ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Lokálně podepřená železobetonová deska s otvory

RC flat slab with openings

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kateřina Potočková

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michaela Frantová, Ph.D.

Praha, 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Potočková Jméno: Kateřina Osobní číslo: 495045

Zadávající katedra: 11133 - katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: B3651 - Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: 3608R008 - Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Lokálně podepřená železobetonová deska s otvory

Název bakalářské práce anglicky: RC flat slab with openings

Pokyny pro vypracování:
výběr konkrétního typu lokálně podporované desky - stanovení okrajových podmínek (referenční stavba)
analýza desky s ohledem na ohyb a protlačení - vliv rozmístění otvorů, jejich poloha a velikost
podrobný rozbor protlačení - blízkost otvorů u podpory
porovnání a vyhodnocení posuzovaných variant - stanovení limitních poloh a rozměrů otvoru

Seznam doporučené literatury:
Betonová stropní a schodišťová konstrukce, prof. Ing. Jarostav Procházka, CSc., Ing. Jiří Šmejkal, CSc.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Michaela Frantová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 20. 2. 2023 Termín odevzdání BP v IS KOS: 22. 5. 2023
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 na téma **Lokálně podepřená železobetonová deska s otvory** zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne …

…….

Kateřina Potočková

Poděkování

Děkuji Ing. Michaele Frantové, Ph.D. za její odborné vedení, možnost častých konzultací a užitečné rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Anotace

Obsahem bakalářské práce je rozbor chování lokálně podepřené železobetonové stropní desky u konkrétního objektu. Desku ovlivňují menší a větší otvory, navržené z důvodu vedení TZB a prosvětlení vnitřních prostor. Byla postupně zkoumána limitující kritéria, jako je průhyb, smyk a ohyb. Za tímto účelem se mezi sebou porovnávaly různé varianty desek, lišících se počtem a velikostí otvorů. Porovnání desek umožnily hodnoty získané pomocí analýzy metodou konečných prvků. Na závěr došlo k vyhodnocení vlivu otvorů podle jednotlivých kritérii.

Klíčová slova:

Lokálně podepřená deska, železobeton, otvory, průhyb, smyk, protlačení, ohyb, výztuž.

Summary

The content of the bachelor's thesis is an analysis of the behavior of a reinforced concrete flat slab in a specific building. The flat slab is affected by smaller ones and larger openings, designed for the purpose of HVAC guidance and illumination of the interior spaces. Limiting criteria such as deflection, shear and bending were examined in turn. For this purpose, different variants of plates, differing in the number and size of openings, were compared with each other. The comparison of the flat slabs was made possible by the values obtained through finite element method. At the end, the impact of the openings was evaluated according to individual criteria.

Key words:

Flat slab, reinforced concrete, openings, deflection, shear, punching shear, bending, reinforcement.

OBSAH

1. ÚVOD 5

2. REFERENČNÍ STAVBA 7

2.1. POPIS 7
2.2. ŘEŠENÁ ČÁST KONSTRUKCE 8
2.3. NÁVRH OHYBOVÉ VÝZTUŽE 9

3. PRŮHYB 12

3.1. VLIV OTVORŮ NA PRŮHYB U REFERENČNÍ STAVBY 12
3.2. VLIV ZMĚNY VELIKOSTI OTVORŮ 16
3.3. VLIV ZMĚNY POLOHY OTVORŮ 17
3.4. VYHODNOCENÍ VLIVU OTVORŮ NA PRŮHYB 23

4. PROTLAČENÍ 24

4.1. VLIV OTVORŮ NA PROTLAČENÍ U REFERENČNÍ STAVBY 24
4.2. VLIV VZDÁLENOSTI OTVORŮ OD PODPORY 27
4.3. VYHODNOCENÍ VLIVU OTVORŮ NA PROTLAČENÍ 29

5. OHYB 30

5.1. VLIV OTVORŮ NA PRŮBĚH HLAVNÍCH MOMENTŮ 30
5.2. VYHODNOCENÍ VLIVU OTVORŮ NA OHYB 32

6. ZÁVĚR 34

7. LITERATURA 35

1. ÚVOD

Lokálně podepřené desky jsou často používanou vodorovnou nosnou konstrukcí. U nosných systémů s lokálně podporovanými deskami tvoří svislé nosné prvky převážně sloupy nebo krátké stěny. Díky volné dispozici, umožňují tyto systémy variabilní využití vnitřních prostor.

Takovéto konstrukce mají díky absenci nosných liniových prvků rovný podhled, to umožňuje snadné vedení TZB rozvodů pod stropem. Další výhodou rovného podhledu je snadnější bednění, což zkracuje dobu výstavby. Objekty s lokálně podepřenými deskami je možné navrhovat s menší konstrukční výškou, světlá výška totiž není snížena o trámy nebo průvlaky. Jde tedy o ekonomičtější řešení, díky možnosti ušetřit na výšce svislých konstrukcí.

Naopak nevýhodu těchto bezprůvlakových skeletových systémů je jejich malá prostorová tuhost. Je nutné tyto konstrukce doplnit ztužujícími prvky, nejčastěji stěnovými železobetonovými komunikačními jádry. Další nevýhodou jsou větší průhyby než u desek liniově podepřených.

Problém, který si u lokálně podepřených desek žádá velkou pozornost, je velké smykové namáhaní mezi deskou a podporou. V oblasti podpory při špatném návrhu dojde k protlačení desky, tedy k tomu, že lokální podpora, např. sloup “propíchne“ desku. To může vést ke kolapsu celé konstrukce, jak je vidět na následujícím obrázku *(Obr.1 – kolaps lokálně podepřené desky).*

Obr.1 – kolaps lokálně podepřené desky (Pipers Row Car Park) [12]

Bakalářská práce se zabývá právě lokálně podepřenou železobetonovou deskou, konkrétně takovou, jejíž statické chování je ovlivněno otvory, které se v desce nacházejí. Ty se obecně se stropních deskách navrhují například z důvodu vedení TZB rozvodů, větší otvory pak kvůli prosvětlení vnitřních prostor nebo v místech vertikálních komunikací (otvor pro schodiště, výtahovou šachtu).

Obsahem práce je rozbor chování desky v závislosti na velikosti a poloze otvorů. To, jak se mění ohybové momenty, průhyby a smyková napětí. Cílem je, na základě těchto poznatků, najít optimální řešení návrhu otvorů ve stropní desce tak, aby negativně neovlivnily statické chování, nebo aby byl jejich negativní vliv na desku co nejmenší.

2. REFERENČNÍ STAVBA

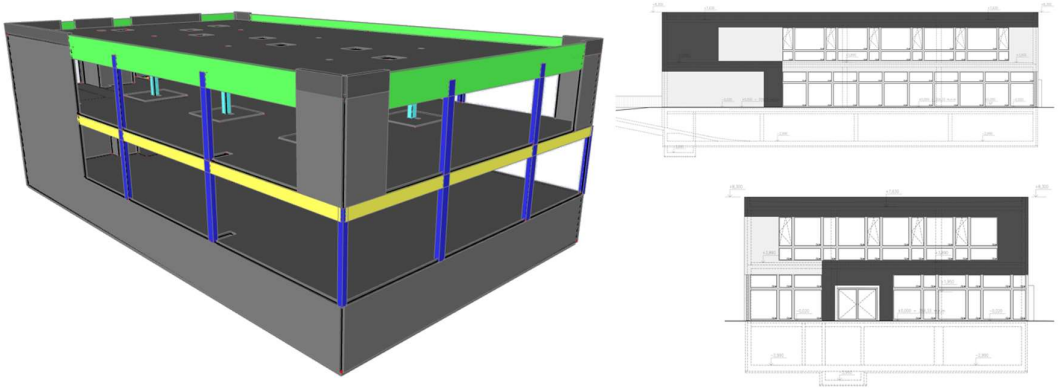
2.1. Popis

Bakalářská práce se zabývá chováním stropní desky administrativní budovy v lokalitě Říčany u Prahy, kterou jsem řešila v rámci předmětu Projekt 2. Objekt má obdélníkový půdorys o rozměrech 32 m x 19 m se dvěma nadzemními podlažími a jedním podzemním podlažím.

V podzemním podlaží jsou situována garážová stání. V nadzemních podlažích se nachází prostory pro kanceláře. Pro vertikální komunikaci slouží výtah přes všechna podlaží a jednoramenná schodiště mezi jednotlivými podlažími. Pro vjezd do suterénu je navržena rampa.

Nosným systémem je železobetonový monolitický skelet. Objekt je založen na plošných základech, základová deska je součástí bílé vany. Stropní desky jsou bezprůvlakové. Desky nad 1. a 2.NP mají po obvodě ztužující žebro. Svislé nosné prvky jsou železobetonové monolitické sloupy a stěny.

Prostorová tuhost objektu je zajištěna přenosem vodorovných sil tuhými stropními deskami do svislých ztužujících prvků. Svislými ztužujícími prvky jsou železobetonové monolitické stěny v prostoru komunikačního jádra.



Obr.2 – 3D vizualizace a pohledy

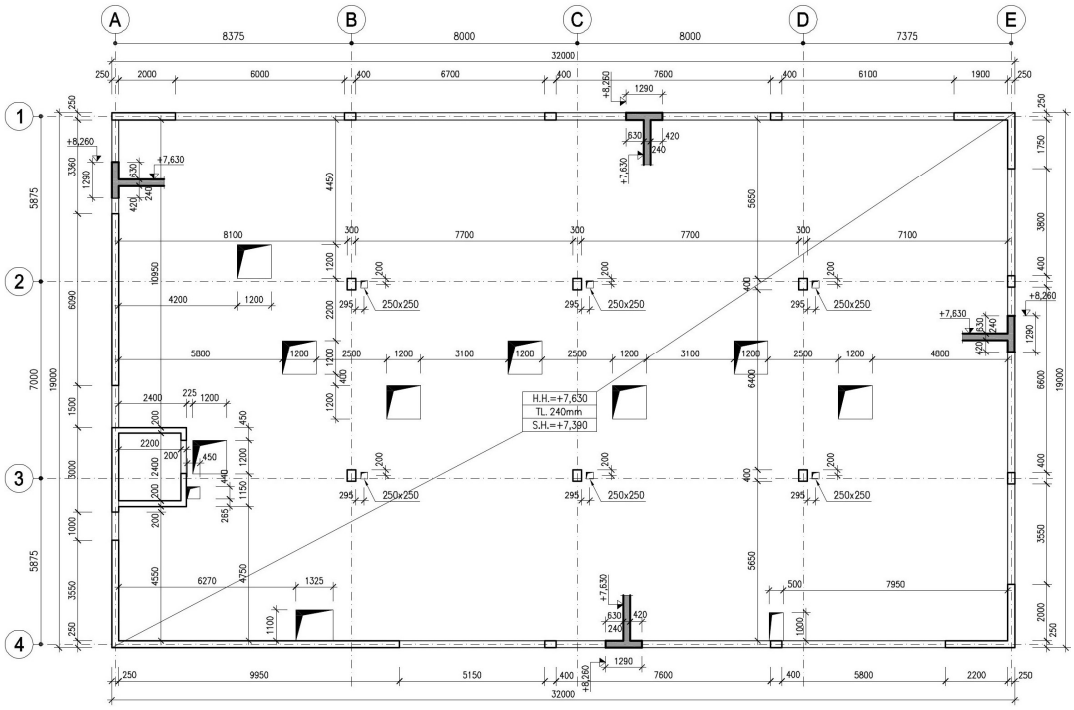
2.2. Řešená část konstrukce

Řešenou částí objektu je stropní deska posledního nadzemního podlaží. Deska je v závislosti na rozpětí, způsobu podepření a působícímu zatížení navržena v tloušťce 240 mm z betonu C25/30 - XC1 (CZ) - Cl 0,40 - D_{max} 22 mm - S3 a vyztužena vázanou výztuží B500B.

