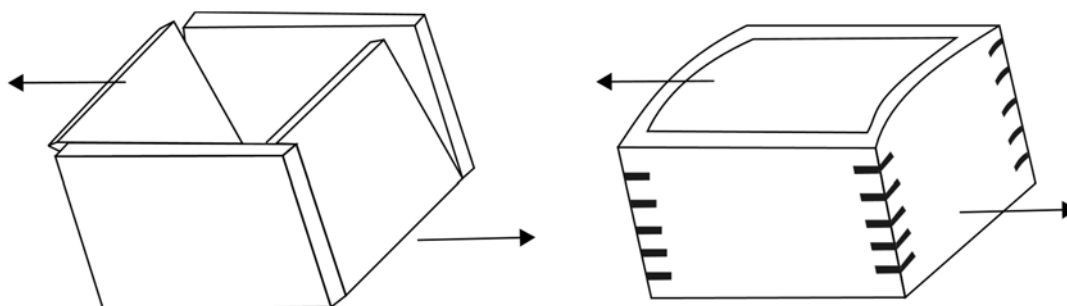


Slika 2.44 Ojačanje trodimenziionalnim CAM sustavom

2.3 GLOBALNE INTERVENCIJE

- Pojačanje zidanih zidova dodavanjem armiranih cementnih slojeva
- Pojačanje zidanih zidova s polipropilenskim mrežama
- Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida
- Pojačanje građevina s horizontalnim zategama
- Pojačanje zidova pritezanje (prednapinjanjem) i armiranjem
- Pojačanje konstrukcije izvedbom AB serklaža
- Pojačanje konstrukcije izvedbom novih AB zidova
- Pojačanje konstrukcije izvedbom AB i čeličnih okvira

Slaba veza između dva konstrukcijska elementa uzrokuje gubitak cjelovitosti konstrukcije i jedan je od glavnih razloga oštećenja zidanih konstrukcija u potresu. Dobra veza između dva konstrukcijska elementa je nužna za osiguranje ponašanja konstrukcije kao „kutije“.



Slika 2.45 „Box“ efekt

2.3.1.1 Pojačanje zidanih zidova dodavanjem armiranih cementnih slojeva

Ova tehnika pojačanja zidanih zidova je jedna od najčešće primjenjivanih postupaka pojačanja zidanih zidova bilo kamenih bilo od opeke. Koristi se kada je zid jako oštećen ili postoji potreba za (posmičnim) pojačanjem zidanih zidova bilo u potresu ili uslijed drugih djelovanja. Naravno primjenjiv je kod zgrada koje nisu zaštićene kao kulturno i povijesno dobro.

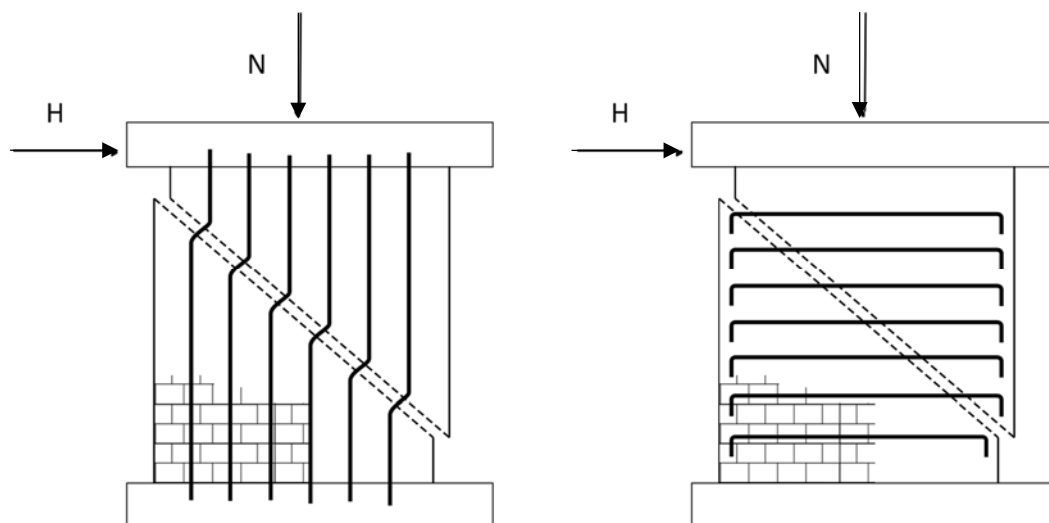
Pojačanje zida se izvodi tako da se obostrano izvodi sloj cementne žbuke ili betona koji je armiran (Slika 2.46). Dobije se kompozitni zid gdje je u sredini ziđa, a s vanjskih strana sloj betona koji je obično nekih 3-8 cm ako je torkretiranje, odnosno do 16 cm ako se beton lijeva u oplatu.



Slika 2.46 Pojačanje armiranim slojem betona [4]

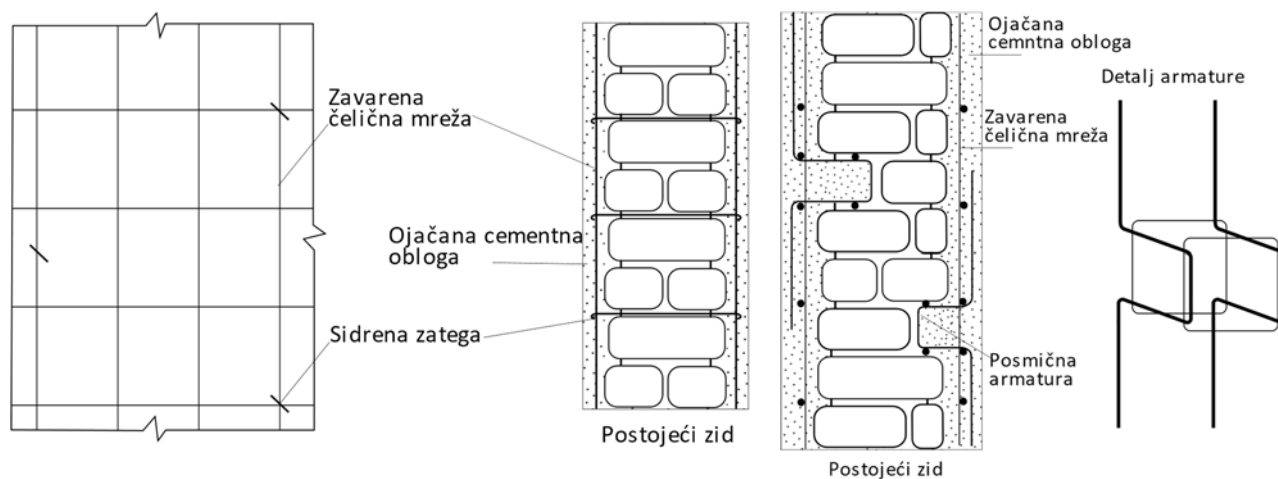
Armatura sa slojem betona omogućuje prihvrat posmičnih sila i osigurava kompaktnost nakon pojave pukotine u zidanom dijelu zida (slično je ponašanju armiranog ziđa). Ova tehnika

pojačanja se provodi tako da se ukloni žbuka sa zida ako postoji. Labave opeke ili kameni elementi se uklone i sve postojeće pukotine se injektiraju mortom i sl. (Slika 2.47).



Slika 2.47 Pojačanje armiranim slojem betona

Zatim se kroz zidove izbuše rupe (Slika 2.48 lijevo) u koje se postave vezne šipke $\varnothing 8-12$ pri čemu se prostor oko rupe zapuni cementnim mortom (min. 4 kom/m², a preporučuje se 6-9 kom/m²). U slučaju da su potrebna veća pojačanja ili da se radi o kamenom zidu onda se rade džepovi (niše) u zidu koje se obrade armaturom tako da mogu prenijeti silu sa zida na betonsku oblogu (Slika 2.48 desno).

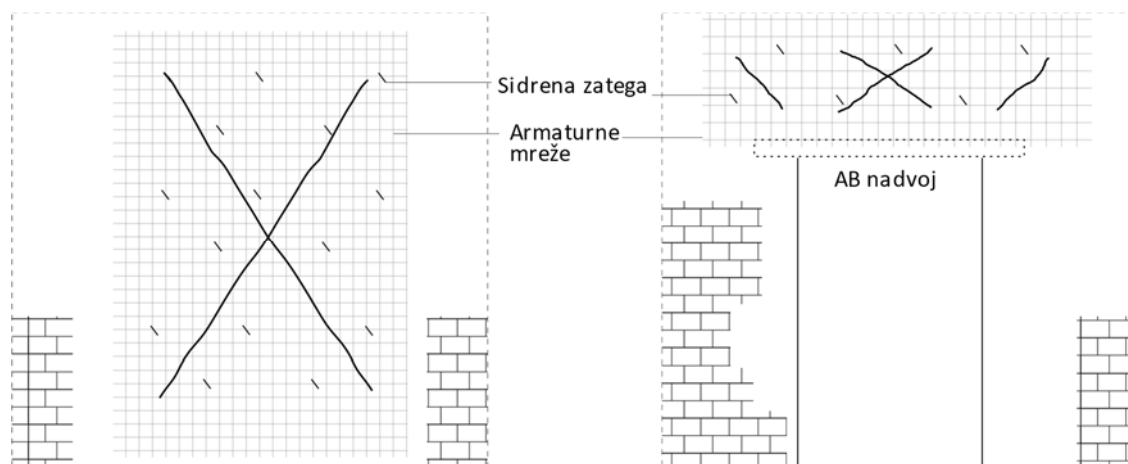


Slika 2.48 Postupak povezivanja zida s oblogom, veznim šipkama (lijevo) i džepovima (desno)

Nakon toga se površina betona dodatno ispere vodom i postavi se armatura. Najčešće su to mreže s dodatnim pojačanjima uz otvore ili se čak može složiti mreža od vertikalnih i horizontalnih šipki.

Nakon što je postavljena armatura, torkretira se zid ili se postavlja oplata i betonira novi sloj zida. Kod ove tehnike pojačanja potrebno je torkretiranje izvesti s obje strane zida i dobro ih povezati kako bi se dobio kompaktni zid. Zid se na ovaj način može značajno pojačati kao na primjer kod kamenog zida. Kameni zid debljine $t = 60$ cm izvedbom 10 cm sloja torkreta s armaturom može povećati posmičnu nosivost zida za nekih 3-6 puta.

Torkretiranje zida se može primijeniti i kao pojačanje zida uslijed nastalih pukotina ili značajnijeg oštećenja zida.



Slika 2.49 Pojačanje zida armiranobetonskom žbukom (torkretiranje)



Slika 2.50 Fotografije izvedbe armiranobetonske žbuke (izvor: www.arhitekti.hr)

2.3.1.2 Pojačanje polipropilenskim mrežama

Koriste se polipropilenske trake koje su jeftine, a često ih se može nabaviti i kao otpadni materijal. Od traka se formira mreža koja se pričvrsti na zid. Povećava duktilnost i nosivost zida te ograničava raspucavanje (Slika 2.51).

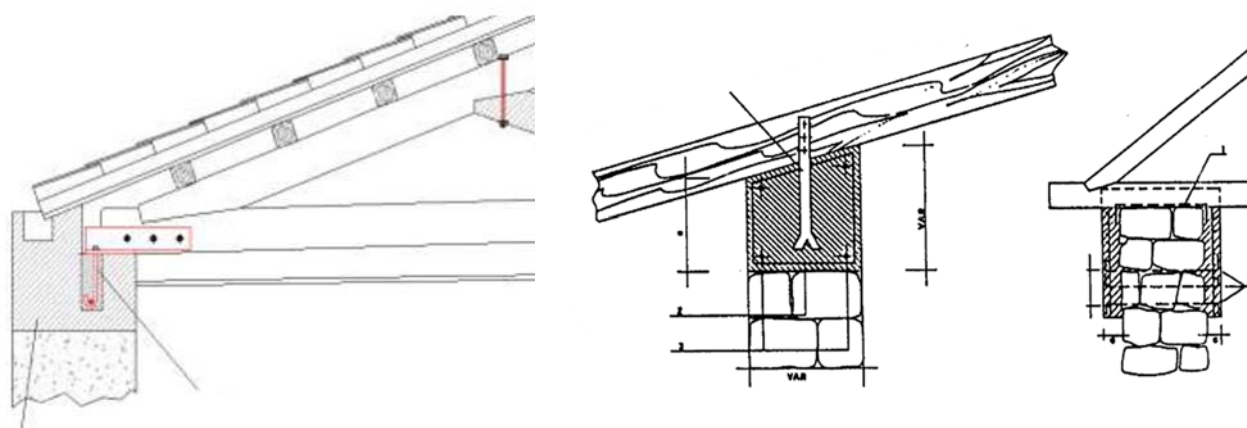
Da bi se trake zaštitile od štetnih ultraljubičastih zraka obvezno je potrebno izvoditi žbuku. Također trake je nužno povezati s ankerima kroz zid. Osigurava prihvatljivu sigurnost za potrese srednjeg intenziteta.



Slika 2.51 Pojačanje polipropilenskim mrežama [4]

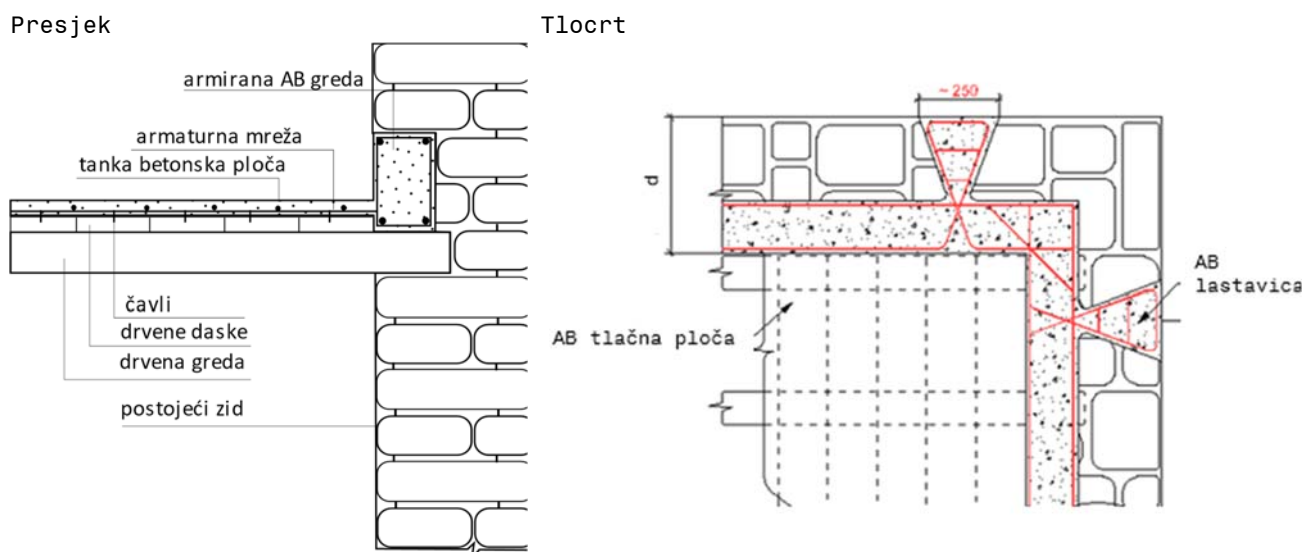
2.3.1.3 Pojačanje stropova i poboljšanje veze između stropa, krova i zida (vidjeti 2.2.1.1 i 2.2.1.5)

U ranijim poglavljima 2.2.1.1 i 2.2.1.5 prikazana su rješenja pojačanja stropova pomoću izvedbe tlačne ploče od dasaka u tri sloja, drvenih ploča od slojevitog furnira, drvene CLT ploče ili izvedbe armiranobetonske tlačne ploče. Također su u poglavlju 2.2.1.5 prikazani načini povezivanja sa zabatnim zidom i nosivim zidom te osiguravanja ponašanja stropne ploče kao krute dijafragme. Navedena pojačanja osim kao lokalna intervencija su dio globalne intervencije jer se ostvaruje bolja povezanost ploče i zidova, a takve su pojačane ploče puno kruće i nisu toliko fleksibilne u vlastitoj ravnini. Povezivanjem stropova i zidova osigurava se cjelovitost konstrukcije za vrijeme djelovanja potresa. Osim prikazanih povezivanja stropnih ploča, potrebno je osigurati povezivanje krovnih greda. Na idućim slikama prikazane su moguće varijante povezivanja.



Slika 2.52 Povezivanje krovne konstrukcije sa zidom

Slijedi prikaz povezivanja AB tlačne ploče sa zidom preko AB serklaža koji se povezuje sa zidom pomoću tzv. „lastavice“. Razmak „lastavica“ je otprilike svakih 2 m po duljini zida. Identičan način spajanja moguć je i kod izvedbe nove AB stropne ploče i njenog povezivanja sa zidom. Osim lastavicom, moguće je povezati novu AB ploču i pomoću čeličnih sidara kao što je prikazano u poglavlju 2.2.1.5.



Slika 2.53 Povezivanje AB tlačne ploče sa zidom pomoću AB serklaža i „lastavice“

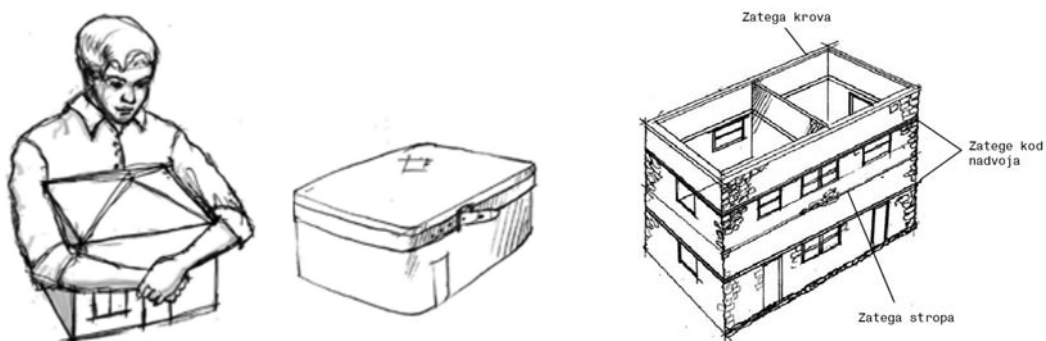
2.3.1.4 Pojačanje građevina horizontalnim zategama

Na ovaj način se dodatno osigurava cjelovitost građevine jer je glavni cilj osigurati da ne dođe do razdvajanja zidova. Posebno je primjenjiva kod zgrada s visokim etažama gdje nije dovoljno samo zidove pridržati u razini stropova i krovova.



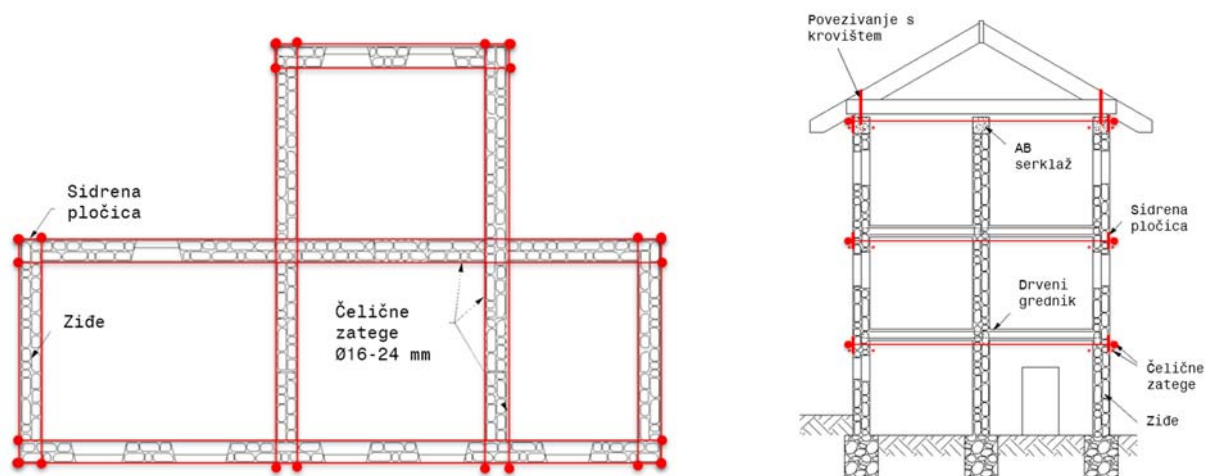
Slika 2.54 Povezivanje zidova s ciljem osiguranja nerazdvajanja visokih zidova [5]

Ovijanje građevine se postiže provlačenjem čeličnih šipki uz zidove ispod stropova i po visini. Povezivanjem se ostvaruje povećanje cjelovitosti.

