

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ V SOULADU S POŽADAVKY PROVOZU PŘÍSTROJŮ A VYBAVENÍ

Zpracoval: Petr Brodec

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Brodec Jméno: Petr Osobní číslo: 468525
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh betonových konstrukcí v souladu s požadavky provozu přístrojů a vybavení
Název bakalářské práce anglicky: Design of concrete structures in accordance with the operating requirements of equipment and devices

Pokyny pro vypracování:
Souhrn poznatků z literatury
Příklady specifických požadavků na betonové konstrukce
Varianty řešení vybraných konstrukcí

Seznam doporučené literatury:
odborné publikace - např. časopis beton TKS
platné normy pro navrhování betonových konstrukcí

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 24.2.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 17.5.2020
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s odbornou konzultací vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jitkou Vaškovou, CSc., a veškeré použité podklady, ze kterých jsem při psaní čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 17.5.2020

Petr Brodec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval paní doc. Ing. Jitce Vaškové CSc., za rady, konzultace, trpělivost a vedení během studia a psaní bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat sourozencům a přítelkyni, za nekonečnou podporu a povzbuzení.

Hlavní dík patří mým rodičům, bez kterých by nic z toho nebylo možné.

ANOTACE

Tato práce popisuje vliv umístěných zařízení v objektu na návrh nosné železobetonové konstrukce. Přibližuje fyzikální princip vybraných interakcí mezi přístrojem a konstrukcí, vyjmenovává varianty takových případů a následně shrnuje možné postupy úprav, které jsou potřebné pro zajištění potřebných podmínek pro fungování daných přístrojů, bezpečnosti a životnosti.

V další části je vypracován zběžný návrh obálky pro radioterapeutické zařízení produkující silné ionizující záření, v němž je znázorněn postup návrhu tloušťky betonových konstrukcí pro odstínění tohoto záření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, přístroje, ionizující záření, speciální beton, polotloušťka, stínící konstrukce, lokální břemeno, průhyb, dynamické zatížení,

ANNOTATION

The aim of this thesis is to describe the influence of devices placed inside a building on bearing concrete structure design. It outlines physical principles of selected interactions between a device and a structure, names variations of these examples and then summarises the possible adjustments which are necessary for ensuring required conditions for functioning of given devices, security and service life.

The next part develops a cursory design of shielding vault for radio treatment device producing strong ionizing radiation. The design further presents a construction method, regarding thickness of concrete structures, to shield this radiation.

KEY WORDS

Concrete, devices, ionizing radiation, special concrete, half value layer, shielding construction, local burden, deflection, dynamic load

OBSAH:

1. ÚVOD	9
1.1. TÉMA PRÁCE	9
1.2. MOTIVACE	9
2. FYZIKÁLNÍ POŽADAVKY	11
2.1. IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	11
2.1.1. TYPY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	12
2.1.2. VLIV ZÁŘENÍ NA LIDSKÉ TĚLO	14
2.1.3. OCHRANA PROTI IONIZUJÍCÍMU ZÁŘENÍ	15
2.1.4. VLIV IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA KONSTRUKCI	18
2.1.5. ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	20
2.2. ÚPRAVY KONSTRUKCÍ VZHLEDEM K PŮSOBENÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	23
2.2.1. ZVĚTŠENÍ TLOUŠŤKY KONSTRUKCE	24
2.2.2. ZVÝŠENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI MATERIÁLU	26
2.2.3. ÚPRAVY TVARU KONSTRUKCÍ	30
3. MECHANICKÉ POŽADAVKY	34
3.1. ROZDĚLENÍ MECHANICKÝCH POŽADAVKŮ A VLIVŮ NA KONSTRUKCI	34
3.1.1. OSAMĚLÉ BŘEMENO	35
3.1.2. DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ	40
3.1.3. PRŮHYB	45
3.2. ÚPRAVA KONSTRUKCÍ VZHLEDEM K MECHANICKÝM POŽADAVKŮM A VLIVŮM	50
3.2.1. OSAMĚLÉ BŘEMENO	50
3.2.2. DYNAMICKÁ ZATÍŽENÍ	56
3.2.3. PRŮHYB	61
4. NÁVRH OBÁLKY RADIOTERAPEUTICKÉHO ZAŘÍZENÍ	66
4.1. TECHNICKÉ POŽADAVKY KONSTRUKCE	67
4.1.1. SEZNAM PŘÍSTROJŮ A VYBAVENÍ	67
4.1.2. STÍNÍCÍ VLASTNOSTI KONSTRUKCE	68
4.1.3. SPECIFIKACE PROSTORU	68
4.1.4. OSAZENÍ PŘÍSTROJŮ	69
4.2. SCHÉMA A POPIS KONSTRUKCE	70

4.2.1.	KONSTRUKČNÍ SCHÉMA – VARIANTA 1	70
4.2.2.	KONSTRUKČNÍ SCHÉMA – VARIANTA 2.....	71
4.3.	PŘEHLED ZATÍŽENÍ	72
4.3.1.	STÁLÉ ZATÍŽENÍ	72
4.4.	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH A POSOUZENÍ NOSNÝCH PRVKŮ	74
4.4.1.	STROPNÍ DESKY	74
4.4.2.	SVISLÉ NOSNÉ KONSTRUKCE	78
4.4.3.	ÚPRAVA RECEPTURY BETONU VZHLEDEM K VÝVINU HYDRATAČNÍHO TEPLA	83
4.5.	POROVNÁNÍ VARIANT NÁVRHU	84
4.5.1.	PROSTOR.....	84
4.5.2.	OBJEM BETONU A CENA.....	84
4.5.3.	CELKOVÉ POROVNÁNÍ VARIANT	85
5.	ZÁVĚR	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	91
	SEZNAM PŘÍLOH	93

1. ÚVOD

1.1. TÉMA PRÁCE

Návrh konstrukce objektu, jakožto klíčové složky celé budovy, prochází během procesu tvorby mnoha úpravami a doplněními. Již od prvotní fáze, kdy statik variuje různé možnosti konstrukčních systémů a materiálových řešení, je nutné myslet na každý aspekt, který může ovlivnit výsledný návrh. Od jednoduchých a relativně triviálních vlivů, jako jsou hodnoty stálého či proměnného zatížení působícího na nosné prvky, až po komplexnější složky návrhu. Z těch se dají jistě jmenovat rozvody technických zařízení, celková smysluplnost a v neposlední řadě ekonomická stránka návrhu.

V teoretické části práce jsou shrnuty vybrané možnosti vlivů a interakcí mezi konstrukcí a zařízením. V kapitole 2. jsem přiblížil typy ionizujících záření a jejich vlivů na konstrukci a lidské zdraví. V další části této kapitoly jsem shrnul možné varianty úprav konstrukce pro odstínění tohoto nebezpečného záření. 3. kapitola je zaměřena na provoz zařízení z hlediska stavební mechaniky. Pro tři vybrané interakce konstrukce se zařízením jsou v další části vysvětleny možnosti výpočtů a úprav konstrukcí, pro zajištění bezpečnosti a životnosti konstrukce a zařízení.

V praktické části je vypracován zběžný návrh ochranné obálky radioterapeutického zařízení.

1.2. MOTIVACE

Předmětem této bakalářské práce je problematika, se kterou jsem se setkal během bakalářského studia při práci na jednom z projektů. V průběhu návrhu konstrukce budovy hvězdárny jsem byl donucen k určitým úpravám nosných prvků, kvůli teleskopu osazenému v posledním nadzemním podlaží, a jeho požadavkům na provoz. Ty byly stanoveny o dost přísněji, než „běžné“ limity kladené na konstrukci. Díky tomuto impulsu jsem se rozhodl shrnout možné varianty vlivu požadavků specifických přístrojů, objevujících se v budovách s železobetonovou nosnou konstrukcí.

2. FYZIKÁLNÍ POŽADAVKY

Při hodnocení možných fyzikálních vlivů a požadavků, kladených specifickými přístroji na návrh železobetonových konstrukcí, je nejdříve důležité jasně vymežit, co považujeme za fyzikální. Již z podstaty slova fyzika (z řeckého fysikos, neboli přírodní) víme, že fyzika se zabývá všemi přírodními zákonitostmi a popisuje fungování a projevy veškeré hmoty a jevů na této planetě. Dá se tedy říct, že všechny varianty požadavků provozu lze souhrnně nazvat fyzikálními. Avšak pro možnost uchopit téma poněkud přehledněji, lze tyto jevy rozlišit na tři větší skupiny. Vlivy mechanické – takové, které svým přímým silovým působením ovlivňují danou konstrukci, chemické – ty, jež ovlivňují složení betonu a jeho chemickou strukturu, a fyzikální – veskrze všechny ostatní. Tato práce je zaměřena na vliv ionizujícího záření (v rámci obecných fyzikálních vlivů) a na vybrané mechanické vlivy.

2.1. IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Od roku 1896, kdy Antoine Henri Becquerel objevil jev, kterému později Marie Curie Skłodowska dala jméno radioaktivita, uběhlo již přes 120 let, a během 20. století ovlivnila vývoj lidstva do takové míry, že v dnešní době nachází využití v energetice, zdravotnictví, zbrojním průmyslu, zemědělství, materiálovém inženýrství a mnoha dalších odvětvích.

Radioaktivita (z latinského radius – paprsek, activus – aktivita) je označení, poprvé použito na začátku minulého století pro děj, při němž dochází ke změně složení atomových jader určitých látek. Během této přeměny se nestabilní jádro s nevyváženým počtem protonů a neutronů mění na jádro jiného prvku, který je stabilnější než prvek předchozí. Tyto nestabilní prvky se souhrnně nazývají radionuklidy a jejich přeměna se řídí dle jasně daných pravidel rozpadového zákona, rozpadových řad a poločasu rozpadu, udávajících, na jaký prvek se radionuklid rozpadne a rychlost takového rozpadu.

Během něj vzniká jistý druh záření, jenž má schopnost ionizovat atomy jiné látky. Pro tuto schopnost ho dnes nazýváme jako záření ionizující. Ve stavební praxi je možné se s ním setkat v mnoha různých podobách, kterým je třeba porozumět, a

pochopit odlišnosti mezi jednotlivými typy záření, aby bylo možné navrhnout správnou materiálovou a tvarovou variantu stínící konstrukce.

2.1.1. TYPY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ionizujícího záření lze dělit dle vícero kritérií a to jak dle složení, působení, charakteristik nebezpečnosti, schopnosti procházet skrze materiály, či dle zdroje. Za základní faktor rozdělení je možné považovat, jak se záření chová v interakci s jinými látkami a jak dochází k samotné ionizaci těchto látek. V tomto ohledu uvažujeme dvě skupiny, a to záření **přímo ionizující** a **nepřímo ionizující**.

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi, schopných interagovat s látkami a odlučovat jejich elektrony (tedy je ionizovat) pomocí jejich větší kinetické energie. Mezi tyto částice patří například protony, elektrony, miony, piony, α a β částice.

Nepřímo ionizující záření je tvořeno částicemi, které tuto schopnost nemají, neboť jsou elektricky neutrálnější a jejich reaktivita se zasaženými látkami je výrazně nižší. Způsob, jakým ovlivňují další částice spočívá v excitaci sekundárních ionizujících záření, vznikajících předáním kinetické energie zasažené látce. Částice nepřímo ionizujícího záření jsou například neutrony, nebo fotony.

Během rozpadu radionuklidů vznikají různé varianty záření, lišících se od sebe vlnovou délkou, nebo složením. Dle těchto kritérií je možné jej dělit následovně:

- **rentgenové záření**

Záření s vlnovou délkou 10 nm – 1 pm, tvořené fotony s energií dostatečnou k odstřelení elektronu z atomu látky – ionizaci. Dle vlnové délky se dělí na:

- měkké rentgenové záření
 - záření s vlnovou délkou $\lambda = 10^{-8} - 10^{-10}$ m
- tvrdé rentgenové záření
 - záření s vlnovou délkou $\lambda = 10^{-10} - 10^{-12}$ m

- UV záření

Vlnění, jehož vlnová délka se pohybuje mezi 10 a 400 nm, podle které dělíme UV záření na tři podskupiny.

- UVA
 - $\lambda = 400\text{--}315\text{ nm}$
- UVB
 - $\lambda = 315\text{--}280\text{ nm}$
- UVC
 - $\lambda = 280\text{ nm}$ a méně

- α záření

Je tvořeno částicemi α , neboli ionty He^{2+} . Šíří se rychlostí přibližně 20 000 km/s, a ačkoliv má ionizační účinky poměrně vysoké, jeho schopnost prostupnosti materiálem je velmi nízká (účinky α záření je schopen odstínit například list papíru, či pouhá několikacentimetrová vrstva vzduchu). Nebezpečí pro člověka při působení toho záření tedy spočívá pouze při působení uvnitř těla na mnohem citlivější tkáň.

- β záření

Záření o výrazně vyšší rychlosti a větší pronikavosti, než jaká je u α záření. Dosahuje rychlosti až 270 000 km/s. Dle náboje jej dělíme na:

- β^- záření
 - Tvořené letícími záporně nabitými β částicemi – elektrony, emitovanými rozpadem neutronu na proton, neutron a antineutrino, při kterém z jádra unikne pouze záporně nabitá část.
- β^+ záření
 - Tvořené letícími kladně nabitými β částicemi – pozitrony. Tento typ záření je však výrazně vzácnější, protože k němu dochází pouze v podmínkách umožněných prostředím silného urychlovače částic.

- γ záření

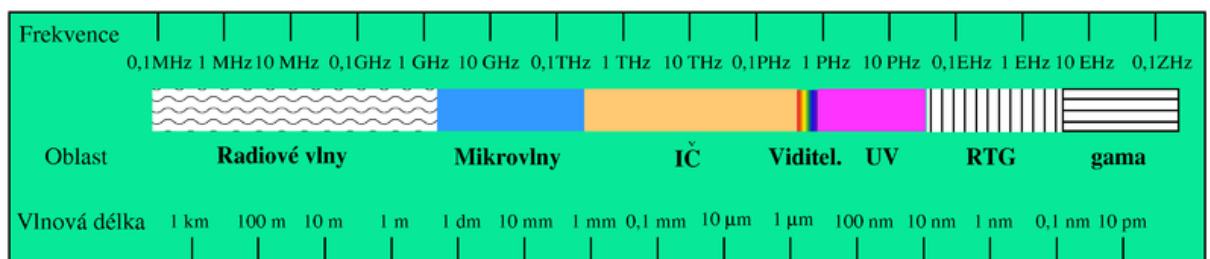
Jedná se nejpronikavější z typů záření. Vzhledem k tomu, že je tvořeno energetickými fotony neschopných přímé ionizace, jeho pronikavá schopnost je tak velká, že není možné jej plně odstínit.

- neutronové záření

Záření tvořené proudem rychle letících neutronů, které nemají vlastní náboj. Díky tomu mají velmi vysokou pronikavost, neboť neionizují látku přímo. Neutrony mohou s jádrem reagovat pružnými a nepružnými srážkami.

- **Pružné srážky** – Jádrům stíracích atomů je předávána část kinetické energie, čímž se neutron zpomalí. Zpomalení je tím větší, čím je hmotnost jader bližší hmotnosti neutronu. Při pružné srážce velmi lehké částice s částicí velmi těžkou k předání energie téměř nedochází.
- **Nepružné srážky** – Srážky nezpomalující proud neutronů. Je tedy větší šance, že se při srážce budou z jader uvolňovat nabitě částice.

[1]



Obr. 2.1. - Rozdělení typů záření dle vlnové délky. [2]

2.1.2. VLIV ZÁŘENÍ NA LIDSKÉ TĚLO

Ačkoliv jedním z nejdůležitějších uplatnění ionizujícího záření je jeho použití ve zdravotnictví, je nutné přihlídnout k riziku jeho negativních vlivů na lidské tělo v dávkách neočekávaných a nekontrolovaných. Tento vliv na zdraví je hlavním důvodem, proč se upravují konstrukce budov, ve kterých se nachází zdroj tohoto typu záření. Tedy upravit konstrukci tak, aby bylo zabráněno neplánovanému ozáření osob. Jak je popsáno v kapitole 2.1.1., ionizující záření ovlivňuje atomy zasažené látky, a to změnou počtu elektronů obsažených v elektronovém obalu atomu. Na základě toho je

možné si představit změnu lidské tkáně poté, co ionizující záření ve větší míře dopadne na atomy tvořící její strukturu.

Buňky, jakožto základní stavební kámen lidského těla, se skládají z molekul, stejně jakákoliv jiná hmota. Vlivem záření schopného způsobit ionizaci atomů dochází k rozpadu struktury a buňka tím ztrácí svou přirozenou funkci. „Na mikroskopické úrovni dojde k porušení důležitých biochemických procesů uvnitř buněk, např. proteosyntézy, nebo fosforylace. Takto poškozené buňky zanikají, případně dochází k mutaci jejich DNA. Makroskopicky se změny projeví porušením tkáně a funkce orgánů. To nakonec vede ke vzniku nemoci z ozáření.“ [3] Stručně se tedy dá říct, že mohou nastat dvě situace. Buňka zahyne, nebo značně změní své chování. Podle toho se dají škodlivé účinky radioaktivního záření rozdělit na dvě varianty.

- **stochastické účinky**

Tyto účinky jsou patrné v delším časovém horizontu a jsou velmi náhodné. Vznikají jako následek genetické mutace, která většinou způsobuje nekontrolované rychlé množení buněk (rakovinu).

- **deterministické účinky**

Na rozdíl od stochastických účinků tato varianta nepodléhá náhodě a její vliv je jasně lineárně vázán na dávku ozáření. Typicky se tyto účinky projevují jako akutní radiační syndrom.

2.1.3. OCHRANA PROTI IONIZUJÍCÍMU ZÁŘENÍ

Teorie stojící za ochranou uživatelů budov a přístrojů (mnohdy také velmi citlivých na záření) je ve své podstatě velmi prostá. Vzhledem k tomu, že záření se skládá z mnoha částic (pro tento případ uvažujme například elektrony), letících vysokou rychlostí prostorem, nejlepší šance ochrany člověka je překážka, jež v sobě bude obsahovat dostatečné množství elektronů, do kterých by elektrony záření mohly narazit. Pomocí této úvahy lze vyjádřit poměrně jednoduchá závislosti účinnosti odstínění záření materiálu. **Stínící účinky materiálu rostou přímo úměrně s jeho hmotností.** Ta je totiž závislá na počtu protonů, nalézajících se uvnitř atomového jádra dané látky. S rostoucím počtem protonů v jádře stoupá s ohledem na zachování

neutrality látky i počet elektronů v obalu atomu, schopných odstínit letící částice ionizujícího záření. Tuto schopnost popisuje veličina **polotloušťka**, jinak označovaná jako HVL (half value layer).

Tato veličina popisuje tloušťku, při které má materiál šanci snížit hodnotu intenzity záření na polovinu původní hodnoty.

Výsledná intenzita záření se tedy dá vyjádřit jako:

$$I = \frac{1}{2^x} I_0 \quad (2.1)$$

kde x se rovná podílu délky uražené zářením v materiálu a jeho polotloušťky. [4]

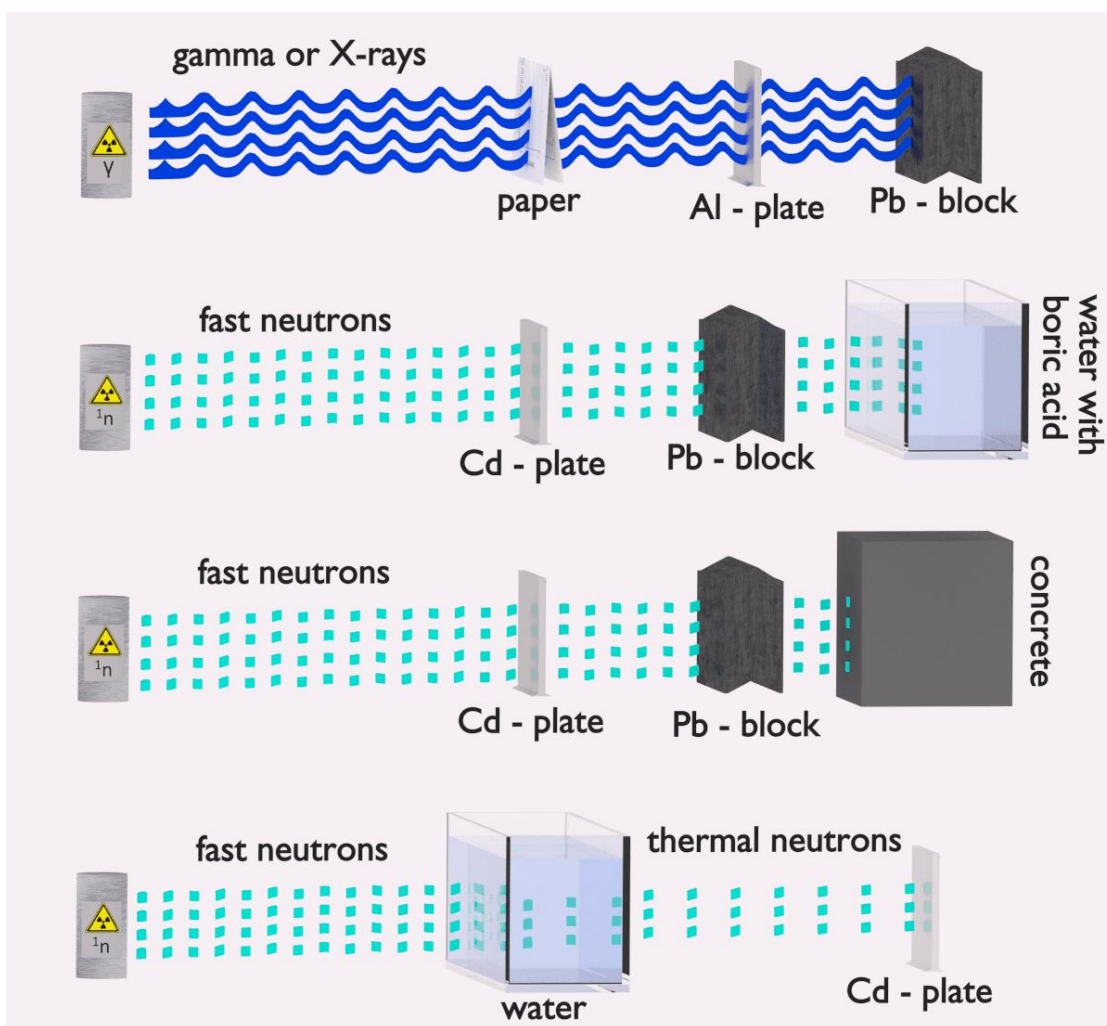
materiál	Iridium - 192	Kobalt - 60
	polotloušťka [mm]	polotloušťka [mm]
běžný beton	44,5	60,5
ocel	12,7	21,6
olovo	4,8	12,5
wolfram	3,3	7,9
uran	2,8	6,9

Tab. 2.2. – Polotloušťka různých materiálů. [5]

Alternativou k polotloušťce (HVL) je tzv. tenth value layer (TVL), která analogicky popisuje tloušťku, při které má materiál šanci snížit hodnotu intenzity záření na desetinu původní hodnoty.

Tento postup však nemusí být vždy správný. Je totiž důležité přihlédnout k přesnému typu záření, proti kterému je stínící konstrukce navrhována. Většina typů záření je tvořena nabitými částicemi, či fotony a nejúčinnější metodou na jeho odstínění je tedy návrh konstrukce o dostatečné hmotnosti. Proces stíní neutronového záření je však jiný. Protože neutrony nenesou žádný náboj, neztrácejí energii přímou ionizací atomů a jejich schopnost prostupovat materiálem je tedy velmi vysoká. [1] Pro jejich odstínění se přistupuje k tzv. zpomalení pružnými srážkami. Vysoká kinetická energie jednotlivých neutronů musí být rozprostřena mezi částice stínícího média a tento přenos je nejefektivnější u látek s velmi lehkými jádry (v kontrastu se stíněním běžných záření). Lehké atomy převezmou část energie neutronu, elasticky se začnou rozptylovat a při každé srážce přebírat kinetickou energii jednotlivých

neutronů. Pro představení si tohoto procesu je vhodné zmínit poměrně typickou analogii se srážkou dvou míčů o velmi rozdílných hmotnostech. Pokud se extrémně lehký míč srazí s extrémně těžkým, přenos kinetické energie je velmi malý, neboť lehký míč se od těžkého pouze odrazí. Pokud se však hmotnost druhého míče blíží prvnímu, míra předané energie se výrazně zvyšuje. Lze tedy říct, že čím bližší je hmotnost částic stínící konstrukce k hmotnosti neutronů, tím efektivněji konstrukce záření zpomaluje a stíní. Běžně se tedy aplikují materiály, obsahující mnoho vázané vody.



