



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Predikce únavové životnosti nýtových spojů

Fatigue life prediction of riveted joints

Diplomová práce

Bc. Pavel Štěpán

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpán** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **408660**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Predikce únavové životnosti nýtových spojů

Název diplomové práce anglicky:

Fatigue life prediction of riveted joints

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši výpočetních metod predikce pevnosti a únavové životnosti v oblasti nýtových spojů.
2. Proveďte rešerši experimentálních metod používaných při pevnostních a únavových zkouškách nýtových spojů.
3. Vyberte vhodnou metodu/metody modelování nýtových spojů pomocí MKP a navrhnete způsob jejich validace.
4. Navrhnete zkušební vzorek a způsob jeho zkoušení.
5. Proveďte a vyhodnoťte únavové zkoušky (dle bodu 4.) a získané výsledky použijte při validaci MKP modelů a metod predikce únavové životnosti.
6. Sepište diplomovou práci.

Seznam doporučené literatury:

odborné články, normativy a disertace, interní dokumentace VÚKV, manuály výpočetních SW

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

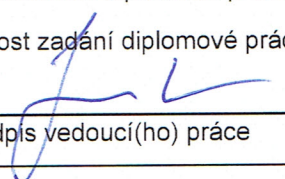
Ing. Josef Jurenka Ph.D., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

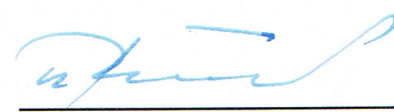
Datum zadání diplomové práce: **28.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **18.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

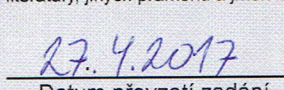

Podpis vedoucí(ho) práce

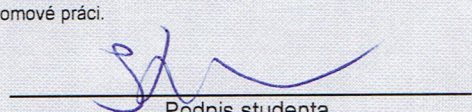

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

| | |
|-----------------------|---|
| Jméno autora: | Pavel Štěpán |
| Název DP: | Predikce únavové životnosti nýtových spojů |
| Anglický název: | Fatigue life prediction of riveted joints |
| Rok: | 2017 |
| Studijní obor: | Aplikovaná mechanika |
| Ústav/odbor: | Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / odbor pružnosti a pevnosti |
| Vedoucí: | Ing. Josef Jurenka, Ph.D. |
| Bibliografické údaje: | počet stran: 103 počet obrázků: 61 počet tabulek: 15 počet příloh: 3 |
| Klíčová slova: | nýt, nýtový spoj, HUCK MAGNA-LOK, tuhost nýtového spoje, pevnost nýtového spoje, životnost nýtového spoje, Eurokód 3, poruchy nýtového spoje, metoda konečných prvků, zjednodušený model nýtového spoje. |
| Keywords: | rivet, riveted joint, stiffness of riveted joint, strength of riveted joint, fatigue life of riveted joints, Eurocode 3, failures of riveted joint, Finite Element Method, simplified finite element riveted joint model. |

Abstrakt:

Cílem diplomové práce je nalezení metodiky výpočtu a hodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů v oblasti kolejových vozidel pomocí zjednodušených MKP modelů nýtových spojů. Návrh metodiky je podpořen experimentálním měřením, při kterém jsou stanoveny bezpečné únavové křivky a popsány únavové poruchy nýtových spojů HUCK MAGNA-LOK.

Abstract:

The aim of this diploma thesis is to find the methodology of calculation and evaluation of strength and fatigue life of riveted joints in the field of rolling stock using simplified FEM models of riveted joints. The found methodology is supported by experimental measurement, which provides safe fatigue curves and describes fatigue failures of riveted joints HUCK MAGNA-LOK.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Predikce únavové životnosti nýtových spojů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Josefa Jurenky, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze, dne 18. 8. 2017

Bc. Pavel Štěpán

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Jurenkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení a zaměstnancům firmy VÚKV a.s. za poskytnuté téma, zkušební vzorky a pomoc při zpracování.

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 8 |
| 2 | Nýtový spoj | 9 |
| 2.1 | Druhy nýtů [2][3] | 10 |
| 2.1.1 | Typické nýtové spojení [1]..... | 10 |
| 2.1.2 | Alternativní typy spojení | 11 |
| 3 | Atributy ovlivňující únavovou životnost nýtového spoje | 14 |
| 3.1 | Únavové vlastnosti hliníkových slitin | 14 |
| 3.2 | Tloušťka spojovaných součástí | 15 |
| 3.3 | Efekt počtu nýtových řad [9][10] | 15 |
| 3.4 | Efekt uspořádání nýtů [9]..... | 17 |
| 3.5 | Efekt poměru rozteč nýtu / průměr nýtu [9] | 19 |
| 3.6 | Efekt ohybové tuhosti nýtového spoje [9]..... | 19 |
| 4 | Zatížení nýtového spoje | 21 |
| 5 | Tuhost a poddajnost nýtového spoje | 24 |
| 5.1 | Výpočet poddajnosti nýtového spoje [12]..... | 25 |
| 5.1.1 | Axiální tuhost nýtového spoje:..... | 25 |
| 5.1.2 | Smyková tuhost – dvojtřížné spoje | 25 |
| 5.1.3 | Smyková tuhost – jednotřížné spoje | 26 |
| 5.2 | Experimentální stanovení poddajnosti nýtového spoje [12]..... | 27 |
| 6 | MKP modely nýtových spojů | 30 |
| 6.1 | Kompletní model nýtového spoje [12][15] | 30 |
| 6.2 | Náhrada nýtu nosníkovým 1D prvkem [12][16] [17] | 30 |
| 6.2.1 | RBE3 – CBUSH – RBE3..... | 34 |
| 7 | Hodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů | 36 |
| 7.1 | Postup dle Eurokódu 3 [19]..... | 36 |
| 7.1.1 | Výpočtová únosnost nýtů | 38 |
| 7.1.2 | Únavová životnost nýtů [19][20]..... | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8 | Validace postupu výpočtu únavové životnosti nýtového spoje podle Eurokódu 3..... | 45 |
| 8.1 | Experimentální stanovení únavové životnosti nýtového spoje | 45 |
| 8.1.1 | Zkušební vzorek | 46 |
| 8.1.2 | Zkušební stroj..... | 48 |
| 8.1.3 | Přípravek pro zatížení smykem..... | 49 |
| 8.1.4 | Přípravek pro zatížení tahem..... | 52 |
| 8.1.5 | Experimentální měření..... | 54 |
| 8.1.6 | Statistické vyhodnocení naměřených dat – sestrojení S-N křivek | 62 |
| 8.2 | Porovnání S-N křivek s křivkami danými Eurokódem 3 | 67 |
| 8.3 | Dílčí závěry..... | 71 |
| 8.3.1 | Parametry ovlivňující mez únavy..... | 71 |
| 8.3.2 | Experiment versus Eurokód 3 | 72 |
| 8.3.3 | Statická únosnost v tahu | 72 |
| 9 | Návrh metodiky modelování a vyhodnocování nýtových spojů v kolejových vozidlech | 74 |
| 9.1 | Postup stanovení vhodné tuhosti náhradního modelu nýtu | 74 |
| 9.2 | Výpočet pevnosti a únavové životnosti zkušební vzorku..... | 79 |
| 9.2.1 | Vyhodnocení pevnosti zkušební vzorku..... | 81 |
| 9.2.2 | Vyhodnocení únavové životnosti zkušební vzorku..... | 83 |
| 9.3 | Shrnutí metodiky modelování a pevnostního vyhodnocování nýtových spojů MAGNA-LOK..... | 88 |
| 10 | Závěr | 89 |
| 11 | Citovaná literatura..... | 92 |
| 12 | Přílohy..... | 94 |

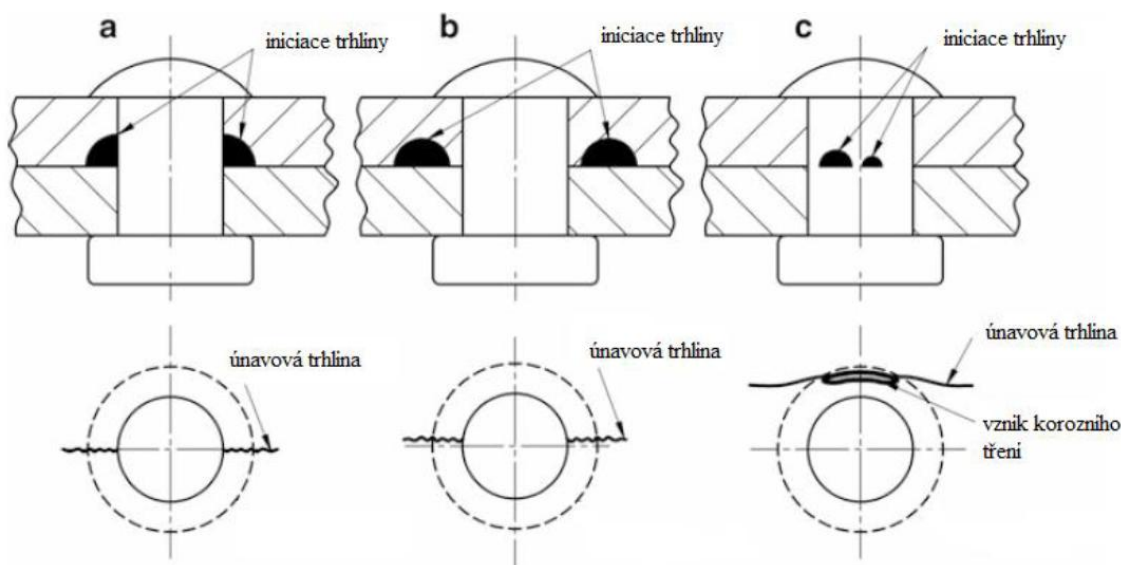
1 Úvod

Tato práce se zabývá nalezením vhodné metodiky návrhu, výpočtu a vyhodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů se zaměřením na aplikace v oblasti kolejových vozidel. V první části práce jsou uvedeny základní typy nýtového spojení, vlivy konstrukce nýtového spoje na únavovou životnost a metody modelování nýtových spojů v MKP. V druhé části jsou popsány experimenty a jejich vyhodnocení a použití získaných experimentálních výsledků při návrhu metodiky, založené na MKP modelování, pro hodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtového spoje. Práce je finančně podpořena z grantového projektu Centra kompetence drážních vozidel (CKDV).

2 Nýtový spoj

Nýtový spoj je jedním z nejdůležitějších spojů v letecké výrobě. Využívá se především z důvodu použití obtížně svařitelných slitin. V jiných odvětvích, například v konstrukci kolejových vozidlech, se využívá především v místech obtížně svařitelných z důvodu složitosti konstrukce, z důvodu dvou obtížně svařitelných materiálů, nebo pokud by sváření negativně ovlivnilo tepelným působením vlastnosti materiálu. Většina porušení nýtového spoje vzniká v důsledku únavového poškození. Pro správnou funkci takového spojení je nutné volit vhodný materiál spojovacích i spojovaných součástí, technologii výroby nýtového spoje i samotných nýtů a vhodnou konstrukci nýtového spoje, [1].

V závislosti na typu namáhání, typu nýtu, předpětí v nýtu a konstrukce nýtového spoje mohou vznikat trhliny způsobené cyklickým namáháním v různých místech spoje. Nejobvyklejší místa inicializace trhlin jsou uvedeny na obrázku 1, [1].



Obr. 1- Pozice inicializace trhlin při smykovém namáhání

- Trhlina vzniklá na vnitřní ploše spojovaného plechu nebo na okraji zahloubení a přímo na okraji otvoru. Tento případ se objevuje, pokud je v nýtu malé předpětí a většina zatížení se přenesla opřením.
- Trhlina vzniklá na vnitřní ploše spojovaného plechu, ale iniciovaná je mimo otvor. Dále se šíří otvorem. Nastává v případech vyšších předpětích nýtu.
- Trhlina vzniklá nad otvorem a šířící se mimo otvor. Nastává v případech, kdy je síla sevření velmi vysoká.

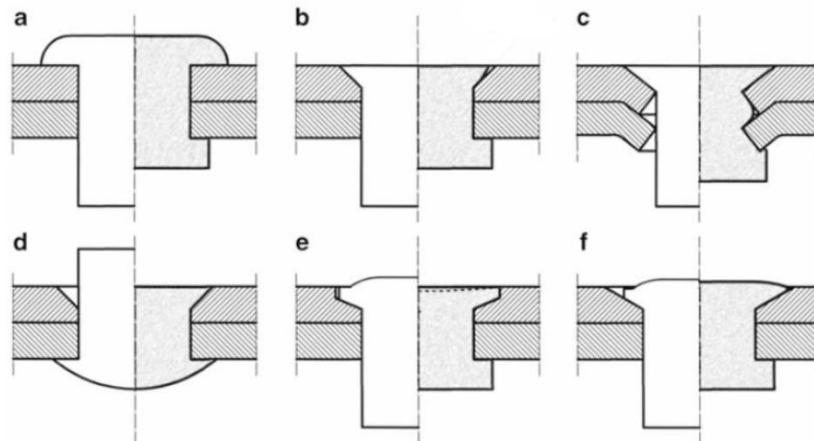
2.1 Druhy nýtů [2] [3]

Na životnost nýtového spoje má velký vliv spojovaný materiál, technologie výroby, konstrukční uspořádání a v neposlední řadě volba typu nýtu. Výběr typu nýtu ovlivňují především dvě hlediska:

- Ekonomické:
 - dostupnost,
 - cena nýtů,
 - finanční náročnost nýtovacího procesu.
- Technologické [3]:
 - statická únosnost – je dána rozměry nýtu a materiálem,
 - kompatibilita materiálů – materiál spojovaných a spojovacích součástí, povrchové úpravy a mazivo musí být voleny ve vhodné kombinaci tak, aby nedocházelo ke galvanické korozi, přílišnému otlačování apod.,
 - odolnost vůči korozi – korozivzdorné nýty bývají poměrně drahé a hrozí u nich vznik galvanické koroze se spojovaným materiálem. Korozivzdorné materiály také nemusí vykazovat dostatečně vhodné mechanické vlastnosti,
 - únavová životnost - únavovou životnost lze výrazně ovlivnit volbou správného typu spojení, kvalitní výrobou, správným konstrukčním řešením atd.,
 - magnetická propustnost – může mít velký vliv, pokud se spoj nachází v těsné blízkosti elektromagnetických zařízení,
 - instalace spojovacích součástí.

2.1.1 Typické nýtové spojení [1]

Levné nerozebíratelné spoje, které lze využít, pokud je možné provádět montážní práce na obou stranách spojovaných součástí. Nejpoužívanější typy nýtů z hliníkových slitin používaných v letectví jsou uvedeny na obrázku 2.



Obr. 2 - Typy nýtů: (a) nýt s vystupující hlavou, b) nýt se zápusťnou hlavou, c) nýt se zápusťnou hlavou a prosazenými plechy, d) NACA nýt, e) nýt Briles, f) Allfast nýt

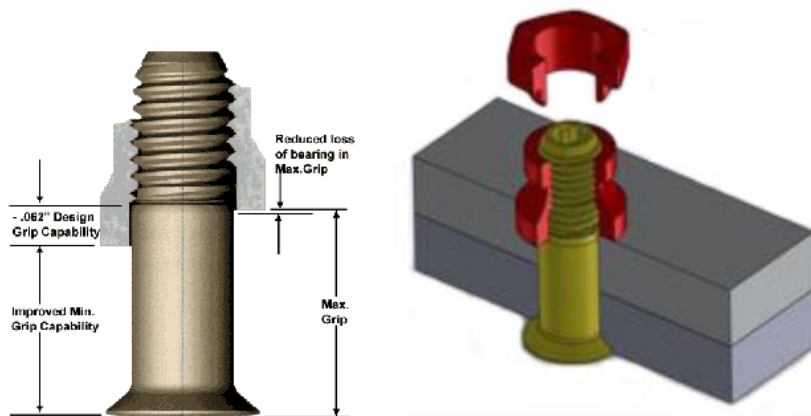
Nejklasičtějším nýtovým spojením je nýt s vystupující hlavou, který byl dlouhou dobu nejpoužívanějším. Dále se dělí na více variant podle toho, jaký je použit tvar hlavy. Nýtovací proces je nenáročný a nevyžaduje téměř žádnou přípravu spojovaných součástí. Nýt se zápusťnou hlavou se používá v aplikacích, kde je žádoucí hladký povrch spojovaných součástí. V tomto případě je již složitější příprava spojovaných materiálů a zároveň je nutné, aby plech, ve kterém je vytvořeno zahloubení, měl dostatečnou tloušťku (1,5x hloubka zapuštění). Pokud není tloušťka spojovaného plechu dostatečná, může zahloubení výrazným způsobem přispívat ke vzniku trhlin a snížení únavové životnosti. Při použití nýtu se zápusťnou hlavou se také může mezi hlavou a plechem vyskytovat mezera, ve které může docházet ke korozi. Nýt bude také přenášet zatížení menší částí. To opět přispívá ke snížení únavové životnosti. Vznik této mezery řeší použití nýtu NACA, kdy je přechována zápusťná hlava. Na stejném principu fungují i nýty Briles a Allfast.

2.1.2 Alternativní typy spojení

Alternativou k typickému nýtovému spojení jsou v dnešní době nýty založené na principu šroubového spoje. Vyznačují se větší únosností a únavovou životností a jsou odolnější vůči vibracím apod.

Hi-Lite, Hi-Lok [4]

Nýt, který využívá společně vlastnosti nýtu, šroubu a matice. Je tvořen ze dvou částí – svorníku a nákrůžku.

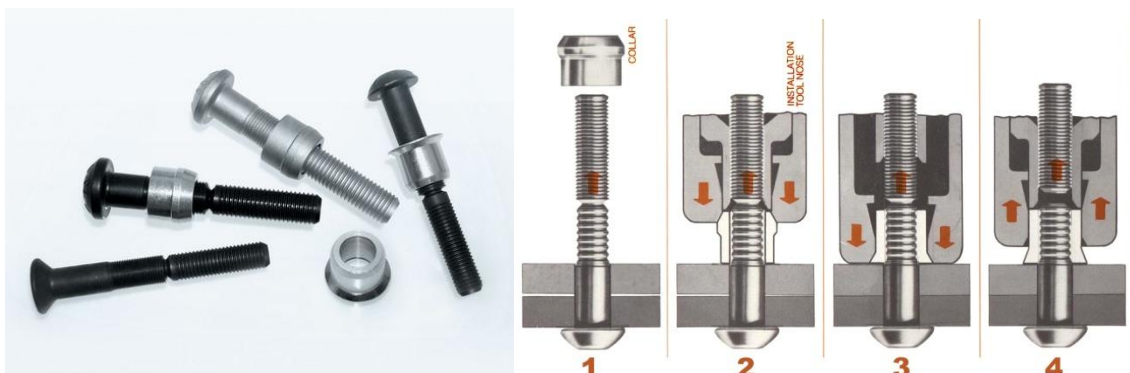


Obr. 3 - Nýt Hi-Lite

Používá se v případech, kdy je požadován nýt o velkém průměru nebo délce. Je výhodné ho použít v místech obtížně přístupných a ve spojích, které jsou namáhány převážně ve smyku. Vyrábí se z oceli, hliníku a titanových slitin. Dodává se s různými tvary hlavy – podle způsobu předpokládaného zatížení (smykové/tahové). Při montáži je na nýt šroubován nákrůžek, který vyvozuje předpětí v nýtu. Po dosažení kritického krouticího momentu se část nákrůžku ustříhne. Tento krouticí moment vyvozuje předpětí v nýtu. Volbou vhodného nákrůžku můžeme toto předpětí upravovat.

Lockbolt [5]

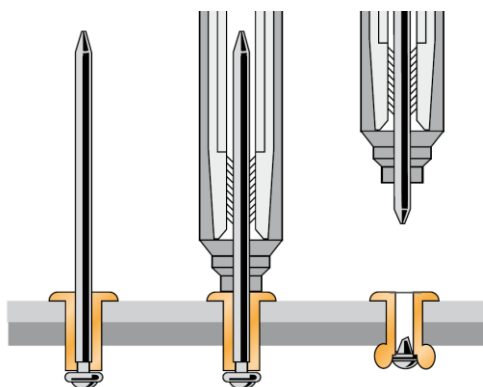
Typ spojení podobný jako Hi-Lok a Hi-lite, ale používá se pro malé průměry otvorů a v případech, kdy je namáhání kombinací tahu a tlaku. Vyrábí se z hliníkových slitin, ze slitin titanu a z korozi-vzdorných ocelí. Na rozdíl od nýtu Hi-Lite se při montáži neutrhne část nákrůžku, ale část dřívku.



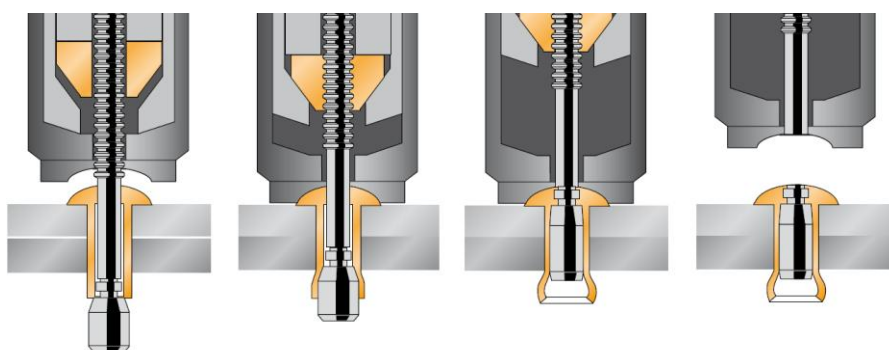
Obr. 4 - Vlevo - nýt Lockbolt, vpravo – montáž nýtu Lockbolt

Trhací nýty [6] [7]

Trhací nýty se používají například v případech, kdy je přístupná pouze jedna strana nýtového spojení. Obvykle nedosahují tak dobrých mechanických vlastností jako výše uvedené nýty. Vyrábí se z ocelí, hliníkových slitin a z nerezových ocelí. Trhací nýty se skládají z dutého nýtovacího pouzdra (dříku), které je namontováno na kovový trn. Pomocí speciálního nářadí se při montáži trn vytahuje z pouzdra, čímž deformuje pouzdro nýtu na zadní straně a vytváří tak závěrnou hlavu. Jakmile se nýtované komponenty spojí, trn nýtu se utrhne. Část trnu zůstává po montáži nýtu v závěrné hlavě, nesplňuje již žádnou funkci (obrázek 5). K dostání jsou i pevnostní trhací nýty, které mají vysokou pevnost v tahu i stříhu a jsou určeny pro spojení hliníkových součástí. Část trnu zůstane po zanátyování uvnitř těla nýtu a k jeho pevnosti (obrázek 6).



Obr. 5 - Aplikace trhacího nýtu [7]



Obr. 6 – Pevnostní trhací nýt MAGNA-LOK

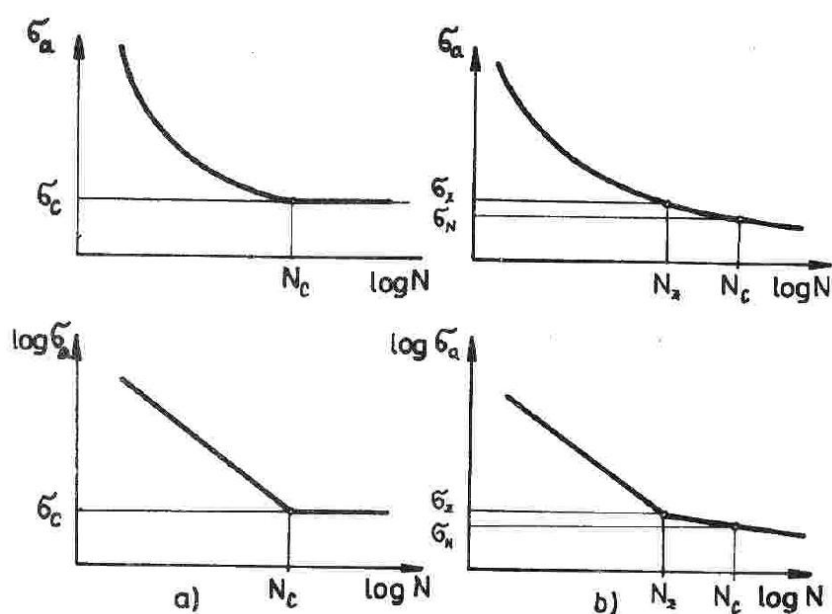
3 Atributy ovlivňující únavovou životnost nýtového spoje

Únavovou životnost ovlivňují především konstrukční uspořádání nýtových spojů a materiálové vlastnosti jednotlivých částí. Vliv vybraných parametrů nýtových spojů byl experimentálně zjišťován a některé poznatky jsou shrnuty v této kapitole.

3.1 Únavové vlastnosti hliníkových slitin

Pro většinu uhlíkových ocelí je typické, že se vyznačují tzv. mezí únavy σ_c . Při cyklickém namáhání s amplitudou napětí, která je nižší než mez únavy, vykazuje materiál z pohledu inženýrské praxe neomezenou životnost (případ a) na obrázku 7).

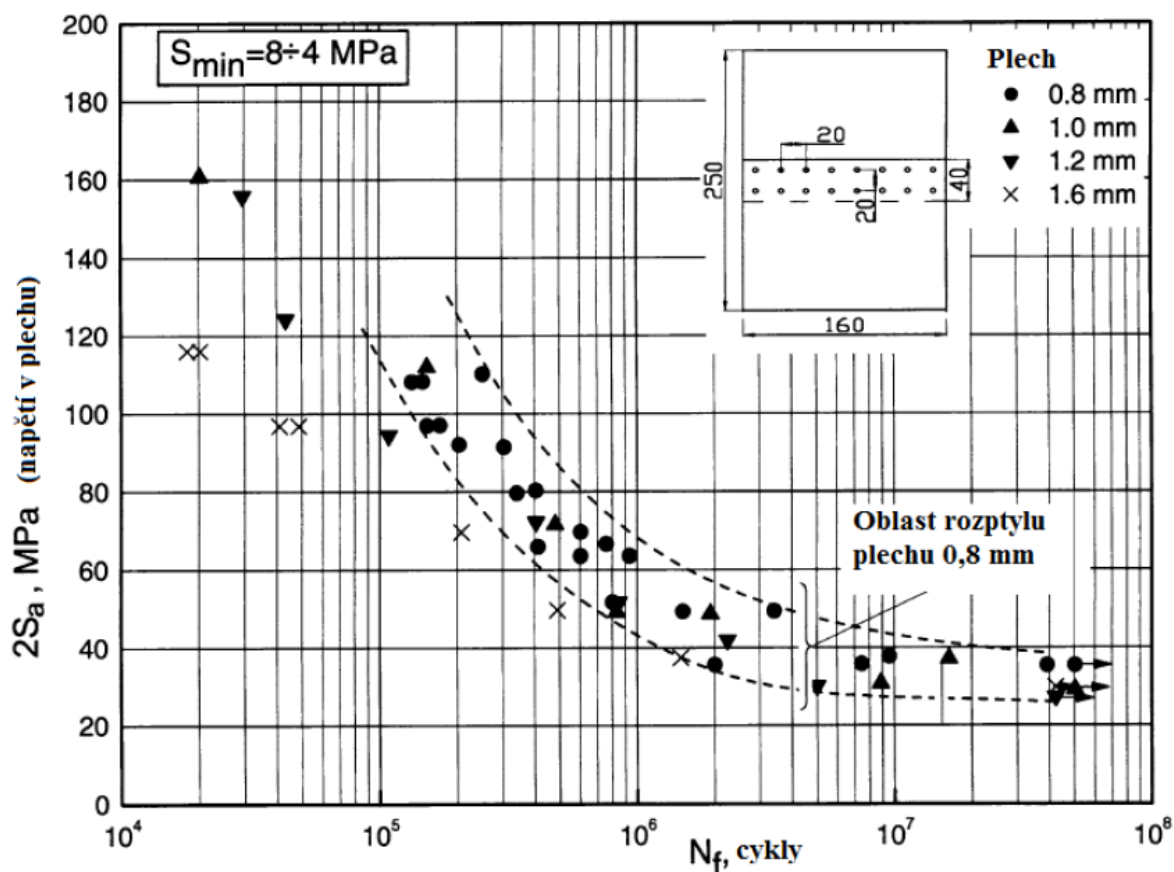
Případ b) na obrázku 7 ukazuje chování vysokopevnostních slitinových ocelí a slitin hliníku. Zde nelze určit jednoznačnou mez únavy a definuje se časová mez únavy σ_N . Definice počtu zatěžovacích cyklů odpovídající mezi únavy je závislá na materiálu a inženýrské aplikaci, a je ovlivněna jak časovou, tak i finanční náročností experimentálních prací. V řadě případů je navíc nutné respektovat požadavky norem apod. U hliníkových slitin se nejčastěji zjišťuje smluvní mez únavy pro $N_C = 5 \cdot 10^7$ cyklů, [8].



Obr. 7- Schematické S-N křivky

3.2 Tloušťka spojovaných součástí

V případě, kdy okolní konstrukce musí přenést větší zatížení, dochází ke zvětšení tloušťky spojovaných plechů. Podle [1] je z pohledu únavové životnosti výhodné zvýšit také poměr D_0/t (D_0 - průměr nýtu, t - tloušťka spojovaného plechu). Byly prováděny zkoušky se dvěma řadami nýtů o konstantním průměru, které spojovaly plechy s tloušťkou od 0,8 mm do 1,6 mm. Z obrázku 8 je patrné, že při malé změně tloušťky plechu nedochází k výrazné změně životnosti – změna se pohybuje stále v oblasti rozptylu plechu 0,8 mm. Ovšem plech tloušťky 1,6 mm má už znatelně nižší únavovou pevnost při vyšších hodnotách namáhání. Bylo zjištěno, že pro delší únavovou životnost je vhodný vyšší poměr D_0/t , při kterém dochází k redukci lokálních napětí [1].



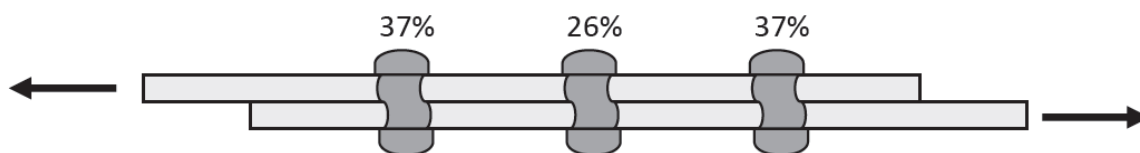
Obr. 8- Závislost tloušťky spojovaných plechů na únavovou životnost

3.3 Efekt počtu nýtových řad [9] [10]

V případech, kde je třeba přenést větší zatížení, je nutné zvětšit tloušťku spojovaných plechů a velikost nýtů. Pokud z konstrukčního hlediska není možné dostatečně dimenzovat tloušťku spojovaných plechů a/nebo velikost nýtů, je

možné použít ve spoji více nýtových řad. Pokud má každá řada stejný počet nýtů a stejnou rozteč, nejvíce jsou zatíženy nýty ve vnějších řadách spoje.

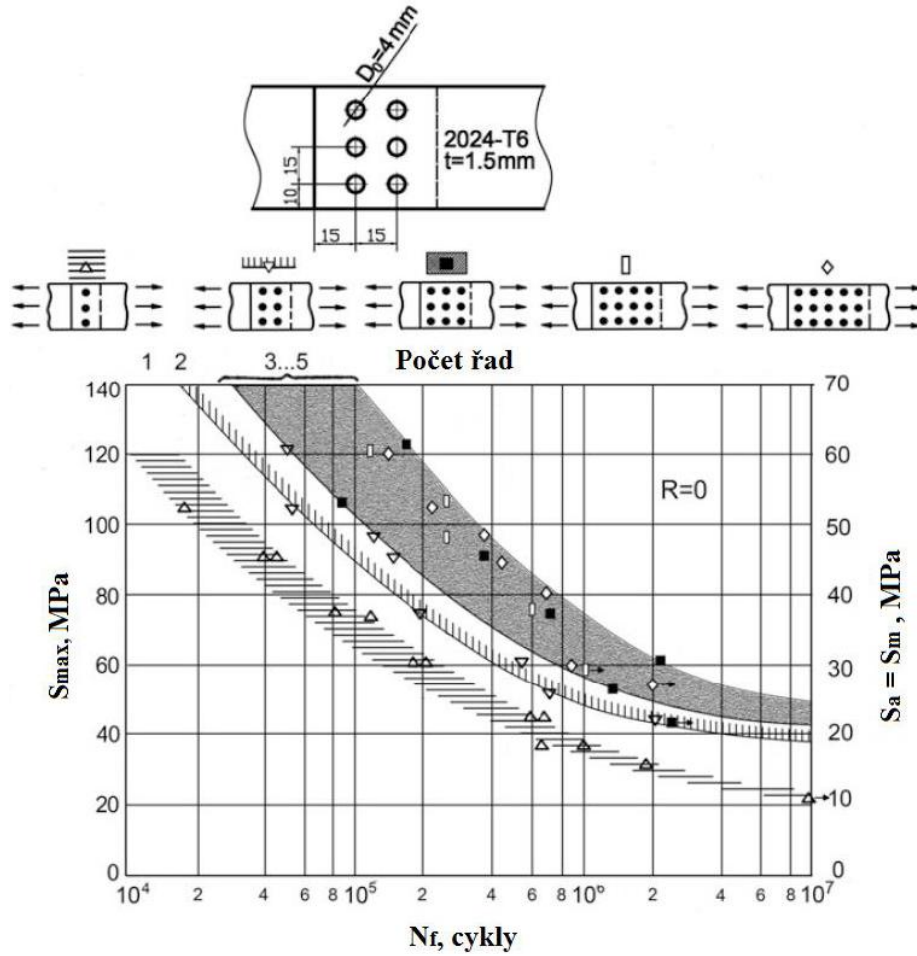
Při použití jedné řady nýtů dochází k největšímu sekundárnímu ohybu nýtového spoje. Při použití více řad se tento nežádoucí efekt snižuje, ale je nutné dbát na dodržení dostatečné rozteče mezi jednotlivými nýty. Kvůli přenosu zatížení na nýty v dalších řadách vznikají napěťové špičky na jiných místech, než v případě použití jedné nýtové řady, kde koncentrace napětí vznikají okolo otvorů pro nýty. Nedodržení vhodné rozteče může vést ke vzniku trhlin mezi jednotlivými otvory pro nýty. U víceřadých nýtových spojů jsou nejvíce zatěžovány vnější nýtové řady (obrázek 9)



Obr. 9 - Distribuce silového působení ve víceřadém nýtovém spoji [11]

Na obrázku 10 můžeme pozorovat, že efekt počtu nýtových řad má velký vliv na únavovou životnost. Tento rozdíl je nejvíce patrný při použití jedné, dvou a třech nýtových řad. Naměřená data při použití více nýtových řad se pohybují ve statistickém rozptylu měření se třemi řadami nýtů. Z tohoto experimentu lze tedy usuzovat, že použití více jak tří nýtových řad již nemá výrazný vliv na zvýšení únavové životnosti spoje.