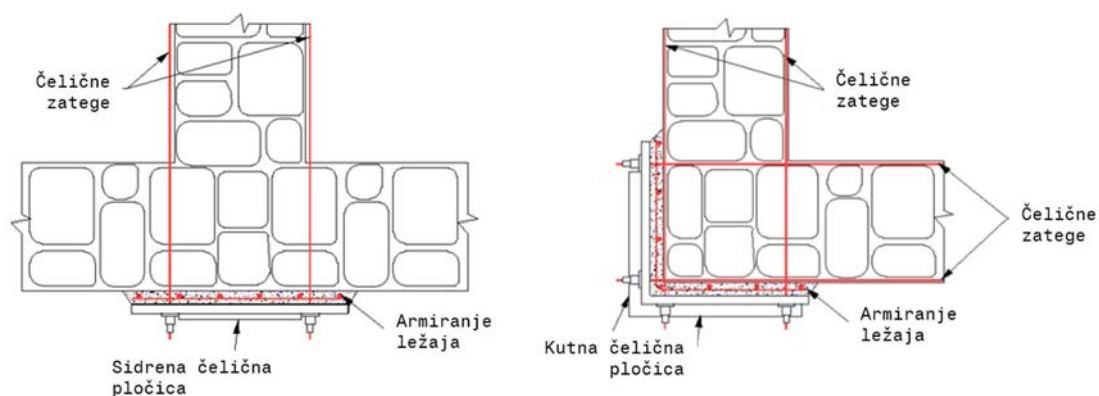


Slika 2.55 Povezivanjem zidova po opsegu čime se povećava integritet [5]

Čelične šipke se provlače uz nosive zidove u visini stropova, a sidrenje je ostvareno na vanjskoj strani zida preko čelične sidrene pločice. Važno je također paziti na detalj i mogućnost proboja sidrene pločice prilikom djelovanja sile u zatezi, stoga je potrebno ugraditi sidrenu pločicu dovoljne širine i/ili visine.

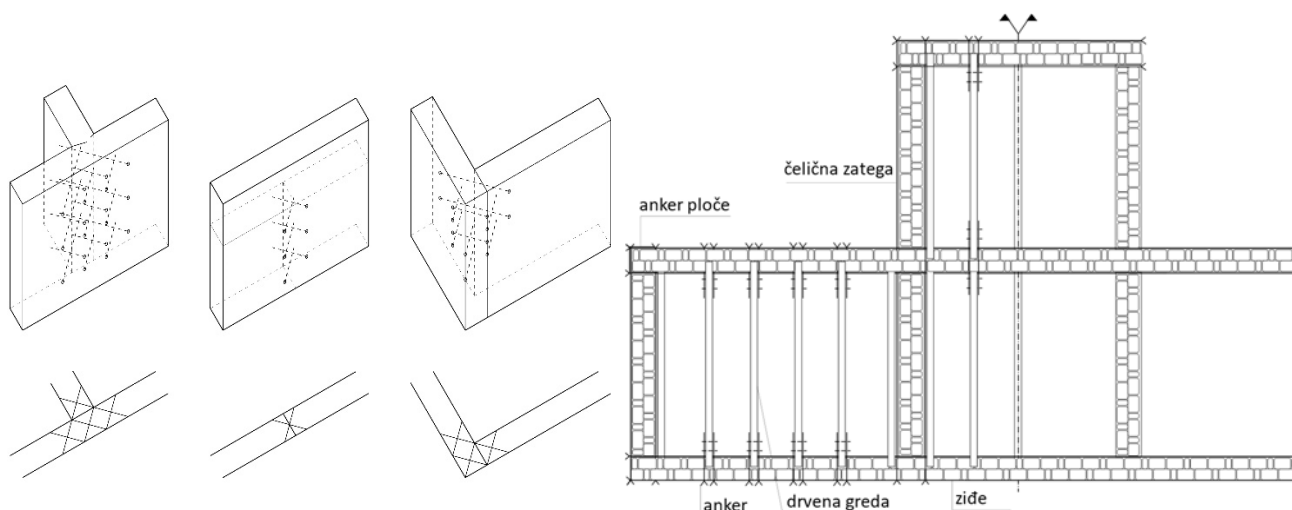


Slika 2.56 Prikaz položaja zatega na primjeru



Slika 2.57 Prikaz detalja sidrenja

Osiguranje kompaktnosti i cjelovitosti građevine, najbolje se postiže kombinacijom povezivanjem stropova i uglova zidova kako je i prikazano na idućoj slici. Povezivanje zidova je moguće dodatno pomoću čeličnih šipki.



Slika 2.58 Prikaz povezivanja stropova i povezivanja uglova

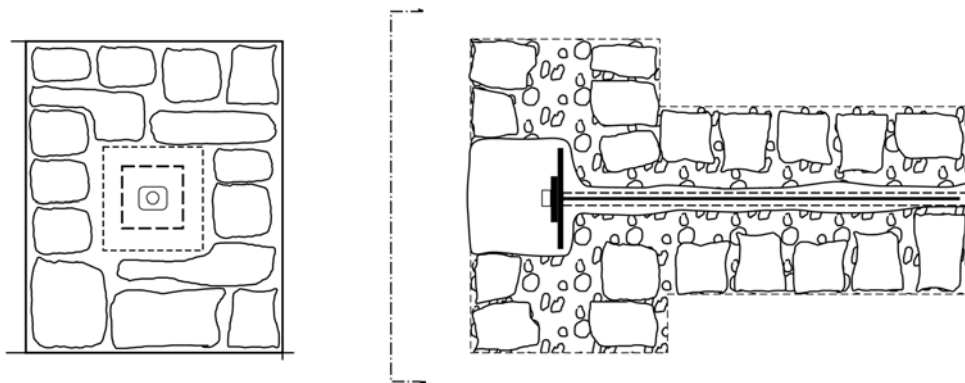
Zatege se postavljaju i u krovnoj konstrukciji te kod lukova i svodova radi osiguranja od otkazivanja zidova i za slučaj uobičajenog opterećenja, a ne samo za slučaj potresa. Zatege su uobičajeni element koji se lako može uklopiti u oblikovanje različitih konstrukcija.



Slika 2.59 Izgled izvedenih pojačanja [4]

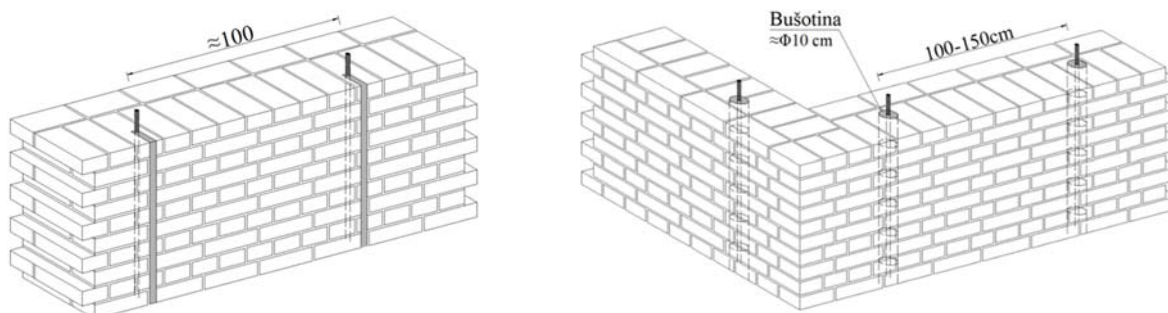
2.3.1.5 Pojačanje zidova pritezanjem (prednapinjanjem) i armiranjem

Prednapinjanjem se kao i kod betona unosi tlak u zid što povećava nosivost zida jer sprečava nastanak vlačnih naprezanja u zidu, a samim tim i pojavu pukotina. Osim toga, i kada se pojave pukotine, ovakvo pojačanje osigurava funkciju veznih šipki te osigurava cjelovitost konstrukcije. Kroz zid ili pored zida se provlače kabeli koji su prednapinju (Slika 2.60).



Slika 2.60 Prednapinjanje zidova

Zid se može pritezati (prednapinjati) vertikalno i horizontalno. Problem je s bušenjem, ali bez problema se može izvesti prednapinjanje zgrada s 4 kata. Prostor gdje prolaze kabeli se može zapuniti, a i ne mora (ovisno o tipu kabela). Postavljanjem armature u sljubnice može se povećati nosivost na poprečne sile, a kod stupova i na vertikalno opterećenje (Slika 2.61).



Slika 2.61 Postavljanje armature u sljubnice

Također, zid se može bušiti ili zarezivati naknadno te se može postavljati armatura i vertikalno i horizontalno ovisno o načinu pojačanja.



Slika 2.62 Prikaz izvedbe prednapinjanja [4]

2.3.1.6 Pojačanje konstrukcije izvedbom AB serklaža

Izvedbom vertikalnih i horizontalnih serklaža dodatno se osigurava cjelovitost zidane konstrukcije, povećava se duktilnost i nosivost. Ovo je dosta jednostavan model gdje se na spoju zidova i u razini stropova izreže ili ukloni („ištema“) zidani zid i izvedu serklaži. Poželjno je izrezivanje zida izvesti tako da se osigura zupčasti spoj i bolja veza zida i novog serklaža.

Horizontalni serklaž se izvodi kada stropna konstrukcija nije AB nego je drvena greda. Tako se dodatno osigura bolja veza drvenog grednika i AB serklaža te bolja veza sa zidom.

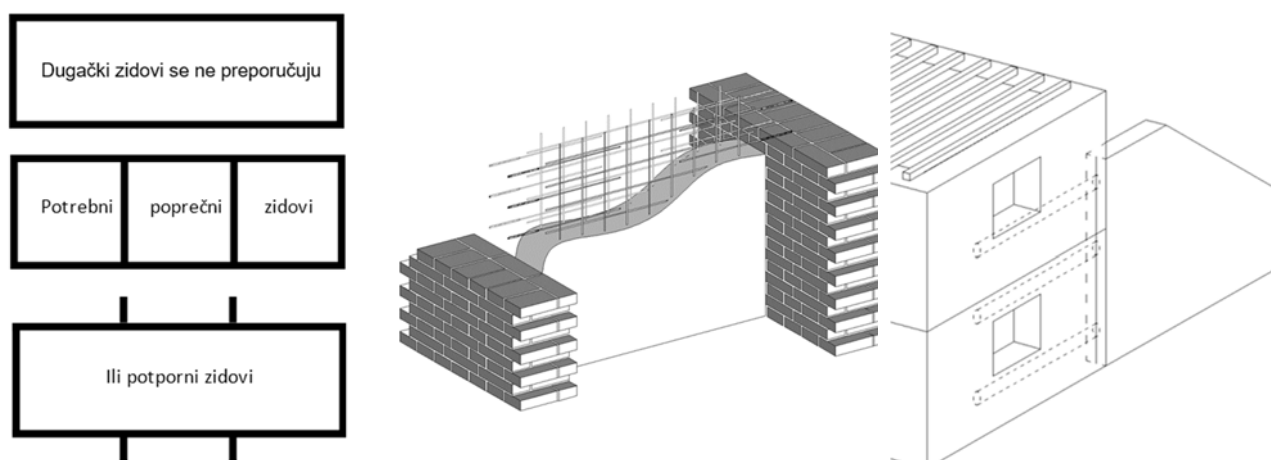
Ponekada se serklaž ne izvodi u klasičnom obliku nego se armatura postavlja u prethodno izbušene rupe ($\varnothing 100 - 150 \text{ mm}$) i zapuni sitnozrnim betonom. Izvedba horizontalnog serklaža na spoju s krovom se može izvesti kao što je ranije prikazano na slici 2.52.



Slika 2.63 Vertikalni serklaž; horizontalni serklaž [4]

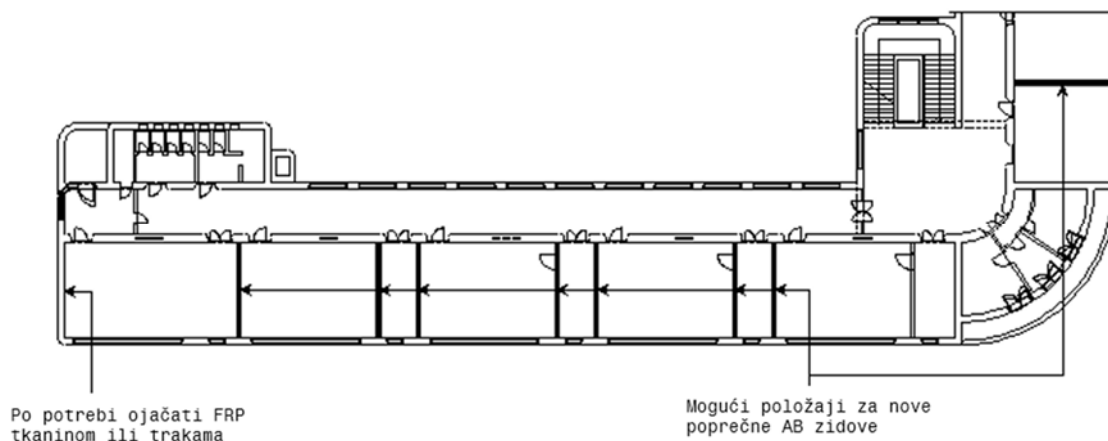
2.3.1.7 Pojačanje konstrukcije izvedbom novih AB i zidanih zidova

U slučaju da postojeći zidovi nisu dostatni, mogu se dodati novi zidovi ili zidani ili armiranobetonski (Slika 2.64). To je čest slučaj kod građevina kojima nedostaje jedan smjer nosivih zidova.

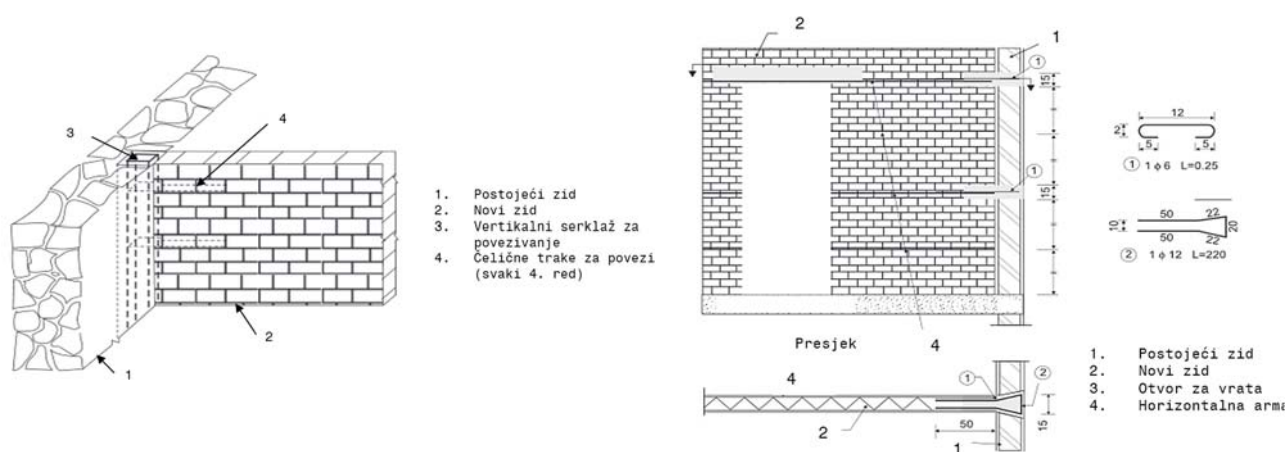


Slika 2.64 Dodavanje novih zidova (lijevo) i varijanta izvedbe (sredina i desno)

Postupak je jednostavan. Prvo se izvede novi temelj na mjestu novog zida. Na temelju se izvede novi zid (zidani ili AB) koji se poveže sa susjednim zidanim zidovima i sa stropnom konstrukcijom. Postupak je isti kao kod pojačanja betonskih konstrukcija.



Slika 2.65 Dodavanje novih zidova na jednom primjeru zgrade



Slika 2.66 Primjeri izvedbe novih zidova i povezivanja s postojećim

2.3.1.8 Pojačanje konstrukcije izvedbom AB i čeličnih okvira

Kako bi se povećala seizmička otpornost, ali i otpornost na vertikalno opterećenje, okviri trebaju imati dostatnu krutost kako se ne bi dogodilo da se zidani zid uruši prije nego dođe do aktiviranja nosivosti AB okvira ili čeličnog okvira.



Slika 2.67 Pojačanje konstrukcije izvedbom čeličnih i AB okvira [4]

Okviri su pogodni za lokalna pojačanja konstrukcije jer omogućuju jednostavnu izvedbu i prolaz na tom mjestu. Čelični okviri su uz to i reverzibilni tj. mogu se ukloniti u nekoj drugoj rekonstrukciji. Često se zadržavaju obodni zidovi, a unutar prostora se izvodi

jedinstvena čelična konstrukcija koja sa zidanim zidovima preuzima sva vertikalna i horizontalna opterećenja.

2.3.1.9 Pojačanje konstrukcije izvedbom drvenih okvira

U Portugalu je poznata tehnika pojačanja zidanih zidova drvenim okvirima zvana „Pombalino“ te predstavlja jedno od reprezentativnijih primjera seizmičkog ojačanja, a nastala je davne 1755. nakon razornog potresa u Portugalu.

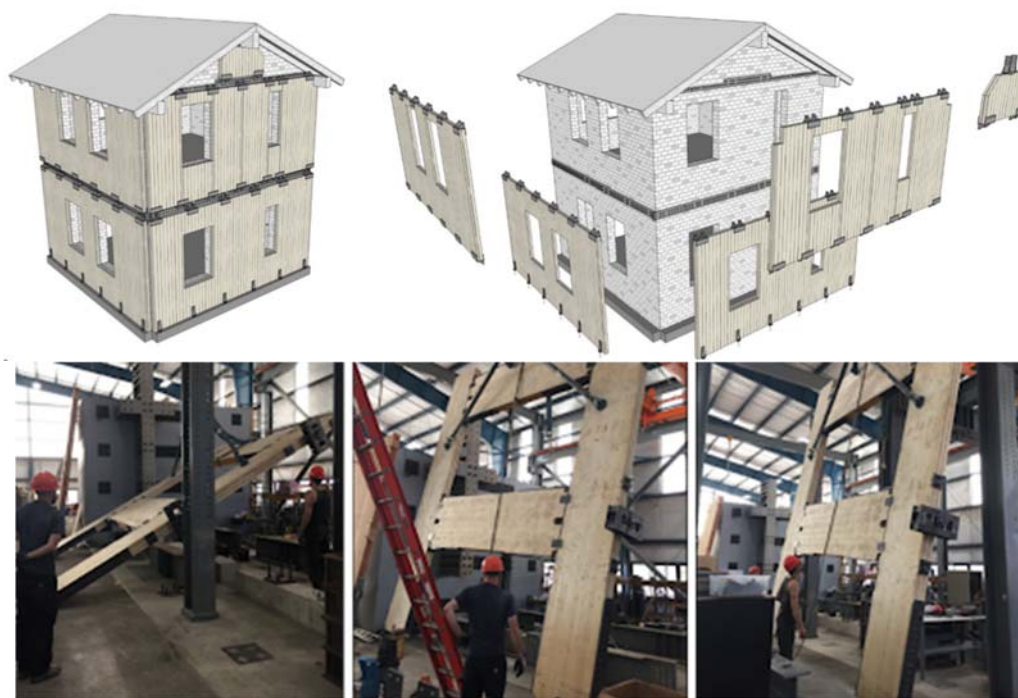


Slika 2.68 Primjer „Pombalino“ drveni okviri

Druga mogućnost je umetanje nepovezanih okvira koji omogućavaju djelomični kolaps konstrukcije.