Desku bodově podporuje šest vnitřních železobetonových sloupů o průřezu 300 x 400 mm. Po obvodu je podepřena liniově na obvodových železobetonových stěnách a obvodovém průvlaku, podepřeném sloupy o průřezu 250 x 400 mm.

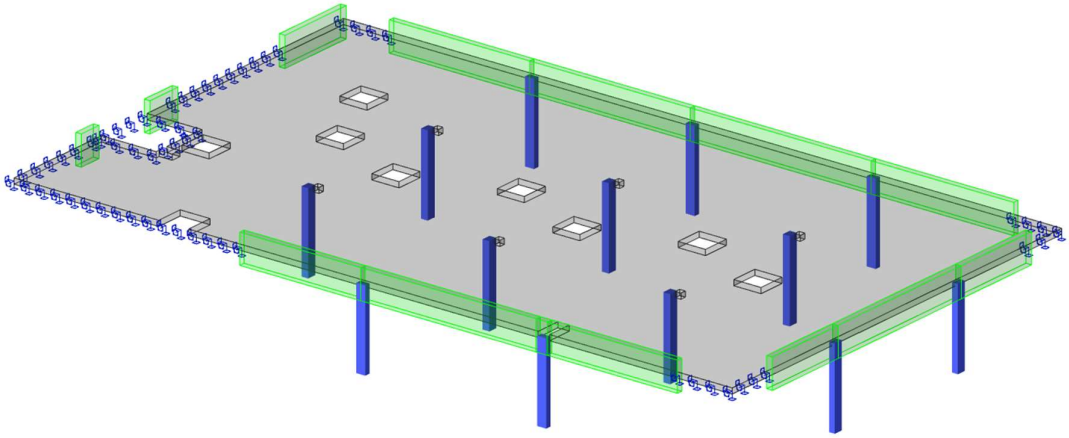
V desce se nachází dva typy otvorů. Jedním jsou malé **prostupy** 250 x 250 mm pro vedení potrubí na odvod srážkové vody ze střechy. Jedná se o malé otvory, které by za normálních okolností nevyžadovaly statické posouzení ani speciální opatření, v tomto případě se ale prostupy nachází v blízkosti podpor a bude dále posuzován jejich vliv na konstrukci.

Druhým typem otvorů jsou **světlíky** 1,2 x 1,2 m rozmístěné ve středím poli stropní desky. Zde už se jedná o větší otvory a bude s nimi rovněž počítáno v následujících posudcích.



Obr.3 – tvar stropní desky

Konstrukce stropní desky byla vymodelována jako patrový výsek v programu SCIA Engineer 21.1. Sloupy nahradily bodové podpory v uzlu typu Sloup. Stěny byly idealizovány jako tuhé liniové podpory, nebylo nutné je modelovat přesněji, protože oblasti stěnových podpor nejsou při posuzování desky rozhodující. [9]



Obr.4 – zjednodušený model ve SCIA Engineer

2.3. Návrh ohybové výztuže

Aby bylo možné desku posuzovat na nelineární průhyb a protlačení v programu SCIA Engineer, je nutné do modelu zadat ohybovou výztuž. Program by sice mohl sám navrhnout a počítat s tzv. nutnou výztuží, ta by se ale měnila v závislosti na množství a poloze otvorů, které se budou v různých posuzovaných variantách lišit. Je tedy vhodnější zadat výztuž do modelu ručně a počítat ve všech následujících variantách se stejnou plochou výztuže.

Před návrhem výztuže bylo zapotřebí vyřešit problém nereálně velkých ohybových momentů nad podporami – tzv. ostrých špiček, které vznikají kvůli podepření desky v nekonečně malém bodě. Řešením je zprůměrovat hodnoty v uzlech konečných prvků v oblasti podpor, pomocí průměrovacích pásů, resp. bodů. Velikost průměrovacích bodů byla zvolena tak, aby se v nich v obou směrech nacházelo vždy alespoň pět uzlů. Průměrná velikost konečných prvků je stanovena podle tloušťky desky na 240 mm. [9]

Následně byly v programu stanoveny potřebné plochy výztuže v obou směrech pro horní a spodní povrch na základě kombinace ohybového momentu a normálové síly, která zohledňuje kroucení. Na nutnou plochu výztuže byly ručně

stanoveny profily a rozteče prutů. U spodního povrchu byla shodně v obou směrech zvolena výztuž ø10/150 mm na celé ploše desky *(viz. Obr.6 – schéma spodní výztuže).* U horního povrchu nad sloupovými podporami byla zvolena výztuž ve směru *y* ø16/100 a ve směru *x* ø18/100, v poli pak doplněna konstrukční výztuž ø10/200 mm *(viz. Obr.5 – schéma horní výztuže).*

Při návrhu výztuže byly uvažovány tyto zatěžovací stavy:

ZS1 – Vlastní tíha: 25 kN/m^2 (stanovena programem)

ZS2 – Ostatní stálé: 2,10 kN/m^2

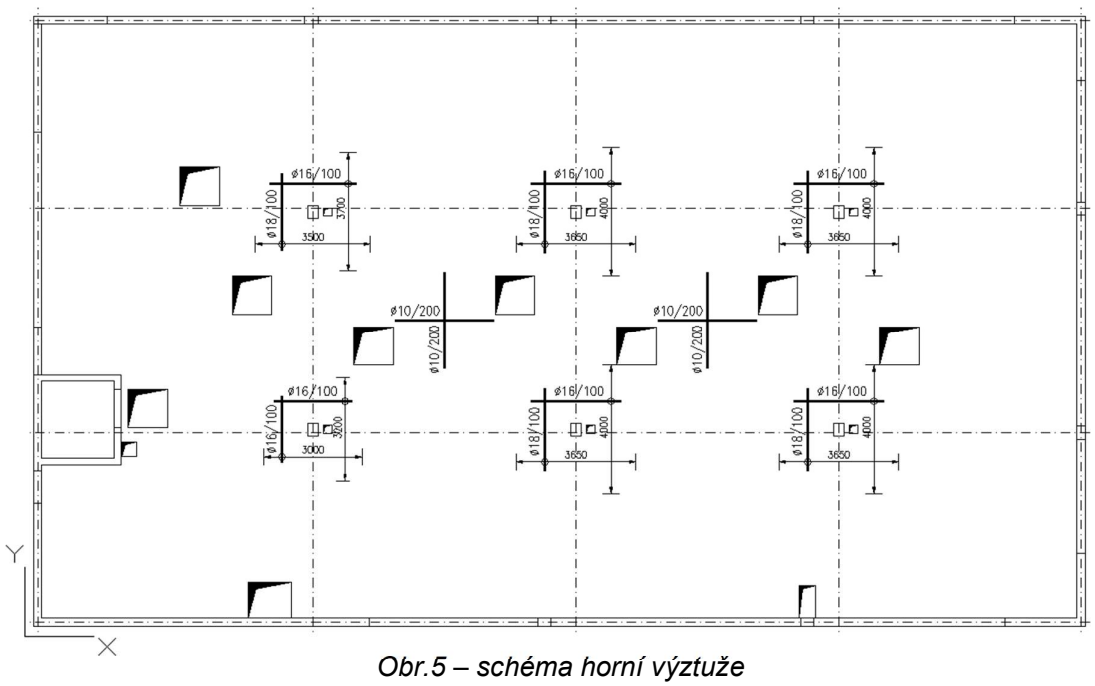
Zatížení	Objem. tíha [kN/m^3]	Tloušťka [m]	Char. zat. [kN/m^2]
kačírek	18	0,060	1,080
HI souvrství	10	0,010	0,100
TI pěn. polystyrén	0,3	0,350	0,105
technologie	-	-	0,500
SDK podhled	21	0,015	0,315
CELKEM			g_k = 2,10

Tab.1 – ostatní stálé zatížení

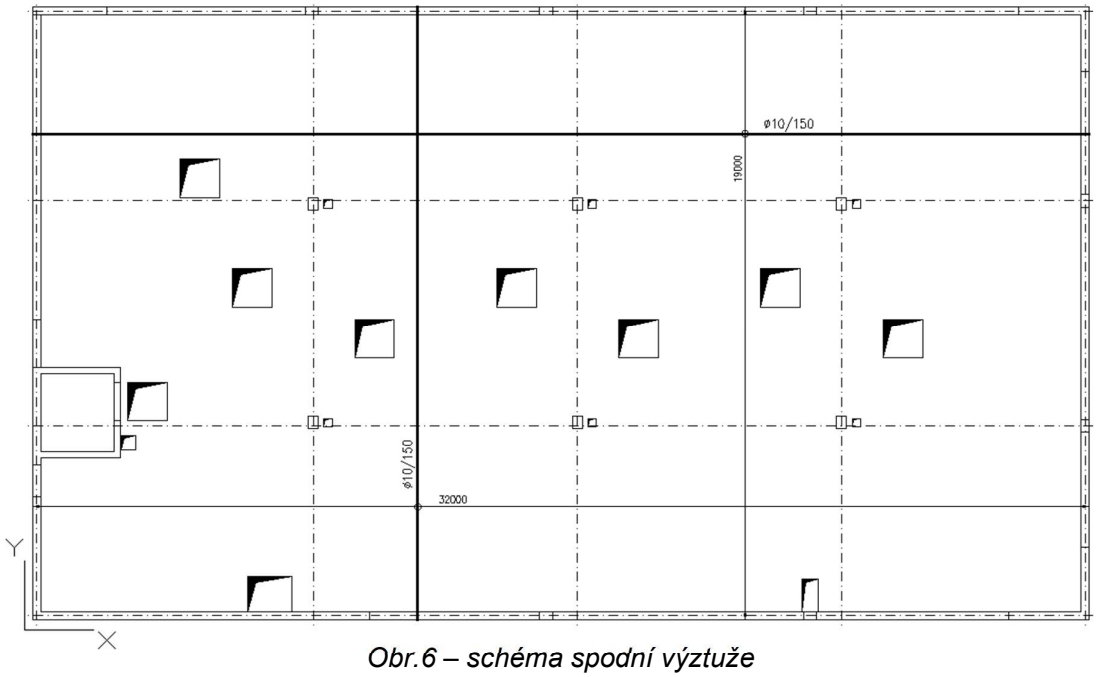
ZS3 – Užitné: 0,8 kN/m^2 (zatížení sněhem – sněhová oblast II)

Výsledné zatížení odpovídá obálkové kombinaci vygenerované programem s dílčími součiniteli podle ČSN EN 1990 tab. A1.2(B) a A1.2(C) podle vztahů (6.10), (6.10a) a (6.10b).

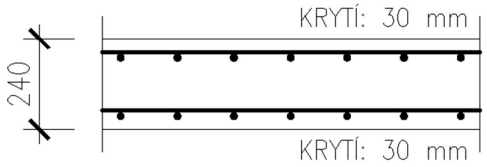
Krycí vrstva betonu byla v závislosti na třídě betonu (C25/30) a stupni vlivu prostředí (XC1) stanovena pro návrhovou životnost 50 let v tloušťce 30 mm u horního i spodního povrchu.



