

Revitalizacija zgrade „Dalmacijavino“

Botić, Marina

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:228824>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-29**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIPLOMSKI RAD

REVITALIZACIJA OBJEKTA "DALMACIJAVINO"

studentica: Marina Botić
mentor: doc. Nikola Popić, dip.ing.arh
komentor: dr.sc. Marjan Sikora, dipl. ing. radiokomunikacija i profesionalne elektronike

2015./2016.

	UVOD	
	Povijesno-prostorna analiza	01
	Objekt "Dalmacijavino"	02
	Povećanje kapaciteta, nadogradnje i izmjene zgrade	03
	Tlocrti - postojeće stanje	04
	Presjeci i pogledi - postojeće stanje	05
	Fotodokumentacija	06
	ANALIZA	
	Analiza šire lokacije	07
	Analiza uže lokacije	08
	KONCEPT	
	Obrazloženje koncepta	09
	Urbanističke postavke	10
	Projektni program	11
	AKUSTIČKA OBRADA	
	Početne postavke - kapacitet i namjena	12
	Proračun	14
	Izbor materijala / 3d prikaz	15
	PROJEKT	
	Pregled- tlocrti mj 1:1000	16
	pregled - presjeci i pročelja 1:1000	17
	Situacija	18
	Situacija(prizemlje)	19
	Tlocrt podruma	20
	Tlocrt prizemlja	21
	Tlocrt 1.kata	22
	Tlocrt 2.kata	23
	Tlocrt 3.kata	24
	Tlocrt krova	25
	Presjek A-A	26
	Presjek B-B	27
	Presjek C-C	28
	Presjek D-D	29
	Presjek E-E	30
	Sjeverno pročelje	31
	Zapadno pročelje	32
	Južno pročelje	33
	Sjeverno pročelje	34
	Prikaz konstukcije	35
	Tehnički opis	36
	SEPARAT	37
	Komentorski rad- Arhitektonska akustika	

POVIJESNO - PROSTORNA ANALIZA

U ovom diplomskom radu odlučila sam prenamjeniti zgradu "Dalmacijavino" koja je smještena na istočnoj obali Splita, podno Katalinića briga. Njezin geografski položaj od ključne je važnosti za grad Split, jer se nalazi na izrazito atraktivnom području gradske luke. Blizina centra grada, Dioklecijanove palače s jedne strane, i transportnih čvorišta s druge. U okruženju zgrade su tako autobusni, željeznički i pomorski terminal.

Sagrađena je na mjestu gdje su postojale dvije kuće obitelji Katalinić, prva koja datira iz 1855. godine i druga iz 1892. godine. Zanimljiva je činjenica da se ta obitelj bavila trgovinom vina, i u prizemljima tih kuća su bila smještena vinska skladišta. Nakon drugog svjetskog rata ostale su samo ruševine od obje kuće, te se na mjestu jedne od njih gradi današnja zgrada vinarije "Dalmacijavino".



Katalinićev brig je prirodni slijed istočne obale, a njegove prirodne, povijesne, obrambene i rekreativne karakteristike su oduvijek privlačile pažnju Splitsana, te je stoga jedna od najatraktivnijih do danas neiskorištenih lokacija u gradu. Sa suprotne, zapadne strane se nalazi Sustipan, drugi zeleni vrh, te u budućnosti se otvara mogućnost povezivanja Marjana i Bačvica upravo šetnicom između Sustipana i Katalinića briga. Danas ta šetnica uvelike postoji i koristi se, od zapadne obale preko rive pa do trajektne luke. No, nakon rive ta komunikacija jenjava na način da je određena transportom i potrebom da ljudi koriste autobusni, željeznički i pomorski terminal.

Na platou samog pomorskog terminala nalazi se i ova zgrada, dragulj hrvatske moderne nažalost u ruševnom stanju. Sagrađena je nakon Drugog svjetskog rata, u periodu kada dolazi do naglog razvoja industrije i prometa u Splitu. Obnavlja se gradska luka, gradi se Sjeverna luka industrijske namjene, proširuje se brodogradilište, obnavljaju tvornice cementa te nastaju i nove tvornice kao što je Tvornica plastičnih masa "Jugovinil" u Kaštel Sućurcu 1947. godine. Poslijeratna arhitektura je izrazito socijalnog ili industrijskog karaktera. Potaknuta ideologijom tadašnje socijaldemokratske vladavine tadašnja arhitektura je fokusirana na otvaranje novih radnih mjesta u vidu izgradnje velikih pogona i nuspojavom te industrijalizacije, potrebom da se povećaju smještajni kapaciteti izgradnjom visokih stambenih četvrti. U takvom ozračju javila se i potreba da se sagrađi objekt vinarije u gradskoj luci da bi se vino što lakše prevozilo trajektima, te da bi se dovozilo grožđe s otoka. Tada je blizina pristaništa i dobra prometna povezanost bila rezultat odluke da se baš na tom mjestu sagrađi zgrada industrijskog karaktera. Danas je promet u trajektnoj luci putničkog karaktera, te je takva namjena zgrade neisplativa, javlja se potreba za javnim prostorom i javnim sadržajima kako za turiste tako i za stanovnike grada Splita.

Zgrada "Dalmacijavino" djelo je arhitekta Stanka Fabrisa. Izgrađena je 1959. godine podno Katalinićeva briga te je danas zaštićena kao kulturno dobro.

OBJEKT "DALMACIJAVINO"

Prema projektu Stanka Fabrisa 1959. godine u splitskoj luci izgrađena je zgrada centralne vinarije Dalmacijavina. Stoljetna trgovina grožđem i vinom između otoka i kopna tako je dobila svoju arhitektonsku formu koja je ujedno naglasila pozicioniranje Splita kao vinarskog centra Dalmacije. Zgrada je u svojoj prvotnoj funkciji ostala sve do 2011. godine kada je zgrada oduzeta Dalmacijavinu, firmi u stečaju, te predana na upravljanje Lučkoj upravi Split.

Od tada zgrada stoji prazna, bez namjene, te joj se mediji s vremena na vrijeme obrate epitetom "ruglo", koji nije rijedak kad se u Splitu govori o modernoj arhitekturi. Zgrada Dalmacijavina upravo je primjer hrvatske moderne industrijske arhitekture, primjer priznat od struke te zaštićen preventivnom zaštitom Konzervatorskog odjela Ministarstva kulture Republike Hrvatske u Splitu.

Splitska vinarija je primjer u kojem autor ostvaruje smjelu i skladnu kombinaciju kamena i stakla kojom, na horizontalno postavljenom volumenu ove zgrade, postiže artikulaciju fasada u duhu neoplasticizma. Postignuta raščlamba katova prozorima i lođama, nad uvučenim te rustičnim kamenom obloženim i stupovima raščlanjenim prizemljem, daje volumenu zgrade određenu lakoću. Geometrijski pristup raščlambi fasade zgrade u skladu je s internacionalnim stilom, a upotreba materijala odaje lokalni karakter. Na samoj lokaciji zgrada ostvaruje logičan prijelaz između hridi Katalinića briga i lukobrana, ali je i funkcionalno susretište pomorskog, cestovnog i željezničkog prometa u svrsi vinarske industrije.

Zajedno s objektima lukobrana (taj je natječaj jednom prilikom radio i sam Fabris), zgrada Dalmacijavina stvara prostornu horizontalu koja s vertikalom Svjetionika pomorcu smještenom na Katalinića brigu, iza zgrade Dalmacijavina, kojeg su 1958. godine projektirali Ivan Carić i Paško Kuzmanić, kreira modernističku vizuru grada koja se ukazuje svim putnicima koji u grad uplovljavaju brodom.



SADAŠNJE STANJE

Unutrašnjost zgrade je potpuno devastirana, do te mjere da se neka stepeništa već urušavaju. Staklene stijene koje su unutrašnjost donekle štitile od vanjskih utjecaja sve više su popucale, a metalni elementi propadaju zbog hrđe. Zbog specifičnosti arhitekture, dominantne velike hale za tankove u samoj unutrašnjosti zgrade, konzervatorske odredbe dozvoljavaju preinake unutrašnjosti uz poštivanje gabarita zgrade i kompozicije pročelja pri adaptaciji zgrade za novu funkciju.

POVEĆANJE KAPACITETA, NADOGRADNJE I IZMJENE ZGRADE

Prva faza izgradnje je objekt **centralne vinarije** iz 1959.godine. Projektiran je po principima internacionalnog stila sa pravilnim volumenom, prizemljem izdignutim od razine tla te korištenjem ravnog krova za raznovrsne aktivnosti. Smješten je na sjevernoj strani parcele neposredno uz trajektna pristaništa. Zgrada se sastoji od dvije funkcionalne sredine: administrativno-upravne na sjevernom dijelu i vinskih cisterni na južnom. Prizemlje zgrade izdignuto je za 1.10m od razine tla i okruženo rampom širine 1.4m na zapadu, a 1m na sjevernoj strani zgrade. Dimenzije zgrade su 44.75m x 40.30m, a izgrađena je od armirano-betonske konstrukcije po sistemu "stup-greda" rastera 5.5m x 5.5m. Vanjski zidovi objekta su debljine 40cm, obloženi su na zapadnoj strani kamenom Veselje, na sjevernoj i istočnoj strani klesanim kamenom, dok je južna fasada u potpunosti sakrivena naknadnom izgradnjom objekta skladišta. Glavni prilaz zgradi vinarije bio je sa sjeverne strane, no u periodu adaptacije 1968.godine premješta se na zapad i tamo ostaje do danas. Podrum zgrade centralne vinarije obuhvaća prostor stare punione, radionica, spremišta goriva, skladišta šljake i kotlovnice te dviju vinskih cisterni. U prizemlju se nalaze prostorije kancelarija, skladišta, ulazni prostor te vinske cisterne u južnom dijelu zgrade. Prvi kat zauzimaju administracija, pravna služba, skladišta, sanitarije i cisterne. Drugi kat je istovjetan prvom katu.

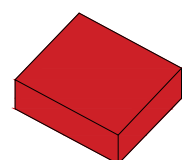
Naknadno je s njene istočne strane sagrađen **aneks** u koji se smješta servisni dio pogona. Nalazi se između zgrade centralne vinarije i prirodnog usjeka podno Katalinića briga. Prizemlje obuhvaća prostore trafostanice te radne prostore. Na prvom katu se nalaze tokarske radionice, a na drugom su prostori tehničkih kancelarija.

Godine 1979. počinje izgradnja **zgrade skladišta** južno od centralne vinarije. Građena je u istom stilu kao i vinarija, a proporcije volumena zgrade s odmjerenim odnosom punih ploha i praznog rastera prozorskih okvira naglašavaju horizontalnost objekta. Glavni ulaz u zgradu skladišta nalazi se sa zapadne strane u razini tla na relativnoj koti od -1.10m. Zgrada je ukopana u teren s južne strane do visine prvog kata, a istočni dio je u potpunosti ukopan i naslonjen na Katalinićev brig. Dimenzije zgrade su 34.00m x 44.40m. Konstrukcijski raster je isti kao i kod zgrade centralne vinarije. Prizemlje zauzima skladište gotovih proizvoda, na prvom i drugom katu je funkcionalna podjela na kancelarijski dio na zapadnoj strani te proizvodno-skladišni prostor na istočnoj strani. Prvi kat zauzima degustacijska sala, enološki laboratorij te "stara puniona". Na drugom katu se nalaze kancelarije u zapadnom sektoru ali i galerija s koje se mogao pratiti proizvodni proces i koja se provlači kroz dvije etaže. Značajan je i njezin krov koji je spojen na Katalinića brig, te predstavlja prekrasnu terasu s pogledom na grad i obližnje otoke.

Zbog nedostatka ureda i potrebe za laboratorijem, nakon ove 3 faze **nadogradnje** se događaju na **krovnoj terasi**. Prva nadogradnja je **lamela "Zapad" i "Jug"** formirajući slovo "L" na krovnoj terasi. Pristupa im se kroz zgradu, stepeništem kroz zgradu centralne vinarije i zgradu skladišta a u obe lamele su smješteni uredski prostori.

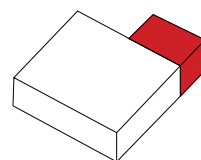
Iduća krovna nadogradnja je **lamela "Sjever"** te sada odnosi poprimaju oblik slova "U". Ta je nadogradnja nešto niža od prethodne dvije, a namjenjena je kao prostor za zaposlene, sa sanitarijama, garderobom i čajnom kuhinjom.

Posljednja nadogradnja je poviše zgrade aneksa, **lamela "Istok"** te formira konačni oblik slova "O" na krovnoj plohi. Pristupa joj se samo preko krovne terase, a unutar nje su smješteni dodatni prostori uredskog karaktera te spremište.



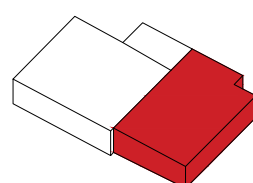
faza 1

CENTRALNA VINARIJA



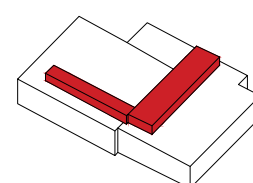
faza 2

ANEKS



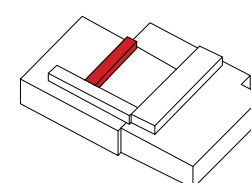
faza 3

ZGRADA SKLADIŠTA



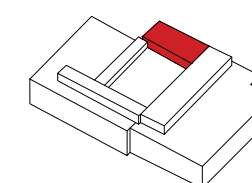
faza 4

NADOGRADNJA KROVA -
"ZAPAD" I "JUG"



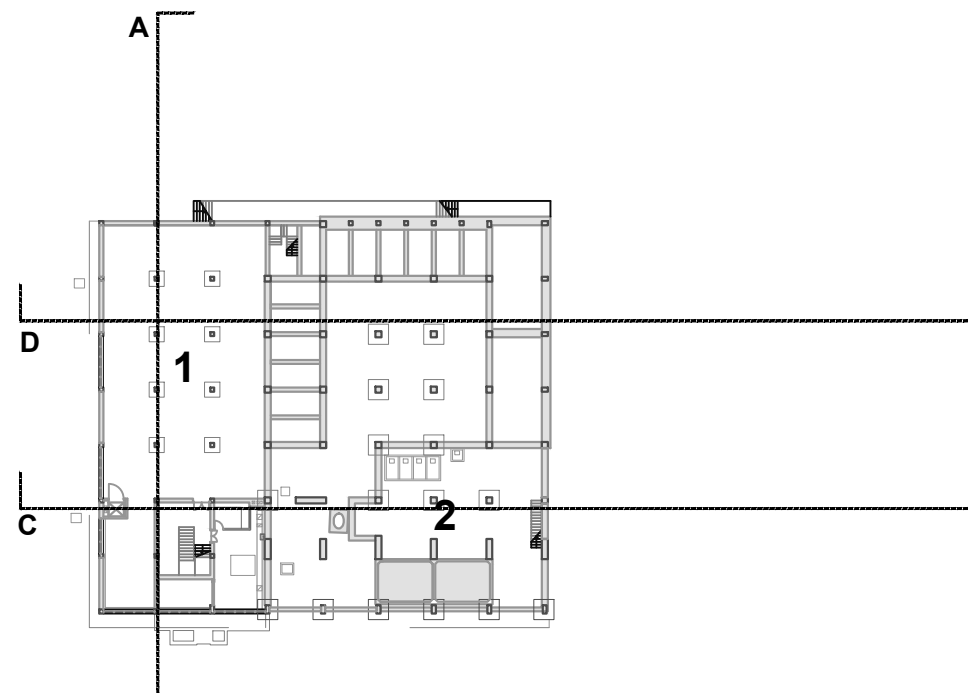
faza 5

NADOGRADNJA KROVA -
"SJEVER"

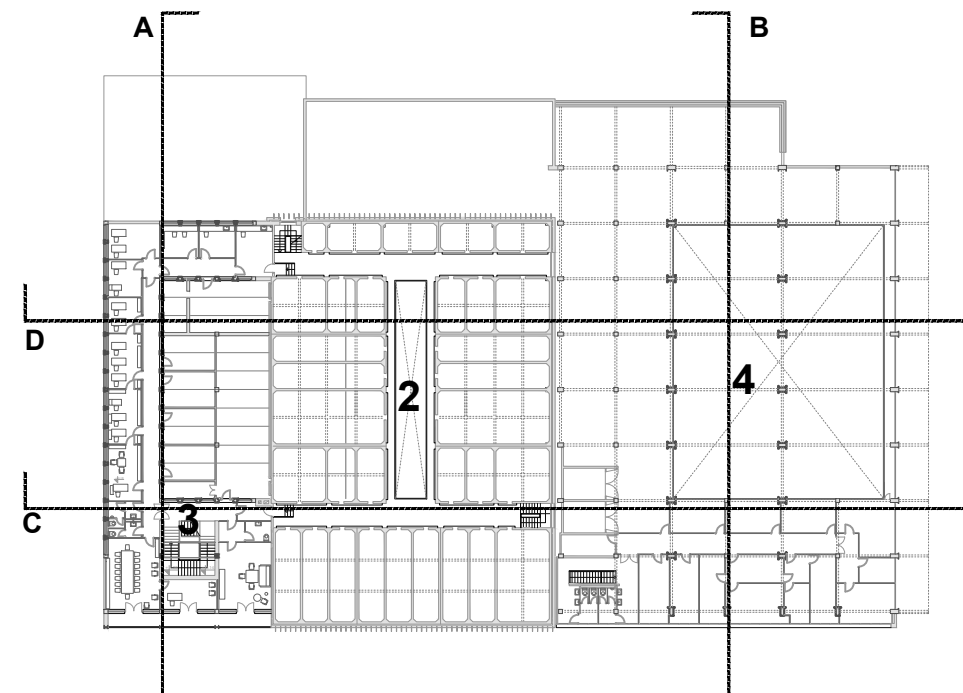


faza 5

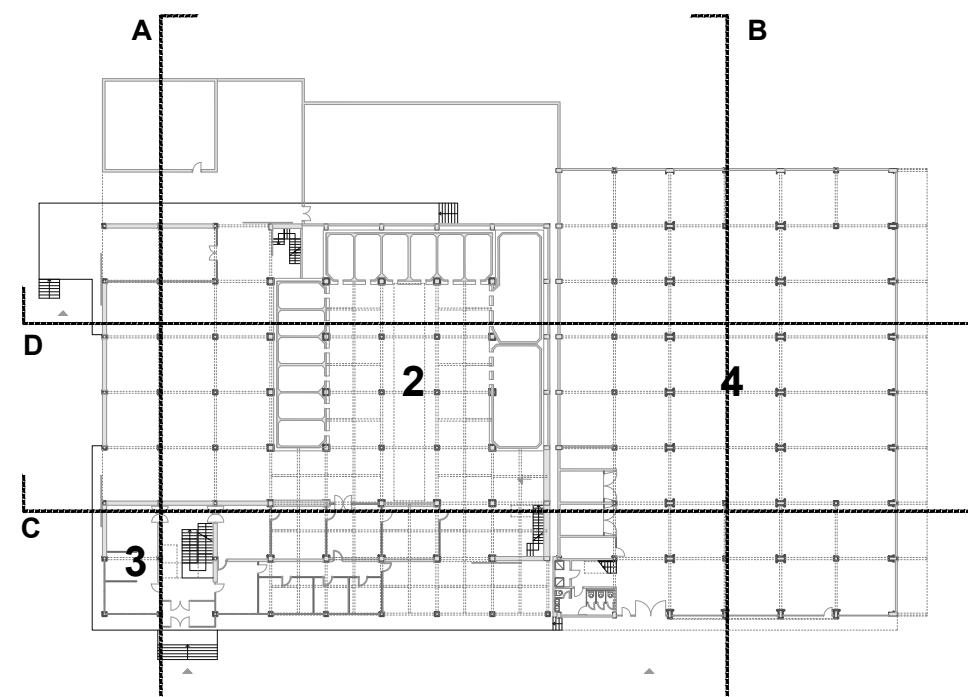
NADOGRADNJA KROVA -
"ISTOK"



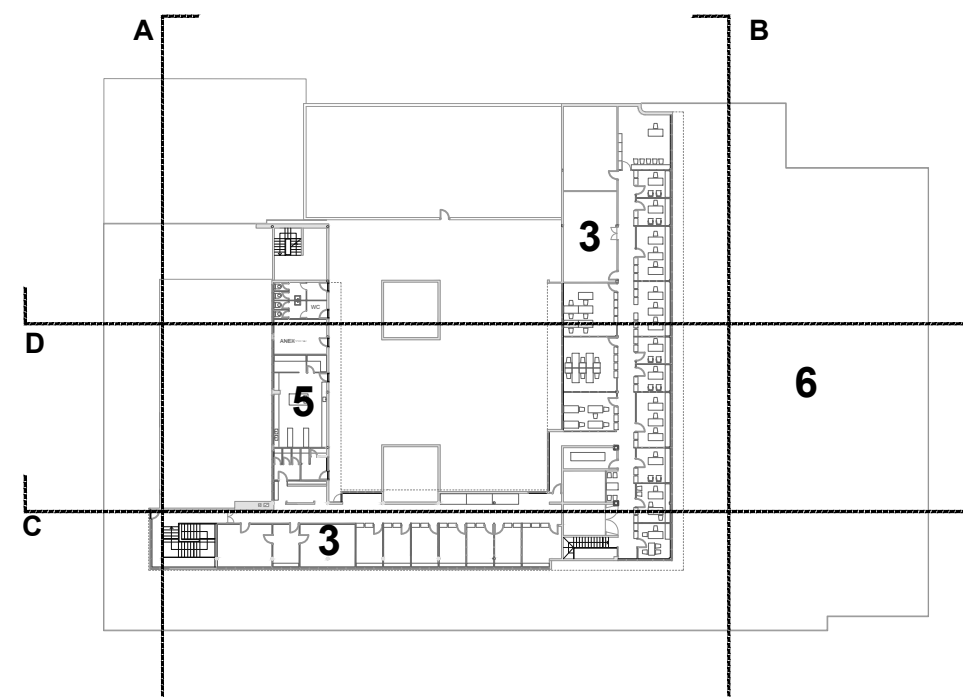
PODRUM



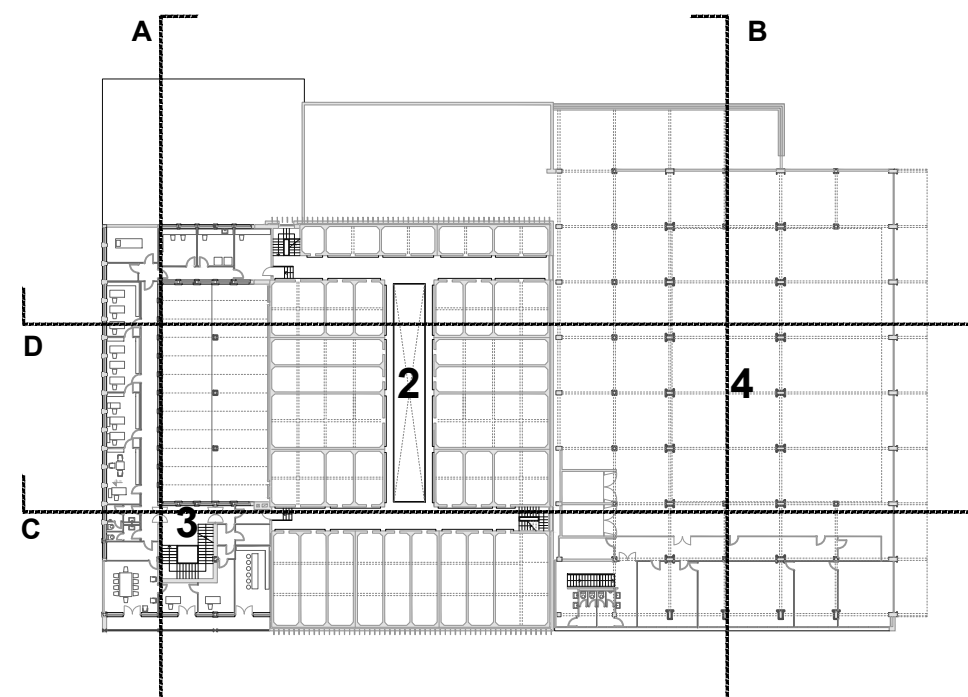
2.KAT



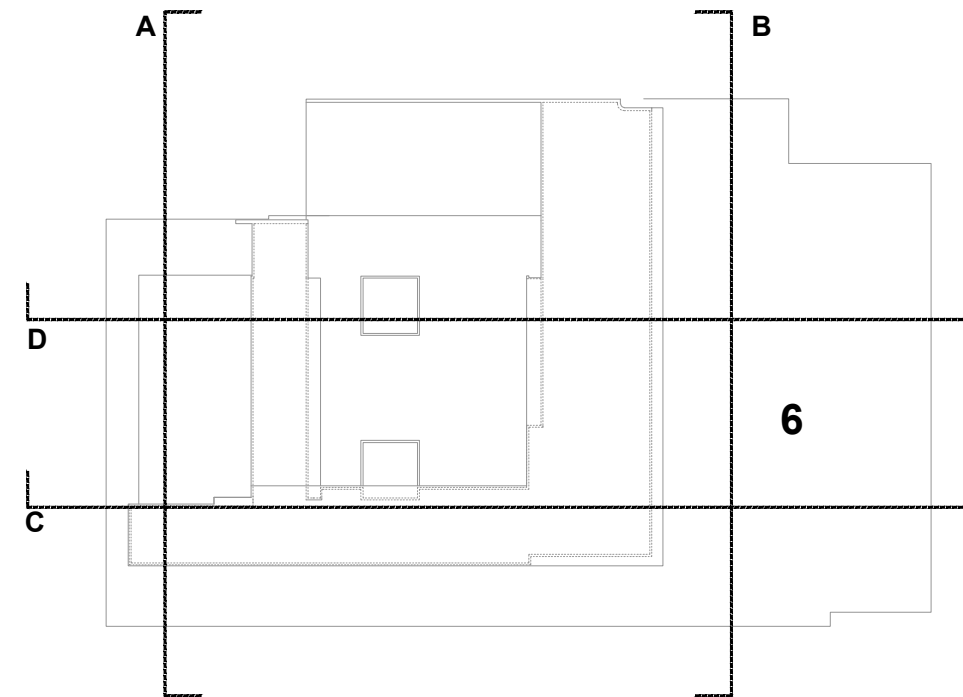
PRIZEMLJE



3.KAT



1.KAT



KROV

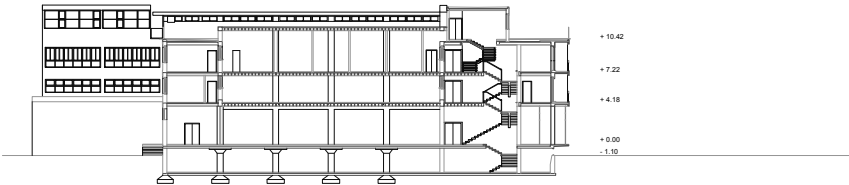
LEGENDA

- 1 gospodarstvo
- 2 cisterne
- 3 administracija
- 4 skladište
- 5 laboratoriji
- 6 terasa

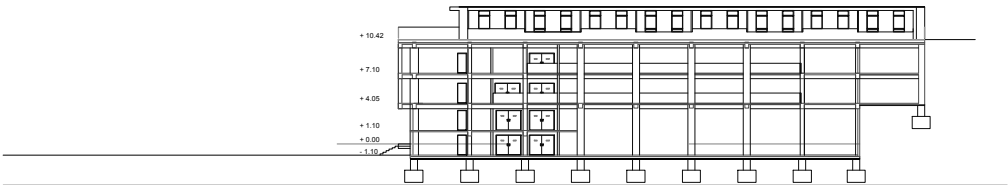


MJ 1:750

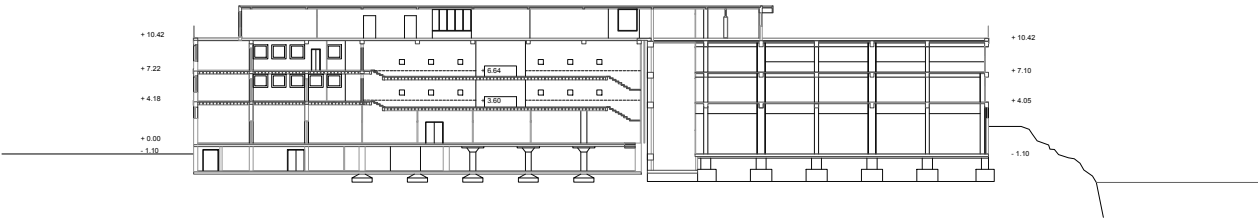
0 5 10 20 30 40 50



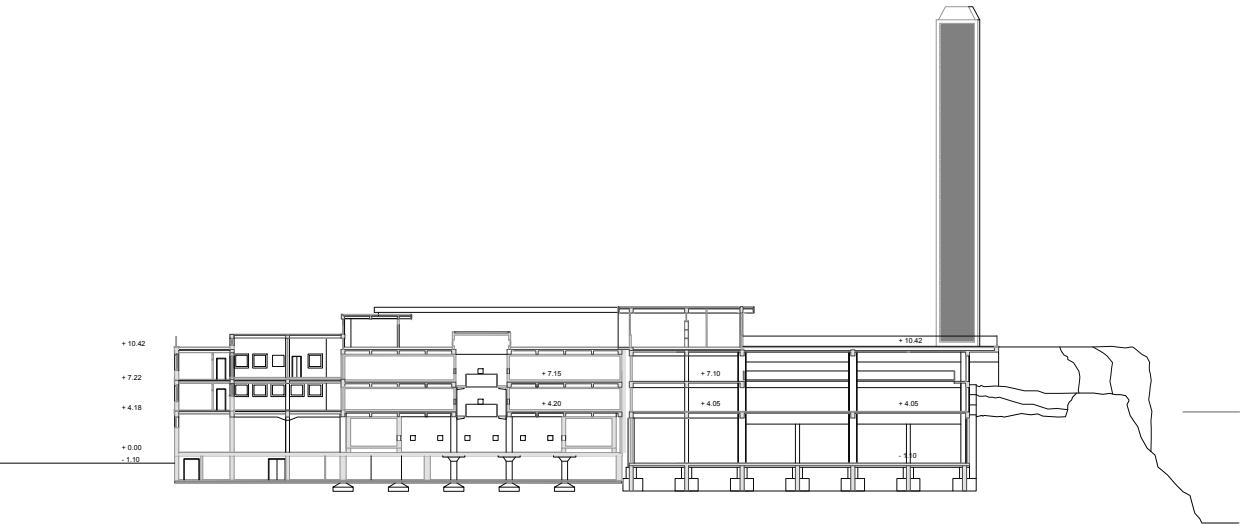
PRESJEK A



PRESJEK B



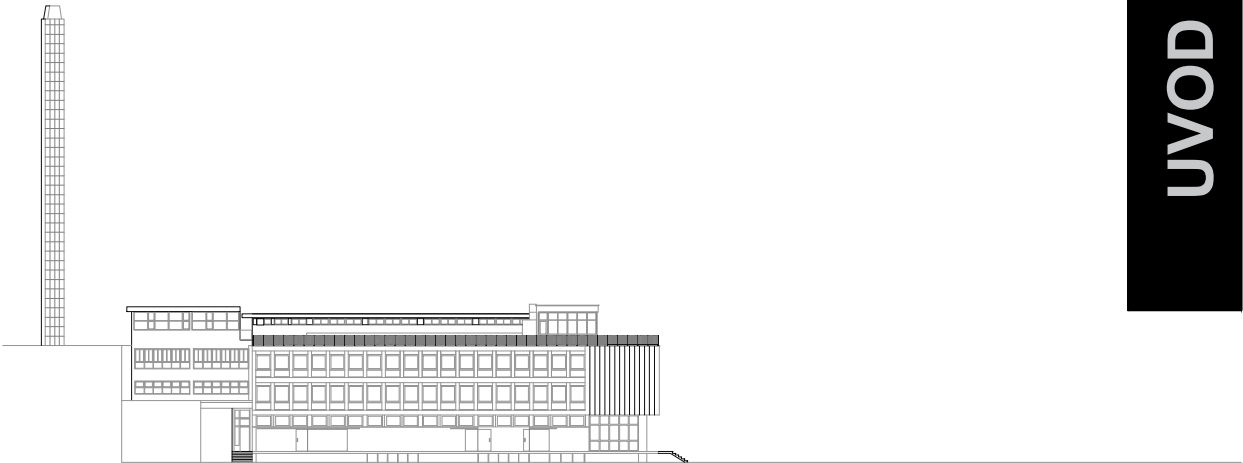
PRESJEK C



PRESJEK D

MJ 1:750

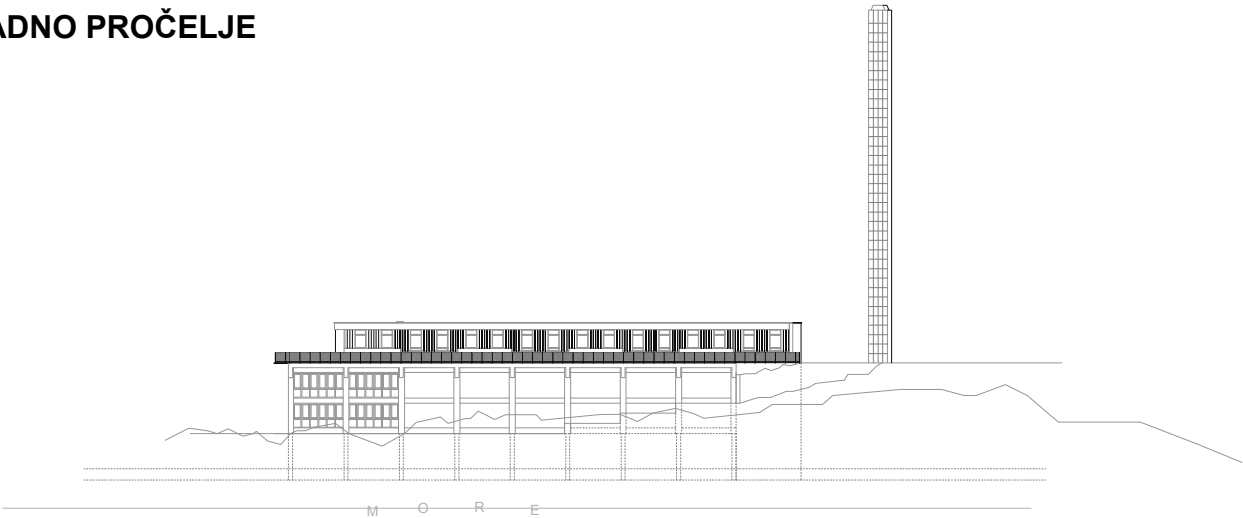
0 5 10 20 30 40 50



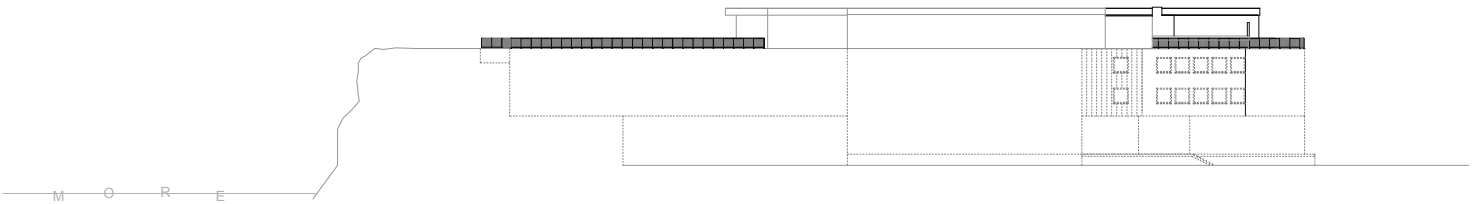
SJEVERNO PROČELJE



ZAPADNO PROČELJE



JUŽNO PROČELJE



ISTOČNO PROČELJE





SUSTIPAN



ZAPADNA OBALA



VAROŠ



PROKURATIVE



RIVA



TRAJEKTNA LUKA



KATALINIĆEV BRIG

Analiza šire lokacije nam omogućava da sagledamo položaj zgrade "Dalmacijavino" u odnosu na centar grada, Dioklecijanovu palaču i cestovni promet. Nalazi se na samom rubu istočne obale smještena podno Katalinića briga a nasuprot se nalazi Sustipan. Te dvije zelene poveznice zatvaraju luku, i dok je Sustipan profitirao izgradnjom Zapadne obale i postao nova šetnica Splitskog, potencijal Katalinićeva briga je ostao neiskorišten. Iako je na granici grada s jedne strane i vodi u zeleni pojas Bačvice s druge, ne privlači ljude kao šetnicu već je to prostor prometnog karaktera poglavito orijentiran na transport putnika i robe autobusnog, željezničkog ili pomorskog terminala.

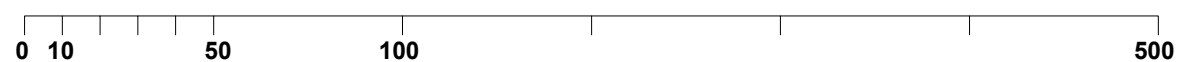
Zgrada je smještena unutar pomorskog terminala, na samom rubu istočne obale gradske luke.

Moguće je pristupiti zgradi kolnim i pješačkim putem. Naslonjena je na prirodni usjek Katalinića briga, a na krovu 2 etaže nalazi se prohodna terasa koja je direktno povezana na park i spomenik pomorcu koji služi i kao svjetionik.

Blizina gradu i dobra prometna povezanost sugeriraju na buduću javnu namjenu zgrade, kao i potreba za rješenjem partera i terase na način da se koriste kao šetnica ili javni trg. Također u budućnosti se planiraju graditi pristaništa za kruzere zapadno od zgrade uz postojeći gat koji zatvara luku. Nameće se i pitanje novih sadržaja za turiste, te odnosa same zgrade s okolinom i povećanjem kapaciteta putničkog prometa.



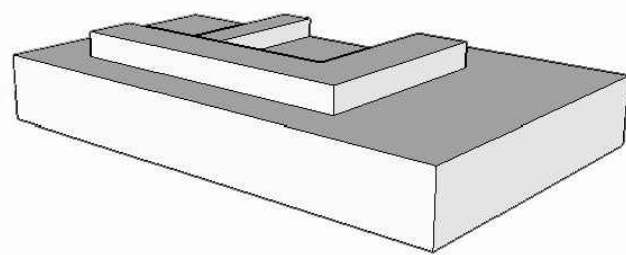
MJ 1:2000



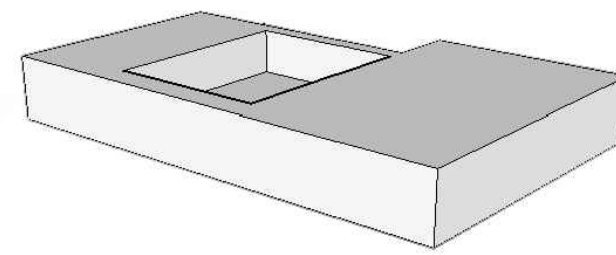
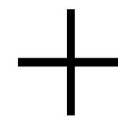
OBRAZLOŽENJE KONCEPTA

Projektni zadatak je prenamjena zgrade Dalmacijavina uz očuvanje postojećih pročelja koja su i konzervatorski zaštićena. S obzirom na nedostatak multifunkcionalne a poglavito koncertne dvorane u Splitsko-dalmatinskoj županiji, ali i na prostoru šire regije, predlažem novu namjenu zgrade kao hibrida multifunkcionalne dvorane i popratnih sadržaja koji su potrebni tom prostoru s obzirom na blizinu centra grada te željezničkog, autobusnog i pomorskog terminala.

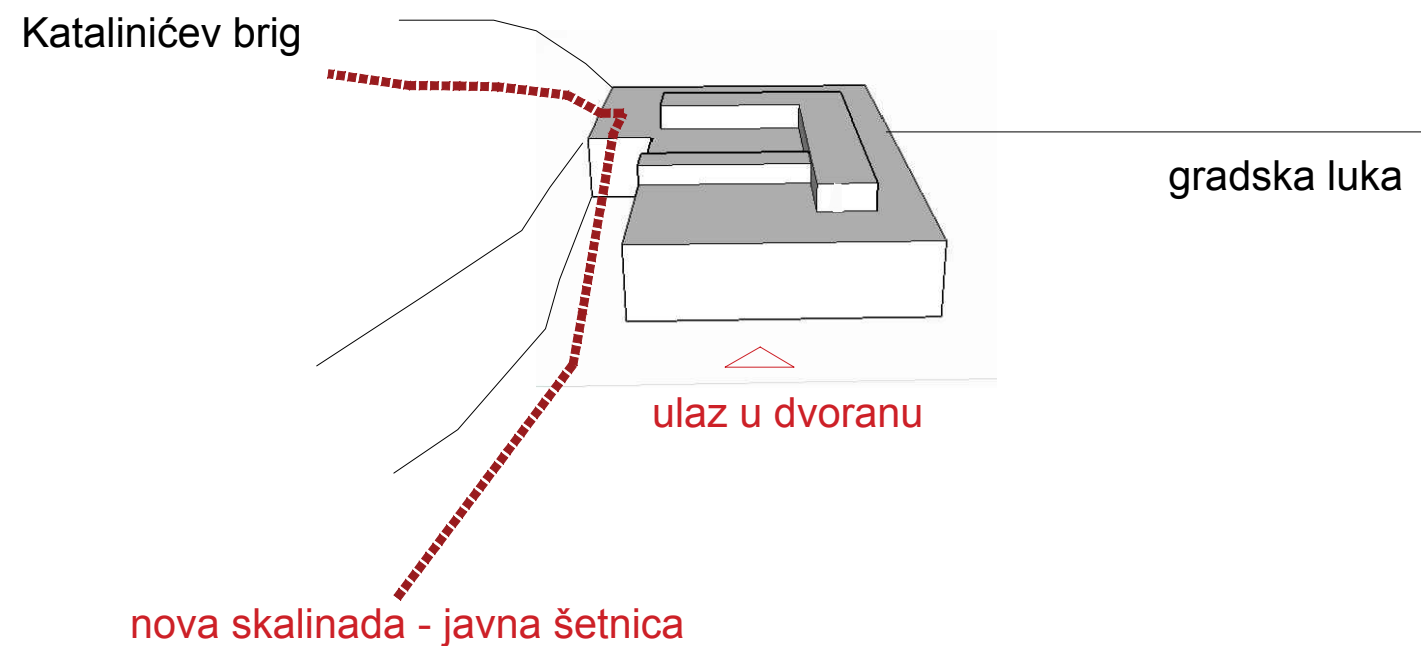
Multifunkcionalna dvorana bi kulturno hranila taj dio grada, dok koegzistencija s drugim sadržajima bi omogućila financijsku neovisnost same građevine. Također, s obzirom na poglavito korištenje u večernjim satima, javlja se potreba za dodatnim programom koji bi tu zgradu aktivirao tokom cijelog dana. Dodatni sadržaji su stoga ugostiteljskog karaktera na katovima, prizemlje ima aktivnosti za turiste a krovna terasa sada postaje gradski prostor spajanjem Katalinića briga sa gradskom lukom u vidu nove šetnice kroz zgradu.



OČUVANJE PROČELJA



"KUĆA U KUĆI"

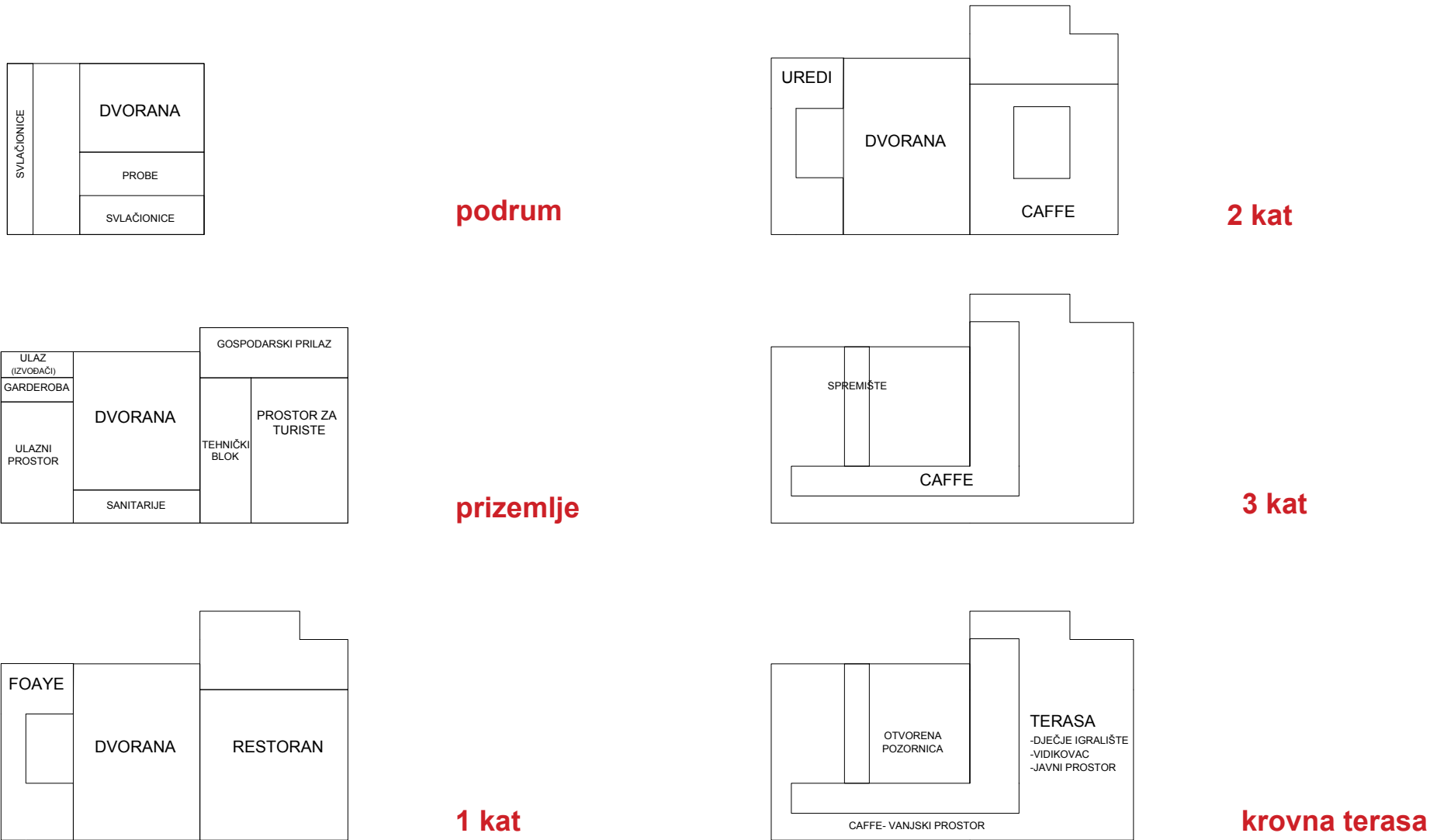




PROGRAM

Odlučila sam se na revitalizaciju zgrade u kojoj centralno mjesto zauzima dvorana i nju smještam u centar objekta, rušim postojeću konstrukciju cisterni, pročelja podupirem čeličnom konstrukcijom i nastavljam na čeličnu krovnu rešetku koja omeđuje volumen dvorane. Ostatak građevine obnavljam, ostavljam postojeći raster konstrukcije, armirano-betonsku rešetku greda i stupova.

Programski sjeverno od nove dvorane smještam sve prostore dvorane, garderobe i prostore za izvođače u podrumu, ulazni prostor u prizemlju, foaye na 1.katu te uredske prostore na 2.katu. Prostor skladišta južno od dvorane tretiram kao zasebnu cjelinu, povezanu sa dvoranom na 1.katu. Prizemlje zauzima prostor za turiste i korisnike terminala (informacije, predavanja, autohtoni suveniri i tradicionalni proizvodi) te u pozadini se nalazi tehnički blok i gospodarski prilaz. Na 1.katu zgrade skladišta se nalazi restoran, na 2.katu caffe. Na krovu zgrade povezujem Katalinićev brig s gradskom lukom uz pomoć javnog stepeništa na istoku zgrade, na prostoru porušenog aneksa čija arhitektonska i funkcionalna vrijednost je bila zanemariva. Terasa tako postaje gradski prostor, igralište za djecu i vidikovac. Postojeće lamele obnavljam i one su ugostiteljske namjene, a na krovu dvorane se događa vanjska pozornica namijenjena ljetnim manifestacijama (koncerti, projekcije, kulturne priredbe).