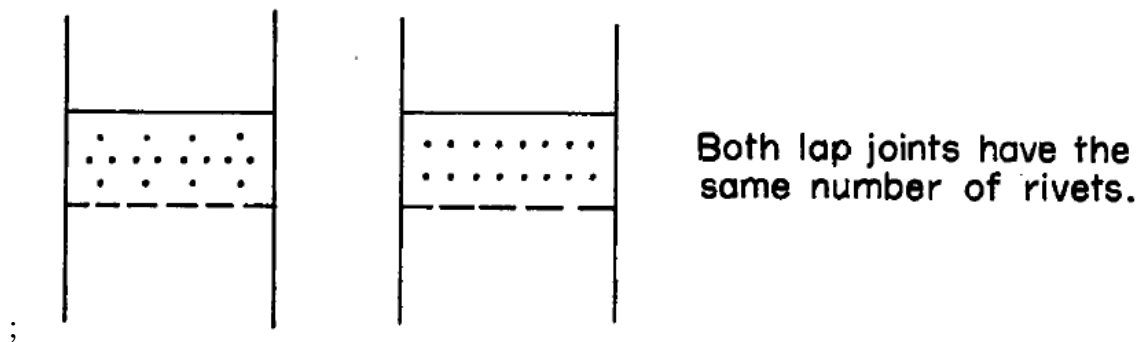
Experiment, kdy se měnil pouze počet nýtových řad a počet nýtů zůstal stejný, potvrdil, že zvýšením počtu nýtových řad se zvyšuje únavová životnost. To může být důsledkem toho, že se při použití dvou a více nýtových řad omezuje sekundární ohyb nýtového spoje.



Obr. 10- Závislost počtu nýtových řad na únavové pevnosti

3.4 Efekt uspořádání nýtů [9]

Při použití víceřadového nýtového spoje nepřenášejí všechny nýtové řady stejné zatížení – nejzatíženější jsou vnější nýtové řady. Je výhodné, aby nýtový spoj byl zatížen co nejvíce rovnoměrně. To lze dosáhnout tím, že se na vnějších řadách zvětší rozteč nýtů, viz obrázek 11.

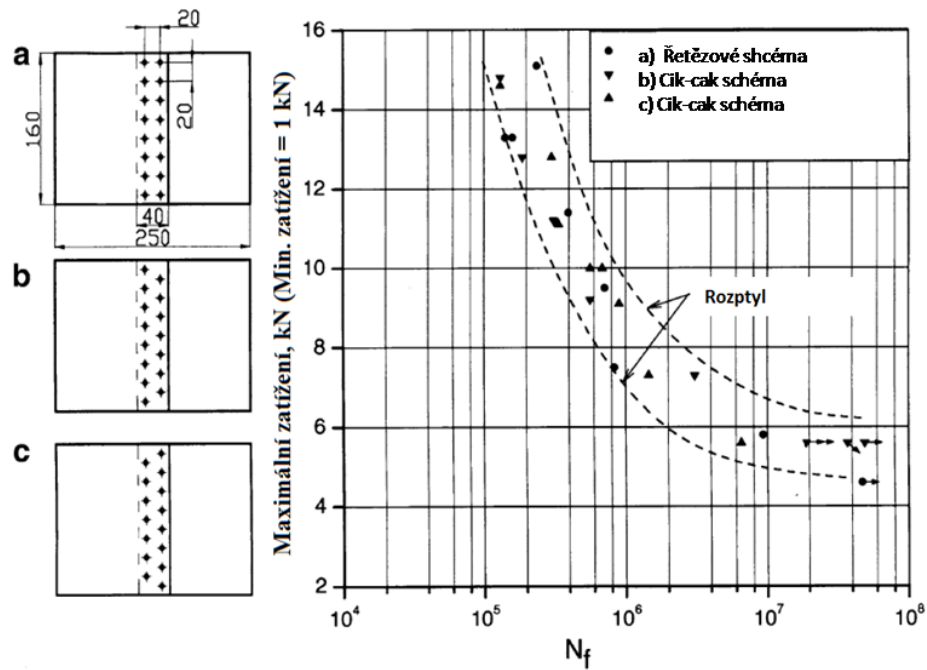


Obr. 11- Uspořádání nýtů pro rovnoměrnější přenos zatížení

Nýtové spoje s více než jednou nýtovou řadou můžeme rozdělit do dvou kategorií podle schématu nýtování. Obecně se používají především následující schémata nýtování:

- cik-cak nýtování,
- řetězové nýtování (řady nýtů nejsou proti sobě nijak přesazeny).

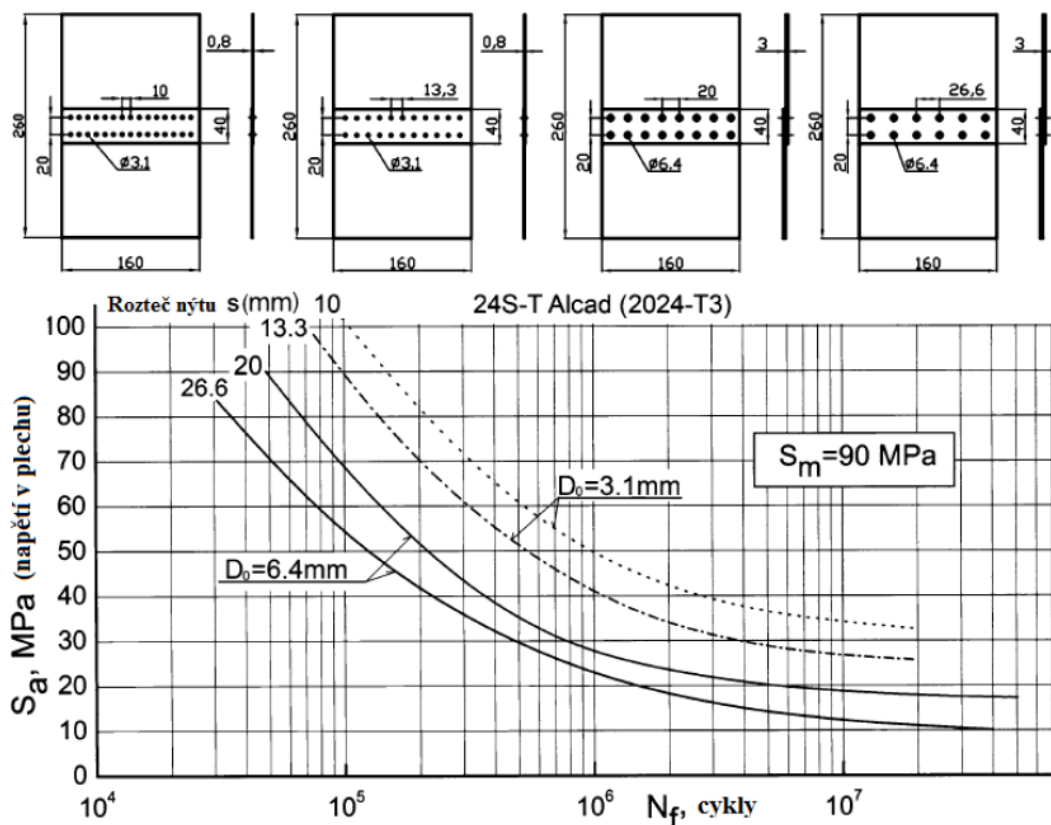
Podle [9] není mezi těmito dvěma schématy rozdíl, který by ovlivňoval únavovou životnost nýtového spoje. Viz obrázek 12.



Obr. 12- Vliv schématu nýtování

3.5 Efekt poměru rozteč nýtu / průměr nýtu [9]

Poměr rozteče nýtů k průměru nýtu s/D_0 je obecně dán výpočtem statické pevnosti. Obvykle bývá $s/D_0 = (3 - 5)$. Podle obrázku 13 se dá usuzovat, že se zvětšujícím se poměrem s/D_0 roste únavová životnost.



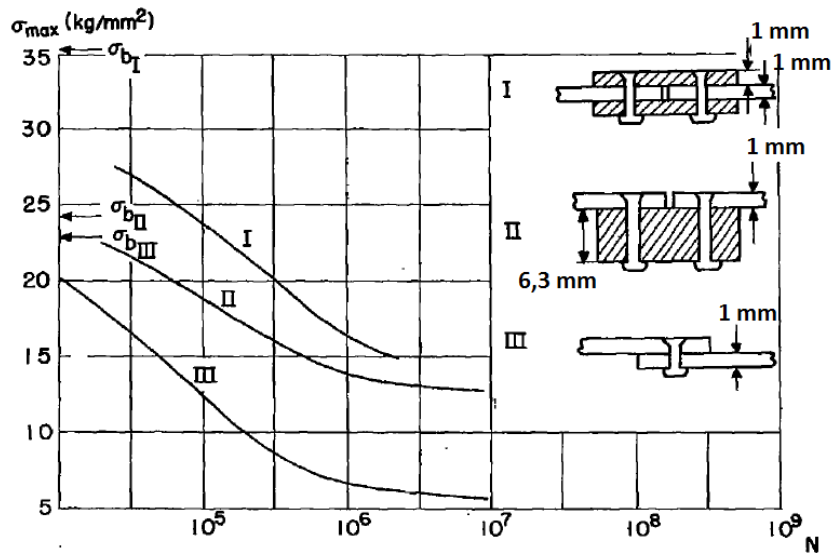
Obr. 13- Efekt poměru rozteče nýtů k průměru nýtu na únavovou životnost

3.6 Efekt ohybové tuhosti nýtového spoje [9]

Koncentrace napětí okolo otvorů pro nýty narůstá kvůli výskytu sekundárního ohybu v jednostřížném nýtovém spoji (případ (II) a (III) na obrázku 14). Tento jev nepříznivě ovlivňuje únavovou životnost. Pokud je zvýšena ohybová tuhost spoje, únavové vlastnosti jsou zlepšeny.

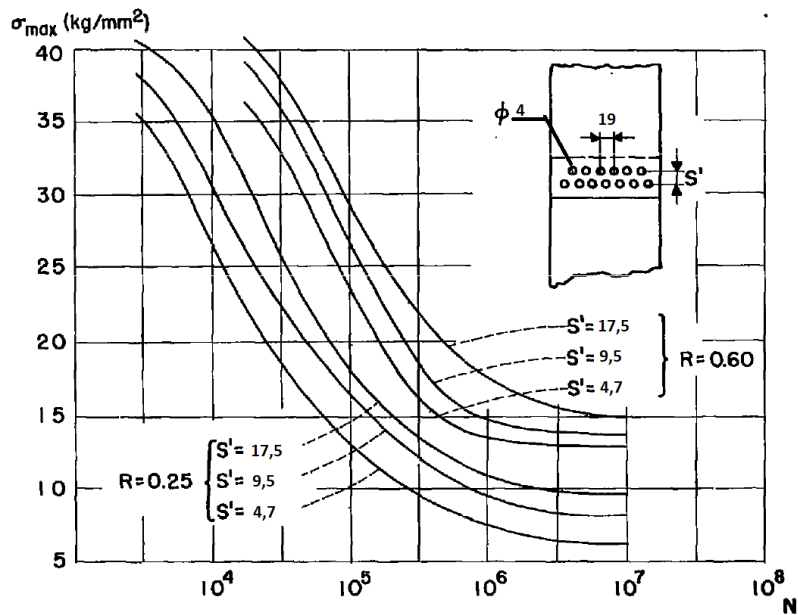
Vliv způsobu provedení nýtového spoje, který ovlivňuje ohybovou tuhost, je patrný z obrázku 14. Nejlepší ohybovou tuhost z uvedených příkladů má dvojstřížný spoj (případ (I) na obrázku 14), kdy při zatížení nedochází k sekundárnímu ohybu a má zároveň nejvyšší únavovou životnost.

V reálných konstrukcích bývá ohybová tuhost spoje podpořena okolní konstrukcí (např. žebra apod.). Efekt této tuhosti je ale obtížné zanést do analytického výpočtu nebo ho zahrnout ve zjednodušeném experimentu.



Obr. 14- Únavová pevnost tří různých provedení nýtových spojů

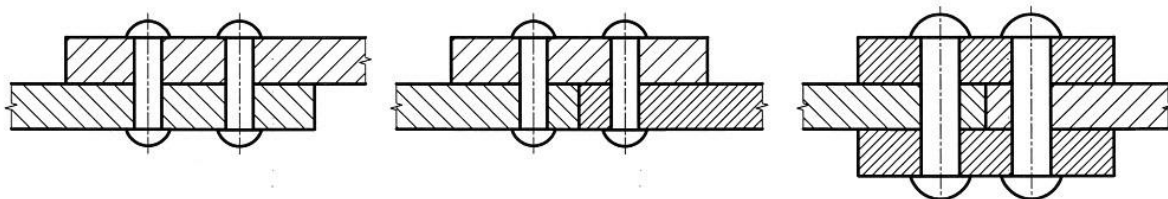
Na sekundární ohyb nýtového spoje má velký vliv počet nýtových řad. Ohyb je tím menší, čím větší je vzdálenost mezi vnějšími řadami. Na obrázku 15 jsou uvedeny výsledky experimentu únavové pevnosti spoje se dvěma nýtovými řadami. Je zjevné, že zvyšující se mezera mezi nýtovými řadami zvyšuje únavovou životnost nýtového spoje.



Obr. 15- Vliv vzdálenosti dvou nýtových řad na únavovou pevnost

4 Zatížení nýtového spoje

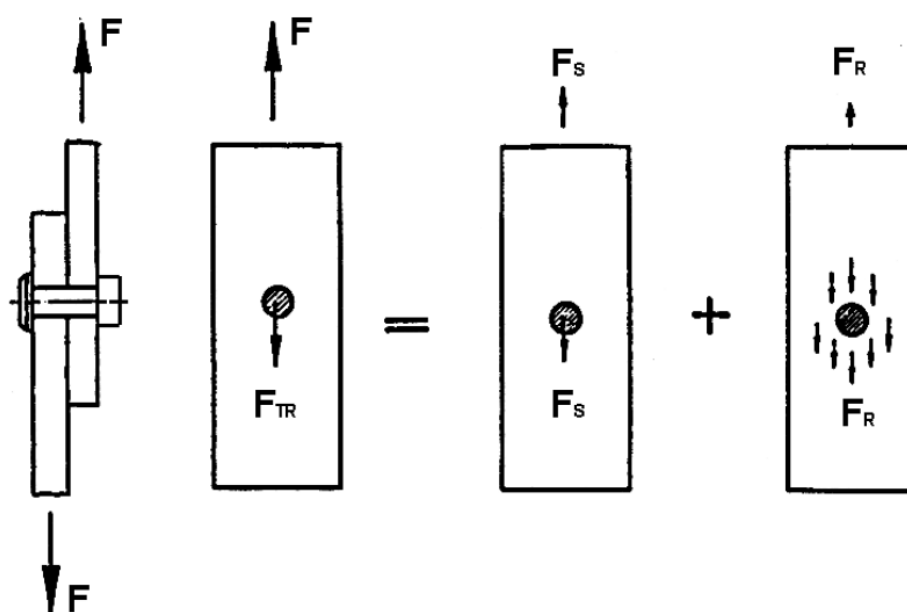
Nýtové spoje jsou spojovací součásti určené především k přenosu smykového zatížení. Střížná plocha je dána velikostí průřezu nýtů a konstrukcí nýtového spoje. Rozlišujeme jednoduché a vícenásobné spoje, jednostřížné a víceštížné spoje, jednořadé a víceřadé apod. Každý typ nýtového spoje má jiné pevnostní, tuhostní a únavové vlastnosti.



Obr. 16 - Schéma jednostřížného a dvojštížného spoje

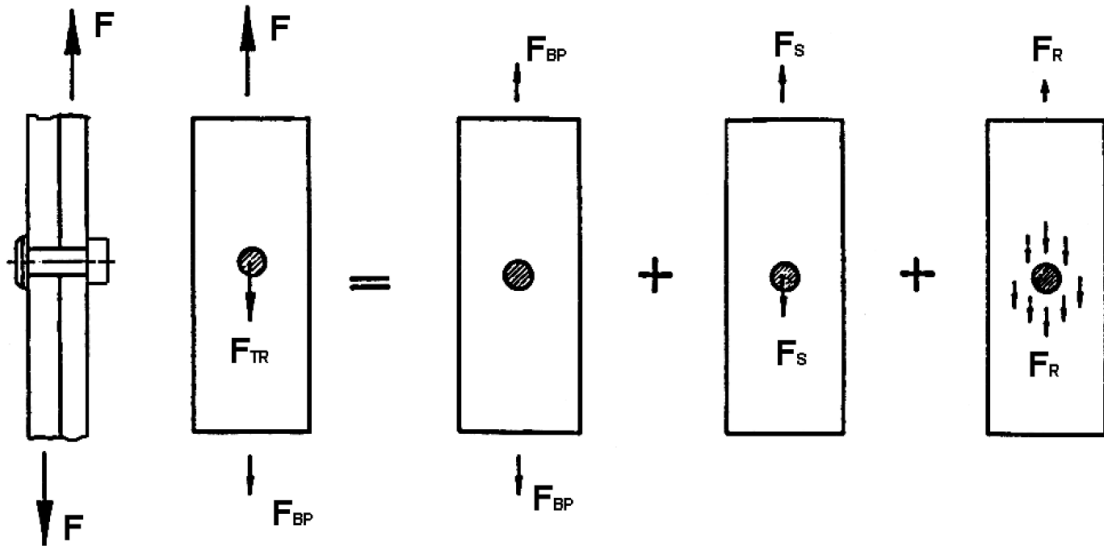
Nýtové spoje lze využít i na přenos tahových zatížení, avšak dosahuje nižší poměrné únosnosti. Při tahovém namáhání je třeba dbát na únosnost opěrné hlavy nýtu v kombinaci s tloušťkou spojovaných součástí.

Pokud uvažujeme přenos pouze smykové síly jedním nýtem, tak se celková přenesená síla skládá ze síly přenesené smykem F_S a ze síly přenesené třením F_R . Třecí síla vzniká mezi spojovanými plechy jako důsledek normálového předpětí nýtu, které vznikne při montáži. Celková přenesená síla F se rovná síle přenesené nýtem F_{TR} . Viz obrázek 17.



Obr. 17- Síly v jednoduchém nýtovém spoji

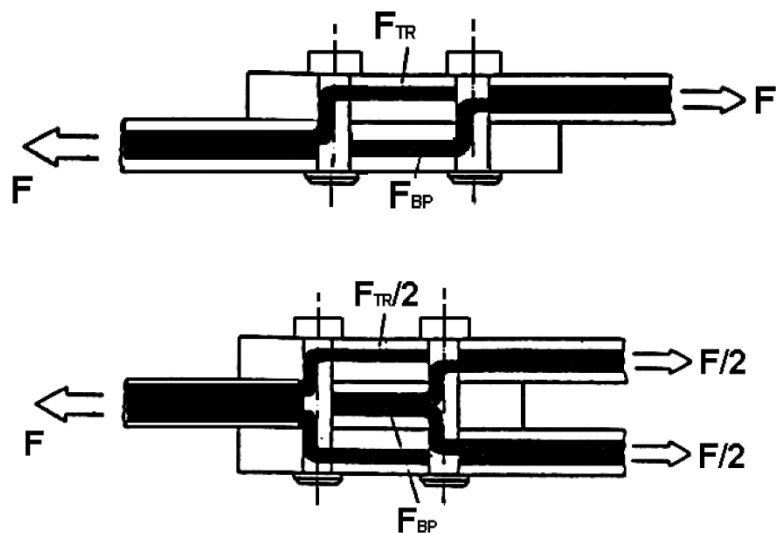
Přenos sil jednoho nýtu ve vícenásobném nýtovém spoji je zobrazen na obrázku 18. Celková síla F je součtem síly přenesené nýtem F_{TR} a síly, kterou přenášejí okolní nýty F_{BP} . Síla přenesená nýtem F_{TR} je opět složena ze síly přenesené smykem a ze síly přenesené třením.



Obr. 18- Přenos sil jednoho nýtu ve vícenásobném nýtovém spoji

Ve vícenásobném nýtovém spoji je tedy síla v jednom spoji součtem síly přenesené nýtem F_{TR} a síly přenesené ostatními nýty F_{BP} .

Ve skutečném případě není nýt namáhán pouze smykovou silou, ale kombinovaným zatížením. Vždy existuje určitá vzdálenost střednic spojovaných součástí, a proto smykové zatížení nevyvozuje pouze stříh, ale také sekundární zatížení ohybem. Tento sekundární ohyb má nepříznivé účinky na únavovou životnost spoje. Správnou konstrukcí nýtového spoje (např. použitím příložek) lze sekundární ohyb výrazně zmenšit. [12]



Obr. 19 - Distribuce silového působení v jednotřížném a dvojtrížném spoji

5 Tuhost a poddajnost nýtového spoje

Na nýtové spoje je možné nahlížet jako na nosné prvky konstrukce a je od nich očekáván hlavně přenos zatížení. V posledních letech se ale čím dál častěji sledují tuhostní charakteristiky navrhovaných spojů. Při použití lehkých materiálů, jakými jsou hliníkové slitiny, které mají nižší Youngův modul pružnosti, dochází k větším deformacím, které mohou ovlivnit rozložení napětí v okolí nýtových spojů. Tyto deformace mohou také způsobit zejména u jednostřížných spojů přídavný ohyb, který významně snižuje únosnost a únavovou životnost nýtového spoje. V nýtových spojih dochází obecně také k poměrně významným lokálním deformacím, které vedou k lokálnímu přetěžování materiálu, což významně ovlivňuje únavovou pevnost v daném místě. [12]

Tuhost je obecně definovaná jako poměr síly k posuvu. Poddajnost je pouze obrácená hodnota tuhosti.

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{1}{C} \quad [N \cdot mm^{-1}] \quad (1)$$

$$C = \frac{\delta}{F} \quad [mm \cdot N^{-1}] \quad (2)$$

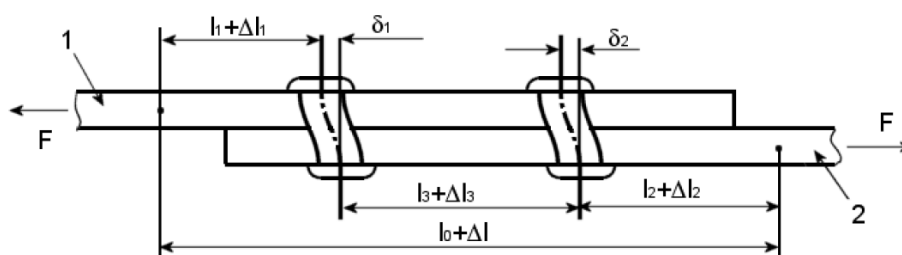
kde K – tuhost

C – poddajnost

F – přenesená síla [N]

δ – posuv [mm]

Experimentálně lze stanovit tuhost nýtového spoje (ve směru smyku) například podle schématu na obrázku 20. Při takto sestaveném experimentu (je měřen celkový posuv – včetně deformace plechů) je nutné pro zjištění posuvů nýtových spojů δ_i odečtení deformací plechů Δl_i (analyticky stanovených) od celkové deformace zkušební vzorku.



Obr. 20 - Schéma pro určení poddajnosti jednostřížného spoje [12]

Tuhost nýtového spoje – respektive posuv δ , lze určit i na základě kompletního MKP modelu nýtového spoje. V tomto případě lze odečíst posuv δ přímo z MKP výpočtu.

Stanovení tuhosti nýtového spoje je důležité pro korektní nastavení zjednodušeného MKP modelu nýtového spoje při numerickém výpočtu (bude probráno v následujících kapitolách). Jak již bylo uvedeno, tuhost nýtového spoje lze určit experimentálně, detailním MKP modelem, anebo analytickými vztahy pro výpočet tuhosti nýtových spojů. Některé z těchto vztahů jsou uvedeny v následující kapitole. [13]

5.1 Výpočet poddajnosti nýtového spoje [12]

Níže uvedené vztahy byly konstruovány pro výpočet tuhosti konkrétních případů zatěžování a geometrie nýtového spoje. Výpočtové vztahy nedochází ke stejným výsledkům a mohou se výrazně lišit od výsledků z experimentálního měření.

5.1.1 Axiální tuhost nýtového spoje:

$$K_{axial} = \frac{E_{nyt} \cdot A}{L} \quad (3)$$

kde E_{nyt} – modul pružnosti nýtu

A – průřez nýtu

L – svěrná délka spoje

5.1.2 Smyková tuhost – dvojtřížné spoje

Tateho rovnice(1946):

$$C = C_a + C_b + C_c + C_d \quad (4)$$

kde C_a – poddajnost plechu od namáhání na stěně otvoru

C_b – poddajnost nýtu od namáhání na stěně otvoru

C_c – poddajnost od ohybového namáhání nýtu

C_d – poddajnost od smykového namáhání nýtu

$$C_a = \frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{2t_2 E_2} \quad (5)$$

$$C_b = \frac{1}{t_1 E_3} + \frac{1}{2t_2 E_3} \quad (6)$$

$$C_c = \frac{8t_2^3 + 16t_2^2 + 8t_2 t_1 + t_1^3}{3E_3 \pi d^4} \quad (7)$$

$$C_d = \frac{8(2t_2 + t_1) \cdot (1 + \mu)}{3E_3 \pi d^4} \quad (8)$$

kde t_1, t_2 - tloušťka plechů

E_1, E_2, E_3 - moduly pružnosti plechů (1,2) a nýtu (3)

d - průměr nýtu

μ - Poissonovo číslo

Celková deformace v oblasti nýtu:

$$\delta = C \cdot F_{TR} \quad (9)$$

Boeingova rovnice pro dvojstřížné spoje (1969):

$$C = \frac{1,25^{\frac{t_1}{d}}}{t_1} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{8E_3} \right) + \frac{1,25^{\frac{t_2}{d}}}{t_2} \left(\frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_3} \right) \quad (10)$$

5.1.3 Smyková tuhost – jednostřížné spoje

Boeingova rovnice:

$$C = \frac{2 \left(\frac{t_1}{d} \right)^{0.85}}{t_1} \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{8E_3} \right) + \frac{2 \left(\frac{t_2}{d} \right)^{0.85}}{t_2} \cdot \left(\frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_3} \right) \quad (11)$$

Grummanova rovnice:

$$C = \frac{(t_1 + t_2)^2}{E_3 \cdot d^3} + 3,7 \cdot \left(\frac{1}{t_1 E_1} + \frac{2}{t_2 E_2} \right) \quad (12)$$

Douglasova(Swiftova) rovnice:

$$C = \frac{5}{E_3 \cdot d} + 0,8 \cdot \left(\frac{1}{t_1 E_1} + \frac{2}{t_2 E_2} \right) \quad (13)$$

Jednotlivé rovnice se od sebe ve výsledcích liší až pětinasobně a často neodpovídají naměřeným výsledkům. To je dáno především tím, že jednotlivé rovnice byly vyvíjeny firmami, které používaly rovnice na konkrétní geometrické a materiálové parametry nýtového spoje. Rovnice budou tedy odpovídat pouze případům, kdy je použita podobná konstrukce nýtového spoje (počet řad, velikost nýtů, ...), jako při odvození a validaci daného vztahu.

Existující rovnice (11),(12)(13) byly Huthem [14] podrobeny experimentálnímu zkoumání a upraveny do Huthovy rovnice poddajnosti:

$$C = \left(\frac{t_1 + t_2}{2d} \right)^a \cdot \frac{b}{n} \left(\frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{n \cdot t_2 E_2} + \frac{1}{2 \cdot t_1 E_3} + \frac{1}{2n \cdot t_2 E_3} \right) \quad (14)$$

kde $n = 1$ pro jednostřížné spoje, $n = 2$ pro dvojstřížné spoje

$a = 2/3$, $b = 3$ pro šroubové nýty v kovu

$a = 2/5$, $b = 2,2$ pro pěchované nýty v kovu

$a = 2/3$, $b = 4,2$ pro nýty v uhlíkovém kompozitu

5.2 Experimentální stanovení poddajnosti nýtového spoje [12]

Experimentální určování poddajnosti nýtových spojů probíhá cyklickým zatěžováním zkušební vzorku. Cyklické zatěžování je vhodné především proto, že dochází k postupnému usazování nýtů vlivem změny zatěžovacích sil a reálná poddajnost nýtového spoje se ustálí až po několika zatěžovacích cyklech.

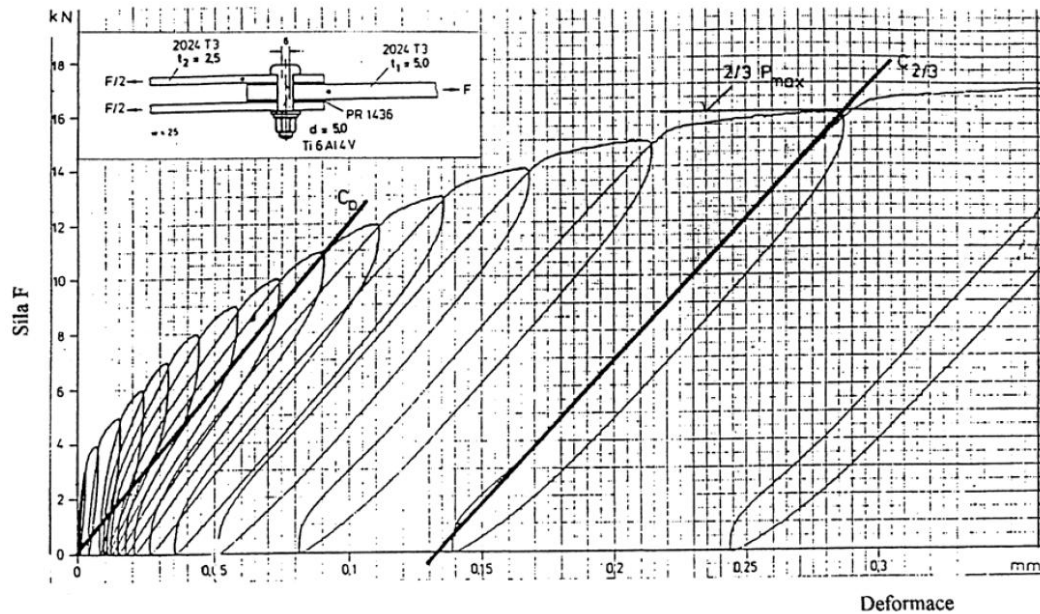
Existují různé způsoby jak experimentálně určit poddajnost. V této práci budou uvedeny dva základní.

Poddajnost C_0 :

Při určování poddajnosti C_0 je měřena deformace nýtu δ [mm] při cyklickém zatěžování, kdy je každým cyklem zvětšována amplituda síly až k dosažení statického lomu. Poddajnost je směrnicí křivky opakovaného zatížení a je posunuta do nulového bodu. Viz obrázek 21.

Poddajnost $C_{2/3}$:

Pro určení poddajnosti $C_{2/3}$ je nejprve nutné zjistit maximální zatížení F_{max} nýtového spoje, při kterém dojde k jeho porušení. Určení této poddajnosti probíhá statickým způsobem. Provede se zatížení do $2/3$ maximální zatěžovací síly, úplné odlehčení a poté další zatížení nad $2/3 F_{max}$. Tím vznikne hysterezní smyčka, jejíž směrnici je poddajnost $C_{2/3}$. Viz obrázek 21.



Obr. 21- Diagram zatěžování nýtového spoje [14]

V tabulce 1 a 2 je možné porovnat hodnoty poddajností naměřených experimentálně [14] a vypočtených pomocí vzorců uvedených v kapitole 5.1. Je patrné, že Huthova rovnice nejlépe odpovídá naměřeným hodnotám v experimentu. Ostatní vypočtené tuhosti vychází až dvojnásobně.