2.3.1.10 Pojačanje zidanih konstrukcija CLT-om

Neomeđeno zide se dobro ponaša isključivo pri gravitacijskom opterećenju, međutim prilikom horizontalnog opterećenja može doživjeti otkazivanje unutar i van ravnine. Za pojačanje zidanih konstrukcija na potresno djelovanje, sve se više provodi istraživanja na temu CLT (Cross laminated timber) panela. CLT je inženjerski drveni proizvod koji nastaje lijepljenjem više slojeva lameliranih ploča tako da je svaki sloj orijentiran okomito na susjedne. CLT se smatra atraktivnim građevinskim materijalom koji se lako ugrađuje, obnovljiv je i ima visok omjer čvrstoće i težine.



Slika 2.69 Pojačanje neomeđenog zida CLT-om [6]

2.4 SPECIJALNE TEHNIKE

U praksi postoji niz specijalnih tehnika sanacija i pojačanja zidanih zgrada. U nastavku su navedene one najčešće korištene

2.4.1 Dodatno amortiziranje

Ugrađivanjem amortizera se omogućuje trošenje energije na onim mjestima gdje se očekuju najveće sile i oštećenja. Kod zidanih konstrukcija je to teže budući da se radi o krutim konstrukcijama.

2.4.2 Izoliranje temelja

Temelji se odvajaju od tla i omogućuje se ograničeno kretanje na fleksibilnim elementima. Smanjuje se količina energije koju bi zgrada trebala apsorbirati. Bit je postići veći period titranja zgrade u odnosu kada je oslonjena na tlo.

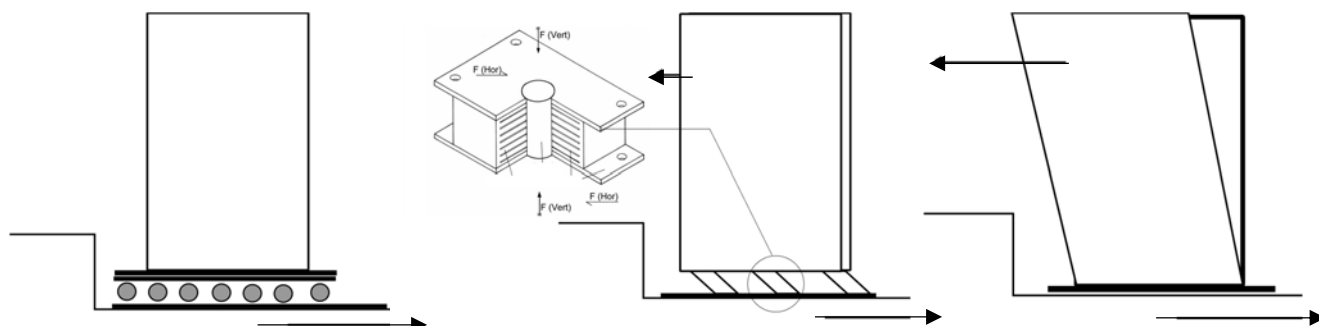
Slika 2.68 prikazuje tri tipa temeljenja. Slika 2.70 desno je slučaj kada je veza između konstrukcije i temeljnog tla potpuno upeta, odnosno konstrukcija je direktno oslonjena na tlo što znači da će pomaci zgrade pri potresnoj pobudi biti značajni. Slika 2.70 lijevo konstrukcija leži na kliznim ležajevima koji je u potpunosti odvajaju od temelja što znači da se zgrada neće zajedno pomicati s tlom u slučaju horizontalnog ubrzanja. Slučaj sa slike 2.70 u sredini vidimo da zgrada ostvaruje relativno male pomake u odnosu na pomake u ležajevima. Takve ležajeve nazivamo elastomernim ležajevima. Sila na konstrukciju može biti i do 5-6 puta manja od konstrukcije koja leži direktno na temeljnom tlu.

Elastomerni ležajevi se sastoje od 3 glavna materijala: olova, gume i čelika.

Guma kao materijal koji se nanosi u slojevima pridonosi fleksibilnosti tako da omogućuje pomake, ali omogućuje povratak konstrukcije u prvobitno stanje. Nakon završetka izvanrednog djelovanja potresa, ležaj (odnosno guma u ležaju) će vraćati konstrukciju u prvobitno stanje i mjesecima kasnije.

Korištenjem čelika u slojevima između gume se sprječavaju vertikalni pomaci dok se u horizontalnom smjeru nesmetano pomiče.

Olovo smješteno u jezgri će služiti kao mjesto trošenja energije („*energy dissipation mechanism*“). Olovo se može deformirati, ali i vraćati u prvobitno stanje pri ponavljajućem opterećenju, bez gubitka čvrstoće.



Slika 2.70 Temeljenje na: kliznim ležajevima; elastomerima; upetim ležajevima

2.4.3 Pojačanje FRP-om

U praksi postoji niz konvencionalnih postupaka sanacija i pojačanja zidanih zgrada koja su navedena u prethodnom poglavlju. Međutim, svi navedeni konvencionalni postupci sanacija su više-manje uspješni u pogledu sanacija i pojačanja (neke čak još uvijek nezamjenjive) ako se ispravno primijene i proračunaju.

Većina navedenih postupaka pojačanja podrazumijeva korištenje čeličnih elemenata koji često narušavaju postojeću konstrukciju građevine.

Primjer izvedbe armirane žbuke ili pojačanje AB oblogom osim povećanja nosivosti ima i niz nedostataka:

- Povećanje težine konstrukcije → potrebno pojačanje temelja,
- Povećanje seizmičkih sila zbog težine betonske obloge,
- Promjene ponašanja konstrukcije pri seizmičkom opterećenju (zidovi su sada znatno krući od nepojačanih),
- Dodatna debljina zida koja smanjuje korisni prostor,
- Brzina izvedbe (potreban dulji period za izvedbu),
- Buka koja je prisutna kod izvedbe,
- Nužnost prekida funkcionalnosti zgrade i iseljavanje stanara za vrijeme izvođenja radova,
- Oksidacija (korozija) armature u uporabi,
- Nedovoljna učinkovitost na kutovima (nije ovijeno).

Sve su to razlozi za stalnim istraživanjem i primjenom novih sustava sanacije i pojačanja zidanih građevina koji neće narušavati nosivost zgrade, bit će ekonomski prihvatljivi, jednostavni za izvedbu i koji neće narušavati estetske zahtjeve zgrade.

Trenutno glavno područje primjene FRP-a u građevinarstvu je kao zamjena za čelik i armaturu.

Najvažnija svojstva FRP u usporedbi s čelikom:

- neosjetljivost na koroziju,
- velika vlačna čvrstoća u smjeru vlakana,
- mala zapreminska težina (oko 6 puta manja),
- dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem (70% vrijednosti početne čvrstoće nakon 2 milijuna ciklusa),
- ne provode struju
- linearno – elastično ponašanje do sloma (neduktilnost),
- koeficijent toplinskog širenja je znatno manji od betona (osim GFRP),
- neotpornost na visoku temperaturu,
- tlačna čvrstoća oko 50% vlačne.

Potpuna zamjena čelika kod AB konstrukcija nije postignuta iz razloga:

- linearno elastično ponašanje FRP-a → duktilnost presjeka manja u odnosu na armiranje čelikom (potrebno ovijanje i dr.),
- za ispunjavanje GSU nužna je primjena FRP-a s većim modulom elastičnosti → ugljična vlakna (skuplja od staklenih ili bazaltnih),
- toplinski koeficijent rastezanja FRP-a je manji nego betona i čelika → nije osigurana kompatibilnost pri promjeni temperature,
- slaba otpornost na požarna djelovanja (nužna žbuka).

Kod zidanih konstrukcija nedostaci FRP-a uglavnom nisu presudni jer:

- Slom pojačanih zidanih konstrukcija uglavnom nastupa degradacijom zida.
- Modul elastičnosti ne mora biti velik pa se mogu koristiti i jeftiniji proizvodi → mogu se koristiti staklena i bazalna vlakna.
- Ima prirodnu zaštitu žbukom ili su elementi skriveni u sljubnicama.

FRP preuzima vlačna naprezanja i treba se postavljati u vlačnom području. Kod tlaka, FRP proizvodi ne povećavaju učinkovitost pojačanog elementa jer imaju manju nosivost na tlak, ali i zbog malih dimenzija često dolazi do lokalne nestabilnosti i odvajanja.

Pojačanje zidane konstrukcije FRP-om se ostvaruje lijepljenjem na zidane elemente ili eventualno mehaničkim sidrenjem pomoću mehaničkih uređaja.

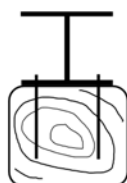
Slijedi prikaz područja primjene

2.4.3.1 Pojačavanje drvenih konstrukcija FRP-om

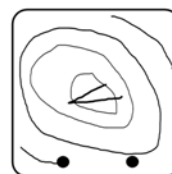
Pojačanje drvenih grednika opterećenih na savijanje izvodi se dodavanjem vlaknima ojačanih lamela i šipki u vlačnoj zoni profila ili na osloncu za povećanje posmične nosivosti. Povećanje vlačne nosivosti kod krovnih greda se dobiva pojačanjem šipkama ili trakama u donjoj vlačnoj zoni.

Na slici 2.72 vidljivo je postavljanje dijagonalnih traka radi povećanja posmične krutosti dijafragme te povezivanje stropne ploče sa zidanim zidovima, a koja može biti izvedena od čeličnih limova ili FRP traka.

Smjernice za proračun FRP-a mogu se pronaći u „*Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*“, a određene države imaju i Nacionalne smjernice za projektiranje FRP-a.



a) Ojačanje FRP I nosačima i povezivanje mehaničkim spajalima drvenu gredu



e) Ojačanje šipkama u vlačnoj zoni



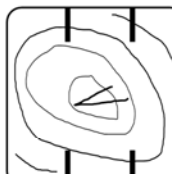
b) Vanjsko ojačanje lijepljenjem lamela ili traka u vlačnoj zoni



f) Ojačanje L trakama u vlačnoj zoni



c) Lijepljenje lamela ili traka u prethodno izrezane ureze u vlačnoj zoni



g) Lijepljenje lamela ili traka u prethodno izrezane ureze u vlačnoj i tlačnoj zoni

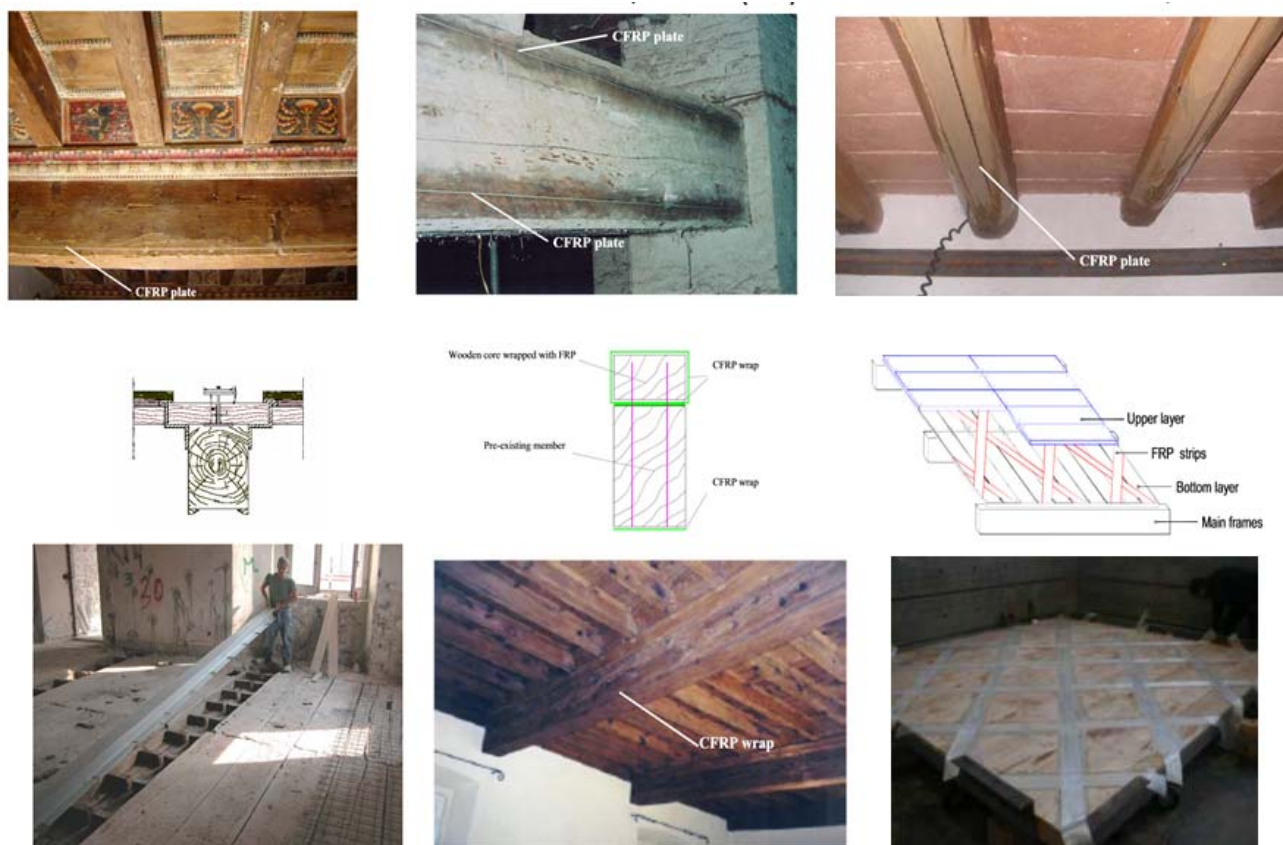


d) Ojačanje šipkama u tlačnoj zoni



h) Ojačanje šipkama u tlačnoj zoni

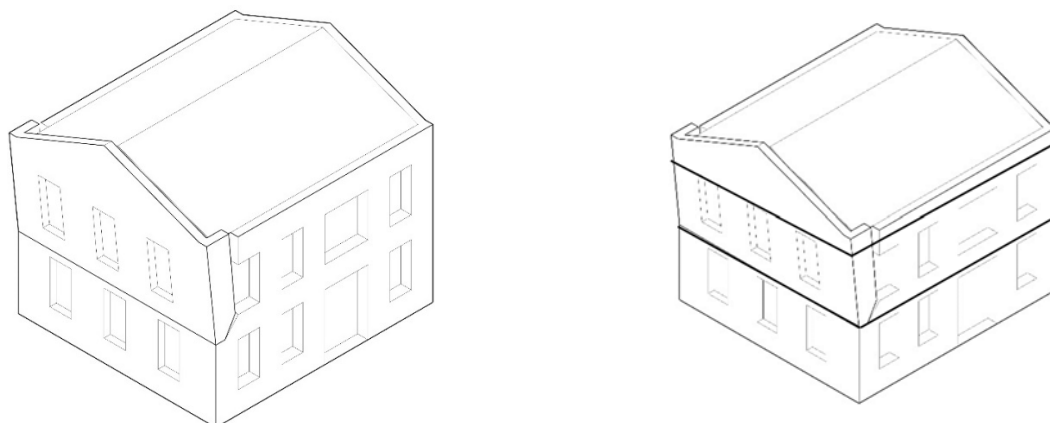
Slika 2.71 Načini ojačanja FRP-om [7]



Slika 2.72 Primjeri izvedenih ojačanja FRP-om

2.4.3.2 Omatanje zgrada i povezivanje zidova

Cilj je u razini stropova u cijelosti oviti građevinu po mogućnosti s obje strane kako bi se dobila funkcija horizontalnog serklaža čime bi bilo onemogućeno odvajanje zidova. Također je cilj povezati zidove na mjestima sudara i spoja



Slika 2.73 Prikaz otkazivanja zidova van ravnine i princip omatanja FRP-om

Najjednostavnije je postavljanje tkanine lijepljenjem samo s vanjske strane ili obostrano. Ako je bitna reverzibilnost pojačanja i sile su manje onda se mogu postaviti mreže koje se postavljaju u mort (FRCM). FRCM (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*) ili IMG metoda (*Inorganic Matrix Grid*) je relativno novi sustav ojačanja koji ima gotovo iste prednosti kao FRP sustavi. Visok omjer čvrstoće i težine što znači da se ne mijenja krutost i ne uvodi dodatna masa, otpornost na koroziju, povećanje duktilnosti i jednostavnost ugradnje su neke od prednosti ovog sustava koji prevladavaju nedostatke kao što su mala otpornost na požar. FRCM sustav osigurava prihvatljivu sigurnost za potrese srednjeg intenziteta. Budući da je cementna smjesa jeftinija i čuva tradicionalni izgled zidanih građevina češće se koristi od primjerice epoksi smjesa.



Slika 2.74 Pojačanje FRCM sustavom

Osim za omatanje, FRCM sustav se danas također koristi i za lokalno povezivanje zidova ili nadvoja.



Slika 2.75 Saniranje pukotine (pojačanje) i povezivanje zidova FRCM sustavom



Slika 2.76 Prikaz izvedbe omatanja FRP trakama i FRCM sustavom

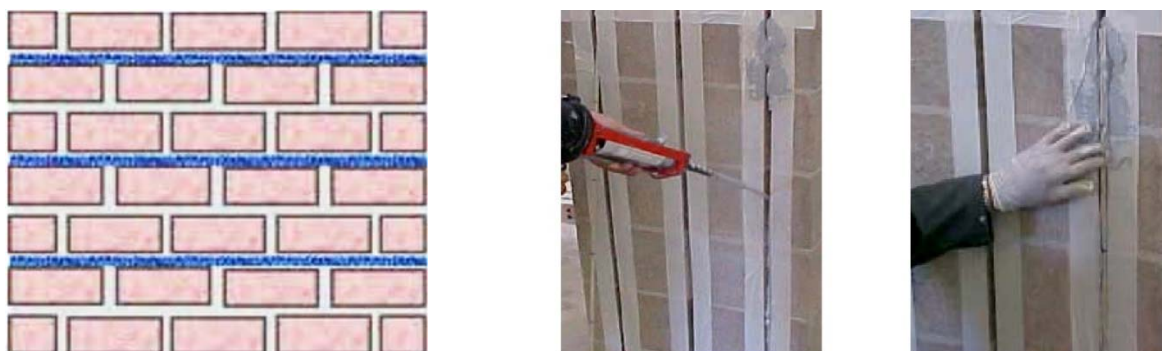
Kako bi se trake zaštitile od štetnih ultraljubičastih zraka obvezno je potrebno izvoditi žbuku. Također mreže ili trake je nužno povezati s pripadajućim ankerima kroz zid.

Obično se pojačanje izvodi postavljanjem tkanine ili šipki u vertikalnom smjeru ili mreža u mort segmentno ili po cijeloj površini.

Uvijek je preporuka da se bočno pridržanje osigura vezivanjem za stropnu konstrukciju koja bi trebala biti horizontalno ukrućena.