MULTIFUNKCIONALNA DVORANA

Analizom kulturne ponude grada Splita primjećujem nedostatak kvalitetne koncertne dvorane, mjesta za kongrese ili predavanja namijenjena široj publici i većem broju ljudi. U gradu postoji Spaladium arena, te se ona danas i koristi za brojne komercijalne koncerte, sportska događanja, a u zimskom razdoblju prostor partera i kao klizalište, te ima kapacitet od skoro 11 000 ljudi. Uz nju, za koncerte se koristi i dvorana Gripe kapaciteta 6000 ljudi. I Spaladium arena i dvorana Gripe su prvenstveno objekti namijenjeni sportu sa tribinama koje ih okružuju. Što se tiče klasične glazbe i prostora za njeno izvođenje koristi se HNK, a tokom ljetnih mjeseci i podrumi Dioklecijanove palače te Peristil. Također se koriste brojne ustanove glazbene namjene koje imaju prostore/predavaonice malih kapaciteta (100m²) koje povremeno prirede koncerte solista ili manjeg zbora.

Zbog toga odlučujem unutar postojeće zgrade "Dalmacijavino" porušiti konstrukciju cisterni, te unutar zaštićene fasade uz pomoć nove čelične konstrukcije napraviti multifunkcionalnu dvoranu sa 540 sjedećih mjesta. Ona bi se koristila za koncerte, predavanja i brojne kulturne manifestacije. Blizina grada i dobra prometna povezanost još više opravdavaju upravo ovu lokaciju za smještaj nove dvorane.



Split HNK



Spaladium Arena



Sportski centar Gripe



Dioklecijanovi podrumi



Peristil



Proračun kapaciteta

Minimalan broj ljudi s obzirom na veličinu grada u usporedbi sa glavnim gradom Zagrebom, brojem stanovnika i kapacitetom koncertne dvorane Vatroslav Lisinski.

$$ZG : ST = 800\,000 : 200\,000 \quad \text{broj stanovnika}$$

$$\text{Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski} : X = 1800 : X \quad \text{kapacitet}$$

$$800\,000 : 200\,000 = 1800 : X$$

$$X = 450 \text{ sjedećih mjesta}$$



Koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog, Marjan Haberle, 1973., Zagreb



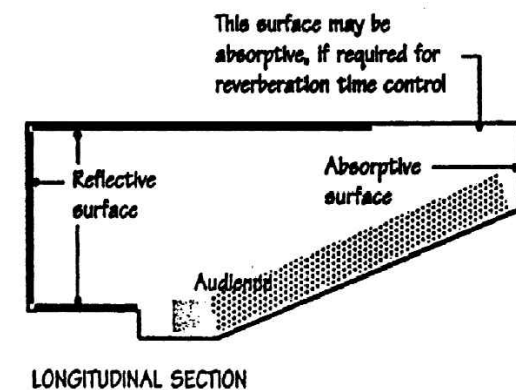
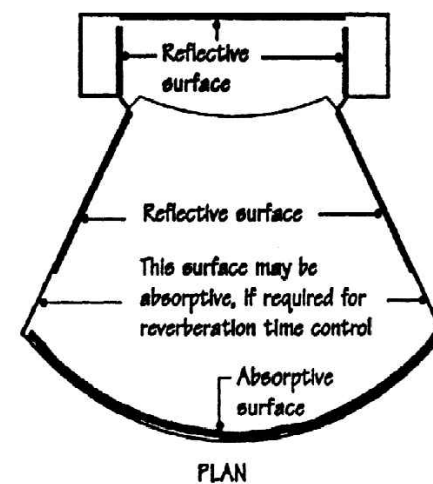
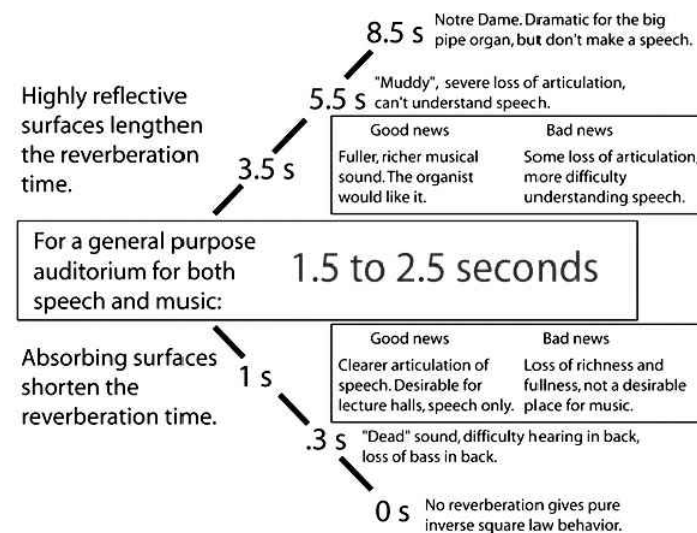
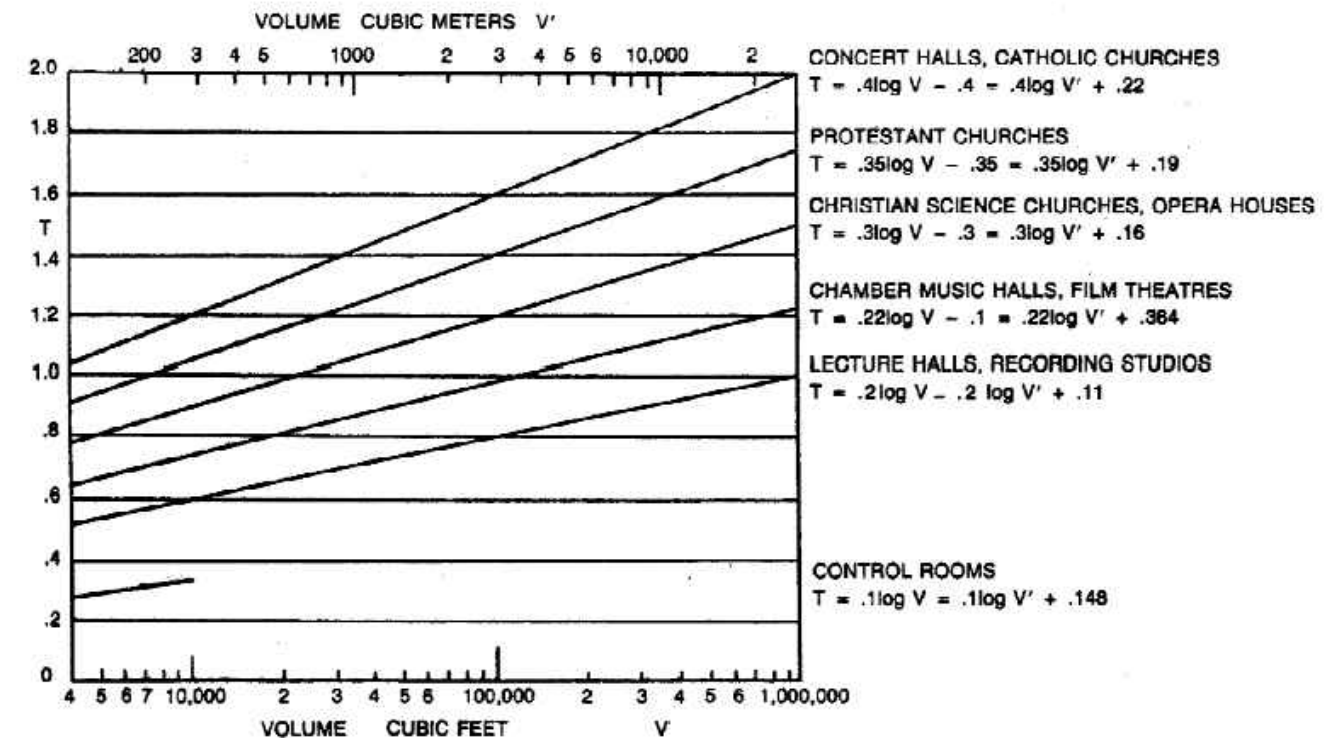
NAMJENA

Odlučila sam se za projektiranje multifunkcionalne dvorane, one koja bi imala dobre zvučne karakteristike za koncerte klasične glazbe kao i mogućnost za održavanje kongresa i predavanja.

Jedan od najbitnijih parametara prilikom određivanja akustičkih kvaliteta i mana nekog prostora je vrijeme odjeka. Upravo zbog toga u ovom diplomskom radu ću izvršiti proračun za vrijeme odjeka isprojektirane dvorane s obzirom na njen volumen, broj sjedala i korištene materijale.

Iz tablice primjećujemo da povećanjem volumena dvorane proporcionalno raste i poželjno vrijeme odjeka. Jasno se iščitavaju i drugačiji zahtjevi za vrijeme odjeka u slučaju govora i glazbe, koncertnoj dvorani je povoljnije imati duže vrijeme odjeka dok za predavaonice veće vrijeme odjeka može predstavljati problem u razumijevanju.

Parametar pri projektiranju ove dvorane koji sam koristila je unificirano vrijeme odjeka koje se koristi u svijetu za multifunkcionalne dvorane srednje veličine (cca 5000m³) i on iznosi između 1,6s i 1,9s.



Što se tiče projektiranja same dvorane, u ovom shematskom prikazu na slici lijevo vidimo način obrade bočnih stijena, stražnje plohe i stropa, te sam u idućem proračunu prikazala korištene materijale i vrijeme odjeka kao rezultat tih parametara.



Royal Albert Hall, London
vrijeme odjeka : 2,6s



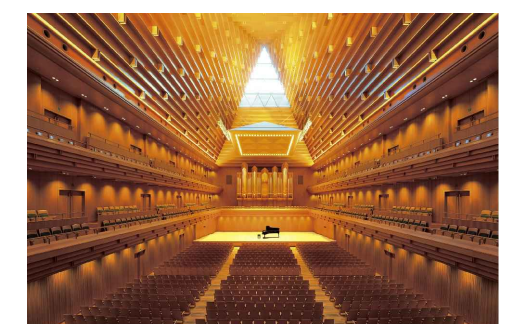
Berlinska filharmonija, Hans Scharoun
vrijeme odjeka : 2,0s



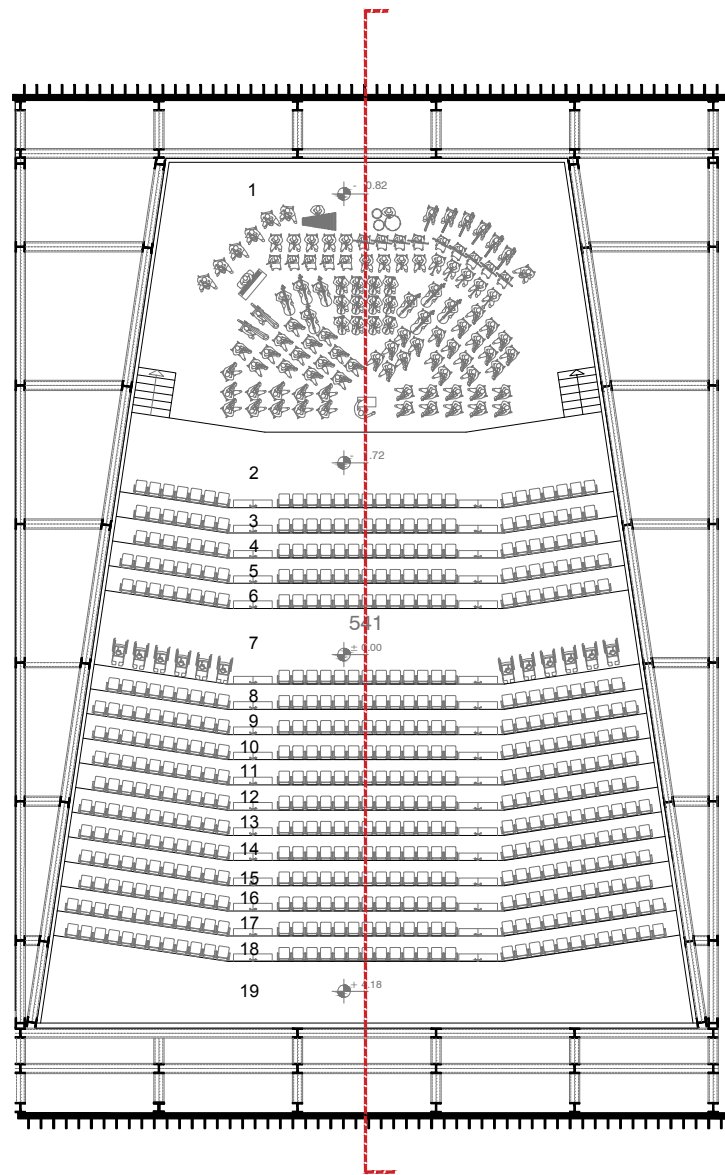
Pariška filharmonija, Jean Nouvel
vrijeme odjeka : 2,3s



Sibelius Hall, Lahti, Finska
vrijeme odjeka : 2,5s



Tokyo Concert Hall, Japan
vrijeme odjeka : 1,95s



površine poda

1- 186,7 m²
2- 58,8 m²
3- 19,9m²
4- 20,2 m²
5- 20,5 m²
6- 20,8 m²
7- 63,9 m²
8- 21,7 m²
9- 22,1 m²
10- 22,4 m²
11- 22,7 m²
12- 23 m²
13- 23,3 m²
14- 23,6 m²
15- 23,9 m²
16- 24,2 m²
17- 24,4 m²
18- 24,8 m²
19- 78,5 m²

visina stropa

1- 8,8 m
2- 9,7 m
3- 9,4 m
4- 9,1 m
5- 8,7 m
6- 8,3 m
7- 8,0 m
8- 7,7 m
9- 7,3 m
10- 7,1 m
11- 6,6 m
12- 6,2 m
13- 5,9 m
14- 5,6 m
15- 5,2 m
16- 4,8 m
17- 4,6 m
18- 4,2 m
19- 3,9 m

volumen

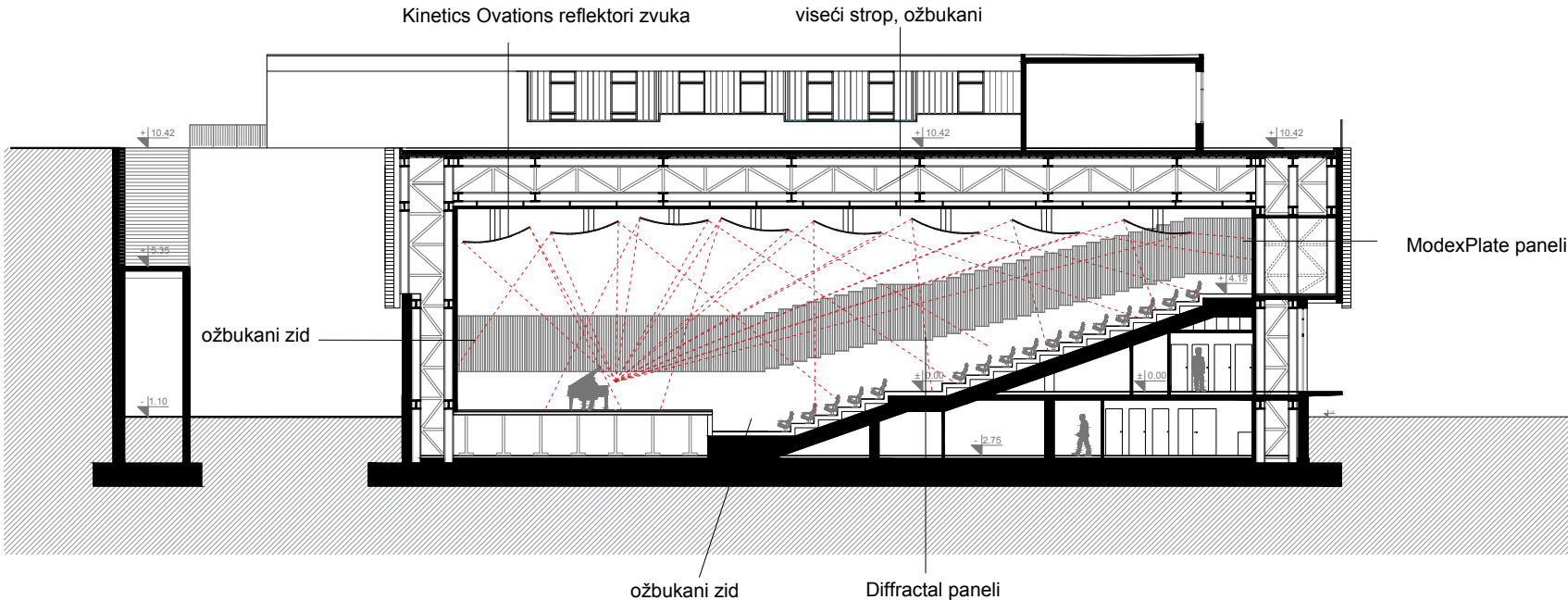
1- 1642 m³
2- 570,4 m³
3- 187,1 m³
4- 183,8 m³
5- 178,4 m³
6- 172,6 m³
7- 511,2 m³
8- 167,1 m³
9- 161,3 m³
10- 159 m³
11- 149,8 m³
12- 142,8 m³
13- 137,5 m³
14- 132,2 m³
15- 124,3 m³
16- 116,2 m³
17- 112,3 m³
18- 104,2 m³
19- 306,2 m³

UKUPNI VOLUMEN DVORANE

5258,4 m³

vrijeme odjeka :

$T = 0.16 \frac{V}{A}$



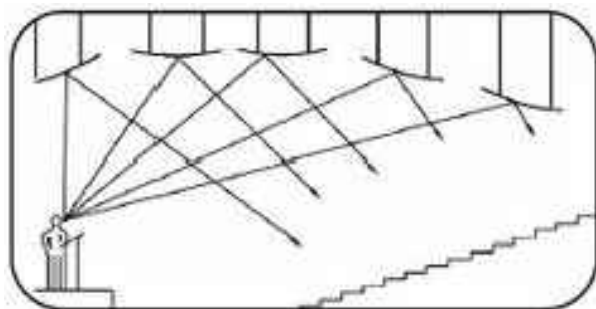
IZABRANI MATERIJALI - KOEFICIJENTI APSORBCIJE PO FREKVENCIJAMA

MATERIJAL	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
viseći strop, ožbukani	0,25	0,25	0,10	0,05	0,05	0,03
akustički panel Kinetics Ovation	0,15	0,00	0,03	0,04	0,05	0,14
ožbukani zid (pozornica)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
ožbukani zid (bočne stijene)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Diffractal (bočne stijene)	0,22	0,23	0,35	0,22	0,20	0,20
Modex Panel (stražnja stijena)	0,90	0,80	0,40	0,25	0,15	0,15
pod, drveni parket	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
tapecirane stolice	0,20	0,25	0,30	0,38	0,45	0,40
publika (m2 po osobi)	0,15	0,30	0,50	0,55	0,60	0,50

PRORAČUN VREMENA ODJEKA

MATERIJAL	POVRŠINA	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
viseći strop, ožbukani	730 m ²	183	183	73	37	37	22
akustički panel Kinetics Ovation	342 m ²	51	0	10	14	17	48
ožbukani zid (pozornica)	140 m ²	3	3	4	6	6	4
ožbukani zid (bočne stijene)	440 m ²	9	9	13	18	18	13
Diffractal panel (bočne stijene)	82 m ²	18	19	29	18	17	17
Modex Plate panel (stražnja stijena)	93 m ²	83	75	37	23	14	14
pod, drveni parket	555 m ²	22	22	39	33	33	39
tapecirane stolice	175 m ²	35	43	52	67	79	70
publika (540), $\frac{2}{3}$ kapaciteta (m2 po osobi)	360 m ²	54	108	180	198	216	180
ukupna apsorbcija	m ²	458	462	437	414	437	407
vrijeme odjeka	sek	1,8	1,7	1,8	2,0	1,9	2,0
vrijeme odjeka	sek	1,9					

PRORAČUN



Kinetics™ Ovation reflektor, dim 2.8 x 2.8m

Reflektori su postavljeni na ovješenu konstrukciju o strop i o njih se zvučne zrake jednoliko raspršuju kroz prostor.



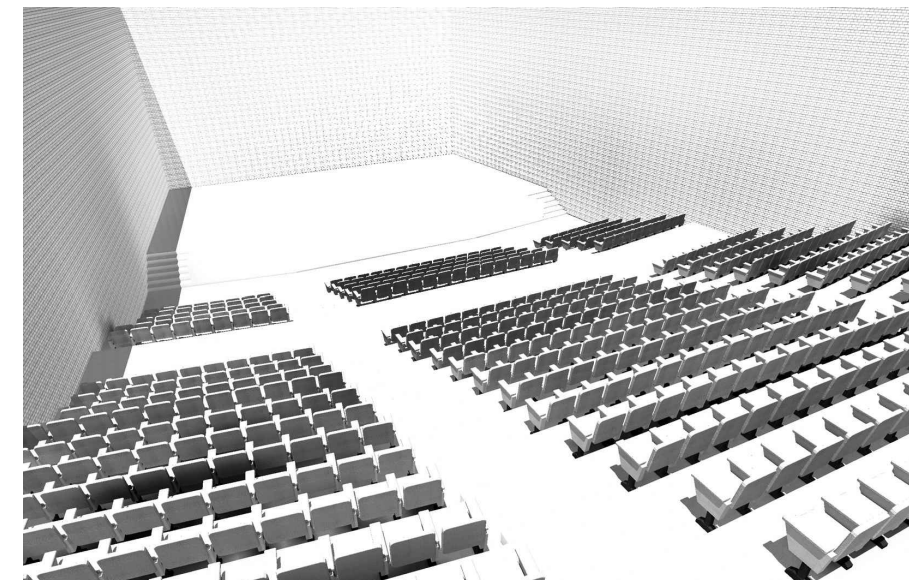
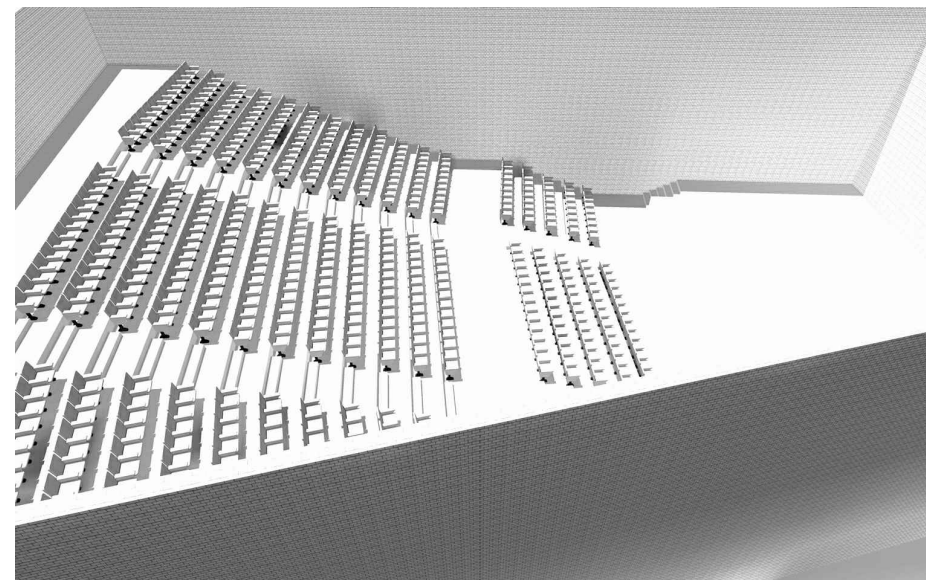
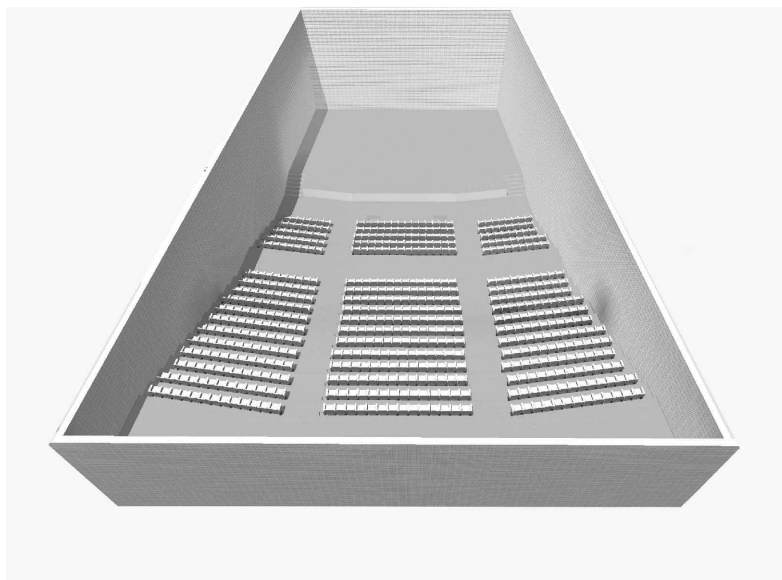
Diffraction paneli, dim 2.4m x 0.6m

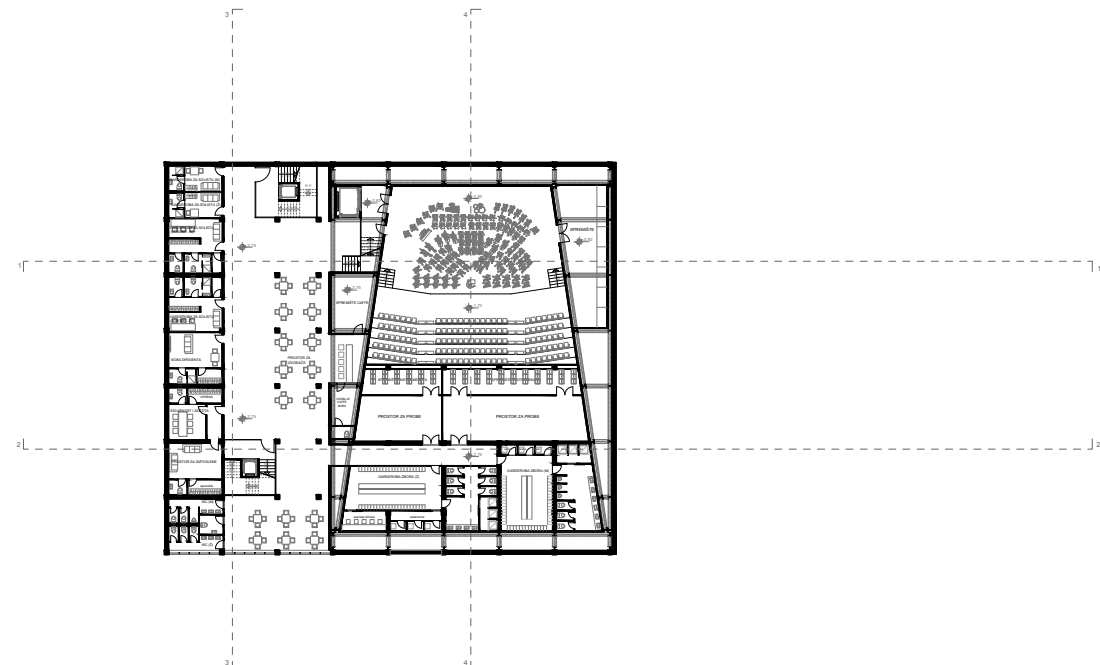
Koriste se na bočnim stijenama dvorane kao difuzori zvuka.



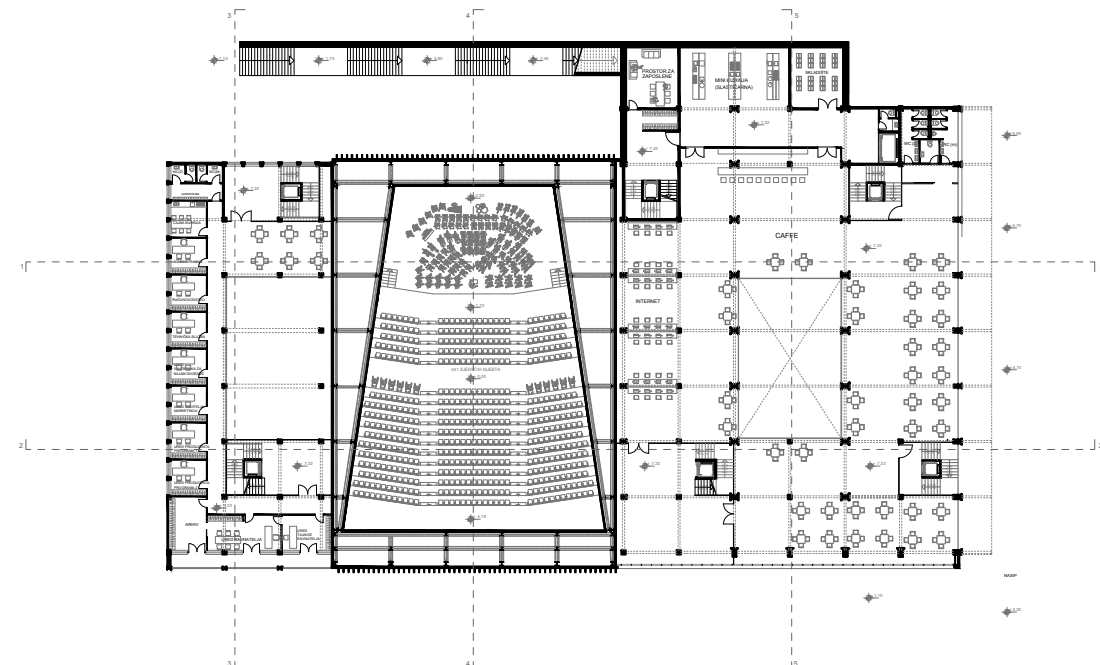
Modex Plate, dim 1.5m x 1m

Obloga stražnje stijene dvorane koja služi za apsorpciju zvuka.

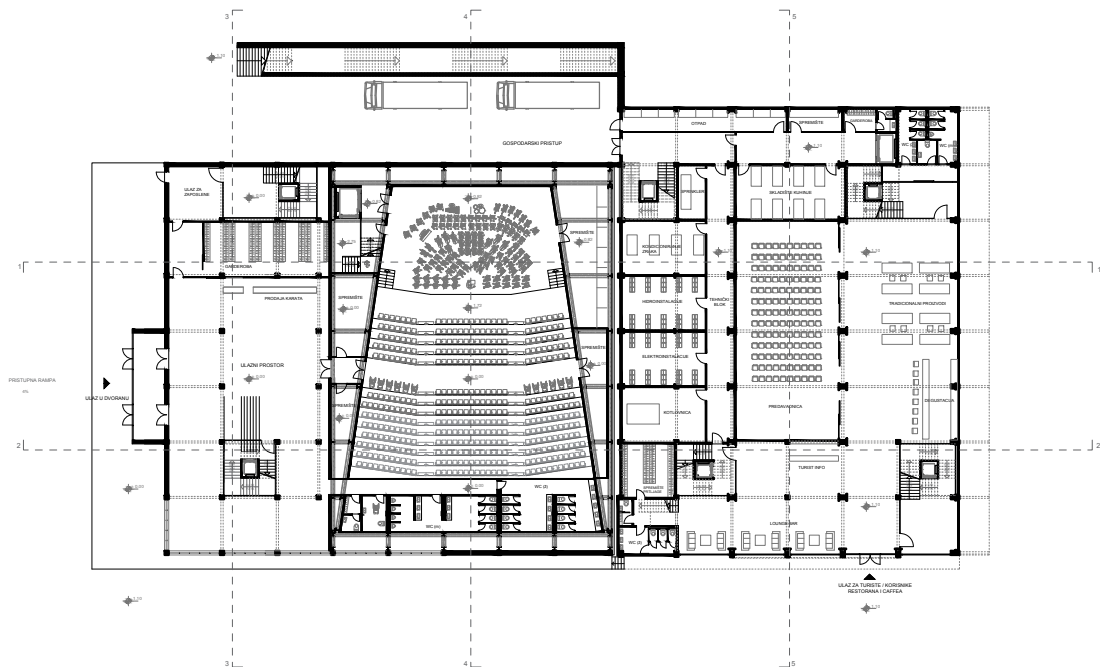




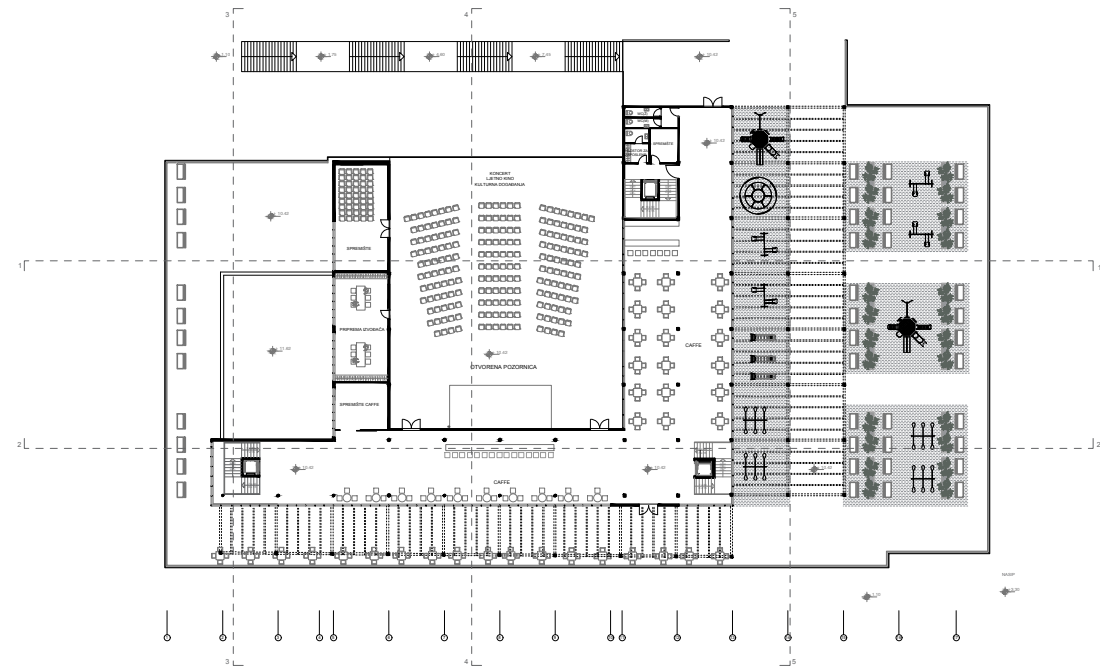
PODRUM



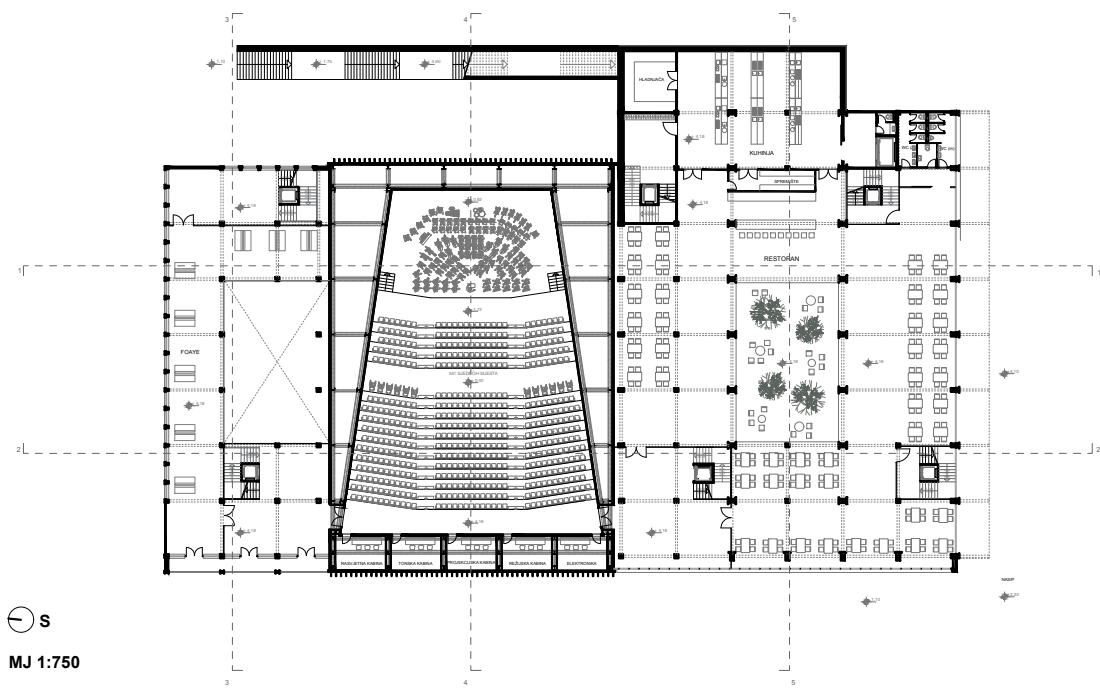
2.KAT



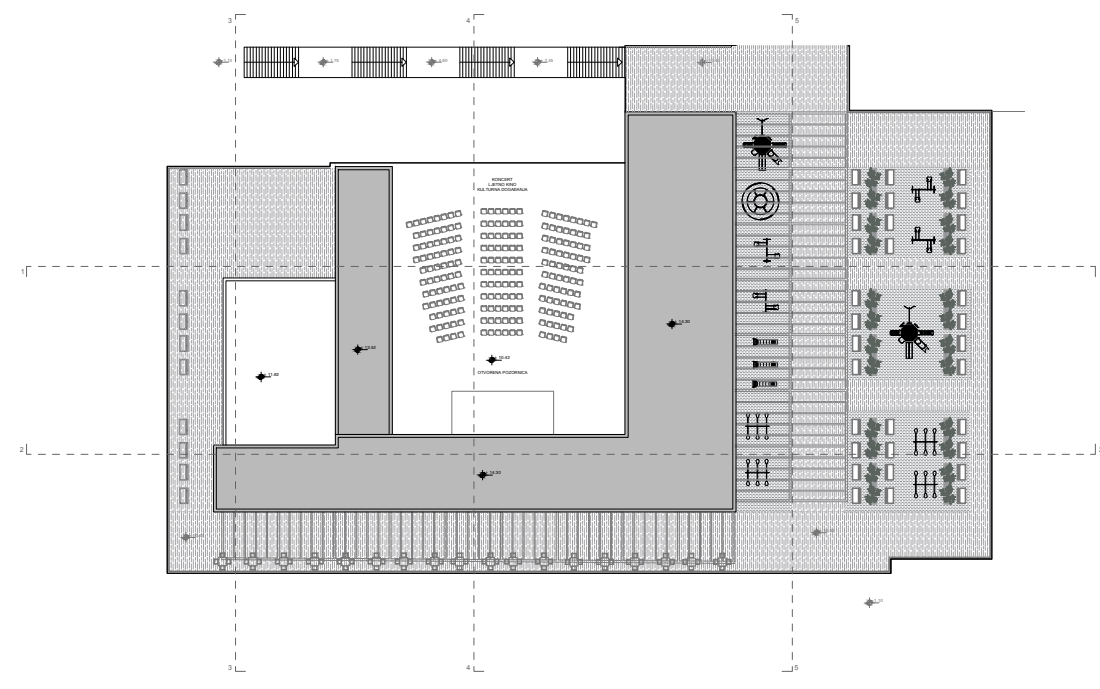
PRIZEMLJE



3.KAT



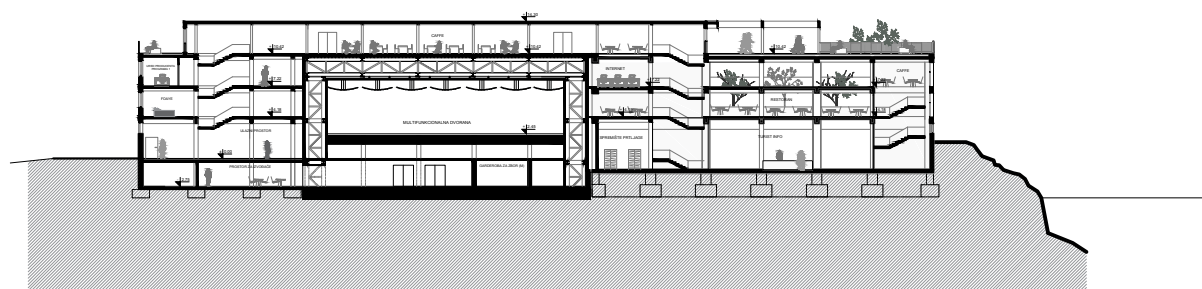
1.KAT



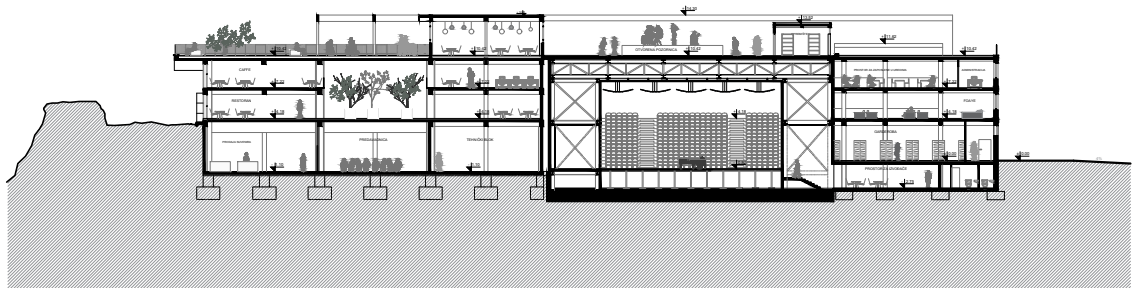
KROV

⊙ S
MJ 1:750

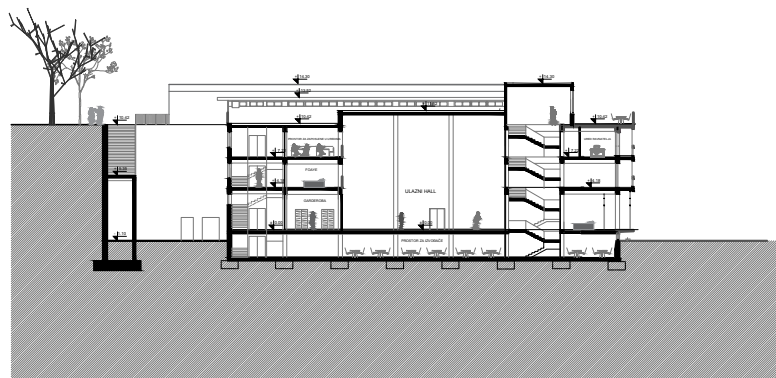
0 5 10 20 30 40 50



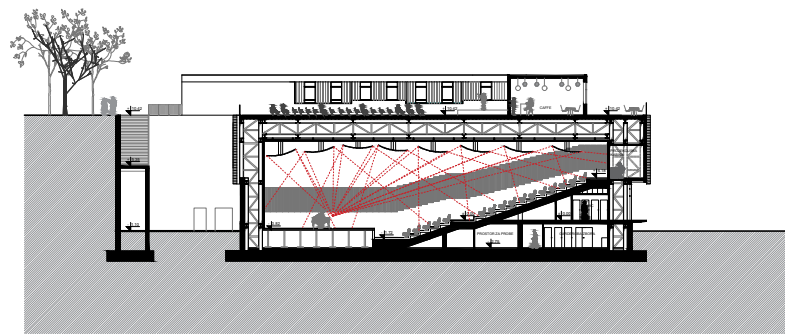
PRESJEK 1 - 1



PRESJEK 2 - 2



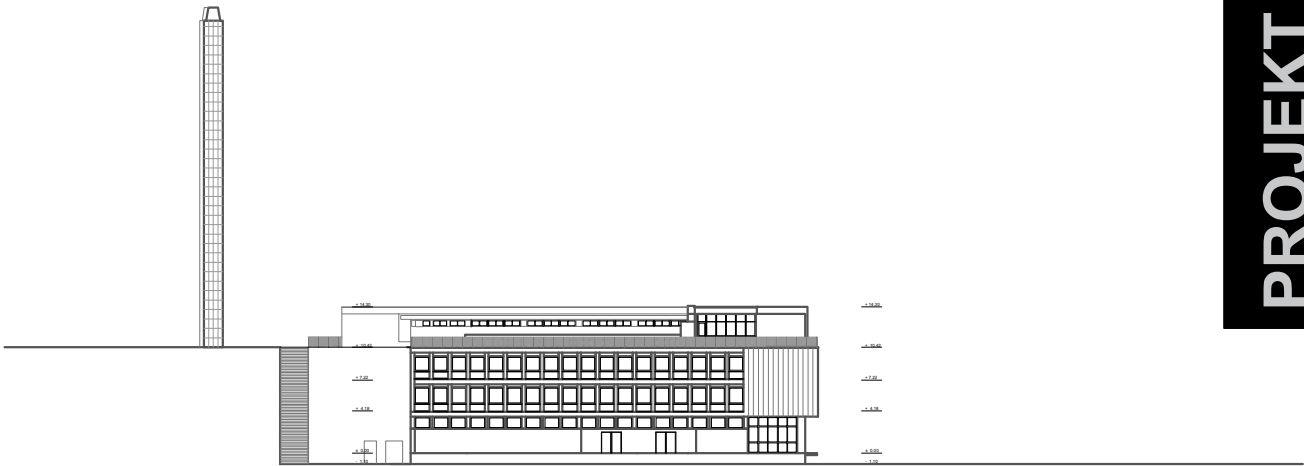
PRESJEK 3 - 3



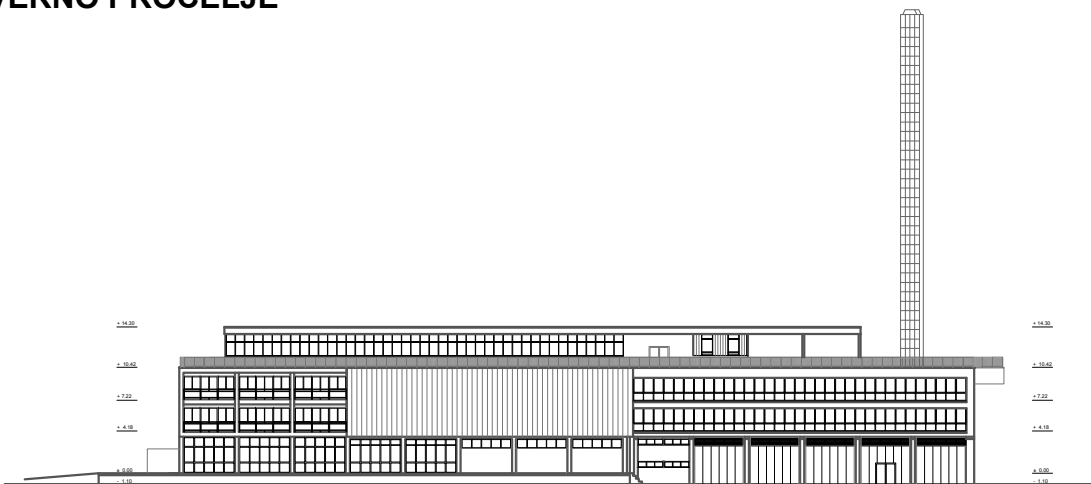
PRESJEK 4 - 4

MJ 1:750

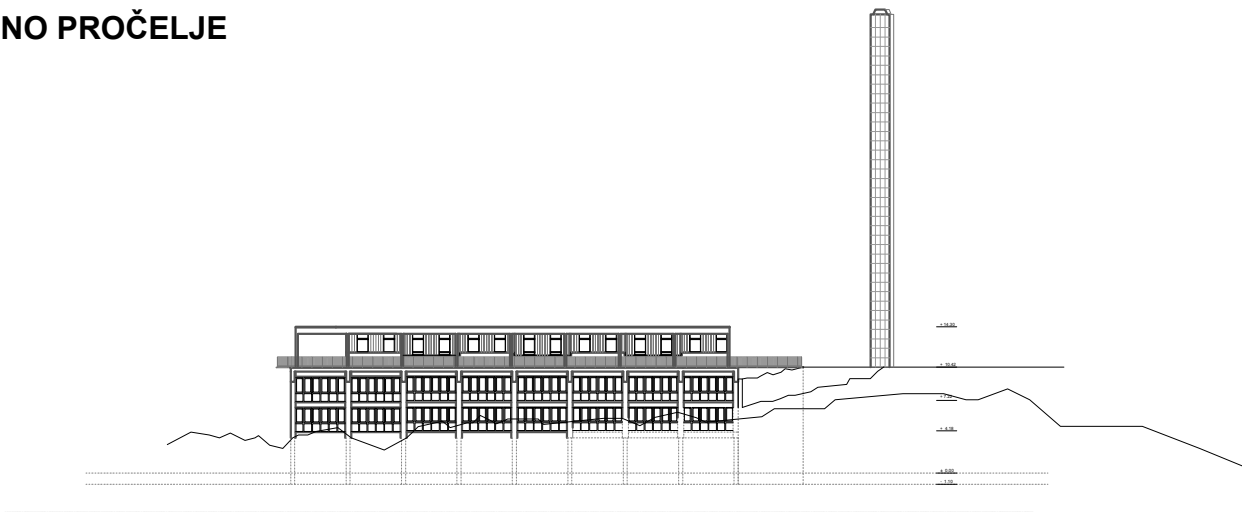
0 5 10 20 30 40 50



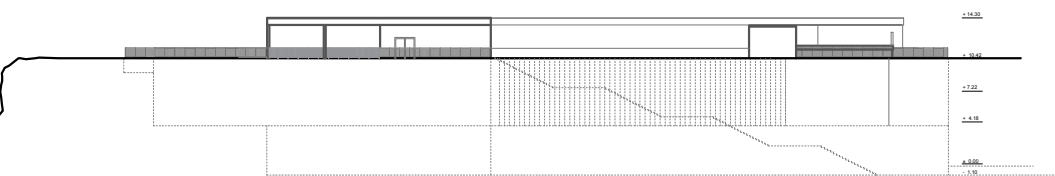
SJEVERNO PROČELJE



ZAPADNO PROČELJE



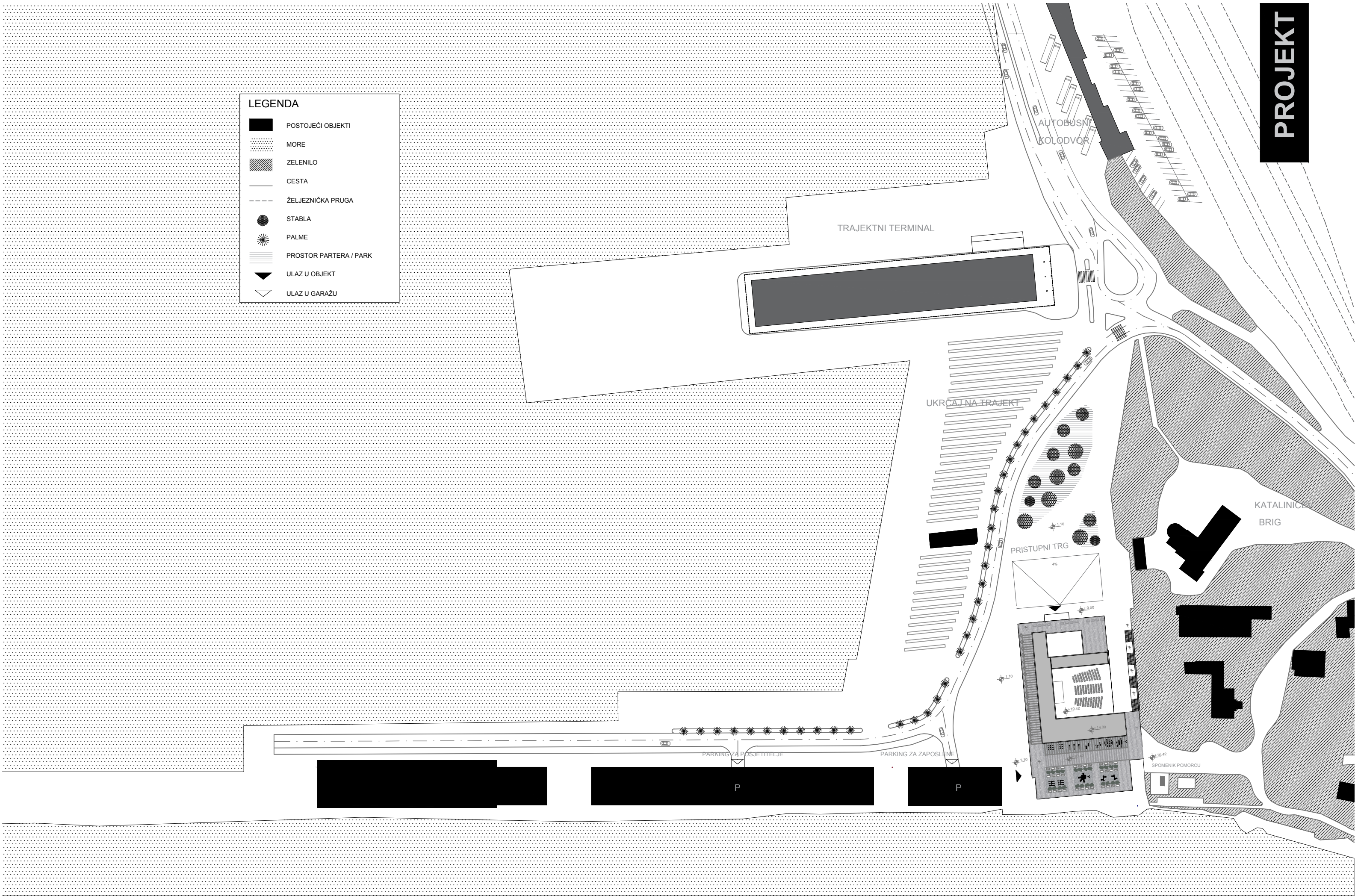
JUŽNO PROČELJE



ISTOČNO PROČELJE

LEGENDA

- POSTOJEĆI OBJEKTI
- MORE
- ZELENILO
- CESTA
- ŽELJEZNIČKA PRUGA
- STABLA
- PALME
- PROSTOR PARTERA / PARK
- ULAZ U OBJEKT
- ULAZ U GARAŽU