Obr.5 – schéma horní výztuže



Obr.6 – schéma spodní výztuže



Obr.7 – kladení výztuže (řez kolmo na osu y)

3. PRŮHYB

Jedním z limitujících faktorů při návrhu stropní desky je průhyb. Průhyby jsou v programu SCIA Engineer spočteny podle Eurokódu 2, jedná se o hodnoty se zohledněním vlivu trhlin, dotvarování a smršťování. Součinitel dotvarování $\varphi(t,t_0)$ (= 2,55) počítá program automaticky podle vztahu v příloze B.1 v EN 1992-1-1 s vlivem stáří betonu na konci životnosti konstrukce (50 let) a zadané relativní vlhkosti 50%.

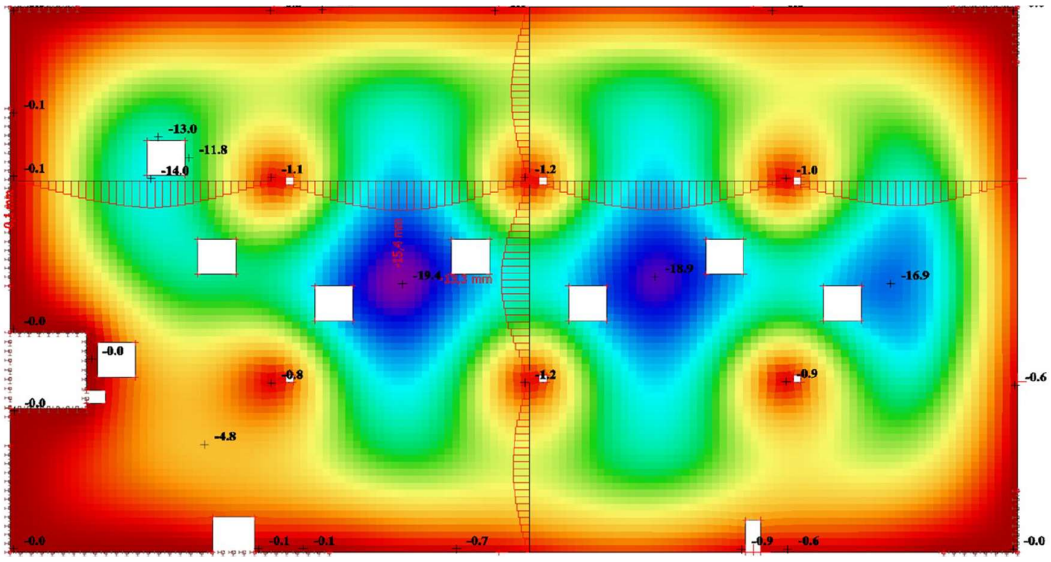
3.1. Vliv otvorů na průhyb u referenční stavby

Pro posouzení, které otvory mají na průhyb u řešené stropní desky největší vliv, byly uvažovány čtyři různé varianty konstrukce.

1. varianta: původní stav konstrukce, tedy ta, ve které se nachází jak větší otvory v poli (světlíky) tak i menší otvory blízko sloupových podpor (prostupy)
2. varianta: konstrukce bez otvorů
3. varianta: konstrukce bez světlíků, jedinými otvory v desce jsou prostupy blízko sloupových podpor
4. varianta: konstrukce bez prostupů, jedinými otvory jsou světlíky v poli stropní desky

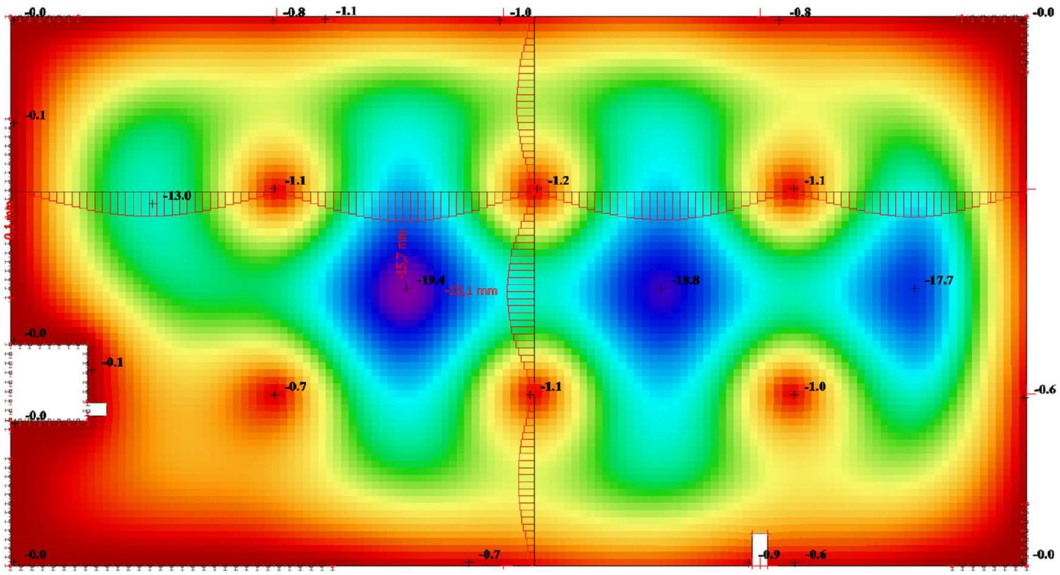
3.1.1. Výsledky

Varianta 1 – světlíky i prostupy (původní)



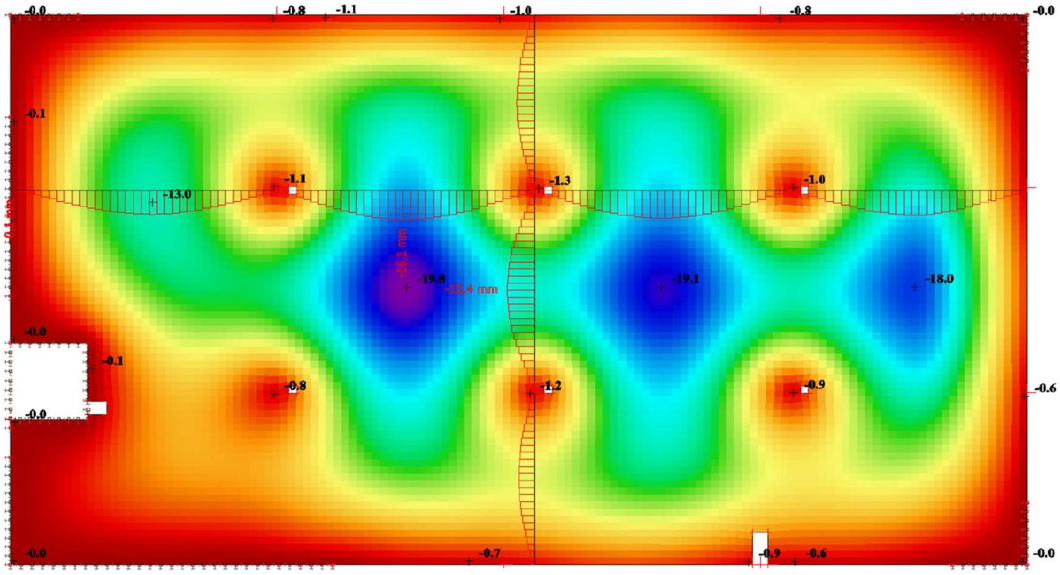
Obr.8 – průhyb desky se světlíky i s prostupy

Varianta 2 – bez otvorů



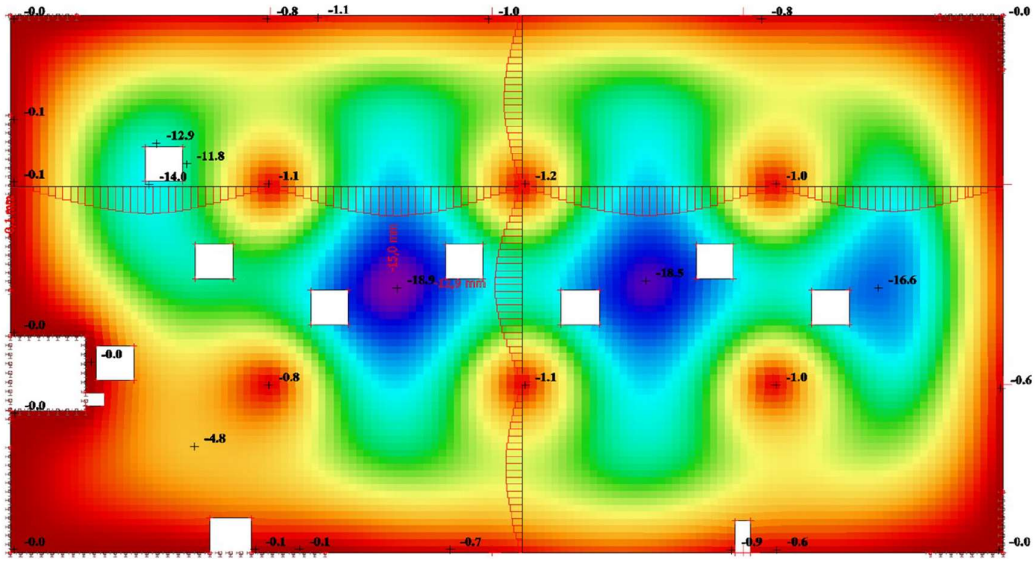
Obr.9 – průhyb desky bez otvorů

Varianta 3 – prostupy



Obr.10 – průhyb desky s prostupy

Varianta 4 – světlíky



Obr.11 – průhyb desky se světlíky

Pro přehlednost při zapisování výsledků byla stropní deska rozdělena na tři pomyslná pole. První mezi osami B, C. Druhé pole mezi osami C, D. Třetí krajní pole mezi osami D, E. *(osy viz. Obr.3 – tvar stropní desky).* V následující tabulce jsou vypsány maximální hodnoty průhybů v daném poli.

Otvory	1. pole [mm]	2. pole [mm]	3.pole [mm]
původní (světlíky i prostupy)	19,4	18,9	16,9
bez otvorů	19,4	18,8	17,7
jen prostupy	19,8	19,1	18,0
jen světlíky	18,9	18,5	16,6

Tab.2 – průhyby

3.1.2. Porovnání

Jednotlivé varianty jsou mezi sebou porovnány v tabulkách. Varianta zapsaná v řádku je porovnávána s variantou ve sloupci, pokud vychází průhyb varianty v řádku menší než u varianty ve sloupci, je buňka s hodnotou zelená, pokud vychází průhyb větší, buňka je červená.

1. pole [mm]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		0,0	-0,4	0,5
bez otvorů	0,0		-0,4	0,5
jen prostupy	0,4	0,4		0,9
jen světlíky	-0,5	-0,5	-0,9	

Tab.3 – průhyby v 1. poli

2. pole [mm]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		0,1	-0,2	0,4
bez otvorů	-0,1		-0,3	0,3
jen prostupy	0,2	0,3		0,6
jen světlíky	-0,4	-0,3	-0,6	

Tab.4 – průhyby ve 2. poli

3. pole [mm]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		-0,8	-1,1	0,3
bez otvorů	0,8		-0,3	1,1
jen prostupy	1,1	0,3		1,4
jen světlíky	-0,3	-1,1	-1,4	

Tab.5 – průhyby ve 3. poli

Rozdíly mezi průhyby nejsou veliké, přesto je možné určit jaký vliv mají oba typy otvorů na průhyb.