U potresu, velike materijalne štete nastanu urušavanjem pregradnih zidova i zidova ispuna okvirnih konstrukcija zato što nisu povezane s glavnom nosivom konstrukcijom. Kao jednostavno rješenje se pokazalo primjena tanke tkanine od staklenih vlakana koja se jednostavno lijepi na plohe zida i povezuje s FRP užadi koja se sidri u glavni nosivi zid, a „rascvjetali dio“ se mortom i trakama lijepi za pregradni zid

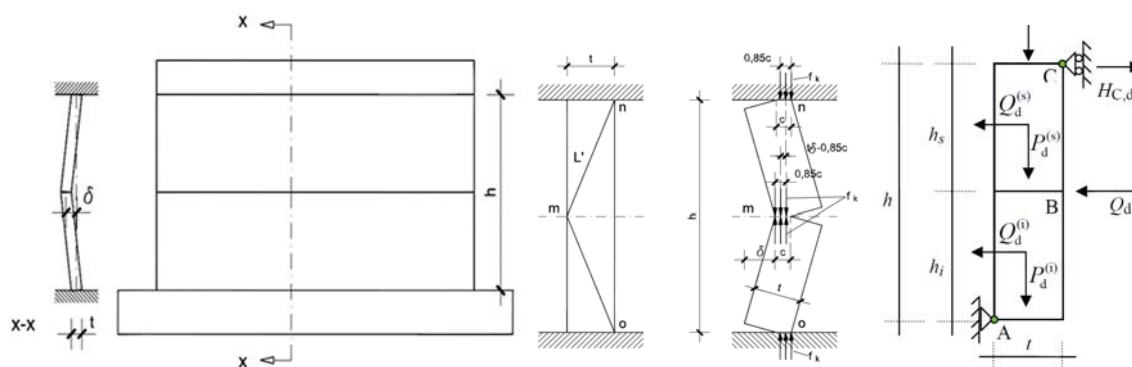
Također ako se radi o zidanom zidu koji nema žbuke moguće je postavljanje FRP šipki u sljubnice radi njihovog povezivanja.



Slika 2.77 Ubacivanje FRP šipki horizontalno i vertikalno u sljubnice

2.4.3.3 Povećanje nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu

Omatanje se koristi i za povećanje nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu. Kod zidnih panela upetih na vrhu i dnu te izvrnutih horizontalnom djelovanju, do otkazivanja dolazi zbog savijanja uz formiranje 3 zgloba (na dnu, vrhu i zadnji na određenoj visini).

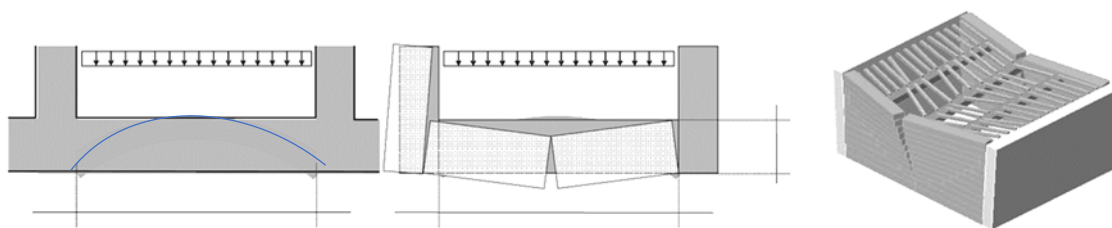


Slika 2.78 Prikaz proračunskog modela za jednadžbu ravnoteže

Obično se takvi zidovi pojačavaju postavljanjem tkanine ili šipki u vertikalnom smjeru ili mreža u mort segmentno ili po cijeloj površini. Prema izrazu 2.1 p_f je razmak između FRP traka, t debljina zidnog panela, a b_f širina odabranog tipa trake.

$$p_f \leq 3 \cdot t + b_f \quad 2.1$$

Za zidne panele pridržane na dnu, te isto tako dobro vezane za poprečne zidove, otpornost na horizontalne sile je osigurana zbog tzv. efekta luka gornje trake (Slika 2.79).



Slika 2.79 Prikaz tipičnih oštećenja zidova uslijed savijanja

Najveće dopušteno jednoliko opterećenje na nepojačani zid prema izrazu 2.2. Gdje je f_{md}^h proračunska tlačna čvrstoća зида u horizontalnoj smjeru.

$$q = \frac{2 \cdot t^2}{L^2} \cdot f_{md}^h \quad 2.2$$

Pojačanje se ostvaruje postavljanjem FRP-a s horizontalnom orijentacijom vlakana i to obostrano. Uvijek je preporuka da se bočno pridržanje osigura vezivanjem za stropnu konstrukciju koja bi trebala biti horizontalno ukružena.



Slika 2.80 Prikaz oštećenja (lijevo) i izvedba FRP traka (sredina i desno)[8]

2.4.3.4 Povećanje nosivosti lukova, svodova i kupola

Povećanje kapaciteta lukova, svodova i kupola je obrađen u poglavlju 2.2.2, tako da se mogu preuzeti jednake mjere pojačanja koja su tamo i prikazana.



Slika 2.81 Prikaz izvedbe pojačanja svodova

2.4.3.5 Povećanje nosivosti zidova u ravnini

FRP proizvodi se dominantno koriste za povećanje posmične otpornosti i otpornosti зида na savijanje u ravnini. Mehanizmi sloma nearmiranog зида su objašnjeni u poglavlju 1.1.

Postoje razne varijante pojačanja: dijagonalno, vertikalno i horizontalno postavljanje lamela i traka od tkanine, postavljanje tkanine po cijeloj površini зида, postavljanje mreža po cijeloj površini i dr..

Najbolje je koristiti tkaninu postavljenu horizontalno s dodatnim trakama na rubovima zida te kod manjih pojačanja s mrežama u mortu po cijeloj površini zida. Za ove zidove su napravljena brojna ispitivanja koja su potvrdila povećanje nosivosti.

Kada je osiguran mehanizam rešetke, proračunska nosivost pojačanog zida na poprečne sile je dana izrazom. $V_{Rd,f}$ je računaska otpornost na posmik FRP-a, $V_{Rd,m}$ je doprinos zida u preuzimanju posmika, $V_{Rd,max}$ nosivost tlačne dijagonale.

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max} \}$$

2.3



Slika 2.82 Primjeri pojačanja mrežama i šipkama



Slika 2.83 Primjeri pojačanja lamelama i trakama i njihovog ispitivanja

2.4.3.6 Ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti

Često zbog povećanog opterećenja ili uklanjanja dijelova konstrukcije postojeći zidani stupovi u rekonstrukciji imaju povećano vertikalno opterećenje koje prekoračuje nosivost. Najjednostavnije je bilo obući zidani zid u AB stup. Ponekad se radi i zamjena zidanog stupa s betonskim, ali to zahtjeva skupo i komplicirano podupiranje. Jedan od jednostavnijih postupaka je ovijanje stupova ili ubacivanje šipki u sljubnice.

Povećanje nosivosti sastoji se u tome što se između šipki stvara troosno naprezanje. Povećanje nosivosti ojačanog stupa ovijanjem prema izrazima 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 [3]. Gdje su: $N_{Rmc,d}$ nosivost ojačanog stupa, f_{mcd} povećana tlačna čvrstoća, $f_{l,eff}$ efektivni bočni pritisak.

$$N_{Rmc,d} \geq N_{Sd} \quad 2.4$$

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md} \quad 2.5$$

$$f_{mcd} = f_{md} + k' \cdot f_{l,eff} \quad 2.6$$

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l = k_H \cdot k_V \cdot f_l \quad 2.7$$

Kombinirana uporaba FRP šipki i FRP tkanine povećava efektivnu površinu ovijanja za kvadrat, pravokutnik ili složenije oblike poprečnih presjeka.

Povećanje ne smije iznositi više od 50% nepojačanog dok dimenzije stupova veće od 90 cm nije preporučljivo omatati za povećanje nosivosti.



Slika 2.84 Primjeri ispitivanja ovijenih stupova

2.4.3.7 Naknadno pritezanje (prednapinjanje) FRP-om

Pritezanje ili prednapinjanje je djelotvorna metoda za povećanje nosivosti van ravnine neomeđenog zida, ali također utječe i na posmičnu čvrstoću zida. Prednapinjanje se može izvoditi izvana ili prethodno probušene rupe vertikalno kroz sredinu zida u koju se onda postavlja uža nosivosti 2000-2500 MPa. Užad se prednapinju na 75% njihove vlačne čvrstoće. Natega na jednom rubu ima samoaktivirajući anker kako bi se mogla aktivirati.

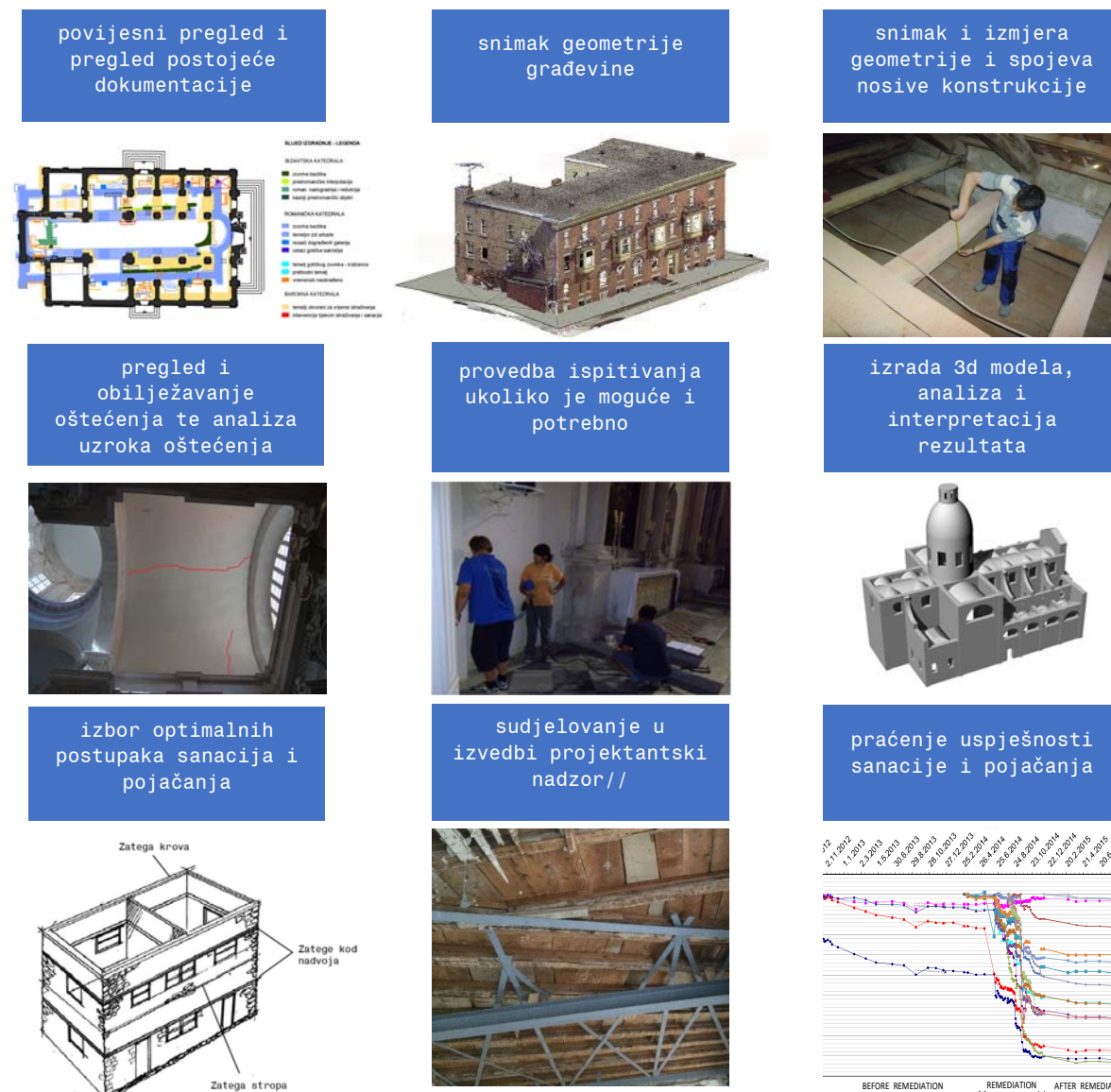


Slika 2.85 Prednapinjanje FRP užadima [8]

3 IZRADA PROJEKTA KONSTRUKCIJE POSTOJEĆE GRAĐEVINE

3.1 OPĆENITO

Projektiranje nosivih konstrukcija postojećih građevina obuhvaća sljedeće korake prilikom izrade projekta konstrukcije:



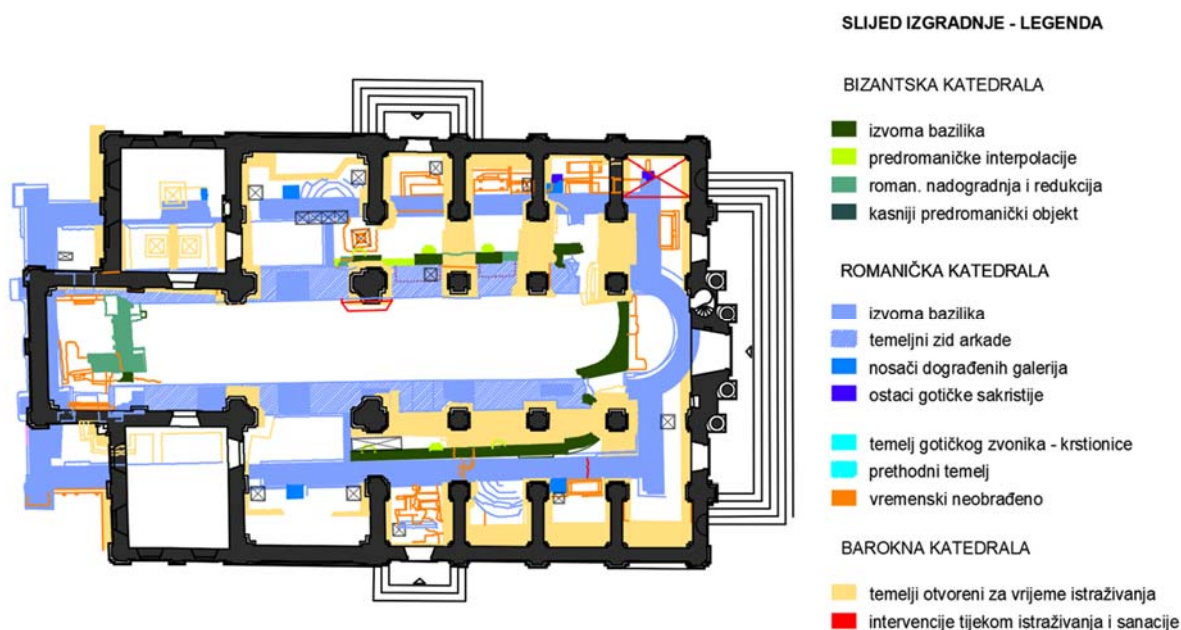
Slika 3.1 Prikaz osnovnih koraka prilikom projektiranja nosivih konstrukcija postojeće građevine

3.2 POVIJESNI PREGLED I PREGLED POSTOJEĆE DOKUMENTACIJE

Kod postojećih građevina, a posebno kod povijesnih građevina neophodno je provesti povijesni pregled. Svako vrijeme i lokacija imali su određene sustave gradnje koji su bili uobičajeni za to doba, pa su takvi sustavi imali neka svoja pravila. Logično je da građevine s vremenom izgradnje prije početka 19 stoljeća nemaju betonskih elemenata i sl. Rasteri i sustavi su uglavnom poznati.

Ponekad se prilikom analize dokumentacije pojave odstupanja u stvarnosti, pa nije rijedak slučaj da vas neka takva situacija ugodno ili neugodno iznenadi. Izrazito je važno pribaviti i izučiti postojeću tehničku dokumentaciju ako postoji, međutim češće je da ona ne postoji. Treba također uzeti u obzir da je uvijek netko nešto radio prije na postojećoj građevini i

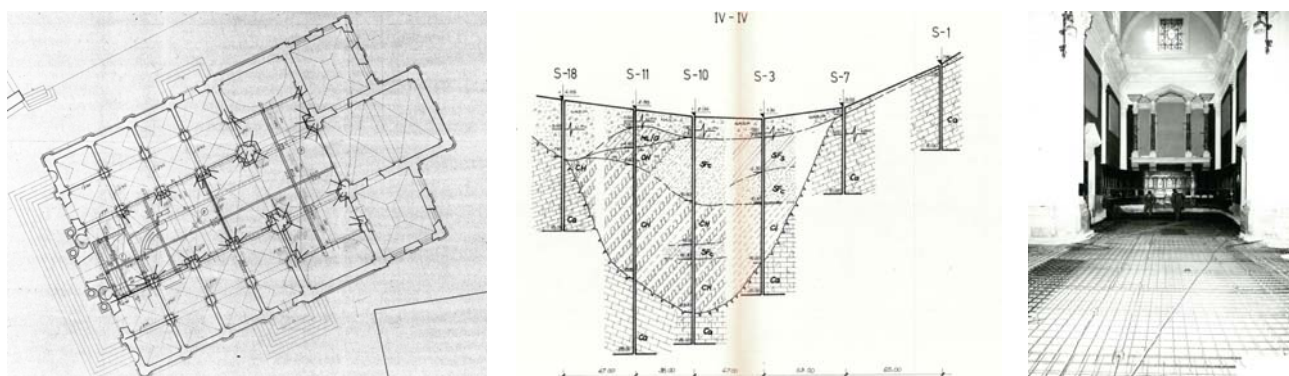
da možda postoji nekakva dokumentacija arhivirana. Danas su konzervatorski uredi solidno organizirani u Hrvatskoj i često se uz njihovu pomoć mogu pronaći dijelovi dokumentacije.



Slika 3.2 Prikaz slijeda izgradnje dubrovačke katedrale [9]

Na slici 3.2 prikazan je slijed izgradnje dubrovačke katedrale. Prilikom obnove katedrale nakon potresa 1979. godine, nađeni su ostaci romaničke katedrale iz 12. stoljeća koja je srušena u potresu 1667. godine. Osim njih, iskopane i zidine mnogo starije bizantske katedrale iz 7. ili 8. stoljeća. Svi ovi podaci važni su za uzimanje u obzir prilikom kasnije analize građevine i njezine konstrukcije.

Inače kod povijesnog pregleda, jako je važno znanje o povijesnim građevinama i starim konstrukcijskim sustavima. Danas je zastupljenost takvih kolegija na inženjerskim fakultetima mala, a i manjak je stručnih studija u obliku stručnog usavršavanja koji bi se bavili povijesnim građevinama. Stoga nije neobično da su često arhitekti puno obrazovaniji u dijelu poznavanja povijesnih građevina i njihovih konstruktivnih sustava. Najbolji pokazatelj tome je da je u proteklih 30 godina najpoznatiji konstruktor u području sanacija i pojačanja starih građevina bio arhitekt kolega pok. Egon Lokošek.

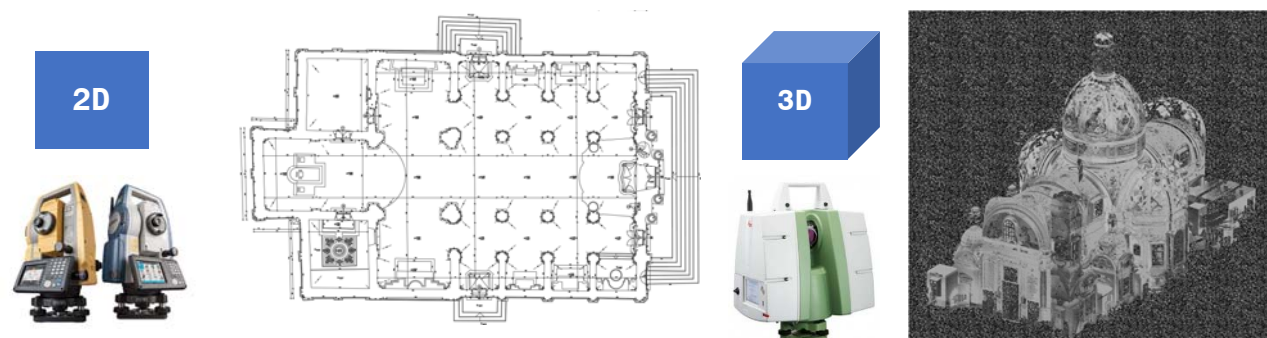


Slika 3.3 Prikaz dokumentacije pojačanja i ispitivanja dubrovačke katedrale nakon potresa 1979.g.