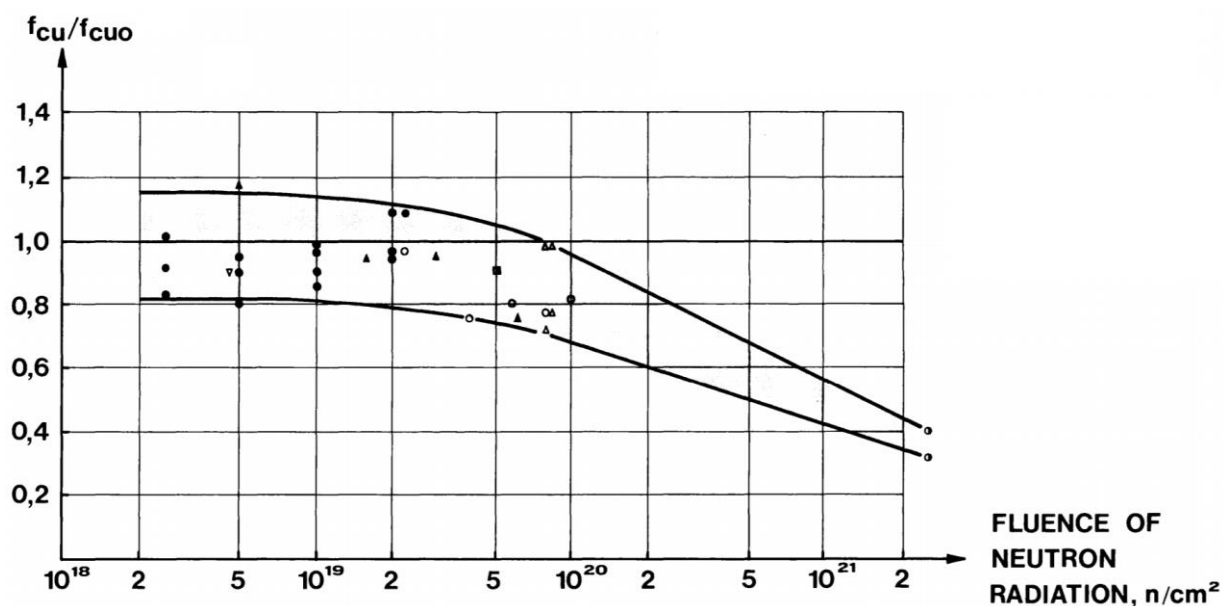
Obr. 2.3. – Porovnání efektivity různých sestav stínících konstrukcí. [6]

2.1.4. VLIV IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA KONSTRUKCI

Ionizující záření má negativní vliv nejen na lidi v okolí, ale i na stínící konstrukci samotnou. Pokud se však jedná o řešení vlivu na konstrukci, který by výrazně ohrožoval její životnost, je řeč o zdroji neutronového a gama záření v takové síle a délce působení, nedosažitelného „běžnými“ přístroji používanými v nemocničních zařízeních a vědeckých pracovištích. V tomto případě se jedná o zdroje typu jaderných elektráren, či skladů radioaktivního odpadu.

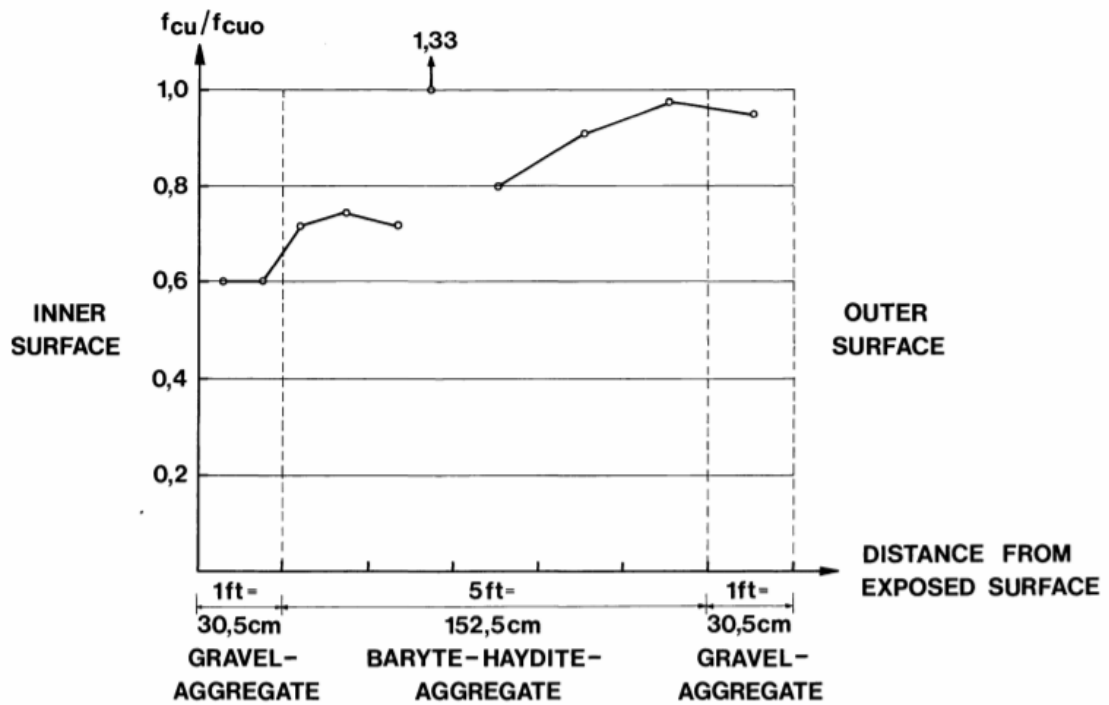
- pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se vlivem dlouhodobého ozařování neutrony snižuje, a to nejenom vlivem zahřátí konstrukce. Od určité míry ozáření, pohybující se kolem 10^{19} n/cm² (neutronů, procházejících plochou centimetr čtverečný), je patrný pokles pevnosti, způsobený postupným narušováním struktury cementového pojiva. (viz. obrázek 2.4.)



Graf. 2.4. – Pevnost betonu v tlaku vzhledem k míře ozáření. [7]

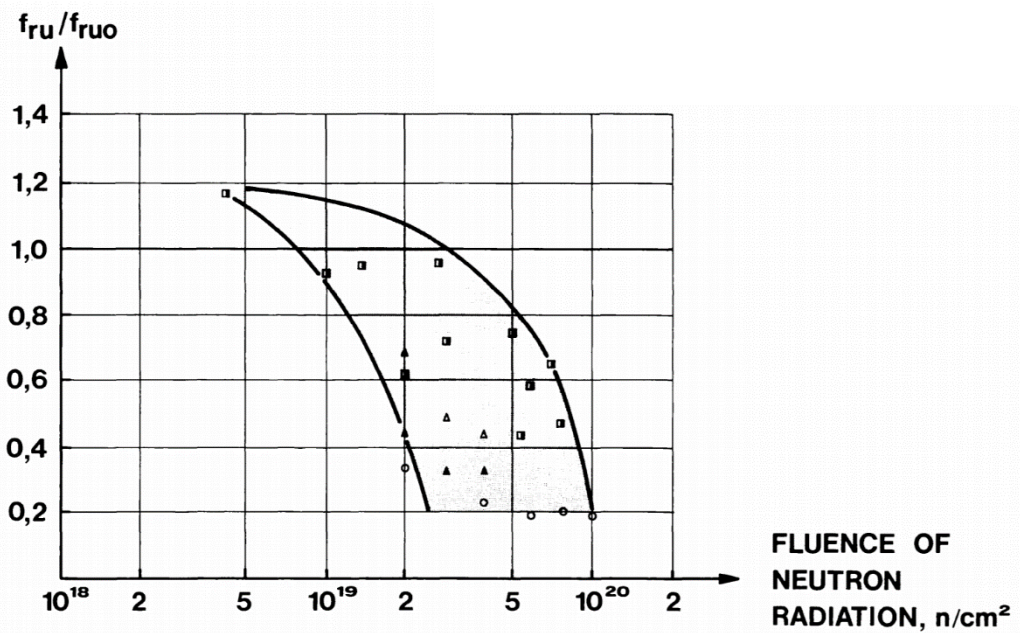
Byl zjištěn značný rozdíl v pevnosti osm let starého betonu jaderného reaktoru mezi stranou vnitřní stranou, vystavenou velkému množství neutronového záření a stranou vnější, vystavené odstíněnému množství. Vnitřní strana vykazovala pokles pevnosti až na 60 % původní hodnoty.



Graf 2.5. – Rozdíl pevnosti betonu na přímo ozařované straně konstrukce a straně vnější. [7]

- **pevnost v tahu**

Pevnost v tahu vykazuje pod vlivem záření ještě dramatictější pokles, než jaký je viditelný u pevnosti v tlaku.

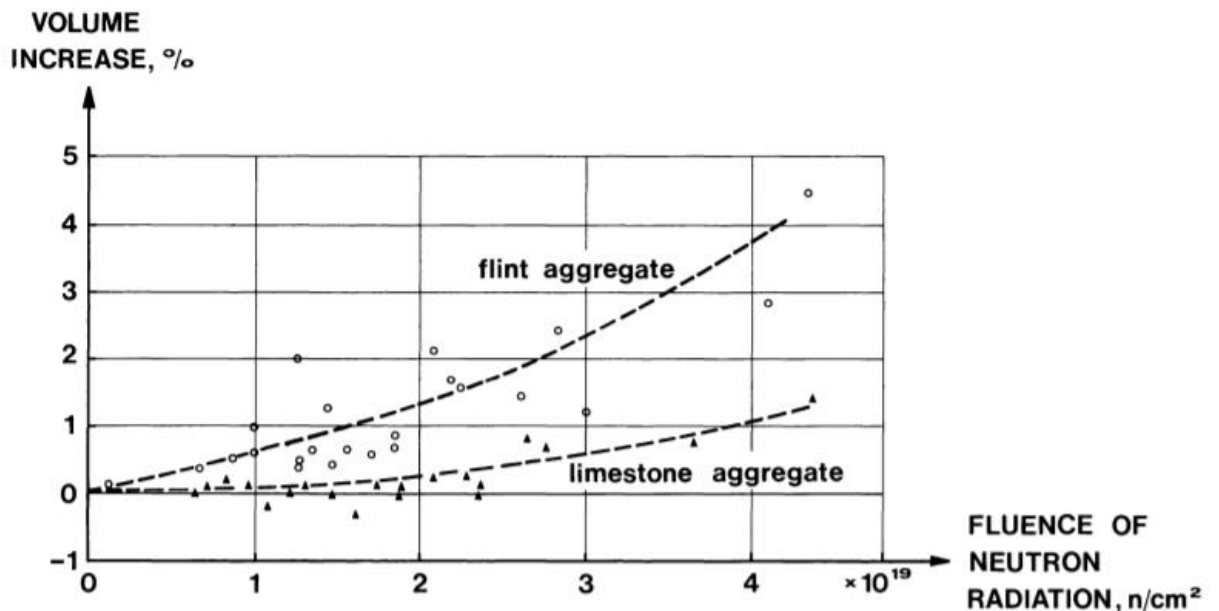


Graf 2.6. - Pevnost betonu v tahu vzhledem k míře ozáření. [7]

- deformace a teplota

U konstrukce vystavené neutronovému záření dochází k nárůstu teploty a objemu, avšak podle měření prováděných na ozařovaných, nebo zahříváných vzorcích je vidět, že u ekvivalentního zahřátí betonu nedochází k tak výrazným objemovým změnám. Lze tedy usoudit, že nárůst objemu ozařovaných vzorků není vázán pouze na teplotně objemovou změnu, ale zároveň i na změny ve struktuře betonu. [7]

Zahřívání betonu vlivem ozáření je poměrně velký problém. Mnohdy totiž konstrukce může dosáhnout teplot až 250 °C, což je hodnota nebezpečná pro životnost konstrukce i bez vlivu ozáření.



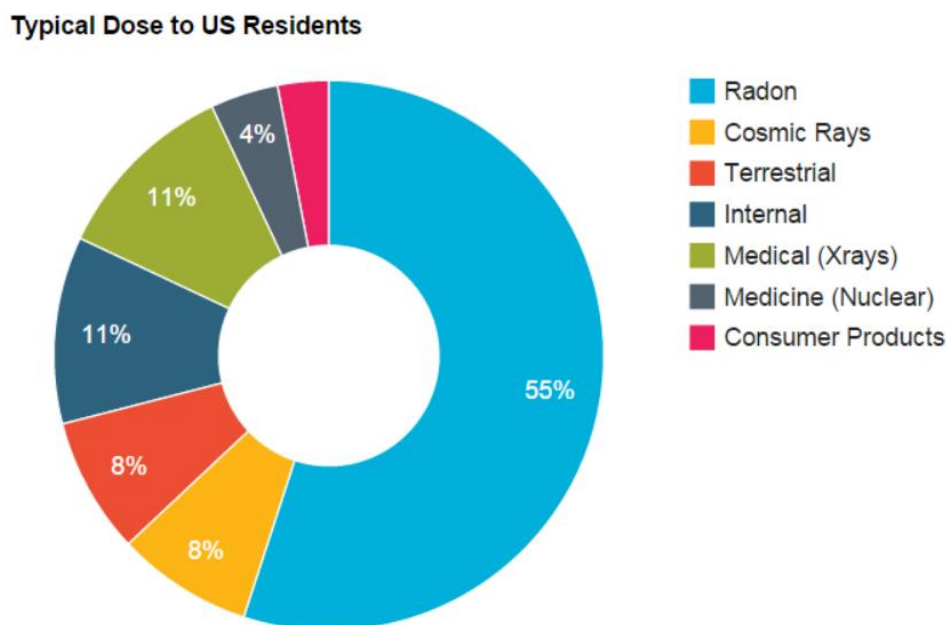
Graf 2.7. – Změna objemu betonu vzhledem k míře ozáření. [7]

2.1.5. ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Radiace je označením pro velmi široké spektrum typů energie vyzařované v prostoru. Mnohdy si neznalá veřejnost může myslet, že pod pojmem radiace se skrývá něco nebezpečného, před čím se musí chránit, ale jak lze vidět na obrázku 2.1., je to označení i pro mnoho neškodných typů záření, jako je například i viditelné světlo.

Zdrojů ionizujícího záření, jako velké podskupiny veškerého záření na planetě, je poměrně velké množství. Přístroje využívající záření však nejsou dominantním zdrojem působícím na lidi. Podle dat oddělení jaderného inženýrství na univerzitě

v Berkeley představuje záření z lékařských zařízení pouze 11 % a 4 % celkové typické dávky běžného člověka (pro rentgen a další lékařské přístroje). [11]



Obr. 2.8. – Procentuální zastoupení různých zdrojů v typické dávce ozáření běžného člověka. [8]

Veškeré zdroje ionizujícího záření lze rozdělit do dvou větších skupin.

- **Přírodní zdroje ionizujícího záření**

Zdroje tvořící již od počátků planety Země jistou úroveň radiace, jejíž přítomnost je pro nás v dávkách vyskytujících se pod vrstvou ochranné atmosféry naprosto přirozená. Patří mezi ně určité druhy **kosmického záření**, **slunečního záření**, a také volně se vyskytující **přírodní izotopy** (typicky například radioizotopy uhlíku, díky jejichž známému poločasu rozpadu jsme schopni datovat stáří určitých předmětů).

- **Umělé zdroje ionizujícího záření**

Zdroje schopné účelně a pod kontrolou emitovat záření v dávkách výrazně vyšších, než jaké jsou běžné z přírodních zdrojů. Jedná se o zařízení sloužící v energetice, ve zdravotnictví, ve zbrojním průmyslu, nebo vědě.

- zobrazovací přístroje

Typická nemocniční zařízení sloužící k diagnostice pacientova stavu. Pomocí emitoru (rentgenky) jsou vyzařovány paprsky procházející pacientem, které následně dopadají na detektor, stínítko, či jiné médium, podobně jako ve fotoaparátech dopadá světlo na film. S tím rozdílem že v tomto případě se nejedná o prosté viditelné světlo, nýbrž o rentgenové záření. Rentgenka se skládá zpravidla z dvou elektrod a wolframového terče, mezi kterými jsou vlivem vysokého napětí urychlovány elektrony. Ty při dopadu na anodu vyzařují rentgenové záření.

Nejedná se však pouze o nemocniční zařízení. Rentgenové paprsky nacházejí uplatnění i ve vědě a průmyslu. V posledních několika dekádách se setkáváme s bezpečnostními rentgeny sloužícími ke kontrole zavazadel a výjimečně i osob. Rentgen se používá i při defektoskopii pro zjištění vad tlakových nádob a dalších možných strojírenských zařízení a výrobků.

- radioterapeutické přístroje

Radioterapie je druh léčby nádorových onemocnění využívající úmyslného ozáření pacienta. To má za následek zahubení rychle se množících buněk (primárně rakovinových, ale neúmyslně například i vlasových. Proto je u pacientů podstupujících radioterapii častá ztráta vlasů). Radioterapie má mnoho variant a podob specializujících se na různé typy nádorových onemocnění. Je dnes považována za nejefektivnější metodu léčby tohoto druhu onemocnění.

- gama – nože

Přístroje, využívající velmi přesného paprsku záření izotopu kobaltu⁶⁰, jehož kombinace z velkého množství zdrojů se kříží v určitém bodě, kde je nastavena léze v hlavě pacienta. Umožňují tak léčit patologické jevy v hlavě bez potřeby otevření lebky pacienta. [9]

Z dalších zdrojů rentgenového záření je vhodné zmínit:

- scintigrafická zařízení
- jaderné reaktory
- jaderné zbraně

2.2. ÚPRAVY KONSTRUKCÍ VZHLEDEM K PŮSOBENÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Způsob, jakým upravujeme konstrukce je pevně určen v právních předpisech České republiky. Vyhláška ministerstva zdravotnictví přesně definuje, v jaké míře je nutné stínit určité druhy záření a jak musí být uzpůsobeny prostory, ve kterých se zařízení emitující ionizující záření nacházejí. Z těchto předpisů je pro navrhování stínících konstrukcí, kromě určení orgánů pověřených schválením projektové dokumentace, však nejdůležitější následující část: „*Stavební materiál konstrukce stěn, zástěn a krytů a vybavení a vnitřní rozmístění pracoviště musí být voleny tak, aby při plánovaném způsobu práce se zdroji záření (čítajíc v to i předvídatelné nehody) byla zajištěna dostatečná ochrana osob na pracovišti a osob pobývajících v blízkosti pracoviště a aby podle povahy pracoviště byla umožněna co nejrychlejší a nejúčinnější očista pracoviště a osob od radioaktivních látek.*“ [10]

V příloze této vyhlášky se dále uvádějí hygienické směrnice, definující nejvyšší přípustné hodnoty ionizujícího záření. 6. bod přílohy 1 této vyhlášky stanovuje: „*Ochranu na pracovištích se zdroji záření je nutno projektovat tak, aby průměrná týdenní dávka záření při provozu byla co nejnižší a dosáhla nejvýše 0,1 rem.*

Ochranu trvalých pracovišť sousedících s pracovišti se zdroji záření je nutno projektovat tak, aby dávky záření na pracovních místech, kde se zdržují osoby méně než jednu třetinu celkové týdenní pracovní doby, nepřesáhly 5 mrem za směnu, a na místech, kde se zdržují osoby více než jednu třetinu celkové týdenní pracovní doby, 1,7 mrem za směnu.

Ochranu osob bydlících v blízkosti pracoviště se zdroji záření je nutno projektovat tak, aby dávkové intenzity nepřekročily v kterémkoli místě obytných prostor hodnotu 1 mrem za den.“ [4]

pozn. Ačkoliv je tato vyhláška stále platná, jednotka rem se dnes již pro popsání hodnoty dávkového ekvivalentu ionizujícího záření nepoužívá. Byla nahrazena jednotkou Sievert. 100 rem = 1 Sv

Jak je nastíněno v kapitole 2.1.3., základní princip ochráníení uživatelů a přístrojů uvnitř budov proti zdroji ionizujícího záření spočívá v umístění stínícího média (ve formě konstrukce o dostatečné hmotnosti) mezi chráněný prostor a emitor záření. Je tedy patrné, že na umístění zařízení emitujících toto nebezpečné záření je nutné myslet již při počátku návrhu konstrukce, při samotné úvaze nad konstrukčním systémem.

K úpravě konstrukce pro zajištění dostatečných stínících účinků se přistupuje dvěma způsoby.

- zvětšení tloušťky konstrukce
- zvýšení objemové hmotnosti materiálu

2.2.1. ZVĚTŠENÍ TLOUŠŤKY KONSTRUKCE

Zvětšení tloušťky konstrukce je prvním a pravděpodobně tím nejjednodušším řešením při stínění nebezpečného záření. Návrh zvýšení tloušťky konstrukce spočívá v podstatě pouze na známé polotloušťce materiálu (viz. Kapitola 2.1.3.), očekávané intenzitě záření, emitované uvažovaným zařízením a požadované hodnotě odstíněného záření, stanovené hygienickými předpisy. Pokud vycházíme z výrazu (2.1)

$$I = \frac{1}{2^x} I_0 \quad (2.1)$$

kde

$$x = \frac{d}{lp} \quad (2.2)$$

lze vyjádřit tloušťku materiálu následovně:

$$I = \frac{1}{2^{\frac{d}{lp}}} \cdot I_0 \quad / \cdot 2^{\frac{d}{lp}} \quad /: I \quad (2.3)$$

$$2^{\frac{d}{lp}} = \frac{I_0}{I} \quad (2.4)$$

následným zlogaritmováním

$$\log_2 2^{\frac{d}{lp}} = \log_2 \frac{I_0}{I} \quad (2.5)$$

$$\text{pro } \left[2^{\frac{d}{l_p}} ; \frac{I_0}{I} \right] \neq 0$$

$$\frac{d}{l_p} \cdot \log_2 2 = \log_2 \frac{I_0}{I} \quad (2.6)$$

získáváme finální výraz pro určení tloušťky materiálu

$$d = \log_2 \frac{I_0}{I} \cdot l_p \quad (2.7)$$

d = tloušťka materiálu [m]

I_0 = intenzita záření ze zdroje [Sv, či ekvivalentní jednotky]

I = povolená intenzita záření v chráněném prostoru [Sv, či ekvivalentní jednotky]

l_p = polotloušťka materiálu [m]

V praxi je tento výpočet zpravidla pouze ujištěním o správnosti návrhu, prováděného ve většině případů na základě technických údajů dodávaných výrobcem. Ačkoliv technické listy daných zařízení nebývají volně přístupné, většinou v nich výrobce uvádí požadovanou tloušťku a objemovou hmotnost betonové konstrukce potřebné k odstínění produkovaného záření.

Pozn. Pro účely stavební praxe lze vycházet z předpokladu, že při vrstvení jednotlivých materiálů je vztah mezi jejich stínícími vlastnostmi komutativní. Výsledný efekt stínění lze tedy počítat pouze jako součet jednotlivých vrstev. Vzhledem k započítání bezpečnostních koeficientů lze vliv štěpení a excitace sekundárního záření ve větší hloubce konstrukce zanedbat.

Pokud jsou v objektu navrhovány velmi masivní konstrukce (u stínících stěn můžeme hovořit o tloušťkách až 2 000 mm) je potřeba, aby projektant a následně technolog provádění stavby věděl o problémech spjatých s takovým návrhem. Vzhledem k tomu, že tuhnutí betonu je exotermický děj, je důležité velmi bedlivě sledovat vývoj hydratačního tepla uvnitř konstrukce, které kvůli tloušťce hůře uniká do prostoru, čímž mohou vzniknout dva hlavní problémy. Vznik teplotních trhlin a horší hydratace betonu. Kvůli povaze účelu takové konstrukce je naprosto nepřijatelné, aby uvnitř byly nehomogenní oblasti se špatně ztuhlým betonem, většími trhlinami, či

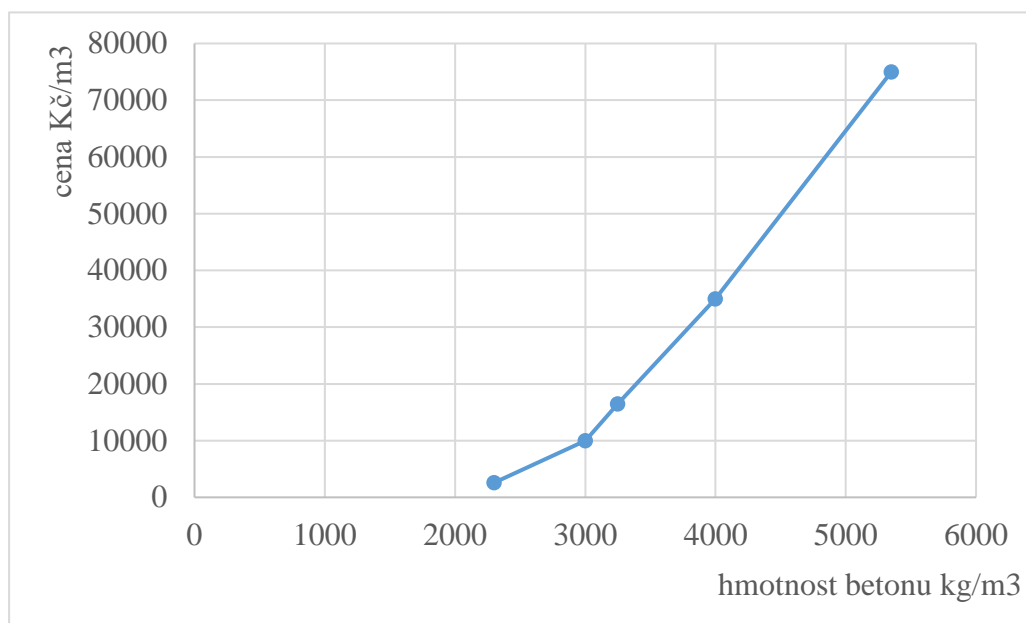
jinými problémy technologické povahy. U masivních konstrukcí je tedy velmi důležité navrhnout správnou směs betonu o vhodné jemnosti mletí cementu, vhodných přísadách, a následně o takové prvky správně pečovat během prvních několika dnů po provedení betonáže, kdy je vývin hydratačního tepla nejvyšší. [11]

2.2.2. ZVÝŠENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI MATERIÁLU

Objemová hmotnost betonu může nabývat hodnot od cca 400 kg/m³ do cca 6 000 kg/m³. Hodnota závisí nejvíce na typu a množství kameniva použitého na výrobu betonu. [12] Právě v kamenivu je největší možnost, jak zasáhnout do objemové hmotnosti, respektive do schopností betonu snížit intenzitu záření jím procházející. Dle hodnoty jejich objemové hmotnosti je můžeme dělit do čtyř základních skupin:

- **lehký beton (LWC – light weight concrete)**
 - $\rho = 800 - 2\,000 \text{ kg/m}^3$
- **běžný beton**
 - $\rho = 2\,000 - 2\,600 \text{ kg/m}^3$
- **těžký beton (HC – heavy concrete)**
 - $\rho = 2\,600 - 4\,000 \text{ kg/m}^3$
- **extrémně těžký beton**
 - $\rho = 4\,000 \text{ kg/m}^3$ a více

Důležitým faktorem při návrhu těžkého betonu je cena, která zpravidla stoupá s objemovou hmotností použitého kameniva (kvůli omezenější dostupnosti materiálu a složitější přípravě). Mnohdy může být preferováno investorem zesílení konstrukce z běžného betonu i za cenu zmenšení možné podlahové plochy.