Jak je z porovnání výsledků patrné, prostupy blízko podpor mají na průhyb negativní vliv, oslabují desku. Varianta, kdy se v desce nachází jen prostupy, má v každém poli vždy větší průhyb než zbývající varianty.

Varianta, kde chybí prostupy a v desce se nachází pouze světlíky, vychází na průhyb nejlépe. Světlíky tedy desku ovlivňují pozitivně, vylehčují ji.

Na původní desku s oběma typy otvorů mají pozitivní vliv světlíky, ale negativní vliv prostupy. Deska bez otvorů není otvory ovlivněna pozitivně ani negativně. Dochází tak v tomto případě k vyrovnání příznivých a nepříznivých účinků, a proto tyto dvě varianty mají podobné průhyby.

Výjimkou je průhyb ve 3. poli, kde je rozdíl výraznější. Jde o krajní pole, které je z levé strany podepřeno obvodovým žebrem. Pole je tedy prostupy u podpor oslabeno jen z pravé strany, proto prostupy nemají na průhyb takový vliv jako v jiných polích. Ve chvíli, kdy je deska bez otvorů, chybí ve 3. poli vylehčení světlíkem a pozitivní vliv chybějících prostupů je zde zanedbatelný, proto ten větší průhyb oproti desce s oběma typy otvorů.

3.2. Vliv změny velikosti otvorů

Bylo tedy zjištěno, že velké světlíky v desce, tak jak jsou umístěny, vylehčují desku a mají příznivý vliv na její průhyb. Otázkou je, do jaké míry by se mohly otvory ještě zvětšit, aby nezhoršily statické chování.

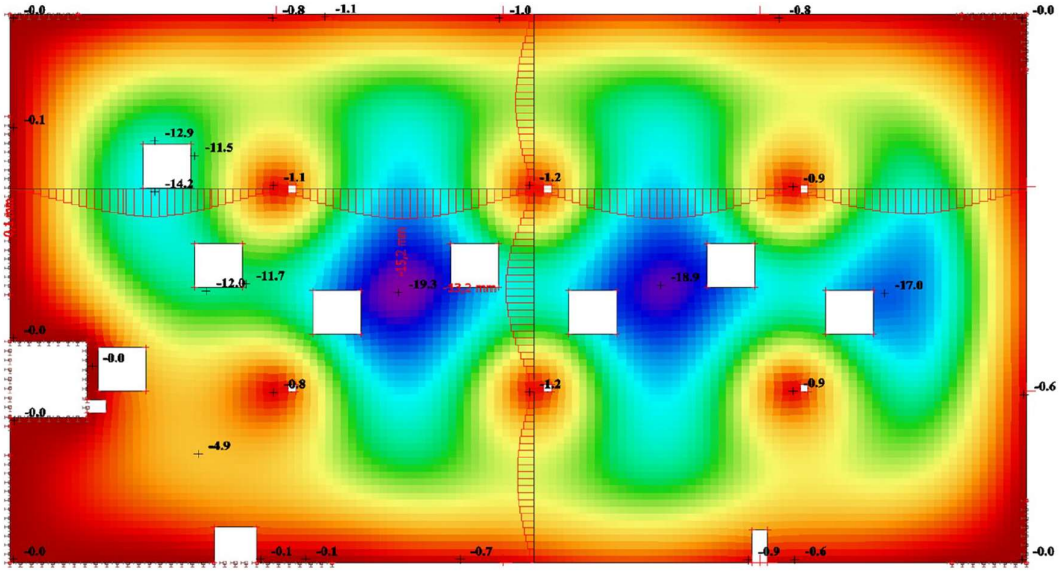
Všechny světlíky v desce byly postupně zvětšovány vždy o 100 mm na obě strany a byla zkoumána změna průhybu oproti desce s původními velikostmi otvorů.

V tabulce jsou vypsány jednotlivé průhyby v závislosti na velikosti otvorů. Červeně zabarvené buňky značí průhyb větší oproti desce s původní velikostí otvorů, zeleně zabarvené buňky značí menší průhyb.

Velikost světlíků	1. pole [mm]	2. pole [mm]	3.pole [mm]
1,0 x 1,0 m	19,5	19,0	17,4
1,1 x 1,1 m	19,4	19,0	17,0
původní (1,2 x 1,2m)	*19,4*	*18,9*	*16,9*
1,3 x 1,3 m	19,3	18,9	16,9
1,4 x 1,4 m	19,3	18,9	16,9
1,5 x 1,5 m	19,3	18,9	17,0
1,6 x 1,6 m	19,4	18,9	17,4
1,7 x 1,7 m	19,5	19,1	17,8
1,8 x 1,8 m	19,6	19,2	18,1
1,9 x 1,9 m	19,8	19,2	18,2
2,0 x 2,0 m	19,9	19,3	18,6

Tab.6 – průhyby vlivem změny velikosti světlíků

Jak je z tabulky zřejmé, světlíky by mohly mít rozměr až 1,5 x 1,5 m a stále by pozitivně ovlivňovaly průhyb desky. V krajním – 3. poli sice dochází k malému zvětšení průhybu oproti původnímu, ale maximální, a tedy rozhodující průhyb 19,3 mm je stále menší než u desky s původními velikostmi světlíků. Další zvětšování otvorů na víc jak 1,5 x 1,5 m by vedlo k oslabení desky a navyšování průhybů.

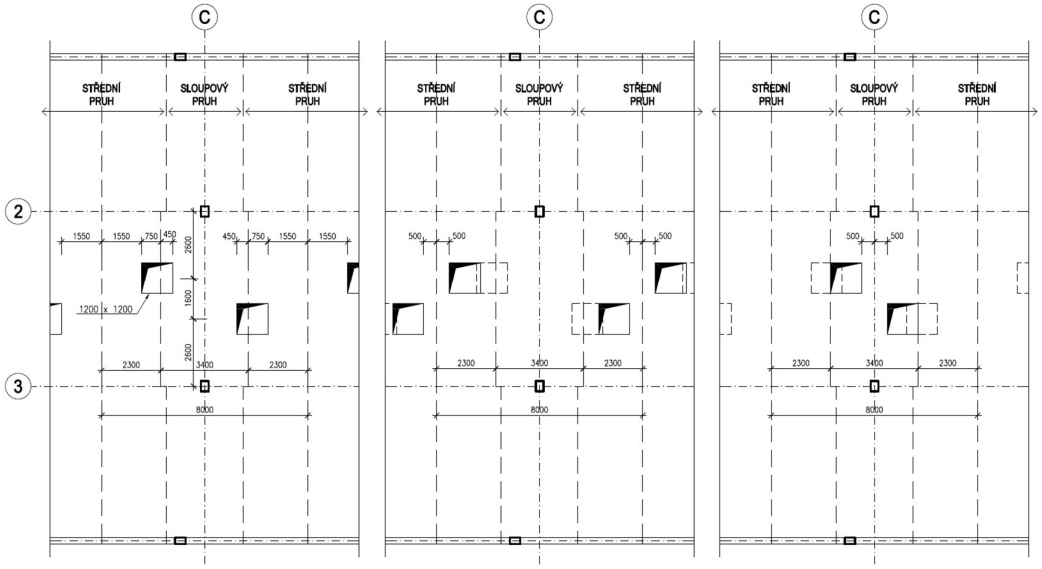


Obr.12 – průhyb desky se světlíky o velikosti 1,5 x 1,5 m

3.3. Vliv změny polohy otvorů

Dále bylo zkoumáno, jak se změní vliv větších otvorů – světlíků na průhyb, vzhledem k jejich poloze.

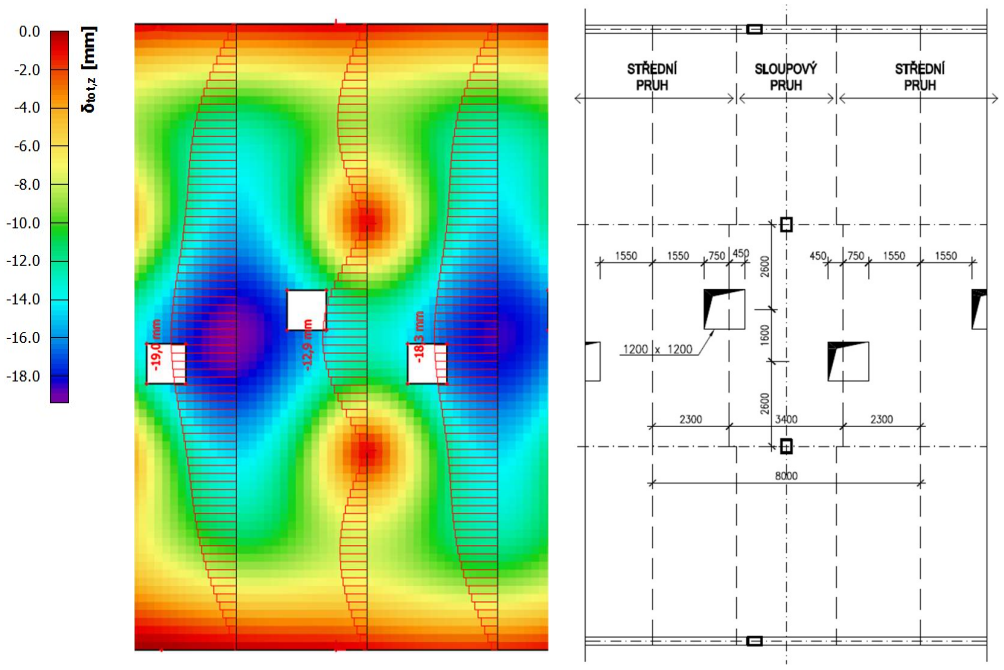
Pro posouzení byly zvoleny čtyři různé varianty desky. Už známé varianty bez otvorů a s původní polohou světlíků, kdy otvor zasahuje z části do sloupového a z části do středního pruhu. K těmto variantám se přidaly dvě nové, kdy byly světlíky v desce umístěny pouze do středního pruhu a varianta, kdy se světlíky nachází pouze ve sloupovém pruhu.