3.3 SNIMAK GEOMETRIJE GRAĐEVINE

Snimak postojeće građevine može se izraditi i na temelju postojeće dokumentacije, ali svakako je nužno provesti kontrolu jer uvijek postoje neevidentirane adaptacije i rekonstrukcije na građevini. Kod 2D snimka stanja zbog složenosti građevine vrlo često dolazi do grešaka u

geometriji. Točniji snimak je 3D pomoću nekih od suvremenih skenera pomoću kojeg se dobiva oblak točaka iz kojeg se izrađuje 3D model.



Slika 3.4 Prikaz izrađenog 2D nacрта i izrađenog 3D modela temeljem oblaka točaka pomoću 3D skenera [10]

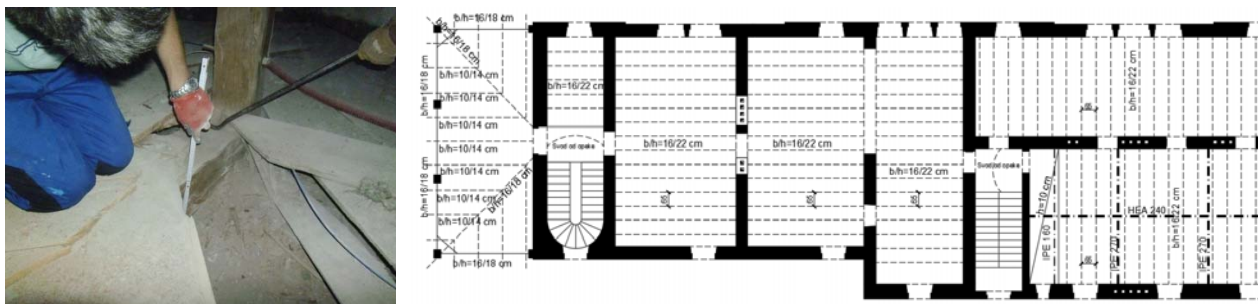
U skoroj budućnosti standard će biti 3D skeniranje i izrada BIM modela. Pomoću BIM modela je u konačnici moguće i izraditi 2D nacрте.



Slika 3.5 Prikaz skenirane građevine i izrađenog 3D modela iz kojeg je moguće izraditi 2D nacрте

3.4 SNIMAK I IZMJERA GEOMETRIJE I SPOJEVA NOSIVE KONSTRUKCIJE

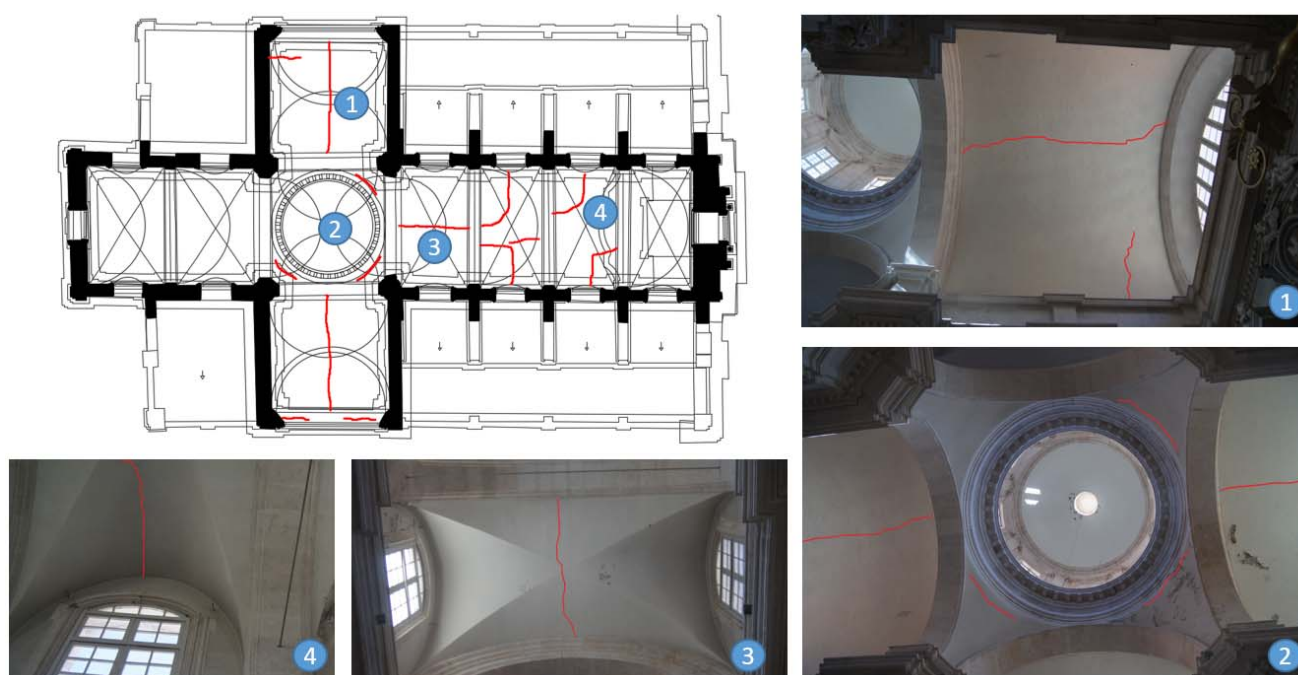
Zbog slojeva poda, žbuke, podgleda i sl. iz snimke geometrije se uglavnom ne dobiju podaci o nosivoj konstrukciji. Nužno je provesti istražne radove na utvrđivanju slojeva, visine temelja, geometrije, statičkog sustava i gradiva nosive konstrukcije. Treba ih provoditi projektant konstrukcije kako bi odmah otklonio što više nepoznanica i dobio dojam o nosivoj konstrukciji.



Slika 3.6 Prikaz izmjere konstrukcijskih elemenata na temelju kojih se dobiva shema nosive konstrukcije

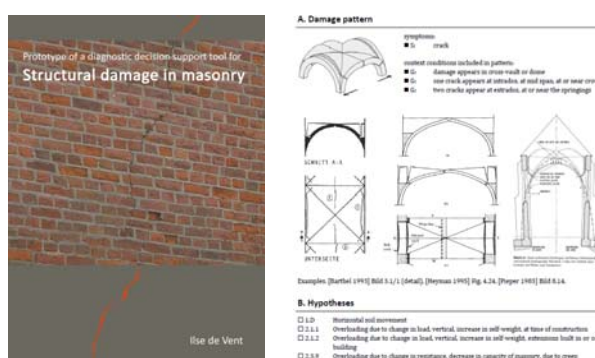
3.5 PREGLED I OBILJEŽAVANJE OŠTEĆENJA TE ANALIZA UZROKA OŠTEĆENJA

Važno je evidentirati sva oštećenja i pokušati utvrditi njihove uzroke. Sva oštećenja se evidentiraju foto dokumentacijom i prijenosom na nacрте uz potrebne opise (npr. širina pukotine, vlaga, korozija sidara i sl.). Važno je napomenuti kako je prilikom pregleda važno usvojiti sustav kojim će nakon pregleda biti lako povezati fotografije i oznake pukotina na konstruktivnim elementima.



Slika 3.7 Prikaz oznaka pukotina na nacrtu pojedinih pozicija i oznaka na pripadajućim fotografijama [9]

Tijekom vizualnih pregleda te ucrtavanja oštećenja potrebno je provesti i analizu uzroka oštećenja. Prije i same provedbe numeričke analize potrebno je na temelju znanja, iskustva, logičkog zaključivanja, iskustva i dostupnih podataka utvrditi uzroke oštećenja. Nekada su oštećenja takva da je potrebno „nabadati“ u numeričkom modelu kako bi se utvrdili razlozi, ali u pravilu numerički model je potvrda hipoteze. Danas za neke uobičajene stvari postoje „kuharice“ na temelju kojih se može doći do zaključka što je uzrok oštećenja preko upitnika koji se ispunjava i navodi na rješenje. Primjer takve knjige je „*Structural Damage in Masonry*“ autora Ilse de Vent. Opet je važno napomenuti da se edukacija „dijagnostike“ oštećenja zidanih građevina minimalno uči na fakultetu i stručnim seminarima.



Slika 3.8 Prikaz tzv. „kuharice“ za pomoć pri traženju uzroka oštećenja zidanih konstrukcija

3.6 PROVEDBA ISPITIVANJA UKOLIKO JE MOGUĆE I POTREBNO

Postoji veliki broj razornih i ne razornih ispitivanja koja se primjenjuju. U pravilu su ispitivanja skupa, uglavnom su problem ako je građevina u uporabi, a kod zidanih konstrukcija glede mehaničkih karakteristika zida upitno je koliko se mogu točno dobiti kvalitetni podaci mjerenjem na jednom do tri mjesta. Generalno najvažniji istražni radovi zidanih konstrukcija su:

3.6.1 Geomehaničko ispitivanje tla

Potrebno je ukoliko nema sigurnih podataka o karakteristikama temeljenja i tlu. Važna su jer je najveći broj oštećenja zidanih konstrukcija uslijed slijeganja tla.

3.6.1.1 Istražne geotehničke bušotine

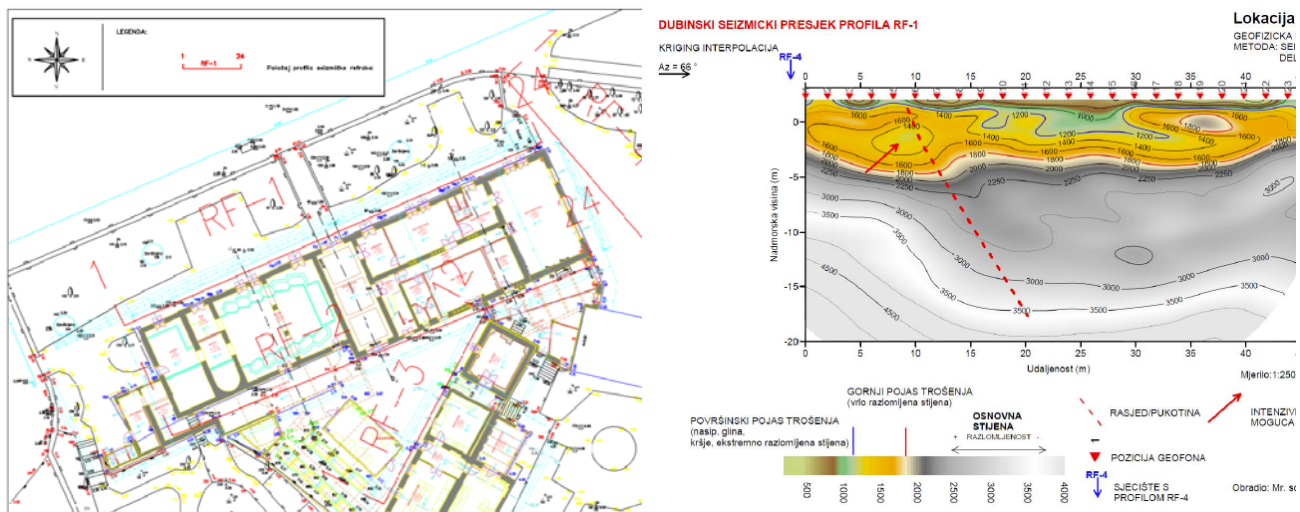
Radi se o minimalnom broju bušotina. Raspored bušotina određuje projektant konstrukcije kako bi dobio jasnije parametre vezane uz tlo i temelje građevine.



Slika 3.9 Prikaz pozicija bušotina i njihova izvedba

3.6.1.2 Geofizički istražni radovi

Geofizički istražni radovi koriste se kako bi se upotrpunili podaci o dubini pojedinih slojeva tla utvrđenih minimalnim geotehničkim istražnim bušotinama.



Slika 3.10 Prikaz položaja geofizičkih profila i interpretiranih rezultata temeljem ispitivanja

3.6.2 Struktura i sastav zida

U pravilu kod zidanih građevina glede zida najvažnije je utvrditi strukturu zida, te vrstu materijala. Sljedeća se ispitivanja provode prilikom utvrđivanja parametara zida:



Slika 3.11 Fotografija površinskog ispitivanja strukture zida i prikaz simulacije šupljina

Površinska struktura zida dobiva se mehaničkim skidanjem slojeva dok se ne dođe do nosivog sloja odnosno zidnih elemenata. Dobivanje podataka o šupljinama u zidu, temelji se snimanjem georadarom ili endoskopijom. Rezultat ispitivanja je klasifikacija zida i izbor parametara iz literature.

Osim navedenih ispitivanja zida, poželjno je napraviti i istražne radove radi utvrđivanja tlačne i vlačne/posmične čvrstoće zida i modula elastičnosti.



Slika 3.12 Fotografija ispitivanja vlačne čvrstoće i modula elastičnosti zida

3.6.3 Tlačna čvrstoća zidnih elemenata i sastav morta

Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata i sastava morta provodi se samo ako postoji sumnja u uobičajenu kvalitetu. Važno je imati u vidu da ispitivanje morta je jako kompliciran postupak.

3.6.4 Dodatna kontrola termokamerom

Termokamerom se mogu vizualno pregledati plohe zidova jer se pomoću nje mogu otkriti zanimljivi podaci poput skrivenih dijelova ispod žbuke ili iznad podgleda stropa.



Slika 3.13 Prikaz snimljenih ploha zgrade i uočavanja skrivenih dijelova pomoću termokamere

3.6.5 Karakteristike drvene konstrukcije

Dostatna je samo izmjera geometrije i vizualna klasifikacija tipa drva

3.6.6 Karakteristike čelične konstrukcije

Provodi se izmjera geometrije i klasifikacija profila, a kvaliteta se obično procjenjuje najmanja s obzirom na vrijeme gradnje, osim ako je izrazito rizičan element.

3.6.7 Karakteristike armiranobetonske konstrukcije

Pored geometrije za armiranobetonske konstrukcije je najbitnije:

- Tlačna čvrstoća betona (valjak + sklerometar)
- Količina armiranja – u pravilu samo šlicanjem je mjerodavno i to na kritičnim mjestima koje je poželjno odrediti nakon numeričkog proračuna na modelu
- Stupanj korozije i oštećenosti armature

3.7 PRORAČUN – IZRADA 3D MODELA, ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA

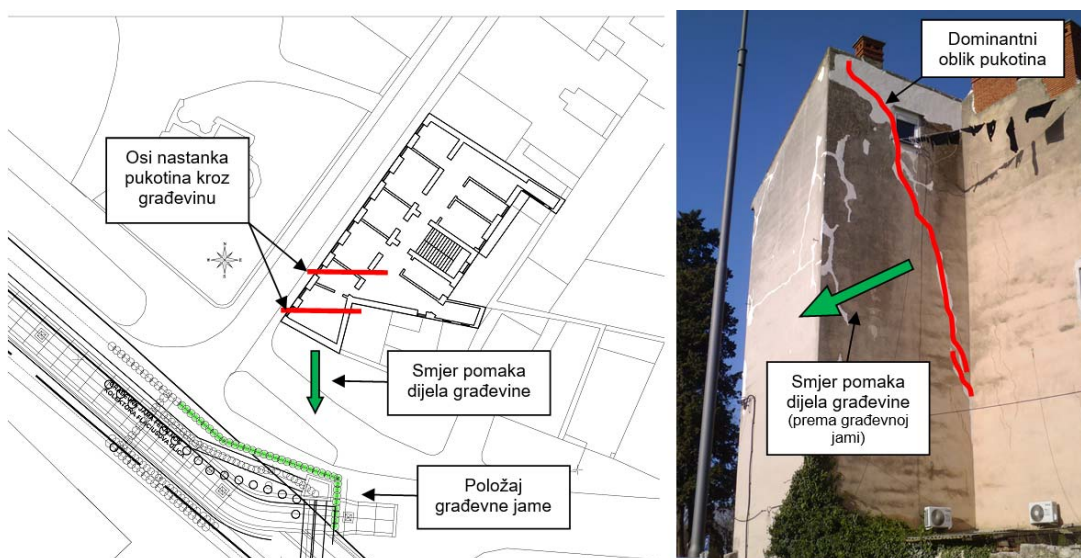
Potrebno je ocijeniti postojeće stanje konstrukcije (utvrditi postojeću nosivost, identificirati nedostatke i njihove uzroke) te dobiti smjernice za intervencije pojačanja. Već je navedeno da postoji više metoda proračuna.

Generalno ovisno o problemu, dostupnom vremenu, ugovorenoj cijeni i važnosti građevine postoji više razina proračuna:

- Pojednostavljene sheme proračuna (za opis ponašanja i dokaz lokalnih elemenata)
- Jednostavniji 3D FEM modeli s linearno elastičnim ponašanjem materijala,
- Složeniji 3D FEM modeli s linearno elastičnim ponašanjem materijala,
- Nelinearni modeli sposobni da simuliraju neelastično ponašanje zida (statički i dinamički).

Važno je imati spoznaje o uzrocima i koji je očekivano ponašanje i mehanizam sloma, kao i što napraviti da sami upravljate načinom sloma. Kod sanacija ziđa i zidanih konstrukcija često se lako odredi uzrok oštećenja tako da s minimalnim ručnim proračunom se može problem riješiti. Nije nužno uvijek raditi 3D modele i „čudesne“ analize. Bit je riješiti uzrok pa su sanacije generalno jednostavne, jer ako uzrok nije uklonjen sanacije su komplicirane.

Slično je i u medicini. Ako znate uzrok onda je lijek jednostavan, a ako se ne zna onda se koriste razne terapije i lijekovi (kokteli).



Slika 3.14 Prikaz snimljenih oštećenja i zaključka temeljem položaja pukotina i pomaka građevine

Na temelju uočenih oštećenja u potresu mogu se definirati osnovne konstrukcijske manjkavosti i najčešći oblici otkazivanja zidanih konstrukcija u potresu:

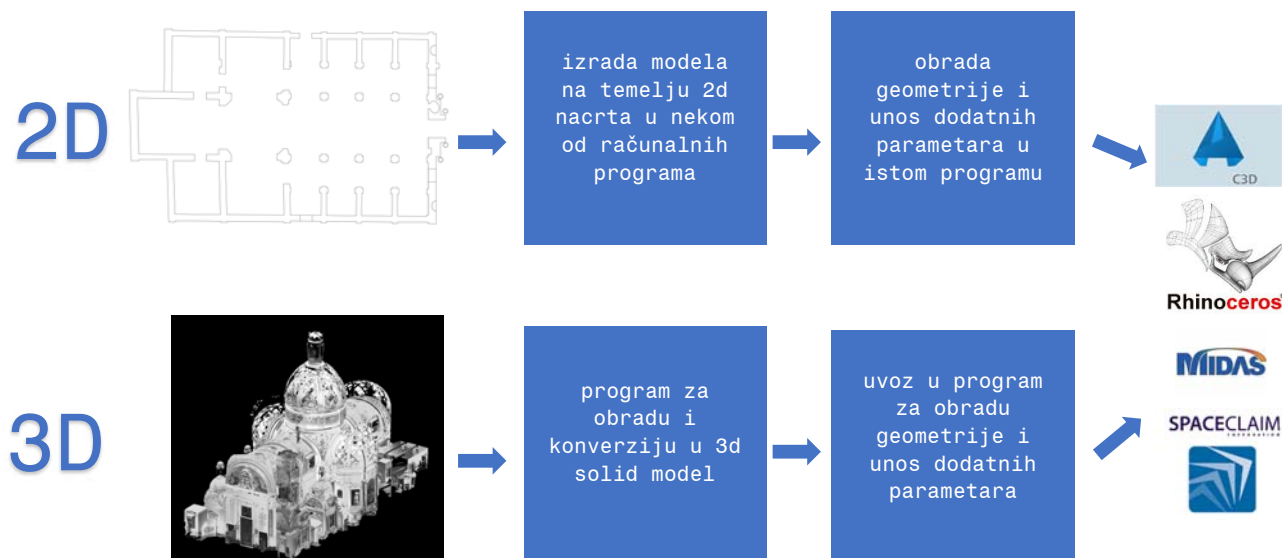
- Nedovoljna cjelovitost konstrukcije, nedostatna veza između međusobno okomitih zidova i nepostojanje veze između zidova i stropnih konstrukcija, zbog čega dolazi do odjeljivanja nosivih zidova u kutovima i na spojevima zidova te do naknadnog rušenja zabata ili zidova položenih okomito u odnosu prema dominantnom smjeru seizmičkog gibanja tla okomito na njihovu ravninu.
- Nedostatak nosivih zidova u nekom smjeru i veliki otvori.
- Višeslojnost zidova bez kvalitetne veze između vanjske i unutrašnje strane ziđa (zidovi sa šupljinama i kamenim nabačajem u sredini).
- Loša kakvoća ziđa pa stoga i neodgovarajuća bočna otpornost nosivih zidova što dovodi do pojave dijagonalnih pukotina u zidovima, do odvajanja te do konačnog rušenja.
- Vitki elementi konstrukcije kao što su zvonici, minareti, dimnjaci i sl.