Graf. 2.9. – Závislosti ceny betonu na jeho objemové hmotnosti. [13]

Těžkých betonů je velké množství a zpravidla je nazýváme dle použitého plniva.

- obyčejný beton

Obyčejný beton s běžným těžným, či říčním kamenivem dosahuje objemové hmotnosti až 2 500 kg/m³, což samo o sobě je poměrně velká hodnota, zajišťující při určité tloušťce konstrukce dostatečnou ochranu před mnoha zdroji nebezpečného záření.

- barytový beton

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších typů těžkého betonu v České republice. Jako plnivo je použit **baryt** (BaSO₄), jinak také nazýván jako **těživec**, což je minerál s hustotou až 4500 kg/m³. Těží se v Markušovicích na Slovensku, popřípadě se do Česka dováží z Číny, kde barytové kamenivo dosahuje mnohem větší čistoty (až 90 % BaSO₄). [13] Jeho použitím se dosahuje objemové hustoty výsledného betonu okolo 3700 kg/m³. Nejčastěji se používá na odstínění záření z radiologických vyšetření, avšak většinou v případě rentgenů s výkonem do 500 kV. Pokud se jedná o zařízení s vyšším výkonem, baryt se používá do betonu ve směsi s litinovou drtí pro ještě větší nárůst objemové hmotnosti.

- **limonitový beton**

Beton, jehož hlavní složkou plniva je **limonit** ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Tento materiál je směsí několik minerálů a oxidů železa (např. lepidokrokit a goethit). Má nahnědlou barvu a hustotu dosahující až $4\,300\text{ kg/m}^3$. Ta se však velmi různí, a to podle množství obsažené vody v limonitu. Zmíněný obsah vody je charakteristický pro limonit a beton z něj vyrobený. Právě z důvodu vysokého obsahu vodíku totiž limonitový beton nachází uplatnění v prostorech vystavených záření tvořeným proudem rychle letících neutronů. [13]

- **magnetitový beton**

Magnetit (Fe_3O_4), používaný na výrobu magnetitového betonu, je železná ruda dosahující nejvyššího procenta obsahu železa (až 72 %). Má tedy poměrně vysokou hustotu okolo 5200 kg/m^3 . Tento nerost, nazývaný u nás také jako **magnetovec**, se těží v Krušných horách, v oblasti kolem Kutné hory a ve Vlastějovicích nad Sázavou. Beton zhotovený z magnetitu dosahuje objemové hmotnosti 3400 až 4000 kg/m^3 . [14]

- **ilmenitový beton**

Hlavní složkou ilmenitového betonu je titan, dostávající se do směsi betonu v podobě minerálu nazývaného **ilmenit** (FeTiO_3). Navzdory nižší hustotě titanu oproti jiným železným rudám, tento minerál dosahuje hustoty okolo 4700 kg/m^3 . Železo a titan zaujímají přibližně po jedné třetině celkové hmoty minerálu. Finální beton dosahuje objemové hmotnosti okolo 3500 kg/m^3 .

- **hematitový beton**

Hematit (Fe_2O_3), jinak také nazývaný **krevel**, je oxid železa typicky rozpoznatelný podle cihlově červené barvy, obsahující až 70% železa. Jedná se o levnější variantu železné rudy pro použití při výrobě těžkých betonů, dosahujících objemové hmotnosti až 3500 kg/m^3 . [14]

- **ferofosforový beton**

Ferofosforový beton je vyráběn z vedlejších produktů výroby fosforu souhrnně nazývaných **ferofosfory**. Jedná se o sloučeniny železa a fosforu (FeP , Fe_2P), které jsou

charakteristické vysokou objemovou hmotností. Tyto sloučeniny se používají pro výrobu betonu o objemové hmotnosti do 4800 kg/m³. [14]

- **Železo – portlandský beton**

Tato velmi těžká varianta betonu se vyrábí přidáním železa do směsi ve formě litinové drti, sekaného železa, broků, či jiných drobných částic železa. Výsledný beton dosahuje velmi vysokých objemových hmotností, a to dle množství přidaného železa, až 6000 kg/m³. Ačkoliv jde o cenově levnější a efektivnější variantu těžkých betonů, je vhodnější uvažovat o variantě betonu s použitím těžšího kameniva. Železoportlandský beton je totiž velmi náchylný na technologii betonáže. U stínících konstrukcí je potřebné, aby byly dokonale homogenní, jednotlivé plnicí složky byly dokonale distribuovány v celém objemu prvku a stejně tak je nepřijatelné, aby v konstrukci vznikaly jakékoliv anomálie a dutiny. U těžkých betonů, a obzvláště u železoportlandského betonu je úroveň náročnosti zhutnění velmi vysoká a je velmi těžké zajistit, aby se přidané železné fragmenty neshlukovaly a nezůstávaly ve spodní části konstrukce.

- **uranový beton**

Uran, jako prvek hojně využívaný v energetice, se v jeho ochuzené formě používá také jako kamenivo do extrémně těžkých betonů. Dosahuje totiž výjimečných objemových hmotností 16 000 – 19 000 kg/m³ (dle jeho formy). Ochuzený uran se získává jako odpadní materiál při výrobě paliva do jaderných elektráren, a zpětně se využívá na výrobu vysoce efektivních stínících betonů, často využívaných na stínění záření jaderných reaktorů, či na uskladnění vyhořelého paliva. Pro výrobu tohoto betonu se nejdříve vyrábí speciální směs kameniva, označovaného jako **DUAGG** (depleted uranium aggregate), které má objemovou hmotnost až 8800 kg/m³. Toto kamenivo se už běžným způsobem přidává do betonové směsi s objemovou hmotností až 6400 kg/m³. Finální výrobek nese označení **DUCRETE**.

- **modifikované betony speciálního složení**

S ohledem na různé typy zařízení by se měla vhodně upravit stínící konstrukce. Ačkoliv jde většinou o případ, kdy rychle letící částice je nutné odstínit množstvím elektronů obsažených v materiálu (tedy použitím prvku s vysokým protonovým

číslem), mnohdy tato varianta není správná. Pokud se totiž jedná o variantu, kde záření je tvořeno proudem jiných částic (většinou neutronů, vyzařujících po srážce sekundární gama záření), je efektivnější použít materiál, jehož protonové číslo je naopak výrazně nižší. Zpravidla se tedy používají betony s velkým obsahem vázané vody, schopné neutrony výrazně zpomalit a následně efektivněji odstínit. [14]

- **Serpentinitový beton**

Serpentinit ($3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$) je metamorfovaná hornina, označovaná také jako **hadec**. Má výborné schopnosti ohledně zadržování vody, a to i ve vyšších teplotách (až $450\text{ }^\circ\text{C}$). [14] Ačkoliv tento druh betonu nemá vysokou objemovou hmotnost – 2100 kg/m^3 (tedy dokonce nižší, než běžný beton) vzhledem k velkému obsahu vázané vody je ideální pro odstínění neutronového záření, a to při kombinaci s použitím běžného betonu, který odstíní zpomalený proud neutronů. Serpentinitový beton je možné vyztužit litinovou drtí, či použitím dalšího těžšího kameniva, a azbest, obsažený v serpentinitu, používat pouze jako složku snižující rychlost neutronů.

- **Boritový beton**

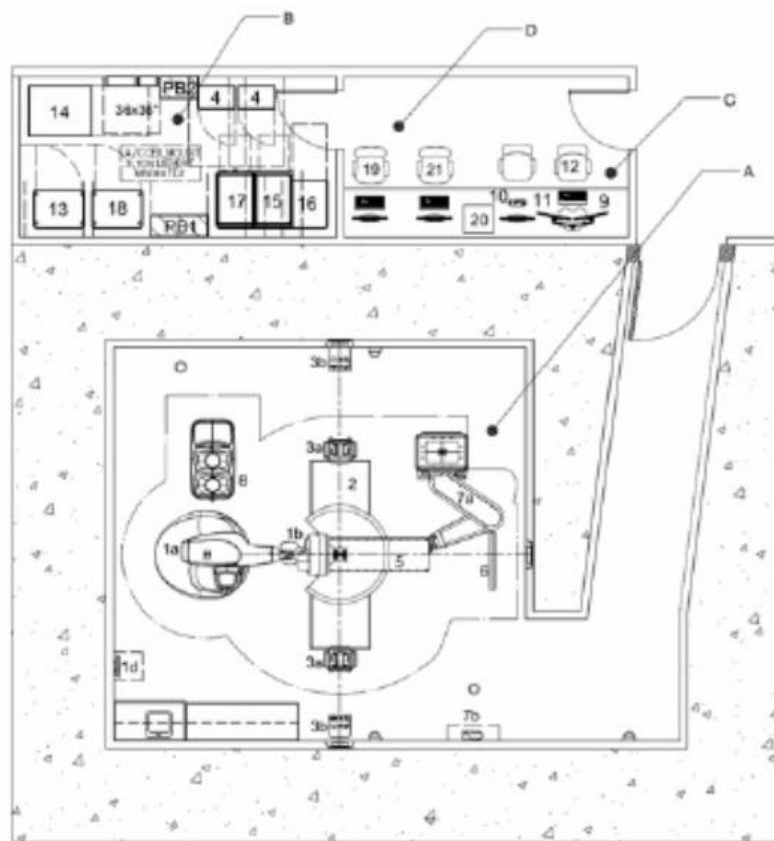
„Beton z těžkého kameniva a kameniva s obsahem vodíku zeslabuje záření gama a rychlé neutrony. Je však nutno ještě dosáhnout záchytu tepelných neutronů bez následného vzniku vysokoenergetického sekundárního záření gama. K tomu je nutno do betonu přidat prvky, které mají velký absorpční průřez pro tepelné neutrony s následnou emisí pouze nízkoenergetického záření gama. Vyhovujícím prvkem je izotop ^{10}B , který je obsažen v horninách, anebo se přidává jako umělá přísada (je ho obsaženo 19 % v přírodním bóru). Bór může být přidáván do obyčejného a těžkého betonu různými způsoby. Nejlépe je přidávat bór ve formě písku o velikosti zrna 0,5 až 2,5 mm. Doporučuje se podíl 0,9 až 1 % bóru vztaženo na hmotu betonu. S ohledem na stínící účinky není zvyšování obsahu bóru nad 1,5 % efektivní, navíc narůstají problémy s tuhnutím betonu.“ [14]

2.2.3. ÚPRAVY TVARU KONSTRUKCÍ

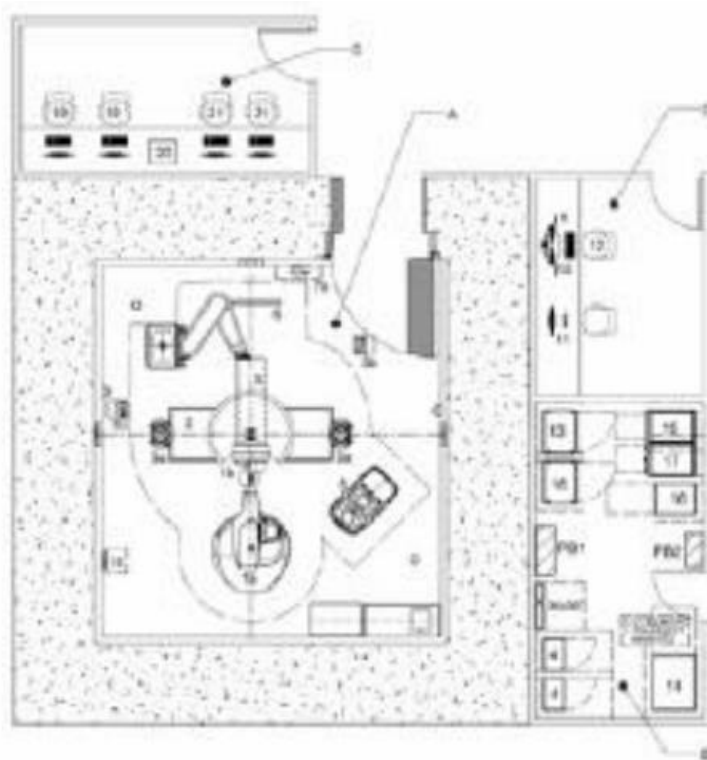
Případný lineární urychlovač umístěný v objektu nemá vliv pouze na tloušťku konstrukcí, či na jejich složení, ale také na jejich tvar. Záření unikající z prostoru daného zařízení má podobnu obrovského množství paprsků procházejících všemi body

okolní konstrukce. Stejně jako je nutné zajistit naprostou homogenitu materiálu, ze kterého jsou provedeny stěny a desky, je potřeba myslet i na tvar celkové konstrukce, její detaily a anomálie, a zajistit tak, aby paprsky byly odstíněny ve všech směrech v požadované míře. Typicky se v tomto případě jedná o návrh přístupu do místnosti, instalační prostupy a další možné diskontinuity konstrukce.

Tvar obálky se podřizuje dvěma, navzájem se vyvažujícím vlivům. Potřeba po dostatečném prostoru nutného pro provoz přístroje, bezpečnou manipulaci a zajištění dostatečně příjemné pracovní místnosti. A zároveň ekonomická stránka návrhu, hrající v tomto případě velkou roli, neboť každý kubický metr těžkého betonu je nejen drahý, ale zároveň z důvodu extrémní tíhy závažně ovlivňuje další části konstrukce.



Obr. 2.10. - Varianta vstupu 1 do obálky zařízení. [15]

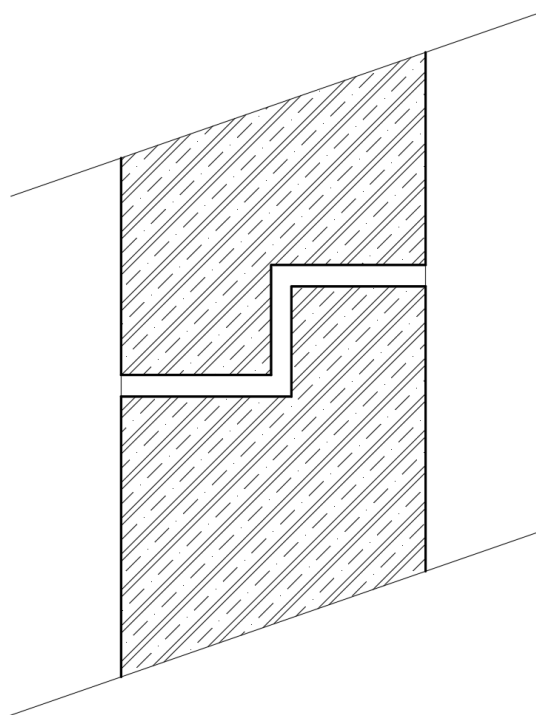


Obr. 2.11. - Varianta vstupu 2 do obálky zařízení [15]

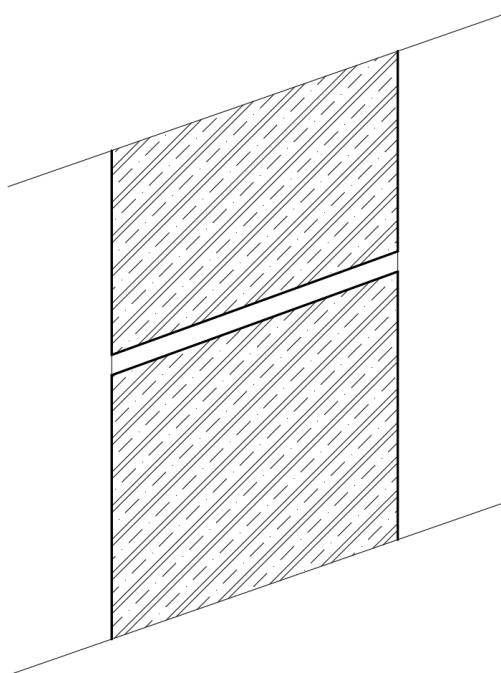
Na obrázku 2.10. je schéma vstupu do obálky radiologického zařízení (konkrétně gama nože Accuray CyberKnife M6), ve variantě, kde je vstup zajištěn pomocí subtilnějších dveří s chodbou odstupňovanou takovým způsobem, aby byla zajištěna dostatečná stínící tloušťka ve všech směrech. Na obrázku 2.11. je schéma stejné situace, avšak ve variantě, kde pro vytvoření vstupní chodby není dostatek prostoru a bezpečnost vstupu je tak zařízena masivnějšími dveřmi zajišťující dostatečnou ochranu (v obou případech se však jedná o dveře z velmi těžkého kovu, pravděpodobně olova).

Drobnější prostupy (většinou pro technické instalace, rozvody atp.) je také vhodné navrhnout způsobem zajišťujícím, že v žádné oblasti konstrukce nedojde k jejímu zeslabení a k možnému úniku radiace v nedovolené míře. Prvním krokem pro tento požadovaný stav je omezení počtu a velikosti prostupů na naprosté minimum. Zpravidla se tedy stavba upravuje tak, aby prostupy rozvodů byly tvořeny pouze pro zdroj energie zařízení, světla a dalších technických potřeb.

Dále se prostupy upravují do tvaru, znemožňujícího přímý průchod paprsků záření. Většinou jsou tedy prostupy vedeny skrze betonovou stěnu pod určitým úhlem, nebo je tvar prostupu prostup zalomen.



Obr. 2.12. – Schéma zalomeného prostupu.



Obr. 2.13. – Schéma prostupu vedeného pod úhlem.

V případě nutnosti světlíků, či jiných průzorů je použita výplň s přidaným obsahem olova, pro maximální možné snížení dávek radiace. I tak je ale vždy doporučeno pro uživatele těchto prostor využít ochranné vyztužené obleky a chrániče citlivých částí těla.

3. MECHANICKÉ POŽADAVKY

3.1. ROZDĚLENÍ MECHANICKÝCH POŽADAVKŮ A VLIVŮ NA KONSTRUKCI

Mechanika je základním kamenem všech technických oborů, a proto má posouzení vztahu mezi přístrojem a konstrukcí důležité místo při jakémkoliv návrhu. Z veličin popisovaných klasickou newtonovskou fyzikou, jako jsou například síla, rychlost, zrychlení, energie, hybnost nebo poloha, vyplývají vztahy popisující chování konstrukce od prvotní fáze výstavby, až do momentu demolice (v horším případě kolapsu). Veškerý vliv označený jako „mechanický“ působí na konstrukci svým přímým silovým působením. Zatížení ve formě objektu umístěného na konstrukci vytváří vnitřní síly uvnitř primárního nosného prvku (normálové, posouvací, momentové silové účinky). Tyto vnitřní síly lze s přihlédnutím na tvar a velikost prvku přepočítat na napětí, od kterého lze pomocí modulu pružnosti zjistit průhyb, či celkovou deformaci.

Dle třetího Newtonova pohybového zákona víme, že jestliže těleso A působí silou F_{AB} na jiné hmotné těleso B, pak těleso B působí na těleso A silou F_{BA} , která má hodnotu rovnou F_{AB} a má opačnou orientaci. [16] Je tedy evidentní, že při zkoumání mechanického vztahu mezi přístrojem a konstrukcí nelze počítat jen se zatížením vyvozeným umístěným zařízením, ale stejně tak je třeba dbát na silový efekt konstrukce, působící na zařízení. Ta totiž mohou být extrémně citlivá na jakékoliv pohyby, ať už kvůli velmi jemné kalibraci, či jisté křehkosti drobných obvodů a součástí.

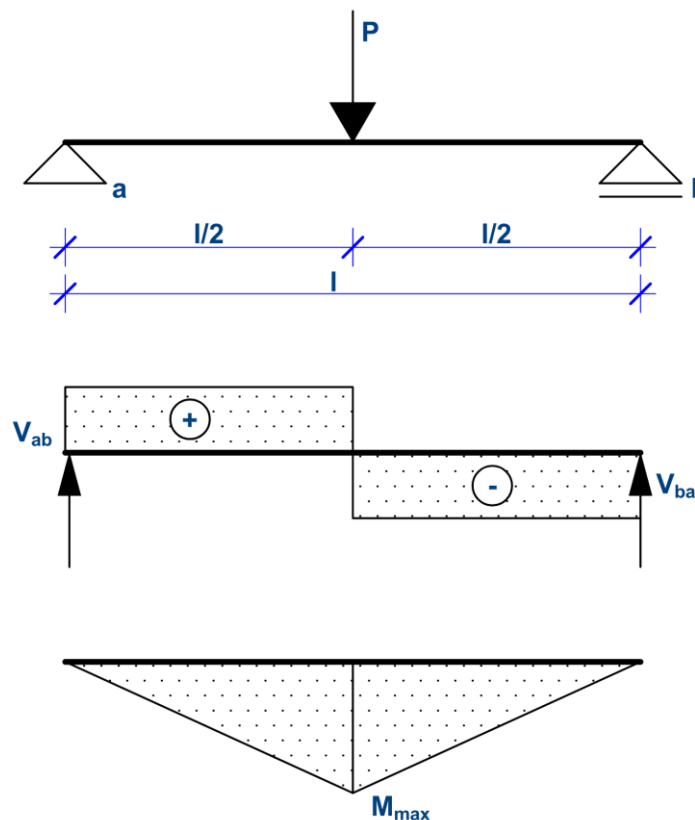
V rámci umístění zařízení do objektu je možné popsat více možných procesů spjatých se zatížením, ovlivňujících jak funkčnost zařízení, tak stav nosné konstrukce. Mezi ty nejdůležitější patří:

- Vliv osamělého břemene (tedy zařízení o značné hmotnosti) na konstrukci.
- Dynamické zatížení vyvozené zařízením způsobující kmitání konstrukce a spolu s ním vliv kmitání konstrukce na provozuschopnost a životnost zařízení.

- Průhyb desek, který může ovlivňovat kalibraci a přesnost zařízení, ale zároveň použitelnost konstrukce samotné.

3.1.1. OSAMĚLÉ BŘEMENO

Osamělé břemeno je varianta zatížení působící na konstrukci na menší ploše, do které soustředí veškerou svou hmotnost. V praxi takové břemeno může mít podobu jakéhokoliv objektu, či části konstrukce napojené na vodorovný prvek, do něhož přenáší zatížení.



Obr. 3.1. – Statické schéma prostého nosníku zatíženého osamělou silou [17]

Na nejtriviálnějším příkladu z oboru mechaniky konstrukcí (obr. 3.1.) lze vidět průběh posouvajících sil a momentu na prostém nosníku zatíženém osamělým břemenem v prostředku pole.

Osamělé břemeno o větší velikosti na nosníku však představuje podstatně větší problém ohledně dimenzování. Během běžné analýzy konstrukcí lze aplikovat globální výpočet pro účely dimenzování prvků. Tato metoda uvažuje pro stanovení účinků zatížení konstrukci jako celek, který proti zatížení působí. Na účinky tímto

způsobem vypočtené jsou následně navrženy a posouzeny jednotlivé průřezy prvků. V určitých oblastech konstrukce je bohužel tento postup nevhodný, neboť za určitých podmínek dochází k nelineárnímu rozložení poměrných přetvoření. V tom případě je nutné provést lokální výpočet. Podle typu rozložení poměrných přetvoření lze rozdělit jednotlivé části konstrukce na oblasti B a oblasti D. [18] [19]

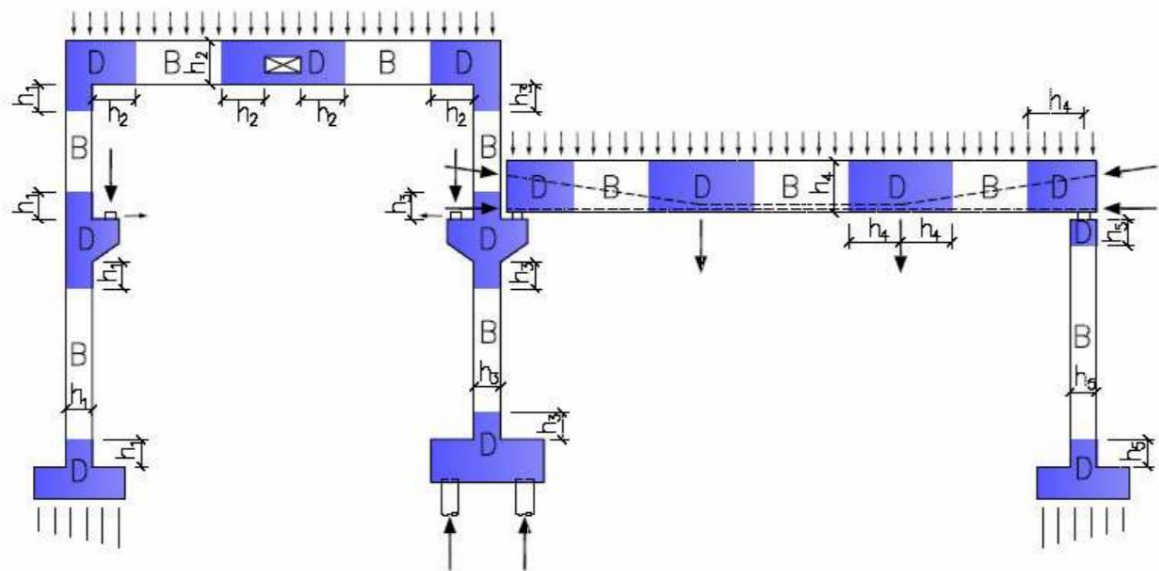
B oblasti – Oblasti s obvyklým chováním. Platí pro ně předpoklad chování ohýbaných prvků shodný s Bernoulli – Navierovou hypotézou ohybu (proto B oblasti – Bernoulli), či Kirchoff – Loveovou teorií z ní derivovanou pro aplikaci na deskových prvcích. Tedy, že rovinný průřez zůstává rovinným i po deformaci. Pro průhyb $\omega(x)$ takového prvku tedy platí:

$$\frac{\partial^2 \omega(x)}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{E(x) I(x)} \quad (3.1.)$$

tedy druhá derivace průhybu ω v libovolném bodě x se rovná momentu dělenému ohybovou tuhostí průřezu v témže bodě. [20] Napětí se v těchto oblastech distribuuje rovnoměrně a účinky vypočtené globální metodou jsou vhodné pro následné posouzení konstrukce. [21]

D oblasti – oblasti, kde je narušen ustálený tok vnitřních sil. Ten je způsoben diskontinuitou v geometrii prvku, nebo v zatížení. Označení D tedy plyne ze slov *disturbed*, či *discontinuity*. Průběh přetvoření a napětí se počítá separátně, výpočtem pouze pro zadanou část. Typickými příklady D – oblastí jsou:

- oblasti podpor
- ozuby a krátké konzoly
- otvory, soustavy otvorů a jiné prostupy
- náhlé změny průřezů
- styky konstrukčních prvků
- kotvení předpjatých prvků
- v oblastech soustředěných zatížení



Obr. 3.2. – Příklad rozdělení jednoduché konstrukce na oblasti D a B. [19]

Pro řešení D – oblastí je potřeba zvolit vhodnou variantu řešení. Na výběr jsou v podstatě tři možné varianty.

