

V Š S T L I B E R E C

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie

zaměření

Tváření kovů a plastických hmot

Katedra technologie a nauky o materiálu

D I M E N Z E V Y B R A N Ý C H Č Á S T Í

P Ě P R A V K Y Z P L A S T Ů

Jméno autora: Petr Kovář

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Šafařík, VŠST Liberec

Konzultant: Ing. Jitka Kvapilová, VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 62

Počet tabulek 15

Počet obrázků 29

DT: 679.5

DP-ST 1323/77

27.5.1977

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro **s. Petra K o v á ř e**

obor **strojírenská technologie**

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: **Dimenze vybraných částí přepravy z plastů**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu a proveďte výpočet přepravy jako rámové konstrukce.
2. Proveďte numerické řešení navrženého výpočtu.
3. V experimentální práci proveďte modelování zatížení a určete průhyb vybraných částí.
4. V hodnocení výsledků se pokuste stanovit kriteria meze stability a ekonomický efekt daného řešení.

Liberec, 31. 8. 1977
V. 15/1977

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PŠČ 461 17

Rozsah grafických laboratorních prací: **Grafy a tabulky**

Rozsah průvodní zprávy: **40 - 50 stran**

Seznam odborné literatury:

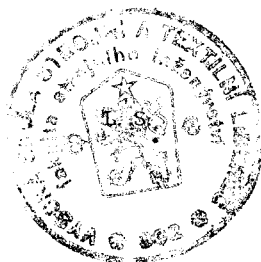
1. Janata Jaroslav: **Přímé tenkostěnné nosníky**; SNTL, Praha, 1961
2. Pestel, E.C.- Leckie, F.A.: **Matrix methodes in elastomechanies**; New York, Me Graw - Hill, 1963
3. Hugo Jiří : **Konstrukční plastické hmoty**; SNTL Praha, 1965
4. Kolář Vladimír : **Vybrané stati z teorie stavebních konstrukcí**; SNTL, ALFA Praha, 1969

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miloslav Šafařík**

Konsultanti: **Ing. Jitka Kvapilová - KMP**

Datum zahájení diplomové práce: **11. X. 1976**

Datum odevzdání diplomové práce: **27. V. 1977**



Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc
Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stríž, CSc
Děkan

V Liberci

dne **7. října**

19 **76**

Místopřisežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 10.5.1977

Petr Horáť

O B S A H

	list
Úvod	5
1. Cíl diplomové práce	6
2. Vlastnosti plastů a jejich stav ke klasickým materiálům	7
2.1. Ekonomické předpoklady pro volbu plastických hmot jako konstrukčního materiálu	8
2.2. Jak se projeví vlastnosti materiálu na hotovém výrobku	9
3. Technické požadavky na přepravky	10
3.1. Výběr přepravek	12
3.2. Deformační chování přepravek	13
4. Výpočet přepravky jako rámové konstrukce	15
4.1. Obecné vlastnosti rámu a jejich řešení	15
4.2. Deformační metoda	19
4.3. Prostorové rámy	24
5. Řešení přepravky jako rámové konstrukce	25
5.1. Řešení přepravky při uvažování tuhého dna	25
5.2. Řešení přepravky při uvažování kloubového uložení styčníků dna	29
6. Numerické řešení	40
7. Experimentální část	43
7.1. Popis zkušebního zařízení	43
7.2. Cejchovní křivka	47
8. Vyhodnocení výsledků	56
8.1. Stanovení kritéria stability	59
Závěr	61
Literatura	62

ÚVOD

Rozvoj národního hospodářství úzce souvisí s jeho materiální základnou. Rostoucí nároky na spotřebu materiálu vedou k hledání stále nových možností. Lze pozorovat intenzivní průzkum přírodních zdrojů, ale současně také hledání nových materiálů, vhodných především pro krytí úzkoprofilových potřeb.

K takovýmto materiálům se bezesporu řadí materiály na polymerní bázi. Vedle přírodních polymerů, jejichž získávání záleží především na klimatických podmínkách, existuje dnes již velmi početná skupina polymerů, připravených syntetickou cestou. Nejvýznamnější postavení mezi nimi mají plasty.

Ve světovém měřítku má vývoj spotřeby plastů strmější trend než vývoj spotřeby kovů. Tyto rozdíly výrazněji vyniknou, vezmeme-li v úvahu místo hmotných jednotek jednotky objemové, neboť plasty jsou vesměs méně hmotné, než ostatní klasické materiály. Lze tedy očekávat, že objemově převýší výroba plastů výrobu kovů již v příštím desetiletí. Z těchto důvodů je nutné volit správné a vhodné použití plastických hmot. To však není možné bez dokonalé znalosti všech specifických vlastností plastů oproti dosud používaným klasickým materiálům. S těmito novými vlastnostmi pak úzce souvisí nová technologie výroby, která má sama o sobě nemalý vliv na konečné vlastnosti vyráběného předmětu.

Jelikož si výrobky z plastických hmot získaly pro své specifické vlastnosti značnou popularitu také v transportní a obalové technice, je důležité problém stability výrobků z plastů vyřešit i pro nové prvky obalové a transportní techniky. Do této skupiny výrobků patří hlavně přepravky z plastických hmot. Pro značnou oblíbenost těchto nových přepravek jako transportních prvků je vhodné podrobněji se zabývat jejich dimenzováním.

1. Cíl diplomované práce

V předešlých pracích zabývajících se problematikou řešení stability velkých výrobků a tedy i přepravek z plastických hmot, byla snaha tyto výrobky rozčlenit na jednodušší nosné elementy se snahou o jejich výpočet a dimenzování. V tomto směru byla přepravka již propočítána v předešlých pracích.

Proto se jako další cesta pro dimenzování přepravek volí zcela opačně. Cílem této diplomové práce je posoudit přepravku jako celek s tím, že by se přepravka měla vypočítat jako rámová konstrukce. Přitom by se vycházelo z výsledků a zkušeností získaných v předešlých pracích. Ve skutečnosti nám nejde o sestavení konečného výpočtu, který by jednoznačně určil rozměry a tvar přepravky, ale o pokus o sestavení metodiky výpočtu řešení stability přepravky s ohledem na její deformační chování při zatížení. Správnost navrženého výpočtu je pak možno zkontrolovat při experimentálních zkouškách, které provedeme na zkušebním zařízení.

2. Vlastnosti plastů a jejich stav ke klasickým materiálům

Vlastnosti plastů se v mnoha směrech liší od vlastností klasických materiálů. Předpoklady pro efektivní aplikaci plastů jsou především v tom, že se využije vlastností, které jiné materiály buď nemají, nebo jich dosahují za značně ztížených podmínek. Z tohoto hlediska je vhodné používat plasty pro výrobky, u nichž se vyžaduje nízká hmotnost, chemická odolnost, vysoká odolnost proti korozi atd.

Význačnou předností plastů je jejich poměrně nízká hustota, kterou lze nadále snižovat lehčením. Ve srovnání s černými kovy je hmotnost plastů 6 - 8krát nižší. U vyztužených plastů bude tento poměr samozřejmě méně příznivý, protože jako plniva se používá hlavně sklo, jehož hustota je proti plastům přibližně dvojnásobná.

Prosté nelehčené plasty mají s ohledem na nízkou hmotnost předpoklady pro efektivní využití především tam, kde se požaduje úspora hmotnosti výrobku. Toto je také jedno z hledisek, které vedlo k volbě plastů při výrobě transportních přepravek. Jako hlavní faktor při volbě plastů však zůstávají, podobně jako u kovů mechanické vlastnosti plastů. U většiny praktických aplikací konstrukčních materiálů je důležité dosáhnout vysokého modulu pružnosti, což je podmíněno vytvořením pevných mezimolekulárních vazeb. Další velmi důležitá vlastnost konstrukčních materiálů je houževnatost.

Zatím co pevnost vychází u plastů podstatně nižší než u ostatních konstrukčních materiálů, bývá tažnost a houževnatost naopak daleko větší. Znamená to tedy, že tuhost výrobků z plastických hmot je vesměs nižší.

K dalším významným přednostem plastů patří poměrně vysoká odolnost proti korozi. I tato vlastnost je důležitá pro volbu plastů při výrobě přepravek a jiných transportních nádob, vystavených vnějším povětrnostním vlivům. Za venkovních podmínek, kde se projevuje vliv slunečního záření, není situace u některých plastů příznivá. Je nutné znát u plastů jejich atmosférickou stabilitu.

Předpokladem této stability je zabránění vzniku fotochemické iniciace. Především je třeba zabývat se likvidací prvních produktů fotooxydace, to je především likvidací radikálů RO_2 .

Plasty jsou také odolné proti bakteriím a plísním. Ve srovnání se dřevem jsou mnohem odolnější, což však nemusí být vždy jenom předností. Při použití plastů na přepravky však tato vlastnost vystupuje do popředí.

V neposlední řadě je třeba se zmínit o fyziologických a biologických vlastnostech plastů. Zatím co polymery jsou v tomto směru vesměs netečné, mohou některé monomery být příčinou zdravotníchnebo fyziologických komplikací. Známá je v poslední době situace kolem vinylchloridu, který byl označen za látku zdraví škodlivou, což vyvolalo výrazné snížení povolené koncentrace monomerů v pracovním prostředí.

2.1. Ekonomické předpoklady pro volbu plastických hmot jako konstrukčního materiálu.

Ceny základních surovin - plastických hmot umožňují v současné době ekonomickou výrobu přepravek a jiných transportních nádob z plastických hmot. V protikladu k tendenci růstu cen dřeva jako nynějšího materiálu přepravek se zdají být plastické hmoty cenově stabilnější.

Použití přepravek samo o sobě již přináší racionalizaci. Při téměř dvojnásobné životnosti nevyžaduje přepravka z plastické hmoty žádnou průběžnou údržbu. Vlivem velmi nízké hmotnosti přepravek se dá tudíž docílit i vyšších transportních výkonů. Další výhodou těchto přepravek spočívá v možnosti snadné stohovatelnosti, což usnadňuje jejich přepravu a umožňuje opět zvýšení transportních výkonů. Tyto výhody, k nimž ještě přistupují: svítivé barvy, výrazné reklamní nápisy, oblíbenost, předurčují přepravky z plastických hmot ke značné oblibě, která je jistě oprávněná. Tato skutečnost se stále více projevuje v tom, že každá modernizace technického zařízení je spojena se zaváděním přepravek do běžného používání.

Pro plastikářský průmysl z této skutečnosti vyplývají nové úkoly.