MJ 1:1500

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 10 50 100

SITUACIJA

18

LEGENDA

POSTOJEĆI OBJEKTI

MORE

ZELENILO

CESTA

ŽELJEZNIČKA PRUGA

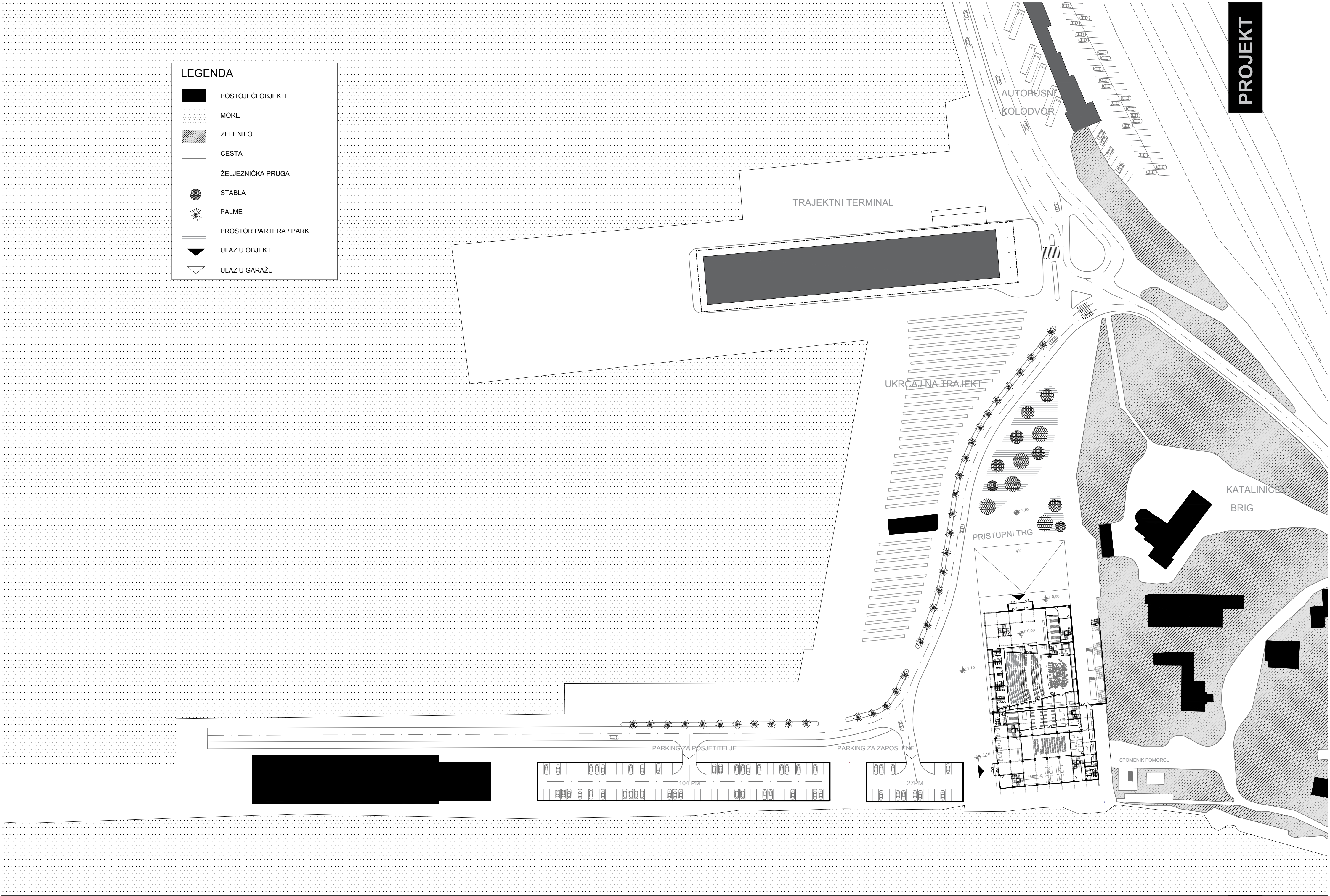
STABLA

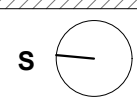
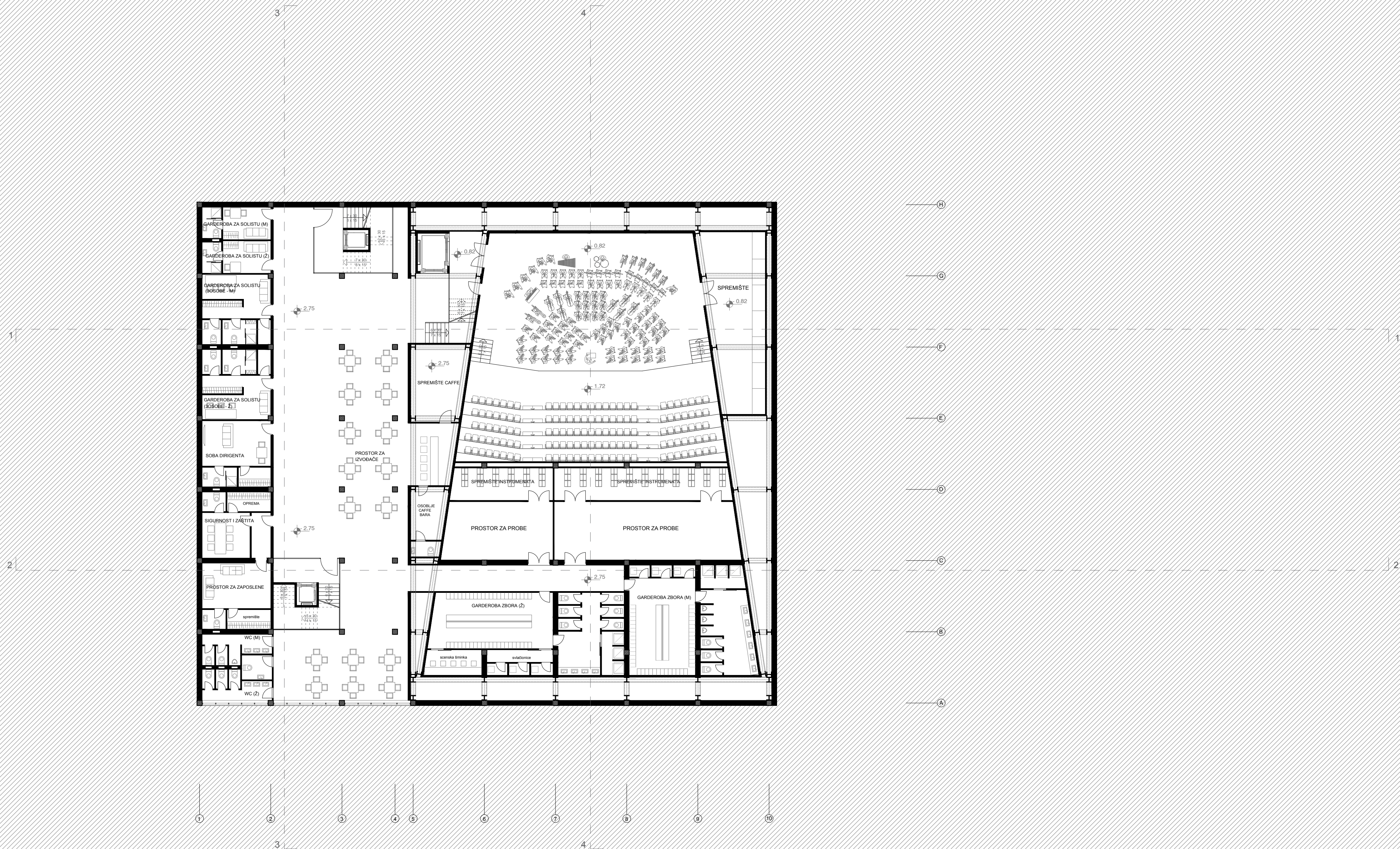
PALME

PROSTOR PARTERA / PARK

ULAZ U OBJEKT

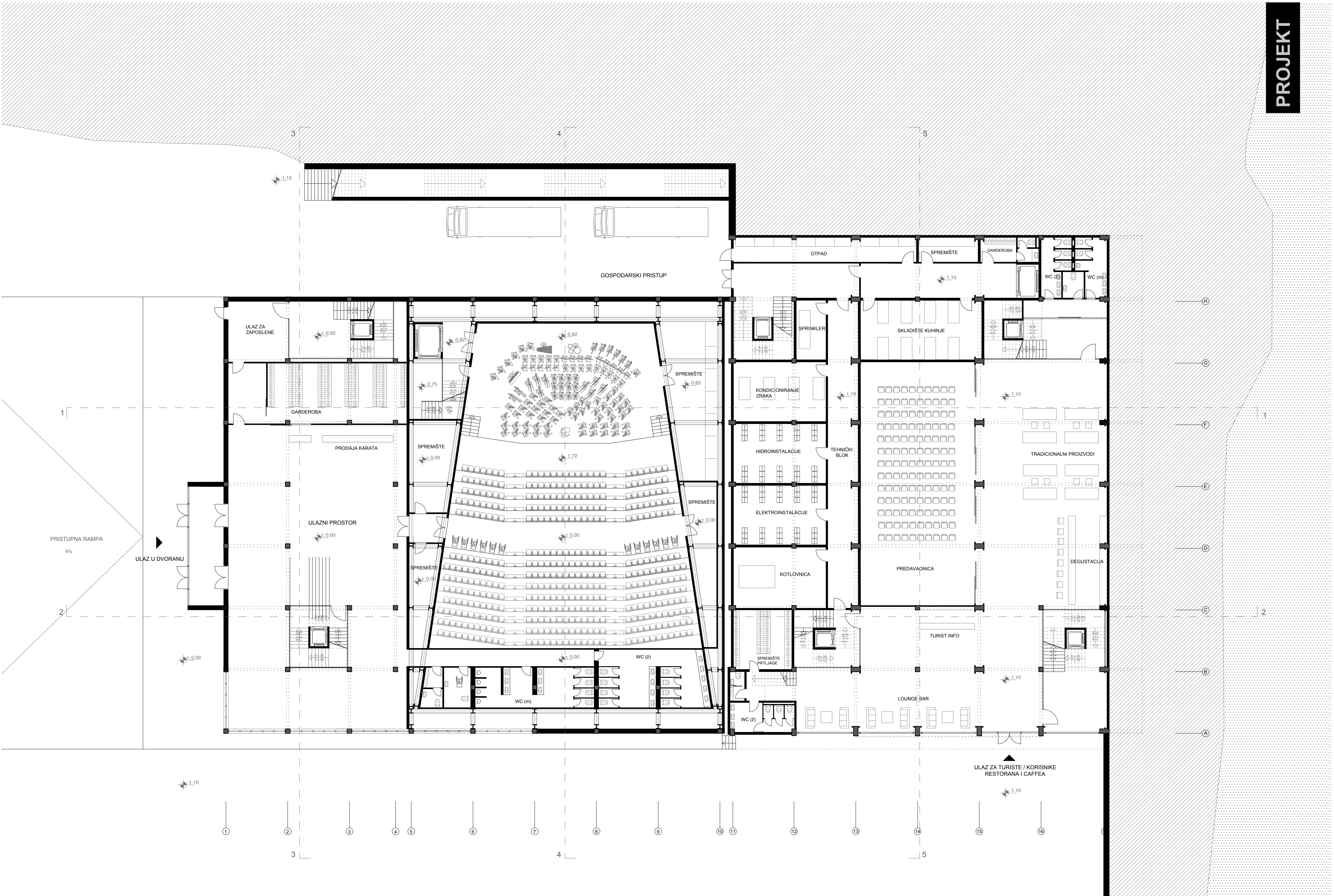
ULAZ U GARAŽU





MJ 1:200 ± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

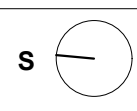
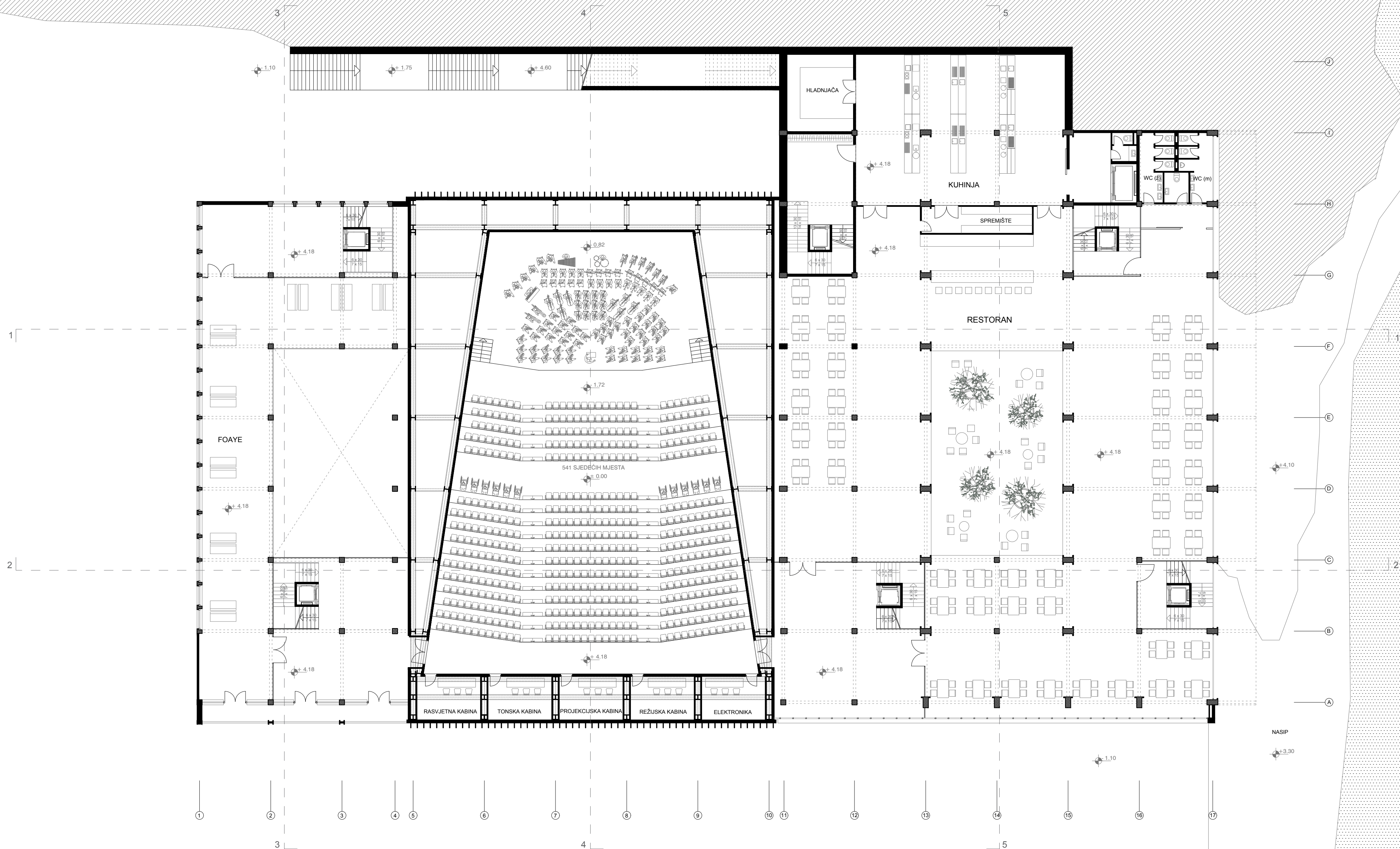


MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

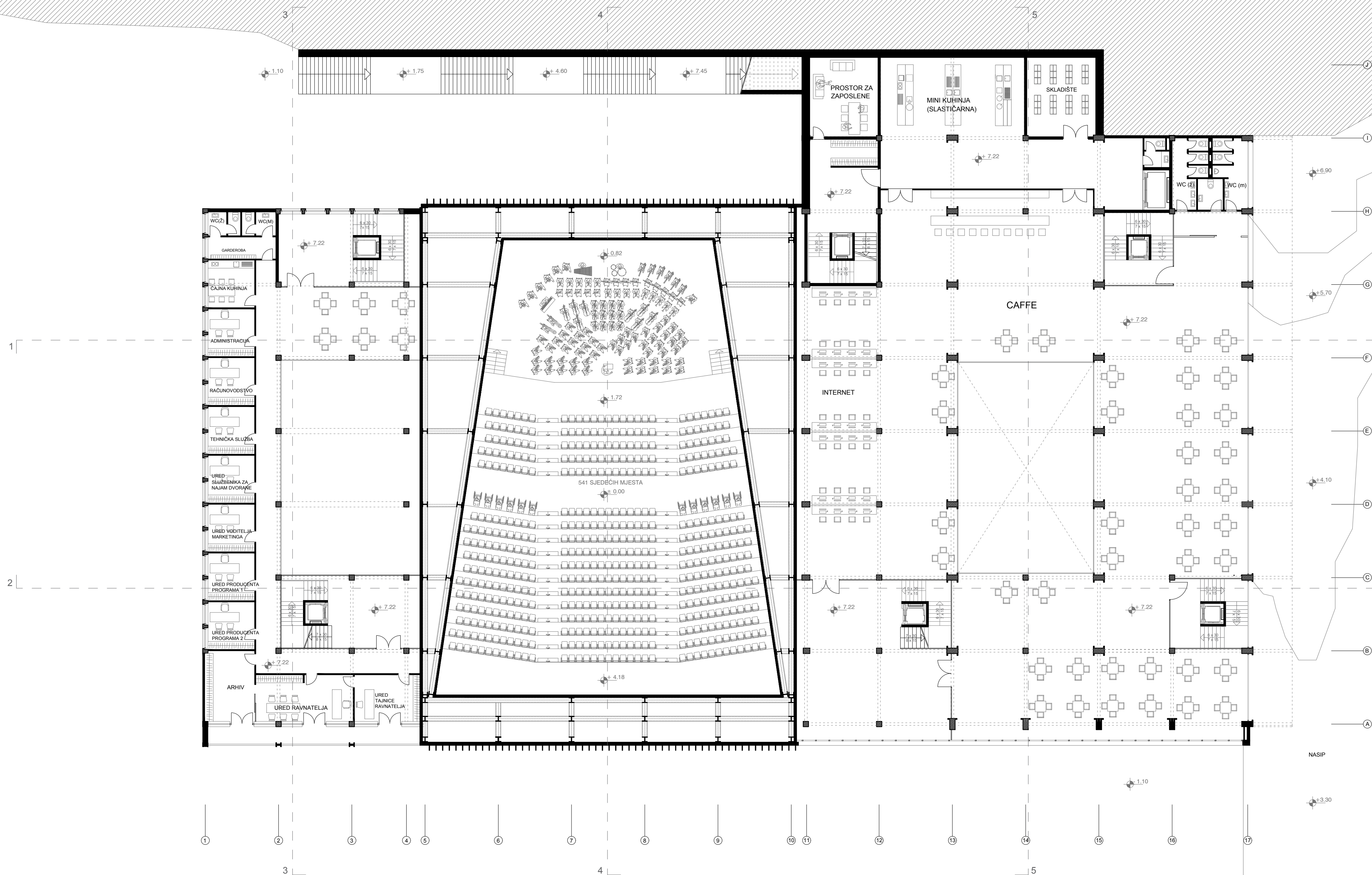
0 1 5 10 20

TLOCRT PRIZEMLJA ±0.00



MJ 1:200 ± 0.00 m = 3.90 m.n.v.
0 1 5 10 20

TLOCRT 1.KATA +4.18

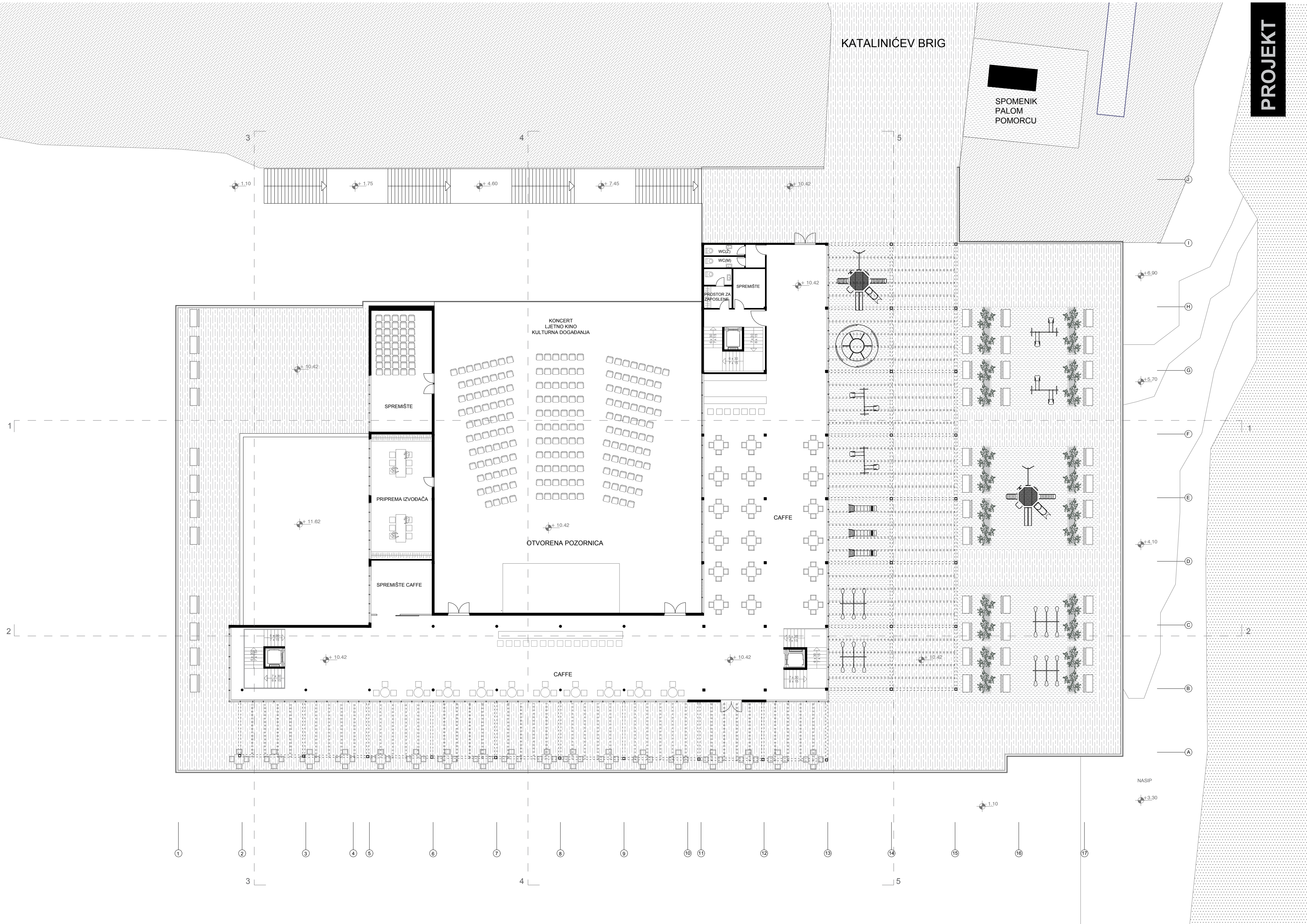


MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

TLOCRT 2.KATA +7.22

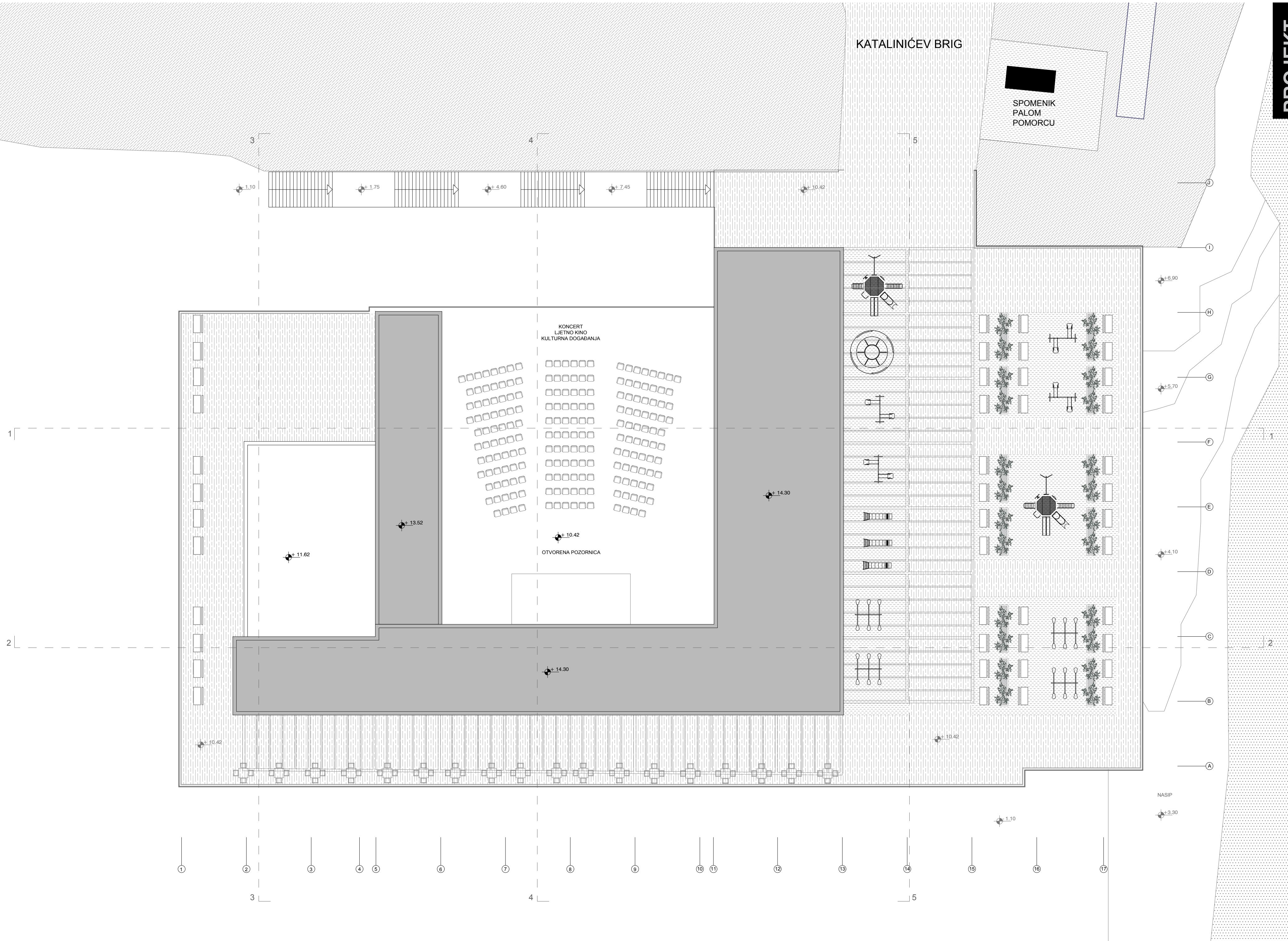


MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

TLOCRT 3.KATA +10.42



KATALINIČEV BRIG

SPOMENIK
PALOM
POMORCU

KONCERT
LJETNO KINO
KULTURNA DOGAĐANJA

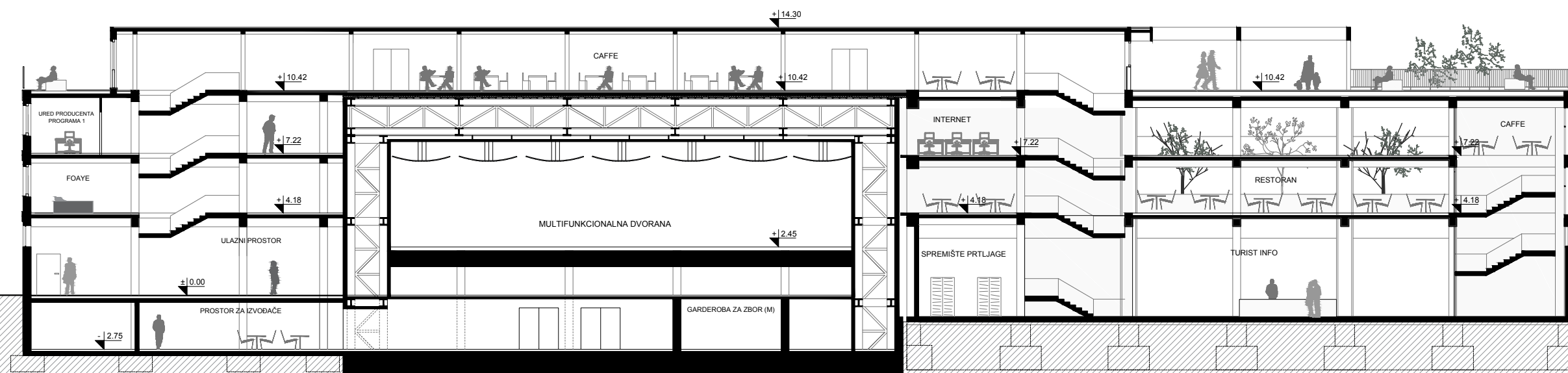
OTVORENA POZORNICA

NASIP

MJ 1:200

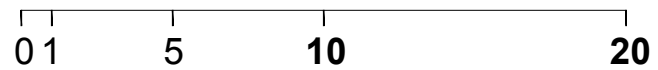
± 0.00 m = 3.90 m.n.v

TLOCRT KROVA +14.30

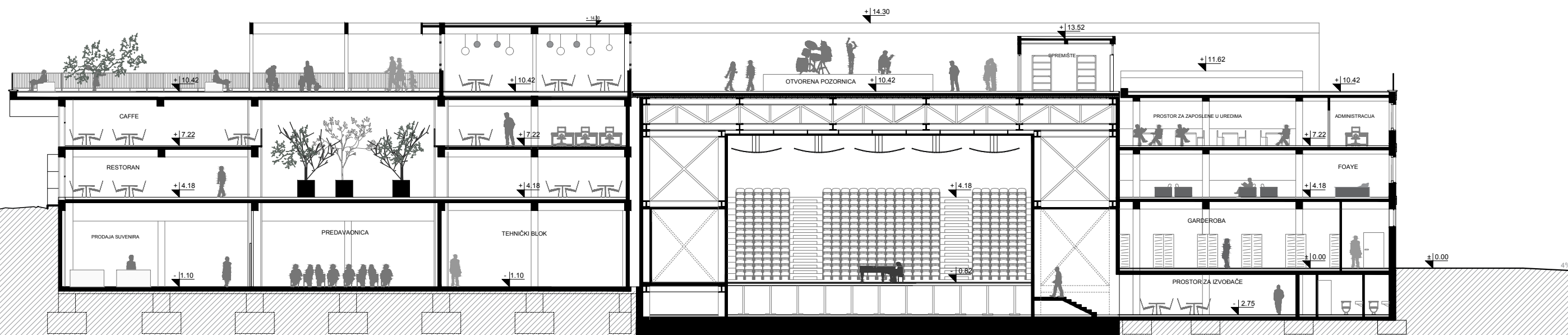


MJ 1:250

± 0.00 m = 3.90 m.n.v



PRESJEK 1 - 1



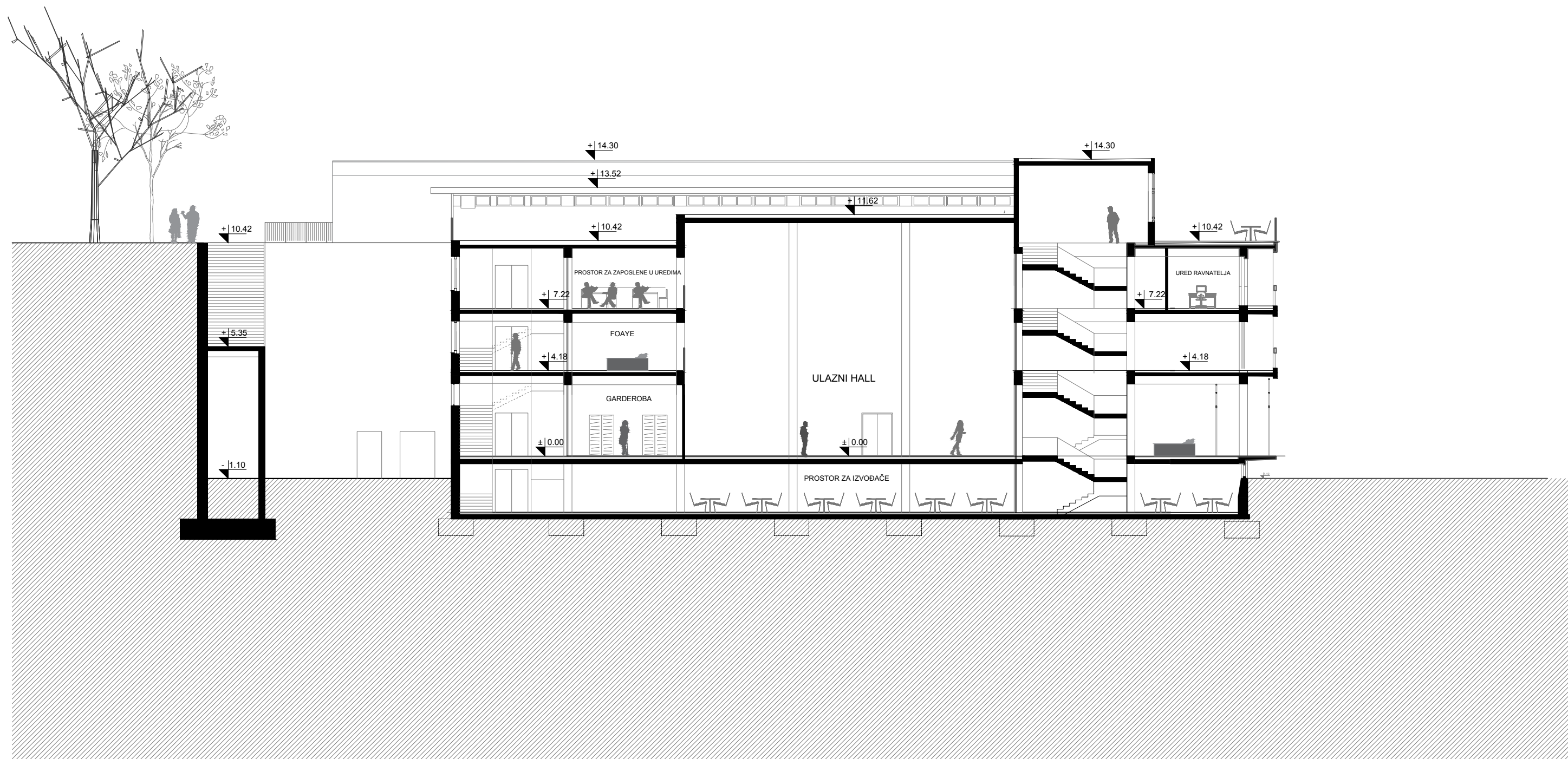
MJ 1:250

$\pm 0.00 \text{ m} = 3.90 \text{ m.n.v}$

0 1 5 10 20

PRESJEK 2 - 2

27

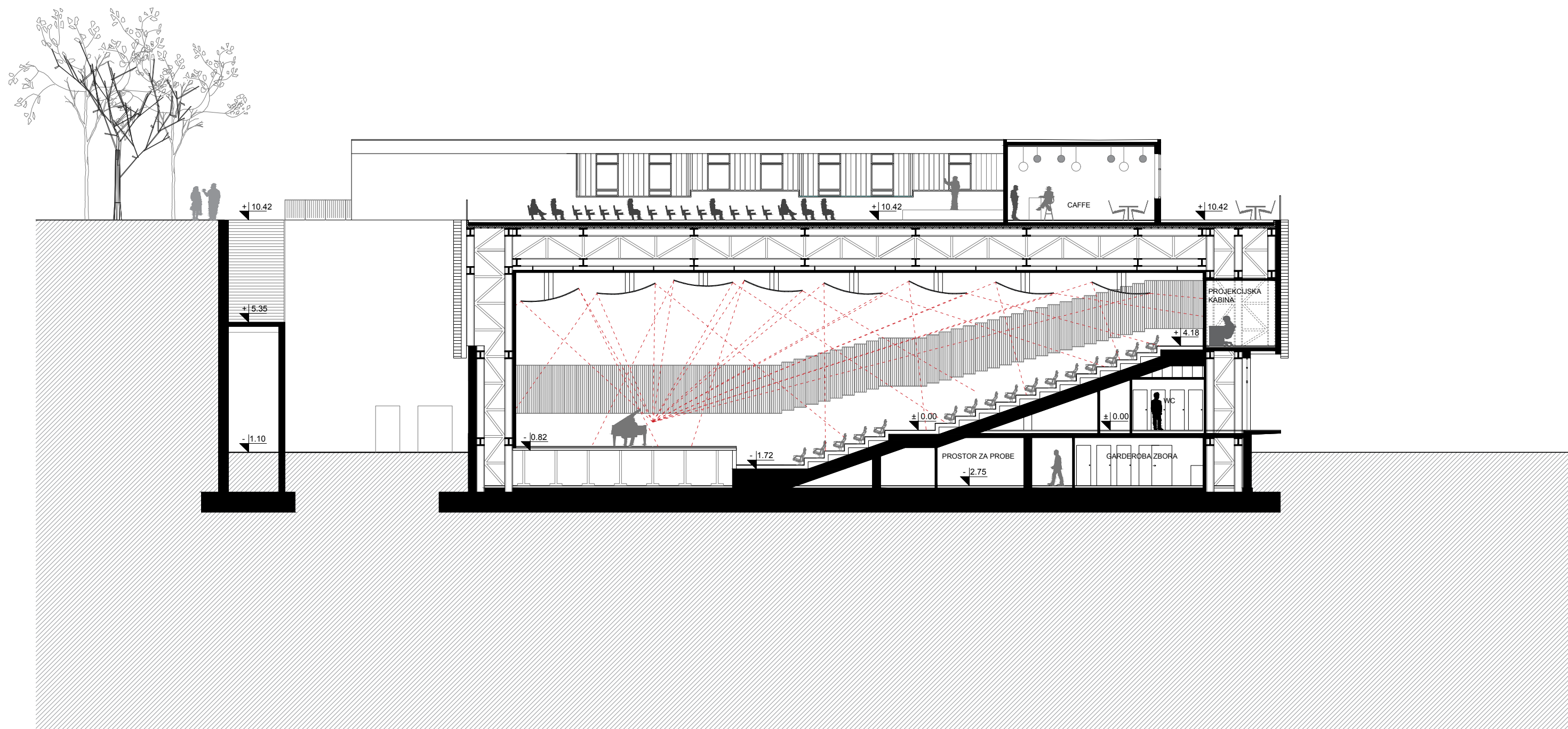


MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

PRESJEK 3 - 3



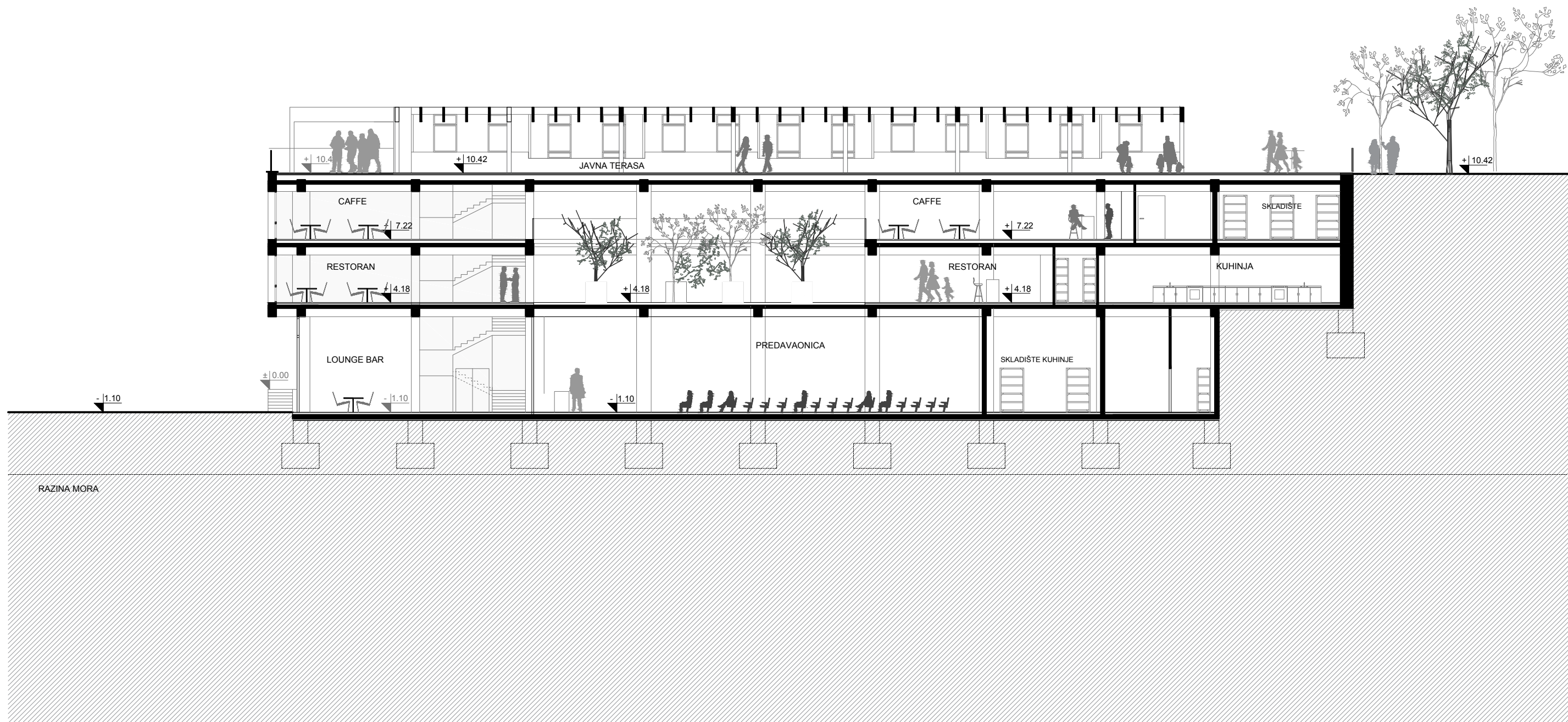
MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