Ranije su u poglavlju 1.1 prikazani tipizirani mehanizmi oštećenja zidanih građevina. Bitno je napomenuti da ukoliko se u rekonstrukcijama primjene tehničke mjere za poboljšanje seizmičke otpornosti kao što su:

- povezivanje zidova,
- sidrenje stropnih konstrukcija u zidove,
- pojačanje stropnih konstrukcija u horizontalnoj ravnini,
- postavu konstrukcijskih zidova u dva ortogonalna smjera
- pridržanje vitkih elemenata,
- osiguranje temelja da mogu preuzeti povećana opterećenja u potresu,
- i dr.

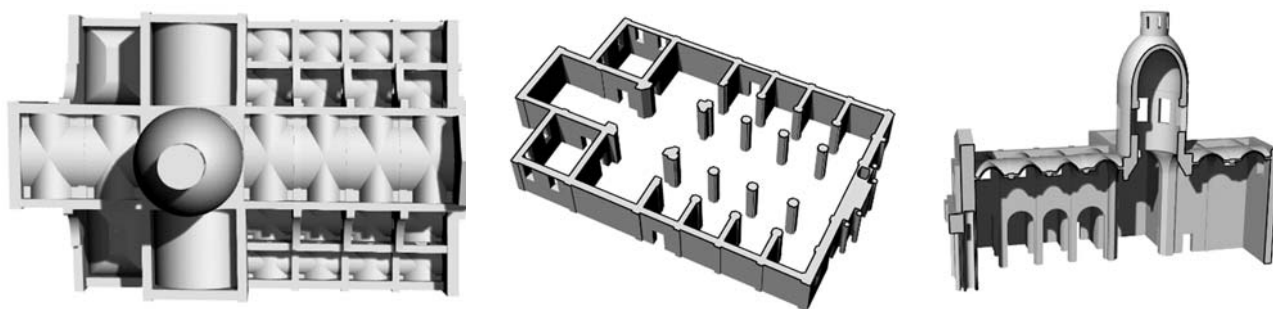
proračun se može provoditi i ručno ili na jednostavnim prostornim modelima s linearnim ponašanjem. Za složenije i zahtjevnije građevine potrebno je provoditi ozbiljniju 3D analizu.

Bez obzira bila podloga 2D ili 3D uvijek je poželjno pojednostaviti geometriju u prihvatljivoj mjeri kako bi model bio optimalan.



Slika 3.15 Prikaz slijeda i izrada 2D modela ili 3D modela [10]

Primjer izrade 3D modela temeljem snimka građevine, pregleda arhivskih nacрта, projekata i istražnih radova:



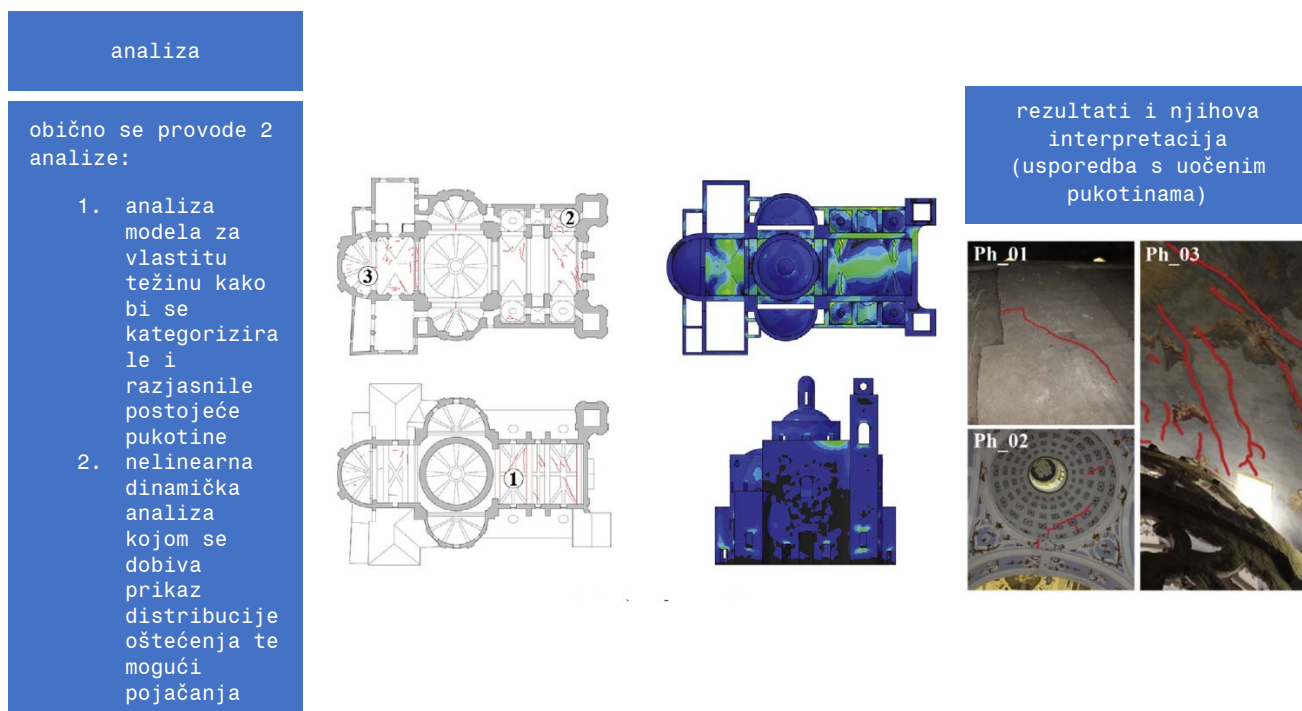
Slika 3.16 Prikaz 3D modela dubrovačke katedrale [9]

Izrađeni 3D model uvozi se u neki od dostupnih računalnih programa koji imaju mogućnost nelinearne analize



Slika 3.17 Prikaz slijeda unosa 3D modela i proračun

Nakon provedenog proračuna, potrebna je analiza dobivenih rezultata i usporedba s uočenim oštećenjima. Može se primijetiti da građevine ovog tipa imaju pojavu značajnih naprezanja i pukotina na karakterističnim mjestima



Slika 3.18 Prikaz slijeda analize i potvrde hipoteza pukotina prije proračuna [10]

Treba imati u vidu da su nelinearni proračuni velikih građevina vrlo složeni i zahtijevaju dosta vremena i pripreme. Možda optimalan proračun s obzirom na vrijeme analize i manju složenost građevine je linearno-elastična analiza sa solid elementima i kontrolom pomaka i naprezanja. Takvi modeli su jednostavni, brzi i s jasnim prikazom kritičnih mjesta na koja se intervenira.

3.8 IZBOR OPTIMALNIH POSTUPAKA SANACIJE I POJAČANJA

Na temelju proračuna utvrde se kritična mjesta i odabiru optimalni postupci sanacije i pojačanja. Postoje brojne konvencionalne tehnike i postupci međutim za većinu tih slučajeva su primjenjive i specijalne tehnike poput FRP proizvoda. Osnovni postupci pojačanja su sljedeći:

- Pojačavanje stropnih dijafragmi i drvene krovne konstrukcije.
- Omatanje zgrada na podnim i krovnim područjima i povezivanje zidova.
- Povećanje kapaciteta nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu.
- Povećanje kapaciteta nosivosti, lukova, svodova i kupola.
- Povećanje kapaciteta nosivosti zidova u ravnini.
- Ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti.
- Pojačavanje i povezivanje pregradnih zidova i zidova ispune.

3.9 SUDJELOVANJE U IZVEDBI PROJEKTA – PROJEKTANTSKI NADZOR

Projektantski nadzor kod sanacija i rekonstrukcija općenito svih vrsta građevina je neophodan, a posebno kod starih zidanih građevina. Redovito se pojave situacije koje odstupaju od podloga, pretpostavljenih statičkih sustava i dimenzija koje nije moguće obuhvatiti tijekom projektiranja.

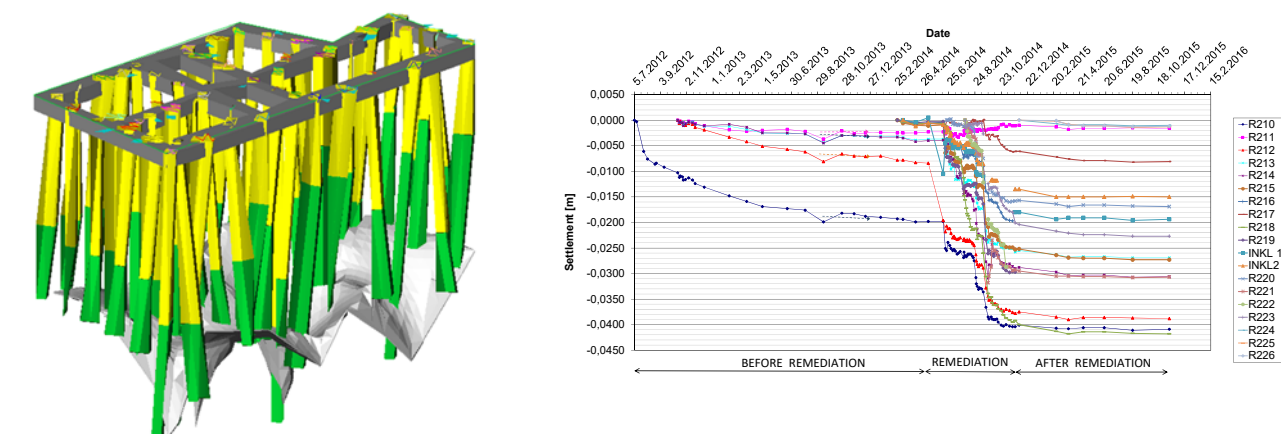
U nastavku slijedi primjer u kojem su se prilikom obnove zidova uklanjali i postojeći slojevi stropa, te je primijećeno kako se pregradni zid oslanja djelomično na drveni grednik bez oslonca ispod. Također središnji stup nije bio kameni od jednog komada nego zidani. Stoga je bilo potrebno pojačanje i osiguravanje oslonca pregradnog zida kako ne bi došlo do daljnje deformacije stropa, ali i dodatno pojačanje stupa.



Slika 3.19 Prikaz stropa s vidljivim pregradnim zidom bez potrebnog oslonca (gore) i skice rješenja s čeličnim gredama

3.10 PRAĆENJE USPJEŠNOSTI SANACIJE I POJAČANJA

Kod sanacija potrebno je provesti praćenje uspješnosti sanacije. To je posebno potrebno kada su uzroci oštećenja slijeganje temeljnog tla koje uvijek ima neko vrijeme realizacije, te u slučaju kada uzroci oštećenja nisu u potpunosti poznati



Slika 3.20 Prikaz rješenja sanacije temelja i rezultata praćenja slijeganja za zgradu prikazanu na slici 3.14

Na slici 3.20 prikazano je rješenje za sanaciju uslijed oštećenja i pojavu pukotina koje su vidljive na slici 3.14. Razlog oštećenja je bilo slijeganje temelja, te je odlučeno da će se izvoditi podbetoniravanje temelja i tzv. „jet grouting“. Nakon izvedbe i pojačanja temelja, praćeni su rezultati i uspoređeni s onima prije pojačanja temelja. Rezultati su pokazivali smanjenje slijeganja i prekid njihovog trenda rasta tijekom vremena.

4 SANACIJA I POJAČANJE AB KONSTRUKCIJA

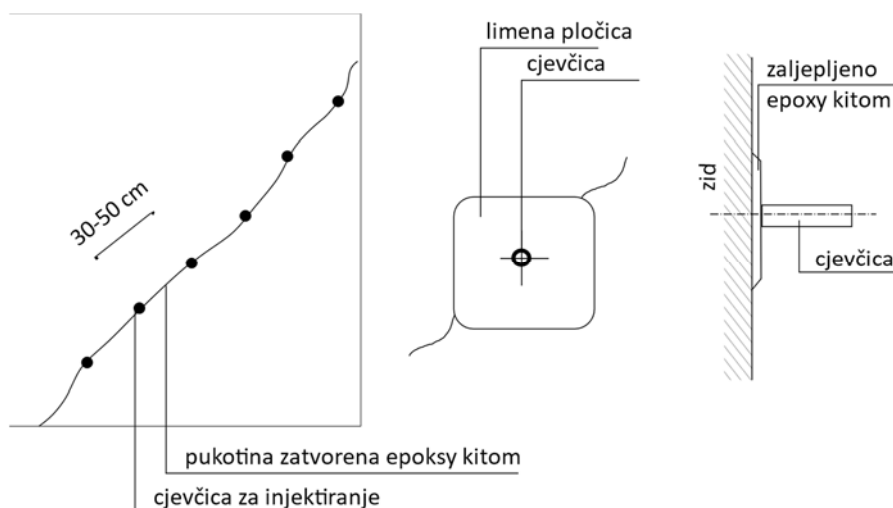
Kako se u nekolicini zidanih građevina nalaze i armiranobetonski elementi poput nadvoja, ploča, greda, stupova, slijedi osnovni prikaz sanacije i pojačanje takvih elemenata.

4.1 POVEZIVANJE AB ZIDA S PUKOTINOM

Buše se rupe s obje strane pukotine i ugrađuju se spone u obliku slova U okomito na pukotinu. Spone su različitih duljina i orijentacije da naprezanja ne budu koncentrirana u jednoj ravnini. Spone osiguravaju vlačnu vezu.

Za ozbiljnija injektiranja u pravilu se koriste čisti polimer tj. čiste epoksi smole niske ili srednje viskoznosti (Slika 4.1)

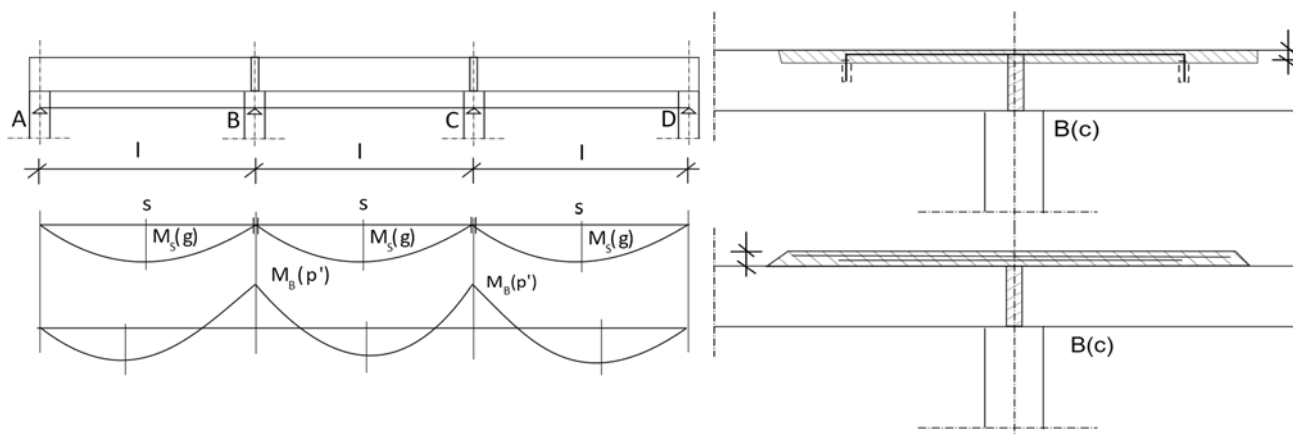
- za pukotine do 0,5 mm – niska viskoznost,
- za pukotine preko 0,5 mm – srednja viskoznost.



Slika 4.1 Saniranje pukotine epoksi smolom

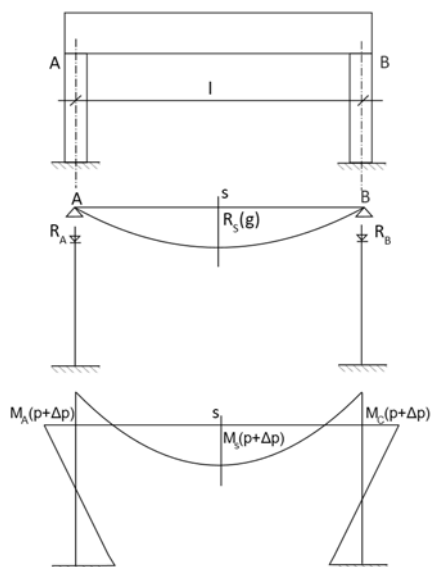
4.2 PROMJENA STATIČKOG SUSTAVA KONSTRUKCIJE KOJI NEMA DOSTATNU NOSIVOST

Promjenom statičkog sustava, kao npr. sustava proste grede u kontinuirani nosač, se povećava nosivosti i uporabljivost elementa. Primjer na slici 4.2 je kontinuiranje postojećeg sustava prostih greda. Detalj na mjestu ostvarenja kontinuiteta formira se dodavanjem armature u gornjoj zoni radi preuzimanja negativnog momenta savijanja (slika 4.2 desno).



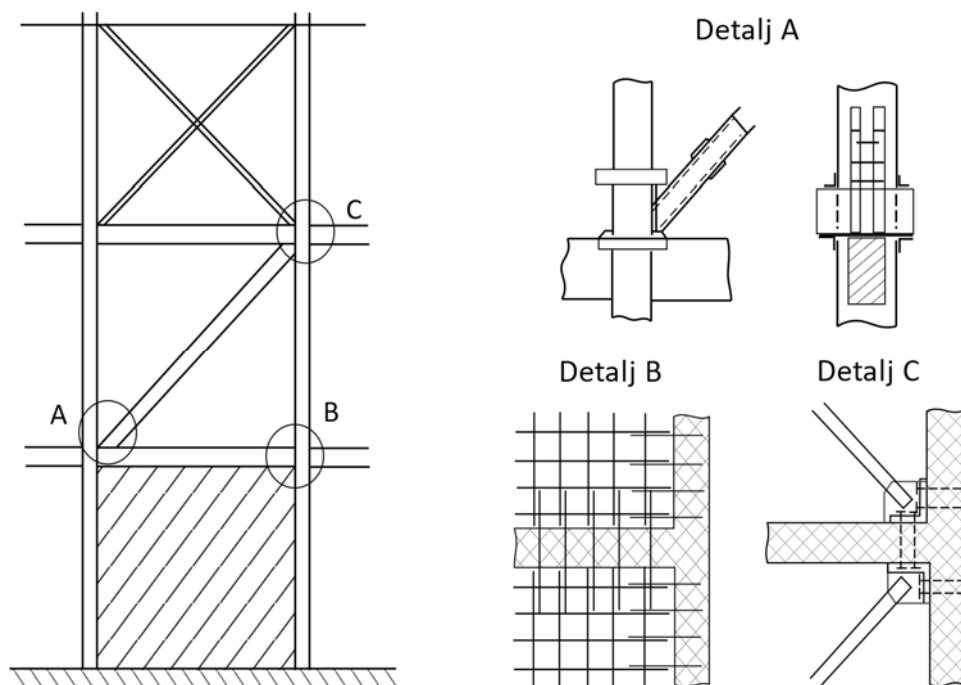
Slika 4.2 Kontinuiranje postojećeg sustava prostih greda i detalj na ležaju

Slika 4.3 pokazuje primjer promjene statičkog sustava na način povezivanja grede i stupova u okvirnu konstrukciju. Na mjestu spojnog čvora treba ugraditi dodatnu armaturu i osigurati kontinuitet, odnosno upetost.