- 1) Navrhnout co nejoptimálnější tvar přepravek
- 2) Vyvinout nejvhodnější materiál přepravek.

2.2. Jak se projeví vlastnosti materiálu na hotovém výrobku.

Výše krystalizačního stupně a s ním paralelně probíhající mechanické vlastnosti: pevnost v tahu, luku, ohybu, tažnost atd. jsou vedle konstrukce a uspořádání formy rozhodující z hlediska dlouhodobého namáhání přepravky. Mechanické vlastnosti plastů, z nichž se přepravky dělají (PEN), propůjčují přepravkám potřebnou bezpečnost a jistotu z hlediska lomu, nárazu a pádu. Při těchto úvahách však nelze opomenout křípevé chování plastických hmot. Nesmírně důležitou hodnotou pro konstrukční návrhy výrobků z plastických hmot a tedy i přepravek je stanovení křípevého modulu pružnosti E_k a to pro různé zatěžovací doby. Jak známo, je modul pružnosti pro klasické materiály - ocel konstantní až do 200°C . Ovšem plastické hmoty mají zcela jiný modul pružnosti, lišící se zejména svou velikostí, která je značně nižší, a navíc tento modul pružnosti je závislý na čase. Tato časová závislost modulu pružnosti je přitom ještě ovlivněna teplotou a napětím.

V současné době jsou známy grafické závislosti časově-deformačních křivek na napětí a závislosti deformačně-napěťových křivek na napětí a závislosti izochromních křivek, získané z firemních materiálů a uvažované pro teplotu $t = 20^{\circ}\text{C}$. Tyto poznatky jsou rozhodující hlavně pro dlouhodobé zkoušky, kde nabývají prioritního významu. Přestože se v další práci budeme zabývat pouze zkouškami krátkodobými, je nutné mít tyto poznatky stále na zřeteli.

3. Technické požadavky na přepravky.

Přepravky svým charakterem patří do skupiny pod názvem: velké předměty vyráběné vstřikováním. Tyto výrobky musí vyhovovat příslušným normám ČSN, nebo podnikovým normám. Hlavní částí těchto forem jsou technické požadavky, jimiž jsou předepsány všechny požadavky technického rázu, vázané pro výrobu, odběratele i uživatele. Norma ČSN 269301 se svým obsahem vztahuje také na přepravky z plastických hmot.

Hlavní technické požadavky jsou:

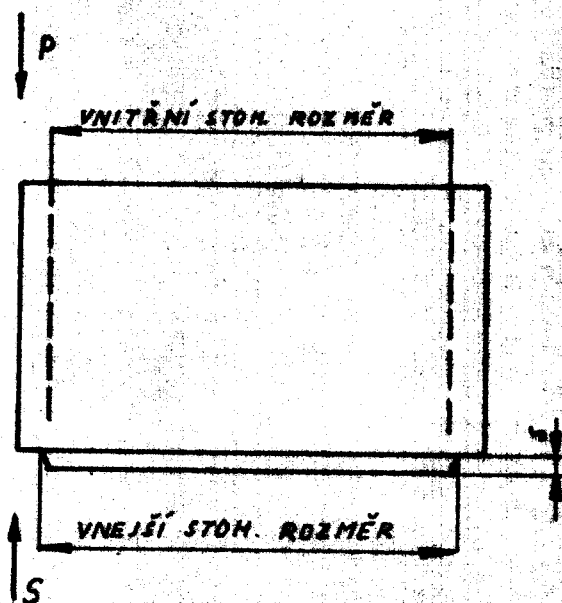
- 1) Rozměry přepravky
- 2) Púdorysné rozměry
- 3) Stohovací rozměry

Vnitřní stohovací rozměry jsou dány vnitřním rozměrem horního stohovacího rámu. Vnější stohovací rozměry jsou dány vnějším rozměrem dolního stohovacího osazení dna přepravky.

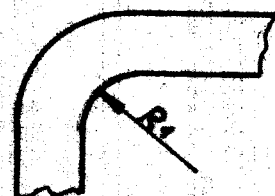
Tabulka 3. Stohovací rozměry.

Púdorysné rozměry	Stohovací rozměry	
	vnitřní	vnější
600x400	570x370	562x362
400x300	384x284	376x276

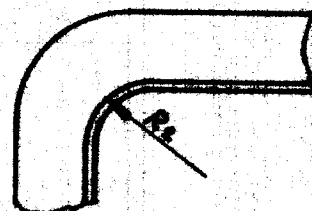
Poloměry R_1 (viz. obr. 3.2.), R_2 (viz. obr. 3.3.), výška stohovacího osazení s (viz. obr. 3.1.), a výšková vůle jsou uvedeny v příslušných normách.



obr. 3.1. Stohovací rozměry



obr. 3.2. Pohled směrem P



obr. 3.3. Pohled směrem S

Z dalších technických požadavků důležitých pro další práci jsou:

4) Provedení

provedení musí být takové, aby byla zaručena vzájemná stohovatelnost přepravek stejného půdorysného rozměru, stejného stohovacího systému a tvaru. Je důležité znát nosnost přepravek a s tím související stohovací nosnosti, které jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Nosnost přepravky (N)	100	160	200	250	320	500
Stohovací nosnost přepravky (N)	1000	3200	4000			

5) Odolnost proti přetížení ložením.

Norma ČSN 269301 obsahuje také požadavky na odolnost proti přetížení ložením. Přepravky o nosnosti do 20 kg musí snést zatížení břemenem, rovnajícím se pětinásobku této nosnosti. Přepravky o nosnosti nad 20 kg trojnásobku nosnosti. Přitom nesmí nastat trvalá deformace nebo porušení soudržnosti.

5) Odelnost proti přetížení stohováním

Přepravky mají stanoveny stohovací nosnosti s ohledem na nosnosti přepravek. Při praktické zkoušce stohovatelnosti musí přepravky ve stohu snést statické zatížení břemenem rovném dvojnásobku stohovací nosnosti a přitom nesmí nastat trvalá deformace nebo poškození, které by ovlivnilo další funkci přepravek. Tato zkouška stohovatelnosti má zásadní význam pro pevnostní rozbor a pro další výpočet. Podle normy se tato zkouška skládá ze dvou částí a to ze zkoušky krátkodobé a dlouhodobé. Jelikož při zkoušce potřebujeme porovnat pouze správnost navrženého výpočtu, spokojíme se se zkouškou krátkodobou.

Tato zkouška spočívá v tom, že se po dobu 30 min. zatíží tři nastohované přepravky a během této zkoušky se měří velikost deformací. Velikost zatížení je rovná dvojnásobku stohovací nosnosti jedné přepravky.

3.1. Výběr přepravek

Při výběru vhodného druhu přepravky jsme se řídili především těmito hledisky: vybrat takový typ, který je v dostatečné míře vyráběn v národním podniku Plastimat a u něhož se předpokládá častá opakovatelnost výroby. Při volbě přepravky jsme brali ohled i na to, do jaké míry je zvolená přepravka již konstrukčně a stabilitně dokonalá. Je zejména vhodné volit pro výpočet přepravky, u kterých jsou již známy průřezové hodnoty hlavních nosných prvků přepravky. Tím bude možno docílit jistého porovnání výsledků dosažených v této práci s výsledky s prací předešlých.

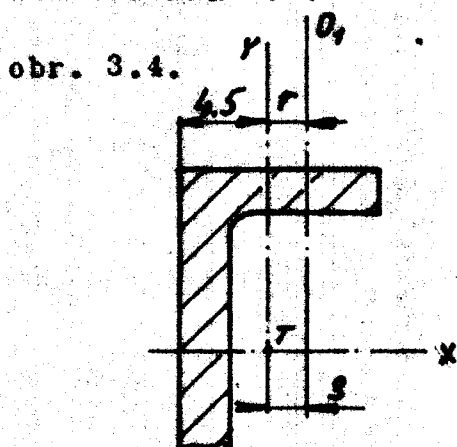
Z těchto důvodů jsme pro náš výpočet zvolili přepravku typu 522, u které byl již proveden komplexní výpočet nosných hran horního stohovacího rámu a dolního stohovacího rámu.

3.2. Deformační chování přepravky

Z rozboru současných znalostí získaných výpočtem i experimentálními zkouškami lze již předem usuzovat na deformační chování zatížené přepravky. Při symetrickém zatěžování přepravky je možno pozorovat výraznou deformaci především tří hlavních profilů přepravky.

1) Deformace horního stahovacího okraje.

Tento stahovací okraj je v průběhu zkoušky zatížen spojitým zatížením q . Vlivem tohoto zatížení je tato část přepravky deformována ve směru působení zatěžovací síly. Kromě toho lze pozorovat také výrazné nakrucování přímých částí tohoto rámu. Nakrucování horního stahovacího okraje je možno vysvětlit tím, že spojitě zatížení q nepůsobí v ose symetrie horního rámu, neboť osa symetrie horního rámu není totožná s osou spojitěho zatížení. Tato skutečnost má za následek, že spojitě zatížení vytváří klopný moment dle obrázku 3.4.



O_1 - osa spojitěho zatížení

y - svislá osa souměrnosti

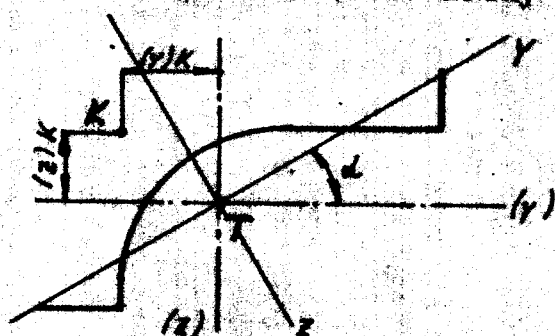
r - rameno výstřednosti

Kromě toho je horní stahovací okraj deformován kolmo na směr působícího zatížení, a to tak, že se snaží horní rám vybočit směrem ven. Tato skutečnost je způsobena zřejmě tím, že nosné hrany jsou namáhány prostorovým vzpěrem, což má za následek namáhání těchto hran i přídatnými napětími v příčných směrech. Tato příčná napětí se snaží celý průřez nosné hrany deformovat v příčném směru a tím se část deformace přenáší i do horního rámu.

2) Nosné hrany.