PRESJEK

4 - 4



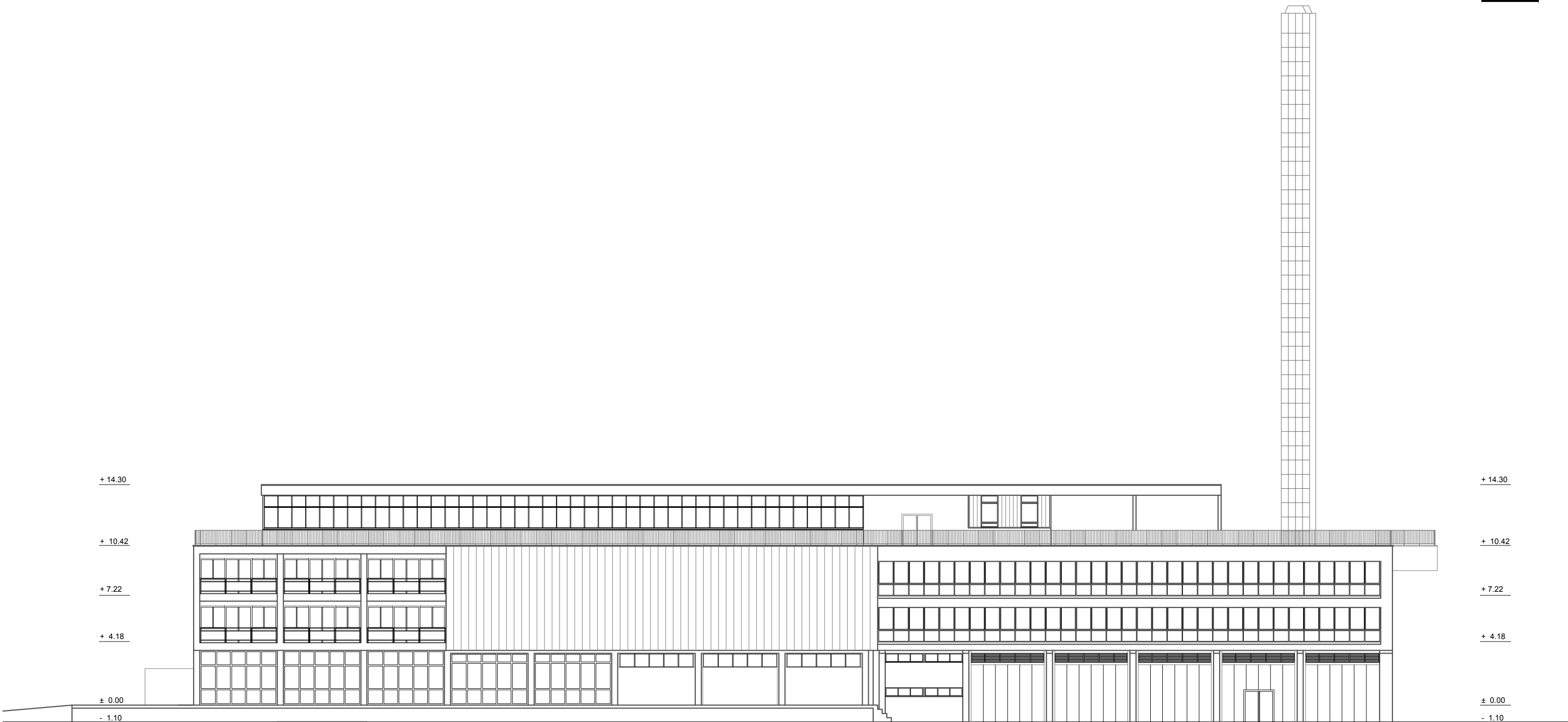
MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

PRESJEK 5 - 5

30

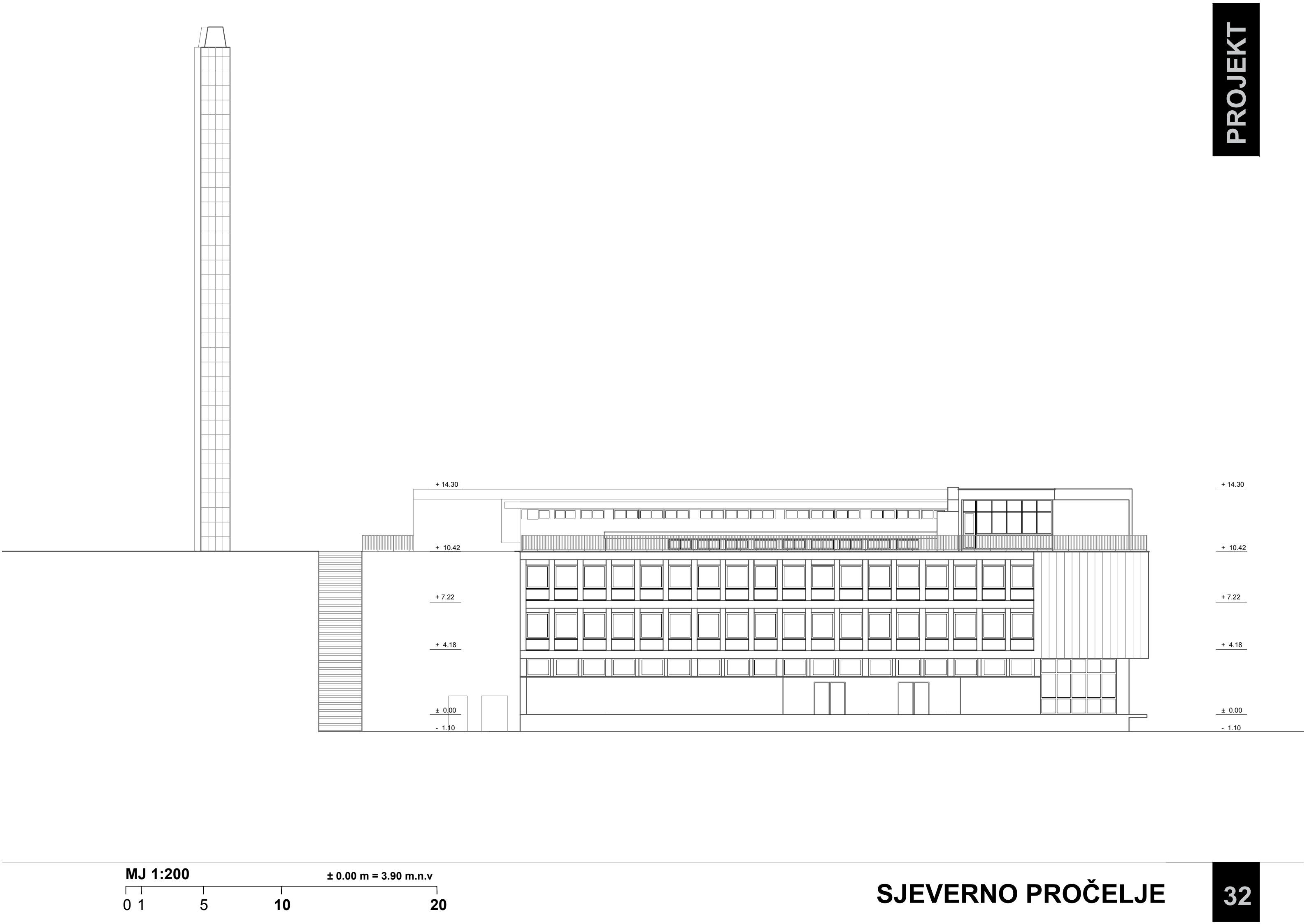


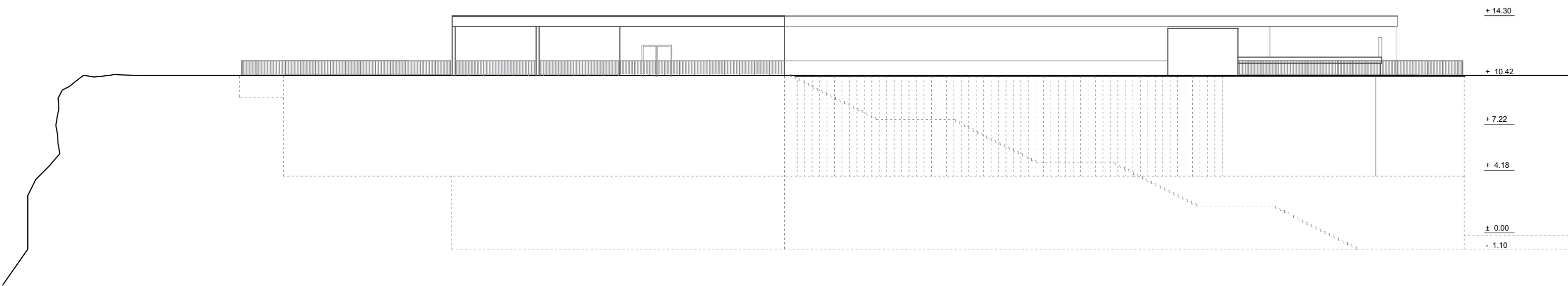
MJ 1:250

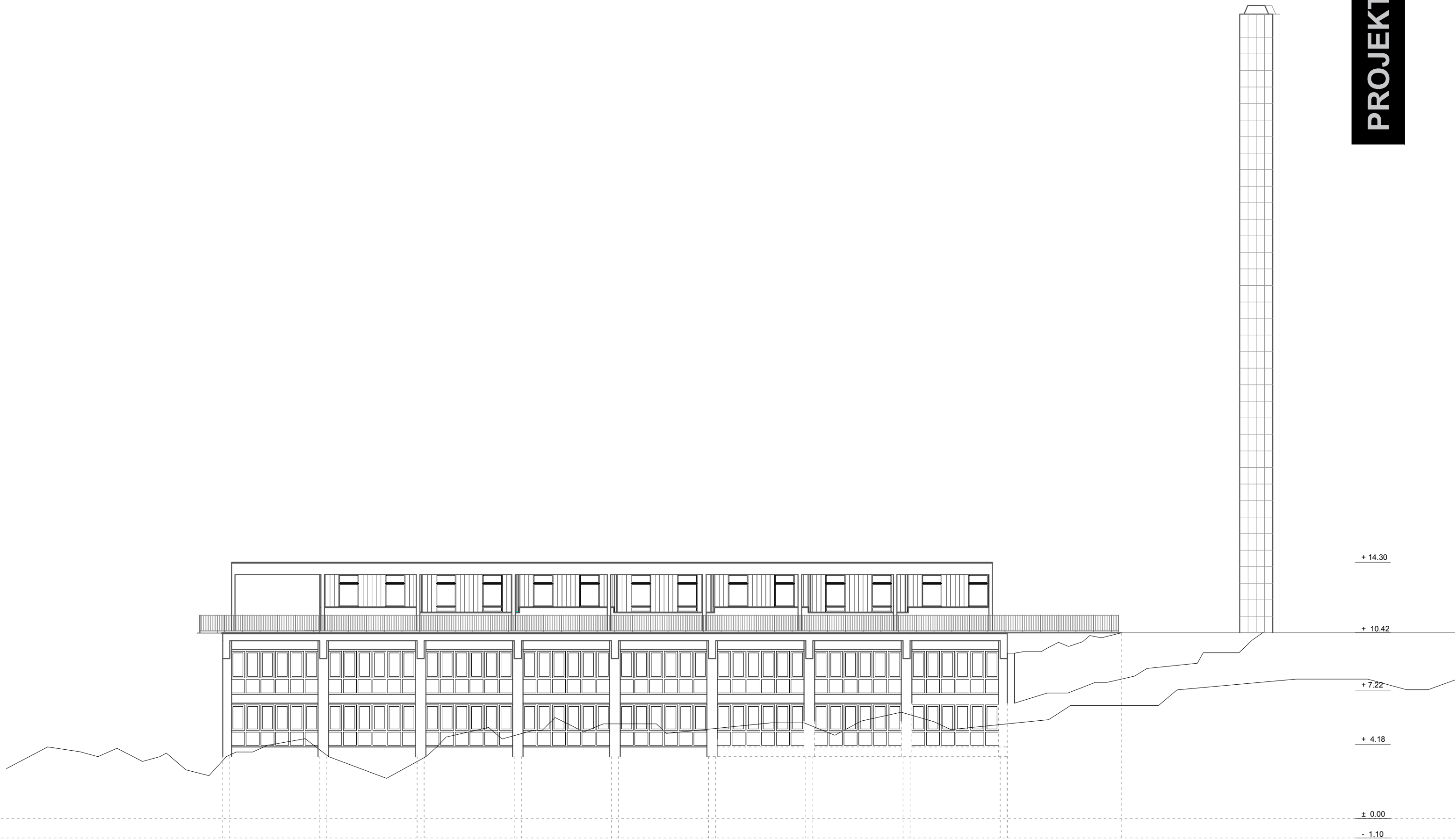
± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

ZAPADNO PROČELJE







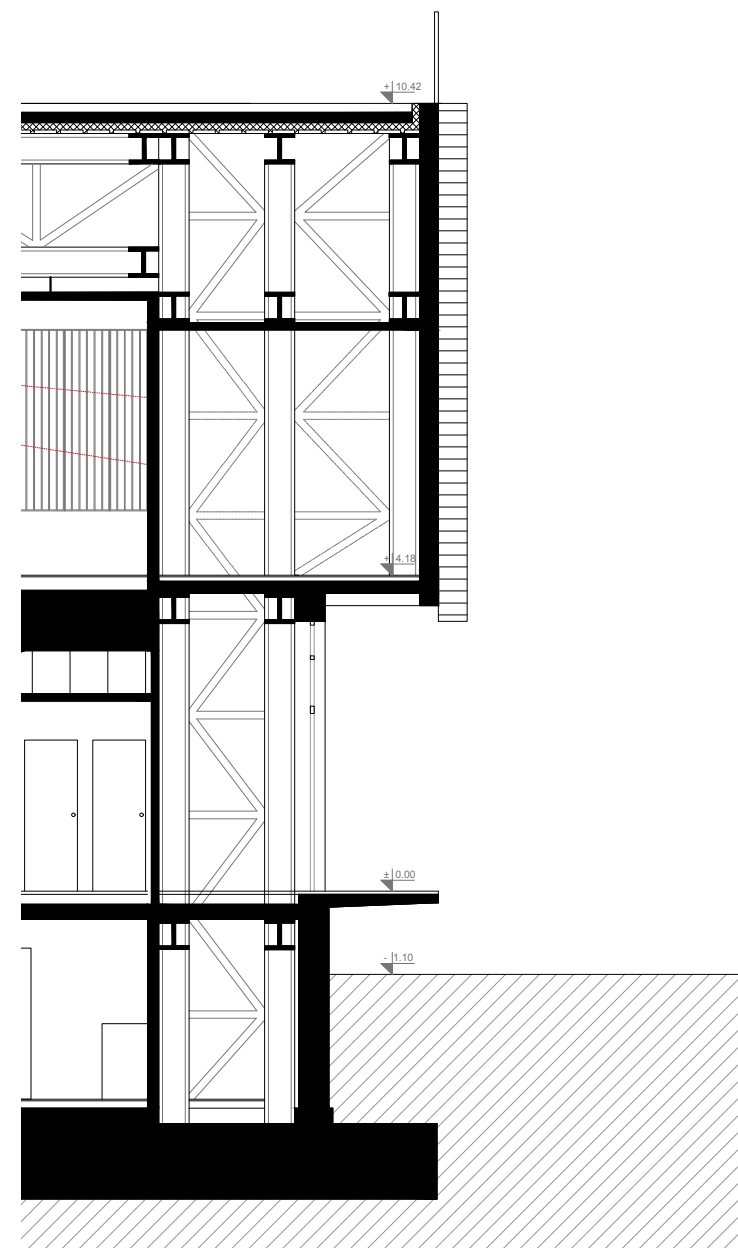
RAZINA MORA

MJ 1:200

± 0.00 m = 3.90 m.n.v

0 1 5 10 20

JUŽNO PROČELJE



Na slikama vidimo potrebnu konstrukciju kako bi se pročelje očuvalo u slučaju rušenja međukatne konstrukcije. Potrebno mu je pružiti oslonac u vidu čelične rešetke koja se fiksira na postojeće zidove i preuzima ulogu nosača.



TEHNIČKI OPIS

Na zgradi Dalmacijavino izvedeni su zahvati koji obuhvaćaju promjene u temeljima, rušenje dijela konstrukcije, te uklanjanje pregradnih elemenata.

Središnji dio zgrade, prostori cisteri u zgradi centralne vinarije se ruše od podruma do vrha jer na njihovo mjesto dolazi nova konstrukcija multifunkcionalne dvorane. S obzirom da su pročelja zaštićena umeće se nova čelična rešetka koja služi kao novi oslonac ljušturi fasade, a njoj se superponira druga prostorna rešetka u suprotnom smjeru koja nosi krov dvorane. Cijela ta konstrukcija čeličnih stupova se temelji na novoj temeljnoj ploči koja se smješta ispod etaže poduma. Prostor lamele Zapad na terasi se ruši u dijelu gdje dvorana probija strop, no pošto se izvodi ravni korisni krov poviše čelične rešetke odlučila sam faksimilski obnoviti taj sektor lamele poštujući raspored punog i praznog tj prozora i zida. Zgrada je ionako u lošem, derutnom stanju pa je obnova većine otvora potrebna.

Također zbog umetanja nove čelične konstrukcije zgradi je bila potrebna dilatacija te ponavljam raster stupova koji sada nosi ostatak armiranobetonske konstrukcije sa sjeverne strane zgrade centralne vinarije.

Ostatak građevine se čuva na način da se cijela zgrada ogoli do rastera stupova i greda, miču se postojeći pregradni zidovi da bi se dobio što otvoreniji, fluidniji prostor. Javljaju se neke promjene i u visinama na način da se u dijelu zgrade skladišta dodaje estrih u visini 10cm na postojeće stanje kako bi od 1.kata do posljednje etaže kote bile ujednačene.

Uklanjaju se pojedini elementi ploča zbog umetanja novih komunikacijskih jezgri, a na mjestima gdje se dodaje nova ploča izvodi se kao spregnuta AB konstrukcija.

DIPLOMSKI RAD
komentorski elaborat

ARHITEKTONSKA AKUSTIKA

1	FIZIKALNI TEMELJI AKUSTIKE	01-04
1.1	Zvuk i osnovne fizikalne karakteristike zvuka	01
1.2	Pojave koje prate širenje zvuka	03
2	SLUŠNA AKUSTIKA	05-06
2.1	Uho - građa i slušni proces	05
2.2	Svojstva sluha	06
3	KARAKTERISTIKE GOVORA I GLAZBE	07-09
3.1	Karakteristike govora	07
3.2	Karakteristike glazbe	08
4	PROSTORNA AKUSTIKA	10-19
4.1	Volumen	10
4.2	Oblik	10
4.3	Odjek	14
5	AKUSTIČKA OBRADA	20-24
5.1	Reflektori zvuka	20
5.2	Difuzori zvuka	20
5.3	Apsorberi	21
6	BUKA	25-28
6.1	Strukturna buka	26
6.2	Zaštita od zračne i udarne buke	27
6.3	Prigušivanje u ventilacijskim kanalima	28
7	ARHITEKTURA - IZVEDENI AUDITORIJI (3 primjera građevina)	29-31
8	LITERATURA	32

1.1 ZVUK I OSNOVNE FIZIKALNE KARAKTERISTIKE ZVUKA

Zvuk je prema fizikalnoj definiciji titranje u plinovitim, tekućim i krutim tvarima. To je ritmičko njihanje molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju međumolekularne, elastične sile. U užem smislu značenja, **zvuk** je sve ono što čujemo, što zamjećujemo sluhom.

Zvuk nastaje kao val titranja čestica zraka koji se širi zrakom u određenom intezitetu i određenom brzinom. U zraku zvučni val se kreće brzinom 343 m/s pri temperaturi 20°, te ta brzina ovisi o temperaturi kao i o mediju kroz koji se zvuk kreće.

Brzina širenja zvuka

Za brzinu zvuka u plinovitom agregatnom stanju vrijedi ova formula :

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \times \gamma}{\delta_0}}$$

Ovisi o gustoći plina δ_0 , o atmosferskom tlaku p_0 i o konstanti γ , koja daje odnos specifične topline zraka uz konstantan tlak prema onoj uz konstantan volumen. Za zrak je $\gamma=1,4$.

Brzina zvuka u zraku u odnosu na promjenu temperature izražava ova formula: $c = 331,4 + 0,6 t$ (m/s) Gdje je t temperatura zraka u C°.

Medij	Agregatno stanje	Brzina zvuka
Zrak	plinovito	343
Voda	tekuće	1500
Guma	„kruto“	40
Beton	kruto	3800
Čelik	kruto	5100

Frekvencija

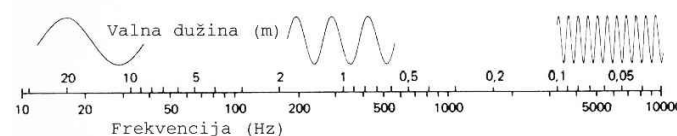
Frekvencija je broj titraja u sekundi. Izražava se u hercima(Hz) ili u kilohercima (kHz). Čovječje uho može čuti frekvencije od 16Hz do 20kHz, što znači da ne zamjećuje one zvučne valove kojih do njega stiže manje od 16 u sekundi ili u većem broju od 20 000 u sekundi. Frekvencije niže od 16Hz se nazivaju infrazvukom, a više od 20 000Hz nazivamo ultrazvukom.

Valna duljina

Razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjavanja ili između dvije točke najvećeg razrjeđenja sredine u kojoj se zvučni val širi, naziva se **valnom duljinom**.

Na putu što ga zvuk prevali u jednoj sekundi ima upravo toliko valova (ili valnih duljina) kolika mu je frekvencija. Prema tome, valnu duljinu (λ) računamo kao kvocijent brzine širenja zvuka (c) i frekvencije (f).

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

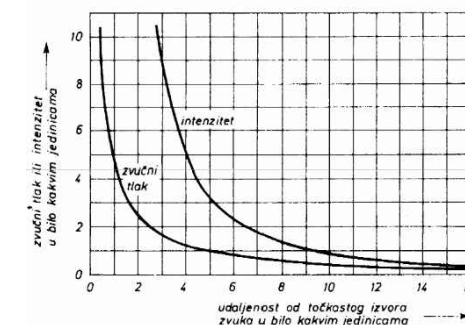


U akustičkom je području odnos valnih duljina, isto kao i frekvencija, vrlo velik. Frekvenciji od 16Hz pripada valna duljina nešto veća od 20m, dok je valna duljina na najvišoj čujnoj frekvenciji od 20 000 Hz nešto manja od 2cm.

Zvučni tlak

Zvučni tlak (p) je izmjenični tlak koji se prilikom širenja zvučnog vala superponira atmosferskom tlaku p_0 koji je puno veći od zvučnog tlaka. Jedinica za mjerenje je paskal (Pa).

Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti.



Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti

Titrajna brzina

Kad se širi zvučni val neke čestice zvuka titraju oko svog središnjeg položaja. Pomak iz položaja mirovanja izvede nekom brzinom koja nije konstantna i zove se titrajna brzina (ψ). Veza između zvučnog tlaka i titrajne brzine je:

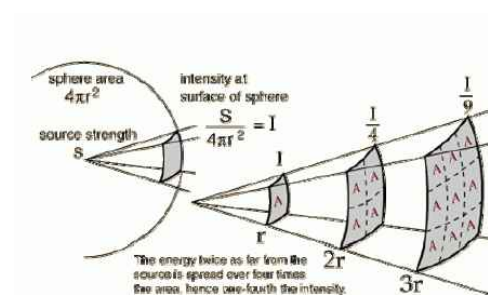
$$p = \delta_0 \times c \times \psi$$

Zvučni intenzitet

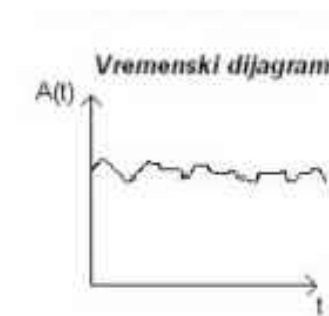
Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu od 1 postavljenu okomito na smjer širenja naziva se jakošću ili intenzitetom zvuka.

Za intenzitet zvuka vrijedi :

$$I = p \times \psi$$



Opadanje intenziteta zvuka ovisno o udaljenosti od izvora

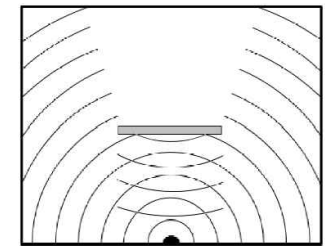
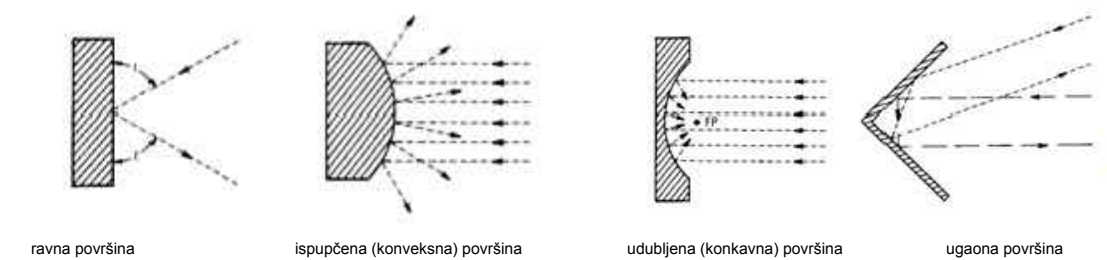


1.2 POJAVE KOJE PRATE ŠIRENJE ZVUKA

Refleksija zvuka

Put širenja zvuka može se prikazati **zvučnim zrakama**. To su zamišljeni pravci, okomiti na čelo valova, koji izlaze iz izvora zvuka. One omogućuju da se optički zakoni vezani za refleksiju svjetlosti primjene i u akustici. Pri tome mora biti ispunjen uvjet da je duljina zvučnog vala mnogo manja od dimenzija plohe od koje se val reflektira.

Prema zakonima refleksije kut upada jednak je kutu refleksije, a upadna i reflektirana zraka u istoj su ravnini.

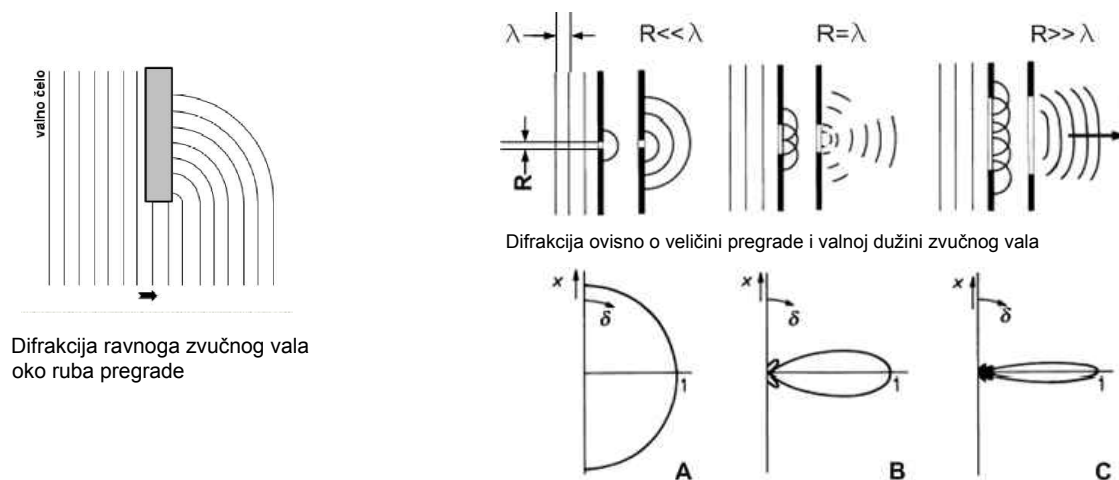


Zvučna refleksija o zapreku mnogo veće dimenzije nego što je duljina zvučnih valova. Zvučni valovi se odbijaju o zapreke, pa ih iza nje praktički nema te je taj prostor u "zvučnoj sjeni".

Difrakcija zvučnog vala

Zakoni refleksije, poznati i iz optike, vrijede u akustici samo ako su valovi mnogo kraći od dimenzija zapreke na kojoj se reflektiraju. Iz svakodnevnog iskustva znamo da možemo čuti i ono što se događa iza neke pregrade. Zvučni valovi zaobilaze prepreke i pri tome mijenjaju smjer širenja. Ta pojava se naziva **difrakcija** ili **skretanje**.

Što je odnos valne duljine prema dimenzijama pregrade manji, to je difrakcija veća. Ako je zapreka mala u odnosu na valnu duljinu, ona gotovo i ne utječe na širenje zvučnog vala.

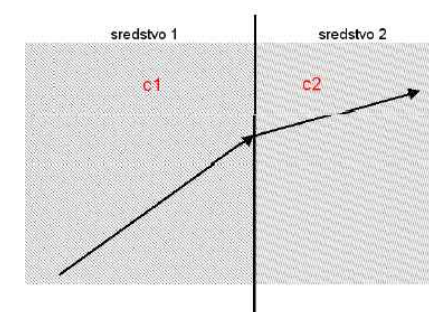


Difrakcija ravnoga zvučnog vala oko ruba pregrade

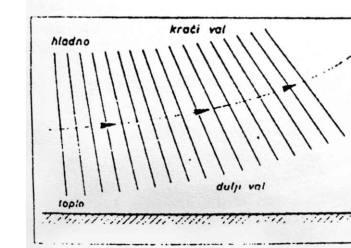
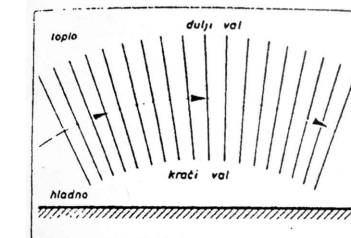
Dijagrami usmjerenosti zvučnog vala ovisno o slici gore

Refrakcija zvučnog vala

Zvučne zrake se lome pri prijelazu iz jednog sredstva u drugo, slično kao i svjetlosne zrake. Veličina promjene smjera ili refrakcije ovisi o odnosu brzina širenja zvuka u sredstvima.



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{jednadžba refrakcije}$$



Ako je pri zemlji zrak topliji nego u višim slojevima, zvuk će se kretati prema gore. Obratno, ako je zrak topliji u višim slojevima kretati će se prema dolje. Prijelazom zvučnih valova iz hladnog u topli sloj zraka zvučne se zrake savijaju prema dolje, dok prelazom iz toplog sloja zraka u hladni zvučne se zrake savijaju prema gore.

Apsorpcija zvuka

Apsorpcija zvuka je proces oslabljivanja zvuka prilikom njegova prolaska kroz neku sredinu ili pri prijelazu preko neke površine.

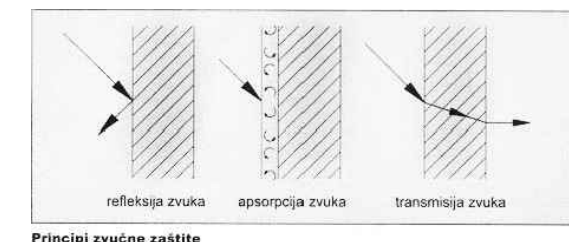
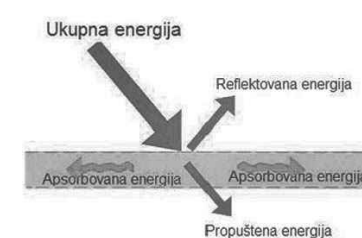
To je pojava upijanja zvuka koja se javlja prilikom refleksije. Kad zvučni val udari o neku plohu postavljenu na čvrstu podlogu, jedan se dio zvučne energije reflektira, a ostatak se apsorbira. Jedan je dio zvučne energije tada predan materiji od koje se zvuk reflektira. Prilikom apsorpcije veći se dio energije pretvara u toplinu tj. zvuk se u nekom materijalu apsorbira tako da se pretvori u drugi oblik energije i onda u toplinu. Za materijale se određuje koeficijent apsorpcije (α), koji je definiran kao odnos apsorbirane i upadne zvučne energije.

Koeficijent apsorpcije vezan je s koeficijentom refleksije (r) i to preko formule:

$$\alpha = 1 - r^2$$

Taj koeficijent važan je da bismo mogli ocijeniti koji je materijal pogodan za određenu svrhu pri prostorijskoj u praksi (svrha može biti: projektiranje skraćivanje vremena odjeka, prigušenje buke itd.).

Pomoću apsorpcijskih materijala i njihovih akustičkih svojstava dobiva se kontrolirana apsorpcija u prostoru i kontrolira se raspodjela zvučne energije.

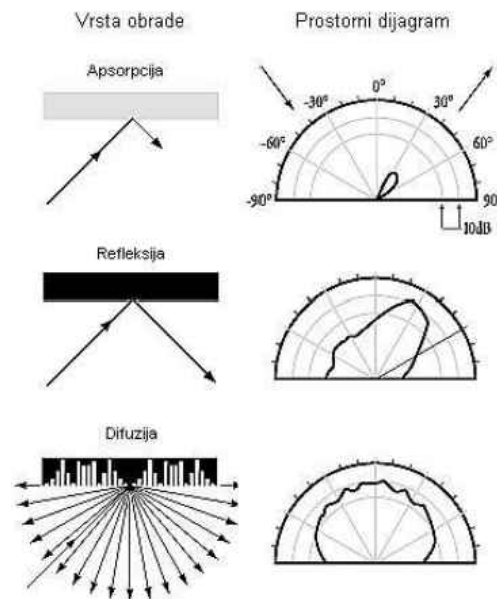


Principi zvučne zaštite

Apsorpcija zvuka u zraku nastaje zbog fizikalne reakcija između H_2O molekula i O_2 molekula. Iz toga ćemo zaključiti da ta pojava ovisi o vlažnosti zraka. Općenito se može reći da se apsorpcija s povećanjem vlažnosti zraka smanjuje, a da se s porastom frekvencije povećava.

Difuzija zvuka

Kod apsorpcije i refleksije kut upada zvučnog vala jednak je kutu refleksije. Za materijale i plohe čija je valovitost h reda veličine valne duljine zvučnog vala ($h \gg \lambda$) dolazi do reflektiranja zvučnih valova i pod kutevima koji nisu jednaki kutu upada.



Prijelaz zvučne energije kroz krute tvari

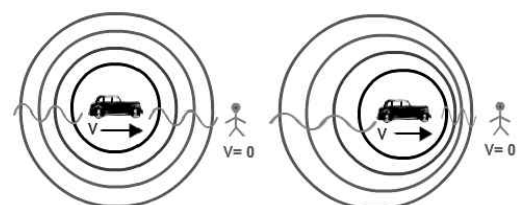
Kad zvuk dođe do nekog predmeta, jedan se dio energije reflektira i apsorbira, a ostatak se prenese na drugu stranu. Količina energije koja se od neke granične plohe reflektira, odnosno koju tijelo propusti, ovisi o odnosu između akustičkih otpora tvari s jedne i druge strane granične plohe. Zvučna energija manje prelazi iz jedne tvari u drugu što se one više razlikuju u tvrdoći i gustoći, te što je veća razlika u akustičkim otporima.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4 \times Z_1 \times Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

E_1 je gustoća zvučne energije u jednoj tvari, a E_2 je gustoća zvučne energije u drugoj tvari, Z_1 i Z_2 su akustički otpori.

Dopplerov efekt

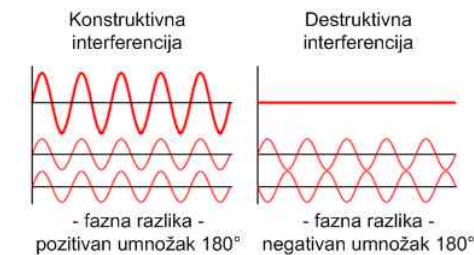
Približavanjem izvora zvuka, slušaču dolazi više zvučnih valova u jedinici vremena nego kad izvor zvuka stoji. Tada je frekvencija zvuka koju slušač čuje viša od one koju izvor zapravo emitira. Situacija je obrnuta kad se izvor udaljava od slušača. Te se pojave događaju bez obzira giba li se izvor zvuka, slušač ili obojica istovremeno.



Slika lijevo pokazuje izvor zvuka u mirovanju, a slika desno dok se kreće. Kao na slici, možemo zamisliti da su fronte zvučnih valova prikazane sivim crtama. Ako nam se automobil približava, fronte postaju gušće, te frekvencija zvuka kojeg čujemo raste. U obrnutom slučaju, fronte su rjeđe i frekvencija pada.

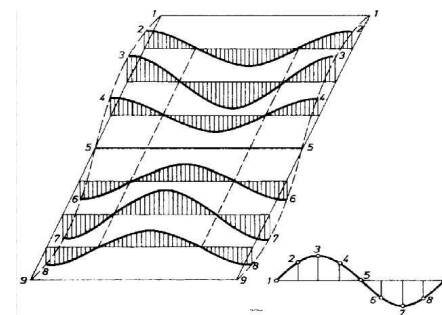
Interferencija

Interferencija je pojava koja nastaje uzajamnim djelovanjem dvaju valova koji se susreću. Ako im se faze poklope, dolazi do zbrajanja po amplitudi, a ako su protufazni, njihove se amplitude oduzimaju.



Stojni valovi

Stojni valovi nastaju kad se dva jednaka zvučna vala (imaju iste valne duljine) kreću jedan prema drugome (putuju u suprotnim smjerovima). Ta pojava nastaje kad val udara u neku prepreku i dolazi do refleksije. Osnovna osobina tih valova je da će efektivna vrijednost tlaka na nekim mjestima biti jednaka. Ta mjesta se nazivaju čvorovima vala, dok na mjestima udaljenim za četvrt valne duljine od čvorova vala imamo trbuhe vala, i tamo je zvučni tlak maksimalan.

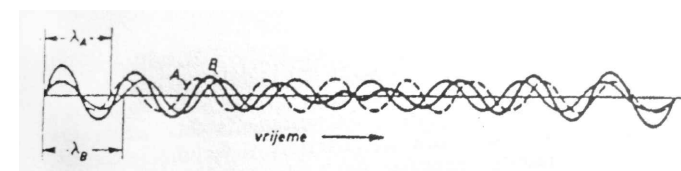


Stojni val je pojava koja nastaje uslijed interferencije dolazećeg i reflektiranog vala. U tom slučaju nastaje mjestimično poništavanje i pojačavanje zvuka. Na mjestima poništavanja nastaju tzv. nule, a na mjestima pojačanja 'maksimumi' zvuka. Pojava se očituje kao potpuna odsutnost zvuka u nekim dijelovima prostora.

Treptajni valovi

Za stojne valove bitno je da su to dva vala potpuno jednake valne duljine koji putuju u suprotnim smjerovima. Ta pojava nastaje prilikom udara vala o neku stijenu na kojoj dolazi do refleksije. Ako se u nekom prostoru nađu dva vala kojima su valne duljine nešto različite, pojava će biti drukčija. Kada se poluvalovi obiju valova više ili manje preklapaju, dobiva se sumaran val povećane amplitude, a njihovo daljnje preklapanje rezultira padom te amplitude.

Tako nastaju **treptaji**, periodično mijenjanje jakosti zvuka na nekom mjestu slušanja. Broj treptaja u sekundi jednak je razlici frekvencija primarnih tonova. Ako su frekvencije tih tonova 500Hz i 505Hz, čuti će se *vibrato* s frekvencijom od 5Hz.



treptajni valovi

2.1 UHO - GRAĐA I SLUŠNI PROCES

Uho je prijemnik zvuka koji radi na istom principu kao i mikrofoni: akustičku energiju pretvara u električnu.

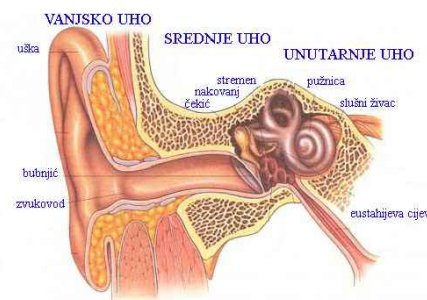
Ljudsko uho može procijeniti zvuk kao jednostavan ili kao složen. Jednostavni zvukovi ne postoje u prirodi. Sastavljeni su od samo jedne frekvencije. Složeni zvukovi sadrže veći broj osnovnih frekvencija. Uz osnovne frekvencije sadrže još i njihove višekratnike koji se nazivaju višim harmonicima. Oni daju boju tona i mogu

se razlikovati čak i kad im je osnovna frekvencija ista. Ako je broj frekvencija i viših harmonika vrlo velik i ima neprekinutu (kontinuiranu) amplitudno-frekvencijsku karakteristiku, uho čuje šum. Dakle, uho je vrlo složen i osjetljiv organ, koji zajedno s mozgom radi kao analizador spektra, određuje smjer zvuka, glasnoću, visinu i boju, otkriva amplitudna, fazna i harmonička izobličenja te je precizni davatelj položaja u prostoru.

Služi za detektiranje zvučnih valova. U zdravom stanju čuje frekvencije od 16 Hz do 20 kHz i osjeća promjenu zvučnih tlakova od 20 μ Pa do 20 Pa. Na svim frekvencijama nije jednako osjetljivo. Najosjetljivije je u rasponu frekvencija od 350 Hz do 3500 Hz (pripada području ljudskog glasa) gdje može osjetiti razliku zvučnih tlakova od 10 – 5 Pa. Najveći zvučni tlak koji može podnijeti bez oštećenja je 100 Pa. Premda ovisno o životnoj dobi čujemo zvukove od 16 Hz do 20000 Hz, na još neobjašnjeni način osjetimo više i niže frekvencije.

Građa uha

Uho se sastoji se od tri glavna dijela: **vanjskog, srednjeg i unutrašnjeg** uha. Sva tri dijela prenose zvučnu informaciju u mozak, koji je prevodi u svojstvo sluha.



Vanjsko uho sastoji se od ušne školjke, ušnog kanala (zvukovoda) i bubnjića. Ušna školjka i slušni kanal čine lijevak koji na srednjim i visokim frekvencijama pojačava zvuk.

Srednje uho se sastoji od slušnih košćica koje se nazivaju čekić, nakovanj i stremen. One su polukružno-štapni sistem kojemu je zadatak da veliki akustički otpor limfne tekućine u unutrašnjem uhu prilagodi malenom akustičkom otporu zraka i time omogućiti potpuniji prijenos zvuka.

Unutarnje uho čine polukružni kanali, pužnica, slušni živac i Eustahijeva cijev. Polukružni kanali ne sudjeluju u slušnom procesu već služe za osjet ravnoteže.

Slušni proces

Vanjski dio uha, koji se sastoji se od ušne školjke i slušnog kanala (zvukovoda) prikuplja zvukove iz okoline i prenosi zvučne valove kroz slušni kanal do bubnjića. Slušni kanal je dugačak približno između 2 cm i 2,5 cm, a presjek mu je približno od 0,3 cm² do 0,4 cm². U njemu se nalaze sićušne dlačice koje štite uho od vanjskih utjecaja.

Srednje uho ima obujam približno 1 cm³. Od vanjskog dijela uha odvojen je membranom bubnjića, koji je povezan trima slušnim košćicama koje se nazivaju čekić, nakovanj i stremen. Zvučni valovi prouzročiti će vibriranje bubnjića. Te se vibracije proslijeđuju preko triju slušnih košćica u srednjem uhu do glavnog osjetilnog organa u unutarnjem uhu, pužnice. One predstavljaju polugu nejednakih krakova, a svojim djelovanjem povećavaju zvučni tlak od 10 do 20 puta. Pločicu stremena zatvara membrana pod nazivom ovalni prozorčić koja predstavlja granicu između srednjeg i unutarnjeg uha.

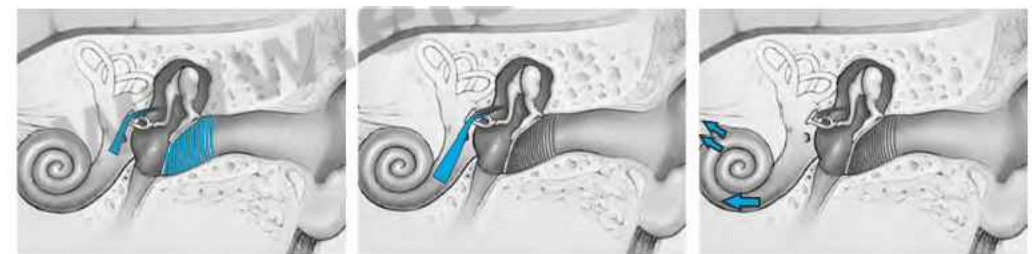
Unutarnje uho čine polukružni kanali, pužnica, slušni živac i Eustahijeva cijev, a zbog svog izgleda naziva se i labirint. Pužnica sadrži vlaknaste živčane stanice. Vibriranjem opne ovalnog prozorčića tekućina se prenosi do opne u pužnici, glavnom osjetilnom dijelu unutarnjeg uha. Ti pokreti iz srednjeg uha prouzroče kretanje tekućine (limfe) u pužnici.

Vlaknaste stanice u tkivu pužnice te pokrete prevode u električne impulse koji se prenose na vlakna slušnog živca. Električni se impulsi tada šalju slušnim živcem u mozak gdje se interpretiraju kao zvuk.

Eustahijeva cijev spaja usnu šupljinu sa srednjim uho i služi za održavanje ravnoteže. Veći dio vremena je zatvorena. Otvara se samo u određenim trenucima, kao na primjer prilikom zijevanja ili gutanja i na taj način izjednačuje tlakove zraka s obiju strana bubnjića kako ne bi došlo do njegovog oštećenja.



Zvučni valovi ulaze iz okoline u ušnu školjku, prolaze kroz nju i ulaze u ušni kanal.



Zvučni valovi prouzročili su vibriranje bubnjića koje uzrokuje pokretanje triju košćica (čekića, nakovnja i stremena), što i prenosi zvučni val do pužnice. Vibriranje se prenosi kroz fluid pužnice do slušnog živca, koji proslijeđuje električne impulse u mozak.

Titraji prolaze kroz rezonantni prostor vanjskog uha, u srednjem uhu prelaze u vibracije, a u unutarnjem uhu u elektrokemijske impulse koji putem slušnog živca informaciju o zvuku prenose u mozak.

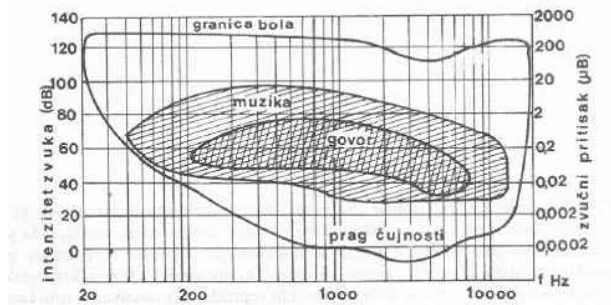
Dva uha čine stereo sustav koji omogućuje identifikaciju položaja izvora zvuka i utvrđivanje smjera njegovog pomicanja.

Ljudski sluh se može ograničiti u rasponu jakosti zvuka od 0 dB (prag čujnosti) do 130 dB (prag bola) i frekvencijskom rasponu od 16 Hz do 20 kHz. Ljudski govor najčešće se nalazi u području intenziteta od 20 dB (šapat) do 80 dB (vikanje) i frekvencija od 300 Hz do 4 000 Hz. Zvuk se najučinkovitije prenosi u području od 1 kHz do 4 kHz.

2.2 SVOJSTVA SLUHA

Pragovi sluha

Svakoj čujnoj frekvenciji odgovara najniži zvučni tlak koji uho još čuje. Na visokim frekvencijama krivulja praga čujnosti se naglo diže. Na kojoj frekvenciji nastaje prekid, vrlo se mnogo razlikuje od slušača do slušača naročito kod osoba starijih od 30 godina. Mladi ljudi čuju frekvencije od 20 000 Hz, neki čak i 25 000 Hz. Osobe s više od 50 godina rijetko čuju frekvencije iznad 15 000 Hz, a katkad ni one koje su više od 10 000 Hz. **Prag čujnosti** je vrlo različit, i to kod ljudi za koje se smatra da imaju normalan sluh. Štoviše, kod iste se osobe on mijenja iz dana u dan, od sata do sata. Poslije djelovanja buke, makar i tihe, prag čujnosti se diže.