Obr.13 – poloha světlíků

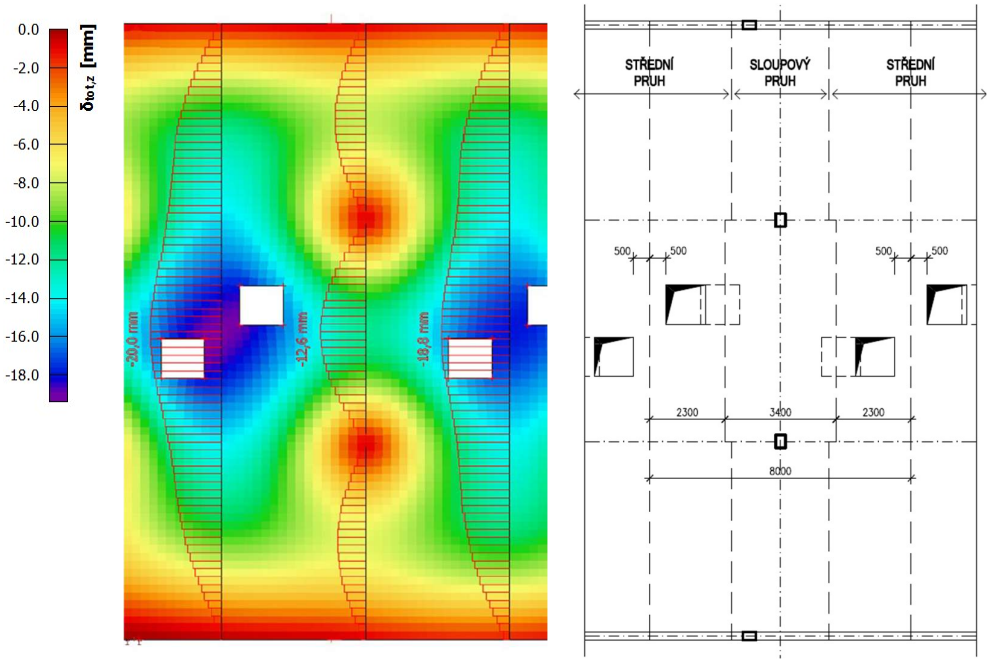
3.3.1. Výsledky

Světlíky na rozhraní sloupového a středního pruhu



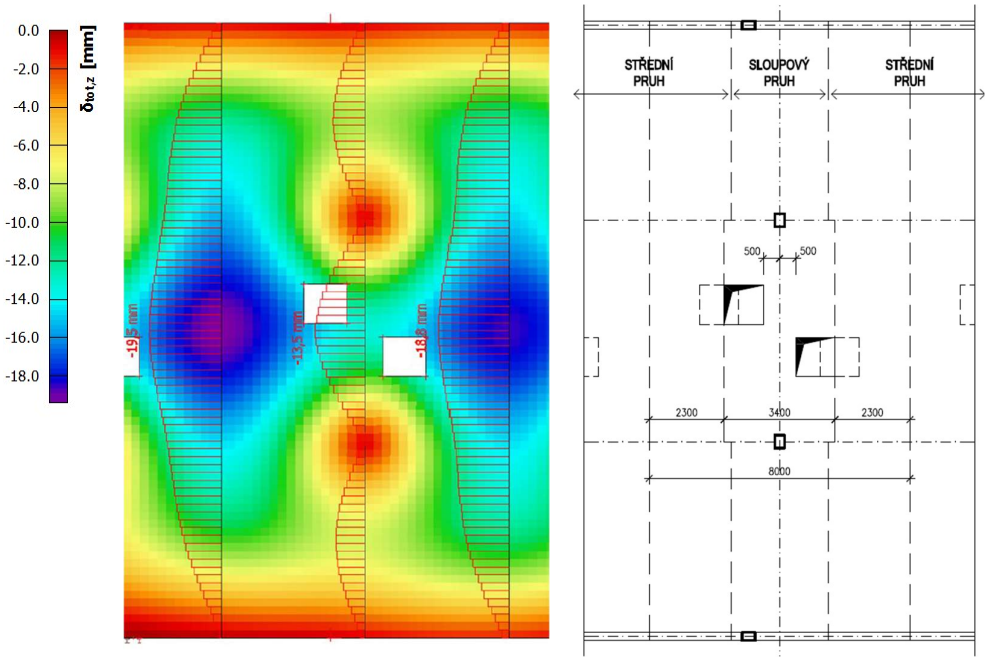
Obr.14 – průhyb v desce s původní polohou světlíků

Světlíky ve středním pruhu



Obr.15 – průhyb v desce se světlíky ve středním pruhu

Světlíky ve sloupovém pruhu



Obr.16 – průhyb v desce se světlíky ve sloupovém pruhu

V následující tabulce jsou vypsány maximální hodnoty průhybu v daném pruhu u posuzovaných variant.

Poloha otvoru	Průhyb levý střední pruh [mm]	Průhyb sloupový pruh [mm]	Průhyb pravý střední pruh [mm]
ve sloup. i střed. pruhu	19,0	12,9	18,3
bez otvorů	19,4	13,1	18,8
ve sloupovém pruhu	19,5	13,5	18,8
ve středním pruhu	20,0	12,6	18,8

Tab.7 – průhyb vlivem světlíků

3.3.2. Porovnání

K porovnání byly vybrány hodnoty průhybu ve sloupovém pruhu a ve středním levém pruhu, kde se hodnoty u jednotlivých variant liší výrazněji než v pravém pruhu, a proto jsou pro porovnání vhodnější.

Maximální průhyby v pruzích u posuzovaných variant jsou mezi sebou opět porovnány v tabulkách stejným způsobem jako v předchozím případě.

Průhyb levý střední pruh [mm]	sloup. i střed. pruhu	bez otvorů	otvor ve sloup. pruhu	otvor ve střed. pruhu
otvor ve sloup. i střed. pruhu		-0,4	-0,5	-1,0
bez otvorů	0,4		-0,1	-0,6
otvor ve sloup. pruhu	0,5	0,1		-0,5
otvor ve střed. pruhu	1,0	0,6	0,5	

Tab.8 – průhyb v levém středním pruhu

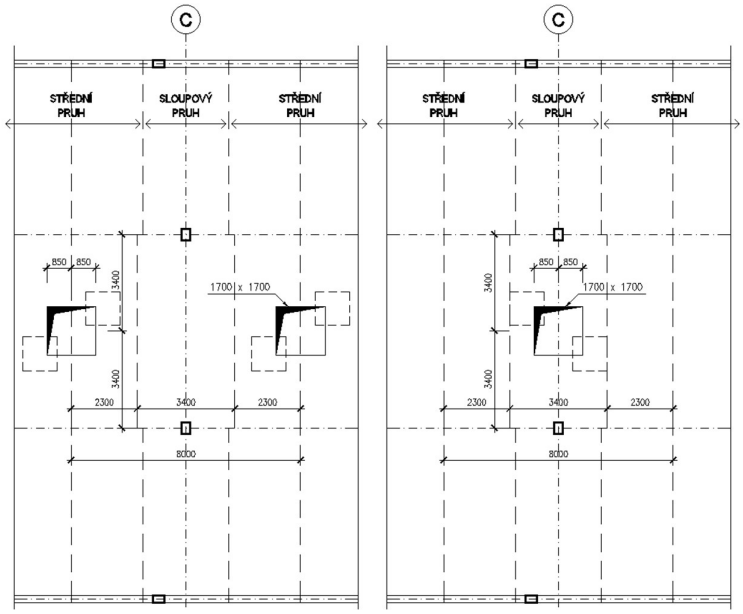
Průhyb sloupový pruh [mm]	sloup. i střed. pruhu	bez otvorů	otvor ve sloup. pruhu	otvor ve střed. pruhu
otvor ve sloup. i střed. pruhu		-0,2	-0,6	0,3
bez otvorů	0,2		-0,4	0,5
otvor ve sloup. pruhu	0,6	0,4		0,9
otvor ve střed. pruhu	-0,3	-0,5	-0,9	

Tab.9 – průhyb ve sloupovém pruhu

Vzhledem k tomu, že největšího průhybu je dosaženo ve středním pruhu, je tento průhyb rozhodující. Nejlépe proto vychází na průhyb původní pozice otvorů, při které se světlíky nachází na hraně mezi středním a sloupovým pruhem.

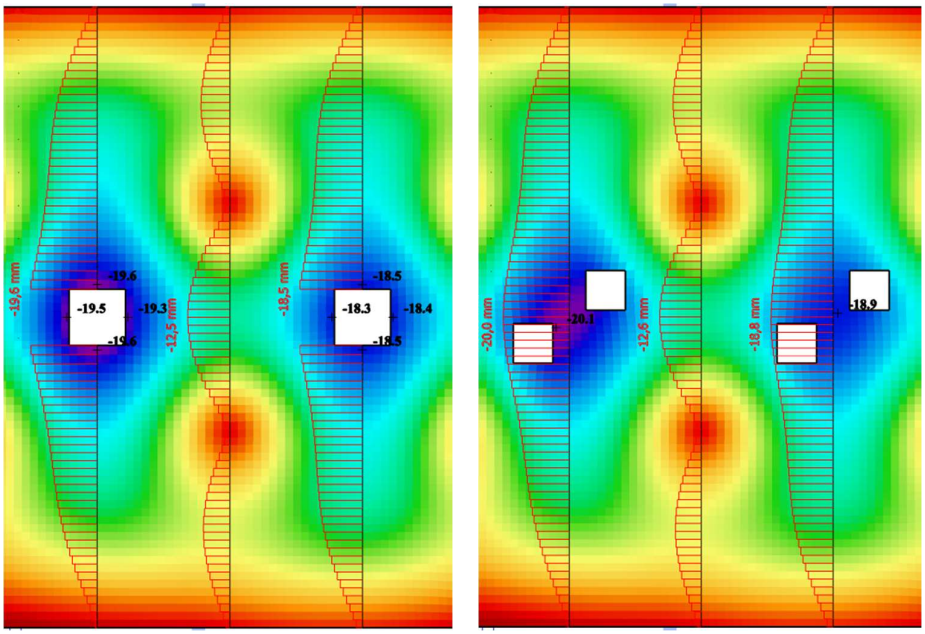
Protože je dvojice světlíků v pruzích umístěna, tak aby byl zachován aspoň minimální pruh mezi nimi, byly zkoumány ještě dvě další varianty, kdy se světlíky nacházejí v ose sloupového nebo středního pruhu.

Aby byla zachována stejná plocha, o kterou je daná oblast desky otvorem ovlivněna, byly nahrazeny dva světlíky jedním větším, jehož plocha je rovna součtu ploch dvou světlíků. Jde o otvor velikosti 1,7 x 1,7 m.



Obr.17 – poloha světlíku

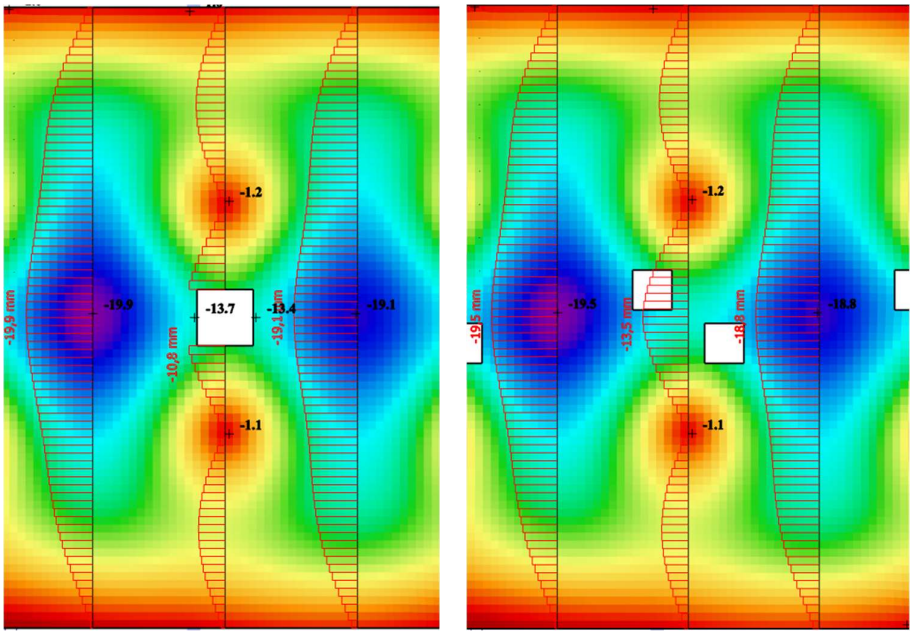
Otvor ve středním pruhu



Obr.18 – průhyb – světlík ve středním pruhu

Průhyby zůstavají skoro stejné. Jediným rozdílem je, že místo s největším průhybem je nahrazeno otvorem, celkově je tedy maximalní průhyb menší. Pokud by měly být světlíky ve středním pruhu, umístění otvoru do osy pruhu se vzhledem k průhybu nejeví jako problém.