Je známo, že přepravka svým tvarem splňuje požadavek tenkostěnných konstrukcí, což se projeví ve způsobu výpočtu hlavní nosné hrany. Tato hrana je v průběhu zatěžování namáhána kombinovaným namáháním ohyb - krut. Vlivem ohybových deformací profilu se vnitřní síly σ_x a τ_{xy} promítají do směrů y , a z , a zatěžují profil příčně. Neprochází-li výslednice příčných sil v každém průřezu středem smyku průřezu profilu, nastává kromě ohybu i krut. Tato skutečnost pak ovlivní stabilitu nosné hrany a její deformační chování.

obr. 3.5. Průřez nosné hrany

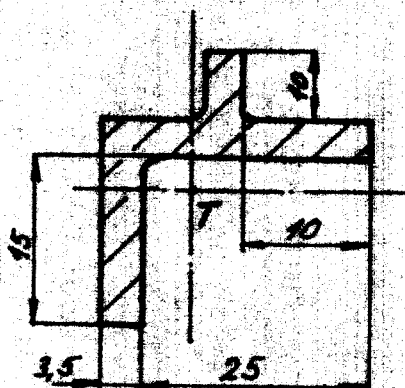


K..... střed smyku

3) Spodní stohovací okraj.

Tato část přepravky se ukazuje spolu s horním stohovacím okrajem jako rozhodující při stabilitě stohu. Ve stohu je spodní stohovací okraj ve styku s horním stohovacím rámem spodní přepravky. Stabilita stohu selhává zejména vlivem zvětšení stohovací vůle, což má za následek následující zalísování přepravek do sebe. V zatíženém stohu má na jeho selhání však především vliv horní stohovací rám, neboť jeho tuhost ve směru x je podstatně menší, než u spodního stohovacího rámu.

obr. 4.6. Spodní stohovací rám



4. Výpočet přepravky jako rámové konstrukce

Pro řešení přepravky jako celku jsme se pokusili použít metodu pro řešení rámových konstrukcí. Tyto konstrukce jsou typické hlavně ve stavební technice a jsou podrobně rozpracovány ve stavební mechanice. Proto jsme se rozhodli aplikovat metody vypracované pro stavební mechaniku i na náš případ rámové konstrukce. Je však zřejmé, že náš výpočet nebude odpovídat zcela skutečnosti a to z těchto důvodů:

1) Přepravka je jako celek svým charakterem tenkostěnná konstrukce. Tuto skutečnost v našem případě poněkud zanedbáme a pokusíme se tenkostěnnost konstrukce vyjádřit pouze dosazením známých momentů setrvačnosti, odvozených pro tenkostěnné konstrukce.

2) Nosné hrany přepravky budeme uvažovat pouze jako pruty a spojení nosných hran s pruty horního a dolního stohovacího rámu jako tuhé styčnický. Tím se dopustíme zřejmě největších nepřesností, neboť nosné hrany ve skutečnosti přenášejí většinu zatížení oproti hornímu rámu.

3) Uvažujeme, že celé zatížení se rozkládá do přepravky prostřednictvím horního rámu, který je zatížen spojitým zatížením. V důsledku jeho deformace se účinnost přenosu zatížení tímto rámem snižuje a zatížení pak přenášejí převážně nosné hrany přepravky.

4) Uvažujeme-li přepravku jako rámovou konstrukci, zanedbáme tím vliv výplně stěn. Ve skutečnosti má výplň podstatný vliv na tvarovou pevnost a celkovou tuhost přepravky.

Vliv výplně na deformační chování přepravky se pokusíme stanovit z výsledků dodatečného experimentu.

4.1. Obecné vlastnosti rámu a jejich řešení.

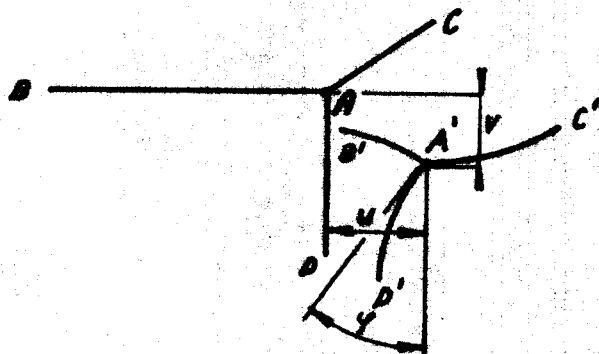
Definice: rám je soustava prutů, zoravidla se pravouhle přičísících, které jsou spolu ve styčnických dokonale spojených tak, že nemůže nastat

žádné vzájemné otáčení stýkajících se konců prutů v úči sobě. Tohoto tuhého spojení se u klasických materiálů dosahuje svařováním, nýtováním, monolitickým odlitím. Mezi takovátó spojení lze řadit i styčník naší přepravky.

Nejprve se budeme zabývat rovinnými rámy, jejichž osy prutů leží v jedné rovině, kterou budeme pokládat za svislou. Styčník takového rámu se může vlivem zatížení přemístit ze své původní polohy A do polohy nové A'. Toto posunutí je definováno třemi složkami: viz. obr. 4.1. Vodorovnou složkou posunutí u svislou složkou posunutí v natočením osy prutu φ

Tyto složky jsou přitom společné všem koncům prutů, stýkajících se ve styčníku.

obr. 4.1. Deformace styčníku



$$u_{AB} = u_{AC} = u_{AD} \quad (4.1.)$$

$$v_{AB} = v_{AC} = v_{AD} \quad (4.2.)$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{AC} = \varphi_{AD} \quad (4.3.)$$

Veličiny týkající se konce A prutu \overline{AB} budeme značit indexy A, B tak, že prvý index udává vyšetřovaný konec prutu \overline{AB} .

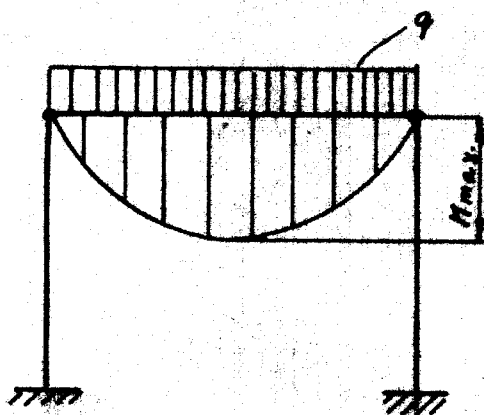
Význam řešení rámu.

Ze stavební oraxe se ukázalo, že monolitické konstrukce mají větší únosnost oproti konstrukcím kloubovým. Z toho je patrné, že i části konstrukce příčně nezatížené (v našem případě nosné hrany přepravky) se zúčastní při ohybovém přenášení břemen do podpor. Toto je možno vysvětlit na dvou případech jednoduchého rovinného rámu

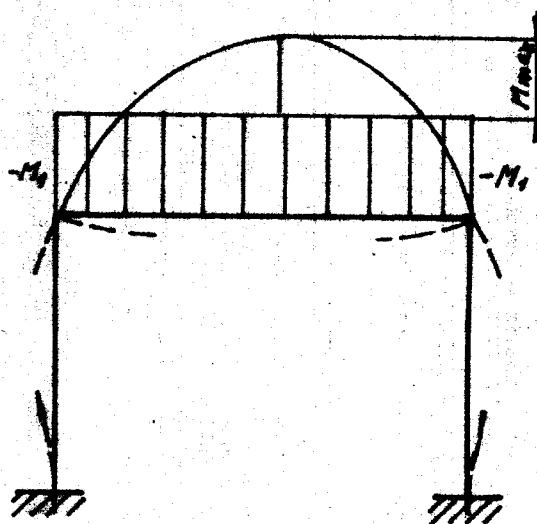
se stejnými pruty a se stejným zatížením horního prutu. Na obr. 4.2. je prostý nosník uložený na dvou sloupech, které jsou jen centricky tlačeny. V nosníku vzniká maximální ohybový moment: $M = \frac{1}{8} q l^2$.

Na obr. 4.3. je nosník rámově spojen se sloupy, které klade odpor natáčení jeho konců průřezu. Vnášejí tím do horního prutu záporné ohybové momenty M_1 , čímž tento prut odlehčují od působení zatížení. Tím se největší ohybový moment sníží na hodnotu $M = \frac{1}{8} q l^2 - M_1$.

obr. 4.2.



obr. 4.3.



Představíme-li si styčník vyjmutý z konstrukce a nahradíme-li působené prutů na styčník vnějšími silami $N_{AB}, T_{AB}, N_{AD}, T_{AD}, M_{AB}, \dots$ atd. Normální a posouvající síly rozložíme na výpočtové složky: vodorovnou, H_{AB}, H_{AC}, \dots

svislou V_{AB}, V_{AC}, \dots

zavedeme dohodu o znaménkách.

Kladné posunutí u, \dots směrem doprava

kladné posunutí v, \dots směrem dolů

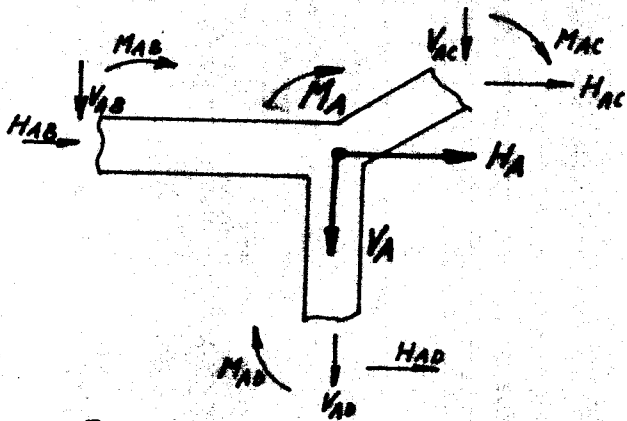
kladné natočení γ, \dots ve směru chodu hodinových ručiček.

Pro styčník A lze potom pomocí principu virtuálních prací sestavit tři podmínky rovnováhy.

$$H_{AB} + H_{AC} + H_{AD} + H_A = 0 \quad (4.4.)$$

$$V_{AB} + V_{AC} + V_{AD} + V_A = 0 \quad (4.5.)$$

$$M_{AB} + M_{AC} + M_{AD} + M_A = 0 \quad (4.6.)$$



Tyto tři podmínky odpovídají třem geometrickým vazbám (4.1.) až (4.3.)

Pomocí principu virtuálních prací udělíme styčníku A virtuální posunutí u_A , potom v_A a nakonec γ_A . Přitom pracují nejprve síly H , potom V , pak momenty M , přičemž virtuální práce musí být vždy rovna 0.

$$H_{AB}^u + H_{AC}^u + H_{AD}^u + H_A^u = 0$$

$$V_{AB}^v + V_{AC}^v + V_{AD}^v + V_A^v = 0 \quad (4.7.)$$

$$M_{AB} + M_{AC} + M_{AD} + M_A = 0$$

Odtud po zkrácení plynou přímo podmínky rovnováhy (4.4.) až (4.6.). V možnosti zkrácení společného posunutí se právě uplatňují geometrické vazby. Nyní už můžeme vytknout hlavní rozdíl mezi konstrukcemi rámovými a příhradovými. U příhradových konstrukcí platí vazby (4.1.), (4.2.), a podmínky (4.4.) a (4.5.). Neplatí tam však vazba (4.3.) a podmínka (4.6.).