Huthova rovnice je nejpoužitelnější především u vzorků s větší tloušťkou plechů. U jednostřížných spojů s tloušťkou plechů 2 až 3 mm nejlépe odpovídají rovnice Boeingova a Douglasova. [12]

Tab. 1- Naměřené a vypočtené poddajnosti dvojitřizných nýtových spojů s vypouklou hlavou [12] [14]

| Rozměry [mm] | | | | Poddajnost nýtu [$\text{mm}\cdot\text{MN}^{-1}$] | | | | | |
|--------------|-------|----|-----|--|-----------|-------|-------|-----------|-------|
| t_1 | t_2 | w | d | C_F | $C_{2/3}$ | C_H | C_B | C_{T+R} | C_D |
| 2 | 1 | 24 | 4.8 | 14.2 | 17.8 | 14.39 | 30.48 | 30.66 | 25.58 |
| 4 | 2 | 24 | 4.8 | 8.2 | 10.4 | 9.49 | 16.23 | 20.99 | 20.02 |
| 2 | 2 | 24 | 4.8 | - | 13.4 | 12.11 | 20.96 | 25.56 | 22.8 |
| 2 | 1 | 16 | 3.2 | 17.2 | 18.8 | 16.92 | 31.45 | 34.89 | 32.81 |

Tab. 2- Naměřené a vypočtené poddajnosti dvojitřizných nýtových spojů se zapuštěnou hlavou [12] [14]

| Rozměry [mm] | | | | Poddajnost nýtu [$\text{mm}\cdot\text{MN}^{-1}$] | | | | | |
|--------------|-------|----|-----|--|-----------|-------|-------|-----------|-------|
| t_1 | t_2 | w | d | C_F | $C_{2/3}$ | C_H | C_B | C_{T+R} | C_D |
| 2 | 2 | 24 | 4.8 | 28.5 | 32 | 31.36 | 25.64 | 31.66 | 25.05 |
| 4 | 4 | 24 | 4.8 | 19 | 20.8 | 21.3 | 17.29 | 31.22 | 20.02 |
| 2 | 2 | 16 | 3.2 | 55.2 | 56 | 37.98 | 30.4 | 42.24 | 32.01 |
| 2 | 2 | 24 | 4 | 36.5 | 40.2 | 34.84 | 28.12 | 35.7 | 28.6 |

6 MKP modely nýtových spojů

V této kapitole bude rozebráno několik přístupů k modelování nýtového spoje pomocí MKP. Tento výčet není kompletní a každý z uvedených postupů může být dále modifikován podle konkrétní aplikace. Pro popis modelů jsou uváděny názvy prvků systému MSC/NASTRAN.

6.1 Kompletní model nýtového spoje [12] [15]

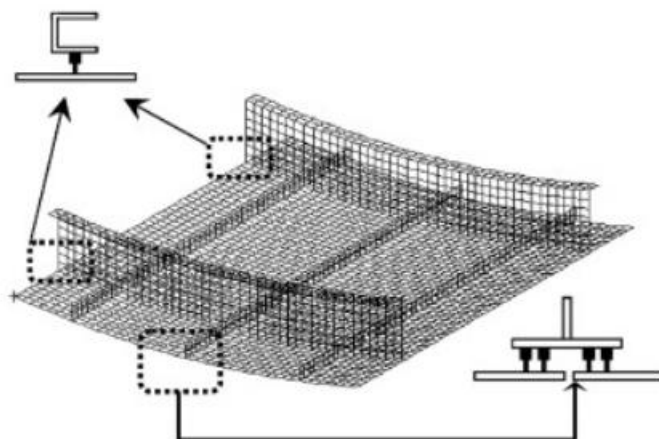
V případě použití kompletního modelu nýtového spoje nedochází k výraznějším zjednodušením a je modelována detailní geometrie spoje. Je nutné použít jemnou síť s objemovými prvky a výpočet může být časově náročný. Dlouhá doba tvorby modelu kompletního nýtového spoje a nutnost použití poměrně malých prvků je důsledkem toho, že se tento model nýtového spoje zpravidla nepoužívá při výpočtu větších konstrukčních celků, které mohou obsahovat i stovky nýtových spojů. Použití jemných prvků vede k přesnějším výsledkům napěťových a deformačních poměrům v nýtovém spoji.

Užívá se především pro napěťovou analýzu v blízkosti nýtového spoje, kdy je často uvažována plasticita a nelineární kontakty mezi jednotlivými díly spoje. Díky respektování geometrických detailů spoje dosažené výsledky mohou poměrně dobře aproximovat skutečné napěťo-deformační poměry ve spoji. To může být výhodné při podrobném posuzování vzniku únavových trhlin a únavové životnosti spoje.

Nevýhodou tohoto přístupu je pracnost přípravy výpočetního modelu nýtového spoje.

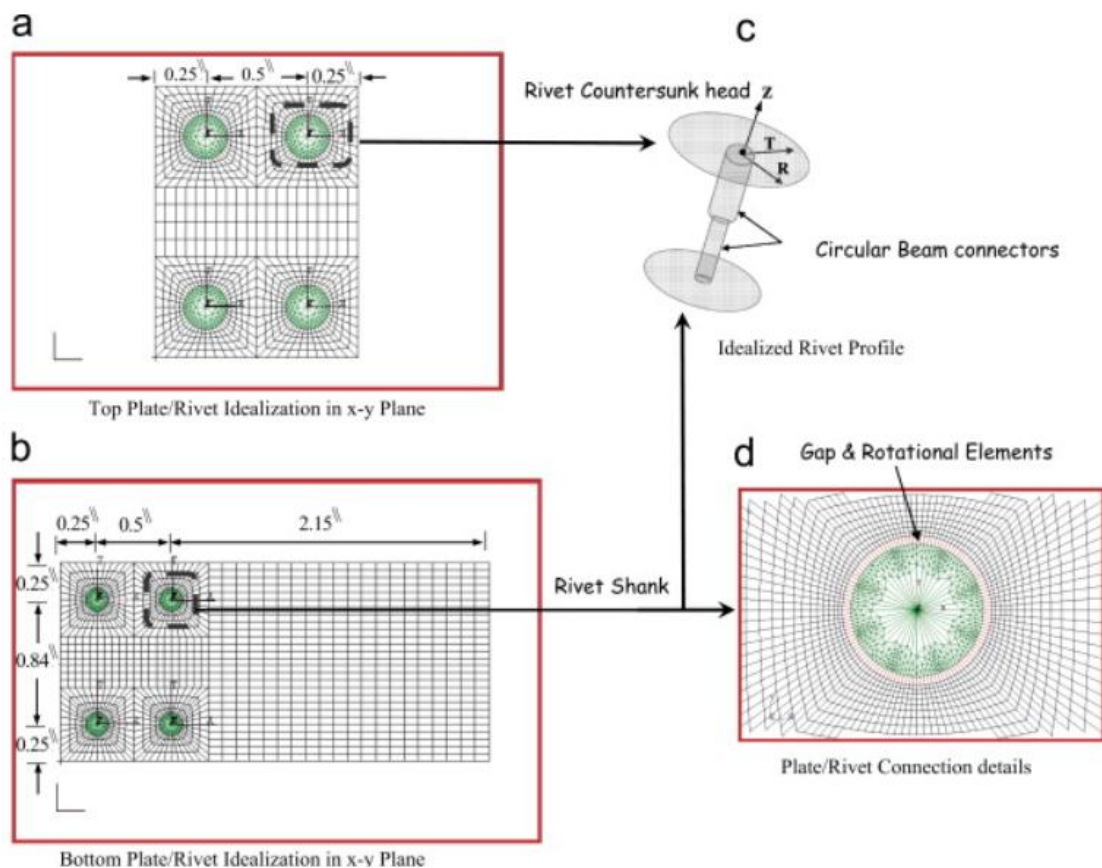
6.2 Náhrada nýtu nosníkovým 1D prvkem [12] [16] [17]

Náhrada nýtu nosníkovým 1D prvkem byla použita v práci [16]. Metoda modelování nýtového spoje je založena na zjednodušení spoje pomocí elementu typu BEAM - nosník a napojení na výpočetní skořepinovou síť, která modeluje spojované plechy. Její výhodou je, že umožňuje zahrnout sekundární ohyb a zatížení od otlacení. V práci [16] byl tento způsob modelování použit při výpočtu části trupu letadla podle obrázku 22.



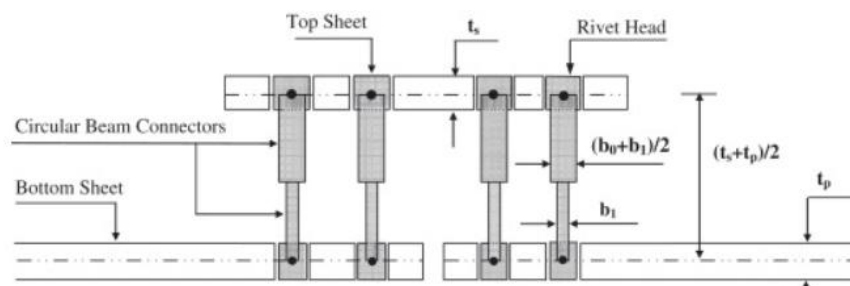
Obr. 22- Konečnoprvkový model části trupu letadla

Na obrázku 23 a 24 je možné pozorovat jakým způsobem je nýtový spoj modelován. Plechy konstrukce jsou tvořeny obdélníkovými skořepinovými prvky s definovanou tloušťkou a v plechu jsou vytvořeny otvory s dostatečným zjemněním sítě v jejich těsném okolí. V rovině plechů jsou vytvořeny skořepinovými trojúhelníkovými prvky hlavy nýtů s určitou mezerou mezi plechem a hlavou nýtů. Kontakt mezi hlavou nýtu a otvorem ve skořepinovém tělese je aproximován GAP elementy. Horní a spodní hlava nýtu je spojena dvěma jednorozměrnými prvky typu BEAM. V práci [16] byly uvažovány nýty se zápusťnou hlavou, a proto byl dřík rozdělen na dva elementy a pomocí změny velikosti průřezu byla zohledněna zápusťná hlava.



Obr. 23- Zjednodušený model nýtového spoje. a) pohled na horní plech b) pohled na spodní plech c) zjednodušený model nýtu d) detail napojení nýtu na plech

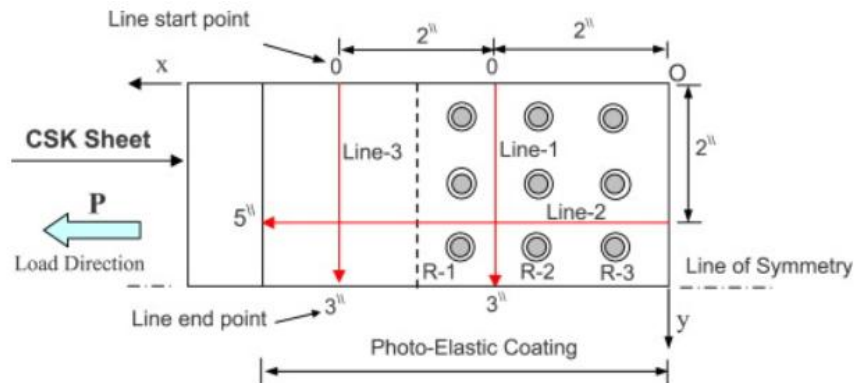
Výhodou tohoto způsobu modelování nýtového spoje je, že je možné vyhodnotit namáhání materiálu otlacením a jeho jednoduchost oproti modelování celého nýtového spoje. Nicméně při výpočtech v aplikaci kolejových vozidel je vhodný pouze pro analýzu menších konstrukčních celků, protože kolem nýtového spoje je nutné dostatečné zahuštění sítě.



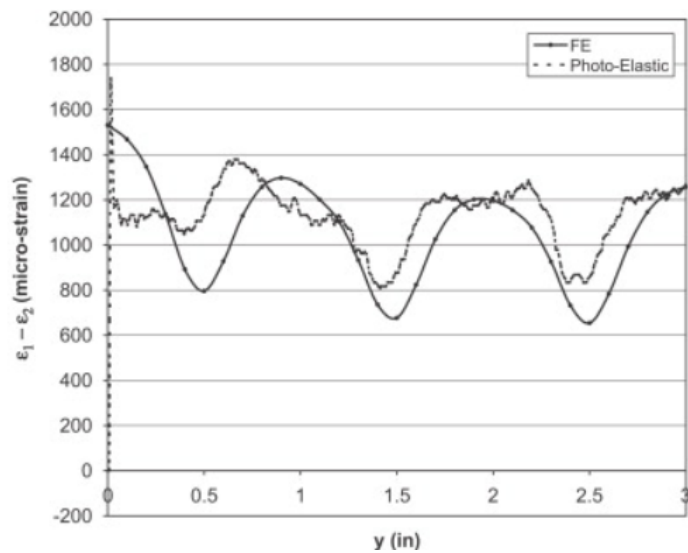
Obr. 24- Schéma zjednodušeného nýtového spoje

Požadavek malých prvků kolem nýtových spojů je avšak poplatný tomu, co je předmětem práce [17] – detailní rozložení napětí v okolí otvorů pro nýty. Přístup lze modifikovat a zvolit hrubší síť pro aplikaci na skříních kolejových vozidel, kde není předmětem zájmu rozložení napětí okolo otvorů, ale silové poměry v nýtech.

Hodnoty deformace získané pomocí experimentu a porovnané s vypočtenými hodnotami podél křivky 1 na obrázku 25 je možné pozorovat na 26.



Obr. 25- Umístění vyhodnocovacích křivek na zkušební vzorku



Obr. 26- Porovnání výsledků deformací vypočtených a měřených fotoelastickou podél křivky 1

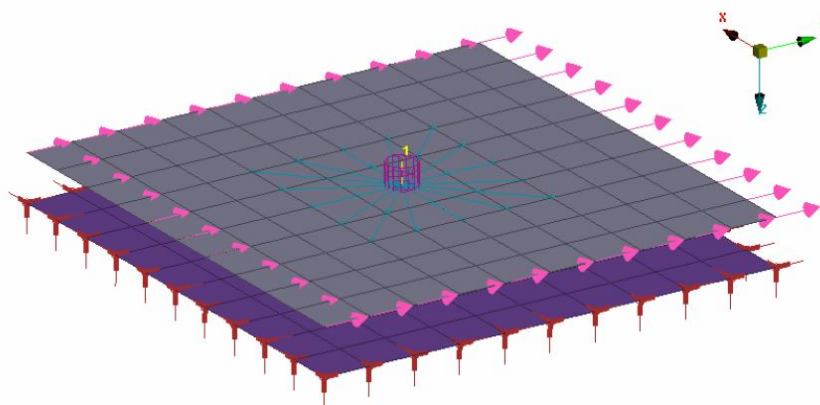
6.2.1 RBE3 – CBUSH – RBE3

Tento způsob modelování nýtových spojů je další variantou modelování pomocí 1D prvků. Kvůli jeho jednoduchosti se často využívá v modelech velkých konstrukčních celků, pro které by velikost elementů nutná pro použití výše zmíněných modelů vedla na příliš velký počet stupňů volnosti.

Metodika RBE3 – CBUSH – RBE3 modeluje spojovací prvky (těla nýtů) jako pružinové elementy, u kterých je možné předepsat do všech směrů volnosti různou tuhost (popřípadě i tlumení). Krajní uzly CBUSH elementu jsou na okolní konstrukci tvořenou skořepinovými prvky navázány pomocí RBE3 prvků – „poddajné“ MPC vazby. Tomuto nahrazení nýtového spoje lze definovat i nelineární závislost síly na posuvu. [13]

Pro správné fungování náhrady nýtového spoje pomocí BUSH prvků je nutné korektně definovat tuhosti BUSH prvků do jednotlivých směrů volnosti.

Definice tuhostí je možné provést podle vztahů z kapitoly 5.1. Každý ze vztahů uvedených v této kapitole je vhodný pro jinou geometrii. V oblasti kolejových vozidel, kdy se tloušťka spojovaných plechů pohybuje přibližně od 3 do 8 mm, je možné pro výpočet smykové tuhosti využít vztah podle Hutha (14). Výpočet axiální tuhosti lze provést podle vztahu (3) a torzní a ohybovou tuhost je možné volit přibližně 10^6 N/mm [13].



Obr. 27 - Využití CBUSH elementu pro modelování nýtového spoje

Stanovení optimální tuhosti BUSH elementu [18]

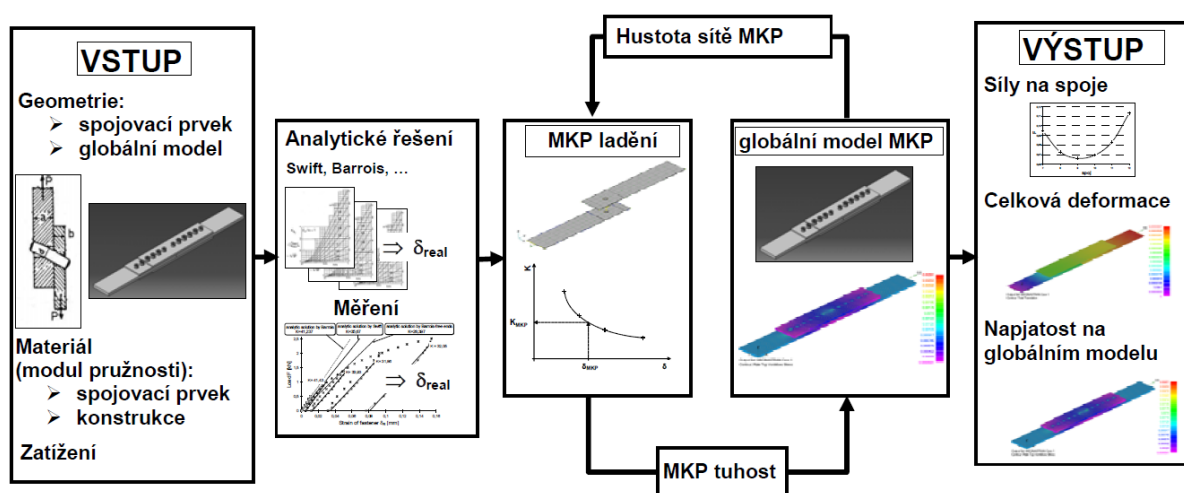
Výpočty bylo zjištěno, že deformace modelu nýtového spoje neodpovídá pouze zavedené hodnotě tuhosti prvku, ale závisí také na zvolené hustotě sítě v místě připojení. V praxi je nutné přizpůsobit tuhost zjednodušeného modelu nýtu tak,

aby odpovídala analytickému výpočtu, experimentálnímu měření nebo kompletnímu MKP modelu nýtového spoje. Celý proces je proveden takto:

- určení tuhosti nýtového spoje pomocí vhodně zvoleného analytického modelu nebo pomocí experimentálního měření,
- vytvoření MKP modelu pevnostního vzorku vzorku nýtového spoje s hustotou sítě a vlastnostmi (modul pružnosti, tloušťky plechů) odpovídajícími globálnímu modelu MKP celé konstrukce v místě oblasti nýtového spoje,
- výpočet modelu vzorku nýtového spoje pro několik hodnot tuhostí spojovacího prvku a proložení polynomu vypočtenými hodnotami,
- Vyhodnocení pole posuvů a určení ekvivalentní tuhosti BUSH elementu, při které posuv nýtového spoje na modelu vzorku odpovídá hledanému řešení (takto určená tuhost může být až několikrát větší než experimentální nebo analytické řešení).

Prvky s takto určenou ekvivalentní tuhostí, která odpovídá konkrétní hustotě sítě, je možné použít v globálním modelu v místech, kde hustota sítě odpovídá síti výpočtového vzorku nýtového spoje.

Na obrázku 28 je znázorněna uvedená metodika ladění tuhosti prvku nýtového spoje.



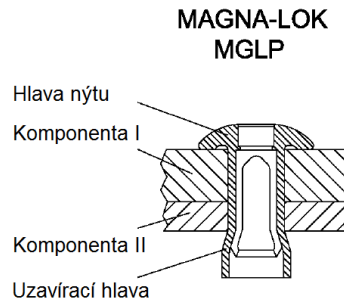
Obr. 28 - Schéma metodiky modelování spoju s ekvivalentní tuhostí pomocí MKP [18]

7 Hodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů

Hodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů je obecně velmi problematické. Malé změny v geometrii spoje nebo použité technologii nýtování, výroby děr a podobně, mohou vést k velmi rozdílným hodnotám únavové životnosti a poměrně velkým rozptylům výsledků získaných při neměnném způsobu zatěžování. Některé faktory ovlivňující životnost nýtových spojů jsou uvedeny v předešlých kapitolách. V případech, kdy se hodnotí spoje v rámci většího konstrukčního celku (např. drak letadla, hrubá stavba kolejového vozidla, apod.) se nýtové spoje modelují zjednodušenými postupy a hodnocení únavových vlastností konstrukcí je založeno především na experimentálních výsledcích konkrétních typů nýtových spojů. Paralelní možností hodnocení nýtových spojů z pohledu pevnosti a životnosti je využití výsledků detailních MKP modelů nýtových spojů, které zohledňují technologii nýtování (plastické zóny apod.) a umožňují provádět složitější simulace např. šíření únavových trhlin ve spojích.

7.1 Postup dle Eurokódu 3 [19]

Jedním ze způsobů vyhodnocování pevnosti a životnosti nýtových spojů je postup podle Eurokódu 3, [19]. Předmětem této diplomové práce je především hodnocení životnosti dutých nýtů MAGNA-LOK používaných na hrubých stavbách kolejových vozidel. V dokumentu německého institutu pro stavební techniku [20], který se orientuje pouze na použití nýtů MAGNA-LOK, jsou uvedené postupy a zásady (v souladu s Eurokódem 3), podle kterých lze nýtové spoje vyhodnocovat. V tabulce 3 je uveden přehled nýtů, kterých se dokument týká, a současně minimální tloušťky spojovaných komponent, které mohou být ve spoji použity. Komponenta I je spojovaný prvek na straně hlavy nýtu a komponenta II na straně uzavírací hlavy. Dohromady musí mít spojované prvky tloušťku v rozsahu danou výrobcem ke konkrétnímu nýtu.



Obr. 29- Nýt MAGNA-LOK MGLP

Tab. 3- Minimální tloušťka komponent

| Poz. | Typ nýtu | Hlava | Součást I [mm] | Součást II [mm] |
|------|-------------------------|----------|-------------------|--------------------|
| 1 | MAGNA-LOK MGL100-R8-xx | Zápustná | 3,00 | 1,50 |
| 2 | MAGNA-LOK MGL100-R12-xx | Zápustná | 4,00 | 4,00 |
| 3 | MAGNA-LOK MGL100-R16-xx | Zápustná | 6,00 | 4,00 |
| 4 | MAGNA-LOK MGLP-R8-xx | Plochá | 0,88 | 0,88 |
| 5 | MAGNA-LOK MGLP-R12-xx | Plochá | 3,00 | 3,00 |
| 6 | MAGNA-LOK MGLP-R16-xx | Plochá | 4,00 | 4,00 |
| 7 | MAGNA-BULB MBP-R8-xx | Plochá | 0,75 | 0,75 |

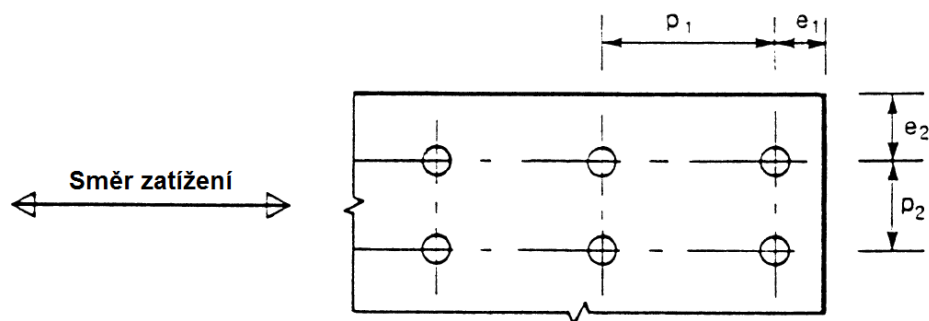
Nýty 1, 4 a 7 musí splňovat požadavky na vzdálenosti děr nýtů k okrajům:

Vzdálenost hrany ve směru síly od díry: $e_1 \geq 3d$; min. 20 mm

Vzdálenost hrany kolmo ke směru síly od díry: $e_2 \geq 1,5d$; min. 10 mm

Rozteč mezi dírami pro nýty: $P \geq 4d$; min. 40 mm

Jmenovitý rozměr d uvádí výrobce [21].



Obr. 30 - Označení roztečí spojovacích prostředků [19]

7.1.1 Výpočtová únosnost nýtů

Různé typy nýtů uvedených v tabulce 3 mají dané kritické zatížení v tahu $F_{v,Rk}$ a ve smyku $F_{t,Rk}$ určené výrobcem a uvedené v katalogu nýtů [21].

Pro typy nýtů na pozicích 1, 4 a 7 v tabulce 3, kdy může mít spojovaná součást méně než 3 mm, je nutné kritické hodnoty zatížení snížit. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 1 a vycházejí z dokumentu německého institutu pro stavební techniku. [20]

7.1.1.1 Střih a otlačení

V mezním stavu únosnosti nesmí výpočtová smyková síla $F_{v,Sd}$ působící na nýt překročit menší z hodnot:

střihové únosnosti:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (15)$$
$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$$

kde $\gamma_{M2} = 1,33$

$F_{v,Rk}$ je maximální možné statické zatížení (dáno výrobcem)

$F_{v,Rd}$ je dovolené statické zatížení

a únosnosti v otlačení:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d_o \cdot t}{\gamma_{Mr}} \quad (16)$$

kde d_o je průměr nýtové díry

t je tloušťka spojovaných plechů

f_u mez pevnosti spojovaných materiálů

$\gamma_{Mr} = 1,25$

α je nejmenší z:

$$\alpha = \frac{e_1}{3d_o}; \frac{p_1}{3d_o} - \frac{1}{4}; 1,0 \quad (17)$$

7.1.1.2 Tah

Nýtové spoje mají být navrhovány tak, aby byly zatěžovány především smykem. Je-li nutné přenést tahové zatížení, pak výpočtová tahová síla $F_{t,Sd}$ nesmí překročit tahovou únosnost $F_{t,Rd}$.

$$F_{t,Rd} = \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (18)$$
$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$$

7.1.1.3 Kombinované namáhání

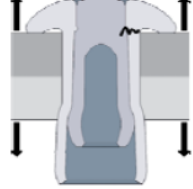
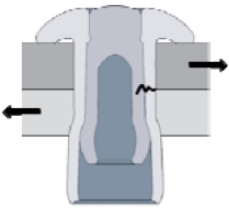
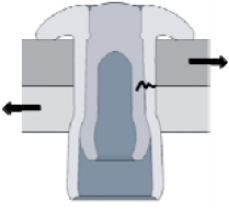
Nýty zatížené současně tahovými a smykovými silami musí vyhovět podmínce:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (19)$$

7.1.2 Únavová životnost nýtů [19] [20]

Posouzení únavové pevnosti nýtů MAGNA-LOK a MAGNA-BULB je podle německého institutu stavební techniky a podle Eurokódu 3 možné pouze pro spoje s minimální tloušťkou spojovaných součástí uvedených v tabulce 4. Spoje jsou kategorizovány do konstrukčních detailů, ke kterým jsou přiřazeny jednotlivé únavové křivky.

Tab. 4- Konstrukční detaily [20]

| Kategorie detailu | Konstrukční detail | Popis | Podmínky |
|-------------------|---|---|--|
| 36 |  | Slepý nýt s dutým dříkem pod tahovým zatížením bez přídavného ohybu | $\Delta\sigma$ je určeno z nominálního průřezu slepého nýtu. Musí být brány v úvahu ostatní podmínky způsobující přídavný ohyb atd. Minimální tloušťka komponenty I/II: 4 mm / 4 mm |
| 100 m = 5 |  | Slepý nýt s dutým dříkem MAGNA-LOK MGLP-R8-xx zatížený střídavým smykovým namáháním | $\Delta\tau$ je určeno z nominálního průřezu slepého nýtu. Minimální tloušťka komponenty I/II: 2,5 mm / 2 mm |
| 100 m = 5 |  | Slepý nýt s dutým dříkem MAGNA-LOK MGLP-12-xx MAGNA-LOK MGLP-12-xx zatížený míjivým smykovým namáháním | $\Delta\tau$ je určeno z nominálního průřezu slepého nýtu. Minimální tloušťka komponenty I/II: 4 mm / 4 mm |

Obecně je nutné spoje posuzovat na únavovou životnost podle Eurokódu, pokud největší rozkmit jmenovitého napětí $\Delta\sigma$ splňuje podmínku:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \quad (20)$$

kde: $\Delta\sigma_D$ je mez únavy při konstantní amplitudě

$\Delta\sigma$ je jmenovitý rozkmit napětí pro příslušnou kategorii detailu

$\gamma_{Ff} = 1$ je parciální součinitel spolehlivosti pro únavové zatížení

γ_{Mf} je parciální součinitel spolehlivosti pro únavovou pevnost (dle tabulky 5)

Tab. 5- Parciální součinitel spolehlivosti γ_{Mf} pro únavovou pevnost [19]

| Kontrola a přístupnost | „Fail-safe“ prvky | Non „Fail-safe“ prvky |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Periodická kontrola a údržba. | 1,00 | 1,15 |
| Přístupný detail spoje. | | |
| Periodická kontrola a údržba. | 1,10 | 1,20 |
| Obtížná přístupnost. | | |

Fail-safe prvky jsou součástí s omezenými důsledky porušení. Porušení jednoho prvku nezpůsobí porušení konstrukce.

Non Fail-safe prvky jsou prvky, kde místní porušení jednoho prvku má za následek rychlé porušení konstrukce.

Pokud je vyhodnocován konstrukční detail s historií různých rozkmitů napětí, je nutné toto zatěžování převést do návrhového spektra rozkmitu napětí pomocí vhodné dekompoziční metody. Touto metodou může být například metoda „Rainflow“ (metoda stékajícího deště).


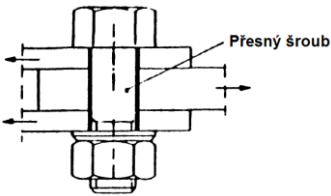
Ověření spolehlivosti konstrukce se provádí:

- vyjádřením kumulovaného poškození a jeho porovnáním s mezním poškozením,
- vyjádřením ekvivalentního rozkmitu napětí a jeho porovnáním s únavovou pevností pro daný počet cyklů.

Jak již bylo zmíněno, nýtové spoje uvedené v tabulce 4 odpovídají konstrukčním detailům v Eurokódu – viz tabulka 6. Pro ně je potřebné uvažovat jmenovitý rozkmit napětí smykového nebo tahového nebo obojí.

Při namáhání napětím o proměnné amplitudě je postup posouzení na únavu založen na Palmgren-Minerově pravidle kumulace poškození.

Tab. 6- Konstrukční detaily odpovídající nýtovým spojům [19]

| Kategorie detailu | Konstrukční detail | Popis | Požadavky |
|-------------------|---|---|--|
| 36* |  | Šrouby a svorníky namáhané tahem. Pro předpjaté šrouby závisí rozkmit napětí na předpětí a geometrii spoje. | Napětí se vypočtou pro účinnou plochu šroubu v tahu. |
| 100 (m = 5) |  | Přesné šrouby namáhané na smyk a na otláčení. | Výpočtová smyková napětí se počítají pro plochu dřívku šroubu. |

Těmto kategoriím detailu označeným číslem odpovídají konkrétní S-N křivky uvedené v Eurokódu. Křivky pro tyto dva případy jsou uvedeny na obrázku 31 a 32.

Literatura [20] tedy přiřazuje pro duté nýty kategorie detailů z Eurokódu 3, které odpovídají přesným šroubům.

V Eurokódu 3 se uvádí, že výsledky zkoušek některých detailů nesouhlasí s křivkami únavové pevnosti daných Eurokódem. Aby se zabránilo nekonzervativnímu dimenzování, jsou tyto detaily zařazeny o jednu kategorii detailu níže. Tyto detaily jsou označeny hvězdičkou. Posunutí do vyšší kategorie musí být experimentálně podloženo.