- **Řešení přibližnými empirickými vzorci**

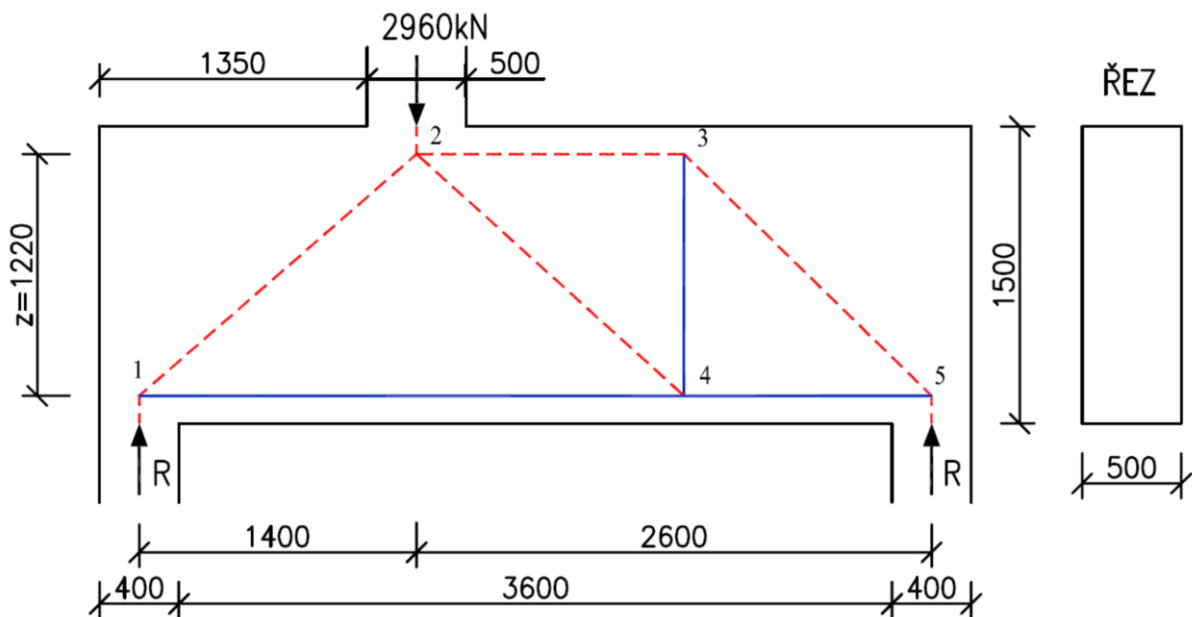
Varianta řešení aplikovaná na řešení typických a opakovaných případů s konkrétním zatížením, využívající norem, empirických vzorců a schémat pro rychlé a jednoduché řešení konstrukcí. Tyto vzorce však lze využívat pouze na malou množinu případů. Obecné použití této metody tak není možné. [22]

- **Metoda příhradové analogie**

Metoda příhradové analogie, jak napovídá název, využívá modelu příhradové konstrukce, navrženou dle určitých pravidel do prostoru posuzovaného prvku. „Napětí, nebo vnitřní síly v konstrukci mohou být znázorněny ve formě trajektorií hlavních napětí. Toky sil směřující od zatíženého okraje konstrukce k podpoře jsou účinným nástrojem pro porozumění chování konstrukce. Pokud známe takové toky nebo trajektorie napětí, můžeme je lokalizovat a napřítit ve formě tlačných a tažených prvků příhradového modelu. Říká se jim modely strut-and-tie (modely vzpěra - táhlo).“ [18]

Tento proces návrhu má pět kroků:

- 1) Určení hranic D – oblasti a sil působící na tuto oblast
- 2) Návrh příslušného příhradového modelu, který odpovídá základním pravidlům jeho tvorby
- 3) Zvolení plochy výztuže podle vypočteného zatížení táhla v modelu
- 4) Posouzení vzpěr a uzlů
- 5) Navržení uspořádání reálné výztuže, opět dle stanovených pravidel, konstrukčních zásad a.j., tak aby byla zajištěna únosnost a duktilita prvku



Obr. 3.3. – Příklad navrženého příhradového modelu pro nosník zatížený osamělou silou. [19]

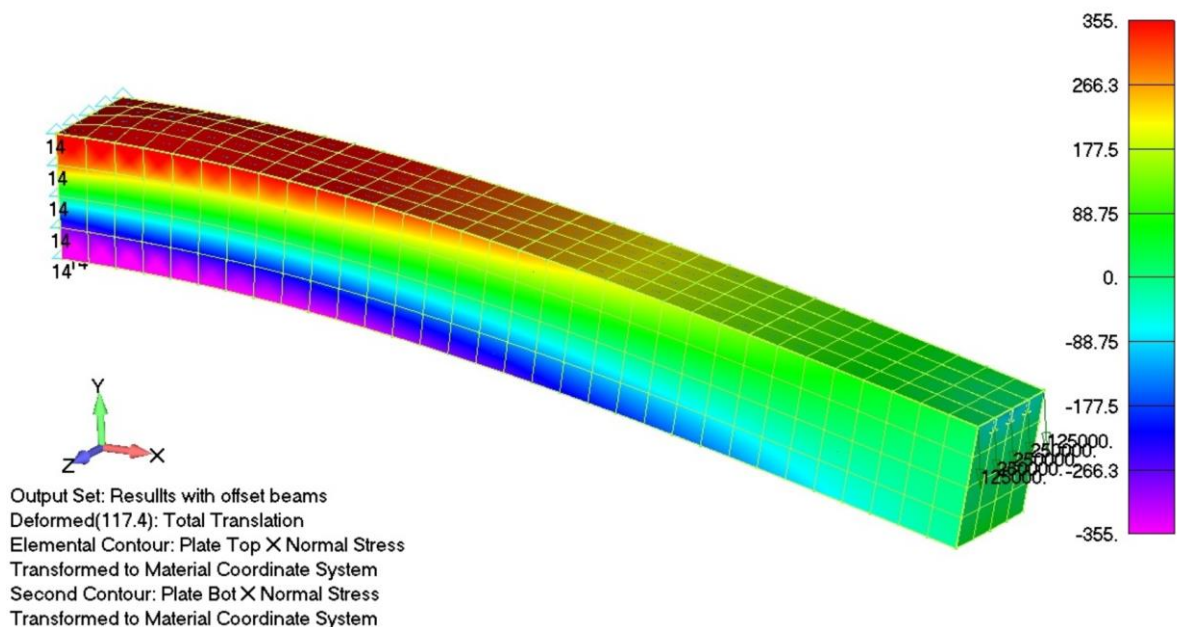
Metoda příhradové analogie se používá zpravidla v případech, kdy je řešena konstrukce jednodušší, zatížená konkrétní osamělou silou. Její předností je relativně jednoduchý výpočet, při kterém je však nutné dbát na nebezpečí spjaté s tímto postupem návrhu, jako je vhodný návrh modelu splňující daná pravidla. Důležité je zároveň zajištění dostatečné pružné deformace konstrukce, která nemusí odpovídat navrženému příhradovému modelu. [20]

- Numerické metody nelineární analýzy

Metody, využívající zpravidla možnosti počítačových programů, schopných provést rychle mnoho operací, které by ručním výpočtem trvaly velmi dlouho. Během výpočtu totiž uvažuje i nelinearity zanedbávaných při běžných výpočtech.

- geometrické (nelineární vztah mezi posunem a poměrným přetvořením)
- fyzikální (nelineární vztah mezi napětím a přetvořením)
- lokální (změna geometrie a okrajových podmínek – teorie II. a III. řádu)

Jejich funkčnost většinou stojí na **metodě konečných prvků**, zkráceně **MKP** (neboli Finite element method – FEM). „Metoda využívá při výpočtu odezvy konstrukce postupných kroků zatěžování. Při nárůstu zatížení se zohledňuje nelineární chování materiálu, kdy rozvojem trhlin dochází ke změně tuhosti prvků. To má u staticky neurčitých konstrukcí za následek přerozdělení vnitřních sil do únosnějších částí (bez trhlin).“ [22]



Obr. 3.4. – Vyhodnocení napětí nosníku metodou konečných prvků. [23]

3.1.2. DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ

Zatížení vyvozené přístroji umístěnými v budovách lze dělit na mnoho kategorií a podle mnoha úhlů pohledu. Jedním z těchto rozdělení je důležité vymezení zatížení působícího staticky a zatížení působícího dynamicky. Rozdíl mezi nimi spočívá v charakteru a reakci konstrukce. Statická zatížení nezpůsobují významná zrychlení částí konstrukce, dynamická ano. Dynamika, jako podmnožina celé mechaniky, se zabývá pohybem těles a jeho příčinami. Její derivát – stavební dynamika, studuje efekty cyklicky působících zatížení na životnost konstrukce. Popisuje únavu materiálu narůstající s počtem cyklů zatížení, projevující se postupnou ztrátou mechanických vlastností a struktury, která může vyústit v poruchy ohrožující únosnost, použitelnost a provozuschopnost.

Za **dynamické** označujeme zatížení, jež je proměnné v čase a jeho účinky vyvolávají nezanedbatelný vliv setrvačných sil. Právě posuzování účinku setrvačných, tlumících, vratných a budících sil je jedním z hlavních principů dynamiky stavebních konstrukcí. Je založená na D'Alembertově principu.

$$\sum_i (F_i - m_i a_i) \cdot \delta r_i = 0 \quad (3.2.)$$

kde

F_i je výslednicí sil působících na i -tou částici hmoty

δ_i je virutální posunutí i -té částice moty

r_i a m_i jsou polohové vektory

tedy, že součet všech sil působících na těleso ve směru kmitání je roven nule. [24]

Síly působící na hmotu konstrukce jsou projevem tří základní parametrů vztahených ke kmitání, popisující jeho průběh.

- tuhost k [N/m]
- hmotnost m [kg]
- útlum c [kg/s]

Z těchto parametrů tedy odvozujeme síly:

- **vnitřní** $f_s = k \cdot u(t)$
 - projev tuhosti soustavy, pro idealizovaný případ tělese na pružině, označující tuhost pružiny
- **tlumící** $f_D = c \cdot u'(t)$
 - tedy útlum konstrukce násobený první derivací vektoru posunutí $u(t)$, tedy vektorem rychlosti
- **setrvačnou** $f_I = m \cdot u''(t)$
 - tedy hmotnost násobenou druhou derivací vektoru posunutí $u(t)$, tedy vektorem zrychlení

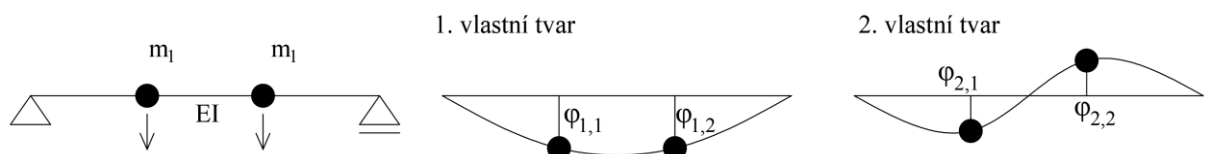
Dynamické zatížení, na které konstrukce reaguje oscilací o určité frekvenci, označujeme souhrnně **buzení**. Tyto síly lze podle účinku dělit na síly

- **stochastické**

Takový druh účinku, jehož intenzita, směr a výskyt čistě podléhá náhodě. Je tím myšleno zatížení jako je vítr, seismická aktivita, doprava a další. Tyto vlivy jsme schopni započítat do návrhu pouze na základě statistických údajů dosavadních pozorování.
- **deterministické**

Účinky charakterizované veličinami jako je perioda, či frekvence, pomocí nichž je možné vyjádřit průběh oscilace rovnicí, popisující její silové působení v určitý čas.

Pro popis určitých jevů je zaveden pojem **vlastní frekvence kmitů**. To je taková frekvence, při které probíhá vlastní kmitání, aniž by bylo způsobeno vnější budící silou. [25] Tomuto kmitání odpovídají tvary, označovány jako **vlastní tvary kmitná**. Jedná se o tvary, do kterých se konstrukce zformuje během vlastního kmitání, přičemž platí, že počet stupňů volnosti odpovídá počtu vlastních tvarů.



Obr. 3.5. – Konstrukce se dvěma stupni volnosti a její vlastní tvary (podle [26]).

Tento princip je velmi důležitý pro pochopení velkého rizika nastávajícího, pokud se frekvence budící síly dostane na podobnou hodnotu, jako je vlastní frekvence zatěžované konstrukce. V tom případě dochází ke stavu rezonance, při kterém dojde k výraznému zvýšení amplitudy kmitání. To může způsobit deformace neslučitelné s materiálovými vlastnostmi a následný kolaps konstrukce.

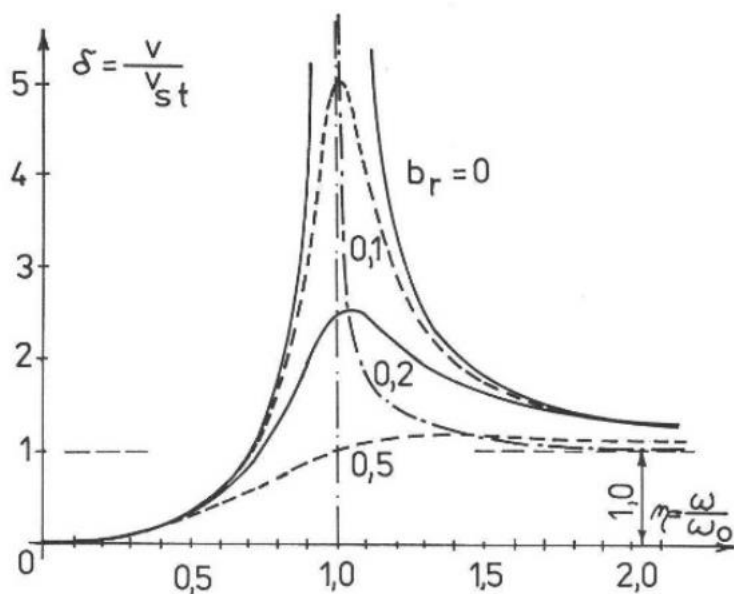
Během praktické aplikace výpočtu je za určitých podmínek velmi výhodné použít vyjádření dynamického účinku sil za pomocí tzv. **dynamického součinitele**. Ten je vyjádřen jako poměr amplitudy ustáleného kmitání a výchylky od statického působení amplitudy budících sil:

$$\delta = \frac{u}{u_{st}} = \frac{1}{2\xi} \quad (3.3.)$$

V případě kmitání netlumeného se pro vyjádření dynamického součinitele využívá **součinitele naladění** η . [25]

$$\delta = \frac{1}{1-\eta^2} \quad (3.4.)$$

„Grafickým vyjádřením vzájemného vztahu dynamického součinitele, součinitele naladění a součinitele útlumu je rezonanční křivka. Ukazuje, že čím více se frekvence budiče blíží vlastní frekvenci konstrukce, tím větší jsou dynamické účinky zatížení. Zároveň potvrzuje, že tyto účinky jsou naopak zmenšovány při větším útlumu konstrukce.“ [25]



Obr. 3.6. – Rezonanční křivky konstrukcí o různých hodnotách tlumení. [27]

S dynamickým zatížením je možné se setkat prakticky při jakémkoliv návrhu budovy, neboť představuje zatížení způsobené mnoha různými, v praxi nevyhnutelnými vlivy. Mezi nejběžnější patří účinky větru, seismicita, doprava, okolní stavební činnost a další. Ohledně dynamických zatížení způsobených přístroji a zařízeními lze rozdělit tyto zdroje dle charakteru vyvozených zatěžovacích účinků.

- rotační stroje

Stroje, během jejichž funkce dochází k rotaci pohyblivé části kolem osy. Zatížení vyvozené na konstrukci spočívá v častých tvarových asymetriích rotující části přístroje (ať už neúmyslných, či úmyslných), které vlivem vysoké rychlosti při periodickém pohybu způsobují značnou vibraci. Zpravidla se jedná o jakékoliv motory, generátory a alternátory, umístěné v průmyslových objektech, či důležitých budovách, vyžadující vlastní autonomní zdroj energie (například nemocnice, banky, důležité serverovny atd.). Ale také jde o rotory ventilátorů, nebo složitých nemocničních zařízení jakým je například CT sken.

- pístové stroje

Stroje, u kterých jsou vibrační účinky na konstrukci způsobeny periodickým translačním pohybem určitých částí zařízení.

- **zařízení vyvolující rázy**

Účinek těchto strojů spočívá v náhlých okamžitých impulzech síly, které způsobují dopady pohyblivých částí konstrukce.

- **zařízení vyvolující mimořádná krátkodobá momentová zatížení**

Zatížení v podobě rozkmitání konstrukce, způsobené většinou rotorem generátorů, či alternátoru při jejich zkratu. Zároveň může vzniknout kvůli chybnému zfázování generátorů.

Celkový přehled rizikových zařízení jejichž umístění je nutné započítat na celkového návrhu konstrukce je dohledatelný v normách.

- Soustrojí parních turbín na železobetonových nosných deskách, či ocelových nosných konstrukcích.
- Soustrojí plynových turbín na masivních blokových základech uložených přímo na podloží nebo na pilotách.
- Synchronní a asynchronní generátory a alternátory, které jsou obvykle součástí soustrojí turbín.
- Axiální ventilátory větších výkonů na blokových základech.
- Ventilátorové mlýny kotlů na uhlí na blokových základech.
- Soustrojí napájecích čerpadel na blokových základech umístěných na zemině nebo na stávajících stropních konstrukcích, popř. soustrojí umístěná na samostatných rámových konstrukcích.
- Stroje v papírenských provozech.
- Pístové nebo rotační kompresory a dmyhadla, obvykle na blokových základech nebo na úložných rámech.
- Dopravní zařízení – mostové jeřáby a vibrační pásové dopravníky.
- Buchary a lisy v hutních provozech.
- Čerpadla větších výkonů.
- Vibrace potrubí vznikající vlivem turbulentních jevů při proudění médií.
- Výtahy.

Částečně převzato z [28].

3.1.3. PRŮHYB

Průhyb je běžným projevem konstrukcí (pro tento příklad vodorovných nosných), vzniklý působením určitého zatížení, vyvozuje moment. Jeho průběh, či chování je popsáno mnoha teoriemi a výpočty, jako například již zmíněnou Bernoulli – Navierovou teorií ohybu (viz. kapitola 3.1.1.). Jedná se nejdůležitější parametr sledovaný při návrhu nosných konstrukcí. Míra průhybu je totiž jasným ukazatelem kvality návrhu, neboť při neobvykle velkých hodnotách je schopen i laik poznat, že s konstrukcí je něco v nepořádku. Přinejmenším to, že vodorovný nosný prvek je zatížen víc, než kolik je schopen unést při zachování strukturální integrity všech částí. Proto je průhyb důležitou podmínkou mezního stavu použitelnosti, protože jednou z hlavních subjektivních podmínek určující onu „použitelnost“ je pocit bezpečí pro uživatele. Průhyb je však patrný pouhým okem až od hodnot, které jsou relativně velké. Dle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 je průhyb desek omezen na hodnotu rozponu dělenou 250 [29] (Mnohdy jsou v zájmu zachování přilehlých částí konstrukce limity zpřísněny na $L/500$, či přísnější. Pausální hodnota je však $L/250$, kde L označuje rozpětí desky [30]). Tyto limity však mohou být nedostačující pro použití určitých přístrojů, jejichž citlivá kalibrace je esenciální pro jejich funkčnost a přesnost. Nejčastějším případem takovýchto provozů jsou laboratoře, nemocnice, pracoviště s velmi přesnými optickými zařízeními a další vědecká pracoviště.

Míra ohybu železobetonových částí konstrukce závisí na míře zatížení na ně kladené, a na počátečním stavu. Do doby, kdy napětí v prvku nedosáhne hodnoty pevnosti v tahu betonu f_{ctm} , je chování pružně lineární a lze tedy průhyb vyjádřit vzorcem (3.1.). Po překročení dochází ke vzniku trhlin na tažené straně prvku. Ocelová výztuž je aktivována a přebírá tahové napětí dosud nesené betonem. Pro případy, kdy výztuž v prvku není a jedná se o prostý beton, dochází k okamžitému rozevření trhliny a kolapsu. Zde začíná být chování poněkud komplikovanější. S nárůstem napětí dochází k větší pružné deformaci ocele, ale zároveň ke vzniku dalších trhlin a k jejich postupnému rozevírání. Tyto trhliny znemožňují výpočet průhybu do té doby běžným způsobem a je nutné je započítat do celkového efektu zatížení.

Chování prvku lze pak vyjádřit takto.

$$\alpha = \alpha_I(1 - \zeta) + \alpha_{II} \cdot \zeta \quad (3.5.)$$

kde

α je uvažovaná přetvárná veličina, tedy například křivost, či pootočení

α_I , α_{II} jsou hodnoty parametru vypočteného pro stav bez trhlin a s plně rozvinutými trhlinami

ζ je rozdělovací součinitel zohledňující tahové zpevnění betonu.

Rozdělovací součinitel je využit právě pro úpravu vlivu zatížení krátkodobého a dlouhodobého, které mají rozdílné účinky na vznik trhlin a následné přetvoření. Je dán vztahem:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (3.6.)$$

kde

β je součinitel zohledňující vliv doby trvání nebo opakování zatížení na průměrnou hodnotu poměrného přetvoření. Přičemž platí, že β nabývá hodnoty 1 pro zatížení působící jednorázově a krátkodobě, a hodnoty 0,5 pro zatížení dlouhodobě působící, či mnohonásobně se opakující.

σ_s je napětí v tahové výztuži

σ_{sr} je napětí v tahové výztuži v momentě, kdy je prvek zatížen zatížením způsobujícím vznik trhlin. [29] Poměr těchto veličin lze přímo nahradit poměrem momentů či normálových sil pro urychlení výpočtu.

Přičemž platí, že pro průřez bez trhlin se $\zeta = 0$.

Deformace způsobené vlivem dlouhodobého zatížení se určují stanovením účinného modulu pružnosti betonu.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{(1 + \varphi(\infty, t_0))} \quad (3.7.)$$

kde

E_{cm} je modul pružnosti betonu

Φ je součinitel dotvarování odpovídající zatížení a časovému intervalu zatížení (jehož výpočet je blíže specifikovaný normou)

Při dalším zatěžování dochází k nárůstu napětí v tažené výztuži a tlačeném betonu, až za mez únosnosti a dochází tedy ke kolapsu.

Pro mezní stav použitelnosti je nutné počítat s možností současného působení více zdrojů zatížení o různé povaze, které vyvoluje různě velké průhyby nosných konstrukcí. Jejich možné spolupůsobení se vyjadřuje užitím tří různých kombinací.

- **charakteristická kombinace**

Charakteristická kombinace zatížení je hodnota zatížení, po jejímž dosažení může dojít k vážné poruše, nebo přetvoření, neslučitelného s použitelností konstrukce. Je definována jako:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.8.)$$

- **častá kombinace**

Po překročení časté kombinace dochází k porušením nesignifikantní povahy, či k vratným přetvořením. Je definována jako:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.9.)$$

- **kvazistálá kombinace**

Zahrnuje vliv dlouhodobých účinků, jako jsou například dotvarování konstrukcí atp. Je definována jako:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.10.)$$

kde

P označuje zatížení od možného předpětí, [33]

$Q_{k,1}$ je hlavní proměnné zatížení

$Q_{k,i}$ je vedlejší proměnné zatížení

$G_{k,j}$ jsou stálá zatížení

$\Psi_{l,m}$ je součinitel vyjadřující pravděpodobnost působení zatížení plnou silou [33]

Další postup výpočtu je závislý na tom, zda při zatěžování dojde ke vzniku trhlin, či nikoliv. To lze zjistit porovnáním předpokládaného vzniklého momentu při kvazistálé kombinaci s kritickým momentem $M_{cr,eff}$, daného materiálovými vlastnostmi betonu a tvarem průřezu. Podle toho je použita hodnota ohybové poddajnosti s trhlinami, či bez trhlin.

Pro průřez bez trhlin je průhyb od kvazi-stálého zatížení:

$$w_{g,lt} = k \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{qp,eff} \cdot l^2 \quad (3.11.)$$

kde

k je součinitel zohledňující typ zatížení a statické schéma uložení nosníku

$r_{qp,eff}$ je křivost daná vztahem

$$r_{qp,eff} = M_{E,qp} \cdot C_{l,eff} \quad (3.12.)$$

Pro průřez zatížený natolik, že dojde ke vzniku trhlin, je nutné přepočítat průřezové charakteristiky, jako je poloha neutrální osy a moment setrvačnosti. Křivost je dána vztahem:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{qp,eff} = M_{E,qp} \cdot [(1 - \zeta_{qp,eff}) \cdot C_{I,eff} + \zeta_{qp,eff} \cdot C_{II,eff}] \quad (3.13.)$$

kde

$M_{E,qp}$ je moment vyvozený kvazistálým zatížením

$\zeta_{qp,eff}$ je rozdělovací součinitel (3.6.)