4.2. Deformační metoda

Na začátku je třeba provést předpoklad, že deformace každého prutu je způsobena jen ohybovými momenty M . Zanedbáme tedy roztažení či stlačení prutu normálními silami N i smykové přetvoření tečnými silami T , jakož i různé vedlejší účinky jako změnu délky prutu vlivem teploty, či dodatečného smrštění.

Za tohoto předpokladu je vhodné pro běžné konstrukce zavést jako neznámé jen úhly. To znamená, že místo složek přemístění u, v , budeme počítat jen s natočením styčnicku φ a výchylkami os prutů ψ u posuvných styčnicků.

Vztah mezi momenty a deformacemi konců prutů.

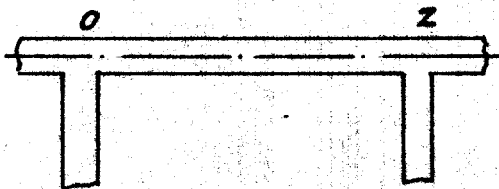
Deformační metoda je metoda nepřímá, která řeší nejprve deformační stav konstrukce a z něho určuje statický stav, rozhodující pro určení konečných rozměrů konstrukce. Deformační stav konstrukce je charakterizován natočením styčnicků φ a odchylkami os prutu ψ .

znaménková konvence:

jsou kladné, znamenají-li otočení ve směru hodinových ručiček.

Moment na konci prutu je kladný, působí-li prut na styčnick v e směru pohybu hodinových ručiček.

Koncový moment prutu závisí na zatížení prutu a jeho deformací. Např. koncový moment prutu \overline{OZ} bude dle principu superposice a úměrnosti roven:



obr. 4.4.

$$\begin{aligned} M_{OZ} &= \mathcal{M}_{OZ} - (A_{OZ} \gamma_0 + B_{OZ} \gamma_z + C_{OZ} \gamma_{Oz}) \\ M_{ZO} &= \mathcal{M}_{ZO} - (A_{ZO} \gamma_z + B_{ZO} \gamma_0 + C_{ZO} \gamma_{ZO}) \end{aligned} \quad (4.8.)$$

A_{OZ} = absolutní hodnota momentu, jímž nastane natočení $\gamma_0 = 1$
Dále ji budeme nazývat tuhost konce O prutu \overline{OZ} .

B_{OZ} = převedená tuhost prutu OZ .

$$B_{OZ} = B_{ZO}$$

C_{OZ} a C_{ZO} = výchylková tuhost konce prutu O nebo Z prutu OZ .

$$\text{Dále platí: } C_{OZ} = A_{OZ} + B_{OZ}$$

$$C_{ZO} = A_{ZO} + B_{ZO}$$

Položíme-li všechny deformace $\gamma_0, \gamma_z, \gamma$, ve vztahu (4.8.) rovny nule a ponecháme-li jen účinek zatížení q , jde vlastně o dokonale vetknutý nosník.

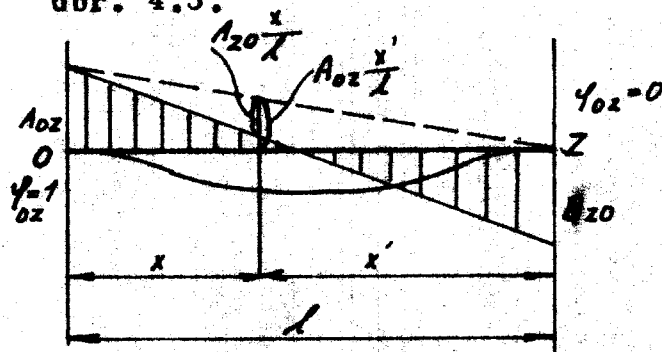
$$\text{Pak platí: } M_{OZ} = \mathcal{M}_{OZ} \quad , \quad M_{ZO} = \mathcal{M}_{ZO}$$

Tím máme vysvětlen význam čísel $\mathcal{M}_{OZ}, \mathcal{M}_{ZO}$

Jsou to momenty v místech vetknutých dokonale vetknutého nosníku OZ, zatíženého stejně jako prut OZ. Budeme jim říkat primární momenty. Jsou opět kladné, působí-li v kladném smyslu.

Tuhosti A, B, C můžeme vypočítat z Mohrovy věty, podle níž je úhel sklonu točny ohybové čáry nad podporou roven reakci prostého nosníku, zatíženého příslušným momentovým obrazcem. (Z obr. 4.5. vyplývá).

obr. 4.5.



$$\left. \begin{aligned} y_{oz} &= \frac{1}{E J_0 l} \int_0^l \frac{J_0}{J(x)} \left[A_{oz} \frac{x'}{l} - B_{zo} \frac{x}{l} \right] x' dx - 1 \\ y_{zo} &= \frac{1}{E J_0 l} \int_0^l \frac{J_0}{J(x)} \left[A_{oz} \frac{x'}{l} - B_{zo} \frac{x}{l} \right] x dx = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9.)$$

Z těchto dvou rovnic vycházejí pro prut stálého průřezu ($I_x = I_0$) známé vzorce.

$$A_{OZ} = 4 \frac{EI_0}{l}; \quad B_{ZO} = 2 \frac{EI_0}{l}; \quad C_{OZ} = C_{ZO} = 6 \frac{EI_0}{l};$$

Tyto všechny hodnoty je možno vyhledat v příslušných tabulkách.

Absolutní hodnoty podporových momentů M_{OZ} ; M_{ZO} dokonale vetknutého nosníku OZ při daném zatížení $q(x)$ vyšetříme opět z Mohrovy věty:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{0z} &= \frac{1}{E J_0 l} \int_0^l \frac{J_0}{J(x)} \left[M_{(x)}^{(0)} - M_{0z} \frac{x'}{l} - M_{z0} \frac{x}{l} \right] x' dx = 0 \\ \varphi_{z0} &= \frac{1}{E J_0 l} \int_0^l \frac{J_0}{J(x)} \left[M_{(x)}^{(0)} - M_{0z} \frac{x'}{l} - M_{z0} \frac{x}{l} \right] x dx = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Hodnoty M_{0z} jsou uvedeny opět v tabulkách.

Sestavení styčnickové rovnice.

Styčnicková rovnice je podmínka momentové rovnováhy ve styčniku rámové konstrukce, vyjádřená v deformaci stýkajících se prutů.

Sbíhá-li se ve styčniku K, n prutů, jejichž druhé konce očíslováme 1 až n, pak každý prut k_j přejímá část zatížení a jeho deformace jsou $\varphi_k, \varphi_i, \varphi_{ki}$. Primární momenty se označí M_{ki}, M_{ik} .

Výsledný moment, jímž působí prut k_i na styčnick je dle vztahu 4.8, roven:

$$M_{ki} = M_{ki} - (A_{ki} \varphi_k + B_{ki} \varphi_i - C_{ki} \varphi_{ki}) \quad (4.11)$$

Součet všech momentů, jež působí na styčnick K musí být roven 0, neboť tento styčnick musí být v rovnováze.

$$\sum_{i=1}^n M_{ki} = 0$$

Převědeme-li známý zatěžovací člen na pravou stranu a vytkneme-li φ_k společný všem prutům, dostáváme rovnici:

$$\varphi_k \sum_{i=1}^n A_{ki} + \sum_{i=1}^n B_{ki} \varphi_i - \sum_{i=1}^n C_{ki} \varphi_{ki} = \sum_{i=1}^n M_{ki} \quad (4.12)$$

kde $\sum_{i=1}^n A_{ki}$ se nazývá styčnicková tuhost.

U rámu s neposuvnými styčnick, což budeme uvažovat i v našem případě, jsou všechny $\varphi_{ki} = 0$ a soustava těchto styčnickových rovnic stačí pro výpočet všech potřebných natočení φ , neboť v každém styčnick můžeme napsat právě jednu styčnickovou rovnici.

Po úpravě pro pruty stálého průřezu (bez náběhů) lze psát po dosazení za konstanty A, B, C.

$$\varphi_k \sum_{i=1}^n \frac{4EJ_{ki}}{L_{ki}} + \sum_{i=1}^n 2 \frac{EJ_{ki}}{L_{ki}} \varphi_i - \sum_{i=1}^n 6 \frac{EJ_{ki}}{L_{ki}} \varphi_{ki} = \sum_{i=1}^n M_{ki} \quad (4.13)$$

Místo úhů φ , a γ budeme počítat s jejich $2E$ násobky a zavedeme nové pojmy:

$$\text{míru tuhosti} \dots K_{ki} = \frac{I_{ki}}{l_{ki}}$$

$$\text{míru styčnickové tuhosti} \dots P_K = 2 \sum_{i=1}^n K_{ki}$$

Pak lze rovnici (4.13) přepsat do jednoduššího konečného tvaru.

$$P_K \varphi_k + \sum_{i=1}^n K_{ki} \varphi_i - 3 \sum_{i=1}^n K_{ki} \varphi_{ki} = \sum_{i=1}^n M_{ki} \quad (4.14)$$

Obecné vzorce (5.8) pak vyjdou také v jednodušším tvaru:

$$\left. \begin{aligned} M_{0z} &= M_{0z} - K_{0z} (2\varphi_0 + \varphi_2 - 3\varphi_{0z}) \\ M_{z0} &= M_{z0} - K_{0z} (2\varphi_2 + \varphi_0 - 3\varphi_{0z}) \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Sestavení patrové rovnice

Patrová rovnice je podmínka vodorovné rovnováhy části rámové konstrukce, ležící nad vodorovným řezem, vedeným těsně pod styčnický některého patra.

Jelikož neuvažujeme působení žádných bočních sil na přepravky ve stohu, nebudeme tuto rovnici potřebovat. K sestavení této patrové rovnice je totiž nutno znát působící boční síly na rámovou konstrukci. U stavebních konstrukcí se tyto síly určují zpravidla jako účinky působícího větru, nebo jako účinky nerovnoměrného zatížení rámové konstrukce. V našem případě by bylo možné určit boční síly pouze jako síly od rozjezdu či brzdění při převozu přepravek ve stohu.