Křivky jsou vyjádřené v mocninném tvaru:

$$\sigma_a^m \cdot N = C \quad (21)$$

Nebo přepsáno do logaritmického tvaru:

$$m \cdot \log \sigma_a + \log N = \log C \quad (22)$$

S-N křivka tahového namáhání má tyto parametry:

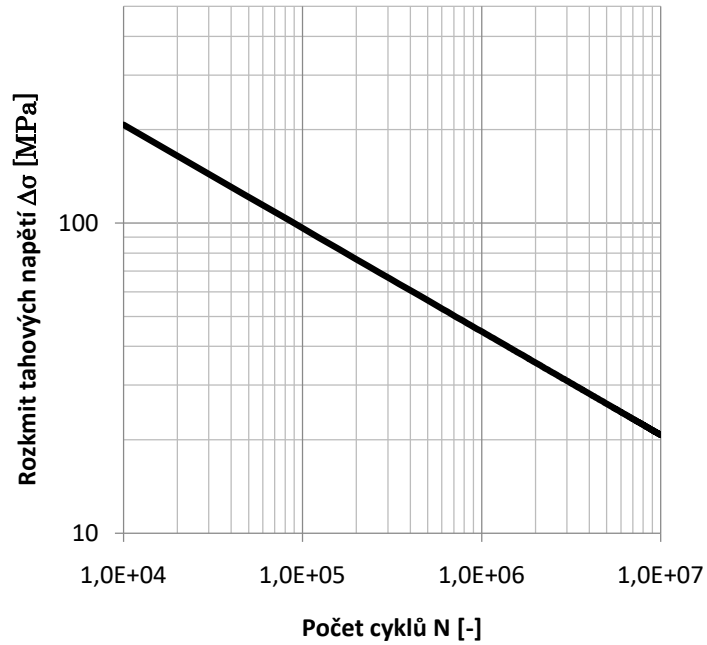
$$m = 3$$

$$\log C = 10,951$$

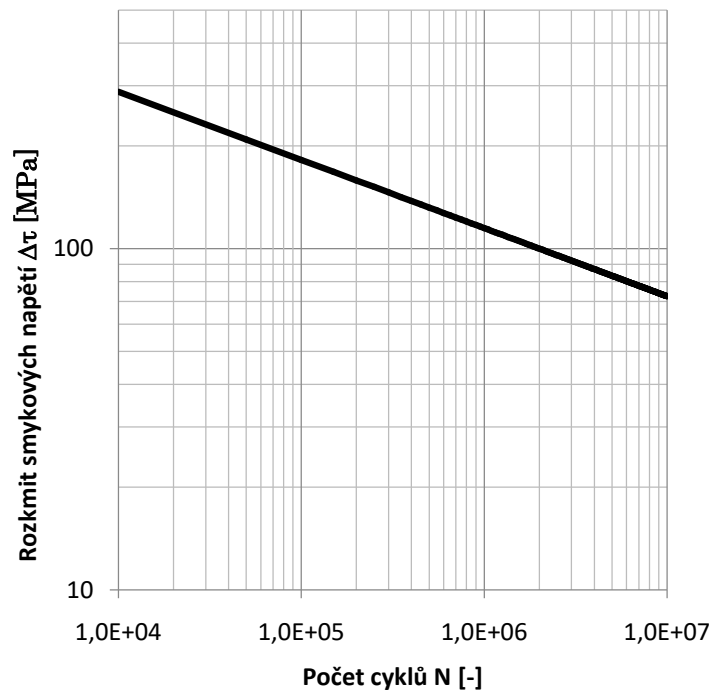
S-N křivka smykového namáhání má tyto parametry:

$$m = 5$$

$$\log C = 16,301$$



Obr. 31- S-N křivka pro rozkmit tahových napětí (kategorie detailu 36) [19]



Obr. 32- S-N křivka pro rozkmit smykových napětí (kategorie detailu 100) [19]

7.1.2.1 Kombinace rozkmitu normálových a smykových napětí

V případě kombinace normálových a smykových napětí se musí při posouzení na únavu uvažovat jejich kombinovaný účinek. Jestliže se v daném místě mění normálová a smyková napětí nezávisle, musí být složky poškození od normálových a smykových napětí posouzeny nezávisle použitím Palmgren - Minerova pravidla:

$$D_{d,\sigma} + D_{d,\tau} \leq 1 \quad (23)$$

kde $D_{d,\sigma} = \sum (n_i / N_i)$ pro rozkmit normálových napětí $\Delta\sigma_i$,

$D_{d,\tau} = \sum (n_i / N_i)$ pro rozkmit smykového napětí $\Delta\tau_i$.

Při použití ekvivalentního konstantního rozkmitu napětí, má všeobecné kritérium tvar:

$$\left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_E}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right]^5 \leq 1 \quad (24)$$

kde $\Delta\sigma_E$ je ekvivalentní konstantní rozkmit napětí, která pro daný počet cyklů vede ke stejnému poškození jako návrhové spektrum,

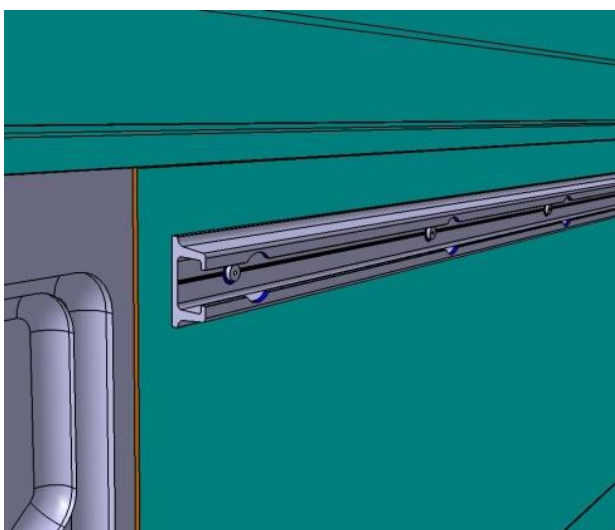
$\Delta\sigma_C$ je únavová pevnost pro příslušnou kategorii detailu pro stejný počet cyklů, jaký se použil pro určení $\Delta\sigma_E$.

8 Validace postupu výpočtu únavové životnosti nýtového spoje podle Eurokódu 3

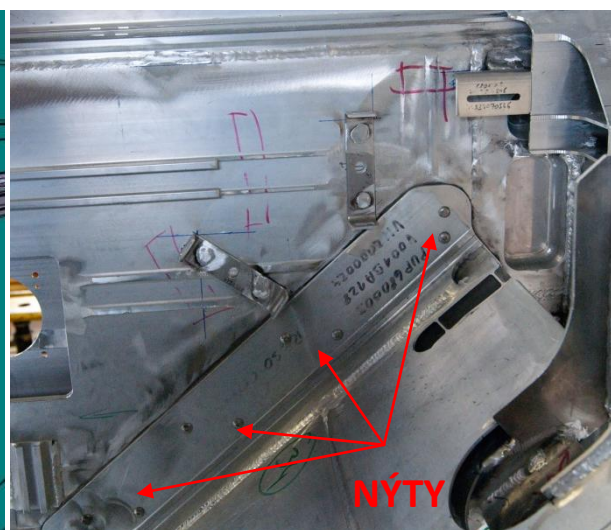
Těžištěm této diplomové práce je provedení experimentu s cílem stanovit S-N křivky ve smyku a vtahu dutého nýtu HUCK MAGNA-LOK aplikovaného v rámci typického konstrukčního uzlu používaného u kolejových vozidel. Pomocí únavových zkoušek jsou stanoveny bezpečné návrhové S-N křivky ve smyku a vtahu zkoumaného nýtového spoje. Dosažené hodnoty jsou porovnány s hodnotami určenými pomocí Eurokódu 3. Trvalou mez únavy lze podle normy EN 12663-1 [22] při vyhodnocování pevnosti a únavové životnosti kolejových vozidel považovat na bázi 10^7 cyklů. Na základě zjištěných dat je rozhodnuto, zda je vhodné k výpočtu únavové pevnosti využívat postup podle Eurokódu 3 a je sepsána metodika modelování a vyhodnocování únavové pevnosti dutých nýtů MAGNA-LOK použitých na hrubých stavbách kolejových vozidel.

8.1 Experimentální stanovení únavové životnosti nýtového spoje

Jak již bylo uvedeno, předmětem experimentu je dutý nýt MAGNA-LOK. Tento typ nýtu se využívá na hrubých stavbách kolejových vozidel například k uchycení C-drážek na bočnice vozidla a následné uchycení přístrojů (obrázek 33), k uchycení šikmého konce horní podlahy podlahy u dvoupatrových vozů (obrázek 34) a podobně.



Obr. 33- Uchycení C-drážky pomocí nýtů MAGNA-LOK



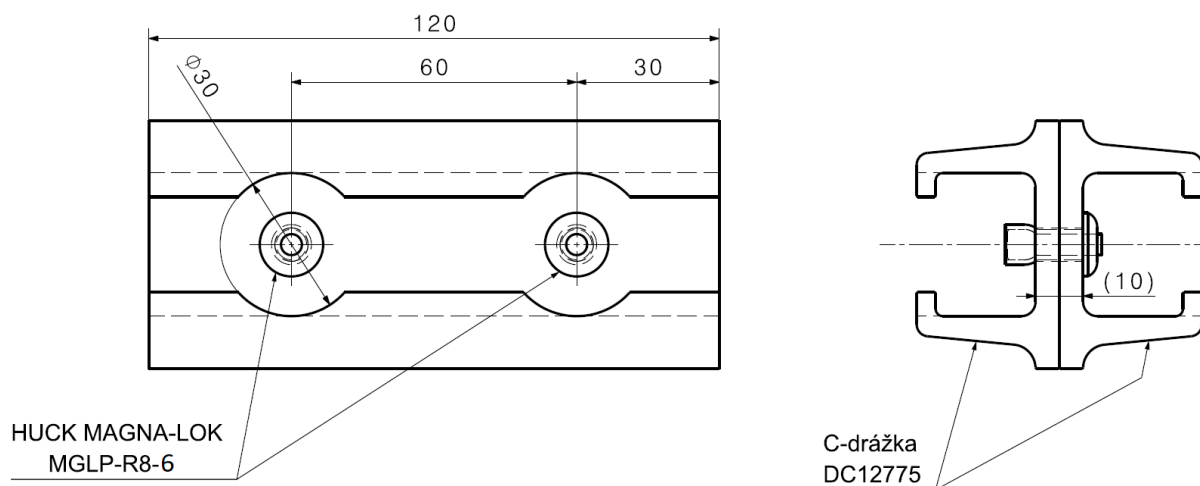
Obr. 34- Uchycení šikmého konce horní podlahy pomocí nýtů MAGNA-LOK

8.1.1 Zkušební vzorek

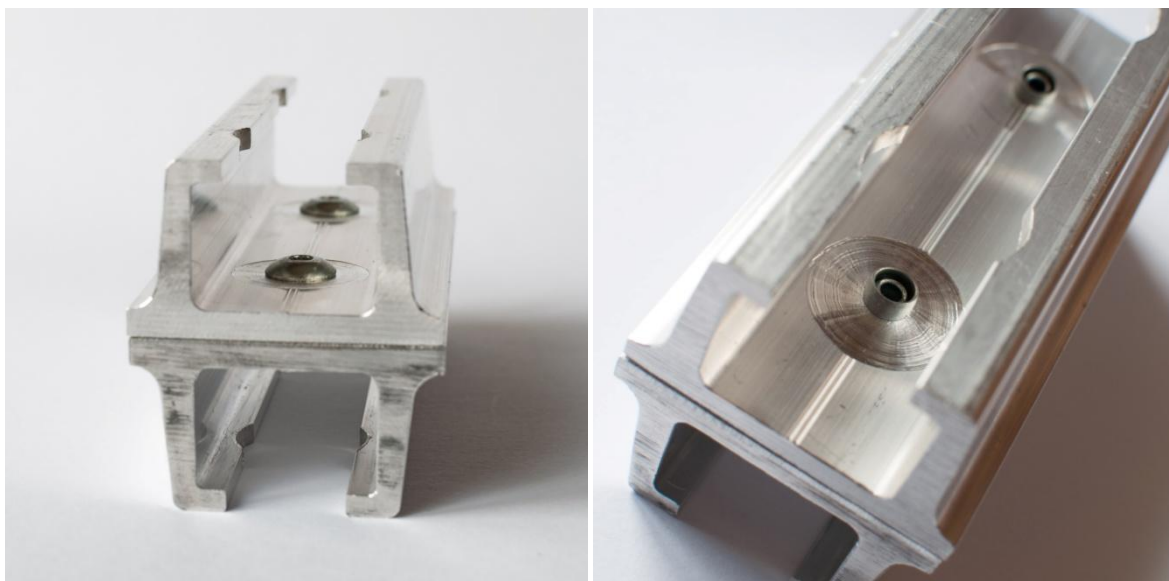
Konstrukce zkušební vzorku vychází ze způsobu, jakým jsou nýty MAGNA-LOK používány na hrubých stavbách kolejových vozidel. Při návrhu tvaru zkušební vzorku bylo cílem přiblížit se podobným podmínkám jak výrobním a montážním, tak i pracovním (zatěžování nýtu a tuhost spojovaných dílů).

Zkušební vzorek se skládá z:

- dvou hliníkových C-drážek DC12775, materiál 6005A, tloušťka spojovaných plechů $t_1 = t_2 = 5$ mm
- dvou dutých trhacích nýtů HUCK MAGNA-LOK MGLP-R8-6, materiál ocel.



Obr. 35 - Výkres zkušební vzorku pro únavové zkoušky



Obr. 36 - Zkušební vzorek

Nýt HUCK MAGNA-LOK MGLP-R8-6 je ocelový trhací nýt s únosností:

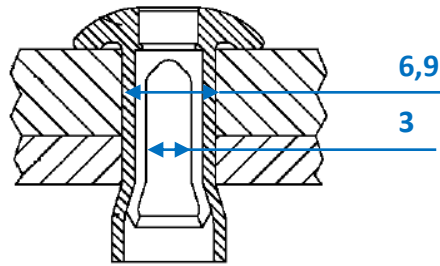
$$F_{\text{smyk, dovoleny}} = 11120 \text{ N [21]}$$

$$F_{\text{tah, dovoleny}} = 8230 \text{ N [21]}$$

Svěrná tloušťka vhodná pro spojování tímto nýtem je 2,0 – 9,5 mm. Spojovaná tloušťka komponent zkušebního vzorku je 10 mm. Bohužel zkušební vzorky byly vyrobeny s touto chybou a je otázkou, jak ovlivní výsledky únavových zkoušek. Díry pro nýty musí být vyrobeny v toleranci 6,6 – 6,9 mm. Jak se ukázalo po rozebrání některých zkušebních vzorků, ne vždy je tato tolerance dodržena.

| Ø nýtu nom. | | Popis pro objednávku | Délka dířku D max. | Délka nýtu E max. | | Montáž | | Tažná hlava | | |
|-------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|--------|-------|----------------|--|--------------------------------|
| | | | | | | | | | Nýtovací pistole | |
| | | | | | | [N] | [N] | Pneum./hydr. | | |
| | | 2.0 – 9.5 | 14.22 | 24.64 | | | | | | |
| 6.4 | 8.9 – 15.9 | MGLP-R8-10 | 20.57 | 30.99 | 6.6 – 6.9 | | 8.230 | 11.120 | 2025L/2480L ¹⁾ LH-224/ --- 202V | 99-3305L 99-3305 99-3305 |
| | 2.0 – 15.9 | MGLP-R8-E | 20.57 | 35.69 | | | | | | |

Obr. 37 - Parametry nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6



Obr. 38- Rozměry nýtu po montáži MAGNA-LOK MGLP-R8-6

8.1.2 Zkušební stroj

Při únavových zkouškách byl použit rezonanční pulsátor Amsler HPF10, který dokáže v tahu i tlaku generovat sílu až 100 kN. Stroj pracuje na rezonanční frekvenci řetězce siloměr-spodní čelist-upínací přípravek-zkušební vzorek-upínací přípravek-horní čelist s přidavnými hmotami a pružným uložením. Buzení je pomocí elektromagnetu. Frekvence zkoušky je měnitelná přidáváním či odebráním hmot a pohybuje se mezi 60 až 110 Hz. Díky motorizaci posuvu příčnicku je na stroji možné provádět i nesymetrické únavové zkoušky, kdy je vzorek zatížen středním napětím.



Obr. 39 - Zkušební stroj Amsler HPF10

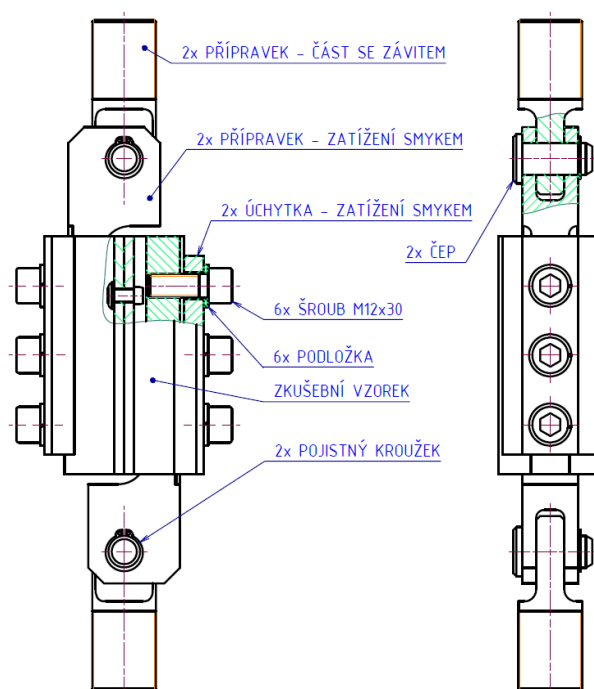
Zkušební vzorek je možné do stroje upnout buď našroubováním do kamenů různé velikosti, jde-li o vzorek ve tvaru tyče, nebo upnutím do svěrných čelistí, jde-li o plech či pásovinu. Pokud je nutné zatěžovat nestandardní zkušební vzorek jako v

našem případě, musí být vyroben přípravek, který je možné upnout do stroje a který přenáší požadované zatížení do zkušební vzorku.

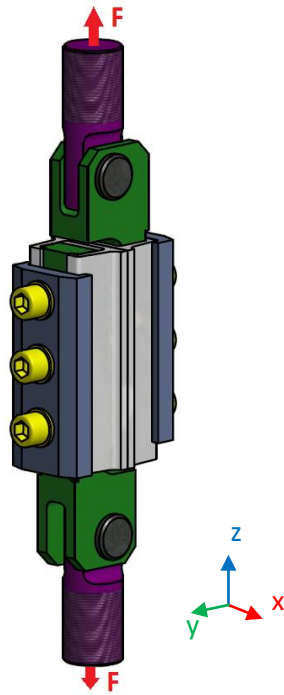
8.1.3 Přípravek pro zatížení smykem

Pro vyvození smykového zatížení nýtů ve zkušebních vzorcích, byl navržen a vyroben přípravek, který využívá tvaru C-drážek podobně jako kameny, které se vkládají do C-drážek a skrze které se na ně upevňují další části konstrukce.

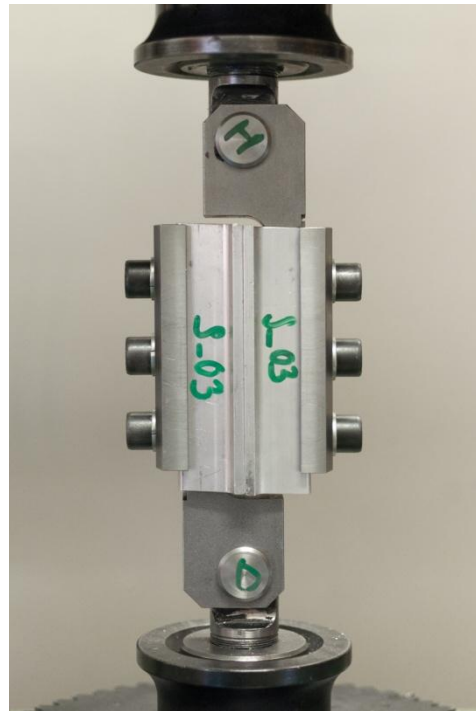
Na obrázku 40 je schematicky zobrazená sestava přípravku a zkušební vzorku pro zatížení smykem. Detailnější návrhový výkres celé sestavy je v příloze 2.



Obr. 40- Sestava přípravku a zkušební vzorku pro zatížení smykem



Obr. 41 - 3D model sestavy pro zatížení smykem



Obr. 42 - Zkušební vzorek upnutý do stroje

8.1.3.1 Statický výpočet přípravku pro zatížení smykem

Při dimenzování přípravku pro uchycení zkušebního vzorku byla provedena řada pevnostních statických výpočetních MKP analýz celé této sestavy, dokud nebyly nalezeny optimální rozměry přípravku.

Zatížení modelu přípravku vycházelo z dovolené statické smykové síly na nýt, která je daná výrobcem nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6. To vychází z předpokladu, že se zatížení při únavových zkouškách bude pohybovat na nižších hladinách, než je dovolená statická smyková pevnost nýtu a proto je přípravek automaticky navržen s potřebou rezervou.

$$F_{\text{smyk, dovoleny}} = 11120 \text{ N [21]}$$

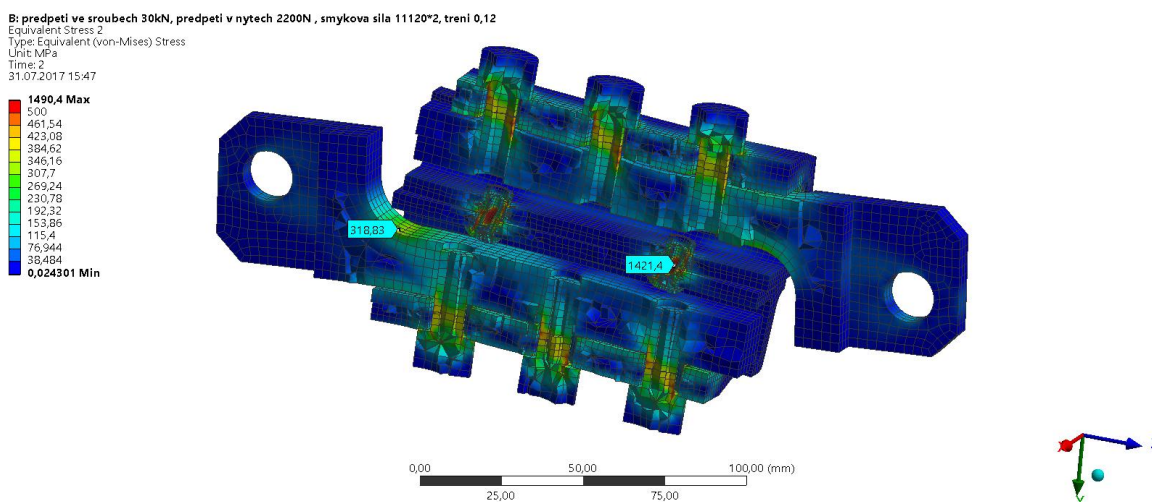
$$F_{\text{tah, zatizeni}} = 2 \times 11120 = 22240 \text{ N (na zkušebním vzorku jsou 2 nýty)}$$

Okrajové podmínky byly voleny tak, aby v maximální míře odpovídaly skutečnosti při únavových zkouškách. Plochám otvoru pro dolní čep byl zamezen pohyb do všech stupňů volnosti kromě rotace kolem osy x , plochám otvoru pro horní čep byl povolen pohyb pouze v směru osy z a rotace kolem osy x . Na tyto plochy byla také aplikována síla F_{zatizeni} . Předpětí ve šroubech vychází z předepsaného utahovacího momentu 90 Nm pro použité šrouby [23]. Tomuto

utahovacímu momentu odpovídá předpětí zhruba 54 kN. Chyba momentového klíče při utahování se pohybuje běžně kolem 25%. S ohledem na bezpečnost proti proklouznutí zkušební vzorku a přípravku byla nastavena výpočtová hodnota předpětí ve šroubech pouze na 30 kN. Při procesu nýtování vzniká v trhacím nýtu předpětí, které následně spojované prvky přitlačuje k sobě. Toto předpětí zhruba odpovídá síle, při které se v průběhu nýtování odtrhne trn. Závisí na dalších parametrech, jako je tloušťka spojovaných součástí, jejich materiál apod. Pro výpočet byla zvolena hodnota předpětí v nýtu 2,2 kN, která je uvedena v literatuře [7].

Při výpočtu nebylo uvažováno elasto-plastické chování materiálu. Na obrázku 43 je možné pozorovat, že kritické místo přípravku je v zaoblení, kde se přípravek rozšiřuje do místa pro čep a uchycení další části sestavy. Napětí v tomto místě dosahuje hodnoty 318 MPa. S ohledem na to, že se při únavových zkouškách bude zatížení pohybovat na nižších hladinách, byl přípravek z pevnostního hlediska shledán jako bezpečný k provozu.

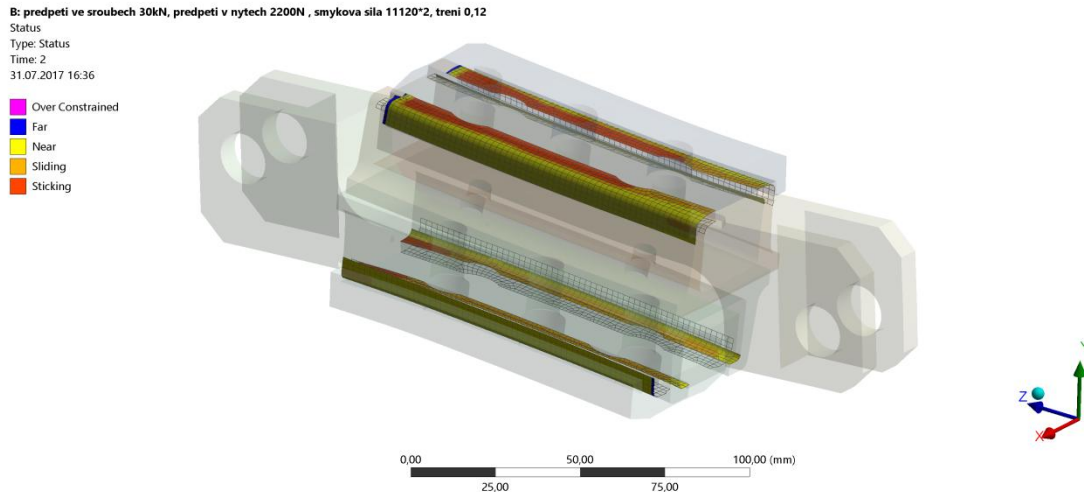
Z výsledků posuvů vyplývá, že nýty kvůli ohybu přípravku nejsou zatěžovány pouze smykem, ale ještě přídavným ohybem. Smyk tvoří přibližně 95% a tah 5%. Tento jev je vidět na obrázku 43, kde je pole posuvů zvětšeno 28x.



Obr. 43- Statický výpočet sestavy pro zkoušku smykem

Jak je patrné z obrázku 40, síla je do zkušební vzorku přenášena skrze tření mezi C-drážkami, úchytkami a dříky. Úchytky jsou přitlačovány šrouby, jež jsou zašroubovány do přípravku. Statickým výpočtem bylo zkontrolováno, že předepsaný utahovací moment šroubů 90 Nm, který vyvodí předpětí minimálně 30 kN, je dostatečný k tomu, aby nedocházelo k prokluzu mezi zkušebním

vzorkem a přípravky. Na obrázku 44 můžeme pozorovat, že kontaktní plochy v místech přenosu zatížení jsou ve stavu *Sticking* – tedy nedochází k žádnému prokluzu. Takto navržené přípravky pro zatížení smykem jsou tedy schopné k provozu.

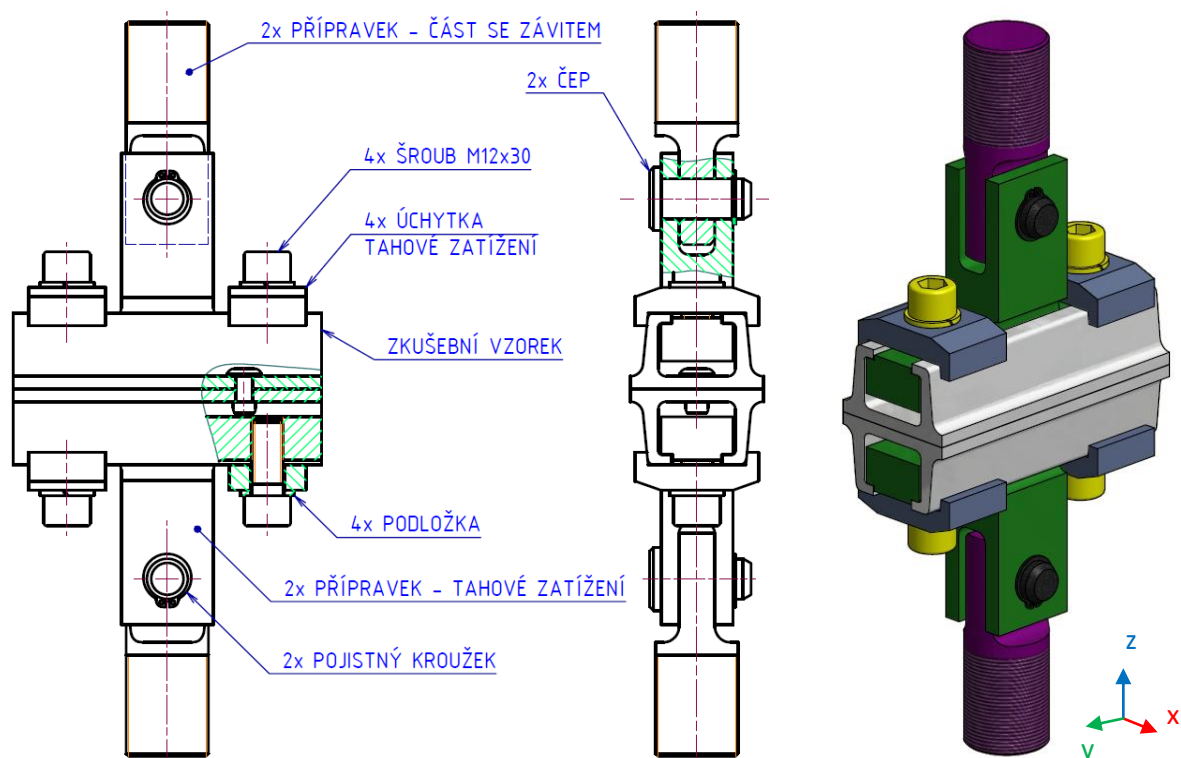


Obr. 44- Status kontaktních ploch

8.1.4 Přípravek pro zatížení tahem

Podobným způsobem jako byl navržen přípravek pro zatížení smykem, byl navržen přípravek pro vyvolání tahového zatížení nýtů. Najít vhodnou geometrii přípravku bylo v tomto případě jednodušší, protože uchycení zkušební vzorku na rozdíl od případu smyku leží v rovině zatížení – nedochází tedy k žádnému přidavnému ohybu. Nebylo také nutné kontrolovat, zda na kontaktních plochách nedochází k prokluzu mezi vzorkem a přípravkem.

Jakým způsobem byl přípravek navržen, je možné pozorovat na následujících obrázcích. Detailnější návrhový výkres celé sestavy pro zatížení tahem je v příloze 3.



Obr. 45-Sestava přípravku a zkušební vzorku pro zatížení tahem

8.1.4.1 Statický výpočet přípravku pro zatížení tahem

Pevnostní výpočet přípravku pro zatížení tahem proběhl velmi podobně, jako výpočet přípravku zatížení smykem. Okrajové podmínky zůstaly téměř nezměněny. Změna nastala pouze v zatěžovací síle, která odpovídá statickému dovolenému zatížení nýtu v tahu. S využitím symetrie byla vymodelována pouze polovina celé sestavy.

$$F_{\text{tah, dovoleny}} = 8230 \text{ N [21]}$$

$$F_{\text{tah, zatizeni}} = 8230 \text{ N (na modelu zkušební vzorku je jeden nýt)}$$

Výsledky statického výpočtu můžeme pozorovat na obrázku 46. Napětí v nýtu dosahuje hodnoty 301 MPa, což je v dobré shodě analytickým výpočtem:

$$\sigma_{\text{tah}} = \frac{F_{\text{tah, zatizeni}}}{A_{\text{nýt}}} = \frac{8230}{\frac{\pi}{4} \cdot (6,6^2 - 3^2)} = 304 \text{ MPa} \quad (25)$$

Z obrázku je také patrné, že ve šroubech, které jsou předepjaty silou 30 kN, je větší napětí než v nýtu. Toto napětí ale bude zůstat přibližně konstantní i v průběhu únavových zkoušek, kdy bude dynamické zatížení přenášeno pouze nýty.

B: předpetí ve sroubech 3kN, předpetí v nýttech 2200 N,tahova síla 8230, trení 0,12

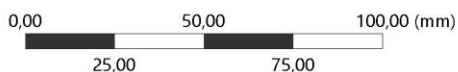
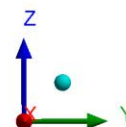
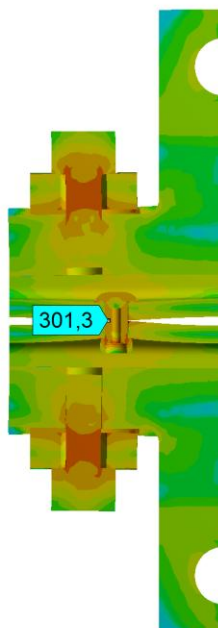
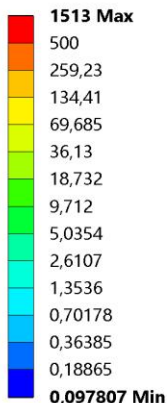
Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 2

31.07.2017 18:12



Obr. 46 -Statický výpočet sestavy pro zkoušku tahem

Ostatní části přípravku jsou zatíženy pouze minimálním napětím a z hlediska únavové životnosti jim není třeba věnovat pozornost. Na základě statického výpočtu tedy bylo rozhodnuto, že takto navržené přípravky pro zatížení nýtů tahem, je možné bezpečně provozovat.