Otvor ve sloupovém pruhu



Obr.19 – průhyb – světlík ve sloupovém pruhu

Jinak tomu je v případě umístění světlíku přímo do osy sloupového pruhu. Zde se nejenže zvětšuje průhyb ve sloupovém pruhu, dochází i k výraznějšímu zvětšení maximálního průhybu ve středním pruhu.

3.4. Vyhodnocení vlivu otvorů na průhyb

U desky referenční stavby se odebíráním světlíku či prostupů podle zvolených variant průhyby o moc neliší. Deska je navržena tak, aby otvory neměly na průhyb příliš velký vliv. Přesto bylo možné z malých rozdílů mezi průhyby určit, jakým způsobem otvory desku ovlivňují. Otvory mohou mít na desku jak negativní, tak i pozitivní vliv. Zaleží na jejich velikosti a umístění.

Do určité velikosti otvory v poli ovlivňují průhyb pozitivně snížením vlastní tíhy desky, a tedy snížením celkového zatížení působící na desku. Světlíky u referenční stavby byly z původních rozměrů 1,2 x 1,2 m zvětšeny na 1,5 x 1,5 m a stále snižovaly maximální průhyb. Pokud se ale přesáhne optimální velikost otvorů, deska už není nadále otvory vylehčována, ale oslabena a průhyby jsou větší než u desky bez otvorů.

To, jak velké mohou otvory při daném zatížení být, záleží na jejich umístění vzhledem k podporám. Aby měly na průhyb pozitivní vliv nesmějí být umístěny přímo do jednoho z pruhů, sloupového či středního. Jak bylo z porovnání v podkapitole 3.3.2 vidět, ve chvíli, kdy se světlíky nacházely pouze v jednom z pruhů, zvětšovaly průhyb právě toho pruhu, ve kterém byly umístěny. Jako ideální se tedy jeví řešení, kdy se světlíky nachází na hraně mezi středním a sloupovým pruhem. Tato varianta měla v poli největšího průhybu maximální průhyb menší, něž ostatní varianty *(viz. Tab.8 – průhyb v levém středním pruhu)*. Světlíky umístěné mezi sloupovým a středním pruhem výrazně neoslabují ani jeden z pruhů.

Pokud by světlíky ale musely být umístěny do jednoho z pruhů, je důležité u sloupového pruhu zanechat průběžnou alespoň část pruhu u jeho osy. Nejméně vhodné je totiž přerušit otvorem osu sloupového pruhu, to vede k přesunu průhybu do pole, a tedy ke zvětšení maximálního průhybu desky. Jak je vidět na *Obr.19 – průhyb – světlík ve sloupovém pruhu*, ve chvíli, kdy je otvor

na ose pruhu je maximální průhyb v poli 19,9 mm, což je víc, než když je na ose mezi podporami ponechán průběžný pás desky.

Naopak pokud by měly být světlíky ve středním pruhu, umístit větší otvor do středu pruhu místo menších není problém, deska je tak zbavena místa s největším průhybem a celkový maximální průhyb desky se tak snížil na 19,6 mm *(viz Obr.18 – průhyb – světlík ve středním pruhu)*. Volíme-li tedy mezi umístěním většího otvor do středního či sloupového pruhu, je střední pruh lepší variantou.

4. PROTLAČENÍ

Jak už bylo zmíněno v úvodu, protlačení je specifický problém lokálně podepřených desek. Je potřeba mu při návrhu desky věnovat velkou pozornost.

4.1. Vliv otvorů na protlačení u referenční stavby

K posouzení vlivu otvorů na protlačení u referenční stavby byly opět uvažovány čtyři různé varianty konstrukce shodné jako u posuzovaní vlivu otvorů na průhyb. Zkoumána byla deska v oblasti sloupu na osách C 2. *(Osy viz. Obr.3 – tvar stropní desky)*

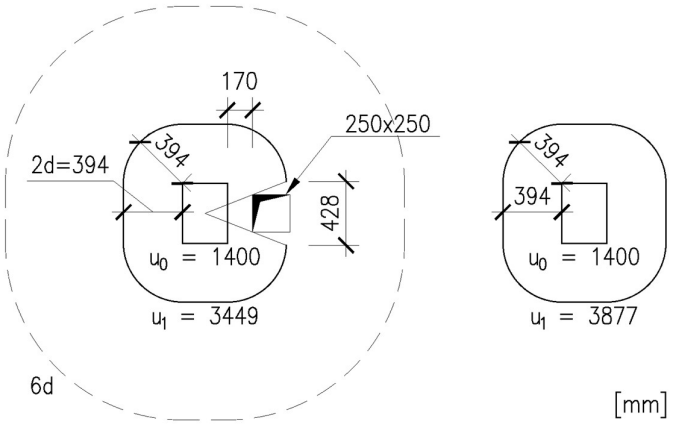
4.1.1. Redukce kontrolovaného obvodu

Při posuzovaní desky na protlačení se hodnotí smyková napětí ve dvou základních kontrolovaných obvodech, obvod u_0 a obvod u_1. Kontrolovaný obvod u_0 se nachází na lící podpory. Kontrolovaný obvod u_1 je od líce podpory ve vzdálenosti 2d, tedy na dvojnásobek účinné výšky průřezu.

U první a třetí varianty se v oblasti podpor nacházejí prostupy. Protože je otvor u těchto variant vzdálen od podpory na menší vzdálenost než 6d, dochází k redukci kontrolovaného obvodu u_1. Obvod je zmenšen o délku výseče, kterou definují dvě tečny ze středu sloupu k okraji prostupu.

U desky bez otvorů (varianta 2) není nutné obvod u_1 redukovat, stejně tak u desky se světlíky (varianta 4). Světlíky leží až za hranicí 6d od líce sloupu a tak kontrolovaný obvod u_1 nijak neovlivní.

Kontrolovaný obvod u_0 zůstává u těchto čtyř posuzovaných variant neměnný a je roven půdorysnému obvodu sloupu.



Obr.20 – redukovaný a neredukovaný obvod u_1

4.1.2. Výsledek protlačení

Výsledkem vlivu protlačení na desku jsou smyková napětí $v_{Ed,u0}$ v kontrolovaném obvodě u_0 a smykové napětí $v_{Ed,u1}$ v kontrolovaném napětí u_1. V tabulce jsou navíc hodnoty, které tyto výsledky ovlivnily: návrhová smyková síla na protlačení V_{Ed} a kontrolovaný obvod u_1. Kontrolovaný obvod je v tabulce pro přehlednost rozlišen dvěma barvami, ten, který nebyl redukován – modře, a ten, u kterého došlo, kvůli prostupu u podpory, k redukci – žlutě.

Otvory	V_{Ed} [kN]	u_1 [m]	$v_{Ed,u0}$ [MPa]	$v_{Ed,u1}$ [MPa]
původní (světlíky i prostupy)	645,59	3,449	2,57	1,04
bez otvorů	665,48	3,877	2,65	0,96
jen prostupy	664,46	3,449	2,65	1,08
jen světlíky	649,59	3,877	2,58	0,93

Tab.10 – protlačení

Další hodnoty pro výpočet smykového napětí zůstávají u všech variant stejné:

d_{eff} = 197 mm

β = 1,10 [-]

ρ = 1,14 %

u_0 = 1,40 m

$v_{Rd,max}$ = 3,60 MPa

$v_{Rd,c}$ = 0,73 MPa

$k_{max}v_{Rd,c}$ = 1,08 MPa *(k_{max}=1,47)* [4]

4.1.3. Porovnání protlačení

Jednotlivé hodnoty ovlivňující vliv protlačení jsou mezi sebou opět porovnány v tabulkách.

V_{Ed} [kN]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		-19,9	-18,9	-4,0
bez otvorů	19,9		1,0	15,9
jen prostupy	18,9	-1,0		14,9
jen světlíky	4,0	-15,9	-14,9	

Tab.11 – hodnoty smyková síla na protlačení V_{Ed}

$v_{Ed,u0}$ [MPa]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		-0,08	-0,08	-0,01
bez otvorů	0,08		0,00	0,07
jen prostupy	0,08	0,00		0,07
jen světlíky	0,01	-0,07	-0,07	

Tab.12 – hodnoty smykového napětí $v_{Ed,u0}$

$v_{Ed,u1}$ [MPa]	původní	bez otvorů	jen prostupy	jen světlíky
původní (světlíky i prostupy)		0,08	-0,04	0,11
bez otvorů	-0,08		-0,12	0,03
jen prostupy	0,04	0,12		0,15
jen světlíky	-0,11	-0,03	-0,15	

Tab.13 – hodnoty smykového napětí $v_{Ed,u1}$

Hodnota návrhové smykové síly na protlačení V_{Ed} se mění s vlastní tíhou desky, která je ovlivněna množstvím otvorů. Je tedy jasné, že nejmenší smykovou silou bude zatížena deska s nejvíce otvory (původní stav kontrakce) a naopak největší hodnotu V_{Ed} bude mít deska bez otvorů.

Protože je u posuzovaných variant, kdy se nemění poloha otvorů, smyková síla V_{Ed} jedinou proměnnou hodnotou ovlivňující smykové napětí na líci podpory, vychází největší $v_{Ed,u0}$ právě u varianty, kde je zároveň největší V_{Ed}, a nejmenší u varianty s nejnižším V_{Ed}. Nejmenší smykové napětí tedy vychází u desky, ve které se nachází jak světlíky, tak prostupy. Největší smykové napětí je pak shodně u varianty bez otvorů a v desce jen s prostupy, kde chybí světlíky, které by desku vylehčily.

Velikost smykového napětí $v_{Ed,u1}$ u těchto variant závisí na hodnotě V_{Ed} a délce kontrolovaného obvodu u_1. Nejmenší smykové napětí $v_{Ed,u1}$ vychází u varianty desky jen se světlíky, kde není kontrolovaný obvod u_1 ovlivněn prostupy, a narozdíl od varianty bez otvorů je tato deska méně zatížení vlastní tíhou díky světlíkům, které jí vylehčují. Největší $v_{Ed,u1}$ je u desky jen s prostupy, které zmenšují kontrolovaný obvod u_1 a jen minimálně snižují vlastní tíhu desky.

4.2. Vliv vzdálenosti otvorů od podpory

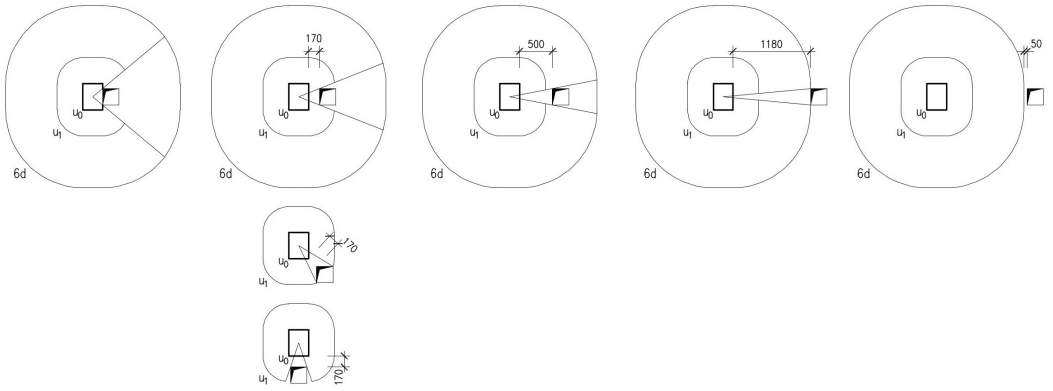
Protože prostupy mají značný negativní vliv na smykovou únosnost desky v oblasti podpor, byl dál zkoumán jejich vliv na protlačení desky a to změnou polohy prostupů, respektive jejich vzdálenosti od podpory.