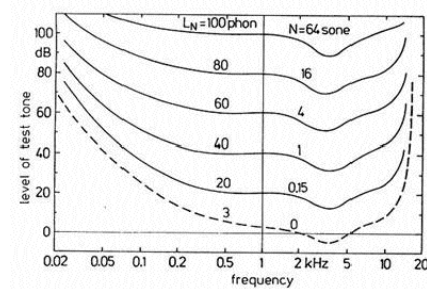
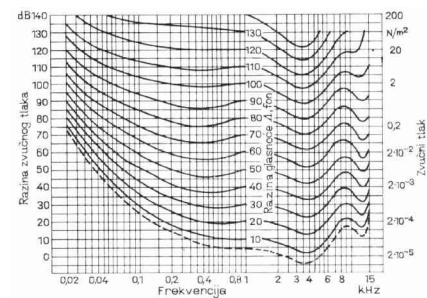


Kao što na pojedinim frekvencijama postoji najniži zvučni tlak koji uho još čuje kao ton, tako će i najviši zvučni tlak koji se na pojedinim frekvencijama smije privesti uhu, a da se ne osjeća neugodnost ili da se ono ne ošteti. Taj se zvučni tlak naziva **pragom bola**.

Glasnoća

Glasnoća zvuka je subjektivni osjećaj intenziteta zvuka. Iskazuje se u fonima. Ponekad se događa da se intenzitet ili jakost zvuka poistovjećuje s glasnoćom. No to su posve različiti pojmovi. Fonska se ljestvica ne podudara s decibelskom. Tako npr. ton frekvencije 100 Hz i jakosti 85 dB ima glasnoću od 80 fona. Odnos fona i decibela prikazuje se tzv. krivuljama jednake glasnoće ili izofonama. Na frekvenciji od 1000 Hz fonska i decibelska krivulja se podudaraju.

Istraživanja su pokazala da u području zvučnih intenziteta između 30 dB i 120 dB ljudski sluh razlikuje oko 235 stupnjeva glasnoćom.



Fonska ljestvica ima za osnovu skalu decibela. U mjernoj tehnici je to svakako prednost. No ta skala ne otkriva kako uho razlikuje glasnoće. Na primjer ako motocikl proizvodi buku glasnoće 80 fona, buka dvaju motocikala neće biti dvostruka već samo za 3 fona više, dakle 83 fona. Smanjenje buke nekog izvora sa 100 na 90 fona, dakle 10% pad, uho će osjetiti kao mnogo veće smanjenje jer će glasnoća buke biti dva puta niža. Očita neprikladnost fonske ljestvice porebama ocjenjivanja glasnoće uzrokovala je da se nađe druga skala koja bi polazila od osobina sluha. Nakon kritičkog razmatranja Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO odlučila se za uvođenje nove jedinice - *son*. U njemu porast glasnoće za 10 fona odgovara povišenje glasnoće za dvostruk broj sona. Prema toj definiciji, razini glasnoće od 40 fona odgovara glasnoća od 1 *sona*. Glasnoći od 50 fona odgovara glasnoća 2 *sona*, 60 fona su 4 *sona*, 70 fona je 8 *sona* itd.

Na razinu glasnoće buke između 70 i 90 fona tijelo reagira neovisno o čovjekovoj volji. To se očituje u vegetativnim smetnjama i poremećajima u krvotoku. Pri trajnoj buci koja premašuje 90 fona nastaju organsko-anatomska oštećenja slušnog organa. Također se remeti osjet ravnoteže, pojavljuje se šum u ušima, nesanica i mučnina.

Visina tona

Visina tona psihoakustična je značajka zvuka. Različiti zvukovi, pa i šumovi mogu pobuditi osjet tonske visine. Za razliku od frekvencije zvuka koja se može mjeriti instrumentima, visina tona određuje se izravnim opažanjem slušatelja. Osjet visine tona proporcionalan je omjeru promjene frekvencije. To znači da se osjet visine tona mijenja s logaritmom omjera frekvencije.

Jedan kontinuirani ton može se od drugoga razlikovati po **glasnoći, visini i boji**.

Visina je u prvom redu određena frekvencijom. Između 1000 i 5000 Hz visina tona je neovisna o glasnoći, dok na nižim frekvencijama od 1000 Hz događa se subjektivno sniženje visine tona. U glazbi, interval je stanovita razlika u tonskoj visini. To je fizički prevedeno određeni odnos frekvencija. Kod oktave taj odnos je 1:2, kod kvinte 2:3 itd.

Oktava (tal. ottava) je razmak između dviju nota, čiji je razmak osam tonova. Predstavlja frekvencijski odnos 1:2. Kad tonovi kojima se frekvencije odnose na takav način zvuče zajedno, rezultat je ugodan, 'suzvučan' zvuk. Viša nota ima pritom dvostruko veću frekvenciju od niže. Tako, primjerice, ukoliko ton 1 zvuči 440 Hz, njegova će oktava zvučati 880 Hz. Takve note imaju isti naziv. Ljudi mogu čuti tonove u rasponu frekvencija od oko 16 Hz do 20000 Hz. To čujno područje obuhvaća spektar tonova do 10 oktava.

Neki ljudi imaju sposobnost prepoznati i imenovati glazbeni ton (visinu tona) bez zadane referencije. Ta je sposobnost vrlo rijetka. Naziva se '**apsolutni sluh**'. Procjenjuje se da je posjeduje samo 1% čovječanstva.

Boja tona

Osjet boje tona ovisi o frekvenciji i amplitudi pojedinih harmonika zvučnog signala, omjeru i međusobnom rasporedu njihovih frekvencija, izobličenju, vremenu kašnjenja, itd.

Boja tona zavisi od vrste materijala, oblika i veličine zvučnog izvora koji treperi. Ova osobina tona nam pomaže da lako razlikujemo iste otpjevane tonove osnovnih ljudskih glasova (sopran, alt, tenor, bas) ili odsvirane na različitim muzičkim instrumentima (klarinet, violina, timpan). Kako svaki ljudski glas ima različitu tonsku boju, tako je ima i svaki instrument.

Maskiranje ili prekrivanje zvukova

Maskiranje u svakodnevnom životu ima važnu ulogu. Za razgovor na pločniku u tihoj ulici, na primjer, dovoljno je malo zvučne energije da bi govornici razumjeli jedan drugoga. Međutim, ako prođe kamion, a nismo povećali glasnoću (snagu) govorenja, naš sugovornik nas neće čuti, odnosno, razumjeti. U takvom slučaju možemo pričekati da kamion prođe, pa onda nastaviti konverzaciju, a možemo povećati snagu govorenja, odnosno glasnoću. Sličan efekt događa se u glazbi: ako jedan instrument svira glasno, on može maskirati zvuk drugog instrumenta koji svira tiho. Ako glasan instrument ima pauzu, ponovno se začuje onaj tihi instrument. Ovo su tipični primjeri (simultanog) maskiranja.

Efekt maskiranja može znatno promijeniti kvalitetu glazbenog tona jer šum ili buka prekrije tiše tonove. Stoga je pri visokokvalitetnoj reprodukciji glazbe potrebno što više smanjiti buku. Kompozitori moraju paziti i na efekt maskiranja jer jaki basovi prekriju tiše visoke tonove.

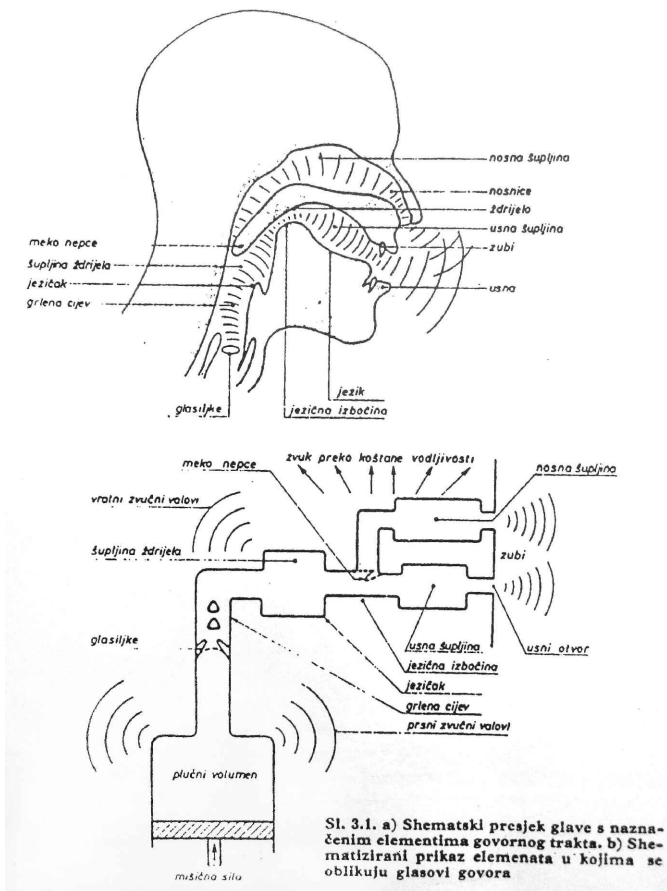
Općenit zaključak je da glasni duboki tonovi prekrivaju tihe visoke tonove i čine ih nečujnima. To je razlog zašto u mješovitim zborovima ima manje muških glasova nego ženskih, a isto je tako i u gudačkim orkestrima broj čela znatno manji od broja violina.

3.1 KARAKTERISTIKE GOVORA

Za glasovnu komunikaciju čovjek ima **govorni organ** kao odašiljač i slušni organ kao prijemnik. Njegov se govorni organ služi energijom pluća, pa nije ovisan o vanjskom izvoru. Zvučni valovi zaobilaze zapreke, a kroz jednostavnije prolaze ne slabeći izrazitije. Nosilac je informacija akustička energija koja sadržava vremenske, intenzitetne i frekvencijske promjene. Govornim organom može se proizvesti velik broj različitih glasovnih znakova, i to vrlo brzo, oko pet u sekundi. U govoru se upotrebljavaju apstraktni simboli koji kao kombinacija akustičkih znakova nemaju nikakve izravne veze sa stvarima na koje se odnose. Riječima se mogu označiti predmeti prostorno i vremenski udaljeni od govornika. Mogućnosti akustičkog govora neusporedivo su veće od onih u znakovnom govoru. To je razlog što je akustički govor postao ne samo sredstvo za međuljudsku komunikaciju nego i instrument samoga ljudskog uma.

Organ za govor

Čovjek proizvodi glasove na taj način što potiskuje zrak iz pluća kroz **glasiljke** i **usnu šupljinu**, pri čemu se energija strujanja pretvara u zvučnu energiju. Glasnice su dva paralelna mišića koji se mogu međusobno približiti i udaljiti, tvoreći tako veću ili manju pukotinu za prolazak zraka. Duljina glasiljki u muškarca je 20-24 mm, a u žene 18-20 mm. Pomoću mišića vezanih za stijenke grkljana može se mijenjati napetost, duljina i debljina glasiljki.



Sl. 3.1. a) Shematski presjek glave s naznačenim elementima govornog trakta. b) Shematsizirani prikaz elemenata u kojima se oblikuju glasovi govora

Pod djelovanjem zračnog tlaka koji stvaraju pluća glasiljke se razmaknu i tlak padne. Zatim se one opet stisnu, zbog čega zračni tlak poraste. Ta igra glasiljki neprestano se ponavlja. One, dakle, izvede relaksacijsko titranje i u tom se ritmu modulira zračna struja. Glasiljke ne titraju sinusoidno, već s obilnim sadržajem harmonika. Zvučni valovi na svom putu u vanjski prostor nailaze na šupljine koje rezonancijom ističu harmonike.

Govorni kanal, a naročito usta, poprimaju za svaki glas određen oblik i položaj. **Samoglasnici** su posve periodičan zvučni proces. **Poluvokali** m, n, r, l nisu strogo periodični. Tu glasiljke nisu jedini izvor zvuka jer on nastaje i na drugim mjestima: strujanjem zraka kroz šupljine govornog kanala, te od vrtloga. Bezvučni suglasnici (**konsonanti**) kao što su s i c, nastaju strujanjem kroz šupljine govornog kanala i vrtloženjem na suženim mjestima, osobito zubima. Eksplozivni glasovi p, t, k, b, d i g oblikuju se naglim otvaranjem zračnog puta.

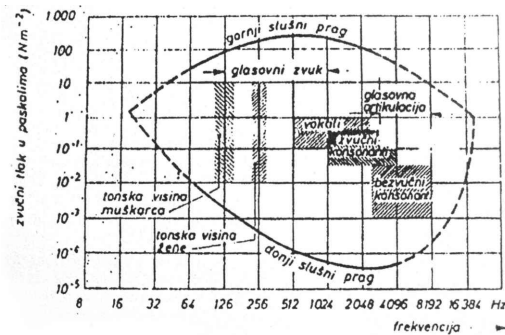
Karakteristike govornog zvuka

Najniže čujne frekvencije ljudskog govora kod muškaraca su u blizini 80 Hz, a kod žene 120 Hz. Opseg frekvencija i spektralni sastav pojedinih glasova vrlo su različiti. Viši harmonici samoglasnika nisu po frekvencijskom spektru raspoređeni jednoliko, već su grupirani u jedno ili dva područja koja se nazivaju područjima formanta. **Formanti** su sastavni tonovi što određuju svojstva vokala gotovo neovisno o osnovnoj frekvenciji.

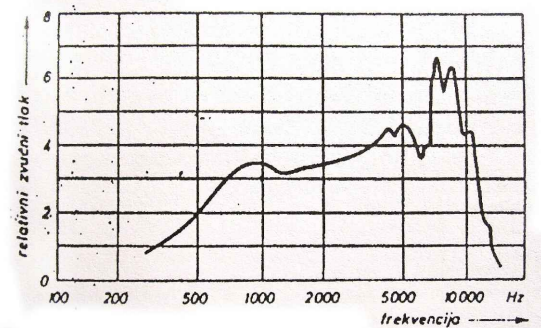
Vokal	Područje formanta
u	200 — 400 Hz
o	400 — 600 Hz
a	800 — 1200 Hz
e	400 — 600 i 2 200 — 2 600 Hz
i	200 — 400 i 3 000 — 3 500 Hz

Pri izgovoru riječi samoglasnici nemaju konstantnu frekvenciju. To vrijedi i za njihove formante. U rečenici su promjene frekvencije vokala i njihovih formanta relativno velike. Time se dobiva "rečenična melodija" bez koje bi govor zvučao monotono, kao da je proizveden strojem.

U usporedbi sa samoglasnicima suglasnici imaju vrlo malu zvučnu energiju. To je razlog zbog kojeg se u velikim dvoranama teško može razumjeti govor. Konsonantima su frekvencije mnogo više nego kod vokala. Tako su komponente glasa S velike još i na frekvencijama od oko 12 000Hz (vidimo na dijagramu na slici ispod).



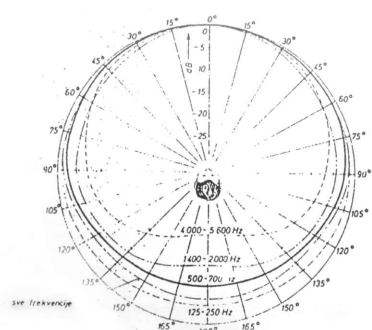
Položaj osnovnih tonova govornih i formatnih područja unutar slušne plohe



Kontinuirani spektar glasa S

Za analizu govornih glasova mnogo se primjenjuje postupak "**vidljivog govora**" (visible speech). Pri tome se upotrebljavaju filtri kojima je širina 300 Hz.

Kad je u pitanju razumljivost govora u nekoj dvorani, treba misliti i na usmjernu karakteristiku izgovorenih glasova. Na slici vidimo prikazanu usmjernu karakteristiku govora u horizontalnoj te vertikalnoj ravni.



Zvučna snaga govora

Akustička energija koju čovjek proizvodi kad govori izvanredno je mala. Snaga je običnog govora oko $10 \mu\text{W}$. To je prosječna vrijednost, u koju su uključene vršne vrijednosti i stanke. Međutim, između govornika i govornika velike su razlike, tako da jedni proizvode i do $500 \mu\text{W}$ akustičke snage, a drugi manje od $1 \mu\text{W}$. Kod istog govornika može akustička snaga varirati od $0.1 \mu\text{W}$ do nekoliko tisuća mikrovata.

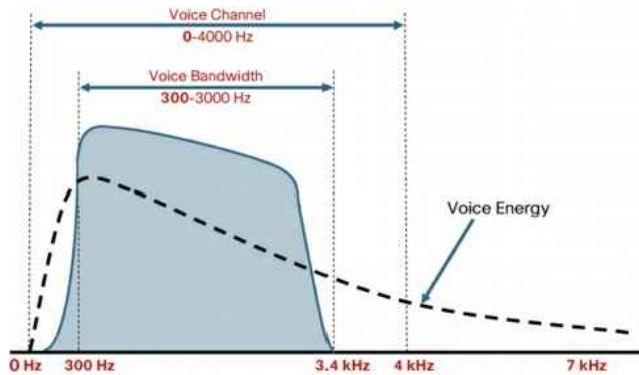
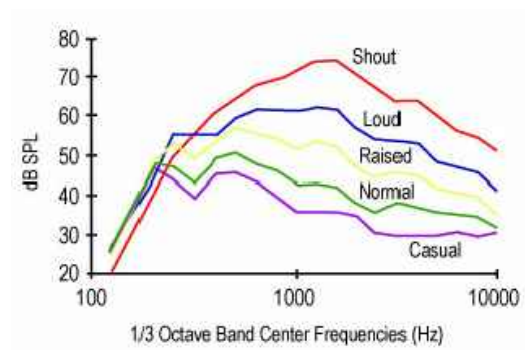
Tiho šaptanje	17 fona
Govor srednje glasnoće	57 fona
Vrlo glasan govor	77 fona
Vršne vrijednosti vrlo glasnog govora	84 fona

Tablica glasnoće u normalnim okolnostima na udaljenosti 1m od govornika

Zbog male govorne snage **gustoća zvučne energije** u nekoj velikoj dvorani vrlo je mala. To je razlog što već i slaba buka npr. ventilacija ili zvukovi izvana, može onemogućiti da se razumije govor.

Da bi govor u velikoj dvorani postao razumljiviji govornik mora govoriti glasnije. Kada se govori vrlo glasno, glas postaje viši, pa se kaže da govornik govori "povišenim" glasom. Razumije se da tad nastaje promjena i spektralnog sastava glasova.

Osnovni ton u glasu muškarca najčešće je negdje između 100 i 125 Hz, a kod žene je za oktavu viši, dakle između 200 i 225 Hz. Ukupna govorna energija je ovisna o frekvenciji. Najveća je u frekvencijama od oko 300Hz dok govorna snaga iznad 1000Hz je sasvim mala.

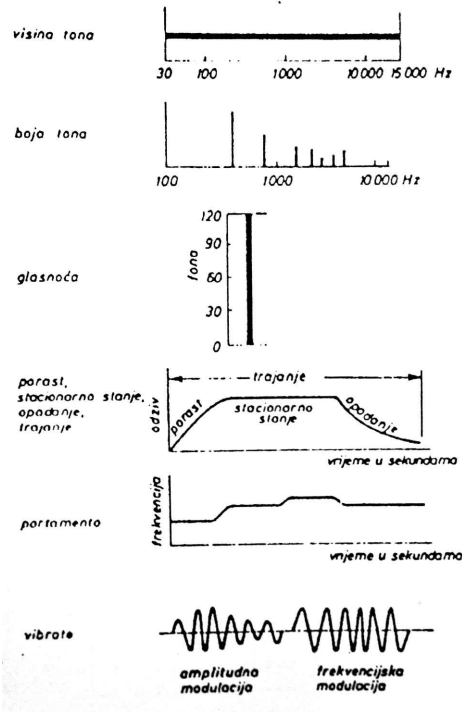


3.2 KARAKTERISTIKE GLAZBE

Glazba je umjetnost čiji je medij zvuk kojeg organiziramo u vremenu i prostoru. Da bi mogao razumijevati i ocjenjivati glazbu, slušatelj mora imati osjećaj za *visinu tona*, za *glasnoću*, za *takt* i osjećaj za *boju tona*. Sve te četiri psihološke osobine zvuka pojavljuju se u kompleksnim muzičkim oblicima : u *harmoniji*, u *melodiji*, u *dinamici*, u *ritmu*, u *punoći* i *kvaliteti tona*.

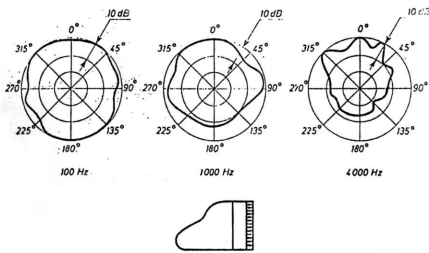
Karakteristike glazbenog zvuka

To su: *osnovna frekvencija* koja određuje tonsku visinu, *spektralni sastav* o kojem ovisi boja tona, *glasnoća*, vremenski tok intenziteta u kojem razlikujemo *početni tranzijent*, *stacionarno stanje* i *završni tranzijent*, zatim *portamento*, što znači kontinuiran prijelaz s tona jedne na ton druge frekvencije, te na kraju *tremolo* ili *vibrato*, kako se naziva amplitudna ili frekvencijska modulacija nekog tona.



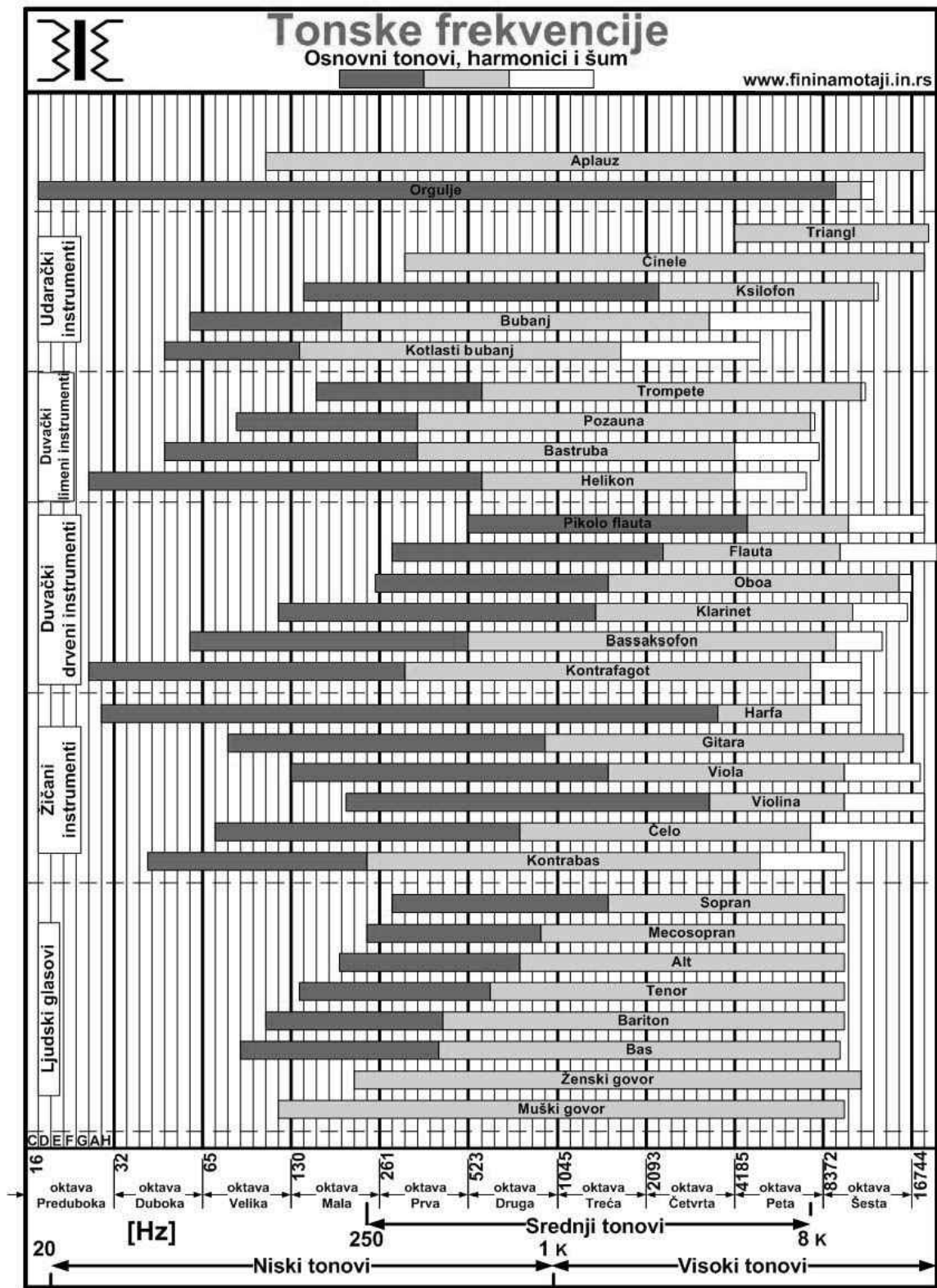
Ton neke note svirane na jednom instrumentu razlikuje se od tona iste note proizvedene drukčijim instrumentom. Jedan od razloga za tu razliku jest različit spektralni sastav tih tonova. On ovisi i o glasnoći, koja utječe na odnos amplituda komponenata glazbe.

Ovisno o položaju slušatelja prema instrumentu mijenja se i glasnoća i boja tona. Svako glazbalo ima na različitim frekvencijama razne usmjerne karakteristike.



Usmjerni dijagram klavira za tri frekvencije : 100, 1000 i 4000 Hz. Na niskim frekvencijama intenzitet zvuka praktički je neovisan o kutu. Na visokim frekvencijama otvoren poklopac djeluje kao reflektor, te usmjeruje zvučne valove.

Muzički efekt neke glazbe ovisi o tonskoj visini izvedbe. U tome je osobito osjetljiv ljudski glas. Ako je tonska visina previsoka, treba za pjevanje uložiti veći napor, a i kvaliteta ne zadovoljava. Kod instrumenata muzički efekt ovisi o tome na koju je visinu tona on ugođen jer je skladatelj pisao glazbu za određenu tonsku visinu. To je naročito važno kad instrumenti sviraju skupno, pa ih zbog toga valja sve ugoditi na istu tonsku visinu.



Opseg frekvencija zvuka što ga proizvode glazbeni instrumenti je znatno veći od onoga kod govora. Najniže osnovne tonove imaju: orgulje (16 Hz), kontrafagot (32 Hz), truba (40 Hz) i kontrabas (44 Hz). Ti su tonovi, međutim slabiji nego njihovi niži harmonici jer je valna duljina pri tako niskim frekvencijama mnogo veća od tijela instrumenata pa je emitiranje slabo.

Dinamika

Pod dinamikom se razumijeva odnos amplituda na najglasnijim mjestima (fortissima) prema amplitudama na najtišim mjestima (pianissima) neke glazbene izvedbe. Taj odnos obično ne premašuje 65 dB. Samo izuzetno može doseći 70 dB, pa i više. U govoru je dinamika znatno niža. Kod pojedinačnog govornika rijetko premaši 40 dB. Ako je, međutim, u pitanju veći broj ljudi dinamika može imati i do 56 dB.

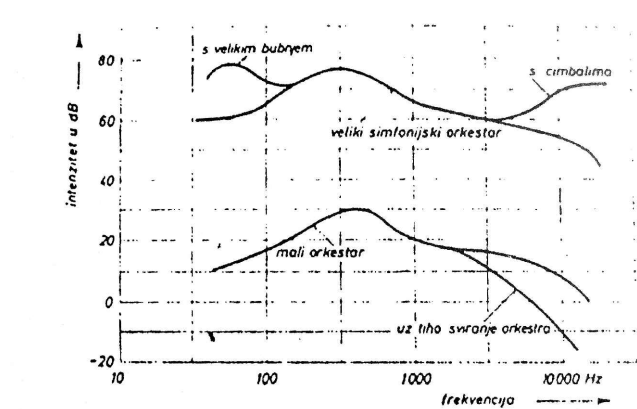
Muzička razina glasnoće	Foni	Decibeli
ppp	20	40
pp	40	50
p	55	60
mf	65	70
f	75	80
ff	85	90
fff	95	100

Zvučna snaga instrumenata

Zvučna snaga što je emitiraju glazbala vrlo je različita. Kao što se vidi iz tablice, ona se kreće u rasponu do nekoliko mikrovata (najtiši pasaži violine) pa do nekoliko desetaka vata (veliki bubanj).

Izvor zvuka	Snaga u watima
Orkestar od 75 izvođača	70
Veliki bubanj	25
Orgulje	13
Cimbali	10
Trombon	6
Klavir	0,4
Bas-saksofon	0,3
Bas-truba	0,2
Orkestar od 75 izvođača uz prosječnu glasnoću	0,09
Pikolo	0,08
Flauta	0,06
Klarinet	0,05
Francuski rog	0,05
Triangl	0,05
Glas bas	0,03
Glas alt pp	0,001
Violina na najtišim pasažima	0,000 003 8

U orkestralnim izvedbama nastupaju maksimalne snage vrlo rijetko, odnosno njihovo trajanje je sasvim kratko. Zvučna snaga plesne glazbe vrlo je ujednačena, a zvučni tlak simfonijske glazbe u 50% vremena ne premašuje 6% najveće vrijednosti.



Frekvencijska karakteristika zvučne snage velikog i malog orkestra

PROSTORNA AKUSTIKA

Zadatak je arhitektonske akustike da u prostorijama stvori uvjete za dobro i ugodno slušanje. Pri tome treba da bude zadovoljen ne samo slušač nego i izvođač tj. govornik ili glazbenik.

Dobra se akustika postiže zadovoljavajući ove uvjete:

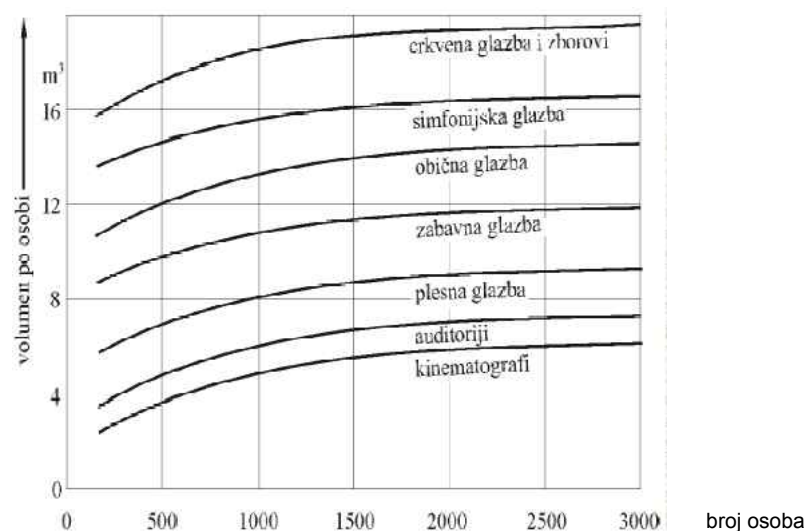
- u prostoriji ne smije biti buke, ni unutrašnje ni one koja dolazi izvana
- zvuk u prostoriji mora biti dovoljno glasan na svim mjestima
- u prostoriji ne smije biti jeke ili flater-jeke, ni na mjestu gdje su sjedala ni ondje gdje je postavljen mikrofoni
- glasnoća zvuka mora biti približno posvuda jednaka, što znači da na mjestima udaljenijima od izvora zvuka treba izravnom zvuku dodati onaj reflektiran od prikladno postavljenih ploha u prostoriji
- u prostoriji ne smiju nastati neželjene rezonancije
- odjek mora biti dovoljno malen da bi se izbjegla preklapanja uzastopnih zvukova (slogova i tonova) u govoru i glazbi. Prostorija ipak treba biti dovoljno "živa" na svim frekvencijama, kako bi slušanje govora ili glazbe bilo popraćeno ugodnim osjećajem. Pri tome direktan zvuk treba biti u stanovitom odnosu prema reflektiranome.

Teorijska razmatranja i mjerenja u izvedenim prostorijama pokazuju da optimalna duljina odjeka ovisi o veličini prostorije i o tome za koje se svrhe ona upotrebljava. Također je važan oblik prostorije jer on utječe na raspodjelu zvuka.

Ta tri čimbenika: **volumen, oblik i odjek** (reverbacija) skupa s akustičkom obradom određuju akustičke osobine prostorije.

4.1 VOLUMEN

Svatom izvoru zvuka odgovara posve određen volumen do kojega se može ići a da pri tome glasnoća ne postane premalena. Raste li volumen povećava se i unutarnja površina pa je i apsorpcija zvuka veća, odnosno uz jednaku emitiranu zvučnu energiju glasnoća je manja.



U tablici su dane vrijednosti volumena za neke izvore zvuka. Ako je potrebno ići iznad ovog volumena da bi se povećao broj sjedala, mora se u prostoriji instalirati razglasni uređaj.

Osnova po kojoj se određuje volumen koncertnih dvorana jest volumen po slušaocu, odnosno sjedalu. Minimalan specifični volumen po slušaocu je 6,65 m³. Manje od toga ne smije biti ako se želi postići akustička kvaliteta. Optimalan specifični volumen je 7-8 m³ po osobi. Za veće specifične volumene potrebno je, da bi se smanjio odjek, dodavati apsorpcijska sredstva.

Izvor zvuka	Maksimalni volumen dvorane u m³
Prosječan govornik	3 000
Uvježban govornik	6 000
Instrumentalni ili vokalni solist	10 000
Veliki simfonijski orkestar	20 000
Veliki pjevački zbor	50 000

Optimalan je volumen koncertne dvorane između 10 000 i 15 000 m³. Može se ići i do 20 000 m³, ali tad nastaju teškoće prilikom solističkih izvedaba. Dobri rezultati mogu se postići i uz manje volumene, od 6000 do 7000 m³. Iz predloženih podataka o specifičnom volumenu i ukupnom volumenu prostorija izlazi da koncertna dvorana optimalnih akustičkih svojstava može primiti 1600 -1700 slušalaca.

Za kino dvorane volumen po sjedalu se kreće između 3 i 4 m³. Zbog tako malog volumena po osobi potrebno je osigurati dobru ventilaciju. Veći volumen bio bi štetan iz dva razloga: prvi, tada bi strop bio viši i zbog toga slabije iskorišten kao reflektor zvuka, i drugi, odjek bi bio suviše velik.

Za predavaonice uzima se 4-5 m³ po sjedalu.

4.2 OBLIK

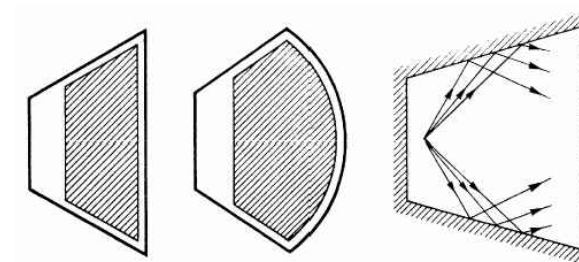
Akustička svojstva prostorije mnogo ovise o njezinu obliku. Stoga je potrebno unutarnjim ploham prostorije već dok se projektira dati ispravan oblik i položaj. Akustični nedostatak koji nastane zbog neprikladna oblika prostorije poslije je teško, a katkad i nemoguće ukloniti.

Prilikom akustičkog projektiranja treba pokloniti pažnju svakoj plohi prostorije. To se odnosi na pod i strop, na bočne stijene, na prednju i stražnju stijenu, na strop ispod balkona, pa čak i na manje plohe.

Plan poda

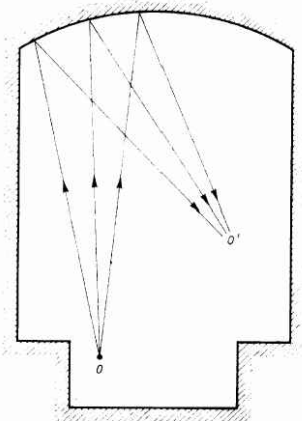
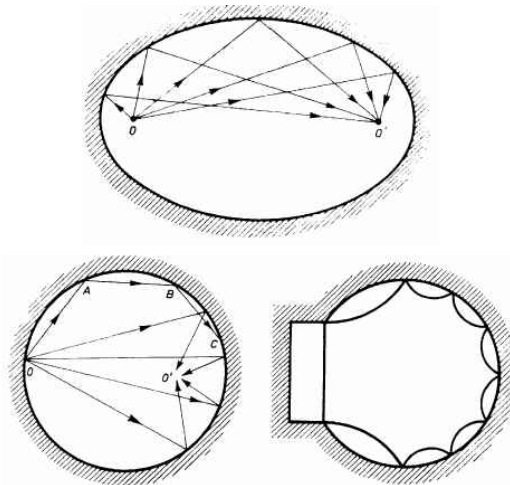
Jedan od najvažnijih zahtjeva u vezi s raspodjelom zvuka u nekoj prostoriji jest taj da zvuk dolazi do slušaoca što kraćim putem. S obzirom na usmjerenost ljudskog glasa (a isto tako i glazbenih instrumenata) na visokim frekvencijama slušatelji trebaju da se nalaze unutar kuta od $\pm 45^\circ$ ispred govornika.

U vezi s usmjernim kutom i kratkim razmakom između govornika i slušalaca vrlo su povoljne prostorije trapezna ili lepezasta oblika. Uz takav tlocrt poda postaju bočne stijene dobar reflektor koji ravnomjerno reflektira zvuk po cijelom auditoriju.

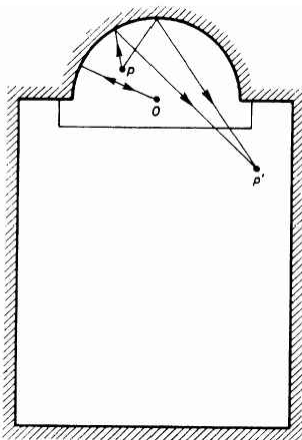


Okrugao i eliptičan pod su izrazito nepovoljni oblici za projektiranje akustičkih prostora. Takav tlocrt donosi poteškoće sa svojim efektom fokusiranja. Ako je izvor zvuka u jednom žarištu elipse, sve se zvučne zrake koncentriraju u drugom fokusu.

Slična pojava nastaje i u okrugloj prostoriji. Zvuk koji dolazi od govornika iz točke O, poslije refleksije koncentrirana se na mjestu O'. U okrugloj dvorani još je jedna zanimljiva pojava. Zvuk koji se od izvora širi u smjeru A odbija se na mjesto B odatle na mjesto C itd., tj. klizi uz stijenu dvorane. Da bi se te pojave izbjegle, treba stijenama okrugle dvorane dati konveksan oblik kakav se vidi na slici ispod.



Nepovoljne refleksije mogu nastati i na zaokruženoj, odnosno konkavnoj, stražnjoj stijeni. Od glumca ili instrumenta koji je na pozornici na mjestu O, dolazi zvuk na stražnju stijenju i reflektira se koncentrirano na mjestu O'.



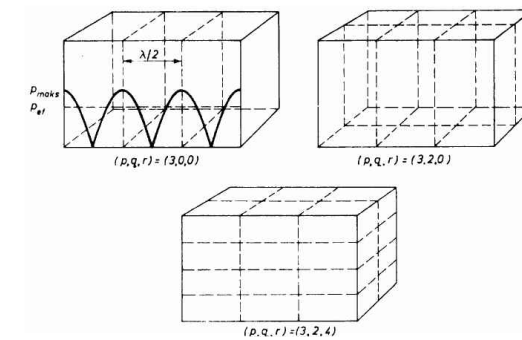
Na slici vidimo neispravan tlocrt pozornice. Prema mjestu govornika koji stoji u točki O odbijaju se od polukružne stijene sve zvučne zrake, zbog čega se govorniku čini da govori vrlo glasno, te nastoji govoriti tiše, što je nepovoljno za auditorij. Osim toga, govorniku smeta udaranje vlastitog glasa u uši. Svirač ili pjevač na mjestu O zbog povećane glasnoće nastojati će svirati ili pjevati tiše, kako bi uspostavio ravnotežu s ostalim instrumentima, odnosno pjevačima. Dakako da to vrijedi samo za njegovo mjesto, a ne za ostale lokacije na pozornici i u dvorani, pa se utišavanje ne smije provoditi. Dalje, zvučne zrake koje emitira izvor na mjestu P fokusiraju se na mjestu P', zbog čega tu slušalac čuje zvuk glasnije nego što bi trebalo.

Zvučni proces u prostoriji paralelopipedna oblika

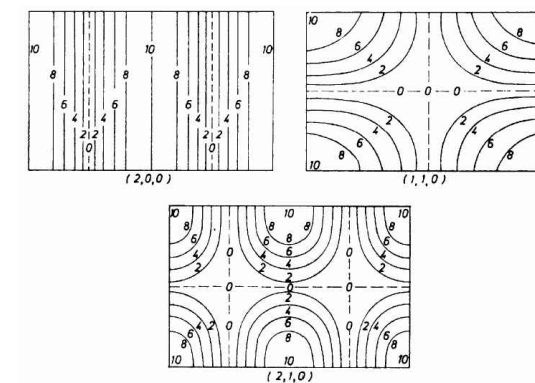
Prostorija paralelopipedna oblika složeni je rezonantni sistem. Između svake dvije paralelne stijene neke prostorije, kada u njoj djeluje zvučni izvor emitirajući kompleksni ton, stvaraju se na određenim frekvencijama *stojni valovi*. Prostorija paralelopipedna oblika ima tri para paralelnih stijena, pa prema tome i tri sistema za stvaranje stojnih valova. Frekvencije na kojima će nastati stojni valovi, a koje se nazivaju prirodnim ili vlastitim frekvencijama prostorije mogu se izračunati po formuli:

$$f = (c/2) \sqrt{(p^2/d^2) + (q^2/s^2) + (r^2/v^2)}$$

Gdje su p, q i r cijeli brojevi ili nula, a d je duljina, s širina i v visina prostorije. Na slici ispod je prikazano shematski nekoliko načina titranja na vlastitim frekvencijama u paralelopipednoj prostoriji.



Između stojnih valova pojedinih titrajnih sistema nastaje **interferencija**. Zbog rezonantnih pojava - stojnih valova, u prostoriji se dakle, nejednoliko raspoređuje zvučni tlak. Pretpostavimo da imamo izvor zvuka koji bi na otvorenom prostoru u stanovitoj udaljenosti proizvodio konstantan zvučni tlak na svim frekvencijama. Stavimo li taj izvor zvuka u neku prostoriju, neće više zvučni tlak biti neovisan o frekvenciji. On će na istoj udaljenosti od izvora biti na nekim frekvencijama znatno viši nego na otvorenom prostoru. To će se dogoditi na frekvencijama stojnih valova ili rezonantnim frekvencijama.



Raspodjela izobara (krivulja jednakog zvučnog tlaka) u prostoriji zbog interferencije valova vlastitih frekvencija.

Da bi se dobila što povoljnija raspodjela zvučnog tlaka, moraju dimenzije prostorije biti u stanovitom odnosu. Najnepovoljniji oblik paralelopipedne prostorije je kocka. U takvoj su prostoriji rezonantne frekvencije svih triju sistema jednake, pa je porast tlaka na tim frekvencijama osobito velik.

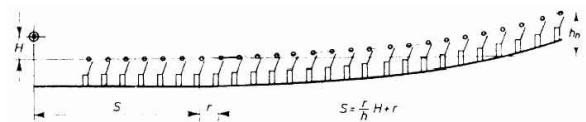
Povoljna je oblika ona prostorija u kojoj se rezonantne frekvencije pojedinih smjerova ne poklapaju. Prije se smatralo da takvu raspodjelu rezonantnih frekvencija daje točno određen omjer dimenzija prostorije. Najpoznatiji takvi omjeri su 2 : 3 : 5, 1 : $\sqrt[3]{2}$: $\sqrt[3]{4}$, zlatni rez itd. Moderna valna akustika pokazala je da se ne mora držati nekih točnih pravila, već se dimenzije prostorije mogu kretati u dosta širokim granicama.

Izdizanje izvora zvuka i sjedala

Prelazeći preko glava i tijela slušalaca zvuk prilično oslabi tako da na stražnjim sjedalima glasnoća nije dovoljna. Izdizanjem zvuka iznad ravnine u kojoj su glave slušalaca osigurava se izravnom zvuku slobodan put i time postiže razumljivost govora i na stražnjim sjedalima većih dvorana. Ako udaljenost posljednjeg sjedala od izvora označimo sa S , visinu izvora iznad glava sa H , razmak među redovima r , a slobodnu visinu glave slušaoca u posljednjem redu sa h , potrebnu visinu izvora zvuka iznad glava izračunavamo po formuli:

$$H = h \times \frac{S-r}{r}$$

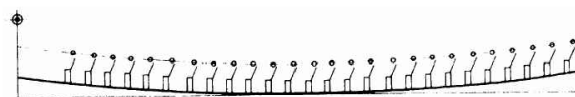
Da slušanje bude dobro h mora iznositi barem 12cm. Može ići i do 8cm, no tad moraju susjedni redovi biti međusobno pomaknuti u bočnom smjeru za pola sjedala. Normalna visina glave od poda u sjedećem položaju uzima se da je 1,2m, a razmak između redova obično iznosi 0,85m.



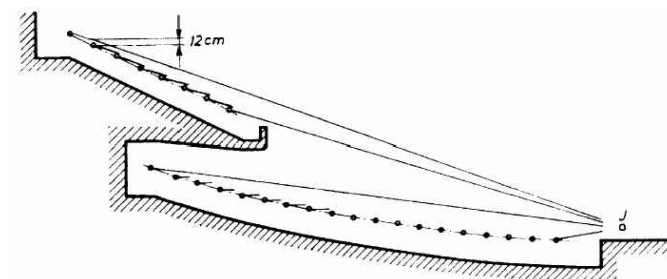
Ako je broj redova velik, ne može se izvesti ravan pod jer bi izvor zvuka trebalo suviše izdignuti iznad glava slušalaca na prvim sjedalima. Tad se prednji redovi postave na ravnom podu, a ostali na izdignutom dijelu kao na slici gore. Izdizanje h_n u n -tom redu iznad ravnine glava slušatelja na vodoravnom dijelu dobiva se iz formule:

$$h_n = h_{n-1} + h - \frac{r \times (H - h_{n-1})}{S + (n-1) \times r}$$

Gdje su h_1, h_2, h_3 do h_n povišenje prvog, drugog, trećeg, odnosno n -tog reda, a S je razmak od izvora zvuka do posljednjeg reda u horizontalnom dijelu dvorane.



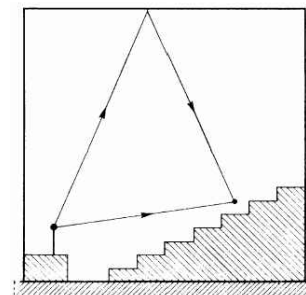
Na slici poviše oblik je poda koji u prednjem dijelu nije vodoravan, već uzdignut. Time se postiže manje izdizanje stražnjeg dijela. Takav se profil poda mnogo upotrebljava u kino-dvoranama.



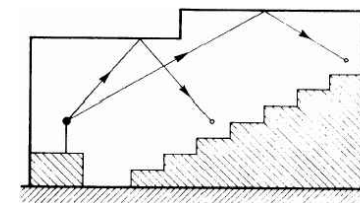
Sjedala na balkonu treba izdignuti na sličan način kao i ona u donjem dijelu dvorane.

Visina i oblik stropa

U dobro projektiranoj dvorani strop je ploha koja više nego ijedna druga doprinosi pojačanju zvuka. Budući da su u pogledu glasnoće najlošija stražnja sjedala, strop treba da najviše reflektira zvuk u tom smjeru. Pri tome mora biti zadovoljeno ovo pravilo: da nebi došlo do nerazumljivosti govora, ili čak jeke, *ne smije reflektirani zvuk doći suviše kasno nakon direktnog zvuka*. Razlika između puta koji će prevaliti izravni i reflektirani zvuk treba da bude do 12m. Iz toga proizlazi da strop ne smije biti previše visok. Spuštajući strop, ili još bolje, ako je on stepeničasta oblika postiže se ispravna refleksija zvuka prema stražnjim sjedalima.