Slika 4.3 Integriranje grede i stupova u okvirnu konstrukciju

Primjer na slici 4.4 je statički sustav koji se ojačava po principu dodavanja ukrućenja na već postojeće okvire koji su nedovoljne nosivosti.



Slika 4.4 Dodavanje ukrućenja postojećim okvirima

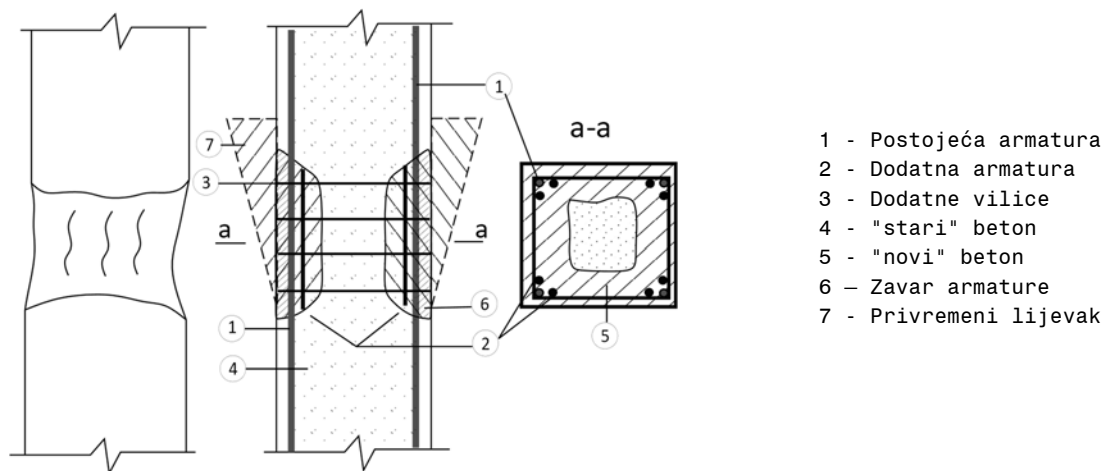
4.3 POJAČANJE AB KONSTRUKCIJE POVEĆANJEM PRESJEKA

Za pojačanje konstrukcije povećanjem presjeka s dodatnim površinama betona i armature. Dva su načina pojačanja:

- Ukloni se zaštitni sloj betona i uz postojeće šipke armature se dodaju nove šipke armature koje se zavare uz postojeće, a zaštitni sloj se izvede sanacijskim mortom. U ovom slučaju ploština presjeka ostaje ista.

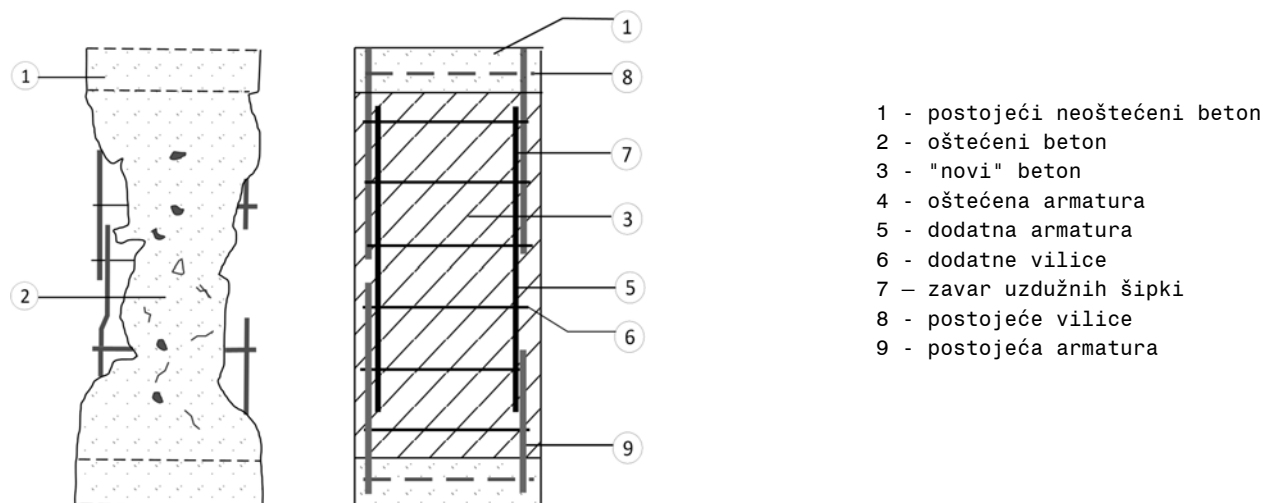
- Oko postojećeg presjeka se izvede dodatni sloj betona s novom armaturom pri čemu je povećana ploština presjeka betona i armature.

Primjeri (Slika 4.5) lokalnog saniranja stupova (lokalno je korozija oštetila armaturu i poprečni presjek).



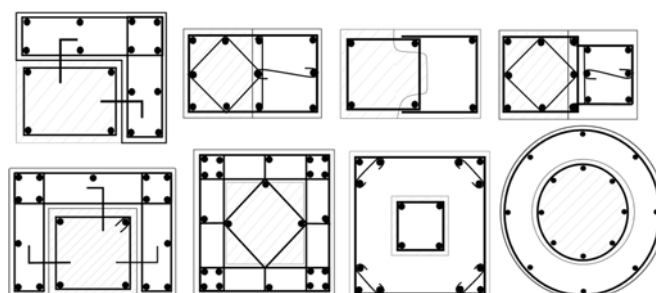
Slika 4.5 Lokalno saniranje stupova

Drugi primjer (Slika 4.6) lokalnog saniranja stupova kada postoji dublje oštećenje i u tom slučaju se u cijelosti uklanja postojeći beton i taj segment stupa se izvodi s novim betonom.



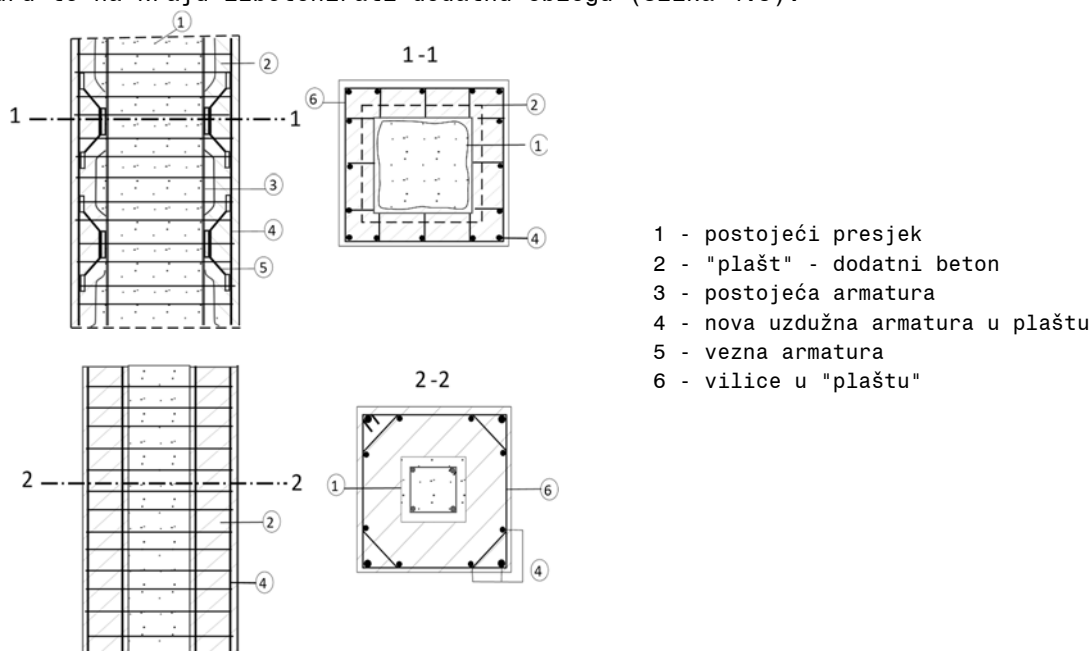
Slika 4.6 Lokalno saniranje stupova za dublja oštećenja

Na primjeru (Slika 4.7) izvodi se pojačanje stupova povećanjem presjeka na način da se oko postojećeg presjeka izvede dodatni betonski dio s armaturom. Postojeći presjek i novi beton treba povezati sidrenim šipkama.



Slika 4.7 Pojačanje stupova povećanjem presjeka

Sljedeći je primjer izvedbe dodatne obloge oko postojećeg presjeka stupa (Slika 4.8). Potrebno je prvo pripremiti površinu postupkom „štemanja“, a zatim postaviti dodatnu armaturu te na kraju izbetonirati dodatnu oblogu (Slika 4.9).

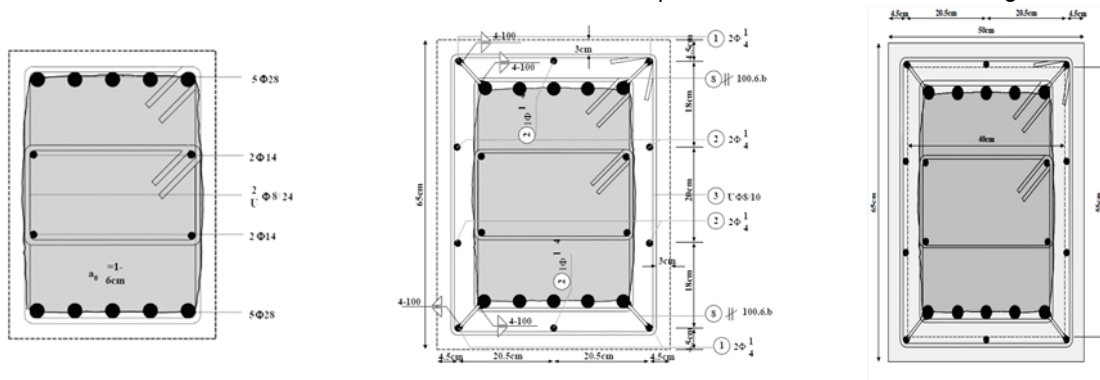


Slika 4.8 Izvedba dodatne obloge oko postojećeg presjeka stupa

Priprema površine stupa

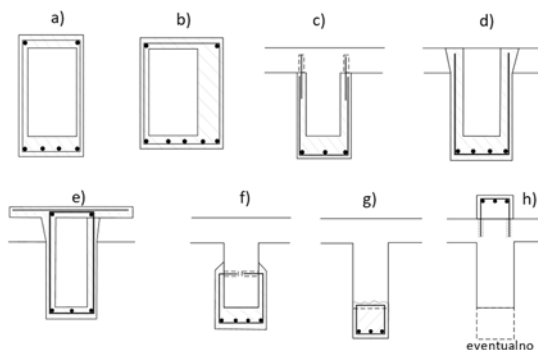
Postavljanje dodatne armature stupa

Betoniranje dodatne obloge

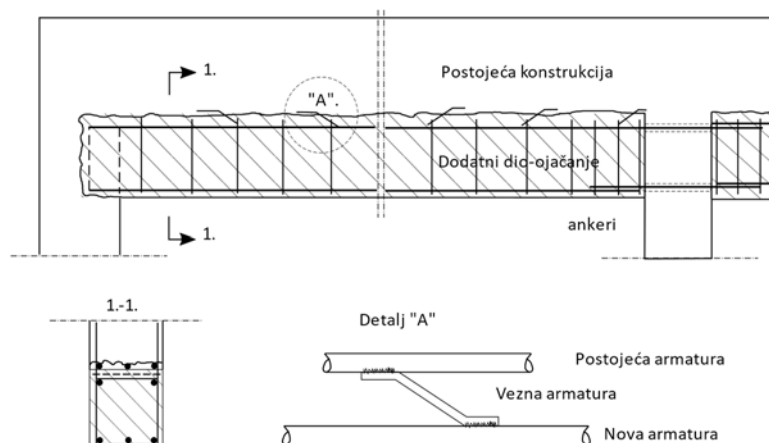


Slika 4.9 Koraci za izvedbu dodatne obloge

Primjer za pojačanje greda povećanjem presjeka (Slika 4.10) na način da se oko postojećeg presjeka izvede dodatni betonski dio s armaturom. Postojeći presjek i novi beton treba povezati sidrenim šipkama. Na primjeru (Slika 4.11) izvedba dodatnog dijela je ispod rebra grede na način da se postojeća i nova armatura povežu zavarivanjem.

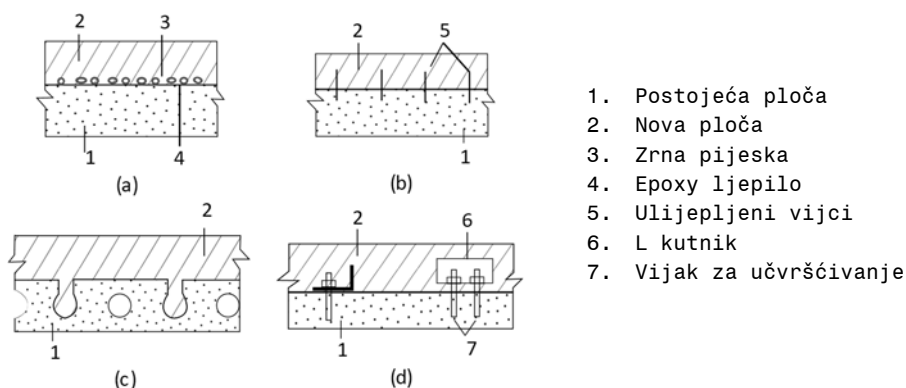


Slika 4.10 Oko postojećeg presjeka se izvede dodatni betonski dio s armaturom



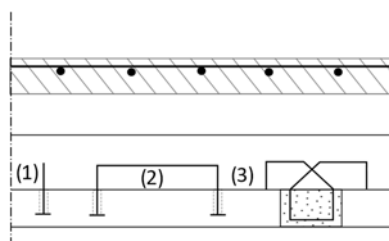
Slika 4.11 Detalj izvedbe dodatnog dijela ispod rebra grede

Pojačanje ploče povećanjem presjeka. Na gornje ili donje strane ploče se dobetonira sloj koji se povezuje s postojećom pločom (Slika 4.12).



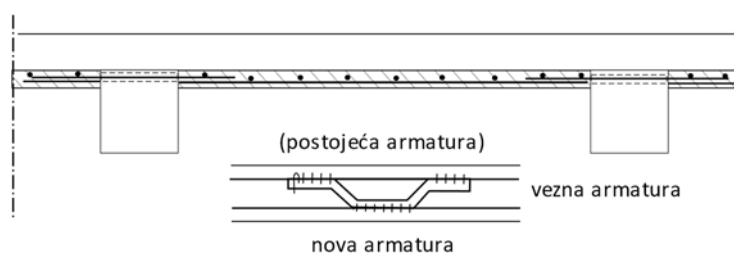
Slika 4.12 Povezivanje novog betona s postojećom pločom

Još jedan primjer (Slika 4.13) pojačanja izvedbom sloja betona po postojećoj ploči. Beton se izvodi s gornje strane. Potrebno je postojeću i novu ploču povezati sidrima za sprežanje.



Slika 4.13 Povezivanje postojeće i nove ploče sidrima za sprežanje

Primjer pojačanja izvedbom sloja betona ispod postojeće ploče (Slika 4.14). Beton se izvodi s donje strane. Potrebno je postojeću i novu ploču povezati sidrima za sprežanje ili zavarivanjem postojće i nove armature.



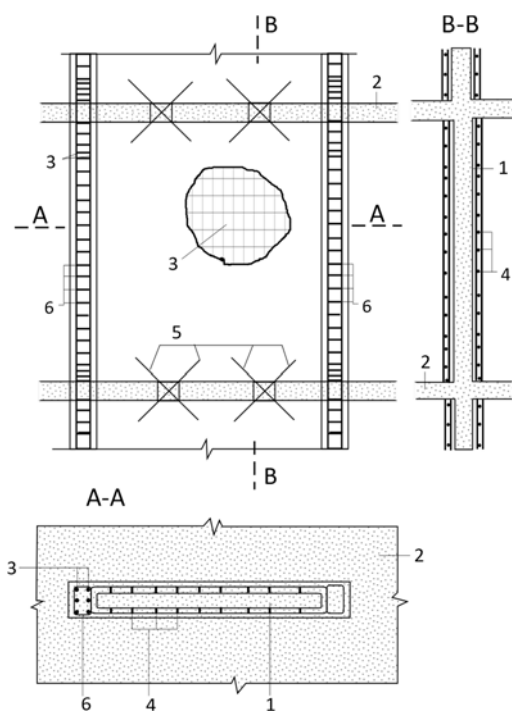
Slika 4.14 Pojačanje izvedbom sloja betona ispod postojeće ploče

Ukloni se zaštitni sloj s donje strane ploče i poveže se nova armatura i postojeća. Najčešće je to zavarivanjem, ali može i mehanički - sidrenjem. Donji sloj betona se izvodi torkretiranjem debljine 3 - 6 cm (Slika 4.15).



Slika 4.15 Postavljanje armature i torkreta s donje strane ploče

Kod problema nedovoljne nosivosti na savijanje ili posmik može se povećati debljina ili duljina zida s ugradnjom dodatne armature (Slika 4.16 i Slika 4.17).

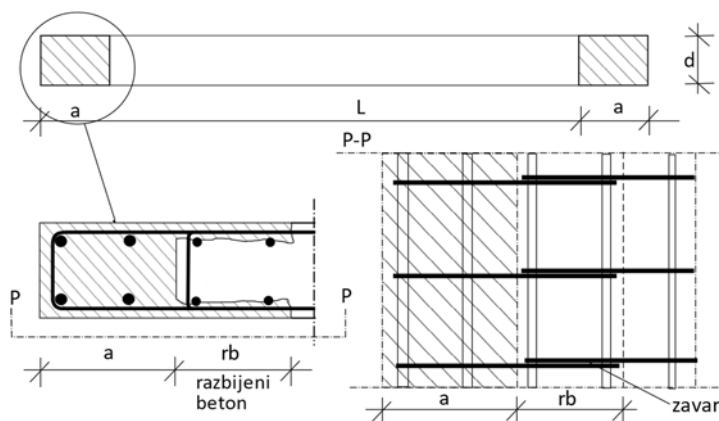


1. Postojeći zid
2. Postojeća ploča
3. Dodatna uzdužna armatura
4. Dodatna mrežasta armatura
5. Dodatne kose šipke za povezivanje zidova po visini
6. Dodatne vilice na krajevima zida

Kod izvedbe rupa u ploči armatura se ne smije oštetiti.

Slika 4.16 Povećanje debljine zida s ugradnjom dodatne armature

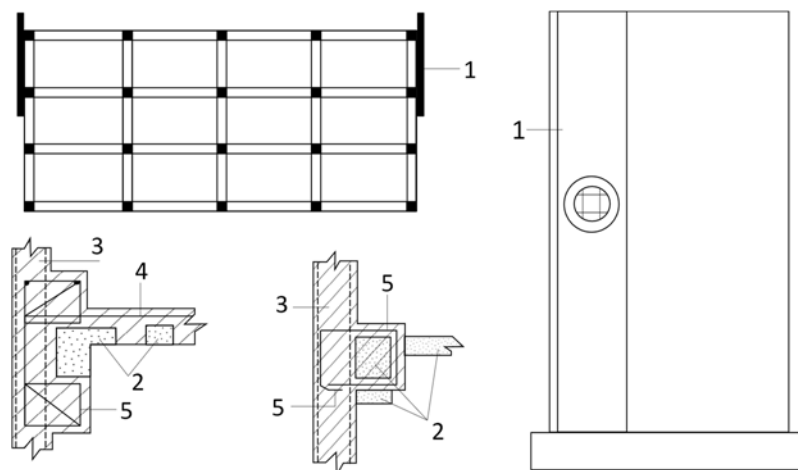
Ako je problem samo nedovoljna nosivost na savijanje zid je dovoljno samo produljiti (Slika 4.17).