Deska byla na protlačení porovnávána s pěti různými vzdálenostmi prostupu od podpory:

1) na líci sloupu
2) 170 mm od sloupu (původní)
3) 0,5 m od sloupu
4) ve vzdálenosti 6d (šestkrát účinná výška průřezu) od sloupu
5) dál jak 6d od sloupu

K původní vzdálenosti 170 mm od líce sloupu byly ještě přidány polohy, kdy je na tuto vzdálenost prostup vzdálen od rohu sloupu, a kdy je prostup vzdálen

opět o 170 mm od sloupu, ale od jeho kratší půdorysné strany na rozdíl od původní polohy, kdy je prostup vedle delší strany sloupu.



Obr.21 – poloha prostupů

4.2.1. Výsledek

Poloha prostupu	V_{Ed} [kN]	u_0 [m]	u_1 [m]	$v_{Ed,u0}$ [MPa]	$v_{Ed,u1}$ [MPa]
na líci sloupu	660,2	1,150	3,045	3,21	1,21
původní (0,17 m)	661,8	1,400	3,449	2,64	1,07
0,17 m od rohu sloupu	662,6	1,400	3,506	2,64	1,05
0,17 m od líce sloupu	662,1	1,400	3,475	2,64	1,06
0,5 m od líce sloupu	663,3	1,400	3,668	2,64	1,01
6d od líce sloupu	664,4	1,400	3,775	2,65	0,98
za 6d od líce sloupu	664,5	1,400	3,877	2,65	0,96

Tab.14 – vliv polohy prostupu na protlačení

V tabulce jsou jen hodnoty, které se posouváním prostupu měnily. Ostatní hodnoty zůstávají neměnné:

d_{eff} = 197 mm

β = 1,10 [-]

ρ = 1,14 %

$v_{Rd,max}$ = 3,60 MPa

$v_{Rd,c}$ = 0,73 MPa

$k_{max}v_{Rd,c}$ = 1,08 MPa *(k_{max}=1,47)* [4]

4.3. Vyhodnocení vlivu otvorů na protlačení

Při změně polohy prostupu se smykové napětí na líci podpory $v_{Ed,u0}$ skoro ve všech variantách nijak výrazně nemění, u většiny variant (s výjimkou první) je totiž ovlivněno pouze smykovou silou V_{Ed}. Síla V_{Ed} se zde mění v závislosti na zatížení od vlastní tíhy desky a na tu mají takto malé prostupy jen nepatrný vliv. Výjimkou je případ, kdy je prostup na líci sloupu, zde totiž došlo na rozdíl od ostatních variant k redukci kontrolovaného odvodu u_0.

V normě sice není o redukci kontrolovaného obvodu u_0 vlivem otvoru zmínka, u_0 je však definován jako obvod styčné plochy podpory a desky, ve chvíli, kdy je otvor přímo na líci sloupu, styčná plocha chybí. Proto je vhodné tuto část do obvodu neuvažovat. Program SCIA Engineer s touto redukcí nepočítá a udává u této varianty hodnotu napětí $v_{Ed,u0}$ jako 2,63 MPa, po ručním přepočítání s redukovaným obvodem, vychází $v_{Ed,u0}$ vyšší, jak je vidět v tabulce *(Tab.14 – vliv polohy prostupu na protlačení)*. Stále tak ale nepřekročí maximální napětí 3,60 MPa, a tak i tato varianta v kontrolovaném obvodu u_0 vyhoví.

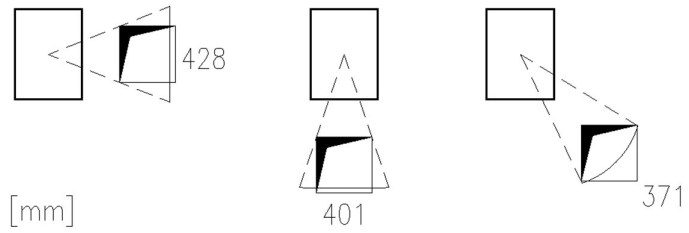
Výrazněji se mění smykové napětí $v_{Ed,u1}$. Čím dál je otvor od podpory, tím menší je výseč, zmenšující kontrolovaný obvod u_1. Díky tomu dochází k většímu rozložení smykové síly $V_{Ed,}$ a tedy ke snížení napětí v kontrolovaném obvodě.

Pokud se prostup posune k podpoře blíž než na původních 170 mm, zmenší se kontrolovaný obvod, a tedy zvětší se smykové napětí na tolik, že nebude možné zamezit protlačení návrhem smykové výztuže pomocí třmínků, se kterou SCIA počítá. Důvodem by bylo překročení napětí 1,08 MPa, což je maximální smyková únosnost s použitím smykové výztuže $k_{max}v_{Rd,c}$.

Například ve variantě, kdy je otvor u líce sloupu, je hodnota smykové napětí $v_{Ed,u1}$ vyšší než smyková únosnost se smykovou vyztuží, proto je hodnota v tabulce červeně. Deska s takto umístěnými otvory by podle SCIA Engineer nevyhověla na protlačení. Řešením je použití smykových trnů, ty jsou schopné přenést větší zatížení díky možnosti lepšího zakotvení v úrovni horní a spodní výztuže. Se smykovými trny je možné uvažovat hodnotu k_{max}=1,96 [3], čímž se limitní smykové napětí zvětší na 1,43 MPa. V tu chvíli už hodnota napětí $v_{Ed,u1}$ v posuzované variantě vyhoví.

Pokud by měl prostup zůstat v původní vzdálenosti od sloupu, je vhodnější pozice, kdy se otvor nachází vedle kratší půdorysné strany sloupu, a ještě lepší,

pokud by byl prostup u rohu. Výseč, snižující kontrolovaný obvod, je u těchto variant menší *(viz. Obr.22 – délka výseče)* a zmenšuje se tak smykové napětí $v_{Ed,u1}$.



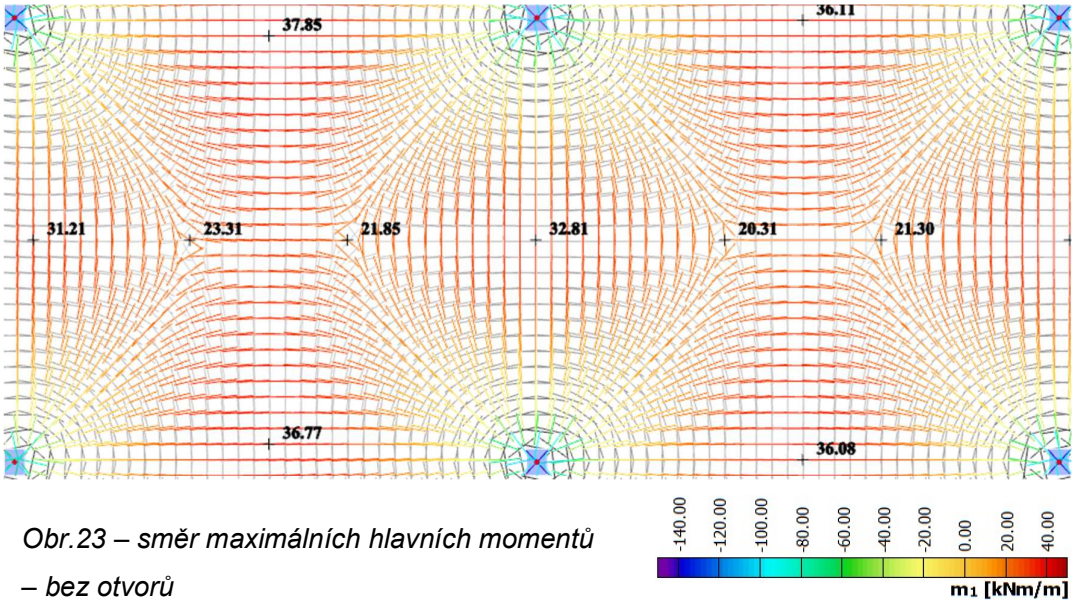
Obr.22 – délka výseče

5. OHYB

Dále bylo zkoumáno, jaký vliv mají otvory na průběh ohybových momentů a jakým způsobem je možné řešit výztuž okolo otvorů. Do sloupového a středního pruhu byl umístěn otvor o velikosti 1,7 x 1,7 m.

5.1. Vliv otvorů na průběh hlavních momentů

Deska bez otvorů

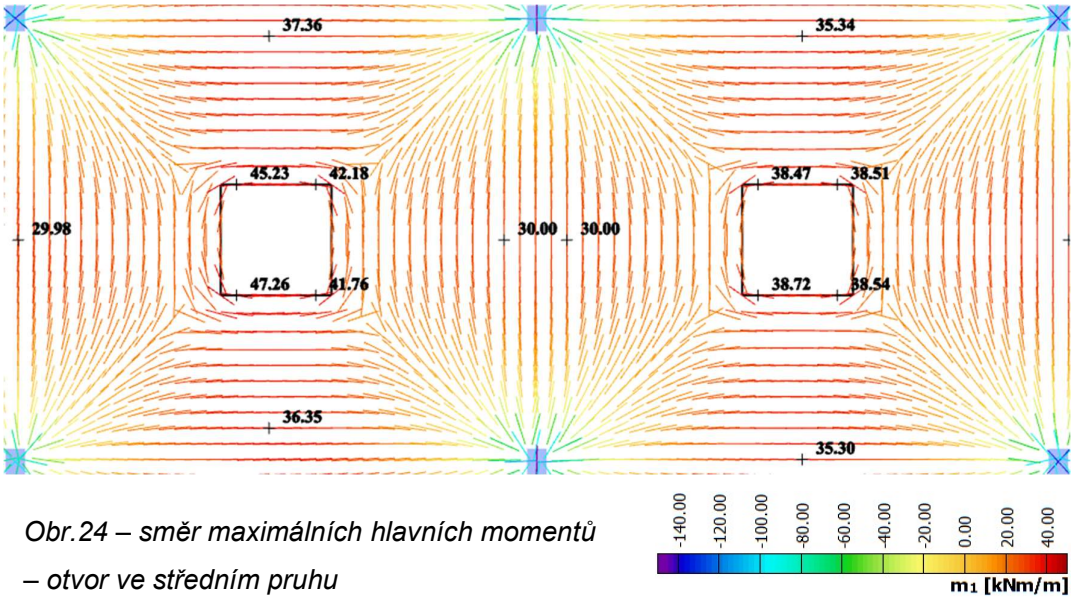


Obr.23 – směr maximálních hlavních momentů – bez otvorů

U lokálně podepřených desek probíhají v poli kladné momenty převážně ve směru osy *x* a *y*. Což je ideální stav, vzhledem k tomu, že i výztuž se v praxi

nejčastěji klade v těchto ortogonalních směrech. Záporné momety nad podporami mají směr radiální (na obrázku šedivou barvou), i tak se ale v praxi nejčastěji zachycují výztuží kladenou ve směru os. [8]