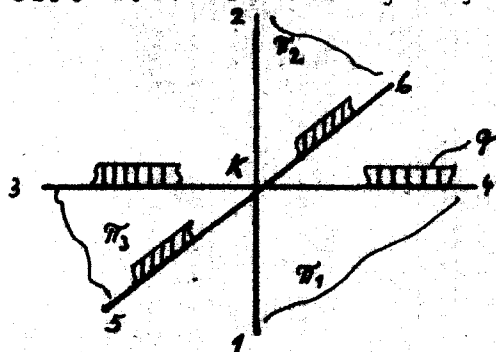
4.3. Prostorové rámy

V podstatě jde o několik rovinných rámu v rovnoběžných či svislých rovinách, jejíž styčníky jsou spojeny kolmými pruty či vodorovnými průvlaky.

V praxi se tyto rámy zpravidla řeší jako rovinné, přičemž se jednotlivým rovinným nosným a vedlejším ráům přisuzuje určitá část zatížení. Protože sloupy a příčné pruty vykazují deformace v obou soustavách, vychází v nich obecně prostorový ohyb s tlakem (excentrický tlak s působištem mimo hlavní osu průřezu). Tímto výpočtem se tedy zhruba vystihne prostorovost rámu.

V pravouhlém prostorovém rámu se ve styčníku K stýká nejvýše 6 prutů. Vliv zatížení v jednotlivých rovinách lze řešit zvlášť a nakonec sečíst účinky těchto zatížení.

obr. 4.6. Prostorový styčník K



Cyklické soustavy

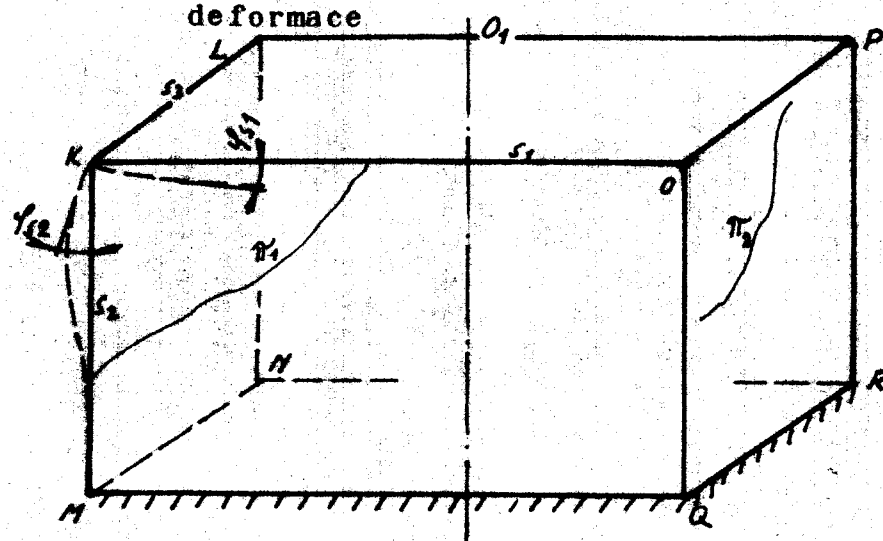
Cyklická soustava se vyznačuje tím, že pootočením této soustavy o určitý úhel kolem její zpravidla svislé osy přejde v tutéž soustavu. Je-li zatížení takovéto soustavy také cyklické, pak je i deformační stav cyklicky souměrný a tudíž je možno psát deformační rovnice jen pro styčníky jednoho sloupu celé soustavy. Tuto podmínku splňuje i naše přepravka, neboť pootočením o 180° kolem své svislé osy přejde v tutéž soustavu.

5. Výpočet přepravky jako rámové konstrukce.

5.1. Řešení přepravky při uvažování tuhého dna.

V první fázi výpočtu předpokládáme, že se jedná o rám s neposuvnými styčníky, jež jsou uloženy na dokonale tuhém podkladě. To znamená, že uvažujeme spodní styčníky přepravky jako vetknuté a tudíž v nich je natočený rovno 0.

obr. 5.1. Schema přepravky s naznačením průběhu deformace



1) Řešíme účinky zatížení v rovině π_1

Rám je symetrický ke své svislé ose a proto má jenom jednu neznámou složku natočení, neboť

Pak platí: $\varphi_{s1} = \varphi_{s2} = \varphi_K$; $\varphi_M = 0$

Tvar styčnickové rovnice pro styčník K:

$$P_K \varphi_K - K_{s1} \varphi_K - K_{s2} \varphi_K = M_{KO} + M_{KM} \quad (5.1)$$

Po dosazení do (5.1) má styčnicková rovnice tento tvar:

$$(2K_{s1} + 2K_{s2}) \varphi_K - K_{s1} \varphi_K - K_{s2} \varphi_K = \frac{M_{KO} + M_{KM}}{K_{s1} + K_{s2}}$$

$$\varphi_K = \frac{M_{KO} + M_{KM}}{K_{S1} + K_{S2}} \quad (5.2)$$

Koncové momenty prutů budou mít pro náš případ tento tvar:

$$M_{KO} = M_{KO} - K_{S1} \varphi_K \quad (5.3)$$

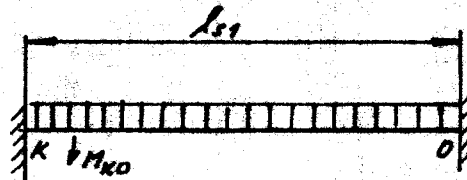
$$M_{KM} = M_{KM} - K_{S2} \varphi_K \quad (5.4)$$

Jako kontrola rovnováhy styčnicku K musí platit:

$$M_{KO} = M_{KM}$$

M_{KO}, M_{KM}, \dots moment, který by vyvolalo spojitě zatížení q , kdyby byly konce prutů dokonale vetknuté.

obr. 5.2. Vetknuté konce prutu.



$$M_{KO} = \frac{1}{12} q l_{s1}^2$$

Výpočet tuhostí prutů s_1, s_2

$$K_{si} = \frac{I_{si}}{l_{si}} \dots \dots \dots \text{tuhost } i\text{-tého prutu}$$

$$K_{s1} = \frac{I_{s1}}{l_{s1}}$$

$I_{s1} = I_x =$ moment setrvačnosti průřezu horního stohovacího rámu k ose x

$l_{s1} =$ délka přímé části horního stohovacího rámu v rovině

$$l_{s1} = 465 [\text{mm}]$$

Podle obr. 5.3 je možno psát:

$$J_x = \frac{1}{12} (ab^3 - a_1 b_1^3) = 18150 \text{ mm}^4$$

obr. 5.3. Průřez horního stohovacího rámu

$$a = 15 [\text{mm}]$$

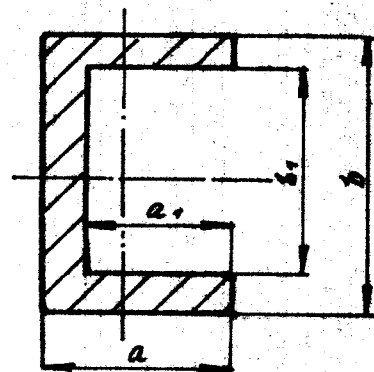
$$b = 30 [\text{mm}]$$

$$a_1 = 12 [\text{mm}]$$

$$b_1 = 25 [\text{mm}]$$

$$K_{s1} = \frac{18150}{165} = 39 [\text{mm}^3]$$

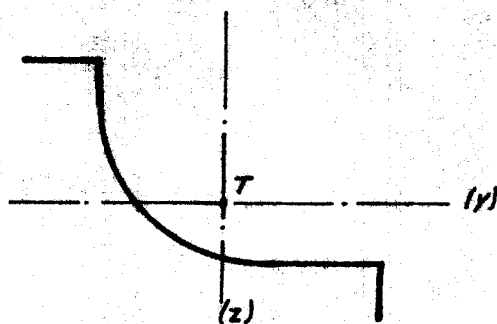
$$K_{s2} = \frac{I_{(z)}}{I_{s2}} = \frac{146641}{165} = 890 [\text{mm}^3]$$



l_{s2} výška nosné hrany = 165 [mm]

$I_{(z)}$ moment setrvačnosti průřezu nosné hrany k ose (z).

obr. 5.4. Schema průřezu nosné hrany



$$I_{(y)} = 87787 [\text{mm}^4]$$

$$I_{(z)} = 146641 [\text{mm}^4]$$

Velikosti momentů $I_{(y)}$ a $I_{(z)}$ jsme převzali z diplomové práce DP - ST 1211/76 autora Vladimíra Berného.

Výpočet velikosti spojitého zatížení q .

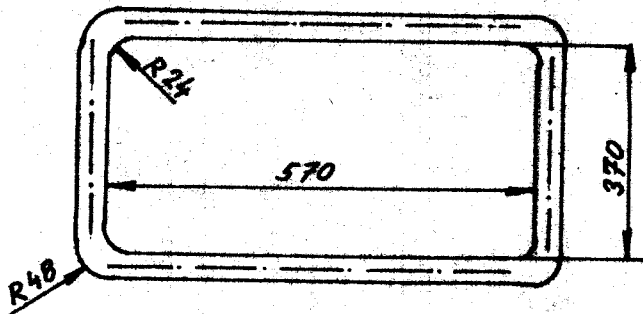
$$q = \frac{F}{0} [\text{N/mm}]$$

F celková zatěžující síla

0 obvod horního stohovacího rámu v jeho ose.

Při zkoušce stohovatelnosti musí přepravky snést dvojnásobek své stohovací nosnosti. To znamená, že zatěžující sílu volíme 6 000 N.

obr. 5.5. Horní stohovací rám



$$O = (570 - 48) + 2(370 - 48) + 2 \cdot 32 = 1788,5 \text{ [mm]}$$

$$q = \frac{6000}{1788,5} = 3,36 \text{ [N/mm]}$$

Po dosazení do rovnice (5,2)

$$\varphi_K = \frac{M_{K0} + M_{KN}}{K_{S1} + K_{S2}} = \frac{\frac{1}{12} q l_{S1}^2}{K_{S1} + K_{S2}} = 65,17$$

$$M_{K0} = \frac{1}{12} q l_{S1}^2 - K_{S1} \varphi_K = 57980 \text{ [Nmm]}$$

$$M_{KN} = 0 - K_{S2} \varphi_K = -57980 \text{ [Nmm]}$$

Jelikož je prut s_2 nezatížen spojitým zatížením q , je $M_{KN} = 0$

Kontrola styčnicků K: $M_{K0} + M_{KN} = 0$

Styčnick K je v rovnováze, tudíž výpočet by měl být správný.