$C_{I,eff}$ a $C_{II,eff}$ jsou ohybové poddajnosti průřezu bez trhlin a s trhlínami [29]

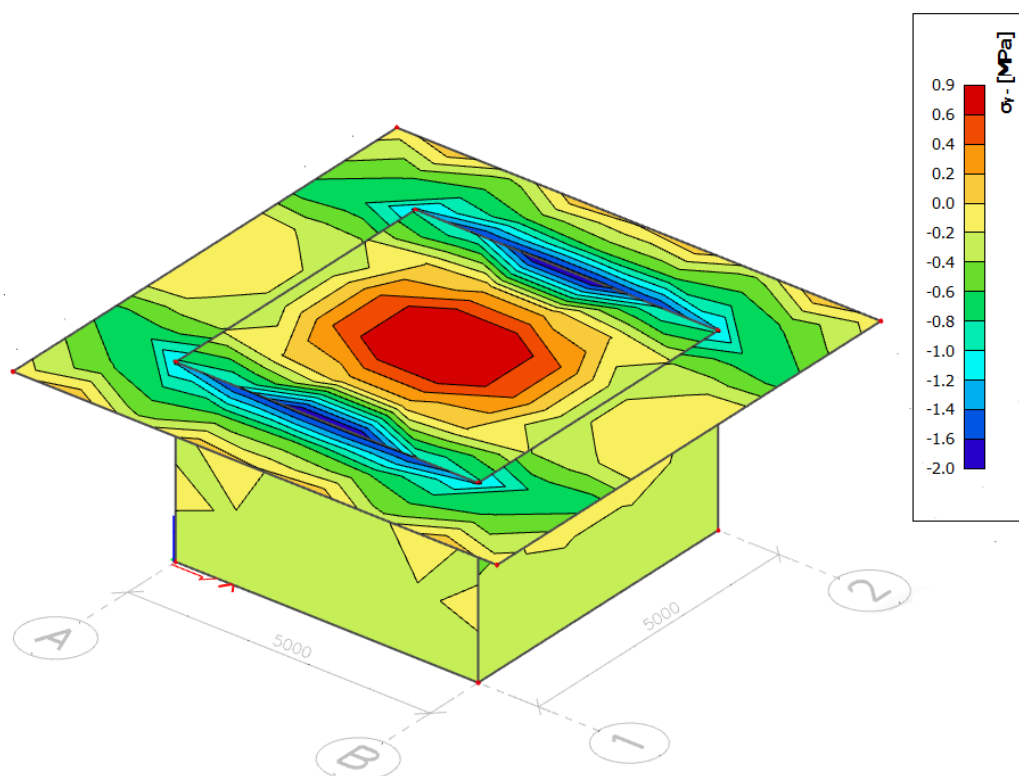
Posledním krokem je posouzení, zda průhyb, způsobený dlouhodobě působícím zatížením spolu s dotvarováním, nepřekročí limitní mez stanovenou normami, či technickými požadavky přístroje specifikovanými výrobcem.

3.2. ÚPRAVA KONSTRUKCÍ VZHLEDEM K MECHANICKÝM POŽADAVKŮM A VLIVŮM

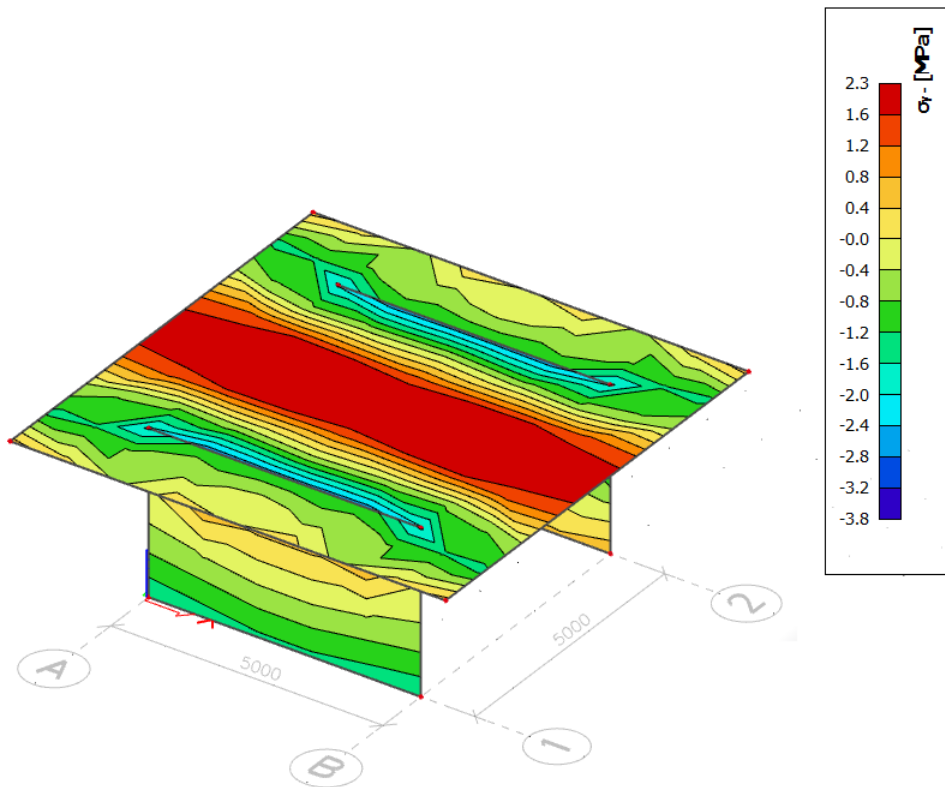
3.2.1. OSAMĚLÉ BŘEMENO

Pokud je konstrukce zatížena lokální břemenem o značné velikosti, je potřeba upravit její návrh takovým způsobem a v takové míře, aby bylo zajištěná bezpečnost, životnost a použitelnost konstrukce. Vzhledem k možné rozmanitosti betonových konstrukcí lze však téměř vždy najít technologické řešení pro řešení jakéhokoli problému. Pokud jde o lokální břemena, řešení se většinou skrývá v jednoduchém principu: Zajistit, aby konstrukce co nejefektivněji roznesla koncentrované napětí do její plochy a následně jej převedla do svislých nosných prvků.

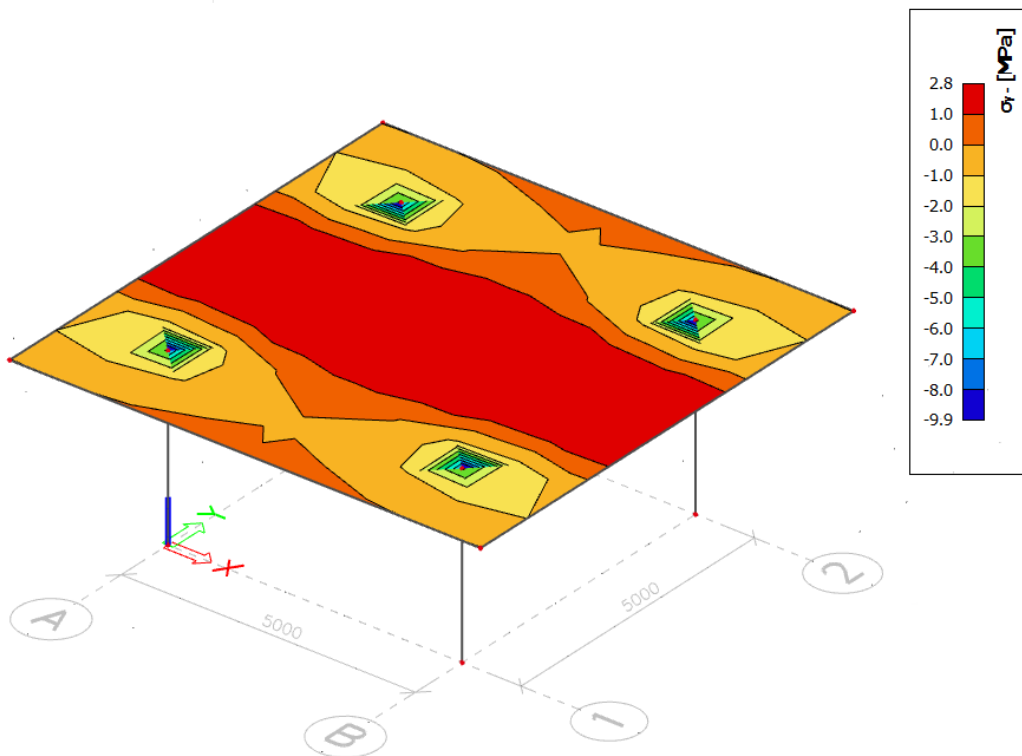
Prvním krokem během návrhu je **volba konstrukčního systému**. Pro nejlepší možný efekt přenesení koncentrovaného zatížení je nejlepší navrhovat desky pnuté obousměrně než desky jednosměrně pnuté. Desky pouze lokálně podepřené jsou pro tento případ spíše nevhodné.



Obr. 3.7. – Napětí na desce pnuté obousměrně.

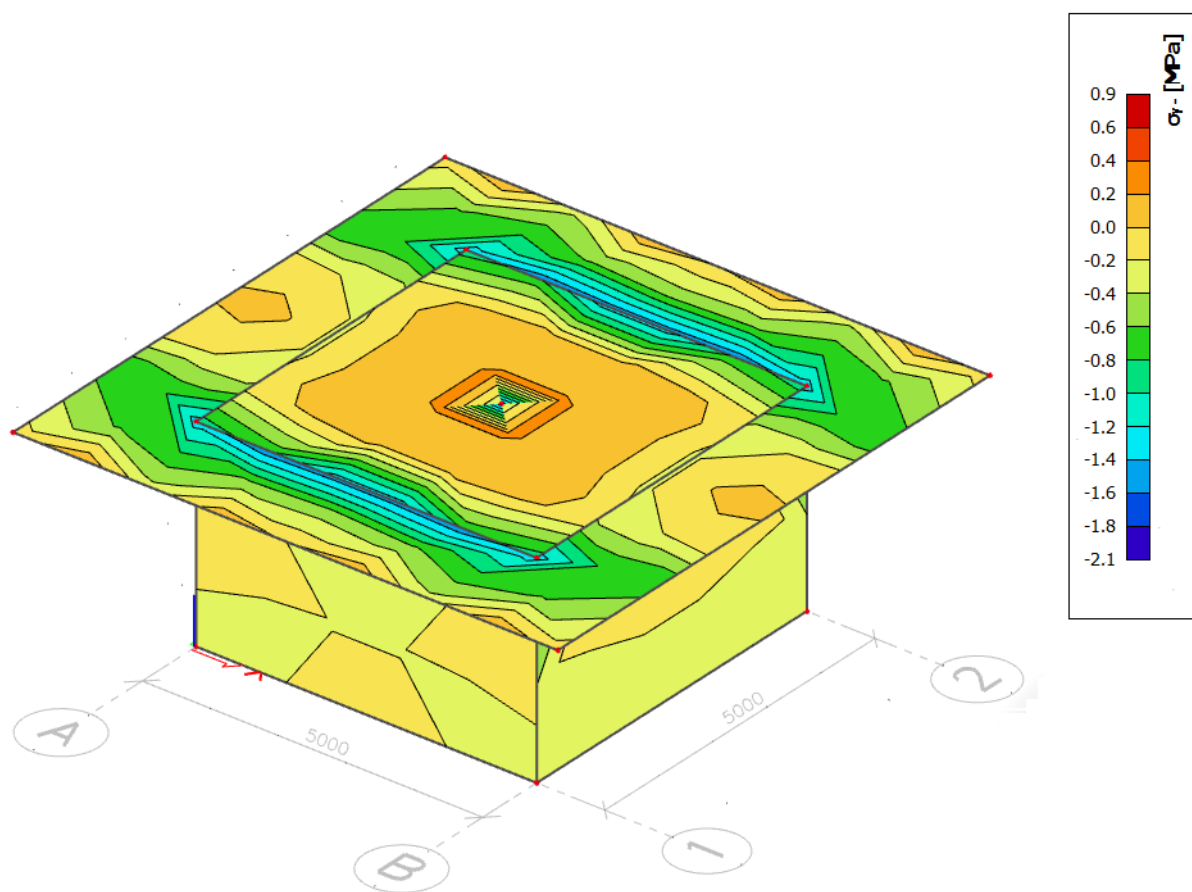


Obr. 3.8. – Napětí na desce pnuté jednoduše.



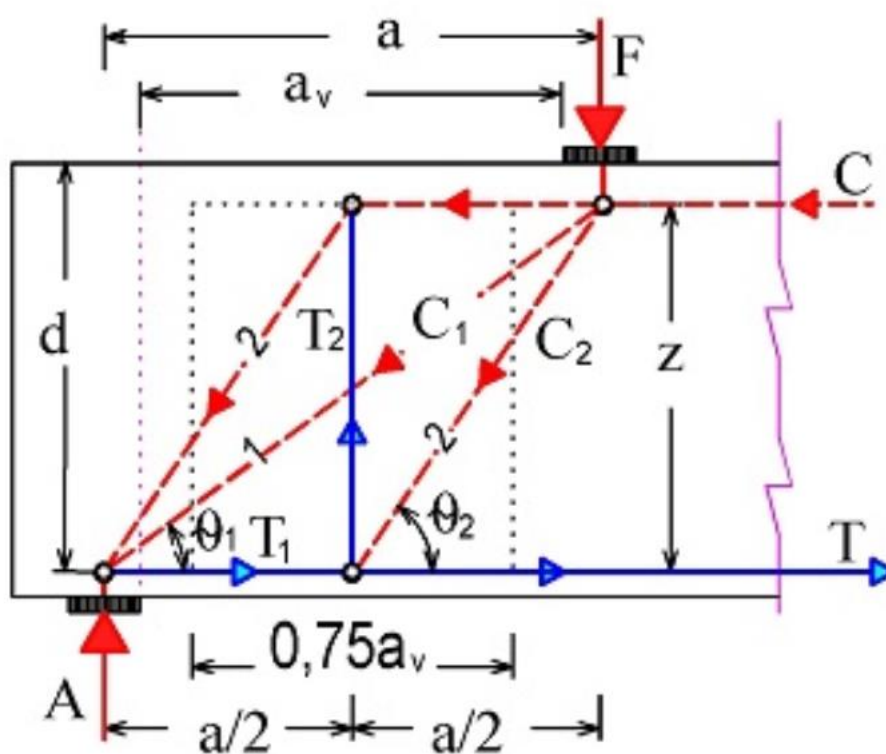
Obr. 3.9. – Napětí na desce lokálně podepřené.

Na obrázcích 3.7. – 3.10. jsou desky s převislými konci o velikosti 8x8 metrů a tloušťky 200 mm, které jsou podepřeny různými variantami podepření. Desky jsou zatíženy předpokládaným plošným zatížením $2,5 \text{ kN/m}^2$ a zároveň osamělým břemenem o velikosti 30 kN na ploše $0,5 \text{ m}^2$. Je patrné, že v případě desky obousměrně pnuté dochází k nejlepšímu přenesení koncentrovaného zatížení do svislých nosných stěn. V případě jednosměrně pnuté desky je nárůst napětí přibližně trojnásobný. (za daných podmínek). Na obrázku 3.10. je varianta se sloupem umístěným přímo pod lokálně zatíženou oblastí. Tato varianta je samozřejmě nejlepší, ale z architektonického a funkčního hlediska je takové řešení velmi nepraktické, a je tedy využíváno v případě opravdu extrémních lokálních zatížení, či pokud sloup funguje v celkové architektonické koncepci vnitřního prostoru.



Obr. 3.10. – Napětí na desce pnuté obousměrně s lokální podporou v prostředku pole.

Umístění lokálního břemene je další proměnnou, kterou je možné ovlivnit celkové namáhání konstrukce. Při práci se soustředěnou silou je potřeba vždy přihlídnout k největšímu problému tohoto typu zatížení, kterým je značné smykové namáhání konstrukce. Z hlediska momentové únosnosti je samozřejmě nejvýhodnější umístit břemeno co nejbližší k podporám, pro maximální snížení momentového účinku. Zatížení se totiž přenesou ve větší míře přímo do podpory a nevyvozuje tak velký moment. Posouvající síla by však v takovém případě byla podstatně větší a zvětšil by se tak vznikající příčný tah v místě podpory, nutný zachytit navrženou smykovou výztuží.

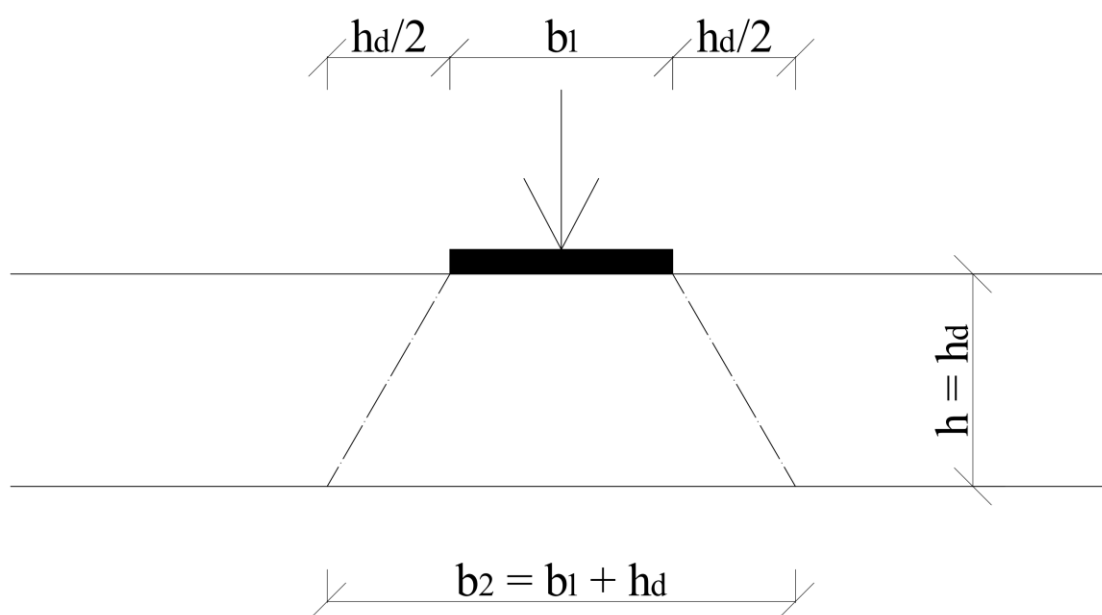


Obr. 3.11. – Model náhradní příhradoviny pro osamělou sílu poblíž podpory. [31]

Dalším krokem při návrhu konstrukce je výpočet množství a umístění **betonářské výztuže**. Vzhledem k tomu, že se jedná o hlavní nositelku tahové pevnosti železobetonových prvků, je vyztužení krucální pro pevnost, stabilitu, životnost a celkovou kvalitu, a to nejenom v ohledu na působení lokálního osamělého břemene, ale i pro celkovou konstrukci. Způsob, jakým je konstrukce vyztužena, má velký vliv

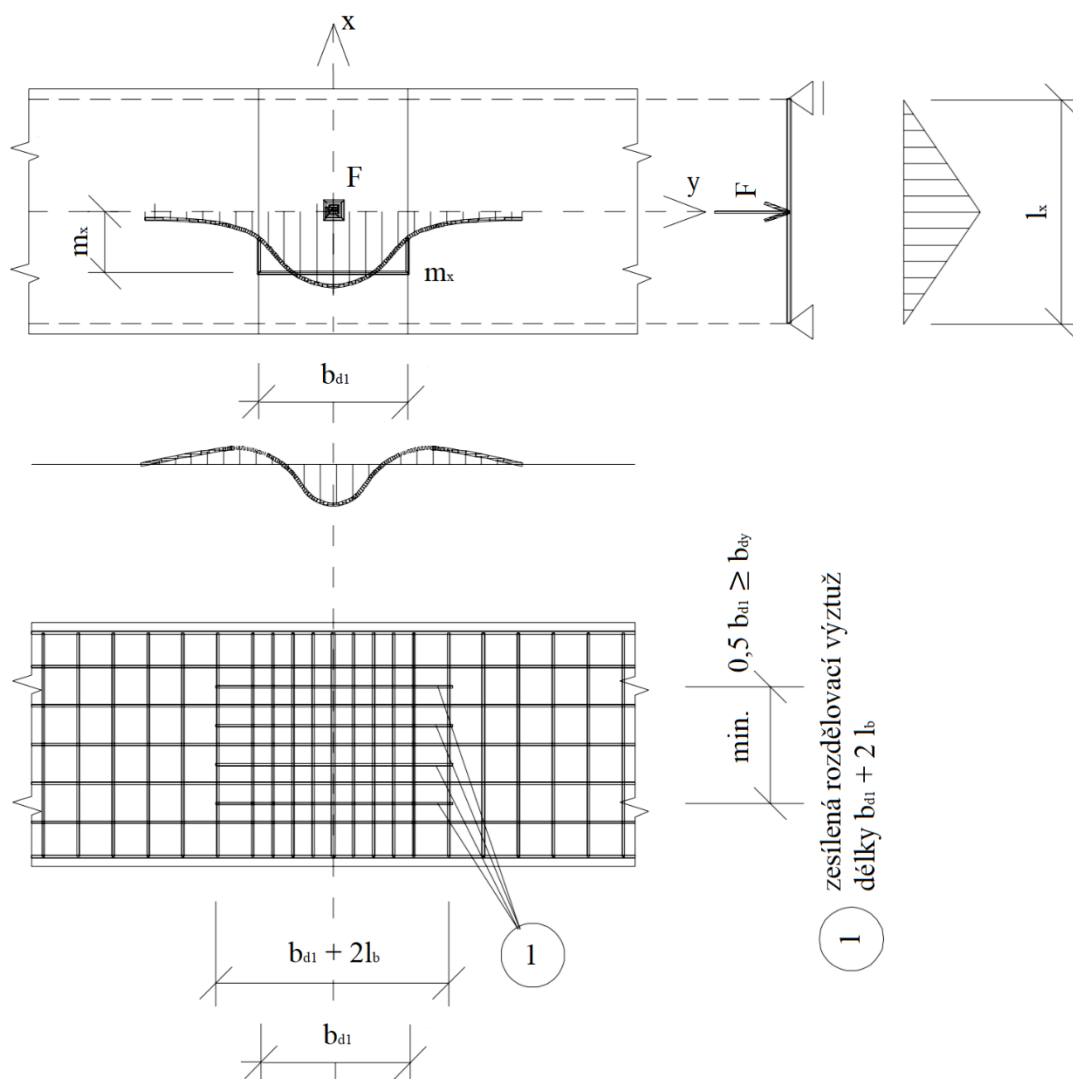
na chování konstrukce během zatěžování, a to nejenom na únosnost samotnou, ale i na průběh roznášení zatížení do celého nosného prvku. U lokálních břemen je například velmi důležité, aby bylo zajištěno spolupůsobení veškeré výztuže, na přenesení onoho zatížení.

U jednosměrně pnutých desek, tedy takových, kde je hlavní nosná ohybová výztuž pouze v jednom směru, hrozí působení lokálního břemene pouze na ty pruty výztuže, které jsou pod zatěžovací plochou, či pod její přímou roznášecí plochou. Proto je v takovém případě nutné navrhnout správný profil a rozteče **rozdělovací výztuže**. Ta zajišťuje správné roznášení zatížení všemi pruty hlavní nosné ohybové výztuže.



Obr. 3.12. – Roznášecí plocha pod osamělým břemenem.

V případě obousměrně pnutých desek se nejedná o rozdělovací výztuž, neboť nosná ohybová výztuž je orientovaná v obou směrech. Samotnou rozdělovací funkci tedy plní nosná výztuž v kolmém směru. Ta je dimenzována standardním výpočtem „proužkovou“ metodou, nebo za určitých podmínek tabulkami dle teorie pružnosti, či plasticity. Obecně je však vhodné navrhnout v zatížené oblasti zesílení hlavní výztuže, zajišťující větší odolnost vůči maximálnímu momentovému namáhání, zmenšení průhybu a omezení rozvoje trhlin.



Obr. 3.13. – Schéma zesílení vyztužení v oblasti lokálního zatížení. [32]

Zatížení lokálním břemenem také může způsobit drcení na horním líci prvku. K tomu dochází kvůli velké koncentraci tlakových napětí v oblasti styku mezi betonem a přímo působící plochou břemene. Pro zjištění odolnosti betonu vůči drcení je nutné posoudit pevnost betonu v tlaku v této oblasti.

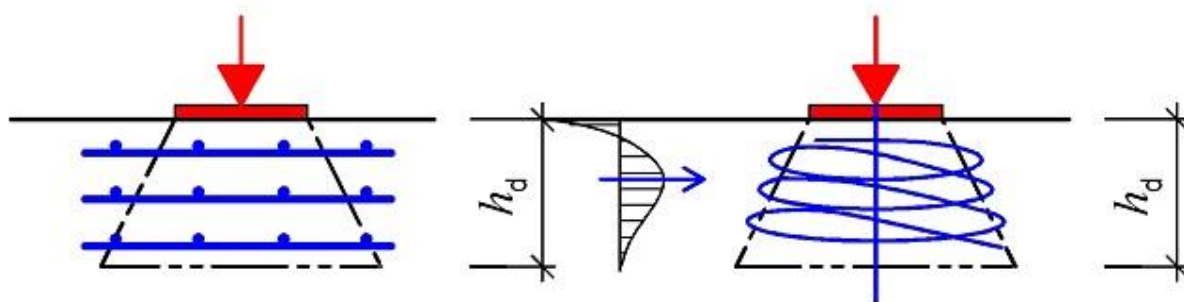
$$F_{Ed} = A_{c0} \cdot f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (3.14.)$$

kde

A_{c0} – styková zatěžovací plocha

A_{c1} – největší roznášecí plocha [31]

Odolnost betonu závisí na trojnásobku součinu pevnosti betonu v tlaku a stykové ploše. Při návrhu je tedy vhodné navrhnout použití materiálu zajišťující dostatečnou únosnost. Použití méněhodnotných, lehkých, či vylehčených betonů tak není správnou volbou. Případně lze pomoci konstrukci navržením přidané výztuže k hornímu povrchu prvku, která navíc zvyšuje tuhost prvku a tím snižuje průhyb desky a do jisté míry zvětšuje momentovou únosnost.