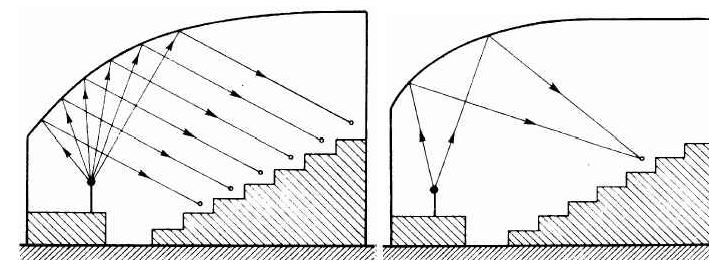


Zbog refleksija na suviše visokom stropu može se pojaviti jeka.

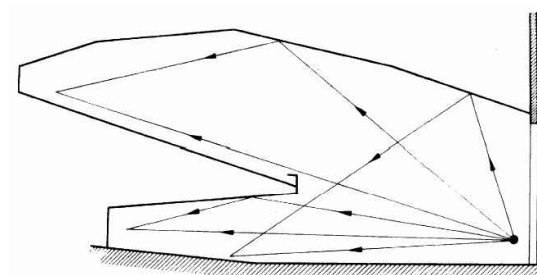


Stepeničastim stropom zvučne zrake se mogu ispravno usmjeriti prema slušateljima.

Još je povoljnije stropu dati zakrivljen oblik, kao na slici ispod, jer se tad sve zvučne zrake koje stižu na strop vraćaju prema auditoriju. Treba upozoriti da svaki zakrivljeni strop ne daje dobar rezultat, pa tako na slici desno prikazuje se primjer u kojem je zakrivljenost neispravna i djeluje štetno jer koncentrira zvuk u srednji dio dvorane.

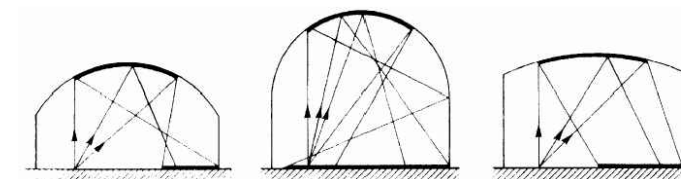


Ispravno i loše zakrivljen strop.



Na slici vidimo presjek dobro projektiranog kazališta. Stropu ispred pozornice dan je takav položaj i oblik da se zvuk odbija u prostor ispod balkona. Ostali dio prostora usmjeruje zvuk na balkon. I stropu ispod balkona dan je takav nagib da odbijeni zvuk dopjeva na stražnja sjedala parketa.

Ovisno o odnosu radijusa zakrivljenja stropa prema njegovoj visini, može raspodjela zvuka na podu biti povoljna ili nepovoljna.

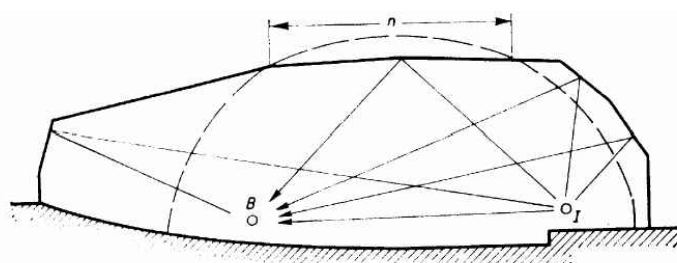


Jeka i flater-jeka (lepršajuća jeka)

Kada zvučni val naiđe na neku prepreku, on se od nje može odskočiti ili odbiti, kao što se odbija svjetlost. Kad se zvučni val odbije na ovaj način, čuje se kao odjek. Stoga je jeka odbijeni zvuk koji se ponavlja. Jeka se može pojaviti u različitim prostorijama te loše utjecati na razumijevanje govora i opći slušni dojam.

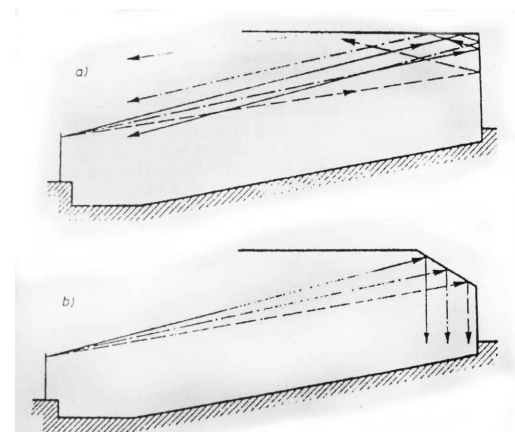
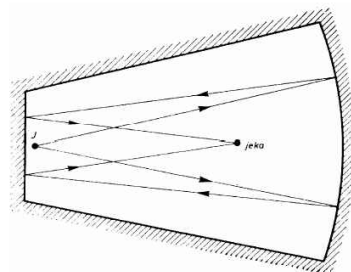
Zvučne impulse koji jedan poslije drugoga slijede u vremenu duljemu od 0,05 do 0,1 s uho čuje svaki posebno. Pojava da se zvučni impuls ponovo čuje pošto se odbije od neke plohe naziva se **jekom**. Uz zakašnjenje reflektiranog zvuka prema izravnome od 0,05 s, što odgovara razlici putova od 17 m, jeka se čuje onda ako je odbijeni zvuk istoga intenziteta kao i direktni. Vrijeme zakašnjenja od 0,1 s (razlika u putu od 34 m) odnosi se na primjer kad je intenzitet reflektiranog zvuka upola slabiji od onoga u izravnom zvuku.

Jeka uz to što je slušanju neugodna otežava i razumijevanje govora. Rečeno je već da jeka nastaje u prostorijama s visokim stropom. No, ona se pojavljuje i u suviše dugoj prostoriji.



Na slici koja prikazuje presjek velike dvorane, vidi se kako na mjestu slušaoca B jeka neće biti samo od odraza na stropu unutar crtkane elipse na dijelu označenome sa n. Reflektiranje od ostalih ploha daje previše veliku razliku između puta izravnog i reflektiranog zvuka pa se čuje jeka.

Jeka se može pojaviti i u malim prostorijama zbog višestruke refleksije. Takav primjer vidimo na slici ispod. Tu je polumjer zakrivljenja stražnje stijene velik pa se zvuk ne može koncentrirati, ali zato, kao što vidimo, postoji mogućnost da se u nekim prostorima dvorane pojavi jeka.



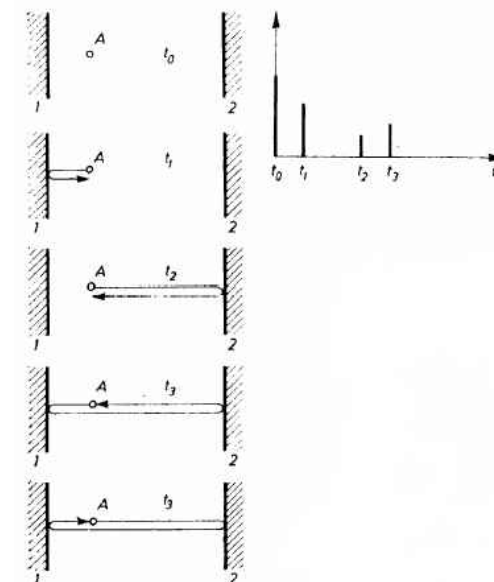
Jeka na kazališnoj pozornici

Refleksijom od stražnje stijene balkona i stropa nad balkonom vraća se zvuk na mjesto odakle je pošao. Jednostavnim skošenjem stropa iznad balkona, kao na donjoj slici, može se taj štetni zvuk pretvoriti u korisni.

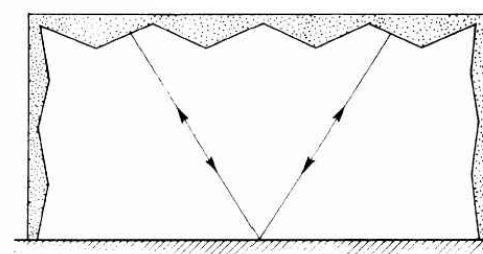
U manjim prostorijama glatkih i tvrdih stijena često ćemo naići na pojavu da se npr. pljesak dlanovima čuje kao niz brzih uzastopnih impulsa. To je tkz. **flater-jeka** ili **lepršajuća jeka** (engl. flutter-lepršati).

Slika ispod predodžuje nastanak te pojave. Impuls proizveden na mjestu A odbije se od stijene 1 i nakon vremena t_1 natrag do slušaoca. To se isto događa s impulsom koji se reflektira od stijene 2, samo nakon vremena t_2 . Poslije toga oba reflektirana zvuka putuju od suprotnih stijena i stižu u točku A nakon istog vremena t_3 . Daljni tok je u biti ponavljanje dotadašnjega sve dok se zvuk ne priguši.

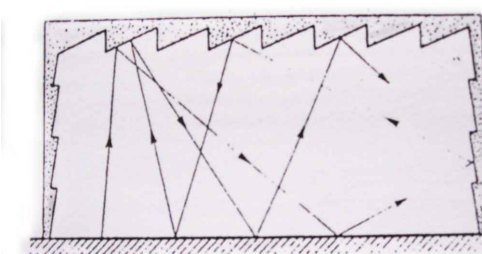
Lepršava jeka može nastati i između ploha koje nisu paralelne.



I kod valovitog stropa može nastati lepršava jeka kao što vidimo na slici dolje lijevo. Stoga je bolje strop nazubiti kako je to i učinjeno na slici desno.



I uz prizmatične difuzore na stropu može nastati flater-jeka.

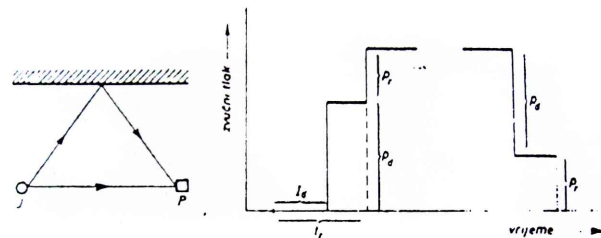


Zupčasti strop onemogućuje nastanak flater-jeka.

4.3. ODJEK

Dozvuk i odjek

Razmotrit ćemo što se događa sa zvukom koji emitira neki izvor u zatvorenoj prostoriji. Pretpostavit ćemo da je bočno od izvora i prijemnika stijena. Zvuk do prijemnika će dolaziti dvama putevima, direktno i reflektiranjem o stijene. Budući da odbijeni zvuk treba da prevali dulji put, stiže kasnije, nakon direktnog zvuka. Oba zvuka zajedno daju povećani tlak, što je u dijagramu izraženo stepenicom. Kada prestane djelovati izvor, naprije će prestati stizati direktni, a nakon toga reflektirani zvuk. Tlak će dakle, također stepeničasto opasti.



Dijagram zvučnog tlaka izravnog i reflektiranog zvuka nakon početka emitiranja i po njegovu prestanku.

U zatvorenoj prostoriji nastaje mnogostruka refleksija od svih stijena. Stoga će se zvučni tlak povisivati u dijagramu skokovito, s mnogo stepenica. Budući da se prilikom svake refleksije jedan dio zvučne energije apsorbira, visina kasnih stepenica bit će u dijagramu sve manja jer one pripadaju zvučnim zrakama koje nakon višestruke refleksije postepeno sve više gube jakost. Zvučni se tlak dakle, povisuje eksponencijalno. *Stacionarno se stanje uspostavlja onda kada nastane ravnoteža između emitirane i apsorbirane energije.*

Proces utišavanja zvuka po prestanku djelovanja zvučnog izvora također se odvija stepeničasto. Budući da niže stepenice pripadaju zvučnim zrakama koje su se mnogostruko reflektirale i time postupno gubile intenzitet, svaka će niža stepenica imati manju visinu od prethodne. I taj se proces odvija po *eksponencijalnom zakonu*.

Proces eksponencijalnog rasta zvučnog tlaka (ili intenziteta zvuka, ili gustoće zvučne energije) do stacionarnog stanja naziva se **dozvukom**. Suprotan proces, koji se odvija nakon prestanka djelovanja zvučnog izvora, proces eksponencijalnog opadanja zvučnog tlaka (ili intenziteta zvuka, ili gustoće zvučne energije) jest **odjek** ili **reverbacija**.

Računanje vremena odjeka - Sabinova formula

Pod pojmom odjek podrazumijeva se niz uzastopnih sve slabijih refleksija koje prate direktni zvuk u prostoriji i koje se ne mogu uhom međusobno razlikovati za razliku od jeke koju uho prima kao izdvojeni slušni događaj.

Vrijeme odjeka (T60) kao mjerilo brzine opadanja razine zvuka u prostoriji uveo je američki znanstvenik W. Sabine 1895. godine.

Vrijeme odjeka je vrijeme za koje intenzitet zvuka opadne za 60dB.

Sabine je uzeo 60 dB zato što se za zvukove normalne jakosti odjek može pratiti uhom baš do pada za 60 dB.

Na temelju svojih mnogobrojnih mjerenja Sabine je došao do ovih zaključaka:

1. Vrijeme utišavanja zvuka praktički je jednako na svim mjestima u dvorani;
2. Vrijeme utišavanja zvuka praktički ne ovisi o položaju izvora zvuka;
3. Djelovanje apsorpcijskih materijala postavljenih da bi se smanjilo vrijeme utišavanja, općenito, ne ovisi o njihovu položaju.

Nakon mnogobrojnih pokusa Sabine je došao do jednadžbe za **vrijeme odjeka**:

$$T = \frac{0,161V}{A}, \quad A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

gdje je T vrijeme u sekundama dobiveno na osnovi odnosa početnog i konačnog intenziteta $10^6:1$ ili 60dB, a apsorpcija A zbroj umnožaka površina promatranih ploha i pripadajućih koeficijenata apsorpcije i izražena je u kvadratnim metrima ili sabinima. Volumen treba uvrstiti u kubičnim metrima.

Sabine uvodi pojam **koeficijenta apsorpcije α** neke površine S na način da kruti zid ima koeficijent apsorpcije (akustičke snage) jednak nuli, a otvoreni prozor ima koeficijent apsorpcije jednak jedinici. Za neku površinu S definira se **ekvivalentna apsorpcijska površina A** kao umnožak **$A = \alpha S$** .

Ukoliko u nekoj prostoriji postoji više površina S_i koje imaju različite koeficijente apsorpcije α_i ukupna apsorpcijska površina se dobiva zbrajanjem svih apsorpcijskih površina, odnosno oplošjem te prostorije.

Sabinova formula za vrijeme odjeka ne uzima u obzir disipaciju zvučne energije u samom zraku. Taj efekt je izražen na višim frekvencijama i dovodi do modifikacije izraza za intenzitet zvuka u oblik:

$$T = \frac{0,16V}{A + 4mV}$$

Koeficijent m se određuje eksperimentalno. Njegov je utjecaj značajan na frekvencijama većim od 1kHz. U slučaju da je relativna vlažnost h između 20% i 70%, u frekvencijskom pojasu od 1,5 do 10kHz, koeficijent m se dovoljno točno određuje iz izraza:

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} \frac{50}{h} \left(\frac{f}{1000} \right)^{1,7}$$

U praksi se često koristi Sabinova formula za određivanje koeficijenta apsorpcije nekog materijala. Naime, ako neku difuznu prostoriju s vrlo krutim zidovima obložimo nekim materijalom koji ima koeficijent apsorpcije α , i izmjerimo volumen V, površinu obloženog dijela prostorije S_0 i vrijeme odjeka T60, Sabinova formula daje približnu vrijednost za koeficijent apsorpcije α_{sab} :

$$\alpha_{sab} = \frac{0,16V}{T_{60} S_0}$$

Statistički izrazi iz kojih je izvedena Sabinova formula vrijede samo ako je u prostoriji prisutan veliki broj zvučnih valova (uvjeti difuznog polja). To je moguće samo ako je pobuđen veliki broj refleksija. To znači da Sabinova formula vrijedi ako je srednji koeficijent apsorpcije mali.

Eyringova formula za vrijeme odjeka

Iako je proces odjeka relativno složen, Sabineova formula je prilično jednostavna i stoga prikladna za upotrebu. No, treba naglasiti da je ona prikladna samo onda kad se zvuk za vrijeme odjeka reflektira mnogo puta, tako da se može smatrati da je zvučna energija jednoliko raspodijeljena po cijeloj prostoriji. Ako je riječ o „prigušenoj“ prostoriji, dakle o malobrojnim refleksijama zvuka za vrijeme odjeka, Sabineova formula ne daje realne rezultate. Ona je zapravo samo poseban slučaj Eyringove formule:

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1-\alpha)} \quad - \ln(1-\alpha) = \frac{\alpha}{1} + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\alpha^3}{3} + \dots$$

Gdje apsorpcijska površina iznosi $A = -\ln(1-\alpha) S$.

Za male vrijednosti α članovi s potencijama postaju zanemarivo maleni, pa je $-\ln(1-\alpha) = \alpha$.

G. Millington je također uzeo da se površina dvorane S sastoji od površina $S_1, S_2, S_3, \dots, S_i$, gdje svaka sa svojim koeficijentom apsorpcije $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i$. Ako za vrijeme odjeka nastaje N refleksija na površini S , onda će N_1 refleksija biti na površini S_1 , N_2 na površini S_2 itd. Uz pretpostavku da je broj refleksija razmjeran površini, vrijedi odnos:

$$N_1 = N \frac{S_1}{S}, \quad N_2 = N \frac{S_2}{S}, \quad \dots, \quad N_i = N \frac{S_i}{S}$$

Konačno se tim postupkom dobiva **Eyringova formula**:

$$T = \frac{0,16V}{-\sum S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)}$$

Kod većih volumena prostorija treba uzeti u obzir apsorpciju zvuka u zraku. Eyringovog izraz uz ovu korekciju ima oblik:

$$T = \frac{0,16 V}{4mV - S \ln(1 - \alpha)}$$

S obzirom da je u odječnom polju vrijednost efektivne vrijednosti tlaka konstantna, uvodimo veličinu koju nazivamo **konstanta prostorije (R)**:

$$R = \frac{A}{1 - \alpha} = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \alpha}$$

Na udaljenostima bliskim izvoru dominira polje izravnog vala, dok u točkama koje su udaljene od izvora prevladava odječno polje. Udaljenost od izvora na kojoj je jednak doprinos izravnog vala i odječnog polja naziva se **kritični radius(r_c)**. On iznosi:

$$r_c = \sqrt{\frac{RD}{16\pi}} = 0,141 \sqrt{RD}$$

gdje je R-konstanta prostorije, a D faktor usmjerenosti točkastog zvučnog izvora.

Često se uzima da za povoljnu razumljivost slušatelj mora biti udaljen od izvora na udaljenosti koja je manja od kritičnog radiusa. Kasnije će biti dani pouzdaiji kriteriji za procjenu razumljivosti. Poznavanje kritičnog radiusa je značajno pri postavljanju mikrofona u sustavu ozvučenja. *Prema uvjetima nastanka povratne akustičke veze, očito je da udaljenost mikrofona od govornika mora biti manja od kritičnog radiusa, inače se ne može ostvariti akustičko pojačanje.*

U prethodnim formulama pretpostavljeno je da se zna točna vrijednost koeficijenta apsorpcije pri određivanju konstante prostorije R. To u praksi nije slučaj jer se prema važećim standardima koeficijent apsorpcije mjeri pomoću Sabinove formule za vrijeme odjeka. Zbog toga se u praksi za izračun konstante prostorije češće koristi izraz:

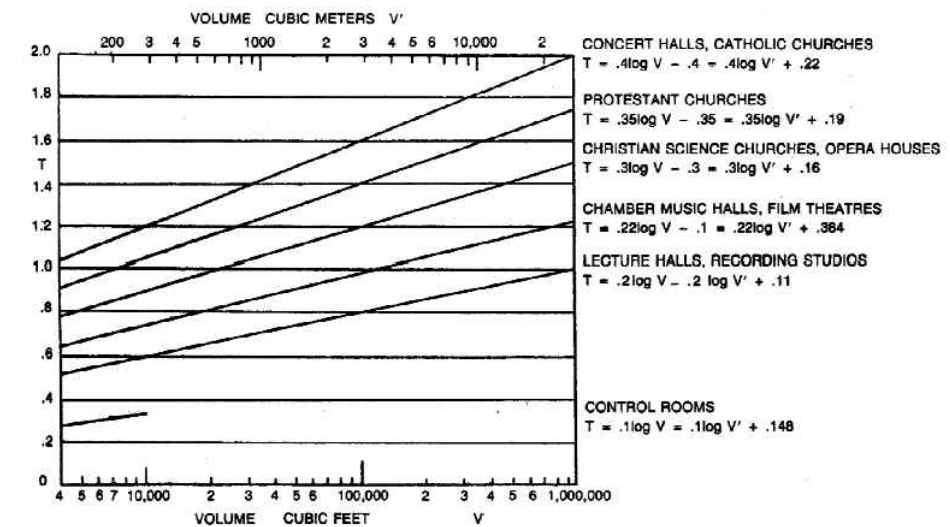
$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \alpha} \cong S \bar{\alpha}_{sab} = 0,16 \frac{V}{T_{60}}$$

Optimalno vrijeme odjeka

Za svaku prostoriju postoji neko određeno najpovoljnije vrijeme odjeka. Ono ne ovisi samo o volumenu prostorije nego i o svrsi kojoj je ona namijenjena. I difuznost prostorije utječe na optimalno vrijeme odjeka. Ako je ona loša, bolje je odabrati manje vrijeme odjeka.

S obzirom na uporabu prostorije razlikujemo optimalno vrijeme odjeka u onima koji služe za govor i u glazbenim dvoranama.

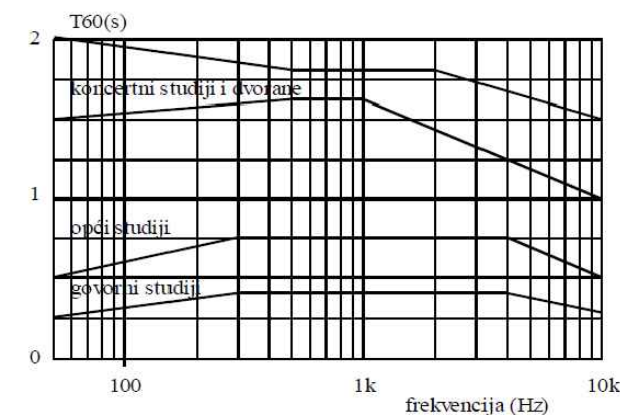
U dvoranama za crkvenu glazbu potrebno je nešto veće vrijeme odjeka nego u dvoranama za simfonijsku glazbu, a u auditorijima vrijeme odjeka treba biti nešto manje, jer je za dobru razumljivost govora potrebno smanjiti razinu odjeka u odnosu na razinu direktnog vala. Ukoliko se dvorane koriste za reprodukciju glazbe, pretpostavka je da je u snimljenoj glazbi već unesen odjek, pa takve dvorane moraju imati nešto manje vrijeme odjeka.



Matras je za optimalno vrijeme odjeka našao ovakvu ovisnost o volumenu:

$$\begin{aligned} \text{u dvoranama za crkvenu glazbu} \quad T_{opt} &= \frac{1}{10} \sqrt[3]{V} \\ \text{u koncertnim dvoranama} \quad T_{opt} &= \frac{9}{100} \sqrt[3]{V} \\ \text{u kazalištima i auditorijima} \quad T_{opt} &= \frac{7,5}{100} \sqrt[3]{V} \end{aligned}$$

Ako se u izraz umjesto T_{opt} uvrsti izraz za vrijeme odjeka prema Sabinu i uzme da u dvoranama pravilnog oblika $\sqrt[3]{V/S} \sim 1/6$, dobije se da optimalan faktor apsorpcije iznosi 0,3. Iz toga bi se mogao izvesti zaključak da je *uho zapravo osjetljivo na apsorpciju, a ne na odjek*.



Povoljne frekvencijske karakteristike za vrijeme odjeka prema L. Beraneku

U pogledu frekvencijske karakteristike odjeka Beranek je sumirao europska i američka iskustva i prikazao ih dijagramom na slici dolje. Uočimo da odstupanja u vremenu odjeka od $\pm 30^\circ$ nisu kritična. Očito se ne može postaviti stroga pravila jer povoljno vrijeme odjeka ovisi o više faktora: o tipu glazbe ili govornog signala, o volumenu prostorije, sastavu orkestra itd. To je razlog da se neki studiji arhitektonski projektiraju tako da se može mijenjati vrijeme odjeka.

Primjer procjene vremena odjeka

Frekvencijska karakteristika odjeka stanovita oblika dobiva se tako da se plohe prostorije oblože materijalima koji imaju određene frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije.

Navest ćemo tipične vrijednost koeficijenta apsorpcije nekih materijala:

Materijal	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
1. Ožbukani zid	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
2. Pod, drveni	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
3. Pod, drveni parket	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
4. Pod, linoleum	0,02	0,03	0,04	0,45	0,05	0,05
5. Pod + tapet 1/8"	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
6. Zid od opeke	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
7. Viseći strop, žbuka ili gips	0,25	0,25	0,10	0,05	0,05	0,03
8. Viseći strop, min.vuna	0,10	0,28	0,66	0,91	0,82	0,69
9. Viseći strop + spužva Sonex	0,57	0,61	0,61	0,83	0,90	0,97
10. Betonski blok, obojani	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
11. Betonski blok, nebojani	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
12. Ožbukani zid	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06
13. Hrastova vrata	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
14. Staklo, normalni prozor	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
15. Staklo, laminirano	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
16. Drvena obloga na rešetki	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05
17. Akust. ploče 15mm na rešetki	0,20	0,35	0,50	0,55	0,60	0,70
18. Iverica, 3/8"	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
19. Sonex spužva, 2"	0,08	0,25	0,61	0,92	0,95	0,92
20. Sonex spužva, 4"	0,20	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00
21. Mineralni sprej 1/2" na zidu	0,05	0,15	0,45	0,70	0,80	0,80

Utjecaj ispune prostorije publikom i namještajem može se procijeniti pomoću sljedeće tablice:

Materijal	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Publika (m2 po osobi)	0,15	0,30	0,50	0,55	0,60	0,50
Tvrde stolice (m2 po stolici)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Kožom tapecirane stolice	0,2	0,30	0,30	0,25	0,25	0,25
Tapecirane stolice	0,2	0,25	0,30	0,38	0,45	0,40
Zračna apsorpcija (po m3)	0	0	0	0,003	0,007	0,02

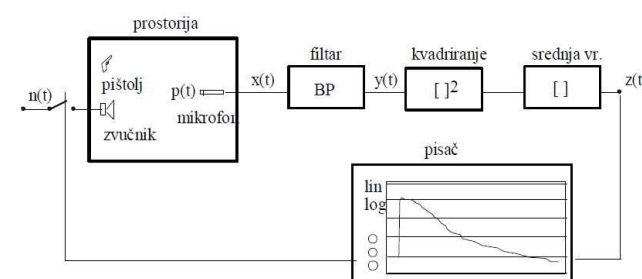
Izvršit ćemo proračun vremena odjeka kino dvorane volumena 1440m³, koja prima 400 gledaoca. Strop je viseći od gipsa na rabić mreži, 80m² bočnih zidova je prekriveno drvenim pločama na rešetki od letava, na stražnjem zidu postavljeno je 55m² akustičkih ploča, ostali zidovi su goli. Slobodna površina poda je prekrivena linoleumom, površina platna je 15m², vrata 16m², a stolice su presvučene kožom. Tijek proračuna je prikazan tabelarno:

Materijal	površina (m ²)	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Viseći žbukani strop	240	60	40	24	12	12	19
Ožbukani zidovi	218	3	4	6	9	9	9
Drvena obloga	80	30	20	15	12	10	8
Akustičke ploče	55	11	20	27	30	33	37
Platno	15	1	3	5	5	5	5
Vrata	16	6	5	3	3	2	2
Linoleum	60	1	1	2	2	3	2
Stolice (koža)	200	40	60	60	50	50	50
Publika	200	40	80	110	120	120	120
Zračna apsprpc.		0	0	0	4	10	31
Ukupna apsorpcija	m²	192	233	252	247	254	274
Vrijeme odjeka	sek	1,2	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8

Mjerenje vremena odjeka u izvedenim prostorijama

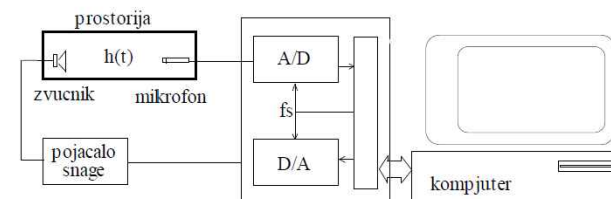
Može se izvršiti analogno i digitalno.

Analogno mjerenje



Za akustičku se pobudu prostorije koriste impulsni signali (pucanj iz startnog pištolja, pucanj balona) ili se zvučnik napaja kontinuiranom signalom (šum, frekvencijski modulirani sinusni burst) do trenutka kada se ocijeni da je u prostoriji pobuđen dovoljan broj refleksija. Zatim se isključuje pobudni signal i započinje vršenje zapisa krivulje opadanja energije na pisacu. Za mjerenje je prikladno koristiti sve tipove širokopojasnih signala (širine pojasa veće od jedne terce), a treba izbjegavati mjerenje sa sinusnim signalom jer tada u odzivu prostorije dominira utjecaj rezonantnih modova prostorije. Da će zapis na pisacu odgovarati krivulji opadanja energije, u slučaju kada se pobuda prostorije vrši kontinuiranim signalom, ne treba posebno dokazivati jer je za takve uvjete pobude i izveden izraz za opadanje energije u prostoriji. Vrijeme odjeka se može odrediti iz krivulje vremenskog tijeka energije.

Digitalno mjerenje



Da bi se dobila što bolja procjena vremena odjeka koriste se dva pristupa:

Prvi je da se snimi krivulja vremenskog tijeka energije na više mjesta u prostoriji i za više različitih položaja mikrofona, te da se procijeni nagib koji zadovoljava najveći broj tih krivulja.

Drugi je pristup mjerenju predložio Schroeder. Analizirao je raspodjelu zvučnog polja u prostoriji koja je pobuđena bijelim šumom te zakonitost opadanja energije ako se izvor isključi u trenutku $t=0$. Statističkom analizom je utvrdio da se srednja vrijednost opadanja energije u prostoriji može dobiti iz impulsnog odziva prostorije, mjerenog na bilo kojem mjestu u prostoriji, ako se integrira impulsni odziv "unatrag" (eng. backward integration). Značaj Schroederova pristupa je u tome što se ne mora vršiti mjerenje u više točaka u prostoriji, jer se unatrag integriranjem ujedno vrši i prostorno usrednjavanje odziva.

Instrumentarij kojim bi se moglo realizirati obradu signala mora imati mogućnost bilježenja i pohrane signala u dugom vremenskom intervalu, pa je neophodna upotreba digitalnih kompjutera s jedinicama za uzorkovanje signala. Obrada signala (filtriranje, usrednjavanje i proračun funkcije opadanja vrši se pomoću digitalnog računala).

Dva su pristupa obradi signala:

Prvi je pristup da se prvo izmjeri impulsni odziv prostorije pa se nakon toga vrši obrada pohranjenog signala. Najprije se vrši digitalno filtriranje oktavnim ili tercnim filtrima, a zatim se vrši proračun funkcije opadanja energije.

Drugi je pristup da se direktno snima odziv na prekinuti uskopojasni šum, a obrada signala se vrši u realnom vremenu simuliranjem funkcije analognog mjernog sustava.

Jasnoća i definiranost

Jasnoća (transparentnost) se označava s C80 ili C50, a predstavlja omjer energije u prvih 80ms (50ms za govor) o odnosu na energiju koja se istitrava u prostoriji 80ms nakon pobude (50ms za govor).

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad \text{dB} \qquad C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad \text{dB}$$

Ne postoje usaglašeni kriteriji veze ovih parametara i akustičke kvalitete prostorije. Marshall je predložio da se za glazbu izvrši procjena srednje vrijednosti C80 u tri oktavna pojasa (500Hz, 1kHz i 2kHz), a da se za ocjenu kvalitete prijenosa govora C50 odredi sumiranjem vrijednosti za 4 oktavna pojasa (500Hz, 1kHz, 2kHz i 4kHz) s težinskim faktorima (0.15, 0.25, 0.35 i 0.25).



Definiranost se označava s D50 (u postocima) a predstavlja omjer energije u prvih 50ms pobude o odnosu na ukupnu energiju koja se istitrava u prostoriji. (eng. early to total index, or definition).

$$D_{50} = 100 \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\%)$$

Mjerne metode za procjenu razumljivosti govora

MTF- prijenos modulacije govora

MTF (modulation transfer function) je tehnika za teorijsku procjenu akustičke razumljivosti. Ona se temelji na činjenici da reflektirajuće polje i šum utječu na oblik odziva zvučnog vala. Ti efekti se očituju kao redukcija modulacije.

U MTF tehnici amplitudno se modulira akustički signal na frekvencijama koje odgovaraju modulacijskim frekvencijama normalnoga govora (0.5Hz do 12Hz). Kada amplitudno modulirani signal govora prođe kroz zvučnik i kroz zatvorenu prostoriju, šum i reflektirajuće polje utječu na njega tako da reduciraju modulaciju. MTF se uvodi kao mjera modulacijskog gubitka koja se očituje prolaskom signala kroz zvučnik i kroz zatvorenu prostoriju. Maksimalna i idealna vrijednost MTF bila bi jedinica, a to je u slučaju kada nema reflektirajućeg polja i šuma.

Ipak, za približne proračune može se koristiti formula koja je izvedena za slučaj da je polje u prostoriji homogeno i da se slušatelj nalazi u dominantno odječnom polju. Dakle vrijedi za udaljenosti koje su veće od radijusa razumljivosti. U ovoj formuli je utjecaj šuma opisan omjerom S/N (u dB).

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F \frac{T}{13,8})^2}} * \frac{1}{1 + 10^{\frac{S/N}{10}}}$$

MTF tehnika je sama po sebi nedovoljna za ocjenu razumljivosti jer nije utvrđena točna korelacija sa subjektivnim testovima. Međutim, to je napravljeno u ocjeni STI (speech transmission index) koju ćemo opisati u sljedećem odjeljku.

STI i RASTI

STI -**Speech transmission index** je veličina kojom se opisuje kako odječni ambijent mijenja modulaciju govora. U metodi se provodi ispitivanje kako se mijenja dubina modulacije amplitudno moduliranog signala. Houtgast i Steeneken su pronašli da se modulacija prirodnog govora vrši frekvencijama raspona 0.5 do 12.5 Hz.

Osnova dobre akustičke razumljivosti je da govorni signal prolazeći kroz akustički prostor zadrži svoju modulacijsku karakteristiku. Upravo ta sposobnost očuvanja modulacijske karakteristike je i ujedno pokazatelj prikladnosti prostorije za ozvučenjem. Međutim, odječno polje i šum imaju utjecaj na modulaciju tako da je smanjuju. Budući da se STI metodom koriste modulacijske frekvencije manje od 12.5Hz, može se pokazati da rane refleksije unutar određenog vremena ne smanjuju STI, nego suprotno u prisutnosti odječnog polja, povećanjem razine ranih refleksija povećaje se i STI odnosno povećaje se razumljivost. Modulacijske frekvencije su u intervalima od 1/3 oktave i kreću se od 0.63Hz do 12.5 Hz. Ovih 14 modulacijskih frekvencija koriste se radi modulacije zvučničkog odziva u sedam oktavnih područja od 125Hz do 8kHz.

Za proračun STI koristi se modulacijski indeks MTF dan kao omjer modulacije signala u prostoriji i modulacije signala koji se dovodi u prostoriju. STI se računa sumiranjem i traženjem prosjeka MTF za 14 modulacijskih frekvencija pri 7 oktavnih područja. Specijalni slučaj STI je RASTI (rapid speech transmision indeks) koji koristi 9 modulacijskih frekvencija (0.7Hz, 1Hz, 1.4Hz, 2Hz, 2.8Hz, 4Hz, 5.6Hz, 8Hz, 11.2Hz) pri samo 2 oktavna područja (500Hz i 2kHz).

Postupak kako se procjenjuje STI je sljedeći:

1)Najprije se određuju vrijednosti MTF bilo mjerenjem MTF ili se procjenjuje pomoću formula ,zatim se vrijednostima m(F) daju težinski faktori :

$$X_i = 10 \log(\frac{m_i}{1 - m_i})$$

- 2)Vrijednost od Xi se ograničava: ako je Xi >15 uzima se Xi=15,
 ako je Xi < -15 uzima se Xi=-15,
- 3) Zatim se računa srednja vrijednost Xi po oktavnim pojasima.
- 4) Konačno se ukupni STI računa po formuli:

$$STI = (\frac{\overline{X} + 15}{30})$$

u koju se unosi srednja vrijednost od svake oktave. Uočimo da se vrijednost STI kreće unutar vrijednosti 0 i 1, jer su vrijednosti X ograničene od -15 do 15.

STI	ocjena razumljivosti	ekvivalentni %ALcons
0.0 < STI < 0.3	vrlo loša razumljivost	100 < %AL < 30
0.3 < STI < 0.45	slaba razumljivost.	30 < %AL < 15
0.45 < STI < 0.6	dovoljna razumljivosti	15 < %AL < 6.6
0.6 < STI < 0.75	dobra razumljivost	6.6 < %AL < 3
0.75 < STI < 1.00	izvrsna razumljivost	0 < %AL < 3

Usporedbom navedenih teorijskih jednadžbi sa stvarnim subjektivnim rezultatima, dobiva se točnost sa odstupanjem od što je dosta točnije od ALcons čija je odstupanje oko 10%. ALcons (articulation loss) je metoda procjene razumljivosti a temelji se na veličini postotka gubitka artikulacije konsonanata s obzirom na udaljenost od izvora.

METODE AKUSTIČKOG PROJEKTIRANJA

Kada se akustički projektira velika dvorana, potrebno se držati nekog redoslijeda i pravila. Ovdje ćemo prikazati J.Moir u knjizi High quality sound reproduction:

- 1) Prema arhitektovom pretprojektu i podacima izračuna se vrijeme odjeka na recimo, šest frekvencija između 80 i 4 000 Hz.
- 2) S obzirom na svrhu dvorane prilagodi se vrijeme odjeka na optimum, kako po apsolutnoj vrijednosti tako i po frekvencijskoj karakteristici. Gdje je auditorij promjenjiv faktor, treba vrijeme odjeka prilagoditi na optimum za $\frac{2}{3}$ slušatelja. Ako je u vezi s prilagođavanjem vremena odjeka potrebno dodavati akustičke materijale, oni se ne stavljaju na strop. Većina apsorpcijskih materijala, sjedala, sagovi, te slušaoci, koncentrirani su na podu, pa je tok zvučne energije između stropa i poda dovoljno prigušen i bez akustičke obrade stropa. Tok energije u vodoravnom smjeru između zidova samo je neznatno oslabljen. Ako je zbog korekcije vremena odjeka potrebno dodati apsorbere, oni se stavljaju na zidove, osobito na onaj nasuprot izvoru zvuka. Pri tome se apsorberi ne smiju koncentrirati na velike površine, već se na zidove nepravilno raspoređuju, i to tako da pojedina površina ne prevale 5% ukupne.
- 3) Izbjegavaju se konkavne (udubljene) površine.
- 4) Izbjegavaju se velike ravne plohe, naročito ako će se instalirati razglasni uređaji. Velike plohe valja razbiti u nepravilne likove. Pri tome se mora znati da su izbočenja u službi difuzora uspješna samo onda ako su im dimenzije približno jednake ili su veće od valne duljine. Na sreću važnost difuznosti opada ispod 500 ili 600 Hz ($\lambda \sim 60\text{cm}$). Da se stvori difuznost, najefikasniji su pravokutni stupovi i "koferi".
- 5) Lagana neparalelnost zidova poželjna je, osobito ako će se ugraditi razglasni uređaj. Zvučnici se ne mogu konstruirati da daju paralelan snop zvučnih zraka.
- 6) Oblikom zidova valja smanjiti mogućnost koncentrirane refleksije zvučne energije na površini sjedala sa zakašnjenjem većim od 50ms.
- 7) Izbjegavaju se nagle promjene presjeka dvorane. Luk iznad proscenija koji je možda potreban u kazalištima, prenesen je i u kinematografe, gdje je nepotreban. U oba ta primjera suženje prostora na mjestu proscenija(prednjeg dijela pozornice) loša je praksa.
- 8) Troškovi za građenje i površina koju treba akustički obraditi smanjuju se ako se volumen dvorane strogo nadzire. Za kina i kazališta potrebno je odrediti 4 - 5 m³ po sjedalu, a za koncertne dvorane oko 7 m³ jer je tu vrijeme odjeka dulje, što zahtijeva "živa glazba".
- 9) Treba se nadati najboljem!

Akustičko projektiranje velike dvorane vrlo je kompleksan problem jer treba omogućiti dobro slušanje na svim sjedalima. Ne smije se zaboraviti da i muzičarima treba osigurati dobro slušanje; pojedini izvođači mogu svirati u savršenoj sinkronizaciji samo onda ako jedan drugoga dobro čuju. Da se izbjegnju grube pogreške i kasniji skupi popravci, primjenjuju se već prilikom projektiranja razne metode koje omogućavaju da se unaprijed zna kakva će biti raspodjela zvuka po prostoriji, odnosno kakva će osnovne akustičke osobine imati dvorana.

Danas se najviše primjenjuju metode simulacija u kojima kompjuterski se analizaju akustični parametri nekog prostora s obzirom na njegov volumen, oblik i primjenjene materijale.

Danas se koriste software programi u koje se ubaci 3d model kao što su EASE, ODEON itd.

Metode simulacije širenja zvučnih valova

Metode simulacije se mogu podijeliti u dvije temeljne skupine:

1) Numeričke metode – temelje se na numeričkom rješavanju akustičke valne jednačbe. Tu spadaju metoda konačnih elemenata , metoda graničnih elemenata i metoda konačnih razlika (eng. finite difference method - FDM).

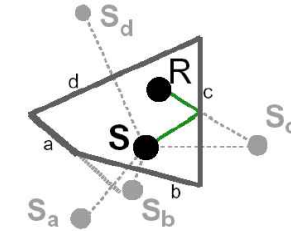
2) Geometrijske metode – koriste pravila geometrijske akustike. Temelje se na aproksimaciji, da je frekvencija zvučnog vala visoka u odnosu na dimenzije prostora u kojem se širi, te da se stoga putanja širenja vala zvuka određuje geometrijskim metodama. U ovu grupu spadaju metoda virtualnih izvora, metoda praćenja zraka, te metode praćenja snopova.

Metoda virtualnih izvora

Metoda virtualnih izvora se često koristi u akustičkim simulacijama za proračun impulsnog odziva prostorije. Ova metoda je izuzetno točna, puno točnija od metode praćenja zraka, a za analizu ranih (bliskih) refleksija je i njena učinkovitost zadovoljavajuća.

Kod ove metode, refleksije se računaju stvaranjem virtualnih, zrcalnih slika izvora. Da bi dobili virtualnu sliku izvora S, zrcalimo ga oko stranice čija je normala n_i , a udaljenost od stranice i iznosi d_i . Na taj način se dobije virtualni izvor S_i . Postupak je opisan sa slijedećim izrazom:

$$S_i = S + 2d_i n_i$$



Putanja reflektiranog zvuka računa se tako da se prvo nađe točka refleksije. Povučemo se linija od prijemnika R do virtualnog izvora S_i te se nađe presjecište sa stranicom i . To presjecište predstavlja točku refleksije. Putanja zvuka se zatim konstruira tako da se povuče linija od izvora S do točke refleksije, te zatim od točke refleksije do prijemnika R.

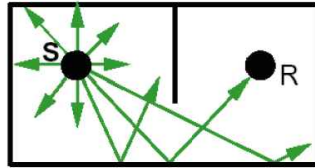
Najvažnija prednost ove metode je njena točnost i potpunost. Pomoću ove metode se mogu pronaći sve putanje zvuka, jer ona ispituje sve kombinacije mogućih putanja zvuka, odnosno refleksija. Međutim, upravo zbog provjeravanja svih kombinacija, složenost algoritma iznosi $O(n^2)$, gdje je n - broj stranica ploha od kojih se zvuk reflektira, a r - najviši red refleksija koje se uzimaju u obzir.

Zbog složenih testova vidljivosti i ispravnosti, te zbog eksponencijalnog rasta broja refleksija viših redova, metoda virtualnih izvora upotrebljiva je samo za proračun ranih refleksija, što u praksi znači do refleksija trećeg reda. Međutim njena točnost, te karakteristika da ne podliježe "aliasingu" kao kod praćenja zraka, održali su je u praksi, te se danas koristi u hibridnim sustavima. Često se kombinira s metodom praćenja zraka, gdje se početni dio impulsnog odziva računa metodom virtualnih izvora, a kasniji dio odziva se računa metodom praćenja zraka. Kako su rane refleksije najvažnije za akustički dojam i proračun parametara prostora, metodom virtualnih izvora osigurava se njihov točan i potpun proračun, a metodom praćenja zraka se ubrzava proračun kasnijeg dijela impulsnog odziva.

Mana ove metode je također što računa samo zrcalne refleksije, dok je za proračun difuznih refleksija potrebno upotrijebiti neku dodatnu metodu. Metoda također u obzir ne uzima refrakciju, što je čini nepogodnom za simuliranje širenja zvučnog vala u nehomogenim prostorima.

Metoda praćenja zraka

Metoda praćenja zraka se po raširenosti može usporediti sa metodom virtualnih izvora. U svijetu kompjuterske grafike, ova metoda je najčešće korištena metoda u praksi. U kompjuterskoj grafici postupak praćenja zraka je obrnut od onog u akustici - kod kompjuterske grafike zrake se prate od očista do objekta. **Princip metode praćenja zraka** u akustici prikazan je na slici ispod.



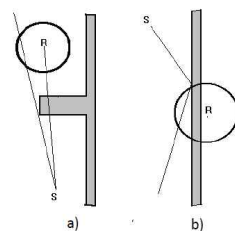
U prostor oko izvora S odašilju se zrake, na način da je kut između dviju zraka konstantan. Što je kut manji, broj zraka će biti veći. Time se povećava točnost simulacije, ali i usporava vrijeme proračuna. Nakon generiranja, svaka se zraka zasebno prati, na način da se ispituje nalazi li se na njezinom putu kakva prepreka. Kada zraka naiđe na prepreku, ona se reflektira, te se nastavlja njeno praćenje. Trajanje praćenja zrake se obično ograničava na jedan od slijedećih načina:

- prekida se nakon što je dostignut najveći dozvoljeni broj refleksija
- prekida se kada ukupna atenuacija postane veća od kritične – znači da doprinos ukupnoj energiji postaje zanemariv, pa više nije potrebno računati.
- prekida se kada duljina zrake (ili vrijeme potrebno da zvuk pređe putanju zrake) postane veća od maksimalne dozvoljene

Kako bi se izračunala razina energije na mjestu prijemnika, potrebno je koristiti kuglasti detektor, a ne točkasti. Naime, kako je kutna gustoća zraka oko izvora konačna pomoću točkastog detektora ne bi mogli detektirati niti jednu zraku. Zato se za pronalaženje zraka koje dolaze do prijemnika, koristi kuglasti detektor, konačnog radijusa. Ukoliko zraka dotakne, odnosno dijelom prođe, kroz takav sferni detektor, smatra se da je došla do izvora, te se detektira.

Metoda praćenja zraka je izuzetno jednostavna za računalnu implementaciju. Prilikom implementacije na računalu potrebno je realizirati samo nekoliko jednostavnih geometrijskih operacija. Proračun refleksija višeg reda ne usložnjuje proračun kao kod metode virtualnih izvora. Pomoću ove metode se osim refleksija mogu računati i druge valne pojave – refrakcija i difrakcija. Izračun difuznih refleksija nije moguće obavljati izravno, već se implementiraju hibridne metode, poput metode razmjene zračenja (engl. radiosity). Osim brzine, te većeg broja valnih fenomena, ova metoda ima prednost i u tome što se dobro mogu simulirati i modeli sa zakrivljenim površinama i s velikim brojem reflektivnih ploha, za razliku od metode virtualnih izvora.