2) Řešení účinků zatížení v rovině π_2

$$K_{S3} = \frac{J(x)}{l_{S3}} = \frac{18150}{290} = 62,586 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$K_{S2} = \frac{J(y)}{l_{S2}} = \frac{47785}{165} = 522,062 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$\varphi_K = \frac{\frac{1}{12} q l_{S3}^2}{K_{S3} + K_{S2}} = 39,8$$

$$M_{KL} = M_{KL} - k_{s3} Y_K = \frac{1}{12} q L_{s3}^2 - k_{s3} Y_K = 21060 \text{ [Nmm]}$$

$$M_{KN} = 0 - k_{s2} Y_K = -21060 \text{ [Nmm]}$$

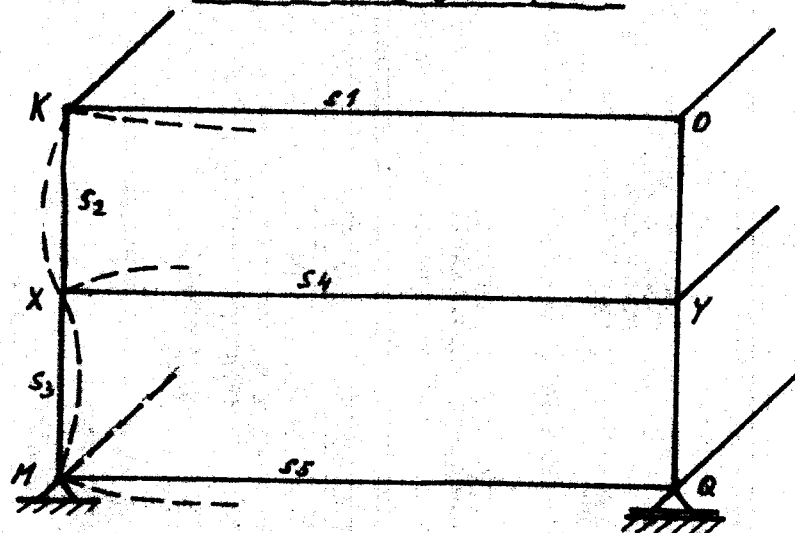
$M_{KL} + M_{KM} = 0 \Rightarrow$ i v této rovině π_2 je styčník K v rovnováze. Nyní by jako další postup následovalo vypočtení posouvajících a normalných sil. Zatím se však zabýváme pouze metodikou výpočtu a proto pro další postup není důležité znát přesné hodnoty posouvajících a normalných sil v prutech. Jejich vyjádření provedeme až v konečné fázi celého výpočtu.

5.2. Řešení přepravky při uvažování kloubového uložení

V předchozím případě jsme přepravku řešili při uvažování dokonale tuhého dna. Je však zřejmé, že ve skutečnosti dno není dokonale tuhé, čímž by nebyl první způsob výpočtu zcela odpovídající skutečnosti. Tuhé uložení dna by bylo možno předpokládat s určitou nepřesností pouze u spodní přepravky ve stohu, která vlastně svým spodním stohovacím rámem leží na zpravidla tuhém podkladě. Je-li zatížená přepravka umístěna na některém místě ve stohu, kromě spodní přepravky, je zřejmé její uložení už jiné. Uložení této přepravky se potom dá přirovnat ke kloubovému uložení. Vlivem deformace nosných hran se část této deformace přenáší i do spodního stohovacího rámu, čímž přispívá k jeho deformaci. (Viz. obr. 5.5). Tento kloubový způsob uložení by ve skutečnosti mohl postihovat případ chování přepravky ve stohu. Oproti prvnímu výpočtu se pokusíme nový výpočet upřesnit ještě tím, že budeme uvažovat, že přenosu zatížení a deformace se bude podílet i prut \overline{XY} , který v přepravce tvoří část boční výplně. Jeho tuhost oproti ostatním průřezům je sice zanedbatelná, ale přesto může mít tento prut vliv na celkové deformační chování nosné hrany přepravky.

Při uvažování příčného namáhání průřezu nosné hrany mohou tyto pruty částečně zachycovat účinky těchto příčných sil, čímž přispívají částečně ke zvětšení stability nosných hran.

obr. 5.6. Kloubové uložení přepravky s vyznačením deformace jejich prutů



Tuto přepravku budeme řešit jako v předešlém případě nejprve v rovině π_1 a potom v rovině π_2 .

Podle naznačené deformace je patrné, že tato konstrukce bude mít tři neznámé a to natočení styčnic K, X, M.

Proto je nutné sestavit tři styčnicové rovnice, pro každý styčnic jednu.

$$\text{Styčnic K: } \rho_K \gamma_K - \rho_X k_{s2} = M_{KO} \quad (5.5.)$$

$$\text{Styčnic X: } \rho_X \gamma_X + \rho_K k_{s2} + \rho_M k_{s3} + \rho_X k_{s4} = 0 \quad (5.6.)$$

$$\text{Styčnic M: } \rho_M \gamma_M + k_{s3} \rho_X + k_{s5} \rho_M = 0 \quad (5.7.)$$

Tyto styčnicové rovnice je možno přepsat do přehledné tabulky, čímž se značně usnadní výpočet.

Tabulku je možno sestavit takto:

- 1) Do hlavní diagonály se vepíše tuhosti styčnicků
- 2) Do okének, v nichž se protíná k-tý řádek s i-tým sloupcem vepíšeme: 0, když styčnick K není přímo spojen jedním prutem se styčnickem i.
k-tuhost prutu k_i , když takové spojení dvou styčnicků jedním prutem existuje.

Tab. 5.1. Tabulka styčnickových rovnic

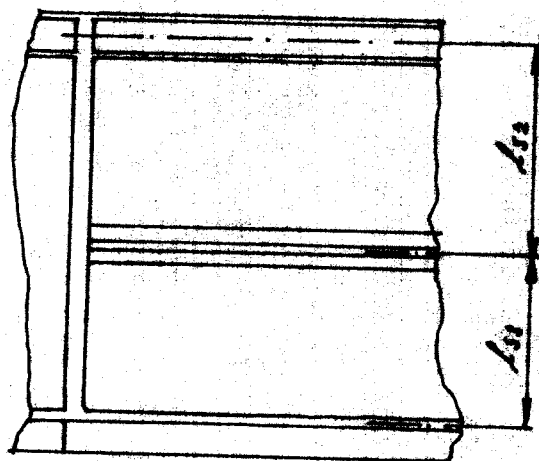
Y_K	Y_X	Y_M	ΣM
P_K	K_{S2}	0	M_{K0}
K_{S2}	P_X	K_{S3}	0
0	K_{S3}	P_M	0

Sestavení přímo ukazuje, že soustava rovnic je souměrná podle hlavní diagonály.

Výpočet tuhostí prutů S_2, S_3, S_4, S_5 .

$$k_{S2} = \frac{J(z)}{L_{S2}} = \frac{146641}{97} = 1511,763 \text{ [mm}^3\text{]}$$

obr. 5.7. Boční pohled na přepravku



$$L_{S2} = 97 \text{ [mm]}$$

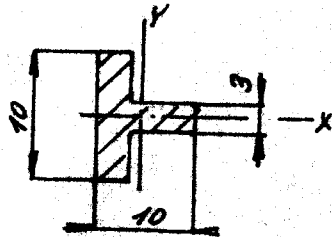
$$L_{S3} = 70 \text{ [mm]}$$

$$K_{s3} = \frac{J(z)}{L_{s3}} = \frac{146641}{70} = 2094,871 \text{ [mm}^3\text{]}$$

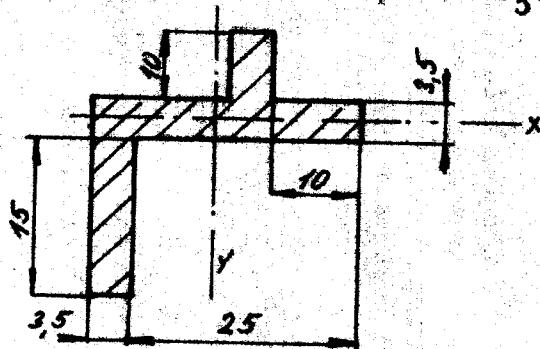
$$K_{s4} = \frac{J_{x4}}{L_{s4}} = \frac{265,75}{465} = 0,572 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$J_{x4} = \frac{bh^3 + b'h'^3}{12} = \frac{3 \cdot 10^3 + 7 \cdot 27}{12} = 265,75 \text{ [mm}^4\text{]}$$

obr. 5.8. Průřez prutu s_4 .



obr. 5.9. Průřez prutu s_5 .



$$J_{x5} = 7464,21 \text{ [mm}^4\text{]}$$

Výpočet styčnickových tuhostí.

$$\rho_K = 2K_{s1} + 2K_{s2} = 3101,526 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$\rho_x = 2K_{s2} + 2K_{s3} + 2K_{s4} = 7214,412 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$\rho_M = 2K_{s3} + 2K_{s5} = 4221,846 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Dosazení do tabulky 5.1.

ρ_K	ρ_x	ρ_M	ΣM
3101,526	1511,76	0	60543
1511,763	7214,412	2094,871	0
0	2094,871	4221,846	0

Nyní z tabulky vyloučíme φ_M přičtením $\frac{2094,871}{4221,846}$ násobku třetí rovnice.

Nová tabulka bude mít tento tvar:

φ_K	φ_X	ΣM
3101,526	2551,234	60543
2551,234	8253,883	0

Nyní z první rovnice vyloučíme φ_X přičtením $\frac{2551,234}{8253,883}$ násobku druhé rovnice.

Tím dostaneme tabulku, z které je už možno vypočítat první neznámou φ_K .