8.1.5 Experimentální měření

Při únavových zkouškách nýtových spojů bylo cílem naměřit na třech různých hladinách zatížení alespoň 5 zkušebních vzorků a získaná data statistiky vyhodnotit a sestavit bezpečnou S-N křivku smykového a tahového zatěžování nového spoje HUCK MAGNA-LOK MGLP-R8-6. Zatěžování probíhalo v míjivém režimu zatěžování $R = 0$. Při tomto režimu zatěžování nedochází ke změně smyslu působení zatěžovací síly. Změna smyslu zatěžování by kvůli vůli v čepch mohla vést k rozkmitávání celé soustavy. Nicméně i v tomto režimu se rozkmitávání při vyšších zatíženích objevovalo a bylo by vhodnější zatěžovat pulzujícím zatěžováním, kdy dolní hodnota síly neklesá k nule. Horní hodnota zatěžovací síly odpovídala celému rozkmitu síly. Při sestavování S-N křivek bylo pracováno s rozkmitem sil (napětí) nikoliv s amplitudou napětí, jak je obecně

zvykem. Důvodem je to, že v Eurokódu 3, se kterým budou výsledky porovnávány, se pracuje s rozkmitem napětí.

K dispozici bylo při experimentu 50 zkušebních vzorků. Tedy 25 na hledání S-N křivky ve smyku a 25 na hledání S-N křivky v tahu. Z počátku obou zatěžovacích případů bylo nejdříve nutné najít hladiny zatěžování, kdy v nýtovém spoji dojde k poruše v rozmezí 10^4 až 10^7 cyklů.

8.1.5.1 Zatěžování smykem

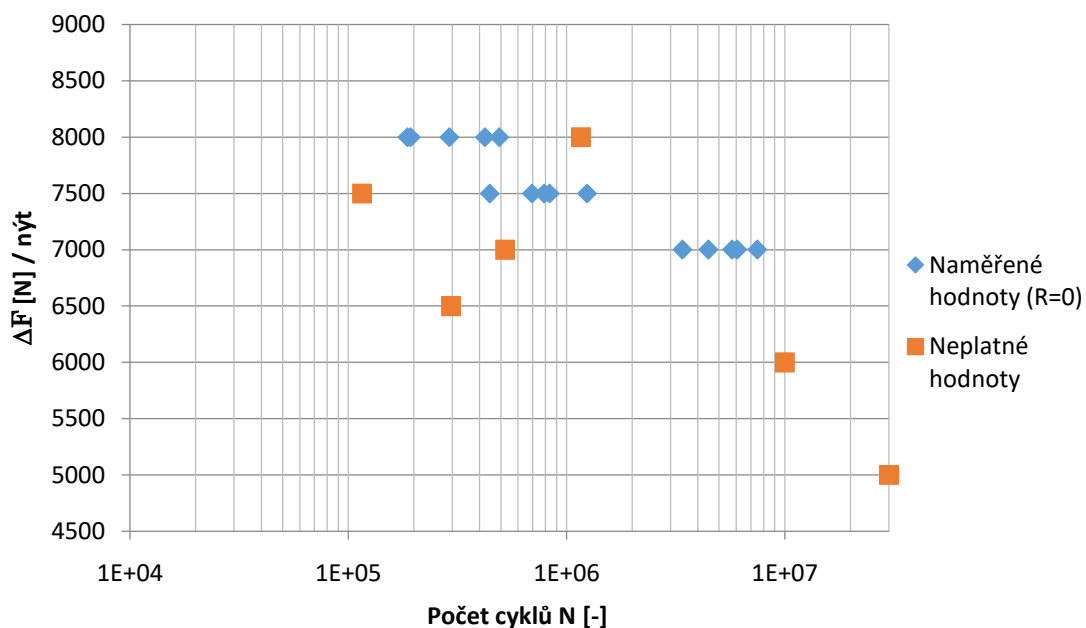
V tabulce 7 jsou uvedena data ze zkoušek v pořadí, v jakém byly zkoušky prováděny. Po naměření prvních 4 vzorků byly určeny 3 hladiny zatěžování pro sestrojení S-N křivky:

- 7,0 kN / nýt – 6 vzorků
- 7,5 kN/ nýt – 6 vzorků
- 8,0 kN/ nýt – 6 vzorků

Tab. 7- Data z únavových zkoušek pro zatížení smykem

| Vzorek | ΔF [kN] / nýt | N [cyklů] | f [Hz] | Poznámka |
|--------|-----------------------|----------------|--------|--|
| 1 | 4 | 10^7 | 84 | Překročen stanovený limit cyklů |
| 2 | 5 | $3 \cdot 10^7$ | 84 | Překročen stanovený limit cyklů |
| 3 | 6,5 | 295163 | 84 | Neplatný vzorek – mimo běžný rozptyl hladiny 6,5 N – otvory pro nýty mimo dovolený rozsah (6,6 – 6,9 mm) |
| 4 | 6,0 | 10^7 | 84 | Překročen stanovený limit cyklů |
| 5 | 7,0 | 4467914 | 84 | |
| 6 | 7,5 | 694417 | 84 | |
| 7 | 8,0 | 290835 | 84 | |
| 8 | 7,0 | 3392273 | 84 | |
| 9 | 8,0 | 422649 | 84 | |
| 10 | 8,0 | 193288 | 84 | |
| 11 | 8,0 | 186776 | 84 | |
| 12 | 8,0 | 1162562 | 84 | Neplatný vzorek – mimo běžný rozptyl hladiny 8,0 kN |
| 13 | 7,5 | 115495 | 84 | Neplatný vzorek – mimo běžný rozptyl hladiny 7,5 kN – otvory pro nýty $d_1 = 7,1$ mm, $d_2 = 7,2$ mm – mimo dovolený rozsah (6,6 – 6,9 mm) |
| 14 | 7,5 | 788199 | 84 | |
| 15 | 7,0 | 7471025 | 84 | |
| 16 | 7,5 | 444590 | 84 | |
| 17 | 7,5 | 1239500 | 84 | |
| 18 | 7,0 | 522514 | 84 | Neplatný vzorek – mimo běžný rozptyl hladiny 7,0 kN – ostrý otřep na okraji jedné z děr v místě kontaktu C-drážek |
| 19 | 7,5 | 836898 | 84 | |
| 20 | 7,0 | 6054335 | 84 | |
| 21 | 7,0 | 5728045 | 84 | |
| 22 | 8,0 | 491627 | 84 | |

Při následném vyhodnocování naměřených dat byly podrobeny zkoumání nýtové spoje, které vykazovaly neobvyklou hodnotu počtu cyklů do poruchy oproti ostatním vzorkům na stejné hladině. Některé z nich – především ty, u kterých nastala porucha násobně dříve než u ostatních – byly vyřazeny z dat pro sestavení bezpečné S-N křivky – viz tabulka 7. Na každou zatěžovací hladinu poté zbyla data z pěti zkušebních vzorků.



Obr. 47 - Naměřené hodnoty – MAGNA-LOK MGLP-R8-6 – smyk (R = 0)

Při smykovém zatěžování nýtových spojů se objevovaly dvě různé typy poruch. Tyto poruchy jsou zobrazeny a popsány v tabulce 8. Na většině zkušebních vzorků se jednalo o poruchu číslo 1. Porucha číslo 2 se objevila v případech, kdy nýtový spoj nebyl správně vyroben – díry pro nýty byly větší, než je daná tolerance velikosti díry (6,6 – 6,9 mm).

Tab. 8 - Typy poruch nýtových spojů při zatěžování smykem



- Iniciací a šíření únavové trhliny skrz plášť i jádro nýtu s následným statickým lomem.
- Nejobvyklejší porucha při smykovém zatěžování

2



- Iniclace a šíření únavové trhliny skrz plášť nýtu s následným vysunutím nýtu z otvoru.
- Oba otvory vyrobeny mimo dovolenou toleranci

8.1.5.2 Zatěžování tahem

Únavové zkoušky zatěžování tahem probíhaly obdobně jako zatěžování smykem. Nejprve byly nalezeny vhodné hladiny zatěžování. Při tahových únavových zkouškách se ukázalo, že při určitých vyšších zatíženích, se nýty začaly okamžitě po aplikaci zatížení vytahovat z otvorů – viz porucha číslo 1 v tabulce 10. Při malém snížení zatížení naopak nýtové spoje dosahovaly velmi vysoké únavové životnosti. Data z únavové zkoušky jsou uvedena v tabulce 9 v pořadí, v jakém byla naměřena.

Po naměření několika prvních vzorků, byly zvoleny 2 hladiny zatěžování:

- 5,0 kN / nýt – 6 vzorků
- 4,5 kN / nýt – 6 vzorků

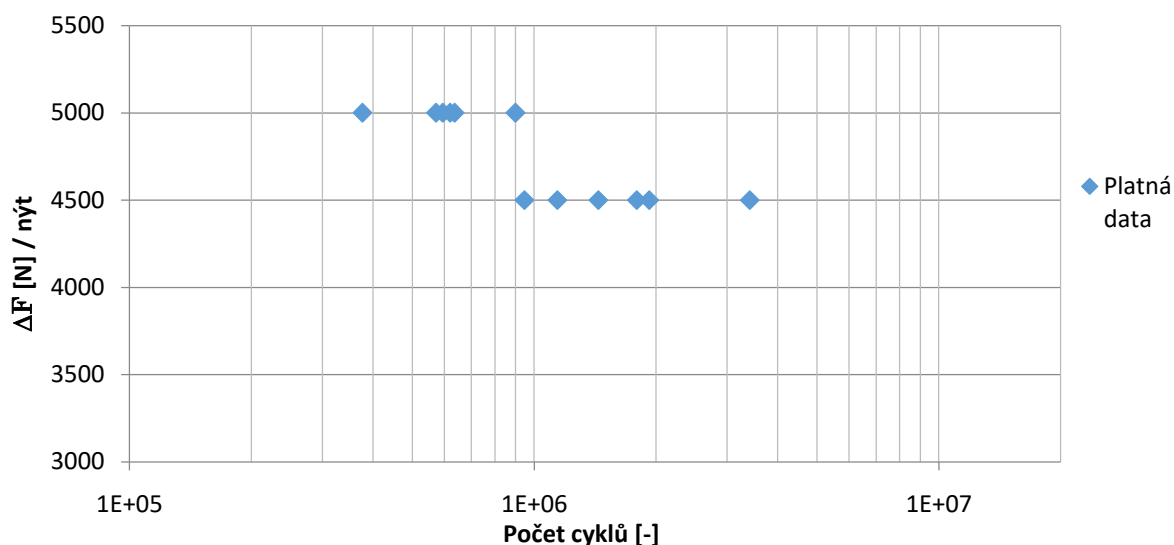
Oproti měření smykové únavové životnosti nýtových spojů se při měření v tahu na obou zatěžovacích hladinách naměřil takový počet vzorků, aby jich bylo alespoň 6 platných pro statistické vyhodnocení.

Tab. 9- Data z únavových zkoušek pro zatížení tahem

| Vzorek | ΔF [kN] / nýt | N [cyklů] | f [Hz] | Poznámka |
|--------|--------------------------|-----------|--------|---|
| 1 | 4,0 | 3697024 | 70 | Tato hladina zatěžování nebyla následně použita |
| 2 | 5,0 | 376099 | 70 | |
| 3 | 5,0 | 0 | 70 | Neplatný vzorek – nýty se vysunuly, $d = 7$ mm – mimo povolenou toleranci. Viz porucha číslo 1 v tabulce 10 |
| 4 | 4,0 | 10^7 | 70 | Překročen stanovený limit cyklů |
| 5 | 4,5 | 3409676 | 70 | |
| 6 | 4,5 | 1792380 | 70 | |
| 7 | 4,25 | 10^7 | 70 | Překročen stanovený limit cyklů |
| 8 | 4,75 | 1423501 | 70 | Neplatný vzorek – tato hladina zatěžování nebyla následně použita |
| 9 | 4,75 | 0 | 70 | Tato hladina zatěžování nebyla následně použita |
| 10 | 4,5 | 1141260 | 70 | |
| 11 | 4,75 | 1226032 | 70 | Tato hladina zatěžování nebyla následně použita |
| 12 | 4,5 | 1440692 | 70 | |
| 13 | 5,0 | 0 | 70 | Neplatný vzorek – nýty se vysunuly, $d = 7,5$ mm – mimo povolenou toleranci |
| 14 | 5,0 | 635830 | 70 | |
| 15 | 5,0 | 0 | 70 | Neplatný vzorek – nýty se vysunuly, $d = 7,2$ mm – mimo povolenou toleranci |
| 16 | 5,0 | 112098 | 70 | Neplatný vzorek – mimo běžný rozptyl hladiny 5.0 kN – utržená hlava nýtu. Viz porucha číslo 4 v tabulce 10 |
| 17 | 5,0 | 619941 | 70 | |
| 18 | 4,5 | 1923324 | 70 | |
| 19 | 4,5 | 946279 | 70 | |
| 20 | 5,0 | 899129 | 70 | |
| 21 | 5,0 | 572640 | 70 | |
| 22 | 5,0 | 594647 | 70 | |

Poměrně velké množství nýtových spojů se na hladině 5,0 kN/nýt porušilo vytažením nýtu z otvoru ve spojovaných komponentách a nebylo možné provést únavovou zkoušku. Všechny tyto zkušební vzorky vykazovaly stejný nedostatek – otvory pro nýty byly vyrobeny větší, než je povolená tolerance. Naopak zkušební vzorky, které vykazovaly nejvyšší únavovou životnost na dané hladině, měly otvory vyrobené na spodní hranici povolené tolerance 6,6 – 6,9 mm. Z naměřených dat tedy vyplývá, že stěžejní faktor pro maximalizaci únavové

životnosti při namáhání tahem, je dodržení správného výrobního postupu a to především dodržení tolerance rozměru díry pro nýt. V nejlepším případě vyrobít otvor pro nýt na spodní hranici tolerance.



Obr. 48 – Naměřené hodnoty – MAGNA-LOK MGLP-R8-6 – tah (R = 0)

Během únavových zkoušek se objevovaly čtyři různé typy poruch uvedených v tabulce 10.

Tab. 10- Typy poruch nýtových spojů při zatěžování tahem



- Vysunutí nýtu z otvoru komponenty na straně závěrné hlavy – vysunutí jádra nýtu a plastická deformace závěrné hlavy
- Statická porucha důsledkem nedodržení tolerance díry pro nýt
- 23 % vzorků s touto poruchou (pouze na nejvyšší hladině zatížení)

2



- Iniclace a šíření únavové trhliny skrz plášť i jádro nýtu s následným statickým lomem.
- Nejobvyklejší porucha při tahovém zatěžování, pokud byly díry pro nýty vyrobeny v toleranci
- 55 % vzorků s touto poruchou

3



- Iniclace a šíření únavové trhliny skrz plášť nýtu s počátkem pod závěrnou hlavou (většinou nesražené hrany) s následným statickým lomem v místě kontaktu spojovaných komponent
- 13 % vzorků s touto poruchou
- Otvory vyrobeny na horní hranici tolerance

4



- Iniclace a šíření únavové trhliny pod hlavou nýtu s následným statickým lomem
 - Otvor pro nýt nebyl vyroben kolmo ke spojované komponentě (neproměřeno – pouze vizuální kontrola) → vznik přídavného ohybu.
 - 9 % vzorků s touto poruchou
-

8.1.6 Statistické vyhodnocení naměřených dat – sestrojení S-N křivek

Jak je uvedeno v předchozích kapitolách, z naměřených dat byly vybrány vzorky, které jsou vhodné ke statistickému vyhodnocení. Na každé hladině byl stanoven výběrový aritmetický průměr (26) (26) a výběrová směrodatná odchylka (27). Pro sestrojení S-N křivky pro danou pravděpodobnost porušení, byl použit Gaussův model normálního rozdělení pro $\log(N)$. Postup vyhodnocení statistických dat proběhl pomocí literatury Dynamická pevnost a životnost [8] a podle přednášek ze stejnojmenného předmětu [24].

$$\bar{x} = \overline{\log(N)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

kde n je počet vzorků

$$x_i = \log(N_i)$$

$$\hat{S} = K \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

kde K je součinitel počtu vzorků

Gaussovo normální rozdělení je model rozdělení četnosti náhodné veličiny. Často se využívá v technické praxi pro jeho jednoduchost. Distribuční funkce, která každému reálnému číslu x_0 přiřazuje pravděpodobnost P , že náhodná veličina x bude mít hodnotu menší či rovnou než toho reálné číslo x_0 , je pro Gaussovo normální rozdělení definovaná podle vztahu (28). [24]

$$F(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} dx \quad (28)$$

kde S je směrodatná odchylka (udávající rozptyl)

μ je střední hodnota

x je náhodná veličina

Hustota pravděpodobnosti je poté definována podle vztahu (29)

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} \quad (29)$$

Protože integrál ve výrazu (29) nelze vyjádřit pomocí elementárních funkcí, stanovují se hodnoty distribuční funkce pomocí tzv. normované náhodné veličiny

$$u = \frac{x - \mu}{S} \quad (30)$$

Distribuční funkce se poté převede do normovaného tvaru (31).

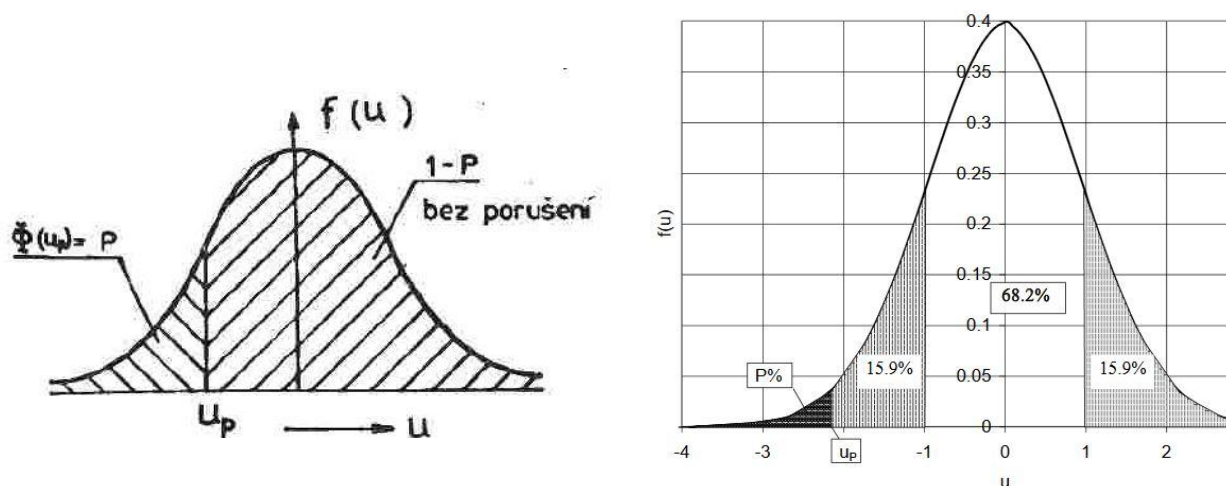
$$\Phi(u) = P(u < u_p) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} dx \quad (31)$$

Tato funkce je tabelovaná. Pomocí tabulek nebo excelovských funkcí pak lze pro danou pravděpodobnost určit daný kvantil a naopak. Ze vztahu pro normovanou veličinu a pro danou pořadovou pravděpodobnost pak lze dopočítat podle (32) hodnotu náhodné veličiny.

$$u_p = \frac{x_p - \mu}{S} \quad (32)$$

$$\Rightarrow x_p = S \cdot u_p + \mu$$

Vztah mezi zmíněnými pojmy osvětluje obrázek 49.



Obr. 49- Závislost pravděpodobnosti výskytu na normované náhodné veličině [8] [24]

Hladina spolehlivosti α určující pravděpodobnost s jakou je očekáváno, že určený parametr rozdělení (počet cyklů do poruchy) se bude vyskytovat ve vypočteném intervalu pravděpodobnosti porušení, byla zvolena 90 %. [24]

Riziko $\beta = 100 - \alpha = 10 \%$

Vztahem (32) jsme schopni dopočítat (odhadnout – nemáme nekonečný počet zkušebních vzorků) hodnotu náhodné veličiny (počet cyklů do poruchy) v daném místě pořadové pravděpodobnosti. Tento odhad musíme rozšířit o informaci, jak je spolehlivý:

$$k_{P,\beta} = \frac{u_p + u_\beta \sqrt{\frac{1}{n} \left[1 - \frac{u_\beta^2}{2(n-1)} \right]} + \frac{u_p^2}{2(n-1)}}{1 - \frac{u_\beta^2}{2(n-1)}} \quad (33)$$

$$x_{P,\beta} = \bar{x} + k_{P,\beta} \cdot \hat{S}$$

V následujících tabulkách jsou stručně uvedeny výsledky ze statistického vyhodnocení naměřených dat aplikováním výše uvedených vztahů. Pro vyhodnocení a nalezení bezpečné S-N křivky byly užity parametry:

$$P = 2,7 \%$$

$$u_p = -1,9268$$

$$\beta = 10 \%$$

$$u_\beta = -1,2816$$

Únavové křivky dané Eurokódem 3 mají danou pravděpodobnost porušení $P = 2,7 \%$, proto i pro naše únavové křivky volíme $P = 2,7 \%$.

Tab. 11 - Statistické vyhodnocení dat na souboru smykově namáhaných vzorků

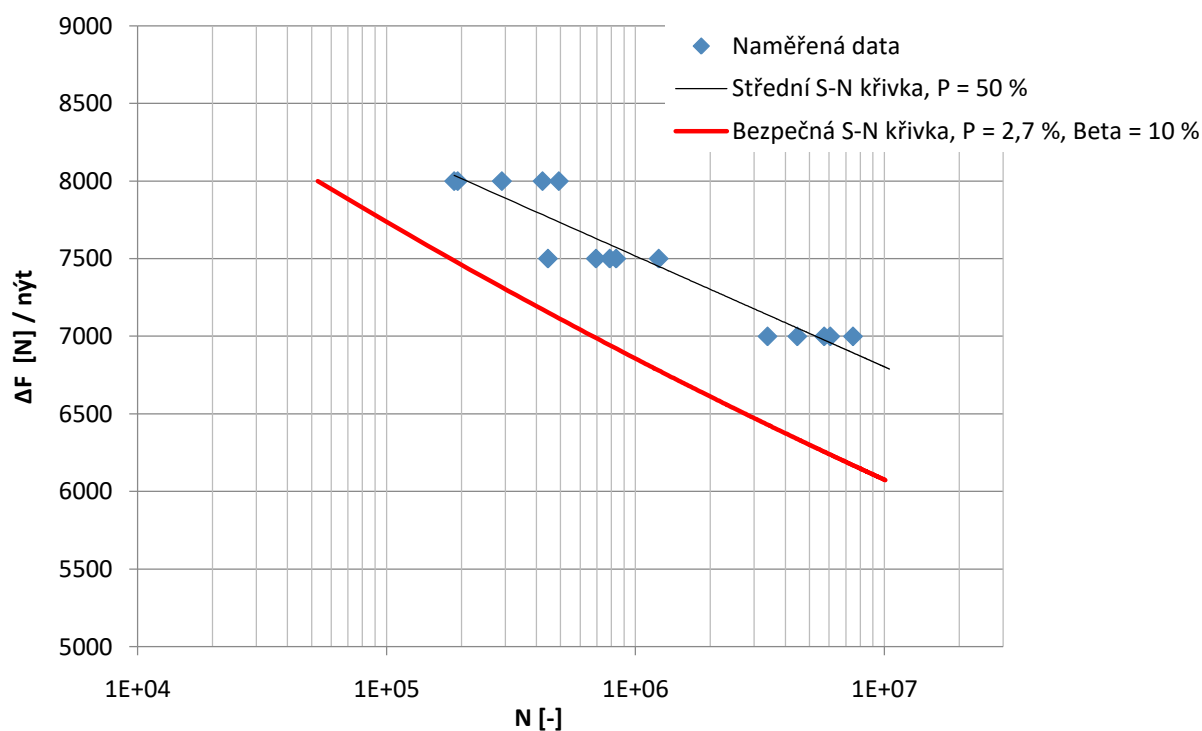
| Zatěžovací hladina ΔF [kN] / nýt | Počet vzorků n [-] | Střední hodnota \bar{N} [-] | $\text{Log}(\bar{N})$ [-] | Směrodatná odchylka S [-] | $X_{P,\beta}$ [-] | $N_{P,\beta}$ [-] |
|--|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 7,0 | 5 | 5233710 | 6,719 | 0,1387 | 6,1086 | 1607508 |
| 7,5 | 5 | 759323 | 5,880 | 0,1686 | 5,1386 | 180794 |
| 8,0 | 5 | 293601 | 5,468 | 0,2013 | 4,0798 | 52905 |

Například při rozkmitu síly 8,0 kN tedy existuje 10% riziko, že po nacyklování 52905 cyklů se poruší 27 z 1000 ($P = 2,7 \%$) zkušebních vzorků.

Tab. 12 - Statistické vyhodnocení dat na souboru tahově namáhaných vzorků

| Zatěžovací hladina ΔF [kN] / nýt | Počet vzorků n [-] | Střední hodnota \bar{N} [-] | $\text{Log}(\bar{N})$ [-] | Směrodatná odchylka S [-] | $X_{P,\beta}$ [-] | $N_{P,\beta}$ [-] |
|--|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 4,5 | 6 | 1399238 | 6,1459 | 0,1369 | 5,5916 | 478848 |
| 5,0 | 6 | 597254 | 5,7762 | 0,1210 | 5,2656 | 222441 |

Takto vyhodnocená data na hladinách zatěžování nám dovolují sestavit bezpečné S-N křivky pro tahové a smykové zatížení. Ty nám říkají, že při daném rozkmitu smykové nebo tahové síly po dosažení určitého množství cyklů, hrozí 10 % riziko, že u 1 ze 100 nýtových spojů dojde k poruše.



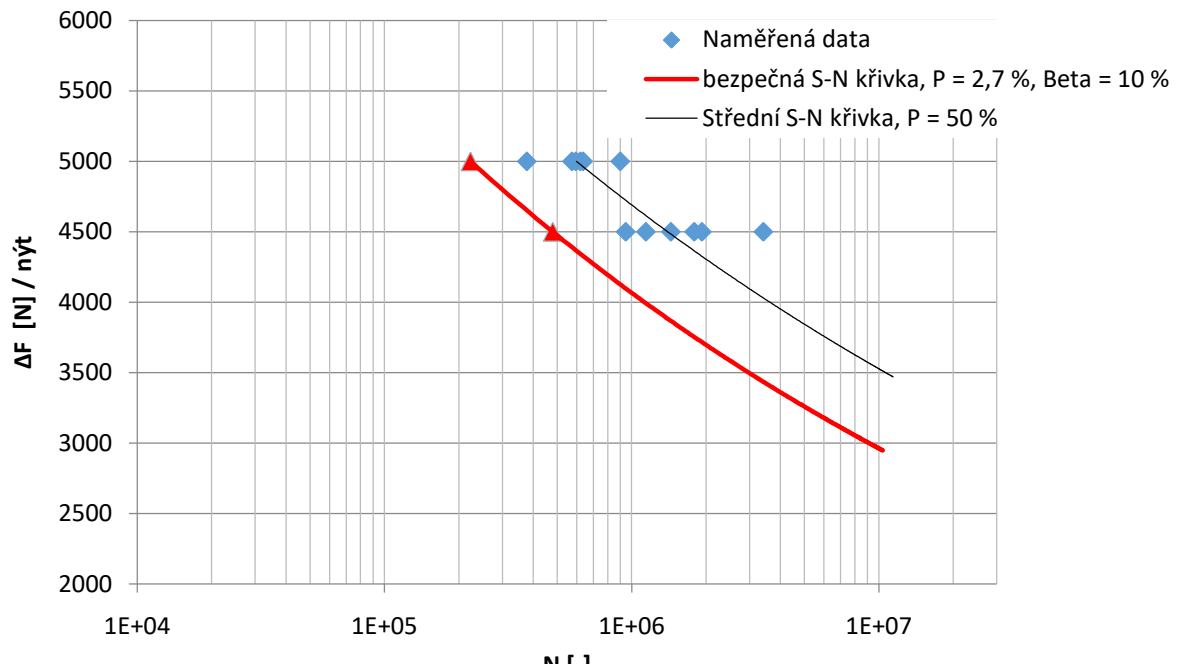
Obr. 50 - S-N křivky – MAGNA-LOK MGLP-R8-6 – smyk (R = 0)

S-N křivka smykového namáhání vyjádřená v silách (R = 0)nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6 je v mocinném tvaru vyjádřena takto:

$$(\Delta F_{smyk})^m \cdot N = C \quad (34)$$

$$m = 19,04$$

$$C = 1,099E+79$$



Obr. 51 - S-N křivky – MAGNA-LOK MGLP-R8-6 – tah (R = 0)

S-N křivka tahového namáhání vyjádřena v silách (R = 0) nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6 je v mocninném tvaru vyjádřena takto:

$$(\Delta F_{tah})^m \cdot N = C \quad (35)$$

$$m = 7,28$$

$$C = 1,84E+32$$

Podle EN 12663-1 [19] užívané při pevnostním hodnocení kolejových vozidel je mez únavy stanovena pro 10^7 cyklů.

Stanovená mez únavy extrapolováním bezpečné S-N křivky na bázi 10^7 cyklů ve smyku nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6 pro 10^7 cyklů je:

$$\Delta F_C^S = 6074 \text{ N}$$

Stanovená mez únavy extrapolováním bezpečné S-N křivky na bázi 10^7 cyklů v tahu nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6 pro 10^7 cyklů je:

$$\Delta F_C^T = 2946 \text{ N}$$

Poměr mezi statickou únosností ve smyku a mezí únavy ve smyku je:

$$\delta^s = \frac{\Delta F_C^S}{F_{smyk, dovoleny}} = \frac{6074}{11120} = 0,55 \quad (36)$$

Poměr mezi statickou únosností v tahu a mezí únavy v tahu je:

$$\delta^T = \frac{\Delta F_C^T}{F_{tah, dovoleny}} = \frac{2946}{8230} = 0,36 \quad (37)$$

Při smykovém namáhání se mez únavy pohybuje mírně nad polovinou předepsané statické únosnosti ve smyku. Při tahovém namáhání se mez únavy pohybuje těsně nad jednou třetinou předepsané únosnosti v tahu.

8.2 Porovnání S-N křivek s křivkami danými Eurokódem 3

Při návrhu postupu stanovení únavové pevnosti nýtových spojů podle Eurokódu 3 v kapitole 7.1.2 bylo doporučeno používat S-N křivky pro kategorie detailu odpovídající smykovému a tahovému zatížení nýtového spoje.

Křivky Eurokódu jsou ovšem vyjádřeny v závislosti rozkmitu napětí na počtu cyklů. Námi stanovené S-N křivky pro konkrétní nýt, byly vyjádřeny v závislosti rozkmitu síly na počtech cyklů a v míjivém režimu zatěžování. Abychom mohli tyto křivky porovnat s Eurokódem 3, je nutné převést S-N křivky z rozkmitu síly na rozkmit napětí. Tím zároveň námi stanovené S-N křivky zobecníme a bude je možné použít i pro nýty stejné kategorie, ale jiných rozměrů.

Hodnoty tahového napětí se vypočtou pro účinnou plochu nýtu v tahu a hodnoty smykového napětí se počítají pro plochu nýtu ve střižné rovině – viz tabulka 6 [19]. Z poruch, které se objevily při únavových tahových zkouškách je patrné, že při tahovém namáhání nese zatížení celý průřez nýtu – plášť i jádro nýtu. Obdobně při smykovém namáhání nese zatížení ve střižné rovině celý průřez nýtu. Tahový a smykový rozkmit napětí se pak vypočte prostými vztahy:

$$\Delta\sigma [MPa] = \frac{\Delta F_{tah} [N]}{A_{nýt} [mm^2]} \quad (38)$$

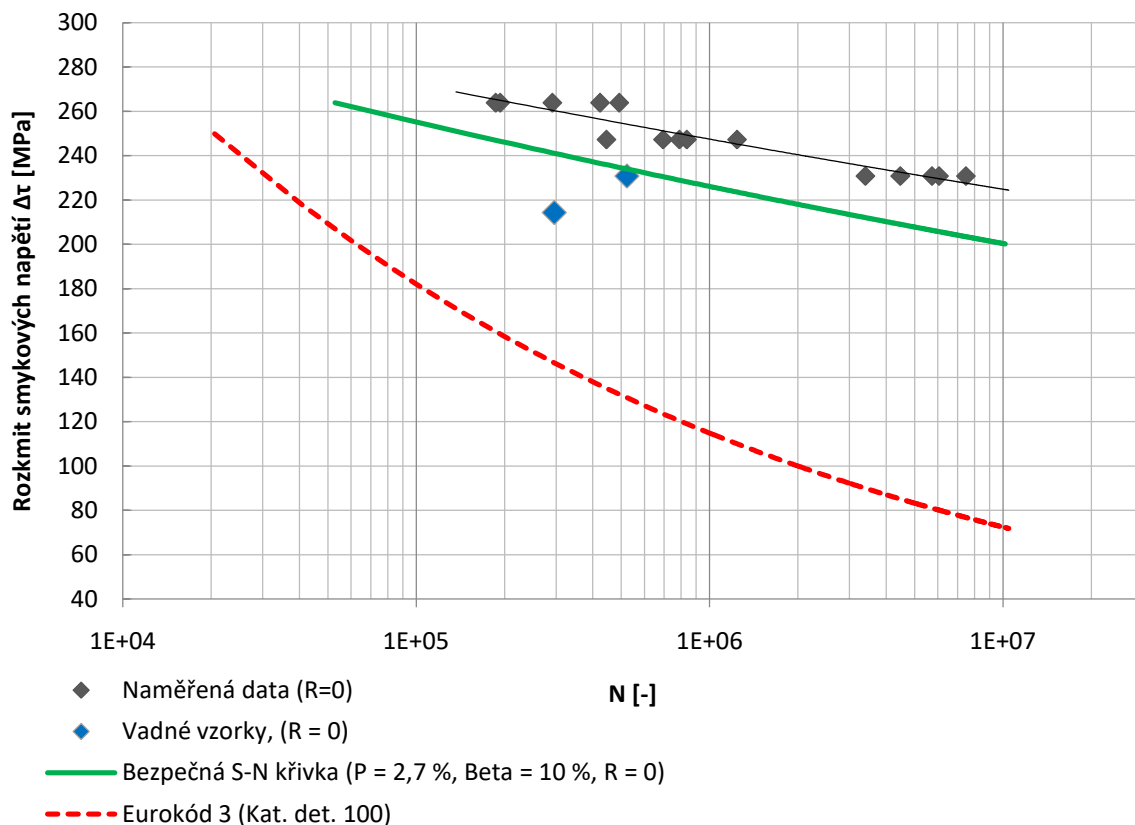
$$\Delta \tau [MPa] = \frac{\Delta F_{smyk} [N]}{A_{nýt} [mm^2]} \quad (39)$$

Plocha $A_{nýt}$ je určena konkrétně pro nýt MAGNA-LOK MGLP-R8-6 rozměry uvedenými na obrázku 38.