Osim prije navedenih prednosti ova metoda ima i nekoliko nedostataka. S obzirom da se za detekciju zraka koristi sferni detektor, kod metode praćenja zraka pojavljuje se problem **"aliasinga"**. Pod ovim imenom podrazumijeva se pojava višestrukih, lažnih detekcija zraka sa sfernim detektorom.

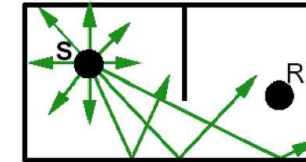


Pojava *aliasinga* kod metode praćenja zraka
a) dvostruka detekcija
b) neispravna detekcija

Na slici **a)** vidi se da ne postoji vidljivost između prijemnika R i izvora S. Zraka koja od izvora ide izravno prema prijemniku R naići će na prepreku i neće biti detektirana. Međutim, druga zraka, prolazi točno uz prepreku, te je prepreka ne zaustavlja. Kako se sferni detektor prijemnika nalazi blizu izvora, njegov radijus je dovoljno velik da obuhvati ovu zraku, te detektira prijam. Na taj se način, iako ne postoji vidljivost između prijemnika i izvora, detektira dolazak izravnog zvuka, što predstavlja grešku "aliasinga".

Na slici **b)** još je teži oblik greške, jer se prijemnik opće ne nalazi u istom prostoru kao izvor. No, zbog svog radijusa, kugla detekcije prijemnika, prolazi kroz zid i neispravno detektira prijam zrake.

Problem "aliasinga" donekle se može ublažiti smanjivanjem radijusa sfernog detektora, ali samo do neke granice – naime ukoliko je detektor premali, postoji vjerojatnost da i neke ispravne detekcije neće biti registrirane. Upravo ova pojava je druga mana metode praćenja zraka, a po svojoj prirodi suprotna je "aliasingu". Ona nastaje uglavnom kod refleksija višeg reda. Naime, zrake koje su se u početku gusto širile oko izvora, svojim prolaskom kroz prostor divergiraju, te kod viših refleksija postaju tako razmaknute, da je radijus sfernog detektora premali da pokrije prostor između dvije susjedne zrake.

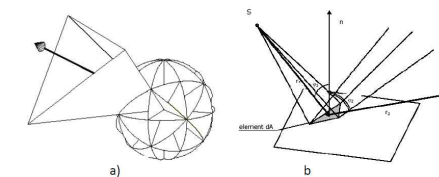


Na slici poviše vidi se da iako se prijemnik R nalazi u području gdje postoji prva refleksija, zbog razmaka između zraka, niti jedna zraka prve refleksije neće biti detektirana. Na taj način neke potpuno ispravne refleksije ostaju nedetektirane.

U praksi se ova metoda često koristi zbog svoje brzine i jednostavnosti. Međutim, na području akustike, često se nadopunjuje s metodom virtualnih izvora za proračun ranih refleksija (kako bi se izbjegao "aliasing"), te statističkim metodama za proračun kasnog dijela impulsnog odziva (kako bi se nadomjestile nedetektirane kasne refleksije).

Metoda praćenja snopova

Metoda praćenja snopova počela se razvijati kasnije od metode virtualnih izvora i metode praćenja zraka. Ova metoda radi na sljedeći način: prostor oko izvora podjeli se na konačni broj snopova (slično kao kod metode praćenja zraka) u obliku stožaca ili piramida.



Metoda praćenja snopova
a) podjela prostora oko izvora na snopove
b) refleksija snopa od prepreke

Zatim se prati širenje snopova kroz prostor, a kada snop naiđe na prepreku, računa se njegova refleksija. Dok traje praćenje snopova, obavlja se detekcija prijema snopa i to s točkastim detektorom. Za razliku od praćenja zraka, koje su beskonačno tanke, te kod kojih je potreban detektor određenog volumena (kugla), kod ove metode, pošto snopovi imaju konačni volumen, kao detektor se koristi točka. Ukoliko dođe do detekcije, pomoću snopa se računa vrijeme i akustički intenzitet vala koji dolazi do prijemnika, te se on dodaje impulsnom odzivu.

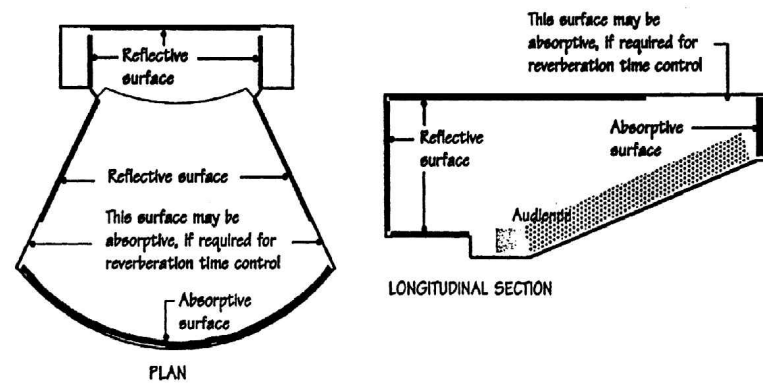
Kako metoda praćenja snopova koristi točkasti detektor, a snopovima je ispunjeno cijelo područje oko izvora, kod nje ne dolazi do problema "aliasinga" i propuštenih zraka. Naime, prostor oko izvora zvuka je u cijelosti pokriven snopovima, pa na taj način ne postoji mogućnost da se, bilo prije, bilo poslije refleksije, detektor nađe u kakvoj "rupi", odnosno nepokrivenom području. Stoga, ne može doći do propuštenih putanja zvuka, kao kod metode praćenja zraka. S druge strane, ne postoji opasnost ni od "aliasinga", zato jer se za detekciju koristi točkasti detektor. Kod metode praćenja zraka se kao detektor koristi kugla, koja ima svoj volumen, pa se može dogoditi da kroz nju prođe više zraka reflektiranih od istog poligona – što je greška. Kada se kao detektor koristi točka, kao kod metode praćenja snopova, ne može se dogoditi da zbog veličine detektora dođe do neispravne detekcije više putanja zvuka. Zbog ovoga se kaže da je metoda praćenja snopova prostorno koherentna.

Ova metoda je bolja i od metode virtualnih izvora, zato jer zadržava njenu glavnu prednost (točnost i potpunost detekcije zvučnog vala – ispravan početni radni dio impulsnog odziva), a nema problem neučinkovitosti kod refleksija višeg reda. Kod metode virtualnih izvora vrijeme proračuna raste eksponencijalno sa složenosti geometrije, jer se u razmatranje moraju uzeti sve plohe, kako bi se provjerila valjanost svih mogućih virtualnih izvora. Nasuprot tome, kod metode praćenja snopova, određuju se potencijalno vidljive reflektivne plohe, te se zatim samo one uzimaju u obzir za proračun. Na taj način moguće je efikasno raditi s globalno izuzetno složenim geometrijama, jer na brzinu proračuna utiče samo lokalna složenost.

Dakle, vidljivo je da metoda praćenja snopova spaja točnost i potpunost metode virtualnih izvora, sa brzinom bliskoj metodi praćenja zraka.

AKUSTIČKA OBRADA

Kod projektiranja neke prostorije na njezina akustička svojstva utječe njen oblik, volumen, broj korisnika, no i vrijeme odjeka te korišteni materijali. Na neke parametre možemo utjecati akustičkom obradom uvodeći nove elemente koji poboljšavaju određena akustička svojstva ili smanjuju negativan utjecaj jakih refleksija, jeke i neravnomjerne raspodjele zvučne energije. Takva obrada omogućuje određenu manipulaciju na način da izborom materijala i njihovim rasporedom promijenimo osnovne prostorne akustičke osobine.

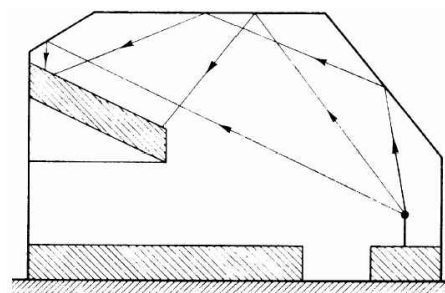


Raspored akustičke obrade

Glavni elementi akustičke obrade unutrašnjosti prostorija su **reflektori**, **apsorberi** i **difuzori zvuka**. Zadatak akustičara je proračunati optimalnu količinu i razmještaj tih elemenata u prostoriji u ovisnosti o njezinoj namjeni. U praksi se često pojavljuju zahtjevi za promjenjivim akustičkim značajkama prostorija. One se postižu elementima promjenjive akustike koji u većem rasponu mogu mijenjati svoj koeficijent zvukoupojnosti i/ili difuzije. Tipična primjena elemenata promjenjive akustike je brza prenamjena tzv. multifunkcijskih dvorana.

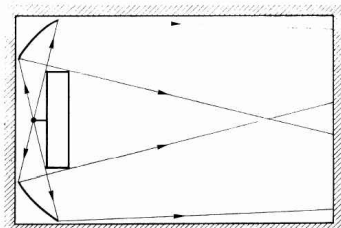
5.1 REFLEKTORI ZVUKA

Zvuk se na stražnjim sjedalima može pojačati tako da se neposredno uz izvor stavi posebna reflektorska ploha. Primjer je takvog reflektora na slici ispod. Bez njega ne samo da bi zvuk koji strmo odlazi prema stropu bio neiskorišten, već bi postao i štetan. Da bi se iskoristio i zvuk koji dolazi na stražnju stranu iznad balkona, ta je stijena djelomično nagnuta, i time također iskorištena kao reflektor za sjedala na balkonu.



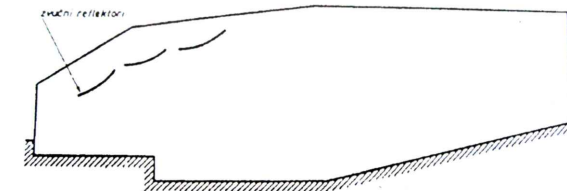
Prednjem i stražnjem dijelu stropa treba dati takav nagib da se zvuk reflektira prema slušateljima

Reflektori mogu vrlo dobro djelovati ako su smješteni bočno kao na slici dolje. Svaki od njih pri tome odbija zvuk u svoju polovicu dvorane i tako pridonosi da se poveća glasnoća.



Bočni reflektori usmjeruju zvuk prema slušateljima

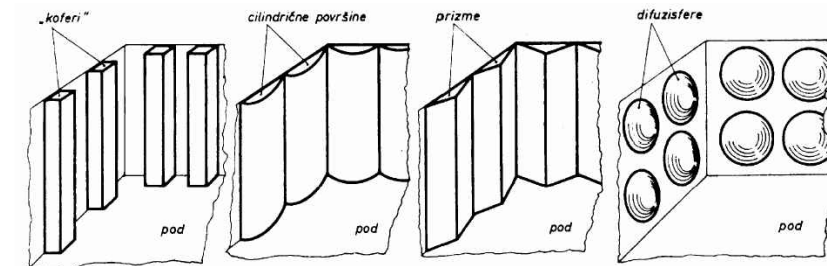
I u koncertnim dvoranama potrebni su reflektori. Budući da je njihov strop relativno visok, reflektori su obješeni iznad orkestra. Zadatak im je da pridonese pravilnoj raspodjeli zvuka po dvorani.



Obješeni reflektori iznad orkestra u velikim koncertnim dvoranama

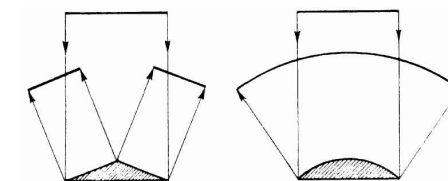
5.2 DIFUZORI ZVUKA

Kad se projektiraju koncertne dvorane i glazbeni studiji, nastoji se postići raspršenje, dakle difuzija zvuka. Veća difuzija omogućuje bolju jednolikost raspodjele zvuka u prostoriji.



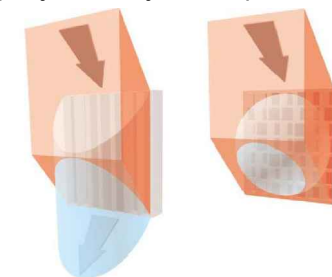
Različite vrste raspršivača zvučnih valova ili difuzora

Dva su načina kojima se povećava difuzija zvuka u prostoriji kojoj je već dan temeljni oblik. Prvi je postavljanje apsorpcijskih materijala, uglavnom na bočne zidove jer strop mora ostati reflektor. Veličina je dopustive apsorpcijske površine ograničena jer prostorija mora imati određeni odjek. Stoga se češće primjenjuje drugi način prema kojemu se zidovima da nepravilan oblik ili se one naprave konveksne. Danas se za te svrhe najviše upotrebljavaju prizmatične ili polucilindrične površine, a katkada i sferne. Cilindrična je površina u prednosti pred prizmatičnom jer daje difuzniju refleksiju. To pogotovo vrijedi za sfernu površinu koja raspršuje zvuk u svim smjerovima. Efikasnost tih površina ovisi o odnosu njihovih dimenzija prema valnoj duljini zvuka. Da bi djelovanje bilo više-manje jednoliko u cijelome frekvencijskom području, treba da su prizme, policilindri, odnosno "koferi" i "difuzisfere" različitih dimenzija.



Promjena oblika čela zvučnog vala nakon reflektiranja od prizmatičnog (lijevo) i cilindričnog (desno) difuzora

Pomoću opisanih metoda nije moguće postići potpunu difuznost zvučnog polja. To se i ne zahtijeva jer slušatelji godi kada može odrediti smjer zvučnog izvora. Zvučno polje treba da ima "**živost**" (engl. *liveness*) koja ne smije biti ni prevelika ni premalena.



Primjer dvije različite vrste difuzora i raspršivanja zvuka koji je rezultat odbijanja zvučnih zraka o njihovu površinu

5.3 APSORBERI

Sve plohe, svi materijali i predmeti u nekoj prostoriji apsorbiraju zvuk. Kad se govori o **apsorpcijskim materijalima** ili o **apsorpcijskim konstrukcijama**, misli se na one kojima je osnovni zadatak da svojim akustičkim svojstvima proizvedu kontroliranu apsorpciju.

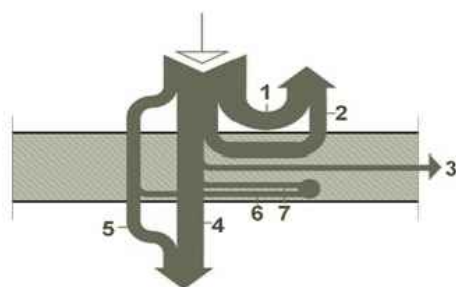
Svrha je takvih akustičkih materijala i elemenata u praksi da:

- 1) skrate vrijeme odjeka,
- 2) otklone pojavu jeke
- 3) priguše buku

Zvuk se u nekom materijalu apsorbira na taj način što se pretvori u drugi oblik energije i, konačno, u toplinu. Kad zvučni val udari u neku plohu, jedan se dio zvučne energije reflektira, a ostatak se apsorbira i propusti (slika ispod).

Pod koeficijentom refleksije r razumijeva se odnos amplitude tlaka reflektiranog vala prema amplitudi tlaka upadnog vala. Koeficijent apsorpcije α definiran je odnosom apsorbirane prema upadnoj zvučnoj energiji. Kako je zvučna energija razmjerna kvadratu amplitude tlaka, za koeficijent apsorpcije vrijedi:

$$\alpha = 1 - r^2$$



- 1 - dio energije zvučnog vala koji se reflektira nazad u prostoriju
- 2 - dio energije vibriranja pregrade vraća se natrag u istu prostoriju
- 3 - manji dio širi se uzduž pregrade
- 4 - preostalu energiju zrači pregradna stijena u prijemnu prostoriju
- 5 - ako je element porozan, dio zvučne energije prelazi u prijemnu prostoriju zračnim putem kroz pore
- 6 i 7 - dio energije zvuka uvijek se pretvori u toplinu

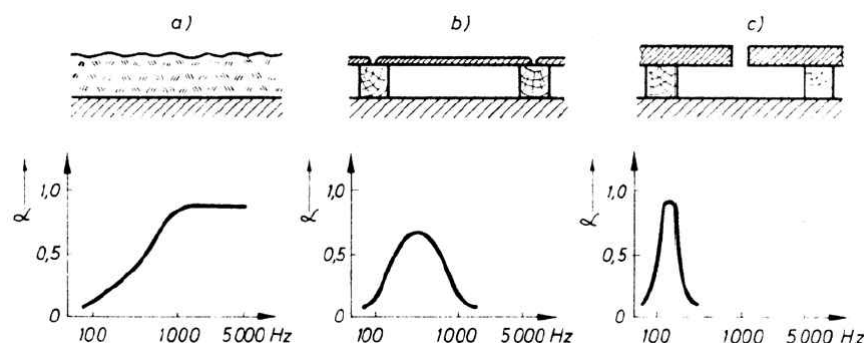
Raspodjela energije zvučnog vala koji udari u građevinski element

Koeficijent apsorpcije ovisi o kutu upada zvučnog vala. Ta se poteškoća uklanja time što se računa sa "statističkim" koeficijentom apsorpcije, koji vrijedi kao srednja vrijednost za statistički raspodijeljene kutove upada. Time koeficijent apsorpcije postaje konstanta određenog akustičkog materijala.

Bolje nego pomoću koeficijenta apsorpcije mogu se akustičke osobine apsorpcijskih materijala opisati akustičkom impedancijom. Ona je definirana kompleksnim odnosom zvučnog tlaka i odgovarajuće titrajne brzine čestica na površini materijala. No matematička obrada problema u akustici prostorija uz pomoć akustičke impedancije vrlo je složena pa za normalnu praksu nije prihvatljiva.

U praktičnoj graditeljskoj akustici susreću se tri vrste apsorpcijskih materijala i elemenata:

- a) porozni
- b) membranski
- c) rezonatorski



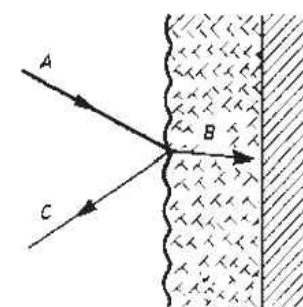
a) Porozni apsorberi

Tipični **porozni apsorpcijski materijali** su tekstilni produkti od vune, pamuka i svile, izrađevine od biljnih niti (koks, juta i dr.), mineralna vuna, strugotine od drveta, staklena vuna itd. U njima se zvuk apsorbira na taj način što on potakne zrak u porama na titranje pa se trenjem zraka o stijenke pora zvučna energija „poništava“, tj. pretvara u toplinu. Ona se u porama troši i zbog razmijene topline stijenki materijala i ugrijanog komprimiranog ili ohlađenoga razrijeđenog zraka.

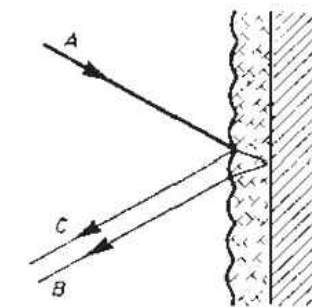
Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisi o:

- 1) debljini sloja
- 1) frekvenciji
- 2) otporu strujanju
- 3) poroznosti
- 4) faktoru strukture.

U debljem poroznom sloju apsorbira se cijela zvučna energija koja prođe u sloj te se pretvara u toplinu, pa je koeficijent određen samo reflektiranim dijelom. Ako je sloj tanak, jedan se dio zvučne energije, koji prođe kroz sloj, reflektira od tvrde stijene pa je koeficijent apsorpcije manji.



U debelom sloju poroznog apsorbera cijela se zvučna energija koja prođe u sloj apsorbira, pretvori u toplinu



Kroz tanak porozni sloj zvučni valovi prodiru do stijene i od nje se odbijaju

Porozni sloj ne mora po cijeloj svojoj debljini biti homogen. Ako se postavi na stanovitom razmaku ispred tvrde stijene, prednost mu je u tome što jače apsorbira niže frekvencije. No, bez obzira na to koeficijent apsorpcije poroznih materijala na niskim frekvencijama je malen. Razlog tome je u odnosu valnih duljina prema dimenzijama pora.

Vješanjem o strop kratkih zastora širine od 30 do 40 cm, s međurazmakom od 30 do 50 cm, postiže se velika apsorpcija u prostoriji. Takav je postupak naročito pogodan u prostorijama sa staklenim stropom jer zastori ne smetaju ulasku svjetlosti.

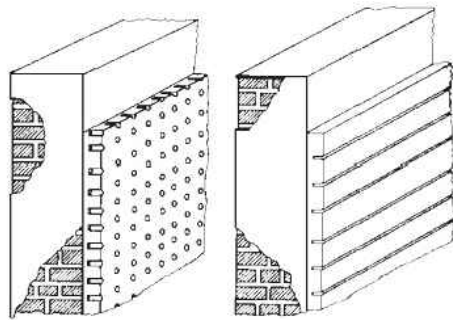
Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisan je o otporu strujanju. Tako se maksimalni koeficijent apsorpcije od 0,8 dobiva pri otporu strujanju od 104 m⁻³ kg s⁻¹. Takav otpor strujanju ima vrlo rastresit sloj od vlaknaca. Koeficijent apsorpcije tvrdo tlačene ploče od drvenih vlaknaca 1 cm debele, najveći je pri otporu strujanju od 106 m⁻³ kg s⁻¹ i iznosi manje od 0,1.

Sagovi su tipični materijali s velikom apsorpcijom u području srednjih i visokih frekvencija. Najčešće im je otpor strujanju optimalan, tako da imaju maksimalan koeficijent apsorpcije.

Kao što smo napomenuli prije, koeficijent apsorpcije dosta ovisi i o poroznosti materijala. Poroznost je definirana odnosom volumena zraka u porama i ukupnog volumena. Ta dva čimbenika, otpor strujanju i poroznost, nisu dovoljna da se karakterizira neki porozni materijal. Kanali u materijalu mogu teći u raznim smjerovima i mogu završavati slijepo, a to nije obuhvaćeno ni poroznošću ni otporom strujanju. Te geometrijske osobine materijala utječu na višim frekvencijama, što se u račun unosi faktorom strukture. Tek uvođenjem tog faktora bilo je moguće objasniti veliko apsorpcijsko djelovanje tzv.

akustik-ploča. Ploče imaju rupe promjera većeg od 4mm, razmak između njih oko 15 mm, tako da na kvadratni metar dolazi više od 4 000 rupa. Izrađuju se i sa žljebovima, a materijal su drvena vlaknaca, azbest, vlaknaca od stakla itd.

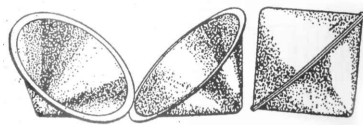
Akustik-ploče najrašireniji su akustički materijal, a upotrebljavaju se u školama, bolnicama, uredima, hotelima, svugdje gdje je potrebno prigušiti buku i smanjiti odjek bez specijalnih zahtjeva u pogledu oblika frekvencijske karakteristike odjeka.



AKUSTIK-PLOČE - lijevo s okruglim rupama, desno s urezanim brazdama

Velik utjecaj na koeficijent apsorpcije poroznih materijala može imati sloj boje koja se stavlja iz estetskih razloga. Osobito nepovoljno djeluje uljana boja. Ako je porozni materijal potrebno obojiti, valja to učiniti prskanjem mineralne boje koja se topi u vodi jer ona ne stvara homogeni sloj, već oboji samo rubove pora.

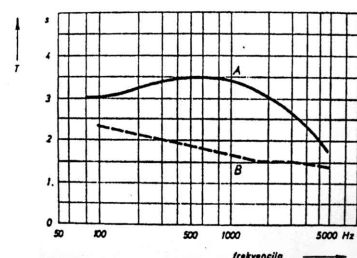
U prostorijama s visokim stropom, kao što su tvorničke hale ili velike radionice, mogu radi smanjenja buke vrlo uspješno poslužiti *ovjesni apsorberi*. Tada se ne mogu upotrijebiti apsorberi uobičajena tipa, ili bi njihova primjena bila neekonomična. Ovjesni apsorberi oblika su kutije građene npr. od dva čunja koji se osnovicama dodiruju. Posebna im je osobitost u tome što zbog difrakcije koeficijent apsorpcije veći od jedan. Povećamo li promjer konusnog apsorbera raste apsorpcija na nižim, a smanjuje se na višim frekvencijama.



Elementi čunjastog apsorbera (prva i druga slika) te čunjasti apsorber sastavljen (treća slika)

Osobe u prostoriji djeluju kao porozni apsorberi. Koeficijent apsorpcije po osobi, ovisi o tome na kakvim stolicama slušatelji sjede i kakav je njihov međusobni razmak. Ako slušatelji stoje, koeficijent je znatno niži.

Budući da je apsorpcija publike vrlo velika, vrijeme odjeka u koncertnim dvoranama praktički je potpuno određeno tom apsorpcijom. Tipičan primjer utjecaja publike na vrijeme odjeka prikazan je na dijagramu na slici dolje. Bez publike je vrijeme odjeka u području srednjih frekvencija više od dva puta dulje nego s publikom. Iz dijagrama se također vidi kako je tad frekvencijska karakteristika vremena odjeka bez publike nepovoljna, a s publikom poprima gotovo idealan tok.



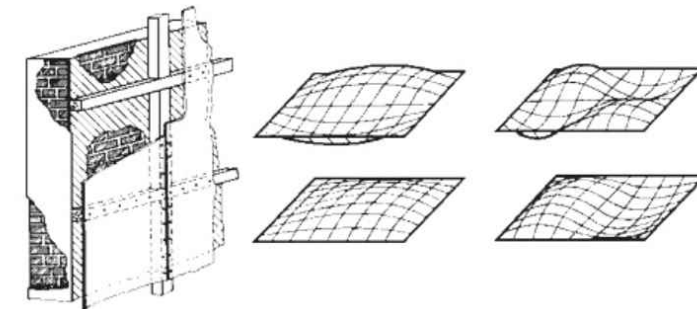
Frekvencijska karakteristika vremena odjeka u dvorani Musiksaal Stadt-Casino, Basel (1976)
A- bez publike
B- s publikom

Općenito se može reći da apsorpcija što je unose slušatelji raste do 2000 Hz, a iznad te frekvencije opada. Tapetirani stolci u usporedbi s netapetiranima povećavaju apsorpciju do oko 1000 Hz, a na višim frekvencijama nema bitne razlike.

Slušatelji u dvorani također utječu na slabljenje zvučnih valova koji se šire paralelno s auditorijem. Na frekvencijama višim od 1000Hz naglo opada zvučni tlak, i to već na mjestima sjedala prednjih redova. U vezi s apsorpcijom auditorija povoljno je da se sjedala postupno izdižu prema stražnjem dijelu dvorane, što je i vizualno bolje rješenje. No, pri tome što je auditorij više izložen zvučnim valovima, on više apsorbira zvuk. To, dalje, uzrokuje da se vrijeme odjeka jako skрати.

b) Membranski apsorberi

U praksi se membranski apsorberi izvedu kako je prikazano na slici dolje lijevo. Preko rešetke od letava pričvrsti se tanka ploča ili membrana od drveta, ljepenke, kože uljnog platna i sl. Apsorpcija nastaje tako da dio ploče koji pokriva pojedino polje rešetke pod djelovanjem zvučnih valova titra, na što se troši energija zvuka. Ploča može titrati na više načina (slika dolje desno).

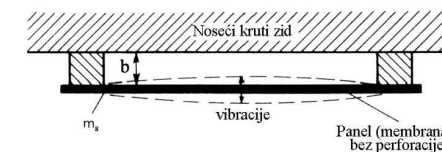


Primjer konstrukcije membranskog apsorbera i nekoliko načina titranja ploče

Najveća apsorpcija nastaje na osnovnoj rezonantnoj frekvenciji. Uz pretpostavku da je ploča dosta tanka i da se prema tome glavni dio elastične sile dobiva od zračnog jastuka koji je zatvoren iza ploče, osnovna rezonantna frekvencija izračuna se po formuli:

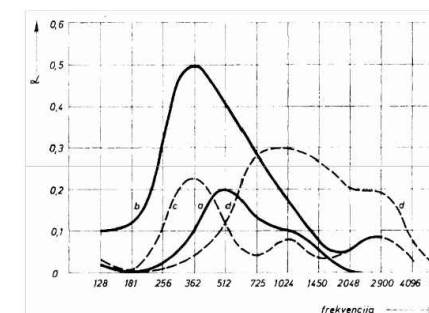
$$f_r = 600 \sqrt{\frac{1}{M \cdot d}} \text{ (Hz)}$$

Tu je M masa ploče u kg/m^2 , a d visina (debljina) zračnog jastuka u cm. Da bi se točnije izračunala rezonantna frekvencija, trebalo bi poznavati elastična svojstva ploče. Takav račun za praksu ne vrijedi jer elastičnost ploče mnogo ovisi o načinu učvršćivanja i o stupnju homogenosti materijala od kojeg je napravljena.



Koeficijent apsorpcije membranskih apsorbera može se znatno povećati stave li se porozni apsorpcijski materijali u prostor zračnog jastuka. Pritom nije potrebno ispuniti cijeli prostor, dovoljno je da se materijal stavi samo uz okvir. Mijenjanjem debljine ploče, debljine zračnog jastuka i načinom akustičke obrade prostora iza ploče, može se znatno utjecati na vrijednost koeficijenta apsorpcije zvuka.

Posebna je vrsta membranskih apsorbera tanka membrana, npr. od uljnog ili voštanog platna, ili kože napeta na drvenu rešetku. Tad je elastična sila titrajnog sistema određena jedino zatvorenim zrakom.



Na slici se vidi kako koeficijent apsorpcije membranskog apsorbera s voštanim platnom ovisi o debljini zračnog jastuka i o prigušivanju. Koeficijent apsorpcije kod višestrukog membranskog apsorbera od uljnog platna velik je u širokom polju niskih frekvencija. Tu je zračni jastuk prigušen samo na rubovima.

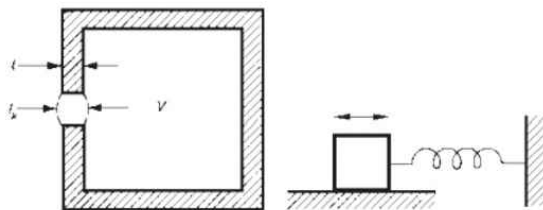
Ovisnost koeficijenta apsorpcije o frekvenciji kod membranskog apsorbera s uljnim platnom prikazana je na dijagramu:

- zračni jastuk od 5cm, neprigušen
- zračni jastuk od 5cm, prigušen
- zračni jastuk od 10cm, neprigušen
- zračni jastuk od 2cm, neprigušen

U građevinama i unutrašnjoj opremi prostorija ima mnoštvo **nehotičnih membranskih apsorbera**. Obješeni strop od gipsa, drvene obloge ili drveno opločenje, ormari, prozori, vrata itd., sve su to apsorberi koji povoljno djeluju na niskim frekvencijama jer smanjuju vrijeme odjeka. Poznat je neugodan osjećaj u podrumima, kupaonicama i sličnim prostorijama gdje apsorbera membranskog tipa nema, pa je vrijeme odjeka u niskom frekvencijskom području vrlo dugo.

c) Rezonatorski apsorberi

Za rezonatorske apsorbere upotrebljavaju se **akustički rezonatori**. To su kutije ili posude s otvorom kojima zrak u otvoru, grlu, predstavlja masu koja pod djelovanjem zvučnog tlaka titra, a volumen zraka u samoj kutiji ili posudi, služi kao opruga.



Najveća se apsorpcija postiže na rezonantnoj frekvenciji. Ona se može približno izračunati po formuli:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_k V}}$$

Tu je S presjek grla, c brzina širenja zvuka u zraku, V volumen kutije ili posude a l_k je korigirana duljina. Kako naime u titranju ne sudjeluje samo zrak koji je točno u grlu nego dijelom i onaj izvan tog otvora, efektivna je duljina grla veća. Ako duljinu grla označimo sa l , i ako je grlo kružnog promjera R , efektivna njezina vrijednost bit će:

$$l_k = l + 1,57R$$

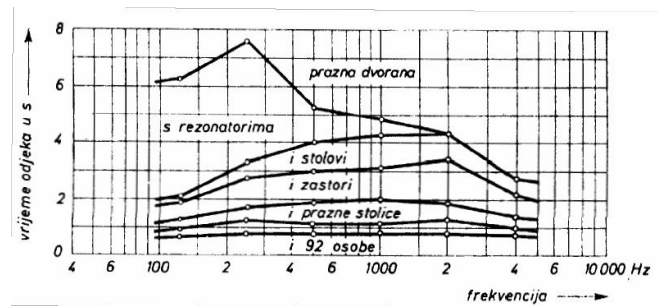
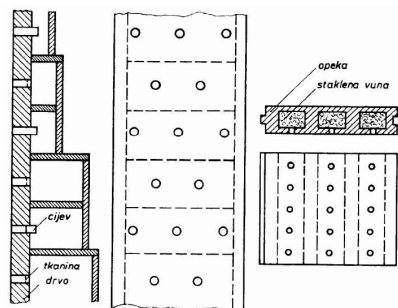
Ova formula dalje dovoljno točan rezultat uz uvjet da je valna duljina na rezonantnoj frekvenciji velika u odnosu prema svim trima dimenzijama kutije i da je grlo u usporedbi s kutijom maleno.

Prigušivanje će nastati dijelom zbog reradijacije zvučne energije, djelomično zbog trenja čestica zraka i stijenke grla, ali će utjecati i umjetno prigušenje koje se poduzima da bi se dobila željena vrijednost. Hotimično prigušivanje postiže se stavljajući porozan materijal u kutiju ili stavljajući mrežast materijal preko grla.

Akustički se rezonatori upotrebljavaju bilo kao **pojedinačni rezonatori**, razmješteni daleko jedan od drugoga da ne bi međusobno djelovali, bilo kao spojeni rezonatorski sistemi (**panelni rezonatori**), ili, konačno, kao **rezonatori s rasporom**, tj. takvi kojima je jedna dimenzija mnogo veća od valne duljine na rezonantnoj frekvenciji.

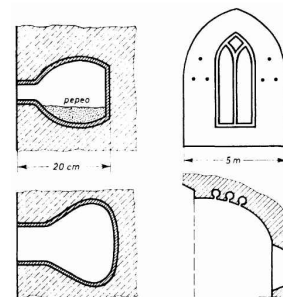
Pojedinačni rezonatori

Pojedinačni rezonatori moraju biti izrađeni od čvrsta materijala, npr. betona, kako bi prilikom titranja gubitci u stijenama bili što manji. Da se dobije velika apsorpcija, otpor trenja treba biti malen. Obično se ovim rezonatorima u kutiju ne stavlja ni porozni materijal ni mrežasti materijal preko grla.



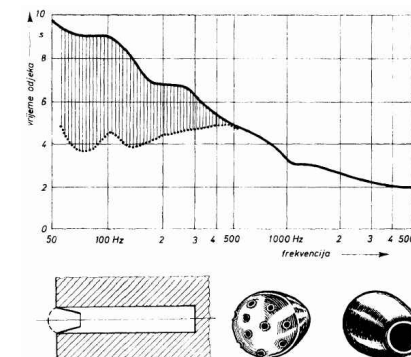
Rezonatori ovog tipa mogu uspješno poslužiti samo na frekvencijama otprilike do 300Hz. Prigušivanje zvučnih valova na uskom pojasu ovako niskih frekvencija dolazi u obzir u npr. velikim koncertnim dvoranama, gdje vrijeme odjeka na rezonantnim frekvencijama prostorije može i da bude nekoliko puta veće nego na ostalim frekvencijama.

Pojedinačni rezonatori mogu se uspješno upotrijebiti i za prigušivanje buke koju na pojedinačnim vrlo niskim frekvencijama stvara neki stroj.



U srednjovjekovnim skandinavskim crkvama upotrijebljeni su pojedinačni rezonatori. To su posude ugrađene u zid, katkad radi prigušivanja djelomično ispunjene pepelom.

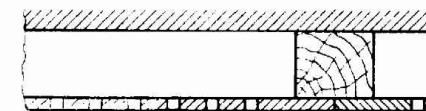
Slika desno: Posebnu pažnju zaslužuju rezonatori u srednjovjekovnoj crkvi u mjestu Pleterje, 15km od Novog Mesta u Sloveniji. U toj crkvi dvostruki rezonatorski sistemi sastoje se od posuda i rupa u zidu. Na strani okrenutoj prostoriji posuda ima rupe, a druga je strana potpuno otvorena. Takav dvostruki rezonator ima veliku apsorpciju u području od 80Hz do 250Hz. Na osnovi volumena prostorije, procijenjenog koeficijenta apsorpcije ploha, te oblika i smještaja zvučnih posuda proračunato je vrijeme odjeka kada su prisutni apsorberi i kada ih nema. Rezultat je na dijagramu, te kao što se uočava uz pomoć rezonatora se smanjuje vrijeme odjeka na niskim frekvencijama.



O zanimljivoj uporabi rezonatora piše Vitruvius u knjizi De Architectura. U starim grčkim i rimskim kazalištima bile su ispod sjedala smještene vaze od bronce otvorima okrenute prema orkestru. Vaze su bile ugođene na tonove glazbala. Prema Vitruviusu, svrha vaza bila je „da pojačaju i poljepšaju zvuk“. Danas se zna da su rezonatori bili postavljeni da bi proizvodili umjetni odjek (0,5 – 2 s). Kada je instrument prestao svirati ili pjevač pjevati, pobuđeni rezonator još je kratko vrijeme emitirao zvuk, čime je donekle nadoknađivao ono čega otvoren prostor nema.

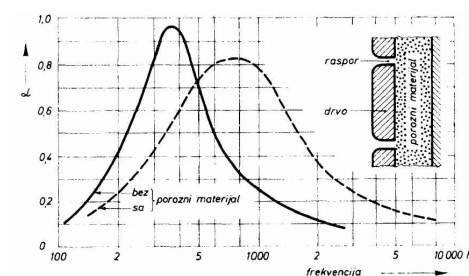
Panelni rezonatori (Spojeni rezonatorski sistemi)

Panelni rezonatori grade se najčešće tako da se čvrsta tanka panelna ploča s izbušenim okruglim ili duguljastim rupama učvrsti na stanovitoj udaljenosti od zida. Ako su rupe okrugle, obično im je promjer 3-5 mm, a međusobni razmak 10-15 mm. Rezonantnu frekvenciju takvog sistema određuje pojedini otvor kao grlo rezonatora s "pripadnim" volumenom iza ploče. Taj se volumen dobiva tako da se cijeli volumen prostora iza ploče podijeli sa brojem rupa.

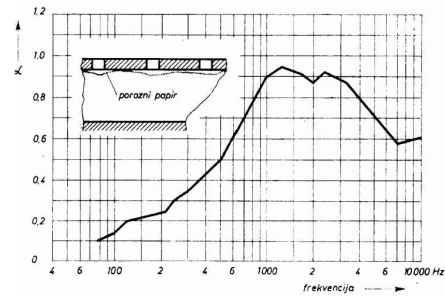


Prigušivanje spojenih rezonatorskih sistema, suprotno pojedinačnim rezonatorima, mora biti veliko. To se može postići na tri načina: stavljajući porozan materijal u prostor iza ploče, prekrivajući otvor vrlo poroznim materijalom ili tako da se rupe izvedu malog promjera.

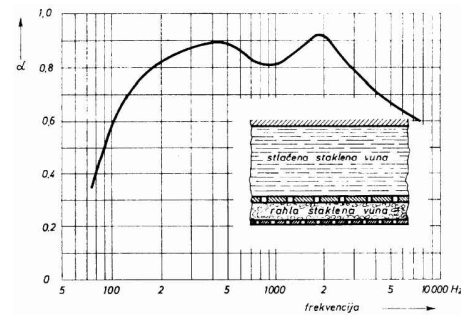
Pregrade iza ploče nisu potrebne. Ako se u taj prostor ne stavi porozni materijal, a žele se staviti pregrade, razmak između njih treba da je manji od četvrtine valne duljine na rezonantnoj frekvenciji. Uz porozni materijal iza ploče razmak između pregrada određuje potrebna mehanička čvrstoća.



Na slici vidimo dijagram koeficijent apsorpcije jednog panelnog rezonatora s duguljastim rupama. Razmak između ploče i zida je 5cm. Puna krivulja odnosi se na rezonator bez porozna materijala, a crtkana na onaj koji je njime ispunjen. Doda li se taj materijal, koeficijent apsorpcije se smanji i krivulja je šira. I rezonantna se frekvencija pomakne naviše jer se efektivni volumen smanji. Poroznim se materijalom ne mora ispuniti cijeli volumen rezonatora. Ispuni li se on djelomično, valja porozni materijal prisloniti na rupe jer je na njihovu izlazu titrajna brzina zračnih čestica najveća.



Visok koeficijent apsorpcije postiže se i pomoću jeftinijeg materijala nego što je porozni u debelom sloju. Često se koristi panelni rezonator s poroznim papirom iza rupa. Na slici vidimo takav rezonator, panelni koji je prigušen samo poroznim papirom nalijepljenim izravno na stražnju stranu ploče te frekventijsku karakteristiku njegova koeficijenta apsorpcije.

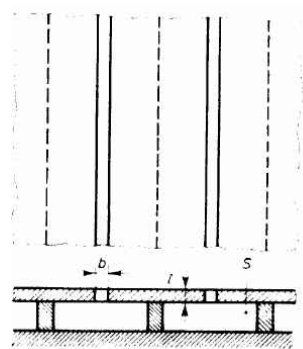


Panelni rezonatori s jednom pločom imaju najveću apsorpciju na jednoj frekvenciji. Stavljajući dva sistema izravno jedan na drugi, kao što vidimo na slici, dobivaju se dvije rezonantne frekvencije i mnogo širi pojas frekvencija na kojima je koeficijent apsorpcije velik.

Slično visećim poroznim apsorberima mogu se i panelni apsorberi izvesti takva oblika da im je koeficijent apsorpcije veći od 1. To su piramide ili čunjevi građeni od ljepenke, šperploče, lesonita ili lima, osnovicom pričvršćeni o strop. Iza rupa se, zbog jeftinoće, obično stavlja porozni papir. Takvim apsorberima treba pokriti jednu šestinu do jednu trećinu stropa. Prednost im je što su jeftini, lako se postavljaju i lako uklanjaju.

Rezonatori s rasporom

Ovoj vrsti rezonatora, suprotno onima koje smo dosad razmatrali, jedna je dimenzija mnogo veća od valne duljine na rezonantnoj frekvenciji. Prednost im je u tome što su jednostavne konstrukcije i može im se dati lijep vanjski izgled.



Konstrukcija rezonatora s rasporom

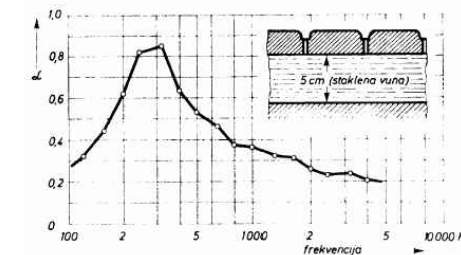
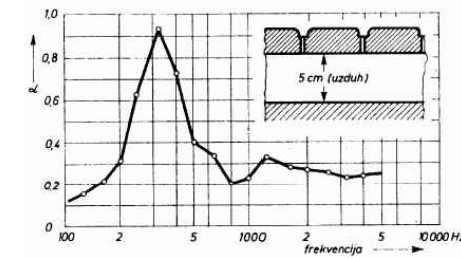
Rezonantna frekvencija izračunava se po formuli:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{l + \frac{2b}{\pi} \left(1.12 + \ln \frac{c}{bf_r \pi} \right) S}}$$

Gdje je c brzina širenja zvuka, b širina raspora, l dubina raspora (debljina panelne ploče), a S je presjek rezonatora u ravnini okomitoj na raspor.

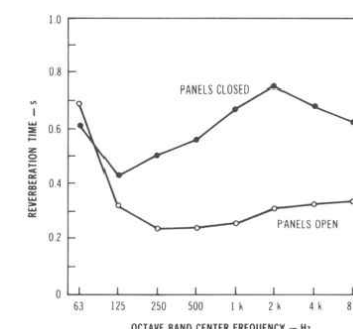
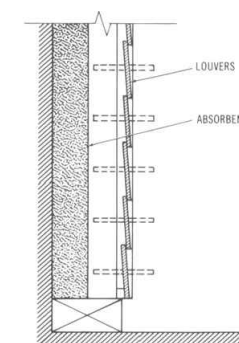
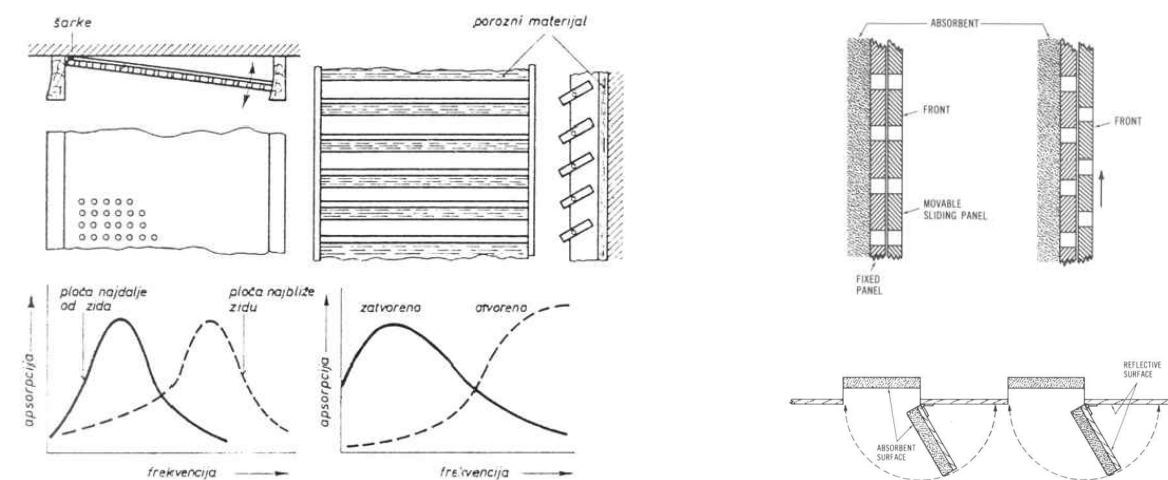
Rezonatori s rasporom se, kao i oni obični, mogu upotrebljavati i pojedinačno (individualni rezonatori s rasporom).

Češće nego pojedinačni upotrebljavaju se panelni rezonatori s rasporom. Na slici ispod frekventijske su karakteristike koeficijenta apsorpcije takvog rezonatora, prva slika bez ispune u rezonatorskom prostoru a druga s ispunom od staklene vune. Kao što se vidi karakteristika je apsorpcije bez ispune selektivnija.



Apsorberi promjenjivih karakteristika

U prostorijama za više akustičkih namjena, kao što je multifunkcionalna dvorana, različiti su zahtjevi za glazbeni nastup ili predavanje, te su im pogodni različiti akustički parametri. Stoga u modernoj gradnji, sve se češće koriste materijali koji imaju osobine prilagođavanja određenoj namjeni. Najčešće je to prilagođavanje mehaničke prirode, stoga takvi paneli rotiranjem svojih elemenata postižu različite akustičke parametre.



BUKA

Prema definiciji buka je neželjeni zvuk, koji na više načina ugrožava ljudsko zdravlje i sam sluh. Govor i glazba su koristan zvuk za one koji ih žele slušati, a drugima su istodobno, pri razgovoru ili kad spavaju, štetni zvukovi.

Jednaka razina buke nije uvijek jednaka subjektivna smetnja, tj. ne izaziva uvijek isti neugodan osjećaj. Na primjer, sviranje jedne te iste melodije može biti sasvim tiho, a ipak onome koji je čuje iz noći u noć oduzima san i postaje nepodnošljivo. Naprotiv , prolazak tramvaja koji proizvodi znatno veću buku, pri spavanju neće smetati. Također, ljudi bolje podnose tonove niskih frekvencija nego visokih.

Medicinskim istraživanjima je otkriveno da buka utječe na krvni tlak, na mišićnu napetost, i na san. Ustanovljeno je da npr. prolazak automobila pokraj prozora spavaće sobe poveća krvni tlak osobe koja spava. Ta reakcija nastupa, a da se osoba ne probudi.