φ_K	ΣM
3101,526	60543

$$\varphi_K = \frac{\Sigma M}{P_K}$$

$$\varphi_K = \frac{60543}{3101,835} = 19,518$$

$$\varphi_X = \frac{0}{8253,883} - \frac{2551,234}{8253,883} \cdot \varphi_K = -6,033$$

$$\varphi_M = \frac{0}{4221,846} + \frac{0}{4221,846} \varphi_K - \frac{2094,871}{4221,846} \cdot \varphi_X = 2,993$$

Nyní budeme tento postup opakovat pro rovinu π_2 .
Nejprve je nutné, přepočítat pro tuto rovinu tuhosti
prutů a styčnickové tuhosti.

$$k_{s1} = \frac{J(x_1)}{l_{s1}} = \frac{18150}{290} = 62,586 [\text{mm}^3]$$

$$k_{s2} = \frac{J(y)}{l_{s2}} = \frac{87787}{97} = 906 [\text{mm}^3]$$

$$k_{s3} = \frac{J(y)}{l_{s3}} = \frac{87787}{70} = 1255 [\text{mm}^3]$$

$$k_{s4} = \frac{Jx_4}{l_{s4}} = \frac{265,75}{290} = 0,916 [\text{mm}^3]$$

$$k_{s5} = \frac{Jx_5}{l_{s5}} = \frac{7464,21}{290} = 25,78 [\text{mm}^3]$$

$$p_x = 2k_{s1} + 2k_{s2} = 1937,172 [\text{mm}^3]$$

$$p_x = 2k_{s2} + 2k_{s3} + 2k_{s4} = 1964,832 [\text{mm}^3]$$

$$p_H = 2k_{s2} + 2k_{s5} = 202,56 [\text{mm}^3]$$

Tyto nové hodnoty opět dosadíme do tabulky styčnicko-
vých rovnic a opakujeme celý postup. Jako výsledek
nám vyjdou styčnicková natočení v rovině π_1 .

Výpočet primárního momentu v π_2 .

$$M_{K1} = \frac{1}{12} q l_{s1}^2 = 23590 [\text{Nmm}]$$

$$q = 3,36 [\text{N/mm}]$$

$$l_{s1}^{\pi_2} = 290 [\text{mm}]$$

y_k	y_x	y_M	ΣM
1937,172	906	0	23590
906	1964,832	125,5	0
0	125,5	202,56	

Vyloučíme y_M přičtením $\frac{125,5}{202,56}$ násobku 3. rovnice.

y_k	y_x	ΣM
1937,172	983,755	23590
983,755	2042,583	0

y_k	ΣM
2410,911	23590

$$y_k = \frac{\Sigma M}{P_k} = \frac{23590}{2410,911} = 9,775$$

$$y_x = -\frac{983,755}{2042,583} \cdot y_k = -4,94$$

$$y_M = -\frac{125,5}{202,56} \cdot y_x = 3,06$$

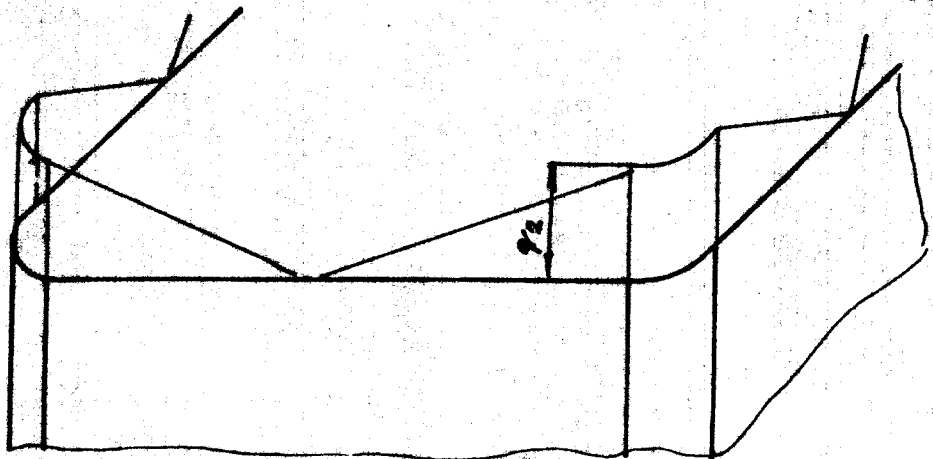
Podle praktických zkoušek s danými přepravkami se ukázalo, že vlivem zatížení horního rámu se tento rám deformuje a to tak, že je horní profil nakrucován a současně ohýbán.

K tomuto vybočení dochází vlivem toho, že osa zatížení horního stohovacího okraje není totožná s osou symetrie tohoto okraje. Tím vlastně zatížení vyvolává na této hraně klopný moment. Jako důsledek těchto deformací je nedokonalý styk přepravek ve stohu. Dochází totiž ke zvětšování stohovací vůle, jež napomáhá k zalísování přepravek do sebe. V tomto případě potom není spojitě zatížení rozloženo rovnoměrně po celém obvodě přepravky, ale jeho hlavní část působí v nosných hranách a v jejich těsném okolí.

Je zřejmé, že deformované části horního rámu se potom na přenosu zatížení nepodílejí, nebo jenom částečně. Za těchto předpokladů by se zdálo být vhodné dělat přepravky odlehčené, jako tomu už je u některých typů vyráběných v n.p. Plastimat.

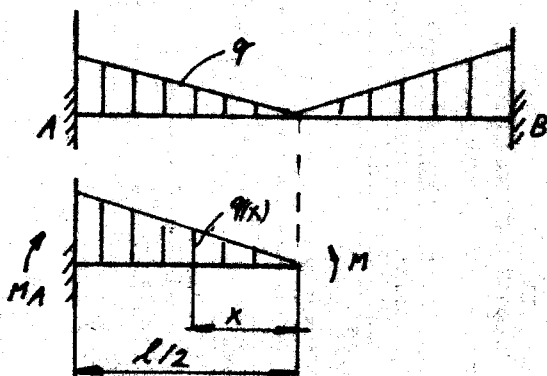
Tuto skutečnost se pokusíme do našeho výpočtu zahrnout tím, že spojitě zatížení nebudeme uvažovat jako rovnoměrně rozložené po celém obvodě, ale jako zatížení proměnné na délce horního rámu. Přičemž v místech nosných hran budeme uvažovat maximum zatížení a v místech polovičních délek horního rámu budeme uvažovat nulové spojitě zatížení. (viz. obr. 5.10.)

obr. 5.10. Schema zatížení horního stohovacího rámu



Takto uvažované zatížení se projeví v našem výpočtu pouze ve velikosti primárního ohybového momentu
Tento moment lze vypočítat pomocí Mohrovy metody.

obr.5.11. Výpočtové schéma



$$M(x) = M - \frac{1}{2} q(x) x \frac{x}{3} = M - q \frac{x^3}{3l}$$

$$q(x) = q \frac{2x}{l}$$

$$w'''' = \frac{1}{EJ} \left[\frac{2qx^3}{3l} - M \right]$$

$$q(0) = 0$$

$$w''' = \frac{1}{EJ} \left[\frac{2qx^4}{12l} - Mx + C_1 \right]$$

$$q\left(\frac{l}{2}\right) = 0$$

$$w'' = \frac{1}{EJ} \left[\frac{2qx^5}{60l} - M \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2 \right]$$

$$w''\left(\frac{l}{2}\right) = 0$$

$$C_1 = 0 \quad 0 = \left[\frac{q}{12l} \cdot \frac{l^4}{16} - M \frac{l}{2} \right]$$

$$M = \frac{ql^2}{96}$$

$$M_{AB} = M - \frac{q}{3l} \cdot \frac{l^3}{8} = \frac{ql^2}{96} - \frac{ql^2}{24} = \frac{ql^2}{32}$$

Za hodnotu q je třeba dosadit nově vypočítané q_2 .

$$q_1 l = q_2 \frac{l}{2} \quad q_1 = \frac{q_2}{2}$$

Primární moment potom bude mít tvar

$$M_{AB} = \frac{1}{32} q_2 l^2 = \frac{1}{16} q_1 l^2$$

Nyní budeme opakovat celý výpočet znovu s uvažováním nového primárního momentu. Výpočet zapíšeme opět do tabulek.

ROVINA π_1

φ_k	φ_x	φ_M	ΣM
3101,526	1511,763	0	45010
1511,763	7214,412	2094,871	0
0	2094,871	4221,846	0

$$\varphi_k = 14,5$$

$$\varphi_x = -4,5$$

$$\varphi_M = 2,23$$

ROVINA π_2

φ_k	φ_x	φ_M	ΣM
1937,172	906	0	17690
906	1964,832	125,5	0
0	125,5	202,56	0

$$\varphi_k = 7,3$$

$$\varphi_x = 3,54$$

$$\varphi_M = 2,2$$

Způsob určení posouvajících a normálních sil.

Posouvající síla T_{OZ} je kladná, jestliže se snaží otočit prutem okolo jeho druhého konce Z v kladném smyslu. To platí pro libovolně orientovaný prut OZ. Pak lze použít výpočtu vzorce:

$$T_{OZ} = t_{OZ} + \frac{1}{l} (M_{OZ} + M_{ZO}) \quad (5.8.)$$

Kde t_{OZ} je posouvající síla prutu OZ jako prostého nosníku. (u nezatiženého prutu je rovno 0).

l délka uvažovaného prutu

M_{OZ} .. výsledné koncové momenty vypočtené z deformační metody se znaménky tak, jak vyšly ze vzorců.

Velikost normálních sil dostaneme již snadno z rovnováhy sil svislých a rovnováhy sil vodorovných ve styčnicích. Tahy při tom označovat +, tlaky -. Smysl osových sil, je již předešlým výpočtem přesně stanoven, takže nyní již můžeme deformační znaménkovou konvenci opustit (pomohla nám právě jen k určení smyslu) a počítáme teď zcela tak, jako při výpočtu osových sil v příhradových soustavách metodou styčnickovou. Přitom stále kreslíme styčnice s rozloženými pruty a řídíme se smyslem šipek, jak působil na prut dle konvence dolů - nahoru, vlevo - napravo. Až ve výsledném obrazci přisoudíme tahům kladné a tlakům záporné znaménko.

6. Numerické řešení

Při řešení složitých rámových konstrukcí deformační metodou je nutno vypočítat neznámé úhly φ a ψ ze soustavy styčnickových a patrových rovnic. Tato etapa výpočtu je u rozsáhlých soustav časově velmi náročná a k praktickému zvládnutí je nutné ji vhodně organizovat i mechanizovat.

Levá strana rovnic tvaru (4.14.) nezávisí zřejmě na zatížení. Počítáme-li týž rám pro více zatížení, stačí počítat znovu jen zatěžovací členy. Tak dospějeme k soustavě rovnic s několika zatěžovacími sloupci.

Obecný tvar takové soustavy, v níž označíme neznámé x_1, \dots, x_n , součinitele a_{11}, \dots, a_{nn} a zatěžovací členy z_1, \dots, z_n , s horním indexem (1), (2) pro první, druhé, atd. zatížení.