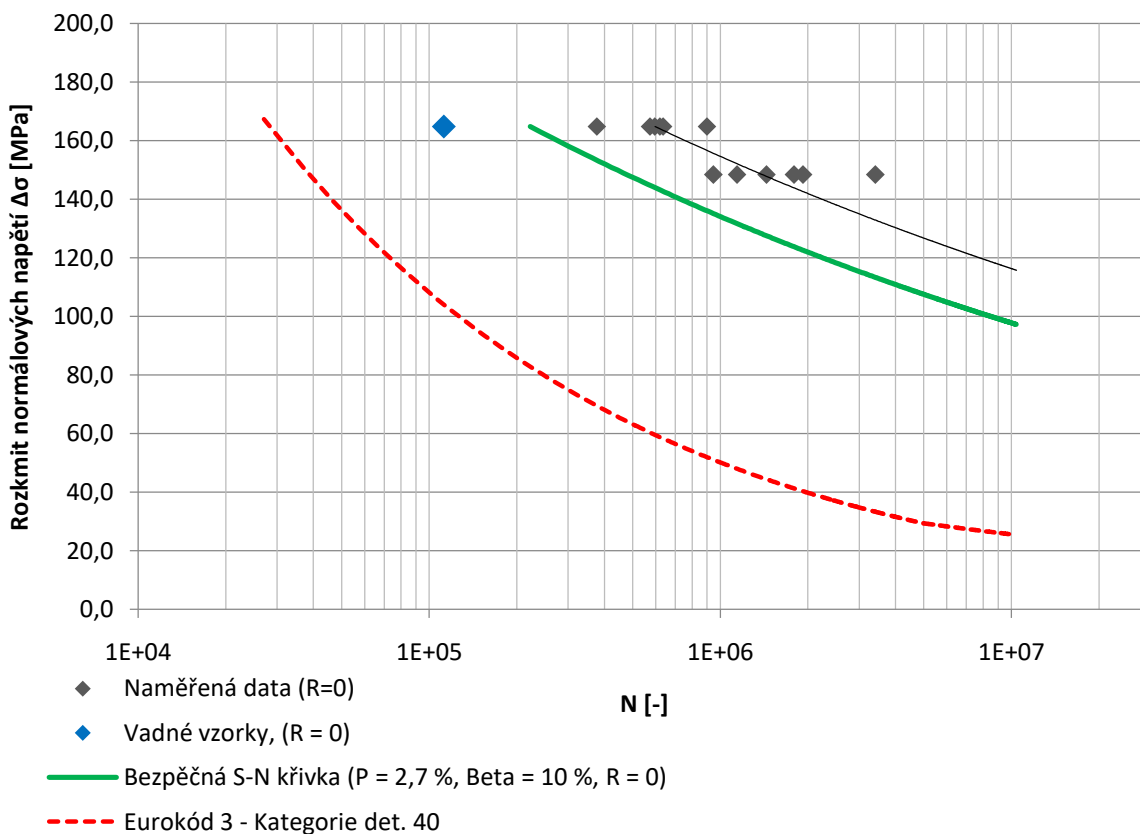
$$A_{nýt} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (6,9^2 - 3^2) = 30,32 \text{ mm}^2 \quad (40)$$

Tímto způsobem jsou přepočítány experimentálně naměřené S-N křivky smykového a tahového zatěžování nýtového spoje na napětí a na obrázcích 52 a 53 jsou tyto křivky porovnány s S-N křivkami danými Eurokódem.

Z obrázků je patrné, že křivky Eurokódu 3 jsou oproti experimentálně naměřeným S-N křivkám velmi bezpečné. Z toho důvodu bylo využito možnosti zvýšit kategorii detailu při tahovém namáhání z kat. det. 36 na kat. det. 40 (tím mírně zvýšit mez únavy v tahu podle Eurokódu 3). Z důvodu maximalizace využití nýtových spojů byla plocha ve vztahu (40) počítána pro průměr otvoru pro nýt na horním okraji tolerance ($D = 6,9 \text{ mm}$). Při přepočtu na napětí tak dostáváme menší hodnoty napětí a více se blížíme hodnotám daným Eurokódem.



Obr. 52 - Křivky únavové pevnosti nýtového spoje pro rozkmit smykových napětí



Obr. 53 - Křivky únavové pevnosti nýtového spoje pro rozkmit tahových napětí

Mocninný tvar S-N křivky pro rozkmit smykových napětí (P = 2,7 %, β = 10 %, R = 0):

$$(\Delta\tau)^{19,04} \cdot N = 6,70993 \cdot 10^{50} \quad (41)$$

Stanovená mez únavy extrapolováním bezpečné S-N křivky na bázi 10^7 cyklů ve smyku nýtového spoje MAGNA-LOK pro 10^7 cyklů je:

$$\Delta\tau_c = 200,3 \text{ MPa}$$

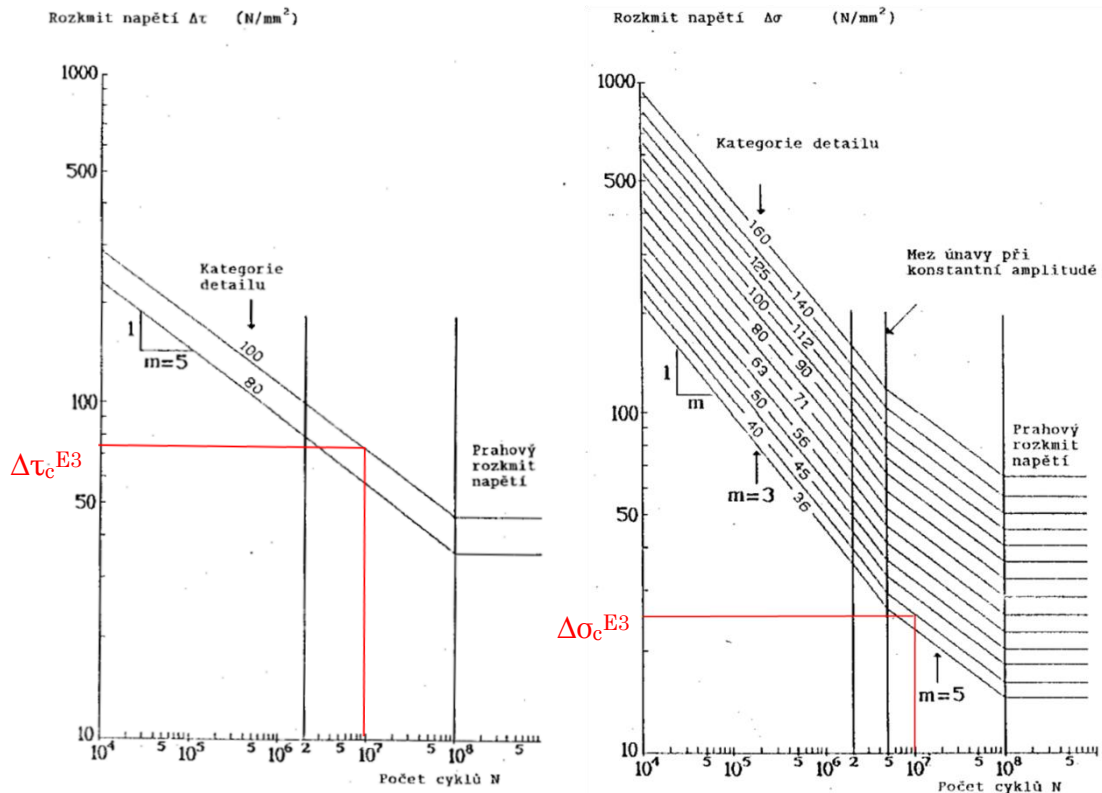
Mocninný tvar S-N křivky pro rozkmit tahových napětí (P = 2,7 %, β = 10 %, R = 0):

$$(\Delta\sigma)^{7,28} \cdot N = 3,03324 \cdot 10^{21} \quad (42)$$

Stanovená mez únavy extrapolováním bezpečné S-N křivky na bázi 10^7 cyklů ve smyku nýtového spoje MAGNA-LOK pro 10^7 cyklů je:

$$\Delta\sigma_c = 97,7 \text{ MPa}$$

Meze únavy v tahu a ve smyku daných Eurokódem pro 10^7 cyklů jsou odečteny podle křivek únavové pevnosti na obrázku 54.



Obr. 54 - Křivky únavové pevnosti pro rozkmit smykových a normálových napětí dané Eurokódem 3 [19]

$$\Delta\tau_c^{E3} = 72,5 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_c^{E3} = 25,5 \text{ MPa}$$

8.3 Dílčí závěry

8.3.1 Parametry ovlivňující mez únavy

Z dat získaných při experimentálním měření únavové životnosti nýtového spoje a z následného zkoumání provedení zkušebních vzorků vyplývá, že dominantní vliv na maximalizaci únavové pevnosti nýtového spoje v tahu a ve smyku má především dodržení tolerance velikosti otvoru pro nýty. Z naměřených dat také vyplývá, že vyšší životnost vykazovaly nýtové spoje, u kterých byly otvory vyrobeny na spodní hranici tolerance průměru. Nýtové spoje vyrobené s otvory přesahujícími toleranci průměru měly řádově sníženou mez únavy (především v tahu) a u velké části z nich došlo při vyšších zatíženích ke statické poruše (vysunutí nýtů).

Mez únavy u některých zkušebních vzorků byla výrazně snížena nedostatečným sražením hran otvorů ve střižné rovině, přítomností otřepů, anebo nedodržením kolmosti otvoru vzhledem ke spojovaným komponentám. Tyto vady nýtových spojů na zkušebních vzorcích byly méně časté.

Pro maximalizaci životnosti nýtových spojů je tedy nutné dodržovat nejen toleranci velikosti otvorů pro nýt, ale u těchto otvorů také dodržovat precizní sražení hran bez otřepů a kolmost ke spojovaným komponentám.

8.3.2 Experiment versus Eurokód 3

Zkušební vzorky, které byly po únavových zkouškách vyřazeny z dat pro sestrojení S-N křivek (z důvodů popsaných výše) jsou vyznačeny na obrázcích 52 a 53 jako vadné vzorky. Můžeme pozorovat, že námi sestrojené bezpečné S-N křivky tyto nedokonalosti ve výrobě nemusí postihovat. Křivky Eurokódu 3 jsou oproti námi sestrojeným S-N křivkám výrazně bezpečnější ale postihují i nekvalitně zhotovené nýtové spoje. Pokud by byly odstraněny tyto nedostatky ve výrobě nýtových spojů, bylo by možné pro vyhodnocení únavové životnosti používat námi experimentálně stanovené křivky únavové pevnosti.

8.3.3 Statická únosnost v tahu

V předešlých kapitolách již bylo několikrát zmíněno, že při vyšším zatížení nýtových spojů v tahu docházelo u poměrně velké části zkušebních vzorků ke statické poruše – vysunutí nýtů – viz porucha 1 v tabulce 10. Konkrétně k vysunutí docházelo na hladině zatěžování 5 kN, na které se takto porušilo 23% vzorků. Statická únosnost v tahu je dána výrobcem pro nýt MAGNA-LOK MGLP-R8-6 8230 N. V kapitole 7.1.1.2 popisující posouzení statické únosnosti nýtů v tahu podle Eurokódu 3 se postupuje takto:

$$F_{t,Rd} = \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (43)$$
$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$$

kde $F_{t,Rk}$ [N] je statická únosnost nýtu v tahu daná výrobcem,

$F_{t,Rd}$ [N] je dovozená statická únosnost nýtu v tahu,

$F_{t,Sd}$ [N] je výpočtové tahové zatížení nýtu,

$$\gamma_{M2} = 1,33$$

Pro nýt MGLP-R8-6 je tedy dovolená statická únosnost:

$$F_{t,Rd} = \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{M2}} = \frac{8230}{1,33} = 6188 \text{ N} \quad (44)$$

Při tahovém zatížení 5000 N < 6188 N, se ale přesto objevovaly statické poruchy v důsledku nedokonalosti výroby některých vzorků. Při zatížení 4,5 kN se tyto poruchy už neobjevovaly. Navrhuji proto zohlednit tyto poruchy navýšením bezpečnosti $\gamma_{M2} = 1,33$ na $\gamma_{zk}^T = 1,85$ při statickém vyhodnocování únosnosti nýtů v tahu. Dovolené statické namáhání v tahu poté klesne na:

$$F_{t,Rd} = \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{zk}} = \frac{8230}{1,85} = 4450 \text{ N} \quad (45)$$

9 Návrh metodiky modelování a vyhodnocování nýtových spojů v kolejových vozidlech

Experimentálním měřením bylo zjištěno, že při použití dutých trhacích nýtů MAGNA-LOK MGLP-R8-6 je stanovení únavové životnosti nýtových spojů podle Eurokódu 3 vhodné a dostatečně bezpečné i při výskytu nýtových spojů s výrobními vadami. Na nýtovém spojení z experimentální části diplomové práce bude v následujících kapitolách popsán způsob, jakým lze nýtový spoj zjednodušeně modelovat a hodnotit jeho pevnost a únavovou životnost.

9.1 Postup stanovení vhodné tuhosti náhradního modelu nýtu

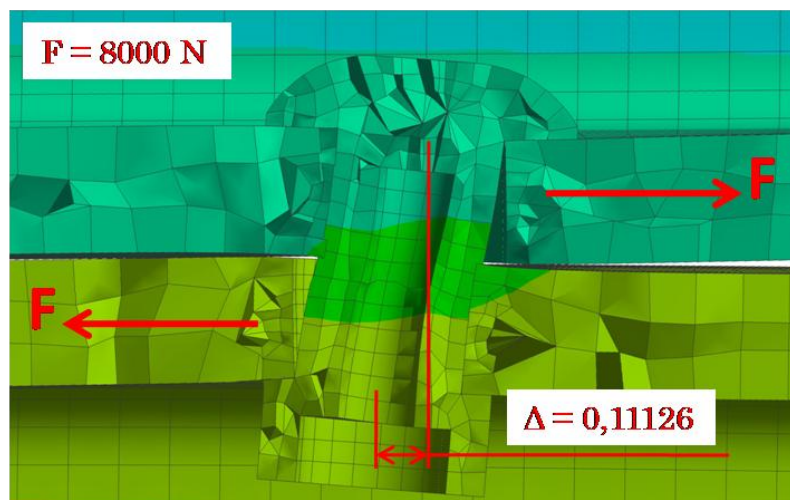
Vhodným způsobem modelování nýtových spojů na rozsáhlých modelech MKP se ukázal přístup popsáný v kapitole 6.2.1, kde je nýtový spoj nahrazen BUSH elementem.

Prvním krokem je správné nastavení tuhostních charakteristik BUSH elementu do všech směrů volnosti elementu. K tomu je možné použít tyto přístupy – experimentální měření, detailní MKP model nýtového spoje nebo použití vhodného analytického vztahu (viz kapitola 5.1). Pro jednostřížný spoj, tloušťku plechů $t_1 = t_2 = 5$ mm a dutý trhací nýt se ukázal nejvhodnější analytický vztah pro výpočet poddajnosti nýtového spoje ve smykovém směru podle Hutha (14) s následujícími parametry:

$n = 1$ pro jednostřížné spoje

$a = 2/5$, $b = 2,2$ pro pěchované nýty v kovu

To dokládá porovnání jednotlivých vztahů z kapitoly 5.1.3 s detailním MKP modelem zkušební vzorku nýtového spoje – viz obrázek 56. Porovnání bylo ovšem provedeno pouze pro jeden konkrétní případ. Pro lepší ověření platnosti Huthova vztahu by bylo vhodné provést více výpočtů kompletního MKP modelu nýtového spoje s rozdílnou svěrnou tloušťkou a rozdílnou velikostí nýtů. V případě, že by závislost tuhosti na svěrné tloušťce byla podle kompletních MKP modelů jiná, je možné zavést vlastní polynom vyjadřující tuto funkci.



Obr. 55 - Stanovení tuhosti nýtového spoje zkušební vzorku ve smyku

$$K_{MKP} = \frac{F}{\Delta} = \frac{8000}{0,11126} = 71903 \text{ N / mm} \quad (46)$$

Tuhost ve smyku podle Hutha s parametry pro stejný nýtový spoj:

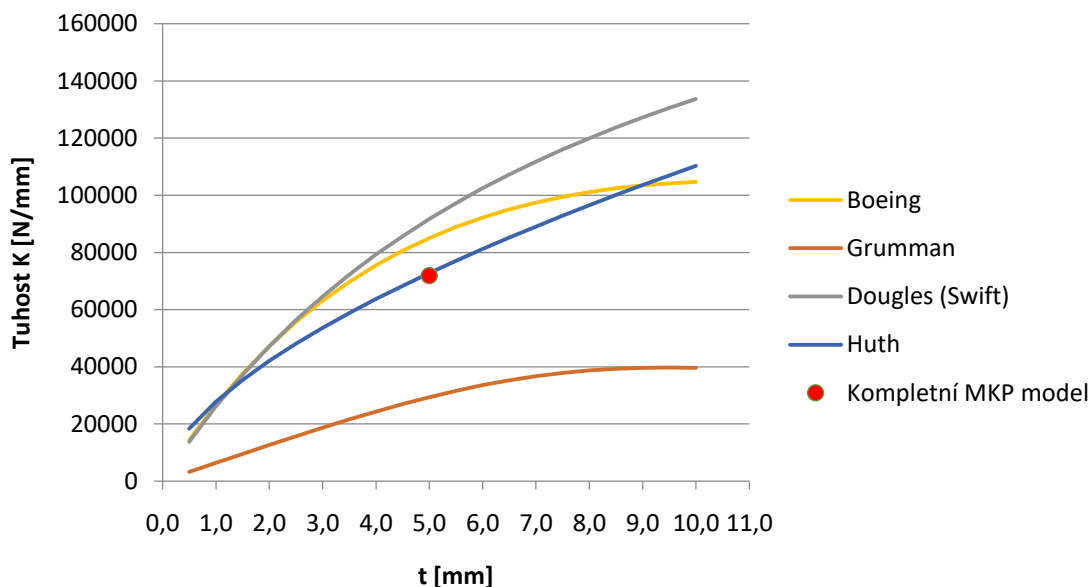
$$\begin{aligned} C_{Huth} &= \left(\frac{t_1 + t_2}{2d_{Ekv}} \right)^a \cdot \frac{b}{n} \left(\frac{1}{t_1 E_1} + \frac{1}{n \cdot t_2 E_2} + \frac{1}{2 \cdot t_1 E_3} + \frac{1}{2n \cdot t_2 E_3} \right) = \\ &= \left(\frac{5+5}{2 \cdot 5,88} \right)^{2/5} \cdot \frac{2,2}{1} \left(\frac{1}{5 \cdot 0,7 \cdot 10^5} + \frac{1}{1 \cdot 5 \cdot 0,7 \cdot 10^5} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot 0,7 \cdot 10^5} + \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 2,1 \cdot 10^5} \right) = \\ &= 1,37469 \cdot 10^{-5} \text{ mm / N} \end{aligned} \quad (47)$$

$$K_{Huth} = \frac{1}{C_{Huth}} = \frac{1}{1,37469 \cdot 10^{-5}} = 72744 \text{ N / mm} \quad (48)$$

kde d_{Ekv} je ekvivalentní průměr (vztah nebere v úvahu dutý nýt) – průměr kruhového průřezu, který má stejnou plochu jako průřez nýtu s dutinou.

$$\begin{aligned} A_{nýt} &= \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (6,6^2 - 3^2) = 27,14 \text{ mm}^2 \\ d_{Ekv} &= \sqrt{\frac{4 \cdot A_{nýt}}{\pi}} = 5,88 \text{ mm} \end{aligned} \quad (49)$$

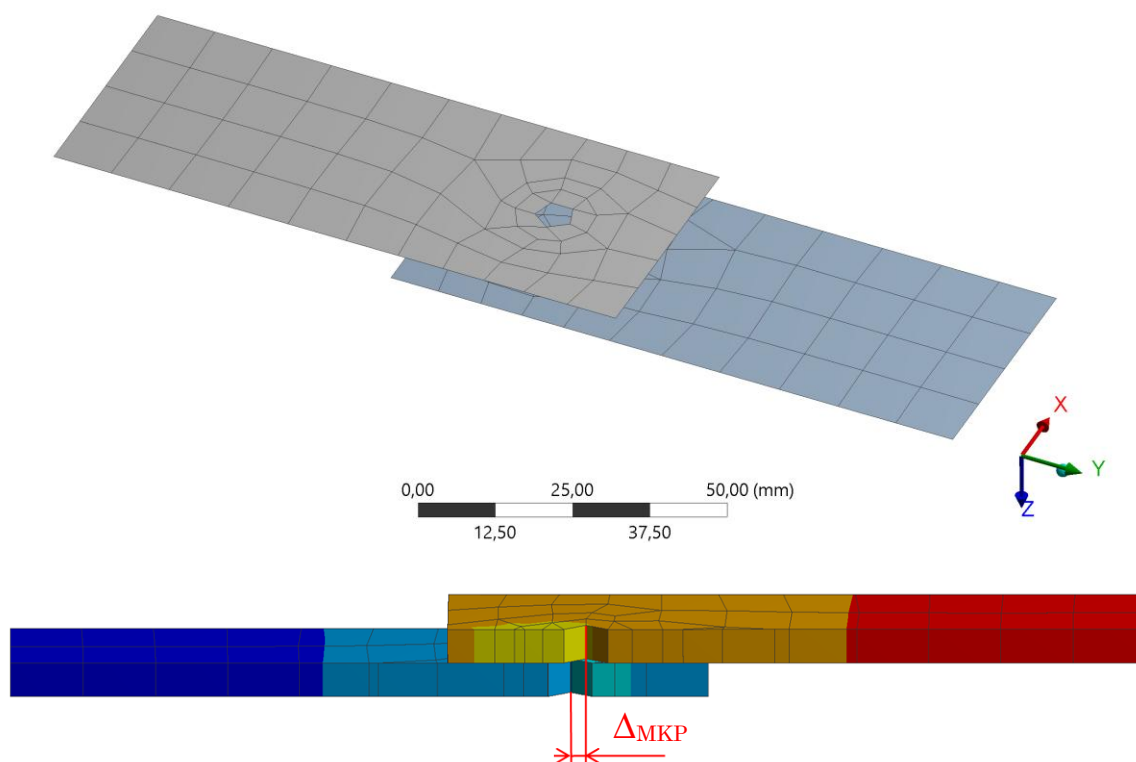
Chyba analytického vztahu oproti kompletnímu modelu MKP je 2,3%.



Obr. 56 - Závislost smykové tuhosti na tloušťce podle různých analytických vztahů

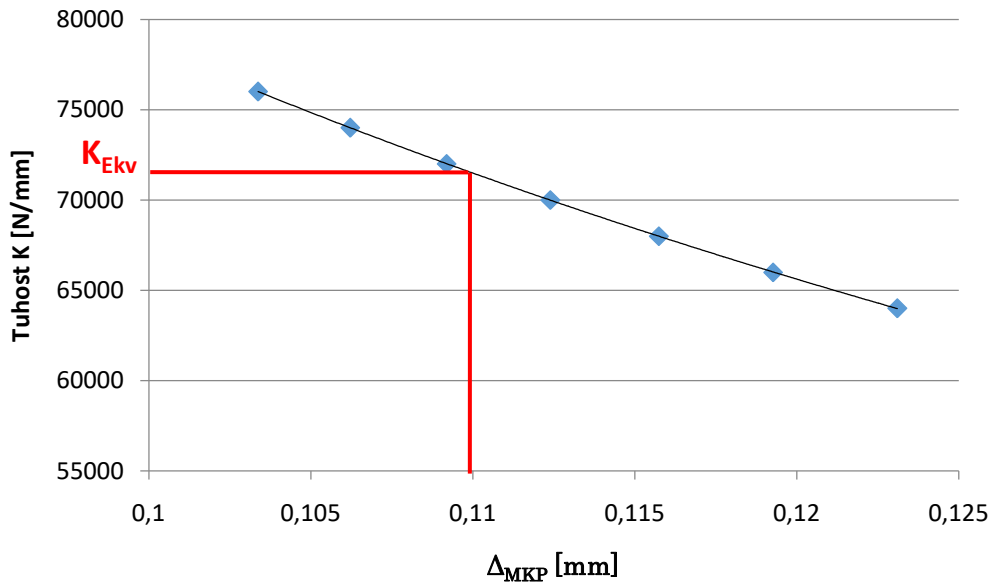
V kapitole 6.2.1 bylo zmíněno, že posuv BUSH elementů s takto nastavenou tuhostí neodpovídá tuhosti určené podle Hutha (podle kompletního MKP modelu, nebo podle experimentu), ale je navíc funkcí velikosti sítě v okolí napojení BUSH elementu. Proto musí být provedena optimalizace tuhosti BUSH elementu tak, aby posuv zjednodušeného modelu nýtového spoje odpovídal posuvu určeným vztahem podle Hutha (nebo určený pomocí kompletního MKP modelu nýtového spoje).

Pro nalezení ekvivalentní smykové tuhosti BUSH elementu byl vytvořen pevnostní model vzorku nýtového spoje s globální velikostí sítě 10 mm. Kolem otvoru pro nýt bylo modelováno mezikruží o průměru 13,5 mm (odpovídá průměru hlavičky nýtu MAGNA-LOK MGLP-R8-6) s velikostí sítě 5 mm (viz obrázek 57).



Obr. 57 - Pevnostní vzorek modelu nýtového spoje pro zjištění ekvivalentní tuhosti při velikosti sítě 5 mm

Model byl zatížen silou 8 kN (stejně velká jako při výpočtu tuhosti na kompletním MKP modelu nýtového spoje) a okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby nedocházelo k přidavnému ohybu – nulový posuv do směru z (vynucená rovinnost). Poté bylo provedeno několik výpočtů při různých smykových tuhostech a byl odečítán posuv Δ_{MKP} nýtového spoje (tuhosti a posuvy jsou zobrazeny na obrázku 58).



Obr. 58- Závislost deformace nýtového spoje na tuhosti BUSH elementu (zatížení 8 kN)

Posuv nýtového spoje podle Hutha je při zatížení 8 kN:

$$\Delta_{Huth} = \frac{F}{K_{Huth}} = \frac{8000}{72744} = 0,1099 \text{ mm} \quad (50)$$

Takový posuv odpovídá na zkušebním modelu MKP tuhosti:

$$K_{Ekv} = 70837 \text{ N / mm} \quad (51)$$

Z výsledků optimalizace tuhosti je patrné, že při velikosti MKP sítě 5 mm v okolí otvoru pro nýt, není tuhost BUSH elementu výrazně ovlivněna velikostí sítě a dobře odpovídá tuhosti stanovené detailním MKP výpočtem a analytickým vztahem. Pro další použití by bylo nutné stanovit, jakým způsobem ovlivňuje změna velikosti sítě posuv nýtového spoje při konstantní tuhosti a jak výrazná je tato změna při malé změně velikosti sítě (jestli lze například zanedbat optimalizaci tuhosti BUSH elementu při změně sítě z velikosti 5 mm na 8 mm).

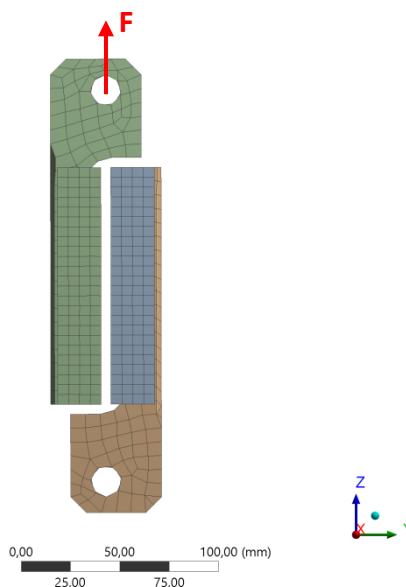
Takto stanovenou smykovou tuhost nýtového spoje je možné použít například na zjednodušeném modelu sestavy zatěžování zkušebního vzorku. Tuhost nýtového spoje v tahu je stanovena podle vztahu (3).

$$K_{axial} = \frac{E_{nyl} \cdot A}{L} \quad (52)$$

$$K_{axial} = \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 27,14}{10} = 570011 \text{ N / mm}$$

9.2 Výpočet pevnosti a únavové životnosti zkušební vzorku

Vyhodnocení únavové životnosti bude ukázáno na zjednodušeném MKP modelu sestavy pro zatěžování zkušební vzorku smykem. C-drážky jsou v tomto modelu nahrazeny střednicovými plochami modelovanými skořepinovými prvky, nýty jsou nahrazeny elementy typu BUSH a přípravky jsou modelovány objemově s relativně velkými elementy. Z modelu byly odstraněny příložky a šrouby vyvozující tření mezi přípravky a zkušebním vzorkem.



Obr. 59 - Zjednodušený model sestavy pro zatěžování zkušební vzorku smykem

Okrajové podmínky byly nastaveny stejně jako při dimenzování zkušebních vzorků v kapitole 8.1.3.1. Byly zvoleny čtyři zatěžující síly podle tabulky 13

Tab. 13 - Zatěžující síly zjednodušeného zkušební vzorku

| Rozkmit síly | Poznámka |
|------------------------------|---|
| $\Delta F_1 = 16 \text{ kN}$ | Stejná hladina zatížení jako při experimentálním měření ΔF_1 na jeden nýt = 8 kN |
| $\Delta F_2 = 15 \text{ kN}$ | Stejná hladina zatížení jako při experimentálním měření ΔF_2 na jeden nýt = 7,5 kN |
| $\Delta F_3 = 14 \text{ kN}$ | Stejná hladina zatížení jako při experimentálním měření ΔF_3 na jeden nýt = 7 kN |
| $\Delta F_4 = 10 \text{ kN}$ | Libovolně zvolený rozkmit |
| $\Delta F_4 = 3 \text{ kN}$ | Libovolně zvolený rozkmit |

Zatěžující síly ΔF_{1-3} byly zvoleny stejně jako při únavových zkouškách zkušebních vzorků. Porovnáním výsledků únavových zkoušek a výsledků ze zjednodušeného MKP modelu zkušební vzorku bude možné validovat navržený postup modelování pomocí RBE3-CBUSH-RBE3. Síla ΔF_{4-5} byla zvolena libovolně (odhadnuta tak, aby vyhověla únavovým křivkám Eurokódu 3).

Pro rozkmit síly $\Delta F_4 = 3 \text{ kN}$ působící na zkušební vzorek je v následujícím textu číselně uveden postup výpočtu pevnosti a únavová životnosti nýtových spojů na zkušebním vzorku.

Parametry elementu typu BUSH byly nastaveny takto:

$$K_x = K_z = 70837 \text{ N/mm} \quad (\text{ekvivalentní tuhost ve smyku})$$

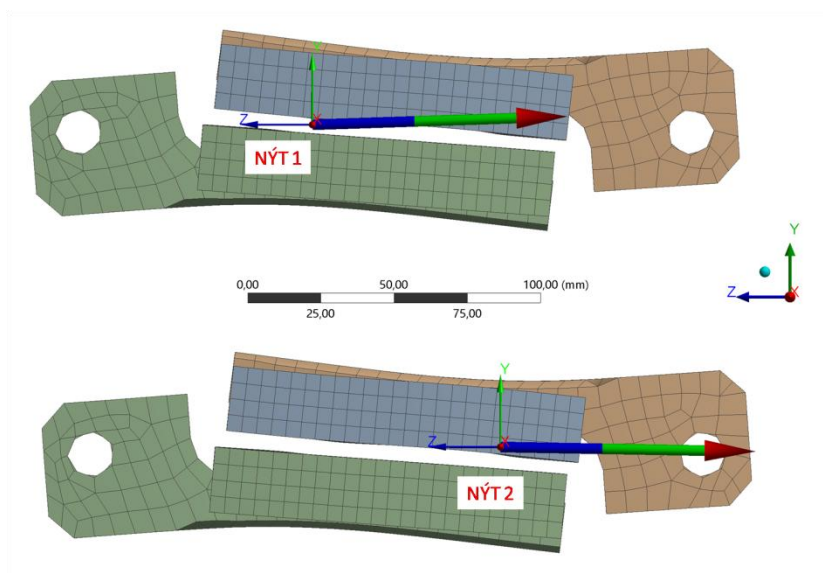
$$K_y = 570010 \text{ N/mm} \quad (\text{tuhost v tahu})$$

$$K_{rx} = K_{ry} = K_{rz} = 10^6 \text{ N/mm} \quad (\text{torzní tuhost})$$

Z takto nastaveného MKP modelu výpočtem získáme vnitřní síly působící v BUSH elementech:

Tab. 14 - Síly v nýtových spojích

| Nýt 1 | | Nýt 2 | |
|-------|--------------------------|-------|--------------------------|
| smyk | $F_x = - 8,8 \text{ N}$ | smyk | $F_x = - 4,0 \text{ N}$ |
| | $F_z = 1499,2 \text{ N}$ | | $F_z = 1500,8 \text{ N}$ |
| tah | $F_y = 1,6 \text{ N}$ | tah | $F_y = 1,9 \text{ N}$ |



Obr. 60 - Silové působení ve spojích

Jak je patrné z obrázku 60, tahové zatížení v našem konkrétním modelu míří ve směru osy y , smykové namáhání je složeno ze sil působících ve směru x a z .