Obr. 3.14. – Možnosti vyztužení oblasti pod osamělým břemenem [31]

3.2.2. DYNAMICKÁ ZATÍŽENÍ

Základní princip, na němž spočívají úpravy konstrukce pro případ zatížení dynamickými zatíženími je útlum kmitání. Tlumení je schopnost konstrukce převzít kinetickou energii vyvolanou vlivem dynamického zatížení a přeměnit ji v jinou formu energie, neohrožující její stabilitu (tepelná, deformační). Tím dojde ke snížení maximální amplitudy kmitání. Jedním z prvních kroků při návrhu budovy je volba materiálu, ze kterého by měla být konstrukce vyhotovena. Při výběru mezi ocelovou a betonovou nosnou konstrukcí má v ohledu na vliv dynamických zatížení navrch beton. Kupříkladu pro návrh budov nemocnic je podle Thomase Fromma, vedoucího statika návrhů zdravotnických zařízení ve Skidmore Owings & Merrill v drtivé většině využívána nosná betonová konstrukce právě větší schopnosti pohlcovat vibrace. „Steel frames with concrete on metal deck floors are easier and less expensive to core.

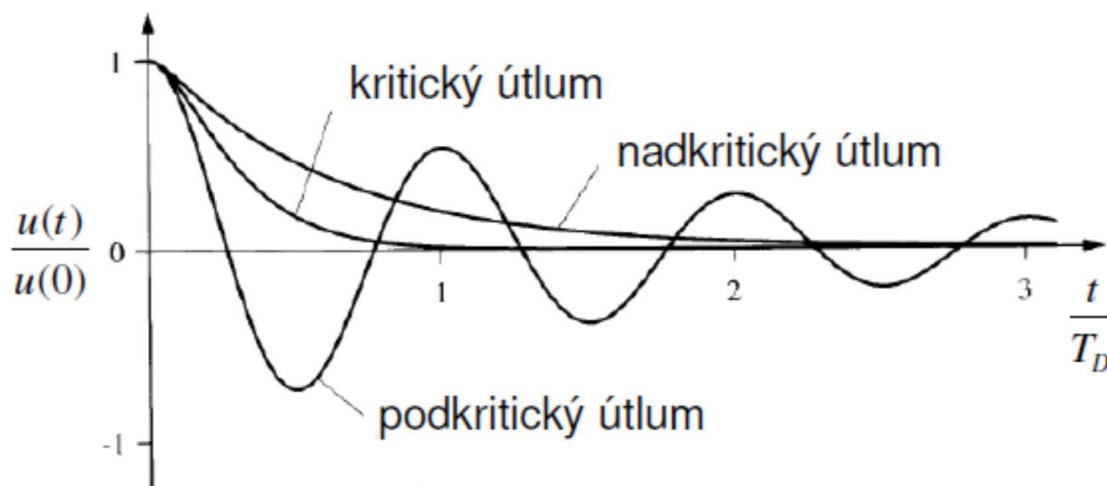
However, structural concrete handles building vibration better. Fromm says concrete dampens vibration, and with medical equipment becoming more sensitive to movement, concrete is preferred. [33]

Pro charakterizaci útlumu oscilace konstrukce zavádíme veličinu **poměrný útlum konstrukce** ξ . Ten je definován jako poměr mezi skutečným útlumem dané konstrukce c a tzv. kritickou hodnotou útlumu c_{cr} . [25]

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}}$$

Dle hodnoty toho poměrného útlumu lze sledovat tři různé varianty chování konstrukce, zatížené dynamickým zatížením.

- nadkritický útlum (pro hodnoty $\xi > 1$)
Při kterém konstrukce nevykazuje periodickou odezvu na zatížení.
- kritický útlum (pro $\xi = 1$)
Rozmezí periodické a neperiodické odezvy.
- podkritický útlum (pro hodnoty $\xi < 1$)
Při tomto útlumu konstrukce vykazuje periodickou odezvu na zatížení.



Obrázek 3.15. – Rozdíl v reakci konstrukce o různých hodnotách poměrného útlumu. [26]

Opatření pro omezení šíření kmitání konstrukce se provádí s ohledem na tři základní požadavky kladené na konstrukce. Na její únosnost, použitelnost ve vztahu

k osobám vyskytujícím se uvnitř budov a na provozní bezpečnost zařízení umístěných uvnitř. Konstrukce tedy musí odolávat periodickým zatížením, zároveň by vlivem zatížení nemělo docházet ke zhoršení komfortu a pocitu bezpečí pro uživatele objektu a v poslední řadě, musí být zaručeny veškeré mechanické podmínky potřebné pro bezproblémový provoz veškerých zařízení umístěných v a vně objektu.

V rámci únosnosti konstrukce je úkolem statika, aby vyhodnotil maximální možné dovolené dynamické zatížení, jež je konstrukce schopna přenést. Alternativně je to otázkou norem a další alternativních doporučení.

Maximální dovolené limitní oscilace pro zařízení jsou většinou specifikovány výrobcem na základě odhadu a zatěžovacích testů. Mnohé přístroje jsou kalibrované s vysokou přesností a jsou tedy také opravdu extrémně citlivé na ty sebemenší výkyvy. Je tedy časté, že právě tyto požadavky budou ve výsledku rozhodovat o návrhu přinejmenším lokální oblasti okolo přístroje.

Limitní oscilace stanové pro zachování zdraví a pohody uživatelů dotčených budov jsou specifikovány v legislativě. Dle paragrafu 13 nařízení vlády č. 402/2000 Sb. se určuje účinek vibrací působících na člověka pro kmitočty nižší jak 0,5 Hz podle průměrné vážené hladiny zrychlení vibrací L_{aw} [dB] a váženou efektivní hodnotou zrychlení vibrací a_{ew} [$m \cdot s^{-2}$]. Dále podle průměrných hladin zrychlení vibrací v třetinooktávových kmitočtových pásmech L_{at} [dB] a posledně průměrnou souhrnnou váženou hladinou zrychlení vibrací L_{vw} [dB], nebo souhrnnou váženou efektivní hodnotou zrychlení a_{vw} [$m \cdot s^{-2}$]. Tyto hodnoty se určují podle tabulek, které jsou k nalezení v přílohách tohoto nařízení. [34]

Pro dosažení funkčního a bezproblémového vnitřního prostředí budovy je nutné navrhnout opatření zajišťující snížení odezvy konstrukce na dynamické zatížení, a tedy i omezení maximální výchylky amplitudy. Tento návrh je jednou z velmi těžkých inženýrských disciplín a vyžaduje vysoké znalosti mechaniky a dostatečné zkušenosti. Obecně je možné říct, že útlum konstrukcí probíhá pomocí několika základních principů.

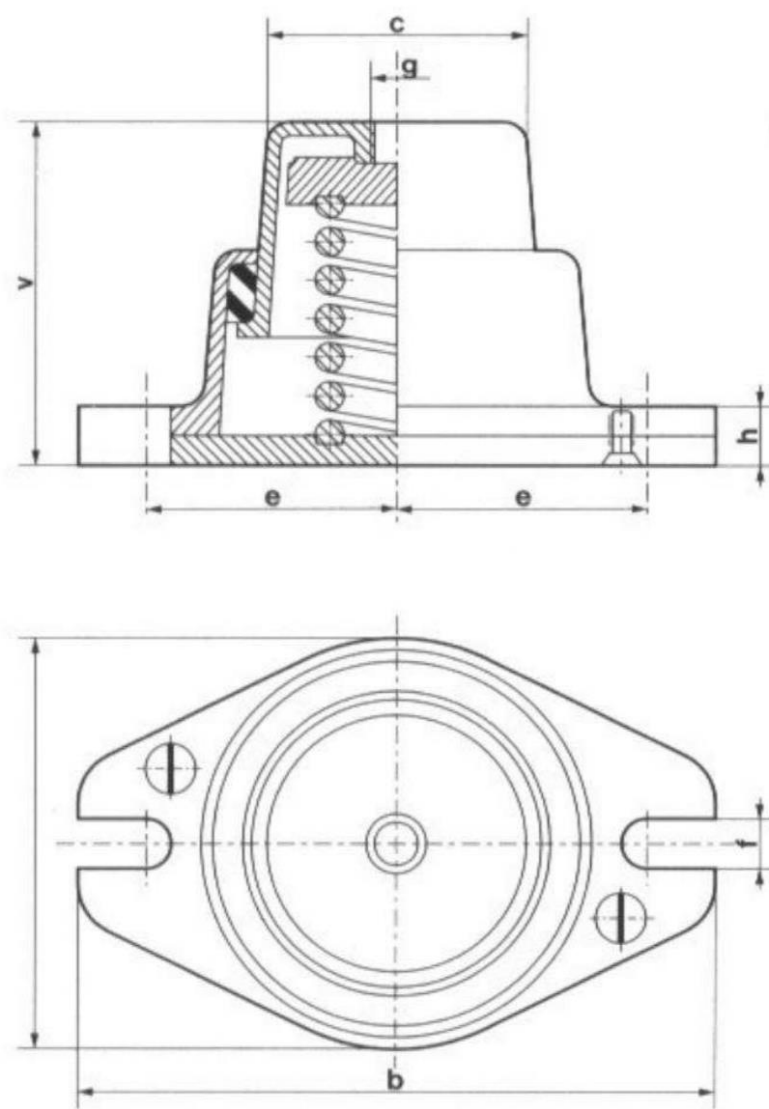
- Využitím materiálové útlumu, způsobeného vlastnostmi použitého materiálu, tedy jeho pružnosti, či vnitřního tření.

- Využitím strukturálního útlumu použitých prvků, jako jsou například rozhraní materiálů.
- Navržením konstrukce tak, aby byla maximálně využita tlumící schopnost konstrukčních spojení různých prvků (například pružná ložiska, styčníky atp.).
- Použitím vysoce pružných prostředí různých materiálů obklopující části konstrukce kontaktně uložené se zdrojem vibrací (typicky například uložení základů – utlumení seismické aktivity).
- Aplikací speciálních přídavných prvků snižujících hladinu oscilace.

Tyto základní teoretické principy se aplikují na praktické řešení útlumu konstrukcí. To je ve výsledky zajištěno několika kroky, které lze kombinovat tak, aby bylo dosaženo maximálního efektu útlumu.

- Omezení velikosti dynamického zatížení všemi dostupnými zdroji, a to zejména konstrukcí samotných zařízení. Seběmenší nevyváženosti a anomálie v rotorech těchto zařízení totiž velkou mírou přispívají k tvorbě značných sil. Ve většině případů je však dokonalé vyvážení nemožné, a proto je nutné alespoň velmi dbát na údržbu, pravidelný servis a dodržováním pokynů doporučených výrobcem. vhodnou synchronizací rotujících částí zařízení, zajišťující jejich vyvážení.
- Navržení základů o dostatečné hmotnosti. V případě těžších zařízení se schopností výrazně zatížit konstrukci je doporučována hmotnost vyšší jak 2,5 - krát větší než hmotnost zařízení.
- Vhodné navržení dilatační spáry zajišťující oddělení dynamicky zatížených celků od zbytků konstrukce. Je nutné dokonale dilatovat konstrukci ve všech jejích částech.
- Volba pružného uložení základů, nebo naopak částí konstrukce, které jsou citlivé na kmitání, nebo se na nich nachází citlivé přístroje. Pružné (antivibrační) uložení základů je zprostředkováno izolátory chvění, osazenými na částech svislých nosných konstrukcí (zhlaví sloupů, nosných stěn atd.). Díky těmto velmi účinným prvkům je zajištěna velmi nízká odezva konstrukce na dynamické zatížení. Izolátory chvění mají mnoho podob, přičemž nejpoužívanější a nejefektivnější jsou pružinové izolátory

poskytující velmi dobrou únosnost v poměru k tuhosti. Alternativně se používají izolátory s nějakou variantou pružného média, jako například korkové, či polyuretanové vibrační desky. K dostání jsou zároveň i kombinované antivibrační izolátory spojené s viskózními tlumiči. Výhodou těchto uložení je velký vliv na útlum konstrukce, ale zároveň i možnost tyto prvky aretovat a vyrovnat tím případné vady konstrukce (nerovnoměrné sedání, nepředpokládané deformace a jiné). Na podobném principu lze uložit pouze určité části konstrukce, pro které chceme odfiltrovat vibrace šířené do konstrukce z vnějšku (či z jiných částí konstrukce, kde se nalézá nějaký zdroj dynamického zatížení).



Obr. 3.16. – Izolátor chvění ISTAKO, typ P40 [35]

- Využití různých materiálových vlastností (tuhost, hmotnost, pružnost) různých prvků, nebo jednotlivých částí jednoho prvku, pro úpravu vlastní frekvence, a tedy následnou eliminaci rizika rezonance.
- Zajištění správného ukotvení zařízení k desce, které zamezí posuny ve vodorovné rovině a v extrémních případech i v rovině svislé. Kotvení je totiž vlivem vibrací velmi náchylné na porušení. Vzhledem k tomu je potřeba kotvení monitorovat a pravidelně jej opravovat. [25] [28]
- Pro extrémní případy rezonančního kmitání využití viskózních tlumičů. V tomto případě pod extrémními případy rozumíme mimořádná zatížení vyvolávající výjimečné odezvy konstrukce (například seismická aktivita, výbuchy, nárazy, nebo jiné neočekávané vnější dynamické zatížení). Tyto tlumiče však nejsou navrženy pro pokrytí běžných vibrací každodenního provozu.



Obr. 3.17. – Shock damper – GERB [36]

3.2.3. PRŮHYB

Při jakémkoliv návrhu, či úpravě konstrukce na určitý specifický požadavek provozu, je nutné znát veškeré podrobnosti užívání dotčeného prostoru. V případě umístěných přístrojů je potřeba přihlédnout k typu, velikosti a hmotnosti. Mnohdy totiž lze problémy spjaté s pohybem vodorovných nosných konstrukcí vyřešit šetrnější

metodou než úpravou celého návrhu, či přestavbou již existujícího objektu. V praxi je totiž velmi hojně využíváno tzv. optických stolů, jinak také nazývaných jako antivibrační stoly. Tato zařízení mají schopnost pomocí tlumičů a samonivelačního systému odizolovat určitou pracovní plochu od možných drobných naklonění a vibrací.



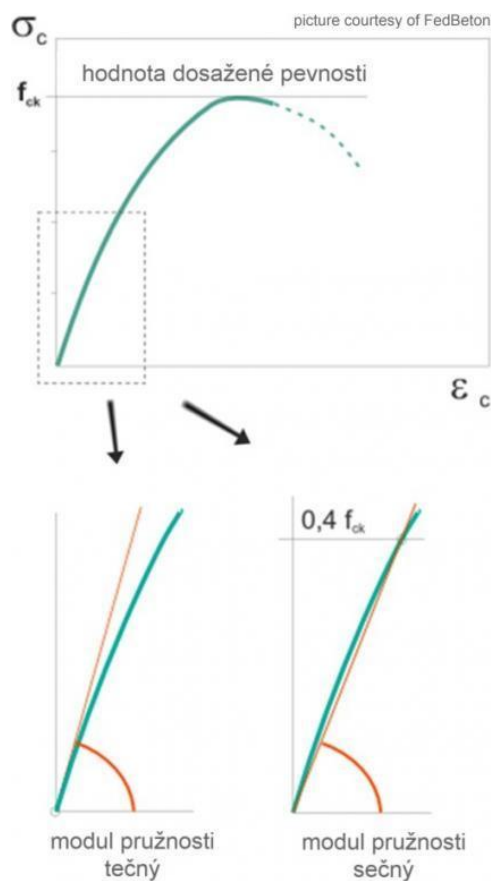
Obr. 3.18. – Antivibrační stůl TMC CleanTop. [37]

Cena těchto stolů se pohybuje podle velikosti a funkce od 150 000 Kč.

Vzhledem k omezené únosnosti antivibračních stolů a jejich omezené ploše může být někdy takové řešení nadměrných průhybů nemožné, či nedostatečné. Zařízení citlivá na průhyb mnohdy bývají výrazně větší, než je maximální pracovní plocha poskytnutá dodatečnými nekonstrukčními prvky. Je tedy nutné zajistit úpravu tuhosti konstrukce. Ta je možná zpravidla ve dvou základních variantách. Úprava materiálových vlastností železobetonu, nebo úprava konstrukčního systému.

Železobeton je kompozitní materiál složený z více složek včetně ocelové výztuže. Díky tomu je možné změnit mnoho různých vstupních hodnot, významně ovlivňujících konečné chování konstrukce během zatěžování. Mechanické vlastnosti

prostého betonu závisí na kvalitě, jakosti a poměrnému zastoupení složek. Tuhost železobetonového prvku (tedy včetně výztuže) pak závisí i na stupni vyztužení prvku. Pro návrh konstrukce odolné vůči možným přetvořením je primární veličina, určující onu odolnost, modul pružnosti. Sekundárním pak pevnost. Youngův modul pružnosti definuje poměr mezi napětím a deformací. Jedná se tedy o základní veličinu používanou pro výpočet průhybů nosných prvků. Pro vlastnosti betonu rozlišujeme dvě různé hodnoty modulu pružnosti, a to modul pružnosti **dynamický** a **statický**. Hodnoty se určují na základě zkoušek, ze kterých vzejde průměrná hodnota používaná pro výpočet. Zároveň pro tyto hodnoty existují dvě různé možné interpretace výsledků příslušné povaze zkoušky. Pro destruktivní měření modulu pružnosti je používán **sečnový modul**, pro nedestruktivní je používán **tečnový modul**.



Obr. 3.19. – Rozdíl ve vyhodnocení sečnového a tečnového modulu pružnosti z grafu. [38]

Není možné vyjádřit vztah, mezi pevností betonu v tlaku a modulem pružnosti, který by bylo možné aplikovat na všechny varianty betonů. To lze pouze pro beton o stejném složení. Změna pevnosti betonu je podmíněná změnou jeho složení, jež ovšem nemusí mít stejný efekt na modul pružnosti, proto jeden určitý vztah vyjádřit nelze. Při

návrhu konstrukce citlivé na deformace je tedy nutné modul pružnosti přesně určit ve specifikaci betonu. [39]

Nejdůležitější složkou ovlivňující modul pružnosti, je typ použitého kameniva. Dle měření provedených doktorem Cikrlem a inženýrem Kocábem na VUT v Brně na třech relativně identických vzorcích lišících se pouze typem kameniva (tabulka 3.20.) je vidět značný rozdíl mezi hodnotou modulu pružnosti mezi jednotlivými vzorky. (tabulka 3.21.).

	ŽULA	DROBA	ČEDIČ
vodní součinitel	0,33	0,33	0,33
CEM I 42,5 R	420	420	420
metakaolin	35	35	35
voda	150	150	150
superplastifikátor	7,5	7,5	7,5
frakce 8/16	975	975	1097
frakce 4/8	245	245	275
frakce 0/4	625	625	625

Tab. 3.20. – Složení jednotlivých směsí betonů použitých pro měření. [40]

Doba zrání	E _c [GPa]			f _c [MPa]		
	ŽULA	DROBA	ČEDIČ	ŽULA	DROBA	ČEDIČ
1	29,0	22,8	35,0	48,4	45,2	51,9
28	40,5	32,8	47,5	105,1	99,1	117

Tabulka 3.21. – Hodnoty modulu pružnosti a pevnosti betonu s různým kamenivem po 1 a 28 dnech. [40]

Zároveň je z měření patrné, že ačkoliv rozdíl modulů pružnosti je mezi směsí s drobou a čedičem až 35 %, rozdíl v tlakových pevnostech tak závatný není (vyšší pevnosti dosahuje beton s čedičem, ačkoliv droba a žula vykazují hodnoty přibližně podobné).

Dalším velmi důležitým vlivem je doba zrání betonu ovlivňující jak modul pružnosti, tak i celkovou pevnost v tahu a tlaku. V tabulce 3.21. jsou uvedeny hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v tlaku v době po 24 hodinách a 28 dnech. Hodnoty modulu pružnosti jsou po 24 hodinách přibližně 70 % oproti výsledné hodnotě, zatímco pevnost se po uplynutí normově stanovené doby tuhnutí přibližně zdvojnásobí.

Poslední z možných úprav ovlivňující výsledný modul pružnosti a pevnost je vodní součinitel. Ten vyjadřuje hmotnostní poměr vody a cementu v čerstvém betonu.

vodní součinitel w	modul pružnosti [GPa]		pevnost v tlaku [MPa]
	E_c	E_{dyn}	f_c
0,33	37	50	92,7
0,38	36	47,2	88,2
0,43	34,3	44,1	73,2

Tabulka 3.22. – Mechanické vlastnosti betonu ve vztahu k vodnímu součiniteli. [40]

V tabulce 3.22. jsou hodnoty vztažené na vodní součinitel, s jehož rostoucí hodnotou klesá modul pružnosti spolu s pevností v tlaku. Ta však klesá výrazně rychleji a to 21 % oproti poklesu 7,3 % modulu pružnosti.

Vztah mezi tuhostí konstrukce a modulem pružnosti, resp. pevností v tahu je samozřejmě přímo úměrný. Ve výpočtech se modul pružnosti projevuje ve výpočtu poddajnosti. Pevnost v tlaku se analogicky zvyšuje s pevností v tahu (ač její hodnota je výrazně nižší). V praxi se větší tahová pevnost projeví zvýšením hodnoty kritického momentu, při kterém dochází ke vzniku trhlin.

Dalším možným zásahem do konstrukce je úprava vyztužení. Ta může být velmi efektivním nástrojem pro úpravu tuhosti konstrukce a její odolnosti vůči přetvoření. Může být provedena v mnoha variantách.

- **zvětšení plochy výztuže**
- **využití předpínání**
- **spřažením ocelových nosníků s betonem**

4. NÁVRH OBÁLKY

RADIOTERAPEUTICKÉHO ZAŘÍZENÍ

Předmětem návrhu jsou dvě varianty stínící konstrukce pro zařízení CyberKnife® M6™ Series, což je radioterapeutické zařízení produkující při léčbě silné gama záření. Návrh je proveden v souladu s doporučeními a požadavky výrobce přístroje ACCURAY® pro zaručení správného provozu a životnosti přístroje.

Stínící konstrukce je součástí většího nemocničního komplexu, jehož návrh není předmětem práce. Případné návaznosti na zbytek konstrukce tedy nejsou uvažovány, nebo jsou započítány odhadem.

Obálka je betonová konstrukce, jejíž hlavní dominantou je značná masivnost všech prvků a tvarové uzpůsobení pro zajištění odstínění škodlivých gama paprsků ionizujícího záření ve všech směrech, a to zejména v prostupech a vchodu. Jsou vypracovány dvě materiálové varianty, jedna za použití betonu o obvyklé objemové hmotnosti 2350 kg/m^3 , druhá za použití těžkého barytového betonu o objemové hmotnosti 3500 kg/m^3 . Součástí obálky jsou také sousední provozní prostory jako ovládací místnost a technická místnost, jejichž návrh je také proveden dle doporučení výrobce. Výsledné návrhy jsou porovnány v ohledu na cenu, efektivnost a celkovou vhodnost pro daný účel.

4.1. TECHNICKÉ POŽADAVKY KONSTRUKCE

4.1.1. SEZNAM PŘÍSTROJŮ A VYBAVENÍ

Objekt obsahuje tato primární funkční zařízení:

zařízení	rozměry [mm]	hmotnost [kg]
šestiosý manipulátor	2807 x 1428 x 2728	2094
lineární urychlovač		330
sekundární kolimátory	70 x 64 x 64	127
Iris™ kolimátor	152 x 152 x 267	22,7
ovladač manipulátoru	330 x 254 x 73	1,36
2x podlahový detektor obrazu	2794 x 724 x 264	430,3
2x zdroje RTG paprsků	506 x 358 x 405	73
2x tepelný výměník pro zdroje RTG paprsků	244 x 232 x 121	6,13
2x generátory pro zdroje RTG Paprsků	609 x 381 x 685	150
Synchrony® System kamera	915 x 457 x 1905	11,34
centrální výpočetní jednotka	900 x 900 x 1400	21,00
RoboCouch® Systém	2235 x 1045 x 2023	1701
RoboCouch® ovládací modul	330 x 152 x 280	1,36
Xchange® stůl	1290 x 736 x 1290	180,6

Sekundární zařízení, zprostředkovávající bezproblémový provoz a odpovídající normovým požadavkům na objekt:

- hands-free interkom
- bezpečnostní kamera
- výpočetní technika
- zaměřovací lasery
- klimatizační jednotka

Vybavení pro práci s přístrojem:

- tlaková lahev fluoridu sírového (alespoň 99,9 %)

4.1.2. STÍNÍCÍ VLASTNOSTI KONSTRUKCE

Dle doporučení výrobce jsou části stínící konstrukce rozděleny na **primární** a **sekundární** bariéru. Pro primární bariéru označující svislé okolní stěny je doporučena tloušťka konstrukce z běžného betonu na 1524 mm (pro železobeton o objemové hmotnosti 2400 kg/m³). Tloušťka sekundární bariéry označující stropní konstrukci je doporučena 1067 mm). Doporučení jsou však provedena na základě norem neplatných v České republice. Podrobnější výpočet viz. kapitola 4.4.2.

4.1.3. SPECIFIKACE PROSTORU

VYŠETŘOVNA

- Pro danou konfiguraci zařízení je výrobcem doporučena plocha vyšetřovací místnosti min. 7,32 x 6,4 m (hodnota zajišťující dostatečný prostor pro pohyb, umístění primárního, sekundární vybavení a podružných objektů pro efektivnější provoz (skříňky, zásuvky atp.). Absolutní minimum plochy místnosti pro možný provoz zařízení je 6,4 x 4,83 m.
- Světlá výška je doporučena 3,35 metru či více. Absolutní minimum je výrobcem stanoveno na 2,9 m.
- Je nutné zajistit dostatečně velký průchod do místnosti, pro umožnění instalace všech zařízení. Minimální rozměry vstupu do obálky přístroje jsou 1219 x 2134 mm.