Stručný zápis :

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} x_i = F_k^{(m)} \quad k=1,2,\dots,m \quad (6.1.)$$

$m=1,2,\dots$

Podrobně:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= z_1^{(1)}, z_1^{(2)}, \dots \\ a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{n2}x_n &= z_2^{(1)}, z_2^{(2)}, \dots \\ \dots & \\ a_{1n}x_1 + a_{2n}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= z_n^{(1)}, z_n^{(2)}, \dots \end{aligned} \quad (6.2.)$$

V praxi se užívá tabulkový zápis, přičemž dole jsou připojeny řádky na vepsání výsledků.

Symbolický zápis, počítáme-li s touž konstrukcí při mnoha zatěžovacích sloupcích má tvar:

	(1)	(2)	(3)	... m
$d =$	z_1	z_2	z_3	
	z_2	z_2	z_2	
	\vdots	\vdots	\vdots	
	z_n	z_n	z_n	

Symbol d , je označena stále stejná levá strana tabulky. Součinitelé $a_{11} \dots a_{nn}$, tvoří hlavní diagonály soustavě rovnic.

Jestliže platí vztah $a_{ik} = a_{ki} \dots$ pak jsou nediagonální součinitelé uspořádány souměrně vzhledem k hlavní diagonále. Soustavu rovnic nazýváme pak souměrnou.

Řešení soustav lineárních rovnic lze provést různými způsoby, jichž výhodnost je dána počtem a povahou rovnic a druhem počítačového stroje, který máme k dispozici.

1) Řešení determinanty

$$x_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$$

kde Δ je determinant soustavy a Δ_i z něj vznikne cyklickou záměnou sloupce i , za zatěžovací sloupec. Tento způsob se osvědčil prakticky jen pro dvě až tři neznámé. Význam tohoto zápisu řešení je ovšem značný pro teoretické úvahy, řešení stability atd.

2) Eliminace

Tento způsob řešení je nejpraktičtější a lze jím provést výpočet v přehledných formulářích s příslušnými součtovými kontrolami. Podstatou eliminace je postupné snižování počtu neznámých v soustavě (6.2.) vylučováním neznámých. Chceme-li např. vyloučit neznámou x_1 , pak stačí znásobit první rovnici číslem $-a_{12}/a_{11}$, dále číslem $-a_{13}/a_{11}$ atd. až a_{1n}/a_{11} a vzniklé rovnice postupně přičíst ke druhé, třetí, atd. až n -té rovnici.

Protože se při součtu zruší členy s x_1 ,

$$a_{12} + \frac{-a_{12}}{a_{11}} a_{11} = 0, \dots, a_{1n} + \frac{-a_{1n}}{a_{11}} a_{11} = 0,$$

zbude soustava $(n-1)$ rovnic o $(n-1)$ neznámých x_1, \dots, x_n .

Z této soustavy lze zcela obdobně vyloučit x_2 a dostaneme soustavu $(n-2)$ rovnic o $(n-2)$ neznámých x_3 až x_n .

Tak dospějeme postupně až k první rovnici pro x_n , z níž vypočteme hodnotu x_n . Do předchozí soustavy pro x_{n-1} , x_n

dosadíme právě vypočtené x_n a stanovíme hodnotu x_{n-1} .

Obě hodnoty x_n , x_{n-1} dosadíme do předešlé soustavy pro

x_{n-2} , x_{n-1} , x_n a určíme x_{n-2} , atd. až nakonec ze zná-

mých x_2 , x_3, \dots, x_n a z první rovnice vypočteme x_1 , čímž

je řešení skončeno. U souměrných soustav, kde platí:

$a_{ik} = a_{ki}$, zjistíme při eliminaci, že souměrnost zůstává

při každém kroku zachována, takže početní úkony s nedia-

gonálními členy provádíme a zapisujeme vlastně vždycky

2x úplně stejně, což je zbytečné. Proto lze ve formu-

láři pro řešení takové soustavy vynechat úplně část

před hlavní diagonálou.

Touto metodou jsme vlastně řešili i naše případy.

Protože náš výpočet oproti konstrukcím užívaných

ve stavebnictví poměrně jednoduchý, bylo by zbytečné

tento výpočet provádět na počítači. V budoucnu by

jako další postup mohl připadat výpočet, který by

zahrnoval i boční stěny. Jednotlivé pruty těchto stěn

by bylo možno uvažovat jako nosné sloupy, čímž by se

celý výpočet nesporně zkomplikoval a potom by bylo

na místě užít tuto metodu iterace k výpočtu na počí-

tači.

7. Experimentální část

Experimentální část byla zaměřena na krátkodobé zkoušky přepravek. Cílem těchto zkoušek bylo modelovat zatížení a uložení přepravek, jaké jsme uvažovali při předešlém výpočtu. Při vlastní zkoušce jsme se pokusili změřit natočení styčníků a tyto deformace potom porovnat s deformacemi vypočtenými. Vzájemné porovnání naměřených a vypočtených deformací nám pak dovedl usuzovat na vhodnost volby této deformační metody pro výpočet přepravek, a stanovit i vliv výplně na deformační chování přepravky.

Tyto praktické zkoušky stlačitelnosti a stohovatelnosti jsme se rozhodli uskutečnit na nově zhotoveném zařízení, které je instalováno v dílnách VŠST Liberec.

7.1. Popis zkušebního zařízení

Zkušební zařízení bylo zkonstruováno v mechanických dílnách VŠST Liberec. Při jeho návrhu se vycházelo z požadavku možnosti provádění dlouhodobých zatěžovacích zkoušek a dlouhodobých zkoušek stohovatelnosti. Toto zařízení se skládá ze čtyř hlavních nosných sloupů, které jsou uchyceny v dolním kotevním rámu, který tvoří také spodní opěrnou desku celého stojanu. Horní konce nosných sloupů jsou sešroubovány s horním rámem. Tyto sloupy slouží jako vedení pro posuvný vozík. Účel tohoto vozíku tkví v tom, že je možno na něj umístit potřebné množství závaží, které potom vyvodí žádanou zatěžující sílu. Zkoušené přepravky jsou přitom opřeny o dna tohoto vozíku svým horním rámem a svým spodním stohovacím rámem leží na dolním kotevním rámu. Pohyb vozíku je nutný z hlediska deformací, které se při dlouhodobých zkouškách budou projevovat zmenšením výšky nastohovaných přepravek. Pohyb vozíků je umožněn čtyřmi otočnými válečky, umístěnými v jeho rozích, které zajišťují jeho přímé vedení.

Celé zkušební zařízení je umístěno v dosahu zdvihacího zařízení, takže manipulace s poměrně těžkým vozíkem se provádí pomocí tohoto zařízení. (mostový jeřáb)

Úprava zkušebního zařízení

Pro náš případ zkoušek, kdy uvažujeme pouze krátkodobé zkoušky s poměrně velkými zatíženími, bylo nutno zkušební zařízení vhodně upravit.

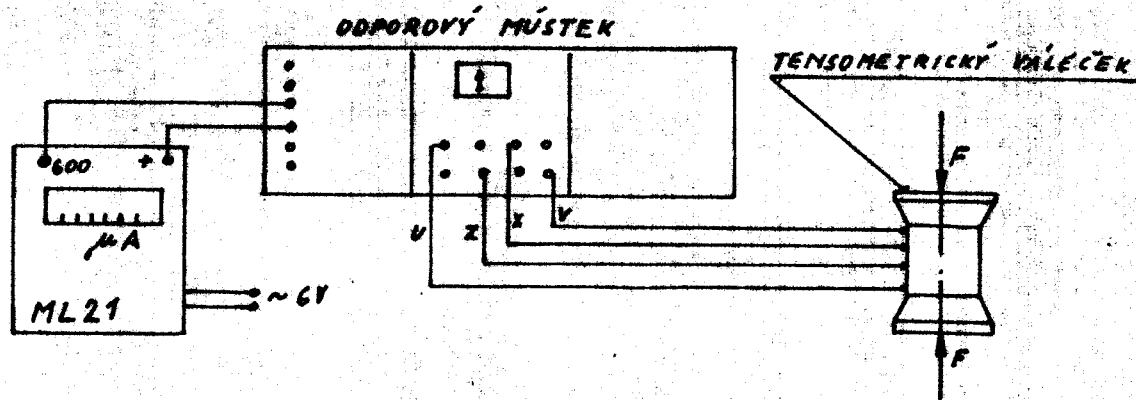
1) Pro vymezení potřebné síly jsme použili automobilový hydraulický zvedák s nosností 50 KN. Tento zvedák jsme umístili na spodní části stojanu, na spodní kotevní desku. Tím jsme znemožnili možnost opření přepravek o tuto desku stojanu, čímž bylo nutné zhotovit novou opěrnou desku, která se vložila mezi spodní rám přepravy a instalovaný hever.

2) Pohyblivý vozík jsme pevně ukotvili k vodícím sloupům pomocí výměnných čepů. Tyto výměnné čepy nám umožňují spolu se zhotovenými otvory v nosných sloupech přestavit vozík do žádaných poloh podle toho, zkusíme-li samotnou přepravku nebo přepravky ve stohu.

Měření zatěžující síly

Velikost zatěžující síly vyvinutou hydraulickým zvedákem jsme měřili pomocí tenzometrického válečku. Zapojení tohoto válečku je zřejmé z obr. 7.1.

obr. 7.1. Schema zapojení tenzometrického válečku.



Před vlastní zahájení zkoušek bylo třeba tensometrický snímač ocejchovat. Pro ocejchování jsme použili univerzální trhací stroj

Zatěžovali jsme od 0 po 5 000 N až do 45 000 N.

Z takto získaných hodnot jsme určili cejchovní křivku a z této křivky jsme nazpět vypočítali potřebný počet dílků odečítaných na $\mu\Delta$ pro žádané zatěžovací stupně.

Úprava přepravek pro zkoušku

Jak jsme již naznačili v kapitole 4. Při řešení zanedbáváme vliv výplně. Aby byly vypočtené a změřené výsledky vzájemně srovnatelné, je třeba tvar přepravky přizpůsobit uvažovanému tvaru ve výpočtu. To znamená, že pro první zkoušku, kterou budeme provádět s ohledem na výpočet dle 5.1. řešení přepravky při uvažování tuhého dna; upravíme přepravku takto: odstraníme výplně z bočních stěn, přičemž dno ponecháme původní. Dále je nutno upravit nosné hrany přepravky. Tato úprava bude společná pro všechny zkoušené přepravky. Z důvodů srovnatelnosti s výpočtem je nutné z nosných hran přepravek odstranit vyztužující svislé žebro, probíhající po celé délce nosné hrany. (viz.obr.7.2.)

obr. 7.2. Původní a upravený tvar nosné hrany