Slika 4.17 Povećanje duljine zida s ugradnjom dodatne armature

4.4 POJAČANJE AB KONSTRUKCIJE DODAVANJEM NOVIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA

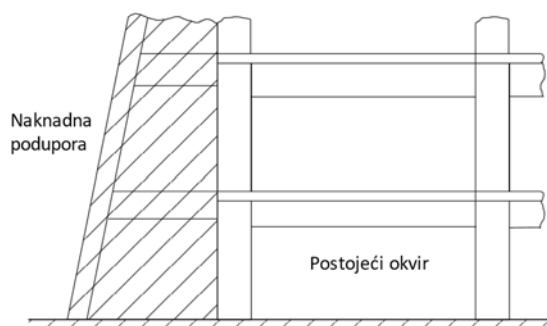
Ovaj model je jedan od najčešćih kod seizmičkog pojačanja postojeće građevine u slučaju da postojeći sustav (najčešće okvirni) nema dostatnu seizmičku otpornost i stabilnost. Ovaj model pojačanja je čest i u slučaju dogradnji kada postojeća konstrukcija u prizemlju ili donjim etažama nema dovoljnu nosivost da prihvati dodatne horizontalne sile zbog dogradnje. Primjer pojačanja konstrukcije dodavanjem novog konstrukcijskog elementa prikazan je na slici 4.18. Princip je ubaciti novi zid između postojećih stupova, ali je najbolja opcija postaviti ga na pročeljima izvan okvira radi jednostavnijeg vođenja armature.



1. Dodatni posmični zid; 2. Postojeći beton; 3. Novi beton; 4. Nova armatura; 5. Nove dijagonale

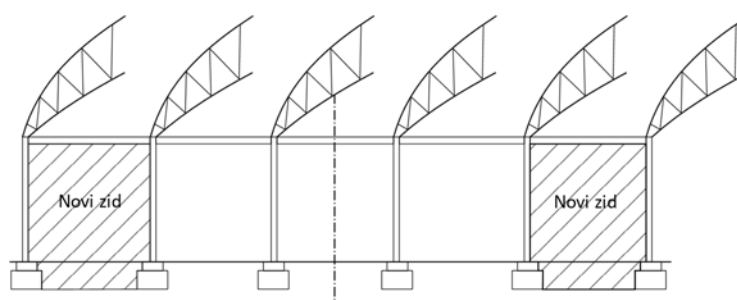
Slika 4.18 Izrada novih AB zidova za prihvaćanje horizontalnog opterećenja

U slučaju manje katnosti može se izvesti primjer sa Slika 4.19. Vanjski AB zid je izrađen kao podupora koja je u stanju prihvatiti seizmičku silu. Ovaj način je prihvatljiv za manju katnost građevine.



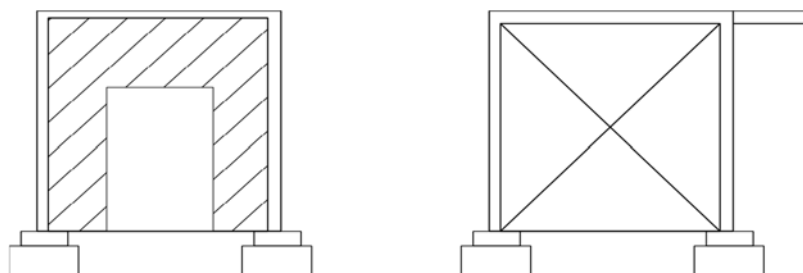
Slika 4.19 Novi AB zid za preuzimanje seizmičkih opterećenja konstrukcija manje katnosti

Izrada novih AB zidova velike krutosti dosta je prikladna za ukrućenje postojeće konstrukcije. Također se koristi u slučaju kada se zbog otvaranja fasade moraju ukloniti postojeće vertikalne stabilizacije. Kod ovakvih konstrukcija treba voditi računa o utjecaju temperature (Slika 4.20).



Slika 4.20 Izrada novih AB zidova velike krutosti

Izrada novih jakih AB okvira ili čeličnih spregova (Slika 4.21) izvodi se ako je kroz pojačanje nužno osigurati prolaz i sl.

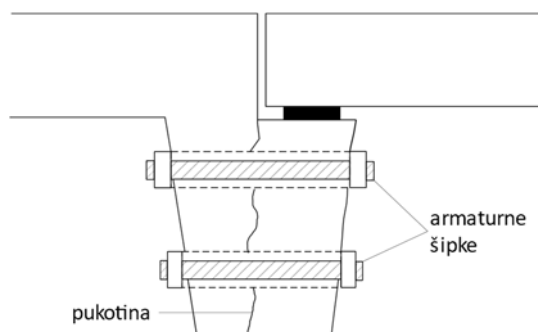


Slika 4.21 Izrada novih jakih AB okvira ili čeličnih spregova

4.5 POJAČAVANJE POPREČNIH PRESJEKA LIJEPLJENJEM LAMELA OD ČELIKA

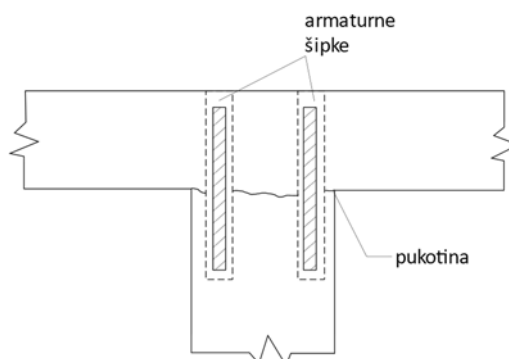
Ovaj način je najčešći za slučaj kad je potrebno pojačati gredu ili ploču. Razlozi su „jednostavna“ izvedba pri čemu presjek ostaje nepromijenjen kao i utjecaj na ostale konstrukcijske elemente. Često se koristi i kod pojačanja ploče uslijed izrezivanja otvora za stubište ili instalacije kao i kod seizmičkog pojačanja okvira.

Primjer pojačanja AB konstrukcije čeličnim elementima jest u slučaju saniranja kratkih konzola. Armaturene šipke se postavje okomito na pravac pukotine (Slika 4.22). Prvo se izbuše rupe u koje se postavje šipke nakon što su prethodno namočene u epoksi ljepilo.



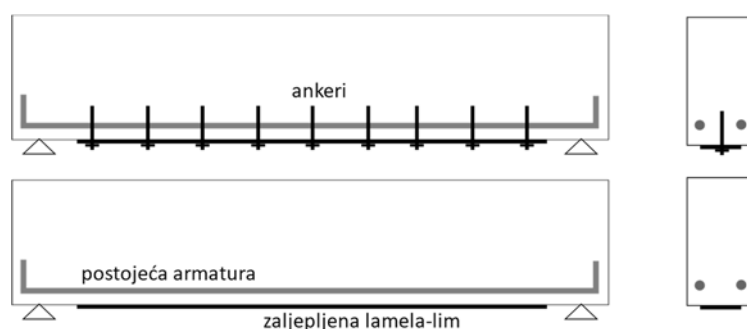
Slika 4.22 Saniranje armaturnim šipkama

Saniranje armaturnim šipkama je moguće i u slučaju kada je potrebno povezivanje dva AB elementa nakon što je došlo do razvoja pukotina. Ovo se koristi i u slučaju da imamo montažne elemente koje treba naknadno povezati radi povećanja seizmičke otpornosti (Slika 4.23).

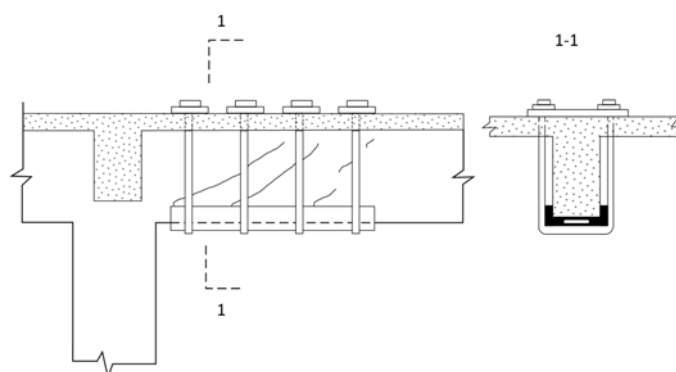


Slika 4.23 Saniranje armaturnim šipkama dva AB elementa

Pojačanje greda i ploča ankeriranjem ili lijepljenjem lamela prikazano je na slici 4.24. Prvo je potrebno pripremiti odnosno očistiti plohe betona i ako nisu puno oštećene izravnati ih reparaturnim mortom te zatim na njih lijepiti čelične lamele. Druga prikazana metoda je posmično pojačanje s čeličnim lamelama i čeličnim šipkama (Slika 4.25).

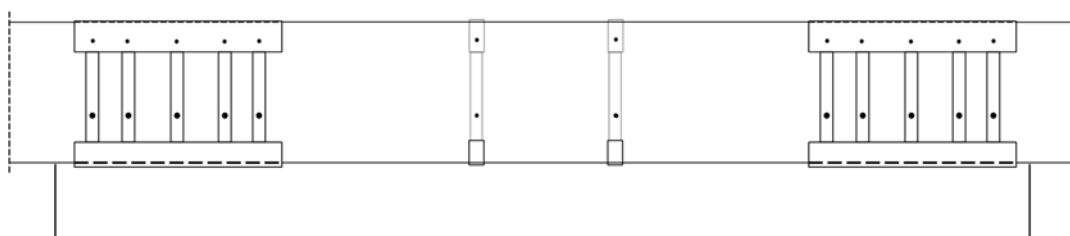


Slika 4.24 Pojačanje greda i ploča ankeriranjem ili lijepljenjem lamela



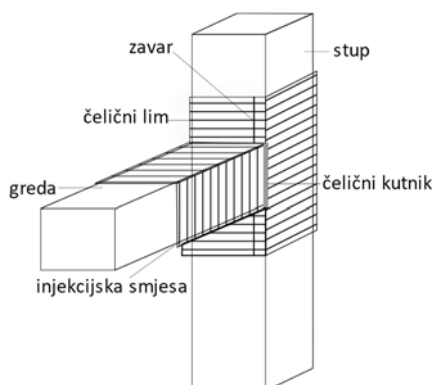
Slika 4.25 Posmično pojačanje s čeličnim lamelama i sidrenjem čeličnih šipki

Primjer sanacije gdje je potrebno pojačati gredu na savijanje i posmik vidljiv je na slici 4.26. U sredini raspona dodaju se posmična ojačanja koja ujedno pridržavaju nalijepljenu čeličnu lamelu na dnu presjeka. Čelična se lamela proteže duž osi grede.



Slika 4.26 Pojačanje na savijanje i posmik

Pojačanje čvorova okvira zbog potrebe povećanja nosivosti i duktilnosti može se izvesti po principu prema slici 4.27. Prostor čvora se ovije čeličnim limovima koji se lijepe na beton (prostor između lima i betona se ispuni epoksi ljepilom ili drugom injekcijskom smjesom) i dodatno zavare.



Slika 4.27 Pojačanje čvorova okvira radi povećanja nosivosti i duktilnosti

4.6 POJAČAVANJE POPREČNIH PRESJEKA LIJEPLJENJEM LAMELA OD FRP-A

FRP (polimeri ojačani vlaknima) je nova, sve popularnija metoda. U tijeku su brojni novi projekti vezani za razumijevanje i standardizaciju proračuna ojačanja FRP-om.

Glavni tipovi ojačanja FRP-om su GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) i CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) s epoksi smolom kao vezom između konstruktivnog elementa i kompozita. Izbor tipa ojačanja je određen brzinom izvedbe na gradilištu, nužnosti povećanja nosivosti u agresivnom okruženju i na kraju smanjenjem ukupnih troškova i troškova održavanja. Uz to, prednost FRP-a kao laganog materijala omogućava jednostavnu i brzu izvedbu u konstrukcijama.

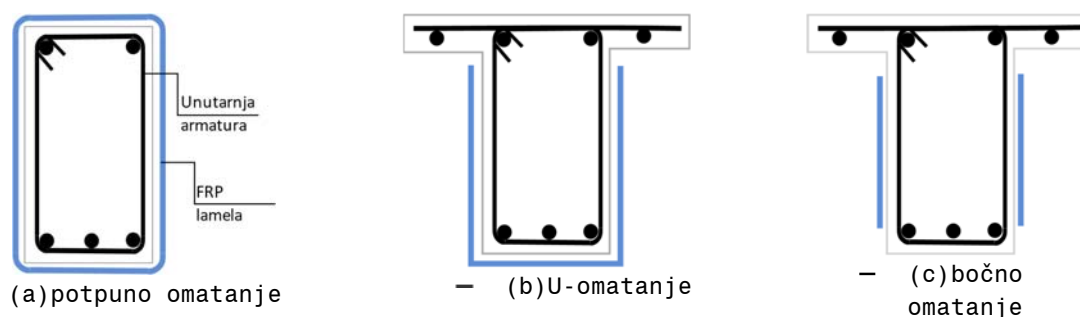
Omjer težine i čvrstoće FRP-a omogućuje veću nosivost u usporedbi s ostalim građevinskim materijalima. Ova metoda se koristi u različitim tipovima konstrukcija i daje dobre rezultate za pomičnu otpornost, otpornost na savijanje i tlačnu otpornost.

Postoje dvije vrste proizvoda:

- Šipke i lamele (danas postoje i gotovi profili kao kod čelika),
- Tkanine i mreže od vlakana kojima se polimerna matrica dodaje prilikom postave.

Tkanina može imati dvosmjerno ili jednosmjerno orijentirana vlakna dok šipke i lamele imaju isključivo jednomjerno orijentirana vlakna.

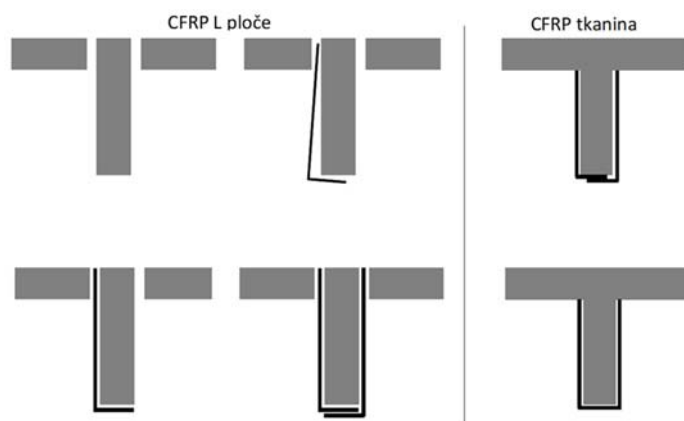
Ovisno o geometriji, ako potpuno omotavanje poprečnog presjeka nije moguće, FRP daje mogućnost djelomičnog omatanja (Slika 4.28).



Slika 4.28 Načini vanjskog omatanja FRP-om

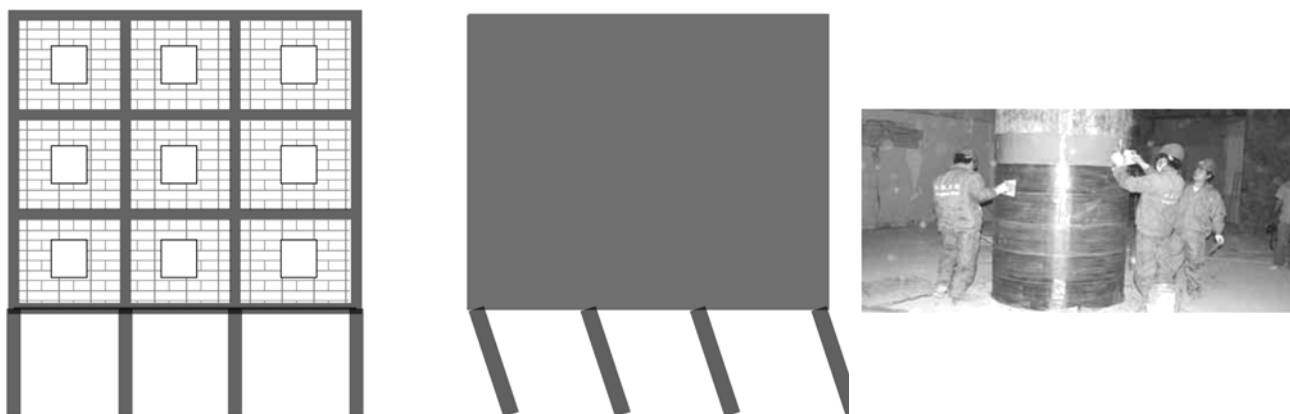
Osim omatanja trakama ili lamelama, moguće je i ojačanje nosivim elementima od FRP-a odnosno CFRP-a ili GFRP-a.

Jedan od primjera pojačanja konstrukcije na posmik je prikazan na slici 4.29.



Slika 4.29 Pojačanja konstrukcije na posmik

Primjer pojačanja stupova ovijanjem u svrhu povećanje duktilnosti, izvodi se kada postoji slučaj tzv. „mekane etaže“ prizemlja, a relativno krute gornje etaže. Dolazi do velikih pomaka između temelja i prve etaže i malih pomaka između gornjih etaža (Slika 4.30).



Slika 4.30 Pojačanja stupova i zidova ovijanjem



Slika 4.31 Mogućnosti pojačanja različitih elemenata konstrukcije

5 LITERATURA:

1. Brehm, E., Dickie, J. E., Lissel, S. L. (2009.), *Reliability of Masonry Panels Subjected to In-Plane Shear*, 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario, May 31- June 3, 2009.
2. Kashyap, J., Griffith, M. C., Mohamed Ali, M. S., Oehlers, D. J. (2011.), *Prediction of Load-Slip Behavior of FRP Retrofitted Masonry*, Journal of Composites for Construction, 15(6), str. 943–951. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000224](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000224)
3. CNR-DT 200R1/2013 (2014.), *Guide for the Design and Construction of externally bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, Materials, RC and PC structures, Masonry Structures*, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Roma – CNR, Rim, Italija
4. Meireles, H., i Bento, R. (2013.), *Rehabilitation and strengthening of old masonry buildings*, ICIST, DTC, (02)
5. Bothara, J. i Brzev, S. (2012.), *A tutorial: Improving the seismic performance of stone masonry buildings*, Earthquake Engineering Research Institut, Oakland, California
6. Stepinac, M., Šušteršič, I., Gavrić, I., Rajčić, V. (2020.), *Seismic Design of Timber Buildings: Highlighted Challenges and Future Trends*, Applied Sciences, 10(4), 1380, <https://doi.org/10.3390/app10041380>
7. Branco, J. M., Descamps, T., & Tsakanika, E. (2017.), *Repair and Strengthening of Traditional Timber Roof and Floor Structures*, Building Pathology and Rehabilitation 9, str. 113–138, https://doi.org/10.1007/978-981-10-5858-5_5
8. Amiraslanzadeh, R., Ikemoto, T., Miyajima, M., Fallahi, A. (2012.), *A comparative study on seismic retrofitting methods for unreinforced masonry brick walls*, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa 2012, International Association for Earthquake Engineering, Tokyo, str. 2-10
9. Galić, J., Vukić, H., Andrić, D. (2019.), *Structural Assessment Of Dubrovnik Cathedral, Croatia*, Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XVI, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 191, str. 467-478, <https://doi.org/10.2495/STR190401>
10. Barbieri, G., Valente, M., Biolzi, L., Togliani, C., Fregonese, L., Stanga, G. (2017.), *An insight in the late Baroque architecture: An integrated approach for a unique Bibiena church*, Journal of Cultural Heritage, 23, str. 58–67, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.07.006>