Dále v textu bude nýt 1 označen jako „ $n1$ “ a nýt 2 jako „ $n2$ “

$$F_{v,Sd}^{n1} = \sqrt{(F_x^{n1})^2 + (F_z^{n1})^2} = \sqrt{8,8^2 + 1499,2^2} = 1499,2 \text{ N} \quad (53)$$

$$F_{v,Sd}^{n2} = \sqrt{(F_x^{n2})^2 + (F_z^{n2})^2} = \sqrt{4,0^2 + 1500,8^2} = 1500,8 \text{ N}$$

$$F_{t,Sd}^{n1} = 1,6 \text{ N} \quad (54)$$

$$F_{t,Sd}^{n2} = 1,9 \text{ N}$$

9.2.1 Vyhodnocení pevnosti zkušební vzorku

Statické vyhodnocení je provedeno pomocí metodiky Eurokódu 3 z kapitoly 7.1.1 s aplikovanými poznatky z experimentálního měření (zvýšená bezpečnost v tahu).

Únosnost ve smyku (podle vztahu (15)):

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{M2}} = \frac{11120}{1,33} = 8360 \text{ N} \quad (55)$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$$

$$F_{v,Sd}^{n1} = 1499,2 < 8360 \text{ N} \quad (56)$$

$$F_{v,Sd}^{n2} = 1500,8 < 8360 \text{ N}$$

Únosnost v otláčení (podle vztahu (16)):

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d_o \cdot t}{\gamma_{Mr}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 270 \cdot 6,6 \cdot 10}{1,25} = 35640 \text{ N} \quad (57)$$

α je nejmenší z:

$$\alpha = \frac{e_1}{3d_o}; \frac{p_1}{3d_o} - \frac{1}{4}; 1,0 \quad (58)$$

$$\alpha = 1,52; 2,78; 1,0$$

$$F_{v,Sd}^{n1} = 1499,2 < 35640 \text{ N} \quad (59)$$

$$F_{v,Sd}^{n2} = 1500,8 < 35640 \text{ N}$$

Únosnost v tahu (podle vztahu (18)) s upravenou bezpečností v tahu – viz 8.3.3):

$$F_{t,Rd} = \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{zk}^T} = \frac{8230}{1,85} = 4450 \text{ N} \quad (60)$$

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$$

$$F_{t,Sd}^{n1} = 1,6 \text{ N} < 4450 \text{ N} \quad (61)$$

$$F_{t,Sd}^{n2} = 1,9 \text{ N} < 4450 \text{ N}$$

Protože se jedná o kombinované namáhání, zatížení nýtových spojů musí zároveň splňovat vztah (19):

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (62)$$

Pro nýt 1:

$$\frac{1499,2}{8360} + \frac{1,6}{4450} = 0,18 \leq 1,0 \quad (63)$$

Pro nýt 2:

$$\frac{1500,8}{8360} + \frac{1,9}{4450} = 0,18 \leq 1,0 \quad (64)$$

Z hlediska statické únosnosti oba nýty vyhovují podmínkám a jsou dostatečně bezpečné k provozu.

9.2.2 Vyhodnocení únavové životnosti zkušební vzorku

Protože nýty zkušební vzorku jsou namáhané smykovým i normálovým zatížením zároveň (i když v případě výpočtu zkušební vzorku zatíženého smykem je normálové zatížení nýtů oproti smykovému velmi malé), je nutné uvažovat zatížení jako kombinované a vyhodnotit jej podle kritéria (24).

Uvažujme, že zkušební vzorek je zatížen míjivým režimem zatěžování a plocha průřezu nýtu je určena vztahem (40). Křivky únavové pevnosti jsou převzaty z Eurokódu 3 pro konkrétní kategorii detailu. Meze pevnosti jsou odečteny pro 10^7 cyklů podle obrázku 54.

$$\Delta \tau_c^{E3} = 72,5 \text{ MPa}$$

$$\Delta \sigma_c^{E3} = 25,5 \text{ MPa}$$

9.2.2.1 Nýt 1

Normálové namáhání:

$$\sigma_h^{n1} = \frac{F_{t,Sd}^{n1}}{A_{nyt}} = \frac{1,6}{30,32} = 0,05 \text{ MPa} \quad (65)$$

$$\sigma_d^{n1} = 0 \text{ MPa} \quad (66)$$

Z toho plyne:

$$\Delta\sigma^{n1} = 0,05 \text{ MPa} \quad (67)$$

Smykové namáhání:

$$\tau_h^{n1} = \frac{F_{v,Sd}^{n1}}{A_{nyt}} = \frac{1457,3}{30,32} = 49,4 \text{ MPa} \quad (68)$$

$$\tau_d^{n1} = 0 \text{ MPa} \quad (69)$$

Z toho plyne:

$$\Delta\tau^{n1} = 49,4 \text{ MPa} \quad (70)$$

Kombinované namáhání:

Uvažujeme, že nýty v případě použití na zkušebním vzorku jsou „Fail-Safe“ prvky s dobrou přístupností ke kontrole spoje. Proto koeficienty bezpečnosti

$$\gamma_{Ff} = \gamma_{Mf} = 1$$

$$\left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma^{n1}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau^{n1}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right]^5 \leq 1 \quad (71)$$
$$\left[\frac{1 \cdot 0,05}{25,5/1} \right]^3 + \left[\frac{1 \cdot 49,4}{72,5/1} \right]^5 = \underline{0,15 \leq 1}$$

Nýt 1 na zkušebním vzorku má podle vyhodnocení pomocí Eurokódu 3 teoreticky neomezenou životnost (stanovenou pro 10^7 cyklů).

9.2.2.2 Nýt 2

Normálové namáhání:

$$\sigma_h^{n2} = \frac{F_{t,Sd}^{n2}}{A_{nyt}} = \frac{1,9}{30,32} = 0,06 \text{ MPa} \quad (72)$$

$$\sigma_d^{n2} = 0 \text{ MPa} \quad (73)$$

Z toho plyne:

$$\Delta\sigma^{n2} = 0,06 \text{ MPa} \quad (74)$$

Smykové namáhání:

$$\tau_h^{n2} = \frac{F_{v,Sd}^{n2}}{A_{nyt}} = \frac{1500,8}{30,32} = 49,5 \text{ MPa} \quad (75)$$

$$\tau_d^{n2} = 0 \text{ MPa} \quad (76)$$

Z toho plyne:

$$\Delta\tau^{n2} = 49,5 \text{ MPa} \quad (77)$$

Kombinované namáhání:

$$\gamma_{Ff} = \gamma_{Mf} = 1$$

$$\left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma^{n2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau^{n2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right]^5 \leq 1 \quad (78)$$
$$\left[\frac{1 \cdot 0,06}{25,5/1} \right]^3 + \left[\frac{1 \cdot 49,6}{72,5/1} \right]^5 = \underline{0,15 \leq 1}$$

Nýt 2 na zkušební vzorku má podle vyhodnocení pomocí Eurokódu 3 teoreticky neomezenou životnost (stanovenou pro 10^7 cyklů).

Kvůli vysokým mocninám nad poměry rozkmitů vůči dovoleným rozkmitům (mezemi únavy) roste stupeň využití nýtových spojů při únavovém zatížení strmě vzhůru až při blízkém přiblížení k mezím únavy.

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtů všech zatížení ΔF_{1-4} a jsou vyhodnoceny jak pomocí Eurokódu 3, tak pomocí námi stanovených mezí pevnosti extrapolovaných z naměřených únavových křivek.

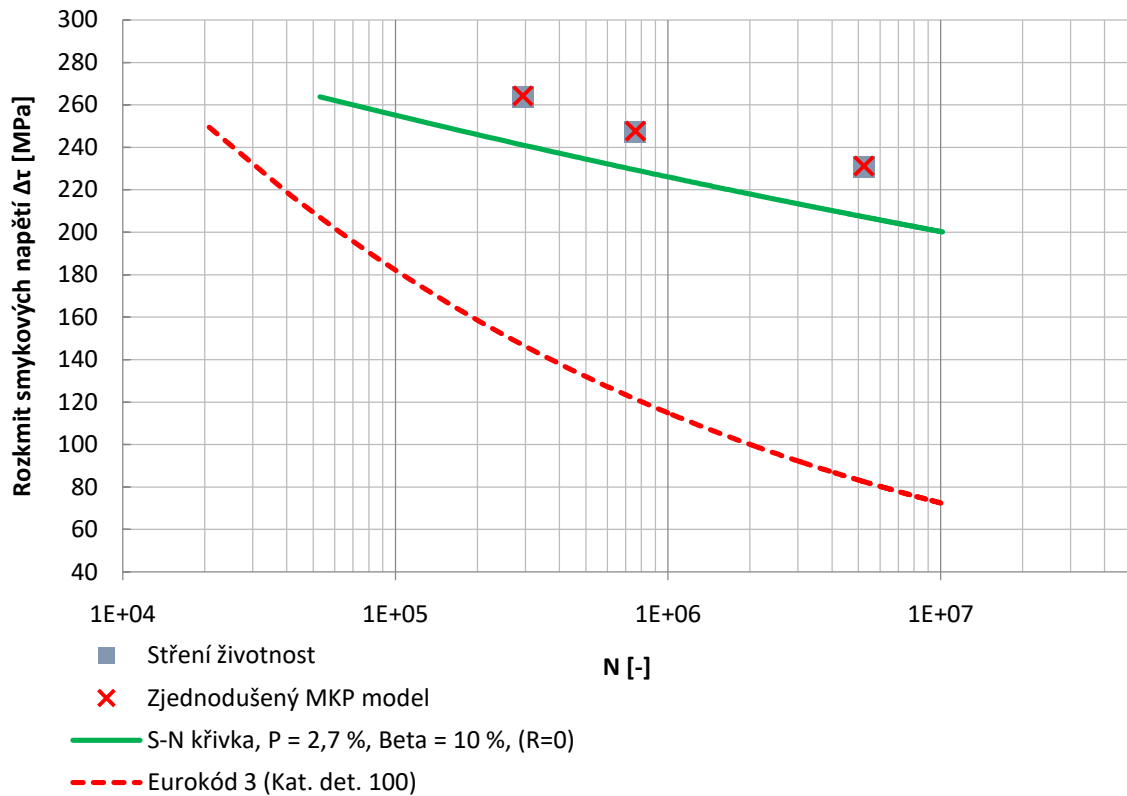
Tab. 15 - Výsledky hodnocení životnosti zkušebního vzorku

| i | ΔF_i [kN] | Nýt | $\Delta \tau_{MKP}$ [MPa] | $\Delta \sigma_{MKP}$ [MPa] | Stupeň využití (EU3) | Stupeň využití (experiment) |
|---|----------------------|-----|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 16 | 1: | 263,5 | 0,7 | 634 | 3,94 |
| | | 2: | 264,2 | 5,1 | 643 | 4,00 |
| 2 | 15 | 1: | 247,0 | 0,6 | 459 | 2,85 |
| | | 2: | 247,7 | 4,5 | 465 | 2,89 |
| 3 | 14 | 1: | 230,6 | 0,5 | 325 | 2,02 |
| | | 2: | 231,2 | 4,0 | 239,7 | 2,04 |
| 4 | 3 | 1: | 49,5 | 0,05 | 0,15 | 0,0009 |
| | | 2: | 49,5 | 0,06 | 0,15 | 0,0009 |

Pro bezpečný nekonečný provoz (daný 10^7 cyklů) musí být stupeň využití < 1 .

Protože hladiny zatížení ΔF_{1-3} byly zvoleny stejně jako při hledání S-N křivek při experimentálním měření, je zřejmé, že nýtové spoje nemohou mít teoreticky neomezenou životnost ani podle Eurokódu 3, ani podle bezpečných experimentálně stanovených S-N křivek (viz stupeň využití v tabulce 15).

Porovnáním výsledků napětí získaných pomocí výpočtu zjednodušeného MKP modelu zkušebního vzorku zatíženého na stejných zatěžovacích hladinách, jako při experimentálním měření (pro hladiny zatížení známe střední životnosti), můžeme validovat postup zjednodušeného modelování.



Obr. 61 - Porovnání výsledků zjednodušeného MKP modelování zkušebních vzorků s naměřenými daty

Na obrázku 61 můžeme vidět, že přepočítání na napětí ze zjednodušeného MKP modelu zkušební vzorku při smykovém namáhání, odpovídá velmi přesně naměřeným datům na zkušebních vzorcích. Z toho vyplývá, že zjednodušení nýtového spoje pomocí metody RBE3-CBUSH-RBE3 dobře reprezentuje nýtový spoj a napěťové poměry získané pomocí této metody modelování, lze porovnávat s experimentálně naměřenými S-N křivkami.

9.3 Shrnutí metodiky modelování a pevnostního vyhodnocování nýtových spojů MAGNA-LOK

Uvedený postup MKP modelování a vyhodnocování nýtových spojů HUCK MAGNA-LOK odpovídá pouze této řadě pevnostních nýtů s plochou hlavou, ocelovým dřikem a trnem a tloušťkou plechů $t = 3$ až 8 mm. Použití jiných typů nýtů nebylo experimentálně ověřeno.

Celkový postup je shrnutý v následujících krocích:

- analytický výpočet smykové tuhosti konkrétního nýtového spoje podle Hutha,
- tvorba pevnostního vzorku modelu nýtového spoje podle metody RBE3-CBUSH-RBE3 s velikostí sítě odpovídající globálnímu modelu pro nalezení ekvivalentní tuhosti BUSH elementu:
 - výpočet pevnostního vzorku pro několik hodnot tuhostí CBUSH prvku,
 - vynesení závislosti tuhosti prvku na deformaci ve směru smykového zatížení
 - nalezení tuhosti prvku tak, aby odpovídala požadované deformaci zjištěné analytickým vztahem
- sestrojení nýtových spojů v globálním MKP modelu pomocí metody RBE3-CBUSH-RBE3 se smykovou ekvivalentní tuhostí do obou tečných směrů, tuhostí v normálovém směru podle vztahu (3) a torzními tuhostmi 10^6 N/mm [13],
- výpočet globálního modelu MKP a vyhodnocení sil ve spojích (v BUSH elementech) vůči statické únosnosti podle Eurokódu 3
 - ve smyku,
 - v otláčení,
 - v tahu (použití experimentálně stanovené bezpečnosti $\gamma_{zk}^T = 1,85$),
- přepočet silových působení v nýtových spojích na normálové a smykové rozkmité napětí v symetricky střídavém cyklu,
- vyhodnocení únavové pevnosti nýtových spojů při kombinovaném namáhání.

10 Závěr

Cílem diplomové práce bylo nalezení vhodné metodiky predikce únavové životnosti nýtových spojů na skříních kolejových vozidel. Práce se zabývala konkrétně použitím dutých trhacích nýtů HUCK MAGNA-LOK s plochou hlavou a ocelovým trnem i dříkem. Doporučená metodika modelování a výpočtu pevnosti a únavové životnosti je validována experimentálním měřením, tudíž je aplikovatelná pouze na použití zmíněných pevnostních nýtů.

V úvodu byly obecně popsány nýtové spoje, jejich druhy a atributy ovlivňující únavovou životnost nýtového spoje jako je tloušťka spojovaných plechů, efekt počtu nýtových řad, uspořádání nýtů, efekt ohybové tuhosti spoje apod. Bylo zjištěno, že na životnost nýtového spoje má vliv poměr průměru nýtu a spojovaných plechů – vyšší poměr je z hlediska únavové životnosti výhodnější. Je-li nutné přenést okolní konstrukcí větší zatížení a zvýšit tloušťku spojovaných plechů, je vhodné zároveň zvýšit průměr nýtů. Výrazným způsobem také zvyšuje životnost nýtového spoje počet nýtových řad ve spoji. Více nýtových řad omezuje nežádoucí sekundární ohyb spoje.

Další část byla věnována tuhosti nýtového spoje. V kapitole bylo rozebráno, jakými analytickými, experimentálními a numerickými způsoby lze tuhost nýtové spoje stanovit, a proč je důležité správně určit tuhost nýtového spoje pro zjednodušené MKP modelování nýtových spojů na globálním modelu pro korektní přenos sil do okolní konstrukce. Některé z metod modelování nýtových spojů pomocí MKP byly v diplomové práci představeny. Pro zjednodušené modelování a následné vyhodnocení životnosti nýtových spojů na velkých modelech skříní kolejových vozidel byla doporučena metoda použití BUSH elementů.

Na skříních kolejových vozidel se používají plechy velkých tloušťek, a proto při únavovém poškození nýtového spoje dochází k poruše samotného nýtu a ne k poruše okolního plechu, jak tomu bývá v leteckých konstrukcích při použití tenkých plechů. Vyhodnocení pevnosti a únavové životnosti takovýchto nýtových spojů nabízí postup podle Eurokódu 3, který předpokládá porušení přímo nýtů a nebere v úvahu koncentrace napětí v okolí otvorů pro nýty ve spojovaných komponentách. Postup podle Eurokódu 3 nabízí různé křivky únavové pevnosti pro různé kategorie detailů včetně kategorií detailů, do kterých spadají nýtové spoje namáhané normálovým a smykovým napětím.

Navržený postup výpočtu pevnosti a únavové životnosti podle Eurokódu 3 byl experimentálně ověřen únavovými zkouškami na zkušebních vzorcích s použitím nýtů HUCK MAGNA-LOK MG LP-R8-6. Pro účel únavových zkoušek byly navrženy a vyrobeny přípravky k uchycení zkušebních vzorků do zatěžovacího stroje vyvozující v použitých nýtech smykové a tahové namáhání. Při únavových zkouškách bylo identifikováno několik typů obvyklých únavových poruch, které se objevovaly při smykovém a tahovém zatěžování. Na základě těchto poruch je možné tvrdit, že při smykovém i tahovém zatěžování přenáší zatížení ve spoji trn i dřík dutého nýtu zároveň. Některé ze vzorků musely být vyřazeny ze statistického souboru dat pro sestavení S-N křivek z důvodu neobvykle nízké únavové životnosti nebo kvůli statické poruše ihned po zatížení (vysunutí nýtu z otvoru). Na těchto zkušebních vzorcích byly zjištěny výrobní vady. Nejčastěji šlo o příliš velké otvory pro nýty, které byly vyrobeny mimo výrobcem danou toleranci otvoru. Tahovým zatěžováním na vyšších hladinách docházelo u vzorků s touto vadou k vysunutí nýtů. Tento problém statické únosnosti v tahu vedl k návrhu zvýšení koeficientu bezpečnosti daného Eurokódem 3 (používaný při statickém vyhodnocení únosnosti) na koeficient bezpečnosti v tahu experimentálně stanovený. Další vady, které se objevovaly, byly nedostatečné sražení hran otvorů v místě střížné roviny, přítomnost otřepů a nedodržení kolmosti otvorů vůči spojovaným komponentám.

Naměřená data, vyjma vzorků s výrobními vadami, byla statisticky zpracována a byly z nich sestaveny bezpečné S-N křivky pro namáhání nýtů MAGNA-LOK v tahu a ve smyku. Pravděpodobnost porušení na bezpečné S-N křivce byla zvolena $P = 2,7\%$ s hladinou spolehlivosti $\alpha = 90\%$. Únavové křivky pro nýtový spoj zatížený v tahu a ve smyku podle Eurokódu 3 jsou oproti experimentálně stanoveným S-N křivkám výrazně bezpečnější. Pokud jsou ale do srovnání zahrnuty vadně vyrobené nýtové spoje, křivky Eurokódu tyto vzorky stále bezpečně pokrývají, ale experimentálně stanovené S-N křivky již ne.

Z únavových zkoušek tedy vyplývá, že křivky Eurokódu jsou pro vyhodnocení životnosti nýtů MAGNA-LOK vhodné a bezpečně pokrývají i nedokonalosti ve výrobě. Pokud by byly výrobní vady eliminovány, bylo by možné přistoupit k použití experimentálně stanovených S-N křivek.

V závěru diplomové práce bylo na příkladu zkušební vzorku ukázáno, jak lze aplikovat zjištěné postupy modelování a vyhodnocování pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů. Pomocí naměřených dat a vypočtených dat na

zjednodušeném MKP modelu zkušebním vzorku byl postup zjednodušeného modelování validován.

Na tuto diplomovou práci je možné navázat vytvořením algoritmu pro automatické vyhodnocení zjednodušených MKP modelů, což by přineslo jednoduché, rychlé a efektivní vyhodnocení pevnosti a únavové životnosti nýtových spojů.

11 Citovaná literatura

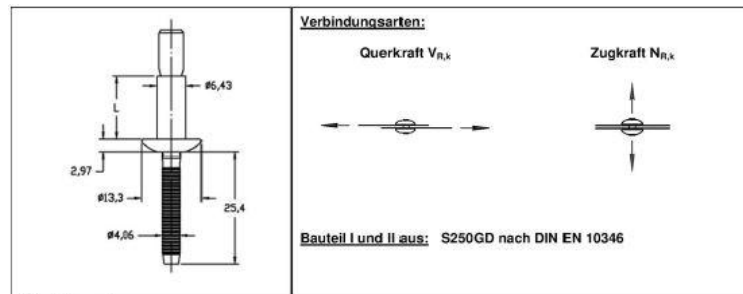
1. A. SKORUPA, M. S. *Riveted lap joints in aircraft fuselage: design, analysis and properties*. New York, London: 2012.
2. BARRRETT, R. T. *Fastener Design Manual*. Cleveland: NASA, 1990.
3. CHUN-YUNG NIU, M. *Airframe structural design*. Hong Kong: 1989.
4. Aerospace fasteners and structural components. *Hi-Lite pin* [online]. [cit. 2016-listopad-14]. Dostupné z: <http://www.lisi-aerospace.com/products/fasteners/externally-threaded/pin/Pages/hi-lite.aspx>
5. Arconic. *Huck LockBolts* [online]. [cit. 2016-listopad-14]. Dostupné z: <http://www.afsrhuck.net/en/products/fasteners/lockbolts.html>
6. nyty.cz. *Hliník - nýty* [online]. [cit. 2016-listopad-14]. Dostupné z: <http://www.nyty.cz/katalogove-listy/dovozove-trhaci-nyty-bralo/hlinik>
7. Heyman. *Vysokopevnostní nýtovací systémy* [online]. [cit. 2017-červenec-31]. Dostupné z: <http://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/katalogy/huck-kt.pdf>
8. RŮŽIČKA, M. M. HANKE a M. ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: 1987.
9. SCHIJVE, J. *The Fatigue Strength of Riveted Joints and Lugs*. Washington: NACA, 1956.
10. HERTEL, H. *Ermüdungsfestigkeit der Konstruktionen*. Berlin: 1969.
11. SODERBERG, J. *A finite element method for calculation load distributions in bolted joint assemblies*. Linköping: 2012.
12. ADAMÍK, P. *Experimentální stanovení tuhosti nýtových spojů a jejich modelování metodou konečných prvků*. Brno: 2009. Dizertační práce. VUT.
13. KOHOUTEK, J. *Modelování nýtových spojů při návrhu leteckých konstrukcí*

metodou konečných prvků. Evekter s.r.o.

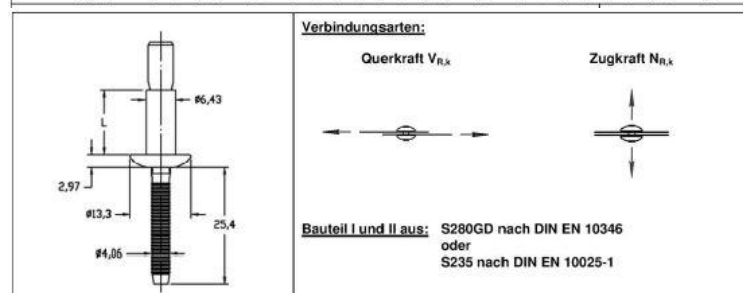
14. HUTH, H. *Zum Einfluss der Nietnachgiebigkeit mehrreihiger Nietverbindungen auf die Lastübertragungs- und* München: 1984.
15. LANGRAND, B. L. PATRONELLI a E. DELETOMBE. *An alternative numerical approach for full scale characterisation.* Valenciennes: 2002.
16. BEDAIR, O. a G. F. EASTAUGH. *A numerical model for analysis of riveted splice joints accounting for secondary bending and* Calgary, Ottawa: 2007.
17. XIONG, Y. B. O. K. *Analytical and Finite Element Modeling of Riveted Lap Joints in Aircraft Structure.* Ottawa: 1998.
18. DOUBRAVA, R. Metodika modelování spojů pro statické a únavové výpočty pomocí MKP. Praha: Elektronický sborník VZLÚ, a.s. 2007, č. 6, s. 80 - 85.
19. ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* 2007.
20. ALLGEMEINE BAUAUFSICHTLICHE ZULLASUNG. *Blindniete der Typen MAGNA-LOK und MAGNA-BULB und damit hergestellte Verbindungen im.* Telford: Deutsches Institut für Bautechnik, 2015.
21. *HUCK - Pevnostní spojovací prvky* [online]. [cit. 2017-Duben-13]. Dostupné z: https://www.kvt-fastening.cz/media/7ec9b6e3-9214-ffdd-823c-a9e034ce36be/KVT_HUCK_CZ_25-03-2013_web.pdf
22. ČSN EN 12663-1. *Železniční aplikace - Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel - Část 1:* 2010.
23. SA Bolt Manufacturers. *Bolt and nut pre-load and torque data* [online]. [cit. 2017-červenec-31]. Dostupné z: <http://www.sabolt.co.za/docs/50.pdf>
24. ŘŮŽIČKA, M. *DPŽ - přednáška 7.* [online]. [cit. 2017-srpen-02]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/2016/DPZ_2016_predn_07.pdf

12 Přílohy

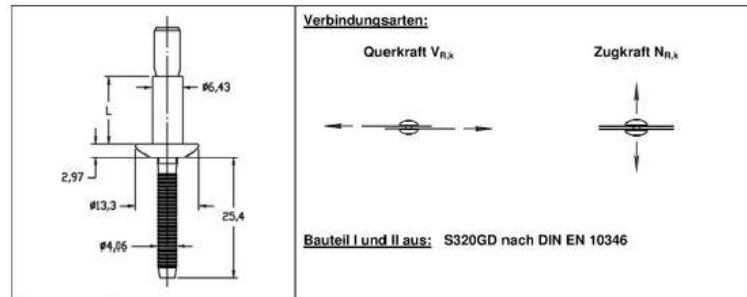
- Příloha 1 Dovolené únosnosti nýtů pro tloušťky spojovaných komponent menší než 3,5 mm
- Příloha 2 Návrhový výkres – Sestava – smykové namáhání
- Příloha 2 Návrhový výkres – Sestava – tahové namáhání



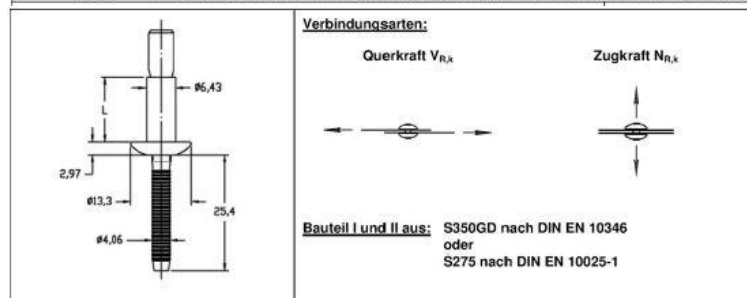
| Vorböhrern mit $\phi 6,7$ | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 2,85 | 3,21 | 3,57 | 3,57 | 3,57 | 3,57 | 3,57 | 3,57 | 3,57 | 3,57 |
| | 1,00 | - | - | 3,10 | 3,14 | 3,17 | 3,39 | 3,62 | 3,66 | 3,76 | 3,86 | 3,95 | 4,05 | 4,05 |
| | 1,13 | - | - | 3,10 | 3,30 | 3,49 | 3,58 | 3,66 | 3,75 | 4,13 | 4,51 | 4,88 | 5,26 | 5,26 |
| | 1,25 | - | 2,38 | 3,10 | 3,46 | 3,81 | 4,37 | 4,93 | 5,31 | 5,68 | 6,09 | 6,28 | 6,47 | 6,47 |
| | 1,50 | - | 2,42 | 3,13 | 3,54 | 3,96 | 5,89 | 6,26 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| | 1,75 | - | 2,45 | 3,13 | 3,62 | 4,10 | 7,40 | 7,58 | 7,76 | 8,15 | 8,23 | 8,94 | 9,33 | 9,33 |
| | 2,00 | - | 2,45 | 3,13 | 3,75 | 4,38 | 7,40 | 7,62 | 7,84 | 8,27 | 8,44 | 8,99 | 9,54 | 9,54 |
| | 2,25 | - | 2,45 | 3,16 | 3,91 | 4,65 | 7,40 | 7,77 | 8,14 | 8,49 | 8,83 | 9,26 | 9,68 | 9,68 |
| | 2,50 | - | 2,45 | 3,16 | 3,91 | 4,65 | 7,40 | 7,92 | 8,44 | 8,83 | 9,22 | 9,52 | 9,82 | 9,82 |
| | 2,75 | - | 2,45 | 3,16 | 3,91 | 4,65 | 7,40 | 8,57 | 8,90 | 9,16 | 9,42 | 9,74 | 10,06 | 10,06 |
| | 3,00 | - | 2,45 | 3,20 | 3,93 | 4,65 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,25 | - | 2,45 | 3,20 | 3,93 | 4,65 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,50 | - | 2,45 | 3,20 | 3,93 | 4,65 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 |
| | 1,00 | - | - | 0,96 | 1,20 | 1,43 | 1,49 | 1,62 | 1,74 | 1,74 | 1,74 | 1,74 | 1,74 | 1,74 |
| | 1,13 | - | - | 0,96 | 1,20 | 1,43 | 1,55 | 1,80 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 |
| | 1,25 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,43 | 1,60 | 1,99 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 |
| | 1,50 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,43 | 1,66 | 2,17 | 2,68 | 2,68 | 2,68 | 2,68 | 2,68 | 2,68 |
| | 1,75 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 2,00 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 2,25 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 2,50 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 2,75 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 3,00 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 3,25 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |
| | 3,50 | - | 0,73 | 0,96 | 1,20 | 1,47 | 1,74 | 2,24 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 |



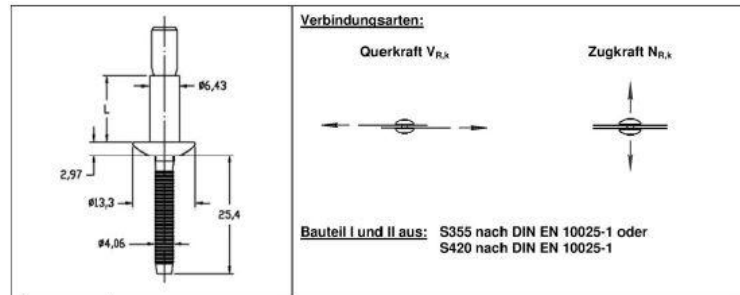
| Vorböhrern mit $\phi 6,7$ | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 3,11 | 3,51 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 |
| | 1,00 | - | - | 3,39 | 3,39 | 3,39 | 3,93 | 4,39 | 4,39 | 4,39 | 4,39 | 4,39 | 4,39 | 4,39 |
| | 1,13 | - | - | 3,39 | 3,60 | 3,81 | 4,35 | 4,88 | 5,09 | 5,30 | 5,30 | 5,30 | 5,30 | 5,30 |
| | 1,25 | - | 2,60 | 3,12 | 3,64 | 4,16 | 4,77 | 5,38 | 5,79 | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,20 | 6,20 |
| | 1,50 | - | 2,64 | 3,12 | 3,64 | 4,32 | 5,89 | 6,26 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| | 1,75 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 4,47 | 7,40 | 7,58 | 7,76 | 8,15 | 8,23 | 8,94 | 9,33 | 9,33 |
| | 2,00 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 4,77 | 7,40 | 7,62 | 7,84 | 8,27 | 8,44 | 8,99 | 9,54 | 9,54 |
| | 2,25 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 7,77 | 8,14 | 8,49 | 8,83 | 9,26 | 9,68 | 9,68 |
| | 2,50 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 7,92 | 8,44 | 8,83 | 9,22 | 9,52 | 9,82 | 9,82 |
| | 2,75 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 8,57 | 8,90 | 9,16 | 9,42 | 9,74 | 10,06 | 10,06 |
| | 3,00 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,25 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,50 | - | 2,67 | 3,27 | 3,87 | 5,07 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 |
| | 1,00 | - | - | 1,05 | 1,31 | 1,56 | 1,63 | 1,77 | 1,90 | 1,90 | 1,90 | 1,90 | 1,90 | 1,90 |
| | 1,13 | - | - | 1,05 | 1,31 | 1,56 | 1,70 | 1,97 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 2,24 |
| | 1,25 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,56 | 1,77 | 2,18 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 | 2,58 |
| | 1,50 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,58 | 1,84 | 2,38 | 2,92 | 2,92 | 2,92 | 2,92 | 2,92 | 2,92 |
| | 1,75 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 2,98 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,00 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,25 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,50 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,75 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 3,00 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 3,25 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 3,50 | - | 0,80 | 1,05 | 1,31 | 1,61 | 1,90 | 2,44 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |



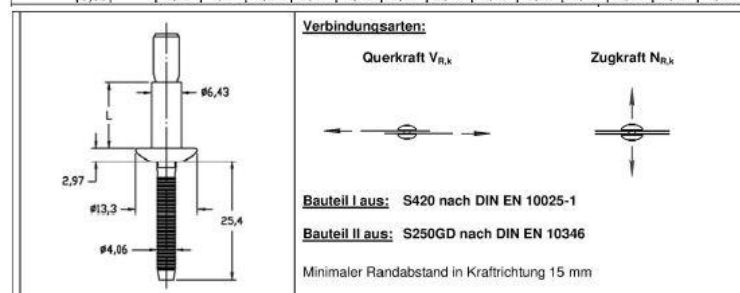
| Vorböhrern mit Ø 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | 3,37 | 3,80 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 |
| | 0,88 | - | - | - | - | 3,67 | 4,21 | 4,67 | 4,67 | 4,67 | 4,67 | 4,67 | 4,67 | 4,67 | 4,67 |
| | 1,00 | - | - | 3,67 | 3,90 | 4,13 | 4,62 | 5,12 | 5,41 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 |
| | 1,13 | - | - | 3,67 | 3,90 | 4,13 | 4,62 | 5,12 | 5,41 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 | 5,70 |
| | 1,25 | - | 2,82 | 3,38 | 3,94 | 4,50 | 5,04 | 5,57 | 6,14 | 6,72 | 6,72 | 6,72 | 6,72 | 6,72 | 6,72 |
| | 1,50 | - | 2,86 | 3,38 | 3,94 | 4,68 | 5,89 | 6,26 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| | 1,75 | - | 2,89 | 3,54 | 4,19 | 4,85 | 7,40 | 7,58 | 7,76 | 8,15 | 8,23 | 8,94 | 9,33 | 9,33 | 9,33 |
| | 2,00 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,17 | 7,40 | 7,62 | 7,84 | 8,27 | 8,44 | 8,99 | 9,54 | 9,54 | 9,54 |
| | 2,25 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 7,77 | 8,14 | 8,49 | 8,83 | 9,26 | 9,68 | 9,68 | 9,68 |
| | 2,50 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 7,92 | 8,44 | 8,83 | 9,22 | 9,52 | 9,82 | 9,82 | 9,82 |
| | 2,75 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 8,57 | 8,90 | 9,16 | 9,42 | 9,74 | 10,06 | 10,06 | 10,06 |
| | 3,00 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,25 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,29 |
| 3,50 | - | 2,89 | 3,27 | 4,19 | 5,49 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,70 | |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 |
| | 0,88 | - | - | - | - | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 |
| | 1,00 | - | - | 1,13 | 1,41 | 1,69 | 1,76 | 1,91 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 |
| | 1,13 | - | - | 1,13 | 1,41 | 1,69 | 1,83 | 2,13 | 2,43 | 2,43 | 2,43 | 2,43 | 2,43 | 2,43 | 2,43 |
| | 1,25 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,69 | 1,89 | 2,35 | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 |
| | 1,50 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,69 | 1,96 | 2,57 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,17 |
| | 1,75 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,23 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,00 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,25 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,50 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 2,75 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 3,00 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | 3,25 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| 3,50 | - | 0,87 | 1,13 | 1,41 | 1,74 | 2,06 | 2,65 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | 3,30 | |



| Vorböhrern mit Ø 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | 3,63 | 4,09 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 |
| | 0,88 | - | - | - | - | 3,95 | 4,46 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 |
| | 1,00 | - | - | 3,95 | 3,95 | 4,44 | 4,84 | 5,23 | 5,59 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 |
| | 1,13 | - | - | 3,95 | 4,20 | 4,44 | 4,84 | 5,23 | 5,59 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 |
| | 1,25 | - | 3,03 | 3,64 | 4,25 | 4,85 | 5,21 | 5,57 | 6,29 | 7,02 | 7,02 | 7,02 | 7,02 | 7,02 | 7,02 |
| | 1,50 | - | 3,08 | 3,64 | 4,25 | 5,03 | 5,89 | 6,26 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| | 1,75 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,22 | 7,40 | 7,58 | 7,76 | 8,15 | 8,23 | 8,94 | 9,33 | 9,33 | 9,33 |
| | 2,00 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,57 | 7,40 | 7,62 | 7,84 | 8,27 | 8,44 | 8,99 | 9,54 | 9,54 | 9,54 |
| | 2,25 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 7,77 | 8,14 | 8,49 | 8,83 | 9,26 | 9,68 | 9,68 | 9,68 |
| | 2,50 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 7,92 | 8,44 | 8,83 | 9,22 | 9,52 | 9,82 | 9,82 | 9,82 |
| | 2,75 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 8,57 | 8,90 | 9,16 | 9,42 | 9,74 | 10,06 | 10,06 | 10,06 |
| | 3,00 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,25 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,29 |
| 3,50 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 | 10,70 | |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| | 0,88 | - | - | - | - | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| | 1,00 | - | - | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 1,89 | 2,05 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,22 |
| | 1,13 | - | - | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 1,96 | 2,29 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 |
| | 1,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 2,03 | 2,52 | 3,01 | 3,01 | 3,01 | 3,01 | 3,01 | 3,01 | 3,01 |
| | 1,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,85 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 3,41 | 3,41 | 3,41 | 3,41 | 3,41 | 3,41 |
| | 1,75 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 2,00 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 2,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 2,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 2,75 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 3,00 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| | 3,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| 3,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,87 | 2,21 | 2,84 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | |

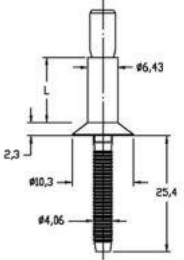


| Vorböhrern mit $\varnothing 6,7$ | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 3,63 | 4,09 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 |
| | 1,00 | - | - | 3,95 | 3,95 | 3,95 | 4,46 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 | 4,89 |
| | 1,13 | - | - | 3,95 | 4,20 | 4,44 | 4,84 | 5,23 | 5,59 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 | 5,95 |
| | 1,25 | - | 3,03 | 3,64 | 4,25 | 4,85 | 5,21 | 5,57 | 6,29 | 7,02 | 7,02 | 7,02 | 7,02 | 7,02 |
| | 1,50 | - | 3,08 | 3,64 | 4,52 | 5,03 | 5,89 | 6,26 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| | 1,75 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,22 | 7,40 | 7,58 | 7,76 | 8,15 | 8,23 | 8,94 | 9,33 | 9,33 |
| | 2,00 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,57 | 7,40 | 7,62 | 7,84 | 8,27 | 8,44 | 8,99 | 9,54 | 9,54 |
| | 2,25 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 7,77 | 8,14 | 8,49 | 8,83 | 9,26 | 9,68 | 9,68 |
| | 2,50 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 7,92 | 8,44 | 8,83 | 9,22 | 9,52 | 9,82 | 9,82 |
| | 2,75 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 8,57 | 8,90 | 9,16 | 9,42 | 9,74 | 10,06 | 10,06 |
| | 3,00 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| | 3,25 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 10,29 |
| 3,50 | - | 3,12 | 3,82 | 4,52 | 5,92 | 7,40 | 9,22 | 9,35 | 9,49 | 9,62 | 9,96 | 10,29 | 11,20 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| | 1,00 | - | - | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 1,96 | 2,14 | 2,32 | 2,32 | 2,32 | 2,32 | 2,32 | 2,32 |
| | 1,13 | - | - | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 2,09 | 2,46 | 2,82 | 2,82 | 2,82 | 2,82 | 2,82 | 2,82 |
| | 1,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,82 | 2,23 | 2,77 | 3,32 | 3,32 | 3,32 | 3,32 | 3,32 | 3,32 |
| | 1,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 1,85 | 2,36 | 3,09 | 3,82 | 3,82 | 3,82 | 3,82 | 3,82 | 3,82 |
| | 1,75 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 3,89 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 2,00 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 2,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 2,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 2,75 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 3,00 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| | 3,25 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 |
| 3,50 | - | 0,93 | 1,22 | 1,52 | 2,00 | 2,48 | 3,19 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | 5,10 | |



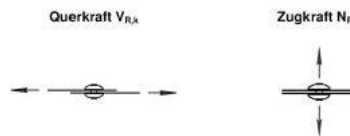
| Vorböhrern mit $\varnothing 6,9$ | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,50 | - | - | - | - | - | - | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 |
| | 1,75 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 6,95 | 7,30 | 7,65 | 7,80 | 7,95 | 7,95 |
| | 2,00 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,03 | 7,34 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| | 2,25 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,11 | 7,38 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| | 2,50 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,19 | 7,42 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| | 2,75 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,42 | 7,54 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| | 3,00 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| | 3,25 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 |
| 3,50 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 1,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,93 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 |
| | 1,75 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 2,00 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 2,25 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 2,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 2,75 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 3,00 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| | 3,25 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| 3,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 2,97 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| | | Verbindungsarten: | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Bauteil I aus: S250GD, S350GD nach DIN EN 10346 oder S420 nach DIN EN 10025-1 Bauteil II aus: S350GD nach DIN EN 10346 bei Zugbeanspruchung S250GD, S350GD nach DIN EN 10346 oder S420 nach DIN EN 10025-1 bei Querkraftbeanspruchung Minimaler Randabstand in Krafrichtung 12 mm | | | | | | | | | | | | | | |
| Vorböhrn mit $\varnothing 6,9$ | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querkraft $V_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,50 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 1,75 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 2,00 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 2,25 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 2,50 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 ¹⁾ | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 2,75 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| | 3,00 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 |
| 3,25 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | |
| 3,50 | - | - | - | - | - | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | 6,19 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 1,75 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 2,00 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 2,25 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 2,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 2,75 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| | 3,00 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 |
| 3,25 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | |
| 3,50 | - | - | - | - | - | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | |
| Vorböhrn mit $\varnothing 6,7$ | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 4,00 | | | | | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querkraft $V_{R,k}$ in kN | 3,00 | 5,67 | 6,49 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | | | | | |
| | 3,25 | 5,79 | 6,64 | 7,48 | 7,49 | 7,49 | 7,73 | 7,97 | 8,15 | 8,33 | 8,51 | | | | | |
| | 3,50 | 5,92 | 6,79 | 7,66 | 7,67 | 7,69 | 8,16 | 8,63 | 8,99 | 9,35 | 9,71 | | | | | |
| | 4,00 | 6,04 | 6,94 | 7,84 | 7,86 | 7,88 | 8,59 | 9,30 | 9,84 | 10,38 | 10,92 | | | | | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Längskraft $N_{R,k}$ in kN | 3,00 | 1,58 | 2,19 | 2,80 | 3,35 | 3,90 | 4,82 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | | | | | |
| | 3,25 | 1,58 | 2,19 | 2,80 | 3,35 | 3,90 | 4,82 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | | | | | |
| | 3,50 | 1,59 | 2,19 | 2,80 | 3,35 | 3,90 | 4,82 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | | | | | |
| | 4,00 | 1,59 | 2,20 | 2,80 | 3,35 | 3,90 | 4,82 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | | | | | |



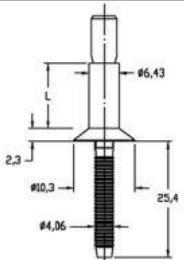
Verbindungsarten:

Querlast $V_{R,k}$ Zuglast $N_{R,k}$




Bauteil I und II aus: S280GD nach DIN EN 10346
oder
S235 nach DIN EN 10025-1

| Vorböhrern mit ϕ 6,7 | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| | | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 4,00 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querlast $V_{R,k}$ in kN | 3,00 | 6,17 | 6,74 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 |
| | 3,25 | 6,30 | 6,89 | 7,48 | 7,49 | 7,49 | 7,73 | 7,97 | 8,15 | 8,33 | 8,51 | |
| | 3,50 | 6,43 | 7,05 | 7,66 | 7,67 | 7,69 | 8,16 | 8,63 | 8,99 | 9,35 | 9,71 | |
| | 4,00 | 6,56 | 7,20 | 7,84 | 7,86 | 7,88 | 8,59 | 9,30 | 9,84 | 10,38 | 10,92 | |
| Längskraft $N_{R,k}$ in kN | 3,00 | 1,72 | 2,39 | 3,05 | 3,50 | 3,95 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | |
| | 3,25 | 1,72 | 2,39 | 3,05 | 3,50 | 3,95 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | |
| | 3,50 | 1,73 | 2,39 | 3,05 | 3,50 | 3,95 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | |
| | 4,00 | 1,73 | 2,39 | 3,05 | 3,50 | 3,95 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | |



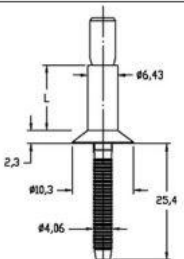
Verbindungsarten:

Querlast $V_{R,k}$ Zuglast $N_{R,k}$




Bauteil I und II aus: S320GD nach DIN EN 10346

| Vorböhrern mit ϕ 6,7 | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 4,00 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querlast $V_{R,k}$ in kN | 3,00 | 6,69 | 7,00 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 |
| | 3,25 | 6,84 | 7,16 | 7,48 | 7,49 | 7,49 | 7,73 | 7,97 | 8,15 | 8,33 | 8,51 |
| | 3,50 | 6,99 | 7,33 | 7,66 | 7,67 | 7,69 | 8,16 | 8,63 | 8,99 | 9,35 | 9,71 |
| | 4,00 | 7,14 | 7,49 | 7,84 | 7,86 | 7,88 | 8,59 | 9,30 | 9,84 | 10,38 | 10,92 |
| Längskraft $N_{R,k}$ in kN | 3,00 | 1,87 | 2,59 | 3,30 | 3,63 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 3,25 | 1,87 | 2,59 | 3,30 | 3,63 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 3,50 | 1,88 | 2,59 | 3,30 | 3,63 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 4,00 | 1,88 | 2,59 | 3,30 | 3,63 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |



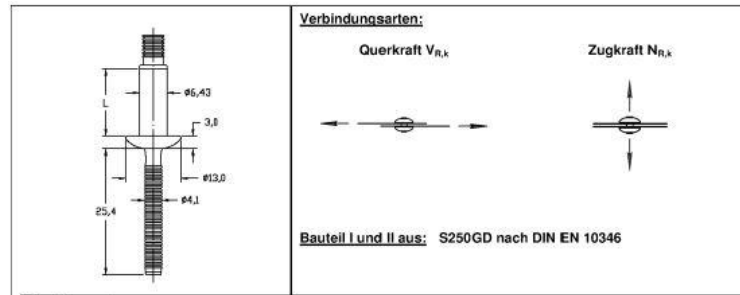
Verbindungsarten:

Querlast $V_{R,k}$ Zuglast $N_{R,k}$

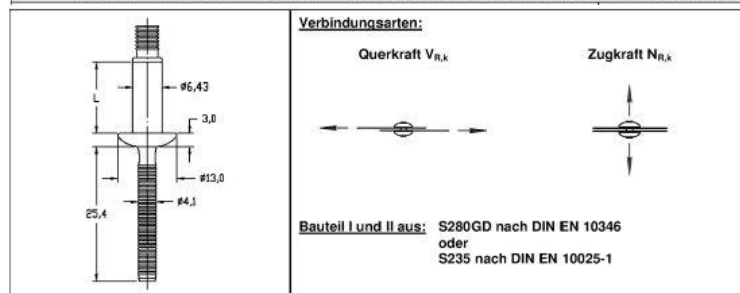


Bauteil I und II aus: S350GD nach DIN EN 10346,
S275 nach DIN EN 10025-1,
S355 nach DIN EN 10025-1 oder
S420 nach DIN EN 10025-1

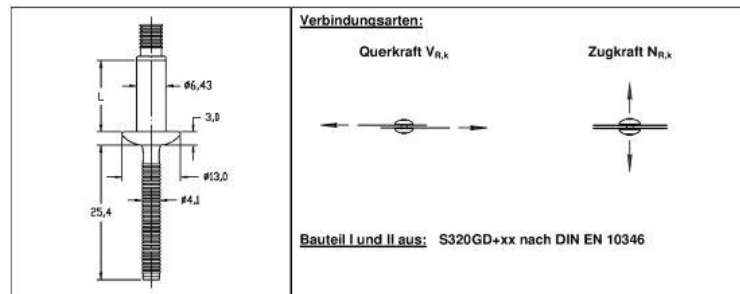
| Vorböhrern mit ϕ 6,7 | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 4,00 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querlast $V_{R,k}$ in kN | 3,00 | 6,91 | 7,11 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 7,30 |
| | 3,25 | 7,07 | 7,27 | 7,48 | 7,49 | 7,49 | 7,73 | 7,97 | 8,15 | 8,33 | 8,51 |
| | 3,50 | 7,22 | 7,44 | 7,66 | 7,67 | 7,69 | 8,16 | 8,63 | 8,99 | 9,35 | 9,71 |
| | 4,00 | 7,38 | 7,61 | 7,84 | 7,86 | 7,88 | 8,59 | 9,30 | 9,84 | 10,38 | 10,92 |
| Längskraft $N_{R,k}$ in kN | 3,00 | 1,93 | 2,67 | 3,41 | 3,69 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 3,25 | 1,93 | 2,67 | 3,41 | 3,69 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 3,50 | 1,94 | 2,67 | 3,41 | 3,69 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |
| | 4,00 | 1,94 | 2,68 | 3,41 | 3,69 | 3,96 | 4,85 | 5,74 | 5,74 | 5,74 | 5,74 |



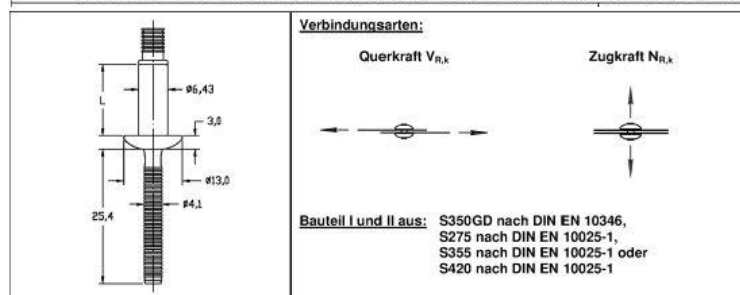
| Vorböhrern mit \varnothing 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querlast $V_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 2,10 | 2,45 | 2,80 | 3,35 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 |
| | | 0,88 | 2,10 | 2,51 | 2,93 | 3,35 | 3,90 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 | 4,03 |
| | | 1,00 | 2,10 | 2,58 | 3,06 | 3,35 | 3,90 | 4,16 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 4,41 |
| | | 1,13 | 2,10 | 2,58 | 3,06 | 3,45 | 3,98 | 4,16 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 |
| | | 1,25 | 2,10 | 2,58 | 3,06 | 3,56 | 4,05 | 4,16 | 4,80 | 5,11 | 5,55 | 5,99 | 6,42 | 6,86 | 6,86 |
| | | 1,50 | 2,10 | 2,67 | 3,24 | 3,56 | 4,05 | 4,16 | 5,00 | 5,61 | 5,61 | 5,99 | 6,42 | 6,86 | 6,86 |
| | | 1,75 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 3,56 | 4,05 | 4,16 | 5,19 | 6,12 | 6,12 | 6,12 | 6,42 | 6,86 | 6,86 |
| | | 2,00 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 3,56 | 4,05 | 4,16 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 |
| | | 2,25 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 3,72 | 4,29 | 4,37 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 |
| | | 2,50 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 3,89 | 4,53 | 4,59 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 |
| | | 2,75 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 4,05 | 4,78 | 4,80 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 |
| | | 3,00 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 4,22 | 5,02 | 5,02 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 |
| | 3,25 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 4,22 | 5,02 | 5,02 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 | |
| | 3,50 | 2,10 | 2,76 | 3,41 | 4,22 | 5,02 | 5,02 | 5,39 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,62 | 6,86 | 6,86 | |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | |
| | 0,88 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | 3,76 | |
| | 1,00 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 1,13 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 1,25 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 1,50 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 1,75 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 2,00 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 2,25 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 2,50 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 2,75 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| | 3,00 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | |
| 3,25 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | | |
| 3,50 | 1,69 | 2,10 | 2,50 | 2,81 | 3,12 | 3,76 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | | |



| Vorböhrern mit \varnothing 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | Querlast $V_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 2,29 | 2,67 | 3,05 | 3,65 | 4,26 | 4,26 | 4,26 | 4,26 | 4,26 | 4,26 | 4,26 | 4,26 |
| | | 0,88 | 2,29 | 2,74 | 3,20 | 3,65 | 4,26 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 |
| | | 1,00 | 2,29 | 2,82 | 3,34 | 3,65 | 4,26 | 4,53 | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 4,81 |
| | | 1,13 | 2,29 | 2,82 | 3,34 | 3,77 | 4,34 | 4,53 | 5,02 | 5,02 | 5,02 | 5,02 | 5,02 | 5,02 |
| | | 1,25 | 2,29 | 2,82 | 3,34 | 3,88 | 4,42 | 4,53 | 5,24 | 5,57 | 6,05 | 6,53 | 7,01 | 7,49 |
| | | 1,50 | 2,29 | 2,91 | 3,53 | 3,88 | 4,42 | 4,53 | 5,45 | 6,12 | 6,12 | 6,53 | 7,01 | 7,49 |
| | | 1,75 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 3,88 | 4,42 | 4,53 | 5,66 | 6,67 | 6,67 | 6,67 | 7,01 | 7,49 |
| | | 2,00 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 3,88 | 4,42 | 4,53 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 |
| | | 2,25 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,06 | 4,68 | 4,77 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 |
| | | 2,50 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,24 | 4,95 | 5,00 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 |
| | | 2,75 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,42 | 5,21 | 5,24 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 |
| | | 3,00 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,60 | 5,47 | 5,47 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 |
| | 3,25 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,60 | 5,47 | 5,47 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 | |
| | 3,50 | 2,29 | 3,01 | 3,72 | 4,60 | 5,47 | 5,47 | 5,88 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,22 | 7,49 | |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 |
| | 0,88 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 |
| | 1,00 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 1,13 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 1,25 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 1,50 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 1,75 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 2,00 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 2,25 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 2,50 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 2,75 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| | 3,00 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 |
| 3,25 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | |
| 3,50 | 1,84 | 2,29 | 2,73 | 3,07 | 3,41 | 4,10 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | 5,55 | |



| Vorböhrern mit \varnothing 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | 2,48 | 2,89 | 3,30 | 3,96 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 | 4,61 |
| | 0,88 | 2,48 | 2,97 | 3,46 | 3,96 | 4,61 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 | 4,76 |
| | 1,00 | 2,48 | 3,05 | 3,62 | 3,96 | 4,61 | 4,91 | 5,21 | 5,21 | 5,21 | 5,21 | 5,21 | 5,21 | 5,21 |
| | 1,13 | 2,48 | 3,05 | 3,62 | 4,08 | 4,70 | 4,91 | 5,44 | 5,44 | 5,44 | 5,44 | 5,44 | 5,44 | 5,44 |
| | 1,25 | 2,48 | 3,05 | 3,62 | 4,20 | 4,78 | 4,91 | 5,67 | 6,04 | 6,56 | 7,07 | 7,59 | 8,11 | 8,11 |
| | 1,50 | 2,48 | 3,15 | 3,83 | 4,20 | 4,78 | 4,91 | 5,91 | 6,63 | 6,63 | 7,07 | 7,59 | 8,11 | 8,11 |
| | 1,75 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,20 | 4,78 | 4,91 | 6,14 | 7,23 | 7,23 | 7,23 | 7,59 | 8,11 | 8,11 |
| | 2,00 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,20 | 4,78 | 4,91 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 2,25 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,40 | 5,07 | 5,17 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 2,50 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,59 | 5,36 | 5,42 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 2,75 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,79 | 5,64 | 5,68 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 3,00 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,98 | 5,93 | 5,93 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 3,25 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,98 | 5,93 | 5,93 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| | 3,50 | 2,48 | 3,26 | 4,03 | 4,98 | 5,93 | 5,93 | 6,37 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 7,82 | 8,11 | 8,11 |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 |
| | 0,88 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 | 4,44 |
| | 1,00 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,13 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,25 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,50 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,75 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | b,7b | b,7b | b,7b | b,7b | b,7b | b,7b | b,7b |
| | 2,00 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,25 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,50 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,75 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,00 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,25 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,50 | 2,00 | 2,48 | 2,95 | 3,32 | 3,69 | 4,44 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |



| Vorböhrern mit \varnothing 6,7 | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | 2,67 | 3,12 | 3,56 | 4,26 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 | 4,97 |
| | 0,88 | 2,67 | 3,20 | 3,73 | 4,26 | 4,97 | 5,13 | 5,13 | 5,13 | 5,13 | 5,13 | 5,13 | 5,13 | 5,13 |
| | 1,00 | 2,67 | 3,29 | 3,90 | 4,26 | 4,97 | 5,29 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 | 5,61 |
| | 1,13 | 2,67 | 3,29 | 3,90 | 4,39 | 5,06 | 5,29 | 5,86 | 5,86 | 5,86 | 5,86 | 5,86 | 5,86 | 5,86 |
| | 1,25 | 2,67 | 3,29 | 3,90 | 4,53 | 5,15 | 5,29 | 6,11 | 6,50 | 7,06 | 7,62 | 8,18 | 8,73 | 8,73 |
| | 1,50 | 2,67 | 3,40 | 4,12 | 4,53 | 5,15 | 5,29 | 6,36 | 7,14 | 7,14 | 7,62 | 8,18 | 8,73 | 8,73 |
| | 1,75 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 4,53 | 5,15 | 5,29 | 6,61 | 7,78 | 7,78 | 7,78 | 8,18 | 8,73 | 8,73 |
| | 2,00 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 4,53 | 5,15 | 5,29 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 2,25 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 4,74 | 5,46 | 5,56 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 2,50 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 4,95 | 5,77 | 5,84 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 2,75 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 5,16 | 6,08 | 6,11 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 3,00 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 5,37 | 6,39 | 6,39 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 3,25 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 5,37 | 6,39 | 6,39 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| | 3,50 | 2,67 | 3,51 | 4,34 | 5,37 | 6,39 | 6,39 | 6,86 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,43 | 8,73 | 8,73 |
| Zugkraft $N_{R,k}$ in [kN] | 0,75 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 |
| | 0,88 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 | 4,79 |
| | 1,00 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,13 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,25 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,50 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 1,75 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,00 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,25 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,50 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 2,75 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,00 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,25 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |
| | 3,50 | 2,15 | 2,67 | 3,18 | 3,58 | 3,98 | 4,79 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 | 5,75 |

| Vorböhrern mit Ø 6,9 | | Nennblechdicke Bauteil II in mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| | | 0,75 | 0,88 | 1,00 | 1,13 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | |
| Nennblechdicke Bauteil I in mm | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 1,50 | - | - | - | - | - | - | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | 6,55 | |
| | 1,75 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 6,95 | 7,30 | 7,65 | 7,80 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 2,00 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,03 | 7,34 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 2,25 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,11 | 7,38 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 2,50 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,19 | 7,42 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 2,75 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,42 | 7,54 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 3,00 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 3,25 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | 3,50 | - | - | - | - | - | 6,31 | 6,63 | 7,65 | 7,65 | 7,65 | 7,81 | 7,95 | 7,95 | 7,95 | |
| | Zugkraft N _{R,k} in [kN] | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | 0,88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1,00 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 1,13 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 1,25 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 1,50 | | - | - | - | - | - | 2,41 | 3,16 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 3,90 | |
| 1,75 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 2,00 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 2,25 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 2,50 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 2,75 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 3,00 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 3,25 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |
| 3,50 | | - | - | - | - | - | 2,53 | 3,26 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | 3,98 | |

Verbindungsarten:

Querkraft V_{R,k}

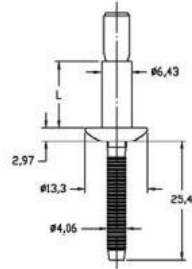
Zugkraft N_{R,k}

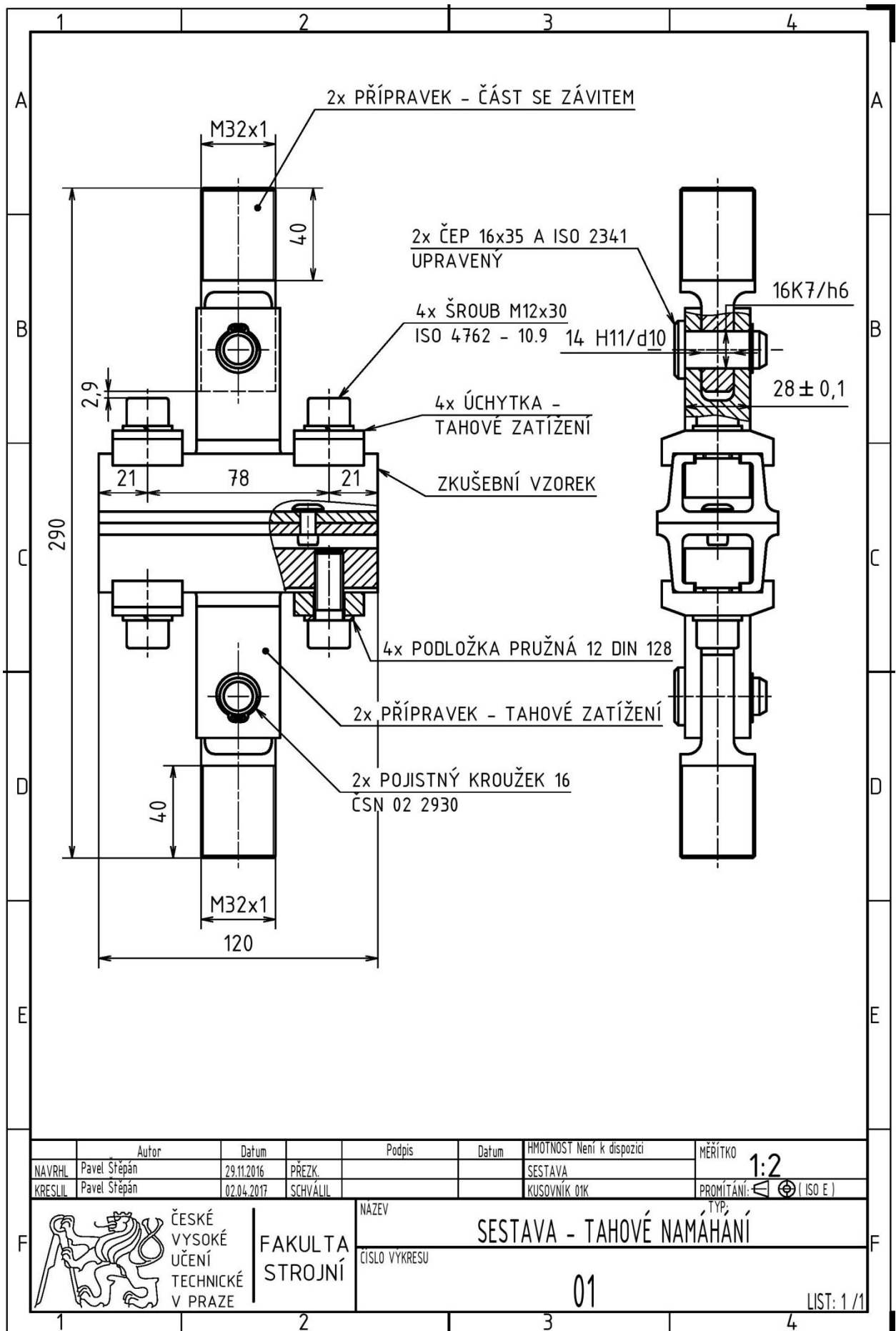


Bauteil I aus: S250GD nach DIN EN 10346

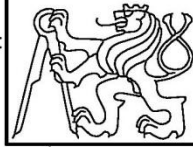
Bauteil II aus: S420 nach DIN EN 10025-1

Minimaler Randabstand in Krachrichtung 15 mm





| | | | | | | | |
|---------|--------------|------------|----------|-------|--------------|------------------|---------------------------|
| | Autor | Datum | Podpis | Datum | HMOTNOST | Není k dispozici | MĚŘÍTKO |
| NAVRHL | Pavel Štěpán | 29.11.2016 | PŘEZK. | | SESTAVA | | 1:2 |
| KRESLIL | Pavel Štěpán | 02.04.2017 | SCHVÁLIL | | KUSOVNÍK 01K | | PROMÍTÁNÍ: ISO E |

| | | | |
|---|----------------------------|---------------|---------------------------|
|  <p>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</p> | <p>FAKULTA STROJNÍ</p> | NAZEV | SESTAVA - TAHOVÉ NAMÁHÁNÍ |
| | | ČÍSLO VYKRESU | 01 |