OVLÁDACÍ MÍSTNOST

- Požadavky na plochu ovládací místnosti odpovídají nutnému prostoru pro možnou práci nejméně 2 osob na 3–4 pracovištích. Dle výrobce zařízení by měla mít minimálně 9,3 m². Pro možnou instalaci rozvodů tato místnost musí být situována vedle vyšetřovny.
- Světlá výška místnosti nepodléhá žádným zvláštním požadavkům.
- Prostor vstupu do místnosti nepodléhá žádným zvláštním požadavkům.

TECHNICKÁ MÍSTNOST

- Plocha technické místnosti musí vyhovovat požadavkům na umístění zdrojů zářičů, elektrickým rozvodům a další umístěné technice. Pro danou variantu

generátorů RTG paprsků umístěných uvnitř technické místnosti výrobce doporučuje plochu 15 m² či větší (absolutní minimum = 13,9 m²). Pro možnou instalaci rozvodů tato místnost musí být situována vedle vyšetřovny.

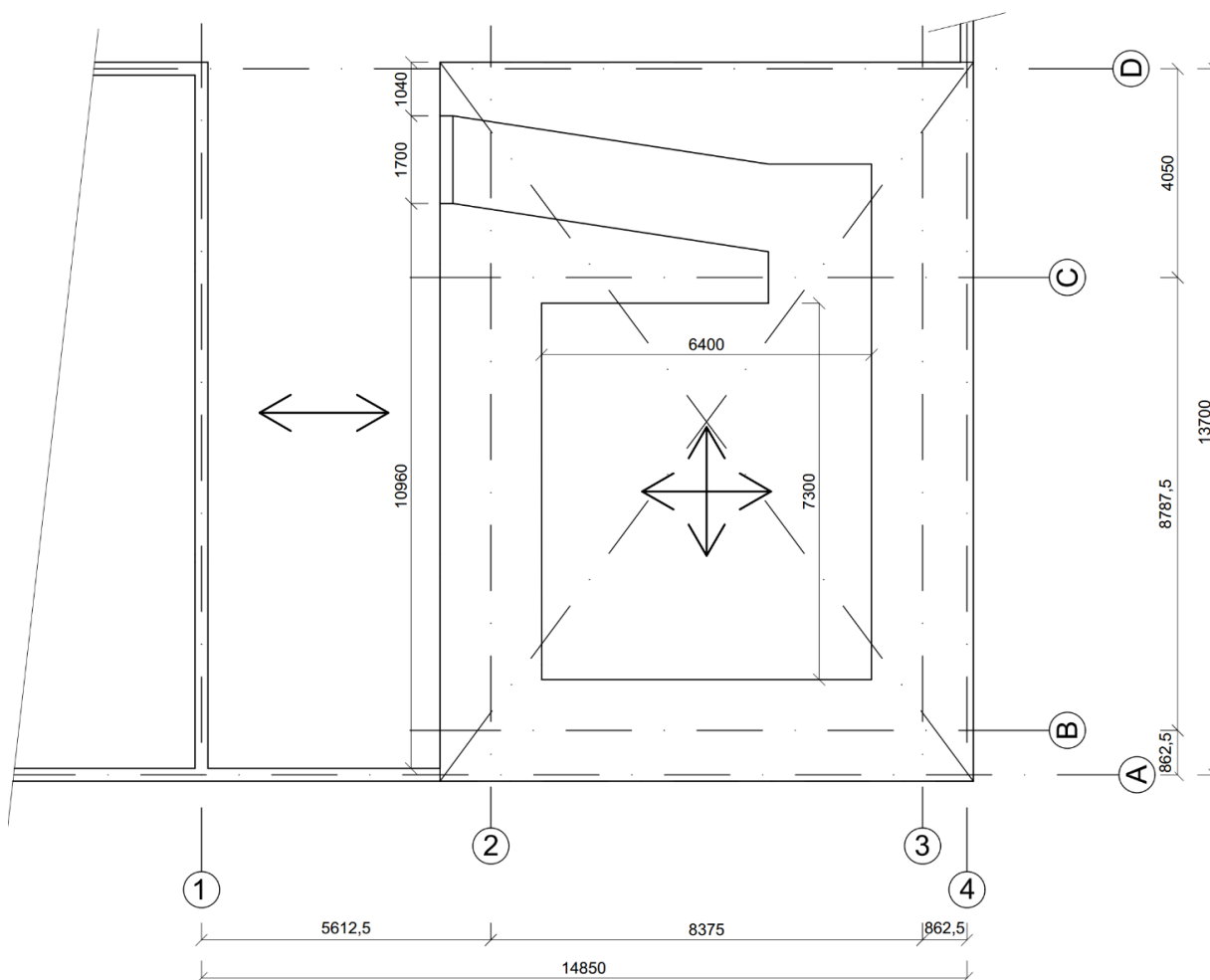
- Světlá výška místnosti by měla být minimálně 2,135 m.
- Vstup do místnosti je navržen o minimálních rozměrech 0,914 x 2,134 m.

4.1.4. OSAZENÍ PŘÍSTROJŮ

Přístroje jsou přišroubovány ke speciálním rámcům dodaným výrobcem (Jedná se o manipulátor a polohovatelné lůžko Robocouch). Tyto rámy jsou instalované na betonové desce o tloušťce 400 mm, odskočené od okolních konstrukcí o 350 mm.

4.2. SCHÉMA A POPIS KONSTRUKCE

4.2.1. KONSTRUKČNÍ SCHÉMA – VARIANTA 1



- konstrukční výška podlaží: 4,925 m
- účel objektu: stínící konstrukce zařízení
- vodorovná nosná konstrukce: ŽB deska z běžného betonu
- svislá nosná konstrukce: ŽB monolitické stěny

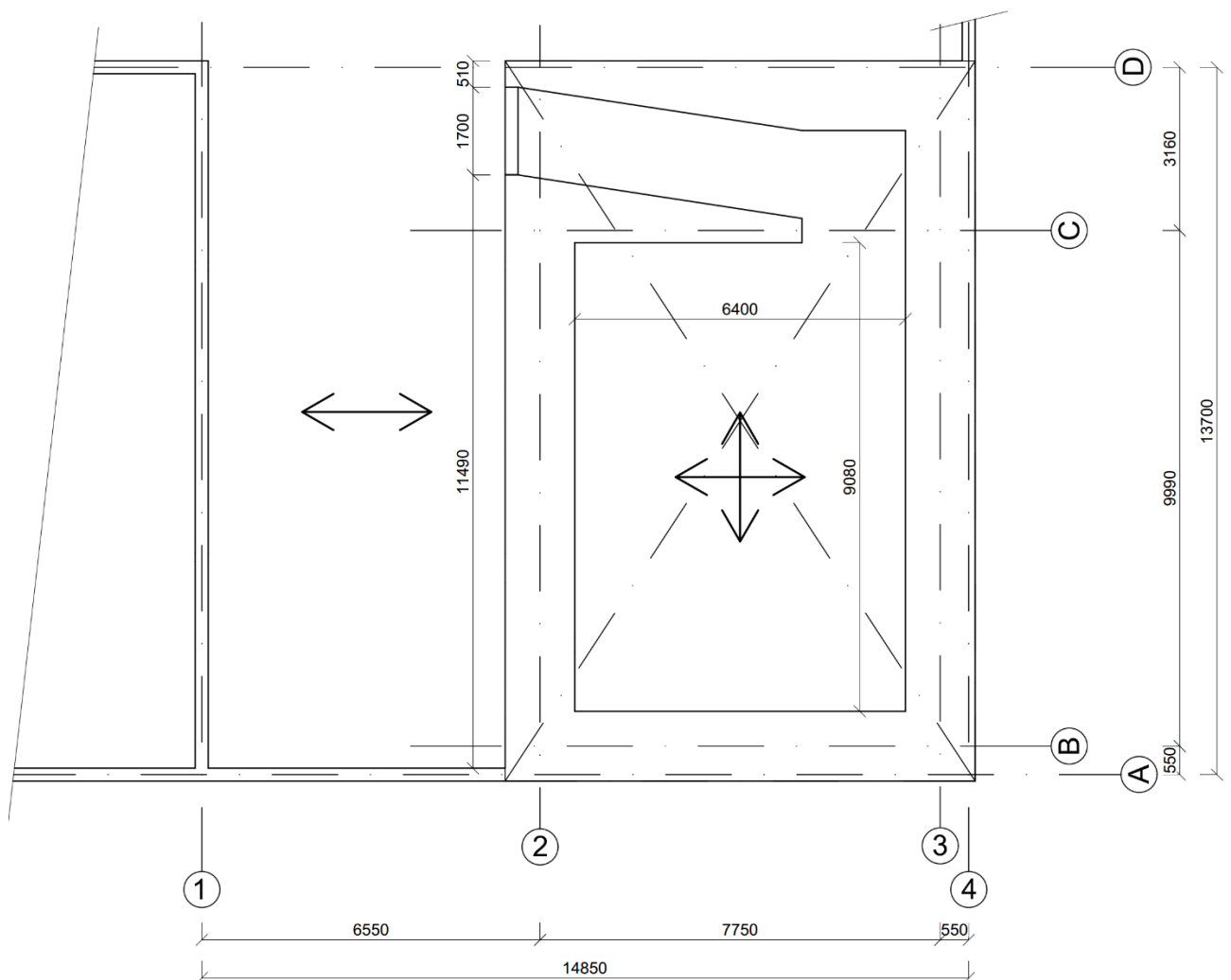
použité materiály:

beton: veškeré konstrukce: běžný beton C30/37 XC2 (CZ) – Cl 0,2 – S3 – D_{max} 22
(více viz. kapitola 4.4.3.)

ocel: B500B

zdivo: Porotherm 11,5

4.2.2. KONSTRUKČNÍ SCHÉMA – VARIANTA 2



- konstrukční výška podlaží: 4,925 m
- účel objektu: stínící konstrukce zařízení
- vodorovná nosná konstrukce: ŽB monolitická deska
- svislá nosná konstrukce: ŽB monolitické stěny

použité materiály:

beton: veškeré konstrukce: běžný beton C30/37 XC2 (CZ) – Cl 0,2 – S3 – D_{max} 22
(více viz. kapitola 4.4.3.)

ocel: B500B

zdivo: Porotherm 11,5

4.3. PŘEHLED ZATÍŽENÍ

4.3.1. STÁLÉ ZATÍŽENÍ

4.3.1.1. NOSNÉ KONSTRUKCE

Vlastní tíha nosných prvků řešena v kapitole 4.4.

4.3.1.2. PODLAHY

vyšetřovna		tloušťka [m]	zatížení g_k [kN/m ²]	zatížení g_d [kN/m ²]
1	Breno - PVC podlaha	0,005	0,0715	0,097
2	tlumící podložka z pěněného PE	0,01	0,002	0,003
3	separační PE fólie DEKSEPAR	0,0002	0,0016	0,002
4	roznášecí vrstva z betonu s KARI sítí 150/150/4	0,055	1,375	1,856
5	beton (výplň instalační mezery)	0,275	6,875	9,281
6	izolace z asfaltových pásů GLASTEK 40 special	0,004	0,02	0,027
	celkem	0	8,345	11,266

ostatní místnosti		tloušťka [m]	zatížení g_k [kN/m ²]	zatížení g_d [kN/m ²]
1	Breno - PVC podlaha	0,005	0,0715	0,097
2	tlumící podložka z pěněného PE	0,01	0,002	0,003
3	separační PE fólie DEKSEPAR	0,0002	0,0016	0,002
4	roznášecí vrstva z betonu s KARI sítí 150/150/4	0,055	1,375	1,856
5	separační PE fólie DEKSEPAR	0,0002	0,0016	0,002
6	ISOVER XPS	0,08	0,008	0,011
7	izolace z asfaltových pásů GLASTEK 40 special	0,004	0,02	0,027
	celkem	0,1544	1,480	1,998

místnost nad obálkou		tloušťka [m]	zatížení g_k [kN/m ²]	zatížení g_d [kN/m ²]
1	Breno - PVC podlaha	0,005	0,0715	0,097
2	tlumící podložka z pěněného PE	0,01	0,002	0,003
3	separační PE fólie DEKSEPAR	0,0002	0,0016	0,002
4	roznášecí vrstva z betonu s KARI sítí 150/150/4	0,055	1,375	1,856
5	separační PE fólie DEKSEPAR	0,0002	0,0016	0,002
6	pěnový polystyren RIGIFLOOR 4000	0,08	0,008	0,0108
	celkem	0,1544	1,460	1,971

4.3.1.3. OBVODOVÝ PLÁŠŤ

Stěny obálky a zbytku nemocničního komplexu jsou tvořeny monolitickými železobetonovými stěnami, které jsou zateplené kontaktním zateplovacím systémem Isover. Jeho tíhu lze zanedbat.

4.3.1.4. PŘÍČKY

Příčky jsou v řešené části konstrukce umístěny pouze pro oddělení prostorů technické místnosti, ovládací místnosti a čekárny. V řešeném výřezu mají další dělicí funkci nosné železobetonové stěny. Příčky jsou provedeny z bloků Porotherm 11,5

- plošná hmotnost: 100 kg/m²
- světlá výška místnosti: 4,57 m
- liniové zatížení: 4,57 kN/m

4.3.2. PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ

4.3.2.1. UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

- čekárna
 - $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$
- ovládací místnost
 - $q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$
- technická místnost
 - $q_k = 1 \text{ kN/m}^2$ (odhadováno vzhledem k množství zařízení)
- konferenční místnost nad obálkou
 - $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$

4.4. PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH A POSOUZENÍ NOSNÝCH PRVKŮ

4.4.1. STROPNÍ DESKY

Stropní desky jsou v celém objektu navrženy jako železobetonové, monolitické. Tloušťka stropní desky obálky záření je navržena s hodnotou 1070 mm dle doporučení výrobce, neboť od přístroje se očekává emitace škodlivých paprsků odkloněných od vodorovné roviny v úhlu maximálně 18° [15] a masivnější deska má účel zachytit pouze možné odražené, či nepředpokládané záření. Podrobnější výpočet tedy není nutný. Deska nad zbytkem užitné ho prostoru je navržena „klasickým“ výpočtem.

- beton C30/37
- $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$
- $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$
- předpokládaný profil výztuže: $\varnothing = 12 \text{ mm}$
- předpokládané krytí výztuže: $c = 25 \text{ mm}$
- předpokládaný stupeň vyztužení: $\rho < 0,5 \%$

NÁVRH DLE PODMÍNKY OHYBOVÉ ŠTÍHLosti:

$$\lambda = \frac{L}{d} \leq \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab}$$

$$d \geq \frac{L}{\lambda_d}$$

varianta 1 – deska 1.2.

- $\kappa_{c1} = 1$
- $\kappa_{c2} = 1$
- $\kappa_{c3} = 1,2$
- předpokládaný stupeň vyztužení desek $\rho \leq 0,5\%$
- $\lambda_{d,tab} = 30,8$
- $L = l_0 + a_1 + a_2 = 4,5 + 0,1 + 0,1 = 4,7 \text{ m}$
 - o l_0 je světlá délka mezi podporami, a_1 je min. $[t/2; h/2]$

varianta 2 – deska 2.2.

- $\kappa_{c1} = 1$
- $\kappa_{c2} = 1$
- $\kappa_{c3} = 1,2$
- předpokládaný stupeň vyztužení desek $\rho \leq 0,5\%$
- $\lambda_{d,tab} = 30,8$
- $L = l_0 + a_1 + a_2 = 5,75 + 0,1 + 0,1 = 5,95 \text{ m}$
 - o l_0 je světlá délka mezi podporami, a_1 je min. $[t/2; h/2]$

deska	L [m]	$\lambda_{d,tab}$	λ	d [mm]	h_d [mm]
D1.2.	4,7	30,8	36,96	127,165	158,165
D2.2.	5,95	30,8	36,96	160,985	192,985

EMPIRICÍKÝ NÁVRH TLOUŠŤKY DESKY

$$h_d \geq \left(\frac{1}{30} \div \frac{1}{25} \right) \cdot L$$

	L				h_d
D1.2.	4,7	156,667	134,28571	→	200
D2.2.	5,95	198,333	170	→	200

Tloušťka desek 1.2. a 2.2. je navržena $h_d = 200 \text{ mm}$.

POSOUZENÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI

D 1.1. – obousměrně pnutá		tloušťka	f_k [kN/m ²]	γ_F	f_d [kN/m ²]
1	ŽB deska	1,07	26,75	1,35	36,113
2	podlaha		1,460	1,35	1,971
3	užitné		3	1,5	4,500
celkem					42,583

- $l_x = 7,47$ m

- $l_y = 8,37$ m

Rozdělení zatížení do směrů x a y dle podobnosti průhybů.

$$w_x = w_y$$

$$\frac{1}{384} \frac{f_x l_x^4}{EI} = \frac{1}{384} \frac{f_y l_y^4}{EI}$$

$$f_x = \frac{f_y \cdot l_y^4}{l_x^4}$$

- $f_x = 26,054$ kN/m²

- $m_{Ed,1} = \frac{1}{12} f_x l_x^2 = \frac{1}{12} 26,054 \cdot 7,47^2 = 121,15$ kNm

- $m_{Ed,2} = \frac{1}{24} f_x l_x^2 = \frac{1}{24} 26,054 \cdot 7,47^2 = 60,576$ kNm

D 1.2. – jednosměrně pnutá		tloušťka	f_k [kN/m ²]	γ_F	f_d [kN/m ²]
1	ŽB deska	0,2	5	1,35	6,750
2	podlaha		1,460	1,35	1,971
3	užitné		3	1,5	4,500
celkem					13,221

- $L = 4,7$ m

- $m_{Ed,1} = \frac{1}{12} f_d l^2 = \frac{1}{12} 13,221 \cdot 4,7^2 = 24,337$ kNm

- $m_{Ed,2} = \frac{1}{24} f_d l^2 = \frac{1}{24} 13,221 \cdot 4,7^2 = 12,168$ kNm

D 2.1. – obousměrně pnutá		tloušťka	f_k [kN/m ²]	γ_F	f_d [kN/m ²]
1	ŽB deska	1,07	26,75	1,35	36,113
2	podlaha		1,460	1,35	1,971
3	užitné		3	1,5	4,500
celkem					42,583

- Obdobně jako D 1.1.
- $f_x = 32,924 \text{ kN/m}^2$
- $m_{Ed,1} = \frac{1}{12} f_x l_x^2 = \frac{1}{12} 32,924 \cdot 7,47^2 = 153,1 \text{ kNm}$
- $m_{Ed,2} = \frac{1}{24} f_x l_x^2 = \frac{1}{24} 26,054 \cdot 7,47^2 = 76,55 \text{ kNm}$

D 2.2. – jednosměrně pnutá		tloušťka	f_k [kN/m ²]	γ_F	f_d [kN/m ²]
1	ŽB deska	0,2	5	1,35	6,750
2	podlaha		1,460	1,35	1,971
3	užitné		3	1,5	4,500
celkem					13,221

- $L = 5,95 \text{ m}$
- $m_{Ed,1} = \frac{1}{12} f_d l^2 = \frac{1}{12} 13,221 \cdot 5,95^2 = 39,004 \text{ kNm}$
- $m_{Ed,2} = \frac{1}{24} f_d l^2 = \frac{1}{24} 13,221 \cdot 5,95^2 = 19,502 \text{ kNm}$

		h_d [mm]	d	m_{Ed}	μ	ξ	\emptyset	n	$A_{s,rqd}$	$A_{s,prov}$	ρ
D1.1.	podpora	1070	1039	121,152	0,006	0,007	12	3	268,813	339,292	0,0003
	pole	1071	1040	60,5762	0,003	0,004	12	2	134,088	226,195	0,00022
D1.2.	podpora	200	169	24,3369	0,043	0,054	12	4	338,417	452,389	0,00268
	pole	200	169	12,1685	0,021	0,027	12	2	167,325	226,195	0,00134
D2.1.	podpora	1070	1039	153,1	0,007	0,009	12	4	339,952	452,389	0,00044
	pole	1071	1040	76,5498	0,004	0,004	12	2	169,509	226,195	0,00022
D2.2.	podpora	200	169	39,0035	0,068	0,088	12	5	550,019	565,487	0,00335
	pole	200	169	19,5018	0,034	0,043	12	3	269,966	339,292	0,00201

- splněna podmínka $\xi < \xi_{opt} = (0,1 \div 0,15)$
- splněna momentová únosnost desek $m_{Ed} < m_{Rd}$
- stupeň vyztužení je nižší než předpokládaných 0,5 %

NAVRŽENÉ ROZMĚRY DESEK VYHOVUJÍ

4.4.2. SVISLÉ NOSNÉ KONSTRUKCE

V řešené části konstrukce jsou nosné stěny ve dvou funkčních variantách. Běžné nosné železobetonové stěny a stínící železobetonové stěny pro odstínění ionizačních účinků produkovaného záření.

Běžné nosné stěny jsou navrženy o tloušťce 250 mm.

Podrobný návrh tloušťky stínících stěn viz. dále.

Vzhledem k neznámým podrobnostem zbytku konstrukce nelze určit zatížení působící na stěny v 1. NP. Vzhledem k značné tloušťce lze ověření únosnosti na tlak zanedbat.

NÁVRH TLOUŠŤKY STÍNÍCÍ KONSTRUKCE

Dle dokumentace přístroje odhadované množství záření při běžných zákrocích hlavy na 512 cGy/zárok a zákrocích páteře, či zbytku těla na 970 cGy/zárok.

Při odhadovaném množství šesti zákroků hlavy a páteře denně:

$$I_0 = 6 \cdot 5,12 + 6 \cdot 9,7 = 88,92 \text{ Gy} = 88920000 \mu\text{Sv}$$

Hygienický limit: $I_1 = 17,0 \mu\text{Sv}$ za směnu (pro prostory s výskytem osob delším jak 1/3 směny) [10]

Stínící schopnosti betonů vyjádřené pomocí Half value layer a Tenth value layer při ozáření izotopem ^{60}Co . [41]

Cobalt - 60	HVL	TVL
běžný beton (1)	87,9	293
barytový beton (2)	60,2	200

varianta 1

Výpočet provedený pomocí hodnoty desetinové tloušťky betonu:

$$t_{(1)} = \log \frac{I_0}{I_1} \cdot TVL_{(1)}$$

$$t_{(1)} = \log \frac{88920000}{17} \cdot 293 = 1968,535 \text{ mm}$$

Tloušťka stínící stěny varianty z běžného betonu je navržena: $t_{(1)} = 1975 \text{ mm}$.

Kontrola pomocí hodnoty polotloušťky betonu:

$$t_{(1)} = \log_2 \frac{I_0}{I_1} \cdot HVL_{(1)}$$

$$t_{(1)} = \log_2 \frac{88920000}{17} \cdot 87,9 = 1961,799 \text{ mm}$$

varianta 2

$$t_{(2)} = \log \frac{I_0}{I_1} \cdot TVL_{(2)}$$

$$t_{(2)} = \log \frac{88920000}{17} \cdot 200 = 1343,710 \text{ mm}$$

Tloušťka stínící stěny varianty z barytového betonu je navržena: $t_{(2)} = 1345 \text{ mm}$.

Kontrola pomocí hodnoty polotloušťky betonu:

$$t_{(2)} = \log_2 \frac{I_0}{I_1} \cdot HVL_{(2)}$$

$$t_{(2)} = \log_2 \frac{88920000}{17} \cdot 60,2 = 1343,576 \text{ mm}$$

POSOUZENÍ NAVRHOVANÝCH TLOUŠŤEK

Tlumicí efektivita navržené konstrukce:

$$I_{1(1)} = \frac{1}{\frac{t_{(1)}}{10^{TVL(1)}}} \cdot I_0$$

$$I_{1(1)} = \frac{1}{\frac{1975}{10^{293}}} \cdot 88920000 = 16,1579 \mu Sv$$

$$16,1579 \leq 17 [\mu Sv] \text{ VYHOVUJE}$$

$$I_{1(2)} = \frac{1}{\frac{t_{(2)}}{10^{TVL(2)}}} \cdot I_0$$

$$I_{1(2)} = \frac{1}{\frac{1345}{10^{200}}} \cdot 88920000 = 16,749 \mu Sv$$

$$16,749 \leq 17 [\mu Sv] \text{ VYHOVUJE}$$

OVĚŘENÍ VHODNÉ GEOMETRIE

varianta 1

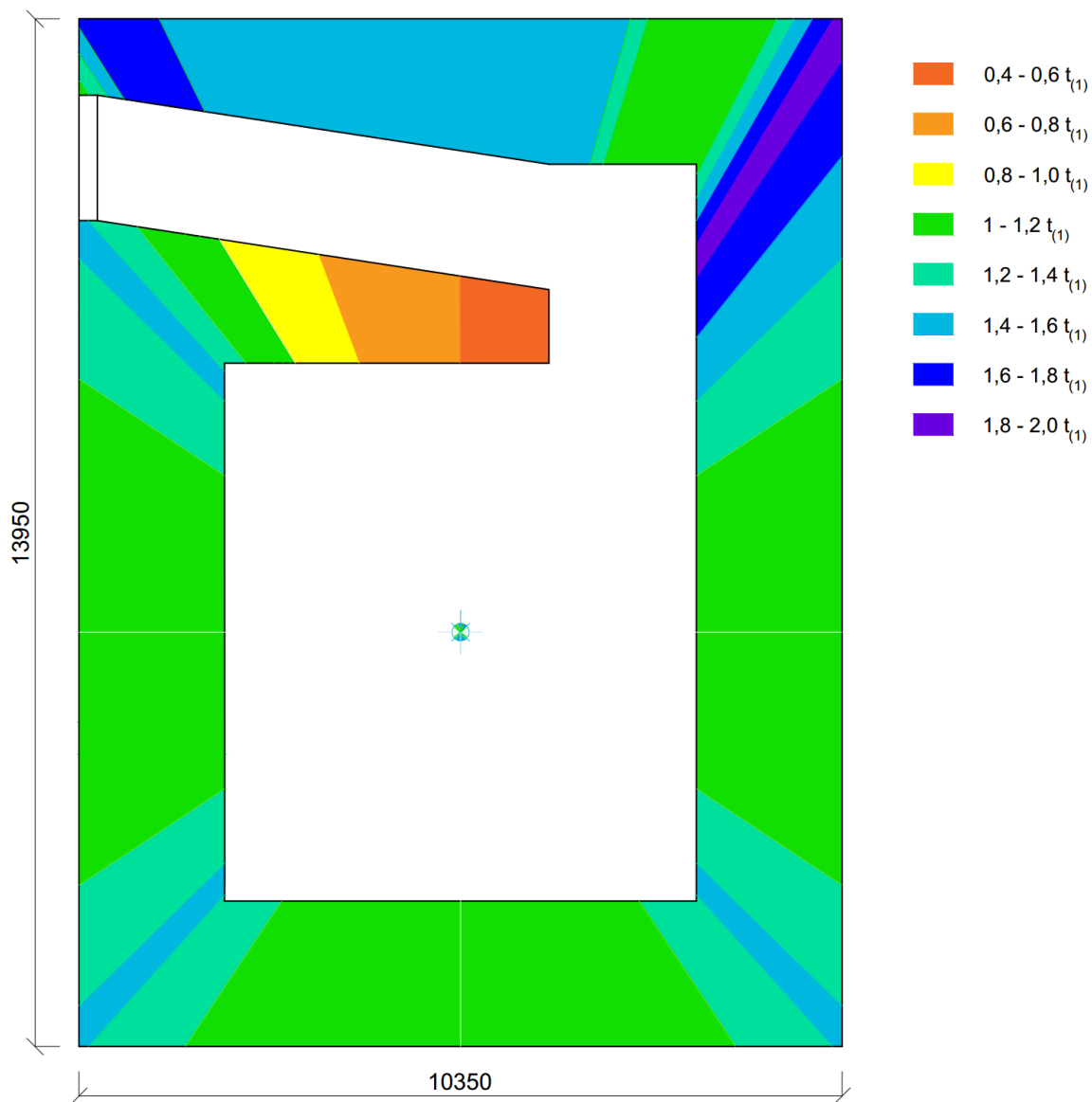


Schéma efektivní tloušťky stínící konstrukce, vyjádřené v násobcích vypočtené minimálně hodnotě $t_{(1)}$.