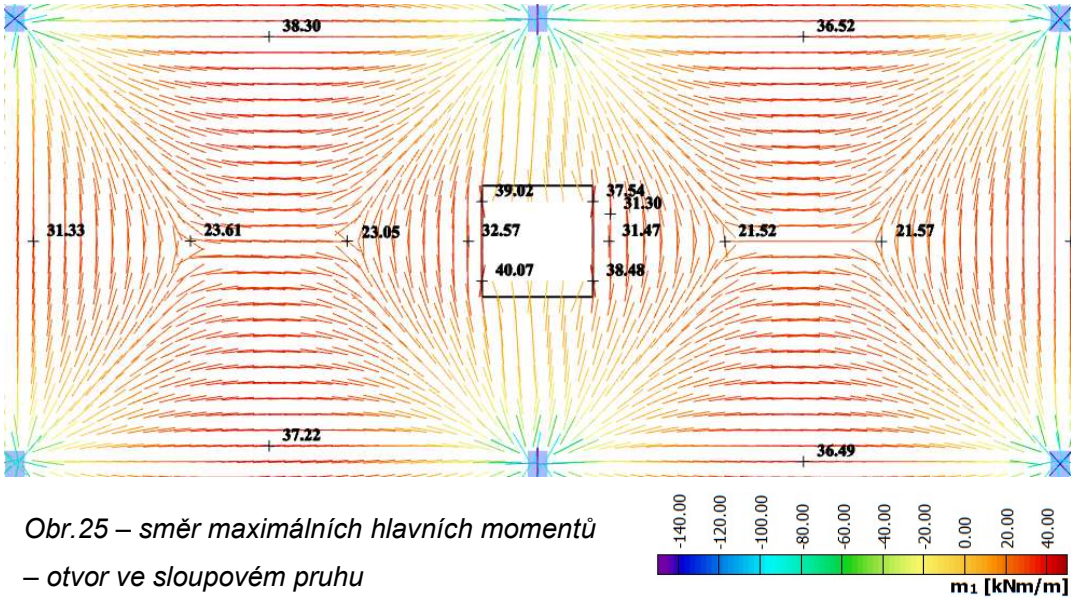
Deska s otvorem ve středním pruhu



Obr.24 – směr maximálních hlavních momentů – otvor ve středním pruhu

V případě, kdy je otvor umístěn uprostřed středního pruhu, se ohybové momenty koncentrují kolem otvoru. Tahová napětí obtékají okolo otvoru.

Deska s otvorem ve sloupovém pruhu



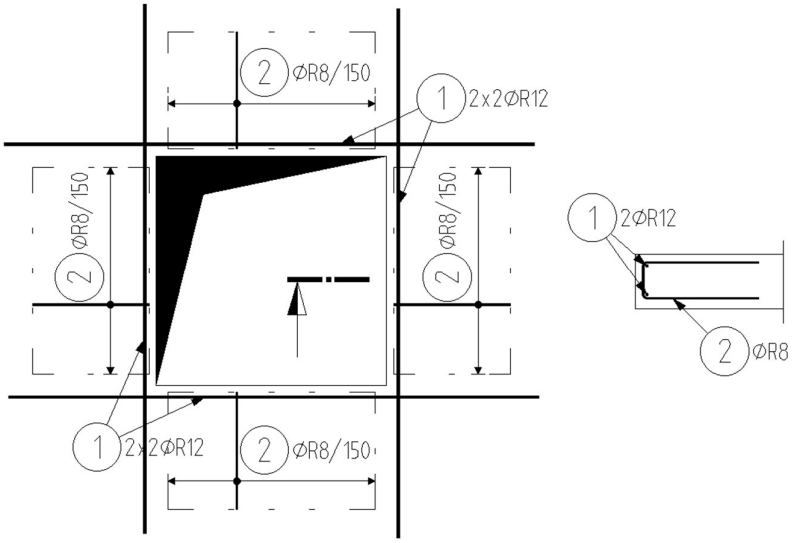
Obr.25 – směr maximálních hlavních momentů – otvor ve sloupovém pruhu

V případě, kdy je otvor umístěn uprostřed sloupového pruhu, dojde k přerušení průběhu hlavních momentů a toku hlavních napětí.

5.2. Vyhodnocení vlivu otvorů na ohyb

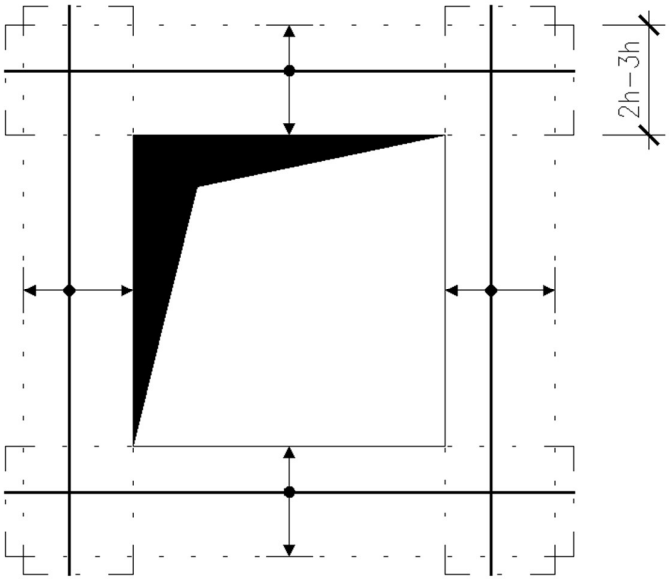
Otvory v desce buď lokálně zvětšují ohybové momenty nebo přesměrovávají toky napětí do jiných směrů. Vliv otvorů na ohyb se tak odrazí v návrhu ohybové výztuže, kterou je potřeba v okolí otvorů upravit.

U desek s menšími otvory se množství výztuže, které je otvorem přerušeno, nahradí po okrajích prutem při horním a spodním povrchu desky. Celý okraj otvoru je ještě doplněn lemovací výztuží, která propojí spodní a horní vyztuž v místě přerušení. *(viz. Obr.26 – příklad výztuže okolo menšího otvoru)*



Obr.26 – příklad výztuže okolo menšího otvoru

U větších otvorů jsou pruty na okrajích otvoru více zatížené. Navrhuje se zhuštění výztuže v pruzích okolo otvoru o šířce zhruba 2h až 3h (kde h je tloušťka desky). Tím vznikne v okolí otvoru systém skrytých nosníků. [1] *(viz. Obr.27 – schéma výztuže okolo většího otvoru)*



Obr.27 – schéma výztuže okolo většího otvoru

Umístění otvoru do sloupového pruhu má na chování konstrukce větší dopad než umístění do středního pruhu. Sloupový pruh vykazuje větší tuhost než pruh střední a přenáší tak větší zatížení. To neplatí, pokud je pruh přerušen otvorem. Dochází ke změně statického schématu a zatížení je přenášeno ve druhém směru než u konstrukce bez otvoru. [11]

Je tedy jasné, že je vhodnější umístit otvor do středního pruhu než přerušit pruhu sloupový, který vlastně tvoří skrytý průvlak.

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem si vyzkoušela optimalizovat návrh otvorů v lokálně podepřené desce. Nejprve jsem na vybrané konstrukci zjistila, jak dané typy otvorů (světlíky či prostupy) ovlivňují chování desky, a následně jsem změnou polohy a velikosti zkoumala, zda se jejich působení bude lišit.

Výsledkem bylo například zjištění, že leží-li otvor na hranici mezi sloupovým a středním pruhem, výrazně nesnižuje tuhost ani jednoho z nich a desku ovlivní pozitivně vylehčením, snížením zatížení od vlastí tíhy.

Dále bylo zajímavé zamyslet se nad variantou, zda je lepší do desky umístit blízko sebe dva otvory nebo jeden větší. Do sloupového pruhu se nabízí jako lepší řešení umístit dva menší otvory a zanechat mezi nimi průběžný pás v ose pruhu, než umístit do něho jeden větší. Ten by zasahoval do osy sloupového pruhu a došlo by tak k přerušení hlavní tahové výztuže (pomyslného průvlaku, za který lze sloupový pruh považovat). Jinak tomu je při umístění otvoru do středního pruhu, tam je naopak výhodnější umístit jeden větší otvor místo dvou menších a vylehčit tak řádně střední pole desky. To beztak nemá takovou tuhost, aby jeho narušení výrazně ovlivnilo statické chování konstrukce.

V případě otvorů v blízkosti podpor se negativnímu vlivu na desku nedá zcela zabránit. Čím blíž bude otvor k podpoře, tím se bude zvětšovat smykové napětí a vliv protlačení bude narůstat. Nejhorší variantou je umístit otvor přímo na líc podpory, v tu chvíli je redukce (zmenšení) kontrolovaného obvodu, a tedy zvětšení smykového napětí, nejvýraznější. Zajímavým zjištěním byl fakt, že nezáleží jen na vzdálenosti, ale i na poloze otvoru vůči podpoře (jestli se nachází u strany či u rohu podpory). Přestože vzdálenost od sloupu zůstává stejná, může se lišit velikost výseče, která zmenšuje kontrolovaný obvod, a tím i plochu na níž se smyková síla rozkládá.

Tato práce mi pomohla pochopit statické chovaní lokálně podepřených desek a přivedla mě k překvapivému závěru, že zásah do stropní desky v podobě velkých otvorů, nemusí vždy znamenat negativní ovlivnění konstrukce.

6. LITERATURA

[1] PROCHÁZKA, Jaroslav a ŠMEJKAL, Jiří. Betonové stropní a schodišťové konstrukce. V Praze: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-01-06323-1.

[2] HANZLOVÁ, Hana a Jiří ŠMEJKAL. Betonové a zděné konstrukce 1. Základy navrhování betonových konstrukcí. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06508-2.

[3] PROCHÁZKA, Jaroslav, Alena KOHOUTKOVÁ a Jitka VAŠKOVÁ. Navrhování železobetonových konstrukcí: příklady a postupy. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 2021. ISBN 978-80-01-06916-5.

[4] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

[5] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí

[6] ČSN 73 1201: Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb

[7] FOGLAR, Marek. Úloha 2 - Lokálně podepřená deska [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. [2023-03-04]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/foglamar/Download/RBZS/RBZS-uloha2-postup.pdf

[8] TIPKA, Martin a NOVÁK, Jiří. Analýza metod výpočtu železobetonových lokálně podepřených desek [online]. [2023-03-14]. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/FRVS_2011/analyza_lok_pod_desek.pdf

[9] BÍLÝ, Petr. Návrh stropní desky v programu SCIA Engineer: Podklad pro předmět Navrhování betonových konstrukcí na počítači (133YBKC) [online]. [2023-02-22]. V Praze: České vysoké učení technické, 2021. Dostupné z: https://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/vyuka/YBKC/manualy/YBKC-deska.pdf

[10] KOHOUTKOVÁ, Alena. Protlačení [online]. [2023-02-26]. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. Dostupné z: https://people.fsv.cvut.cz/~kohouale/vyuka/bz2a/bz2a_sylaby/protlaceni.pdf

[11] VRÁTNÝ, Ondřej, Martin TIPKA a Jitka VAŠKOVÁ. Základní typy betonových konstrukcí pozemních staveb se vzorovými příklady. 1. textová část [online]. [2023-04-29]. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. Dostupné z: https://docplayer.cz/16914427-Zakladni-typy-betonovych-konstrukci-pozemnich-staveb-se-vzorovymi-priklady.html

[12] Progressive collapse of Pipers Row Car Park [online]. [2023-04-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Typical-flat-slab-structure-b-Progressive-collapse-of-Pipers-Row-Car-Park-2_fig5_316975829