Izvršena su mnoga mjerenja i istraživanja da se ispita kako buka smeta pri radu. Iako se nije došlo do rezultata koji bi omogućili da se izračuna koliko treba akustičkom obradom prostorije smanjiti buku, pa da se to odrazi na efekt rada, ipak se općenito može reći da velika buka radnika umara i da mu smanjuje radni kapacitet. Na osnovi toga se ne smije zaključiti da je za rad uvijek potrebna što veća tišina. Ponekad stanovita razina buke djeluje povoljno na radni učinak.

Osim buke u čujnom dijelu zvučnog spektra postoji i buka u infrazvučnom i ultrazvučnom dijelu spektra. I vibracije, koje mogu potjecati od najrazličitijih izvora, vrlo loše utječu na ljudsko zdravlje, pa je potrebno odgovarajućim zahvatima provesti zaštitu.

Razina zvuka u decibelima dB(A)	Opis
0	Potpuna tišina
25	Vrlo tiha prostorija
35	Spuštanje večeri bez vjetra u seoskom području
55	Dan, 0,5 km udaljena užurbana prometnica
70	Restoran pun gostiju
85	Prepun kafić, potrebno je vikati kako bi vas čuli
100	Disco ili rock koncert
120	Neugodno glasno, nemoguće je razgovarati
140	Buka uzrokuje bol u ušima

Buka na čovjeku odmah izaziva nekoliko promjena, koje ako su česte ostavljaju ireverzibilne promjene, a ustanovljive su kao :

- proširenje zjenica, lupanje srca, reakcije mišića
- lučenje adrenalina, hormona štitnjače i nadbubrežne žlijezde
- pojačana peristaltika želuca i crijeva i sužavanje krvnih žila
- porast krvnog tlaka

Djelovanje buke na centralni živčani sustav:

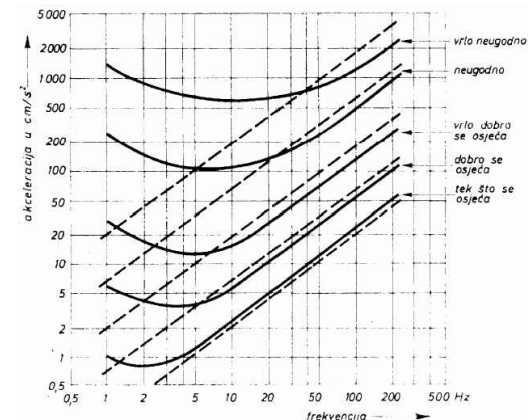
- promjena cerebralne mikrocirkulacije uslijed promjene tonusa krvnih žila
- promjene bioelektričnih potencijala i nervne aktivnosti
- teškoće u psihomotornim reakcijama
- smanjenje efektivnosti rada
- poremećaji ponašanja, pojava nesanice, straha, apatije

Djelovanje na glas i govor zbog poremećaja refleksnih lukova i korelacije između sluha i govora.

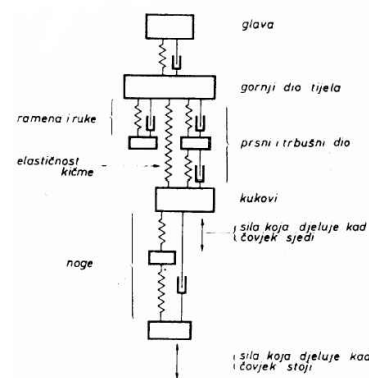
Djelovanje na organ vida u smislu slabijeg raspoznavanja boja, sporije adaptacije na promjene intenziteta.

Dok zvuk, odnosno buku, čovjek prima samo uhom, dakle jednim organom, dotle potresanje prima s više organa istodobno. Pri potresanju razlikujemo oscilacije, potresanje pri kojem se tijelo giba kao cjelina; i vibracije, mnogo brže potresanje, u kojem ne mora sudjelovati cijelo tijelo, ali je ono podvrgnuto nejednakim i neujednačenim pomacima. U praksi se potresanje obično sastoji od istodobnih oscilacija i vibracija. Njihanje broda na moru je primjer gdje su prisutne samo oscilacije a potresanje zgrade zbog prolaska vozila sadrži samo vibracije.

Pri potresanju se cijelo tijelo giba uglavnom kao cjelina, dok se kod vibracija (zapravo je to mnogo brže potresanje) pomiču samo dijelovi tijela.



Frekvencijske karakteristike jednake osjetljivosti čovjeka na vibracije



Podjednostavljena mehanička shema čovječjeg tijela koja vrijedi za nisko frekvencijsko područje i za malene titrajne amplitude. U dijelu tijela između kukova i ramena nastaju pri frekvencijama od 3-6 Hz izrazite rezonantne pojave. Zbog toga se teško podnose te frekvencije uz veće amplitude. Sistem koji tvori glava s vratom i ramenima ima rezonantne frekvencije između 20 i 30 Hz. Rezonantne su frekvencije očih jabučica između 60 i 90 Hz, a donje čeljusti između 100 - 200 Hz.

Simptomi djelovanja vibracija

Prvi stadij

- reverzibilan, malo simptoma
- bolovi i parestezije dijelova prstiju
- sniženje praga osjetljivosti na vibracije

Drugi stadij

- nedostatak osjećaja boli u koži
- jaki bolovi u mišićima, kostima i zglobovima
- povećanje zahvaćene površine tijela
- liječenje moguće

Treći stadij

- bjelina kože šake pri najmanjoj hladnoći
- bolovi u kostima
- prestanak osjećaja boli i dodira na koži prstiju
- utjecaj na srce i krvne žile, živčani sustav
- liječenje teško i rijetko uspješno

Četvrti stadij

- atrofija kože
- oticanje i edemi
- nekontrolirane kontrakcije mišića
- vrtoglavice
- srčane smetnje
- neurološke smetnje (naročito noću)
- moguća pojava gangrene

Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave (NN 145/04)

Navedene su najviše dopuštene ocjenske razine buke imisije u otvorenom, zatvorenom prostoru i radnom mjestu, prema tablicama:

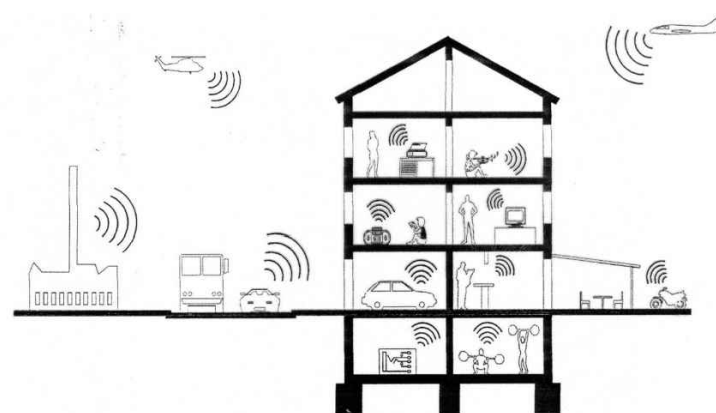
Zona buke	Namjena prostora	Najviše dopuštene ocjenjske razine buke imisije L_{RAeq} u dB(A) za dan za noć	
1.	zona namijenjena odmoru, oporavku i liječenju	50	40
2.	zona namijenjena samo stanovanju i boravku	55	40
3.	zona mješovita, pretežno stambene namjene	55	45
4.	zona mješovita, pretežno poslovne namjene	65	50
5.	zona gospodarske namjene	na granici građevne čestice unutar zone ne smije prelaziti 80 dB(A)	

Buka u zatvorenim boravišnim prostorima:

Zona prema prethodnoj tablici "pravilnika"	1	2	3	4	5
Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke L_{Req} u dB(A) - za dan	30	35	35	40	40
Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke L_{Req} u dB(A) - za noć	25	25	25	30	30

Razlikujemo **tri vrste buke** s obzirom na način prenošenja:

1. buka koja se stvara u prostoriji u kojoj smeta (**buka direktnog izvora**)
2. zračna buka koja se prenosi izvana ili iz druge prostorije u prostoriju u kojoj smeta (**buka od vanjskog izvora**)
3. **vibracijska (strukturnalna) buka** koja se u prostoriju u kojoj smeta prenosi preko građevinskih konstrukcija



Izvori buke

6.1 STRUKTURALNA BUKA

Buka koja se u prostoriji prenosi preko konstrukcije, popraćena vibracijama.

Zvuk kroz zidove prolazi: kroz rupe, longitudinalnim titranjem u materijalu zida te titranjem zbog savijanja zida.

Prirodni izvori strukturalne buke: more i vjetar (lupanje u obalu, trenje valova i vjetra), grmljavina, vibracije od pomicanja tla i potresa, pomicanje ledenih površina, seizmičke aktivnost (potresi) , vulkani, pad meteora, životinje (slon, kit) itd.

Neprirodni izvori strukturalne buke: pumpe, industrijska postrojenja (strojevi), generatori, turbine i motori (kućanski aparati) – rotacioni strojevi, glasna muzika, vjetrenjače, eksplozije (atomska bomba), cestovni, morski i zračni promet, ventilacija, sonari itd.

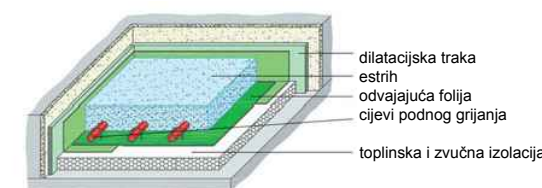
U nekim industrijskim postrojenjima javlja se strukturalna buka kao rezultat rada strojeva, te neugodno djeluje na čovjeka i na njegovo zdravlje. Takve vibracije kao i popratna buka mogu se smanjiti i regulirati određenom arhitektonskom izvedbom projekta.

Postoje različite **metode smanjenja vibracija**:

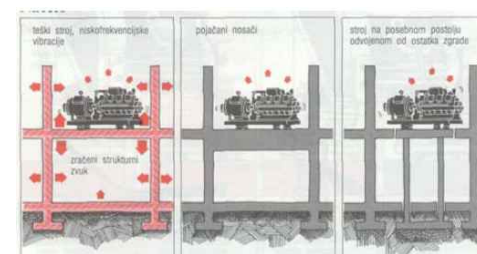
- izbjegavanjem rezonancije vlastitih vibracija objekta i vibracija uzbude promjenom krutosti ili mase
- odnosno vlastite frekvencije objekta ili promjenom frekvencije uzbude,
- ugradnjom dinamičkih, hidrauličkih ili tarnih prigušivača, smanjivanjem intenziteta uzbude promjenom izvora uzbude
- ugradnjom dinamičkih kompenzatora, koji rade na načelu uzbuđivača, ali s razlikom da oni djeluju protufazno, tj. poništavaju ili smanjuju uzbudu,
- korištenjem posebnih izolatora, materijala koji upijaju vibracije i time sprječavaju njihovo prenošenje



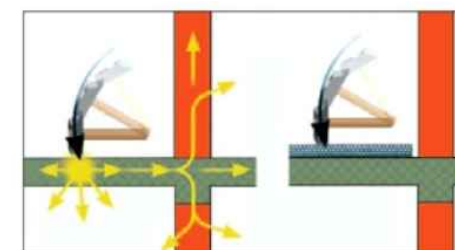
Razni prigušni elementi koji se ugrađuju na strojeve ili u podnožje strojeva



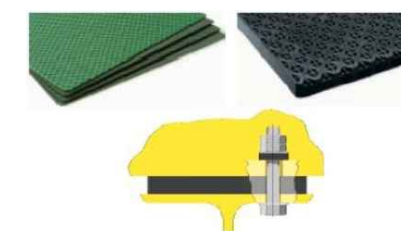
Plivajući pod



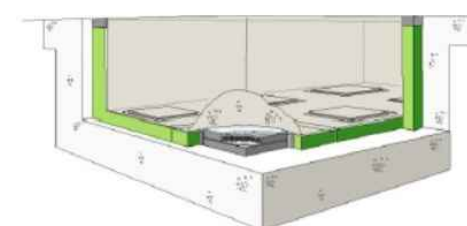
Izolacija strojeva s niskofrekvencijskim vibracijama zahtijeva teške temelje



Zaštita od buke i vibracija izolacijskim folijama



Izolacijski materijali



Izolacija temelja

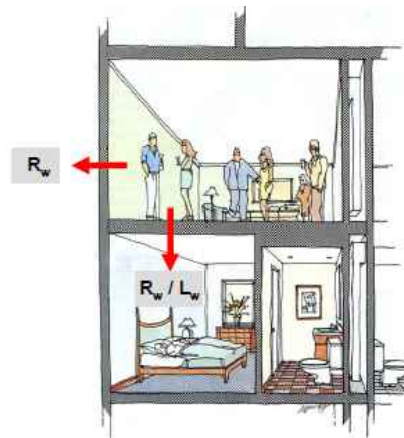
6.2 ZAŠTITA OD ZRAČNE I UDARNE BUKE

Zaštita od zračne i udarne buke unutar zgrade - ova norma propisuje:

- minimalne vrijednosti zračne zvučne izolacije R_w (vertikalne i horizontalne pregrade)
- maksimalne vrijednosti nivoa zvuka udara L_w (horizontalne pregrade)

	$R_{w,min}$ (dB)	$L_{w,max}$ (dB)
A/ Stambene i stambeno-poslovne zgrade		
zid između dva stana	52	-
zid između stana i zajedničkog hodnika	52	-
zid s vratima između stana i zajedničkog hodnika D_w	52	-
zid između stana i poslovnih prostora	57	-
strop između stanova, i ispod stana prema ulaznim prostorima,	52	68
strop iznad stana prema lodi/terasi drugog stana	-	68
strop ispod stana prema prostorima druge namjene (poslovni prostori,)	57	68
pod bučne prostorije prema stanu iznad i pored	-	48
B/ Poslovne zgrade i poslovne prostorije u drugim zgradama		
zid između prostorija dva korisnika	52	-
zid bez vrata između prostorija za intelektualni rad i prostorija za sastanke prema prostorijama za drugu namjenu istog korisnika	44	-
zid bez vrata između prostorija istog korisnika	42	-
stropovi između poslovnih prostora	52	68

* Navedene su samo neke vrijednosti. Za detaljniji uvid vidi HRN U.J6.201



Zvučna izolacija

Zvučna izolacija je sposobnost neke pregradne ili druge konstrukcije da u određenoj mjeri spriječi širenje zvuka kroz nju. Razlikuju se dvije vrste izolacije:

- zračna zvučna izolacija
- udarna zvučna izolacija

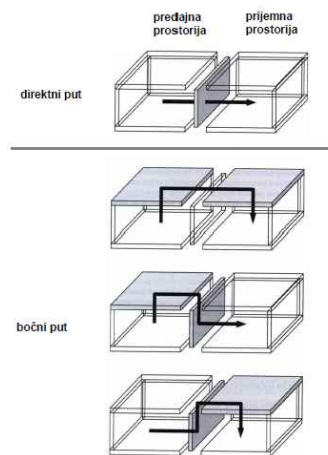
Zračna zvučna izolacija je svojstvo sprječavanja širenja zračnog zvuka svih pregradnih konstrukcija zgrade - vertikalnih i horizontalnih, uključujući fasade i fasadne elemente.



Udarna zvučna izolacija odnosi se samo na horizontalne pregrade tj na međukatne konstrukcije i svojstvo je sprječavanja širenja strukturalnog zvuka.

Prijenos zvučne energije preko krutih tvari/ pregrada

Kada zvučni valovi udare o plohu pregrade, jedan dio energije se reflektira, jedan apsorbira, dok se ostali dio energije prenese kroz plohu/pregradu na drugu stranu.



Prenošenje zračnog zvuka iz prostorije u prostoriju

Zvučni valovi koje emitira izvor zvuka u predajnoj prostoriji prenose se različitim putevima u prijemnu prostoriju.

Na slici vidimo načine prenošenja zvuka gdje razlikujemo direktni put te više načina prolaska zvuka bočnim putem.

Veličine za izražavanje zračne zvučne izolacije

Normirane veličine za izražavanje zračne zvučne izolacije pregrada u dB:

- indeks zvučne izolacije R
- normalizirana razlika razina D_n
- standardna razlika razina D_{nT}

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log (S / A) \quad (\text{dB})$$

R - izolacijska moć pregrade (dB)
 L_1 - srednja razina zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji (dB)
 L_2 - srednja razina zvučnog tlaka u prijemnoj prostoriji (dB)
 S - površina pregrade (m^2)
 A - ekvivalentna apsorpcijska površina prijemne prostorije (m^2)



$$D_n = D - 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad \text{dB} \quad A_0 = 10 \text{ m}^2$$

$$D_{nT} = D + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad \text{dB} \quad T_0 = 0,5 \text{ s}$$

A - zvučna apsorpcija prijemne prostorije (m^2)
 T - vrijeme odjeka u prijemnoj prostoriji (s)
 $D = L_1 - L_2$ - razlika razina u predajnoj i prijemnoj prostoriji (dB)

U arhitektonskom projektiranju koristimo brojne materijale kao **zvučne i toplinske izolatore**. Tako razlikujemo jednostruke, dvostruke i višestruke pregrade, spuštene stropove te plivajuće podove kao zaštitu od buke. U tablici vidimo neke vrijednosti prigušivanja u decibelima za navedene materijale.

debljina pregrade(cm)	Građevni element	masa pregrade kg/m ³	srednje zvučno prigušivanje dB
1,5	Šperploča masivna	11	23
1,5	Šperploča savitljiva zbog urezanih brazda	10	30
1,2	Zrcalno staklo	30	35
4,2	Gumena ploča	55	44
7	Pjenušavi beton	65	36
8,5	Sadrene platnice	68	34
11	Lagani betonski blokovi	105	37
12	Plovučac	120	42
9	1/4 pune opeke	167	40
21,5	Lagani betonski blokovi	215	44
15	1/2 pune opeke	250	45
28	Šuplji blokovi	290-320	46-49
28	Opeka s uzdužnim rupama	305	46
28	Naplavni kamen	325	48
28	Opeka s poprečnim rupama	470	53
/	Strop sa šuplim elementima	210-250	42-44
12-14	Strop s punim elementima	300-350	47-48
20	Armirani betonski strop	260	51

*građevni elementi od petoga naniže su ožbukani

Što se tiče **vanjske buke**, prigušivanje ponajviše ovisi o karakteristikama vanjskih otvora.

Zvučno prigušivanje vrata ovisi o njihovoj težini, ali vrlo mnogo i o tome koliki je razmak između vrata i dovratnika, te o priljubljenosti dovratnika uza zid.

Prosječna prigušivanja raznih vrsti vrata:

1. lagana obična vrata, 2 cm, masa 6 kg/m² 21 - 27 dB
2. normalna vrata, 4 cm, masa 15 kg/m² 25 - 29 dB
3. kao pod 2., s pustanim brtvilom 28 - 32 dB
4. dvostruka kao pod 2., s razmakom od 40 cm 30 - 36 dB
5. specijalna višeslojna, s pustanim brtvilom i neprolaznom ključanicom 36 - 40 dB
6. dvostruka kao pod 5, s razmakom od 40 cm 50 dB

Kao i za vrata tako i za prozore zvučno prigušivanje ovisi o težini, u ovom slučaju stakla, o broju staklenih ploča, te o izvedbi dosjednih ploha.

Prigušenje prozora:

1. jednostruki, debljina stakla 3 - 4 mm 20 - 24 dB
2. dvostruki, debljina stakla 3 - 4 mm 24 - 28 dB
3. dvostruki, s brtvilom na dosjedima, stakla 5 i 7 mm 30 - 34 dB

6.3 PRIGUŠIVANJE U VENTILACIJSKIM KANALIMA

U ventilacijske i klimatizacijske uređaje jeftinije je ugraditi manji **ventilator** koji ima veći broj okretaja u minuti, pa prema tome stvara veću buku, te dodati u kanale prigušne materijale, nego upotrijebiti polagan veliki ventilator s neprigušnim kanalima. Buku može uzrokovati i **strujanje zraka u kanalu**, a i treperenje stijenki kanala ako su građene od tankih ploča. Da bi se izbjegli zračni vrtlozi, ne rade se u kanalu oštra koljena i izbočine. I brzina zraka treba da je dovoljno malena: u glavnim kanalima do 5m/s, a u sporednima do 3m/s.

Najdjelotvorniji i najtiši ventilatori obično su oni s najnižom brzinom lopatica, odnosno oni s najvećim rasponom i niskom brzinom. Ventilator s unazad zakrivljenim ili unazad nakošenim lopaticama koji je vršno djelotvoran tiši je od radijalnog ventilatora. Buke ventilatora prenose se na velikim udaljenostima. Više frekvencije iz ventilatora s mnogo lopatica sklone su raspršivanju na kraćim udaljenostima nego niže frekvencije koje ispuštaju ventilatori s manje lopatica.

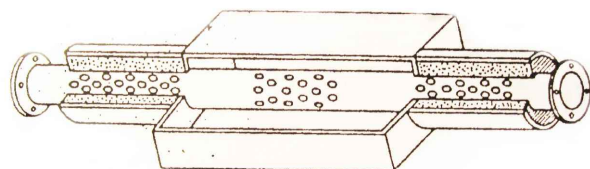
Tablica u nastavku prikazuje smanjenje buke koje se može očekivati uslijed smanjenja brzine ventilatora. Svako smanjenje od 3 dB(A) ekvivalentno je prepolovljavanju razine buke.

Smanjenje brzine ventilatora	Smanjenje buke
10 %	2 dB(A)
20 %	5 dB(A)
30 %	8 dB(A)
40 %	11 dB(A)
50 %	15 dB(A)

U zračnim kanalima obloženima apsorpcijskim materijalima **prigušivanje zraka** ovisi o tri činioca:

1. **Duljina kanala**
-Prigušivanje zvuka u decibelima približno je proporcionalno duljini obloženog kanala.
2. **Oblik presjeka kanala**
-U okruglim i kvadratnim kanalima prigušivanje je manje nego u onima kojima je presjek u obliku izduženog pravokutnika.
3. **Koeficijent apsorpcije materijala kojim je kanal obložen**
-Prigušivanje zvuka po metru duljine kanala ovisi o frekvenciji.

Ako se oblaže staklenom ili mineralnom vunom, taj se materijal pokriva perforiranim pločama da se spriječi odnošenje čestica materijala zračnom strujom. Debljina sloja apsorpcijskog materijala mora biti barem 3cm kako bi se apsorbirale i niže frekvencije buke.



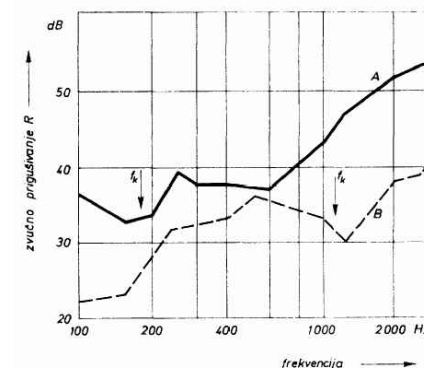
Akustični pojasno-zaporni filter. Kanal ima promjer od 10cm.

U buci može usko područje frekvencija biti po intenzitetu naročito istaknuto. Tad vrlo uspješno djeluje akustički pojasni filter prikazan na slici gore. Sasvim niske frekvencije u ventilacijskom kanalu nije moguće efikasno prigušiti poroznim apsorpcijskim materijalima.

Osnovna pravila građevinske akustike

Svi osnovni principi na kojima se zasniva zvučno prigušivanje zidova, ili općenito pregrada, i sve osnovne mjere koje se poduzimaju da bi se postigla što bolja zvučna izolacija zidova (pregrada) naći ćemo u deset slijedećih pravila. Pravila su preuzeta iz priručnika *"Elektroakustisches Taschenbuch"* E.Rickmanna i H.Heyde (1940.).

1. Zvučno prigušivanje jednostavnih zidova ovisno je uglavnom o masi zida po m³. Što je zid veće specifične mase, to je ono veće. Ono također raste i s frekvencijom, što se vidi iz dijagrama ispod.

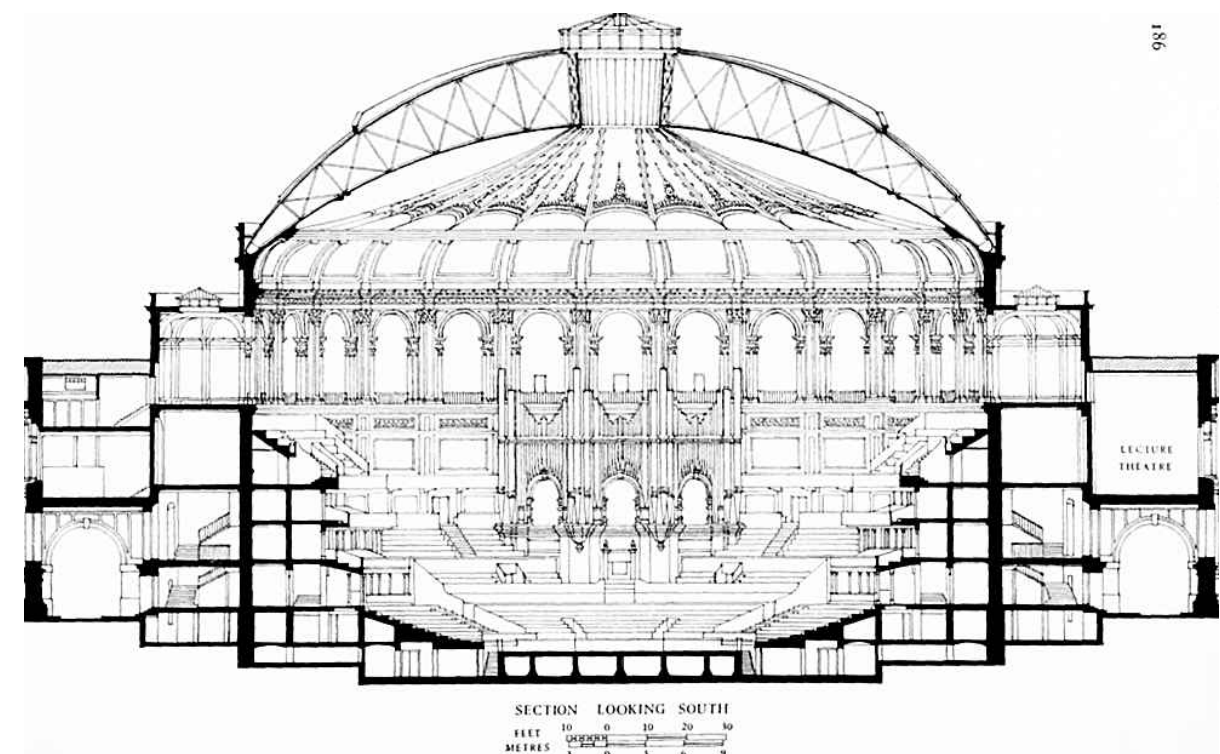
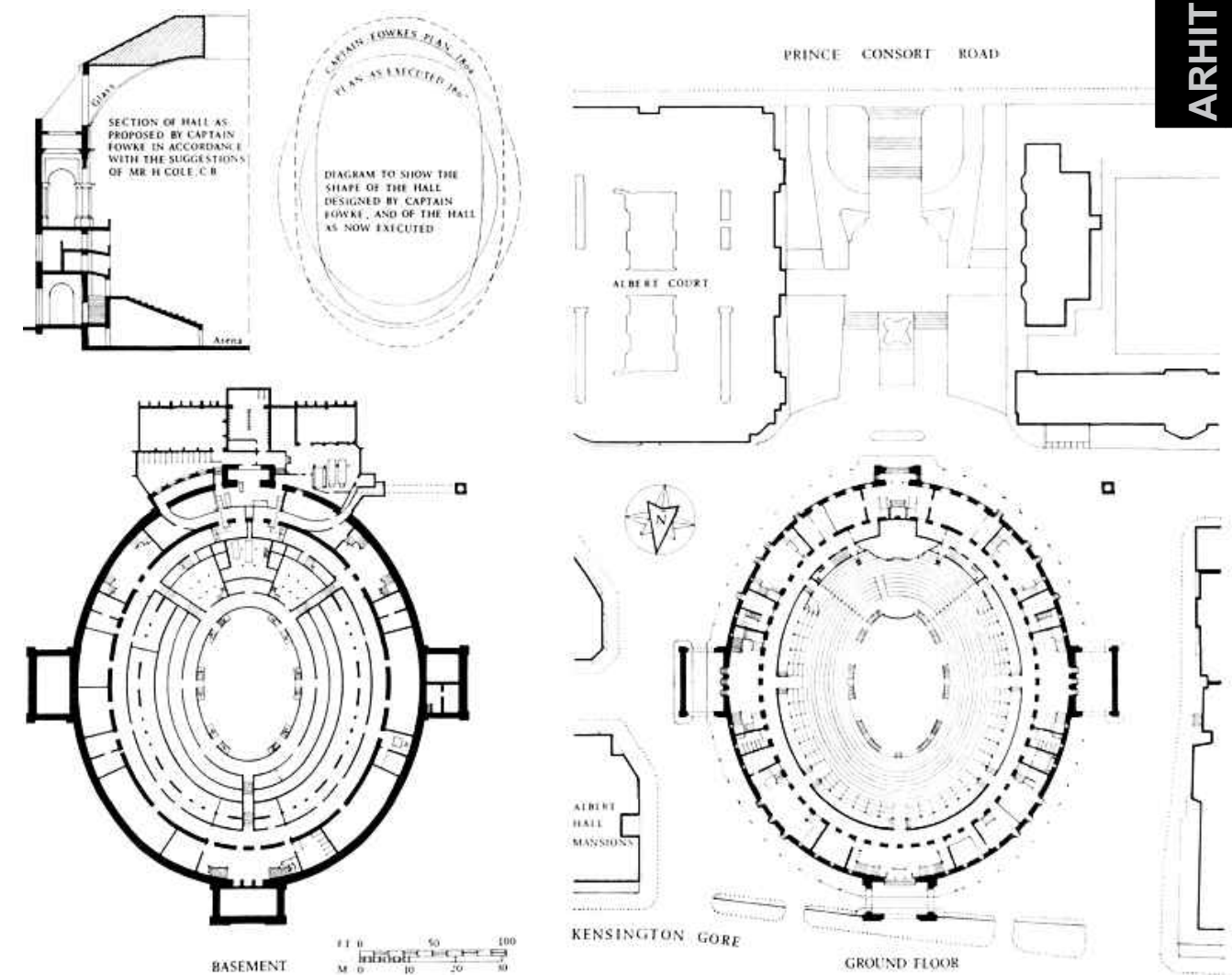


2. Uz istu masu po m³ veće zvučno prigušivanje ima onaj zid koji je krući prema savijanju. Upotreba cementne žbuke, u usporedbi s vapnenom žbukom ili sadrom, povisuje zvučno prigušivanje do 4dB.
3. Zvučno prigušivanje jednostavnih zidova mnogo ovisi o kvaliteti izvedbe zida u vezi sa šupljikavošću.
4. Koliko će biti zvučno prigušivanje nekog jednostavnog zida, ovisi o njegovom najpropusnijem dijelu. Uzalud je izvesti zid prema svim pravilima za zvučno prigušivanje ako npr. vrata u njemu ne prigušuju zvuk isto onako kao on sam. To vrijedi i za sve šupljine u zidu, te prolazne cijevi i grede.
5. Veličina zidne plohe ne utječe znatno na zidno prigušivanje.
6. Zvučno prigušivanje zidova građanih od više međusobno vezanih slojeva od različitih materijala za 2dB je veće nego što bi odgovaralo masi zida.
7. Zvučno prigušivanje višestrukih zidova uglavnom ovisi o masi po m², međusobnoj udaljenosti pojedinih zidova i o ispunjenju pravila 2. i 4. Ono je na rezonantnoj frekvenciji najmanje. Ispod te vrijednosti približava se ono u višestrukog zida iznosu za jednostavan zid.
8. Rezonantna frekvencija višestrukih zidova treba da je što niža kako bi se dobro prigušili šumovi i buka na nižim frekvencijama.
9. Stojne valove (poprečna titranja) višestrukih zidova treba u zračnom prostoru prigušiti apsorpcijskim materijalima.
10. Kod višestrukih zidova mora se paziti da se između pojedinih zidova ne nestane veza preko "mostova" tj preko komada žbuke, cijevi, krutih prigušnih sredstava itd.

Royal Albert Hall, South Kensington, London, UK

Royal Albert Hall je koncertna dvorana u South Kensingtonu otvorena od strane kraljice Viktorije 1871. godine. Od tada je jedna od najpoznatijih koncertnih dvorana u svijetu sa najboljom akustikom. Ima kapacitet od 5272 sjedeća mjesta. Svake godine se održava više od 390 koncerata u glavnoj dvorani, uključujući i klasične, rock i pop koncerte, balet, operu, filmske projekcije s live orkestarom, sportske manifestacije, dodjele nagrada, školske i kulturne događaje, humanitarne nastupe i bankete.

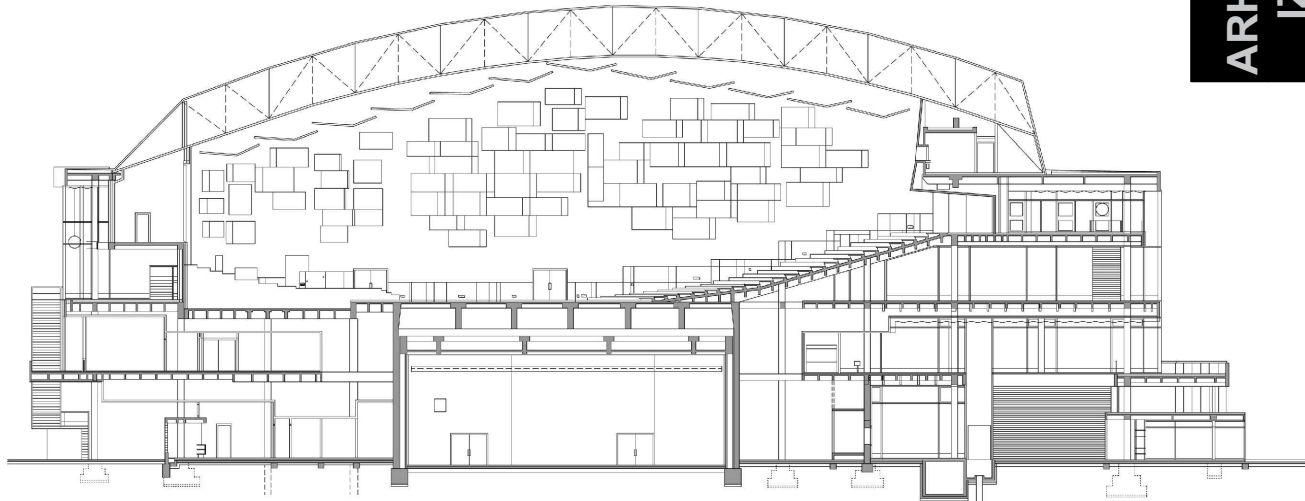
Dizajn podsjeća na rimske amfiteatre. Glavna dvorana je 56m široka i 66m duga te je prekrivena staklenom kupolom. Sama veličina zatvorenog prostora zajedno s refleksijama od staklenog stropa stvarala je značajan odjek te je taj problem riješen 1960-ih dodavajući na strop višestruke akustične tanjure, često nazivani gljive Royal Albert Halla. Njezin eksterijer, pročelja su sastavljena od više od 6 milijuna crvene cigle i 80 000 blokova terrakote.



Koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog, Zagreb, Hrvatska

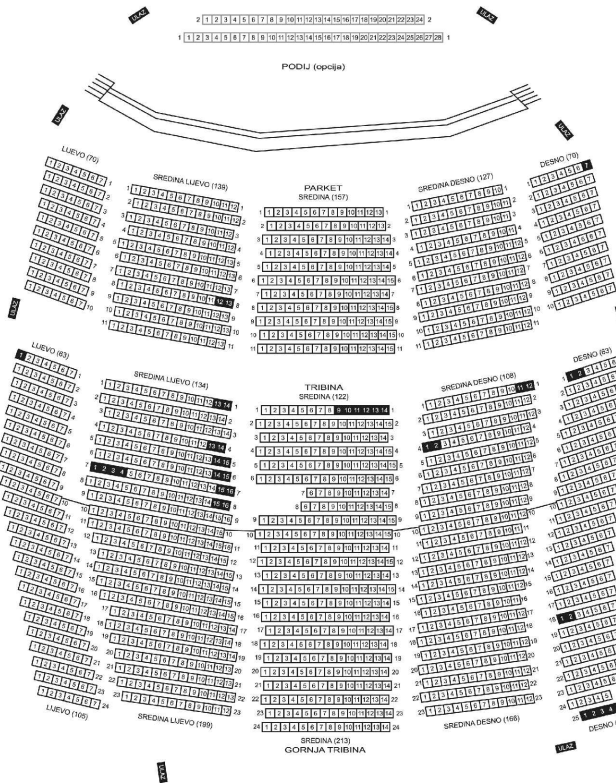
Koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog je kulturna institucija smještena u Zagrebu, između željezničkog kolodvora i Avenije Vukovar, u četvrti Trnje. Dvorana je izgrađena 1973. godine a projektant zgrade je arhitekt Marjan Haberle. Nazvana je po Vatroslavu Lisinskom, hrvatskom skladatelju iz 19. stoljeća. Godišnje dvoranu posjeti više od 760 000 posjetitelja. U zgradi se nalaze : **velika dvorana** s 2360 m², 1847 sjedišta, i velikim orguljama, **mala dvorana** s 360 m² i 304 sjedišta te **četiri salona** za sastanke, **predvorje** i **tri snack-bara**.

Glavna dvorana je izvedena u drvu, koje još više pojačava mogućnosti dobre akustike. Sadrži akustične difuzore na zidovima, te ovješeni akustični svod na stropu, koji je zbog toga što mora biti čvrst, tvrd i jak izrađen od gipsa kao ovjes koji visi iz konstrukcije još jednog svoda, odnosno drugog stropa dvorane. Volumen je 16 000 m³. U auditoriju ima mjesta za 1847 slušatelja. Na podiju se može smjestiti pun sastav suvremenog simfonijskog orkestra i zbor od stotinu pjevača u sjedećem položaju. Volumen po osobi je 8,7 m³. Srednje vrijeme odjeka u frekvencijskom području od 500 -1000Hz iznosi 2,2s.



KONCERTNA DVORANA VATROSLAVA LISINSKOG
VELIKA DVORANA - za najam

1	U PRODAJI	1804 (s podijem do 1856)	UKUPNO DVORANA	1844
1	SLUŽBENA MJESTA	40	PODIJ (opcija)	do 52 mjesta
			SVEUKUPNO	1896



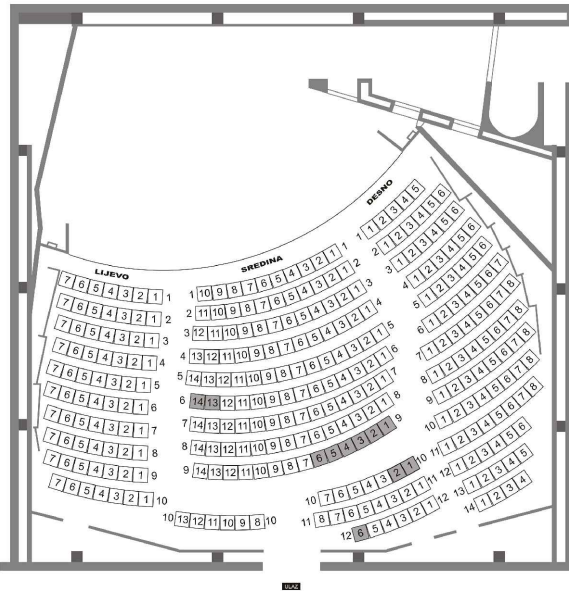
Vrijedi od 1. rujna 2010. godine

Ovjera i potpis: _____

KONCERTNA DVORANA VATROSLAVA LISINSKOG
MALA DVORANA

1	U PRODAJI	293
1	SLUŽBENA MJESTA	11

UKUPNO
304

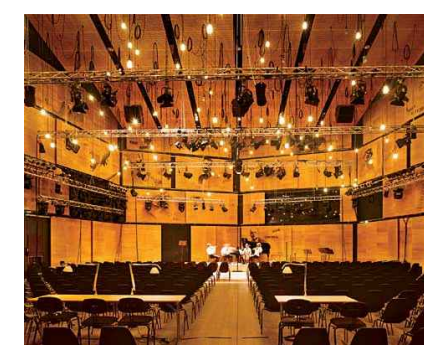
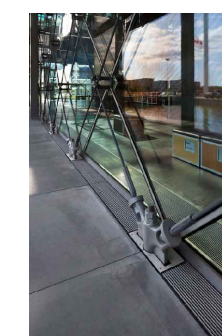
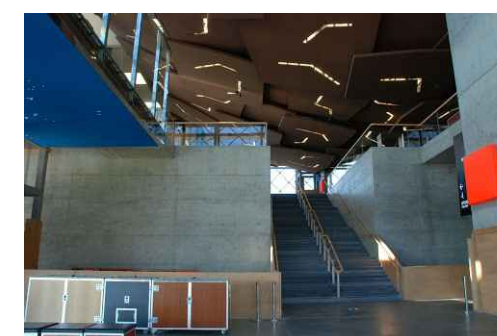
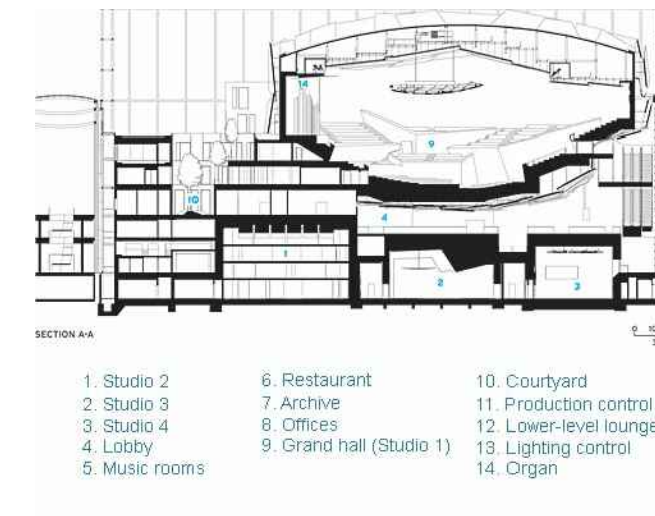
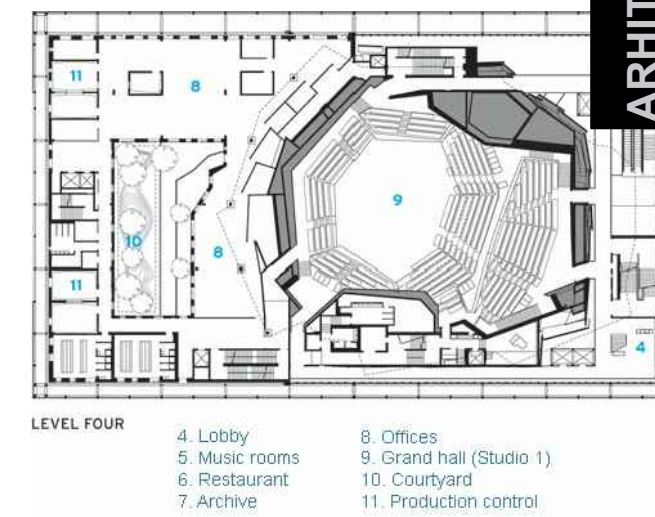
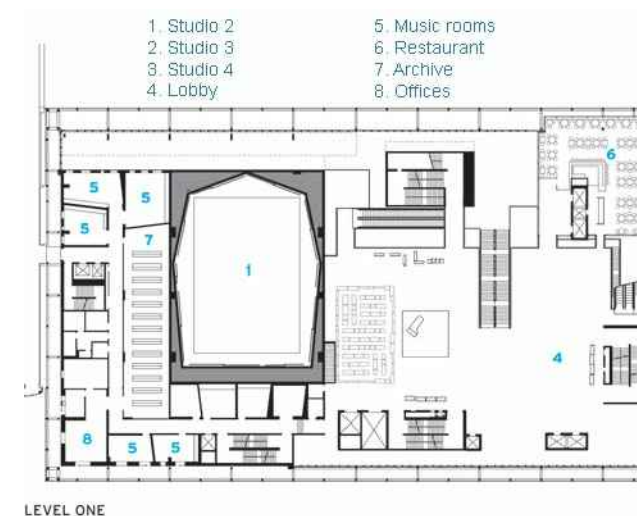
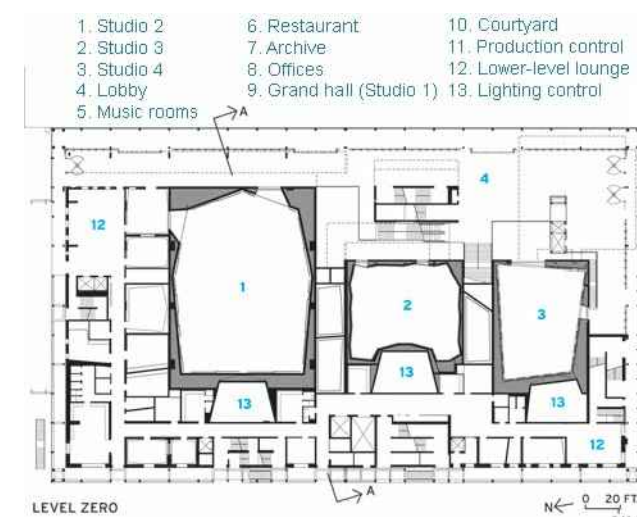


DR Concert Hall, Copenhagen, Danska

Koncertna dvorana DR- Danskog radija u Kopenhagenu djelo je francuskog arhitekta Jean Nouvela. Otvorena je 2009. godine, te ima nevjerojatnu akustiku koja je zavrjedila da se 2012. upravo ova dvorana nominira među 10 najboljih novog tisućljeća.

Pojavnost ovog objekta kao kubusa koji unutar sebe sadrži 4 dvorane i razne popratne prostore javnog karaktera čini ovu zgradu ekonomski održivom i zanimljivoj korisnicima. Čelična konstrukcija kubusa u kontrastu je sa sivim betonom koji mjestimično zatvara određene prostore, a stakleni krov u prostranom predsoblju otvara pogled prema zvijezdama.

Svaka dvorana varira u arhitekturi i izražavanju, od velike dvorane u toplim bojama, do suzdržane u crno-bijeloj tehnici, te male dvorane intimne atmosfere obojane u crveno. Arhitekt Jean Nouvel je surađivao s japanskim akustičarom Yasuhisom Toyotom, a svaka od četiri dvorane ima promjenjivu akustiku koja se može prilagoditi za određeni ansambl ili glazbeni žanr.



Literatura:

predavanja:

FESB - dr.sc. Ivo Mateljan - POG1 - Fizikalna akustika
 - POG2 - Psihoakustika
 - POG8 - Prostorna akustika

Dr.sc. Marjan Sikora - Postupci simulacije i vizualizacije širenja vala u nehomogenim sredinama, doktorska disertacija, FER, Zagreb, 2010.

knjige:

Zvuk-sluh-arhitektonska akustika, prof.dr. Tihomir Jelaković, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
 Auditorium Acoustics and Architectural Design, Michael Barron, second edition, Spon Press, 2009.
 Architectural Acoustics Illustrated, Michael Ermann, publisher: Wiley, 2015.

web izvori:

FER- Akustika prostora (ilustracije iz predavanja) - https://www.fer.unizg.hr/predmet/akupro_a

poglavlje Buka- propisi i regulativa

<http://seminar.tvz.hr/materijali/materijali12/12A03.pdf>
<http://seminar.tvz.hr/materijali/materijali14/14A03.pdf>

poglavlje 7-primjeri:

https://en.wikipedia.org/wiki/Royal_Albert_Hall
<http://www.royalalberthall.com/about-the-hall/our-history/explore-our-history/building/>
<http://www.british-history.ac.uk/survey-london/vol38/pp177-195>

https://hr.wikipedia.org/wiki/Koncertna_dvorana_Vatroslava_Lisinskog
<http://www.lisinski.hr/hr/o-nama/publikacije/>

<http://www.visitcopenhagen.com/copenhagen/dr-koncerthuset-gdk412702>
<http://www.dac.dk/en/dac-life/copenhagen-x-gallery/cases/dr-concert-hall/>
<http://housevariety.blogspot.hr/2011/03/copenhagen-concert-hall-by-ateliers.html>