NAVRŽENÁ GEOMETRIE STÍNÍCÍ OBÁLKY VE VARIANTĚ 1 VYHOVUJE

Pozn. Prostor ve vstupní chodbě není dostatečně odstíněn a není možné jej považovat za bezpečný. Označení nebezpečného pásma je nutné umístit před vstupem do obálky.

varianta 2

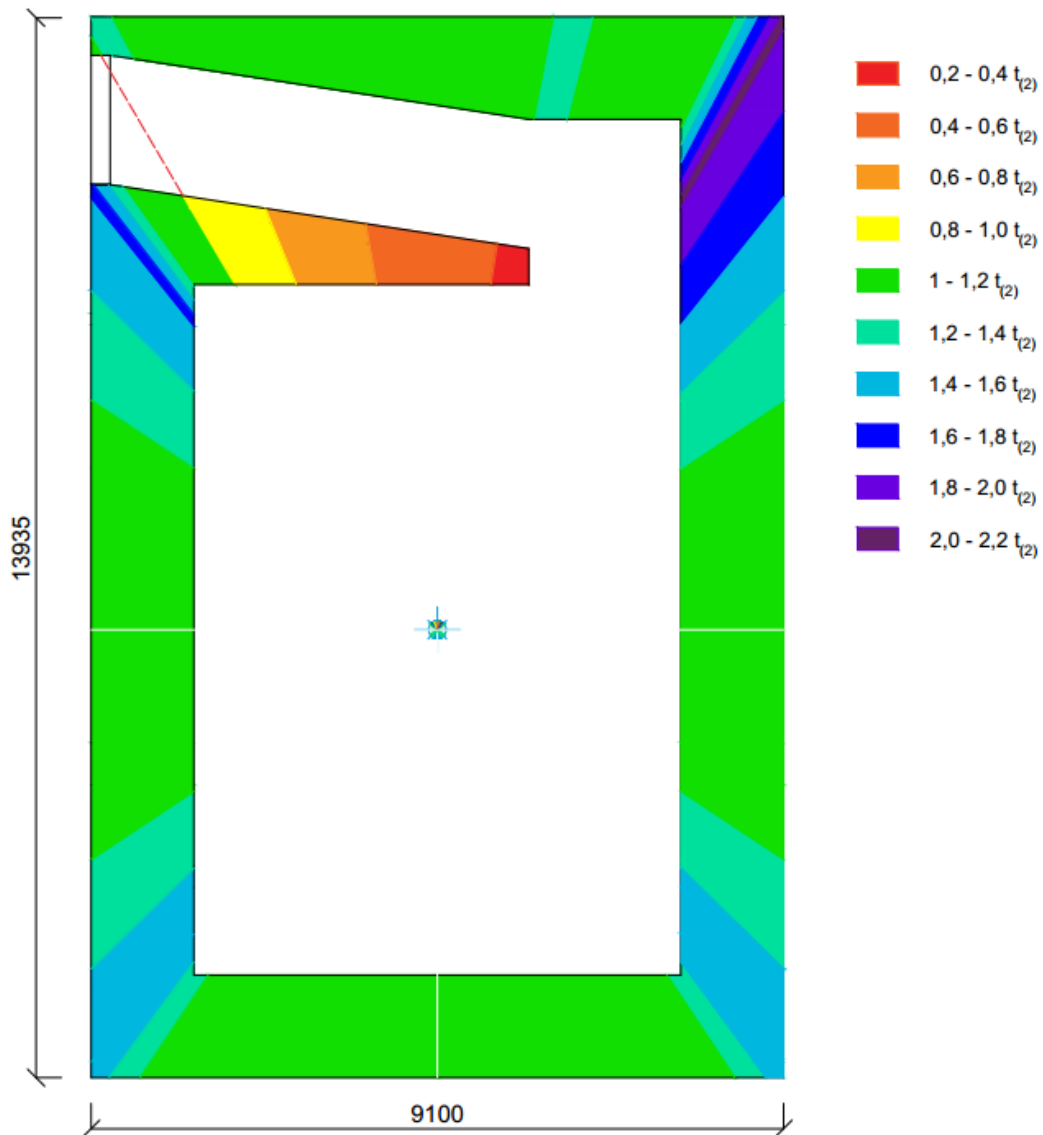


Schéma efektivní tloušťky stínící konstrukce, vyjádřené v násobcích vypočtené minimálně hodnotě $t_{(2)}$.

NAVRŽENÁ GEOMETRIE STÍNÍCÍ OBÁLKY VE VARIANTĚ 2 VYHOVUJE

Pozn. Prostor ve vstupní chodbě není dostatečně odstíněn a není možné jej považovat za bezpečný. Označení nebezpečného pásma je nutné umístit před vstupem do obálky. V prostoru vstupních dveří vzniká zdánlivě hraniční případ. Pro variantu, kdy nadměrné množství paprsků dopadá na dveře, je nutné posoudit stínící schopnosti dveří. V tomto případě jsou však paprsky zachyceny betonem o tloušťce 1350 a 250 mm. Dveře jsou dle pokynů navrženy s olověnou vložkou. Odstínění je tedy možné uvažovat za dostatečné.

4.4.3. ÚPRAVA RECEPTURY BETONU VZHLEDEM K VÝVINU HYDRATAČNÍHO TEPLA

- Nutné omezit vývoj hydratačního tepla Q_{HT} pod 270 kJ/kg, po 7 dnech od zabetonování. [42]

Pro obě varianty návrhu je doporučeno, aby betonová směs byla složena s ohledem na tuto podmínku omezení hydratačního tepla.

cement

- Pevnost 32,5 N (s očekávaným vývojem hydratačního tepla 150-300 kJ/kg po 7 dnech) [42]
- Cement s vyšším obsahem slínku (CEM III).

kamenivo

- Volit maximální možné zrno D_{max} (ideálně 22 a výše)

příměsi

- Přidat latentně hydraulické příměsi, snižující potřebné množství cementu, ergo i hydratační teplo (struska, popílek a.j.).

přísady

- Použít zpomalovače tuhnutí, pro rozprostření vývinu hydratačního tepla do delšího časového úseku a následné snížení účinku tepla na napětí v konstrukci.

vodní součinitel

- Přihlédnout k možné volbě vyššího vodního součinitele pro další redukci hydratačního tepla. Směs navržená technologem by však měla odpovídat potřebám po dokonalé homogenitě a dobrém zpracování.

Během betonáže a následném tuhnutí betonu je doporučeno pečlivě sledovat vývoj teploty, případně přistoupit k chlazení konstrukce.

4.5. POROVNÁNÍ VARIANT NÁVRHU

4.5.1. PROSTOR

Ze subtilnějších konstrukcí plyne samozřejmě více užité podlahové plochy. V rámci budovy nemocnice se neuvažuje uvolnění plochy za účelem zisku z pronájmu, či jiného ekonomického zisku, ale více prostoru v jednotlivých místech umožňuje snazší manipulaci, více možností při běžném provozu (např. více pracovišť v ovládací místnosti a z nich plynoucí větší komfort při práci). Zároveň větší podlahová plocha nad hodnotu doporučeného minima umožňuje lepší manipulaci s pacientem.

Podlahová plocha varianty 1 – 124,183 m²

Podlahová plocha varianty 2 – 150,578 m²

Pozn. Porovnávány jsou celé komplexy radioterapeutického zařízení včetně podružných místností spojených s provozem zařízení.

4.5.2. OBJEM BETONU A CENA

Varianta 1. – Konstrukce provedena pouze z běžného betonu

beton	plocha	výška	m ³
STĚNY obálky	81,431	4,05	330,391
strop obálky	144,383	1,07	154,489
deska pod obálkou	161,385	0,4	64,554
ostatní stěny	4,6125	4,725	21,794
ostatní stropy	66,2625	0,2	13,253
ostatní desky	56,4975	0,3	16,949
			601,431

Při ceně 3000 Kč za m³ betonu lze odhadovat cenu konstrukce na 1 804 292 Kč.

Varianta 2. – Konstrukce se stěnami z barytového betonu

beton	plocha	výška	m ³
stěny obálky	54,7206	4,05	222,213
strop obálky	126,945	1,07	135,831
deska pod obálkou	143,129	0,4	57,2516
ostatní stěny	4,925	4,725	23,2706
ostatní stropy	83,7	0,2	16,74
ostatní desky	73,935	0,3	22,1805
	barytový beton		222,213
	běžný beton		255,274

Při ceně 3000 Kč za m³ běžného betonu a 23 000 Kč za m³ barytového betonu [13] , lze odhadovat cenu barytového celku na 5 110 908 Kč. Cena zbytku betonové konstrukce provedené z běžného betonu lze odhadovat na 765 822 Kč. Cena celkem tedy činí přibližně 5 876 729 Kč.

4.5.3. CELKOVÉ POROVNÁNÍ VARIANT

Při porovnání dvou variant stínící konstrukce je očividný rozdíl přibližně 25 m² podlahové plochy, který je ale vykoupěn cenou použitého barytového betonu, činící variantu 2 přibližně 3,25x dražší. Efektivita různých variant konstrukčních a materiálových řešení se velmi odvíjí od situace. V nastaveném případě, kdy je prostor stínící konstrukce předem definován a subtilnější konstrukce představuje pouze komfortní úsporu prostoru, je při takovém cenovém rozdílu jistě výhodnější použít konstrukci z běžného betonu. Mnohdy je však návrh subtilnější baryto-betonové konstrukce nutný, pro splnění všech geometrických a funkčních podmínek. Častým faktorem také bývá vývoj hydratačního tepla, který je velmi omezen právě tenčí konstrukcí s použitím těžšího kameniva.

5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nahlédnout do jednoho z kroků návrhu železobetonových konstrukcí, který do velké míry určuje jejich tvar a vlastnosti. Popsat jaké varianty interakcí mezi přístrojem a konstrukcí je nutné řešit, shrnout možná opatření pro splnění jejich konstrukčních podmínek, a o tyto informace v ucelené podobě obohatit potenciálního čtenáře a autora.

První část je věnována specifikům návrhu konstrukcí, v nichž se nachází zdroj ionizujícího záření. Popisuje proces ionizace atomů, vyjmenovává různé typy záření a vysvětluje, v čem spočívá princip jejich odstínění a škodlivosti pro zdraví člověka. Dále popisuje dva možné přístupy k návrhu ochranných konstrukcí, spočívající v návrhu větší tloušťky konstrukce, či v návrhu konstrukce o větší hustotě.

Druhá část se zabývá mechanickou povahou vztahu přístroje a konstrukce. Popisuje, jakým způsobem probíhá zatížení konstrukce osamělým břemenem, jak se matematicky tato část konstrukce řeší a jakými úpravami lze dosáhnout lepších výsledků napětí způsobených tímto typem zatížení. Dále je vysvětlena problematika zatížení konstrukce dynamickým zatížením, způsobeným oscilací rotujících částí konstrukce a analogicky vliv oscilace konstrukce na správné fungování a životnost přístroje. Jsou vyjmenovány možné zdroje nepříznivého kmitání a dále vysvětlena možná opatření pro jejich útlum, či eliminaci nebezpečných projevů. V závěru druhé části je vysvětlen postup výpočtu průhybu železobetonových prvků s ohledem na vznik trhlin a dotvarování betonu. Pro redukci tohoto projevu zatížení jsou v poslední části třetí kapitoly opět shrnuty varianty úprav konstrukce.

V praktické části je zpracován zběžný návrh dvou variant konstrukce pro odstínění škodlivého záření produkovaného gama nožem Accuray. Jedna z variant je provedena z běžného železobetonu o větší tloušťce, druhá je subtilnější, provedena z barytového betonu. Výpočet je proveden s ohledem na polotloušťku použitých materiálů a výsledné návrhy jsou v závěru porovnány dle ceny, prostoru a vhodnosti v dané situaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Neutronové záření. MEF, Fyzika. [online]. [cit. 7.3.2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/806-neutronove-zareni>
- [2] Elektromagnetické spektrum. Wikipedie. [online]. [cit. 7.3.2020] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- [3] NAVRÁTIL, L. a J. ROSINA. Medicínská biofyzika. 1. vydání. 2005. s. 371-372. ISBN 80-247-1152-4.
- [4] Polotloušťka látek – WikiSkripta. 301 Moved Permanently. [online]. [cit. 8.3.2020] Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Polotloušťka_látek
- [5] NDT Resource centre. Half-Value Layer. [online]. [cit. 14.3.2020] Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/HalfValueLayer.htm>
- [6] Water as Neutron Shielding - Nuclear Power. Nuclear Power for Everybody - What is Nuclear Power. [online]. [cit. 14.3.2020] Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-nuclear-engineering/properties-of-water/water-as-neutron-shielding/>
- [7] HILSDORF. KROPP. KOCH. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete. [Online]. [cit. 14.3. 2020] Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/anzelmo1/docs/hilsdorf.pdf>
- [8] What radiation sources am I exposed to?. [online]. Dostupné z: <https://radwatch.berkeley.edu/rad101#banner>
- [9] Základní princip gama nože. Nemocnice na Homolce. [online]. Copyright 2003 [cit. 21.03.2020]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20131012004353/http://www.homolka.cz/cs-CZ/oddeleni/stereotakticka-a-radiacni-neurochirurgie-osrn/lekselluv-gama-nuz.html>

- [10] Vyhláška 34/1963 Sb. Vyhláška ministerstev zdravotnictví a chemického průmyslu o hygienické ochraně před ionizujícím zářením a o hospodaření se zdroji ionizujícího záření. Zákony pro lidi – Sběrka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění. [online]. [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1963-34>
- [11] ŠTEFAN, Radek. Syllabus přednášky YBEX – ČVUT v Praze. [online]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/FRVS_2013/Prednaska_5.pdf
- [12] Hmotnost betonu. eBeton – Specialista na beton. [online]. [cit. 14.3. 2020] Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/hmotnost-betonu>
- [13] JAŠEK, Jan. Speciální betony – Ochrana proti ionizujícímu záření. Beton TKS. 6/2009, s. 44-47. ISSN 1213-3116
- [14] HOBST, Leonard. VÍTEK, Lubomír. Betony pro konstrukce stínění zdrojů ionizujícího záření. Beton TKS. 6/2003, s. 18-20. ISSN 1213-3116
- [15] ACCURAY. Site planning guide (SPG) CiberKnife® MG™ Series, 11.0. s. 25
- [16] DEMO, Pavel. FYZIKA – Skriptum ČVUT v Praze. 1. vydání. 2008. s. 66. ISBN 978-80-01-04171-0
- [17] Výpočet průhybu a ohybového momentu nosníku. [online]. [cit. 30.3. 2020] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/165-vypocet-pruhybu-a-ohyboveho-momentu-nosniku>
- [18] KOHOUTKOVÁ, Alena. VAŠKOVÁ, Jitka. Zavádění EN 1992: „Navrhování Betonových konstrukcí“ do praxe – poruchové oblasti. Beton TKS. 6/2004. s. 55-58. ISSN 1213-3116
- [19] SEMRÁD, Karel. SZÜCS, Csaba. Řešené příklady betonových konstrukcí pomocí příhradové analogie – ČVUT v Praze. [online]. [cit. 30.3. 2020]. Dostupné z: https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/frvs2009/Prihradova_analogie_a_resene_priklady.pdf
- [20] ŠEJNOHA, Jiří. BITTNAROVÁ, Jitka. Pružnost a pevnost – Skriptum ČVUT v Praze. 2. vydání. 2003. s 77. ISBN 80-01-02742-2

- [21] KOHOUTKOVÁ, Alena. Modely strut-and-tie. [online]. [cit. 30.3. 2020].
Dostupné z:
http://people.fsv.cvut.cz/~kohouale/vyuka/ymvb/syllaby/strut_and_tie.pdf
- [22] TIPKA, Martin a kolektiv. Základní principy navrhování železobetonových konstrukcí a jejich kritických oblastí. [online]. [cit. 30.3. 2020]. Dostupné z:
<https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/rpmt2017>
- [23] Use of offset beams in FEM. FEM DATA STREAMLINER. [online]. [cit. 30.03.2020]. Dostupné z:
https://femds.com/FEM_Guidelines/Model_stiff_by_beam_elem
- [24] d'Alembertův princip. MEF, Fyzika. [online]. [cit. 1.4. 2020]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1224-d-alembertuv-princip>
- [25] BÍLÝ, Petr. TIPKA, Martin. Úvod do problematiky dynamiky betonových konstrukcí. Rešeršní práce ČVUT v Praze. [online]. [cit. 5.4. 2020] Dostupné z:
http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Uvod_do_problem_dynamiky_bet_konstrukci.pdf
- [26] MÁCA, Jiří. Syllabus přednášky DK01 – ČVUT v Praze. [online]. [cit. 5.4. 2020] Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/cgi-bin/homeworks/student/course.pl?course=DYN1&login=guest>
- [27] BAŤA, Miloslav. PLACHÝ, Václav. TRÁVNÍČEK, František. Dynamika stavebních konstrukcí – Příkladové skriptum. ČVUT v Praze. 1. vydání. 1994. s. 126. ISBN 80-01-01129-1
- [28] LUKAVEC, Martin. Dynamické účinky technologických strojních zařízení na základy budov. Časopis Stavebnictví [online]. [cit. 06.04.2020]. Dostupné z:
https://www.casopisstavebnictvi.cz/dynamicke-ucinky-technologickyh-strojnich-zarizeni-na-zaklady-budov_N1501
- [29] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut. 2006. [online]. Dostupné z:
<https://cdnassets.hw.net/dims4/GG/7aa9353/2147483647/resize/300x%3E/quality/90>

[/?url=https%3A%2F%2Fcdnassets.hw.net%2Fd3%2F56%2F6fafebad4ea9b556cb4d9131f241%2Fhospitals-1-tcm45-460599.jpg](https://www.fcdnassets.hw.net/2fd3/2f56/2f6fafebad4ea9b556cb4d9131f241/2fhospitals-1-tcm45-460599.jpg)

[30] ZICH, Miloš. BAŽANT, Zdeněk. Průhyby železobetonových desek. Beton TKS. 6/2010. s. 70-74. ISSN 1213-3116

[31] Profesis. Základní informace k výkonu odborných profesí ve výstavbě.

[online]. [cit. 3.4. 2020]. Dostupné z:

<https://www.profesis.cz/parser/go/4c7a692f314e32397039516d54794e356d74714a7459365274444c364d6a486e42516c584833646850534a7a4f513237757a6d2b6f39306132654b426d576849>

[32] VAŠKOVÁ, Jitka. Syllabus přednášky BK01 – ČVUT v Praze. [online]. [6.4. 2020]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~vaskova/BK01_prednasky.html,

[33] NASVIK, Joe. Hospitals and health care facilities. Concrete construction.

[online]. [cit. 29.2. 2020] Dostupné z:

https://www.concreteconstruction.net/projects/commercial-industrial/hospitals-and-health-care-facilities_o

[34] Nařízení vlády 502/2000 Sb. Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Zákony pro lidi – Sbírka zákonů ČR

v aktuálním konsolidovaném znění [online]. [cit. 07.04.2020]. Dostupné z

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-502#f2126485>

[35] ISTAKO. Produktový list – Izolátor chvění ISTAKO, typ P 40 a P 60. [online]

Dostupné z: <https://www.istako.cz/produkty>

[36] Direct Industry. The online industrial exhibition. GERB - Shock door damper.

[online]. [cit. 9.4. 2020]. Dostupné z:

<https://www.directindustry.com/prod/gerb/product-5921-473557.html>

[37] OptiXs – Dodavatel a integrátor laserů a přístrojové techniky. CleanTop -

Antivibrační optické stoly. [online]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/antivibracni-opticke-stoly-36k/cleantop-57p>

[35] Modul pružnosti. eBeton - Specialista na beton. [online] Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>

[39] VŠB – Technická univerzita Ostrava. Zatížení stavebních konstrukcí. Studijní materiál, s. 6-7. [online] [cit. 13.4. 2020] Dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Uvod.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Uvod.pdf)

[40] Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. TZB info. [online] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>

[41] AKKAS, A. Determination of the Tenth and Half Value Layer Thickness of Concretes with Different Densities. Suleyman Demirel University Technology, Faculty Civil Engineering. [online] Dostupné z: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/129/a129z4p090.pdf>

[42] ČSN EN 197-1 ed.2 (722101). 2012. Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha. ÚNMZ.

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obr. 2.1. – Rozdělení typů záření dle vlnové délky.

Tab. 2.2. – Polotloušťka různých materiálů.

Obr. 2.3. – Porovnání efektivity různých sestav stínících konstrukcí.

Graf 2.4. – Pevnost betonu v tlaku vzhledem k míře ozáření.

Obr. 2.5. - Rozdíl pevnosti betonu na přímo ozařované straně konstrukce a straně vnější.

Obr. 2.6. –Pevnost betonu v tahu vzhledem k míře ozáření.

- Obr. 2.7. – Změna objemu betonu vzhledem k míře ozáření.
- Obr. 2.8. – Procentuální zastoupení různých zdrojů v typické dávce ozáření běžného člověka.
- Obr. 2.9. – Závislost ceny betonu na jeho objemové hmotnosti.
- Obr. 2.10. – Varianta vstupu 1 do obálky zařízení.
- Obr. 2.11. – Varianta vstupu 2 do obálky zařízení.
- Obr. 2.12. – Schéma zalomeného prostupu.
- Obr. 2.13. – Schéma prostupu vedeného pod úhlem.
- Obr. 3.1. – Statické schéma prostého nosníku zatíženého osamělou silou.
- Obr. 3.2. – Příklad rozdělení jednoduché konstrukce na oblasti D a B.
- Obr. 3.3. - Příklad navrženého příhradového modelu pro nosník zatížený osamělou silou.
- Obr. 3.4. – Vyhodnocení napětí nosníku metodou konečných prvků.
- Obr. 3.5. – Konstrukce se dvěma stupni volnosti a její vlastní tvary.
- Obr. 3.6. – Rezonanční křivky konstrukcí o různých hodnotách tlumení.
- Obr. 3.7. – Napětí na desce pnuté obousměrně.
- Obr. 3.8. – Napětí na desce pnuté jednosměrně.
- Obr. 3.9. – Napětí na desce lokálně podepřené.
- Obr. 3.10. – Napětí na desce obousměrně pnuté s lokální podporou v prostředku pole.
- Obr. 3.11. – Model náhradní příhradoviny pro osamělou sílu poblíž podpory.
- Obr. 3.12. – Roznášecí plocha pod osamělým břemenem.
- Obr. 3.13. – Schéma zesílení vyztužení v oblasti lokálního zatížení.

Obr. 3.14. – Možnosti vyztužení oblasti pod osamělým břemenem.

Obr. 3.15. – Rozdíl v reakci konstrukce o různých hodnotách poměrného útlumu.

Obr. 3.16. – Izolátor chvění ISTAKO, typ P40.

Obr. 3.17. – Shock damper – GERB.

Obr. 3.18. – Antivibrační stůl TMC CleanTOP.

Obr. 3.19. – Rozdíl ve vyhodnocení sečnového a tečnové modulu pružnosti z grafu.

Tab. 3.20. – Složení jednotlivých směsí betonu použitých pro měření.

Tab. 3.21. – Hodnoty modulu pružnosti a pevnosti betonu s různým kamenivem po 1 a 28 dnech.

Tab. 3.22. – Mechanické vlastnosti betonu ve vztahu k vodnímu součiniteli.

SEZNAM PŘÍLOH

Výkres 1. – Půdorys varianta 1

Výkres 2. – Půdorys varianta 2

Výkres 3. – Řez A-A' varianta 1

Výkres 4. – Řez A-A' varianta 2

Výkres 5. – Výkres tvaru varianta 1

Výkres 6. – Výkres tvaru varianta 2