

**UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA  
KATEDRA DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY**

# **Hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí při složitém namáhání**

**Disertační práce**

**Ing. Bohumil Culek**

**Školitel : Prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.**

**Pardubice**

**říjen 2002**

**UNIVERSITY OF PARDUBICE  
JAN PERNER TRANSPORT FACULTY  
DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE**

**Evaluation of fatigue life of steel structures  
under complex stress**

**Dissertation**

**Ing. Bohumil Culek**

**Supervisor : Prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.**

**Pardubice**

**October 2002**

---

## Resumé

Práce vychází z požadavku stanovení odhadu životnosti pomocí pravděpodobnostního přístupu. Odhad životnosti je realizován na základě nové metodiky hodnocení únavové životnosti.

Metodika je navržena tak, aby umožňovala zahrnout do výpočtu odhadu životnosti i ty druhy zatížení, které se v průběhu experimentálního měření odezvy od provozního zatížení neprojeví (např. vliv teploty, vliv stárnutí konstrukce, vliv koroze, vliv vnějších klimatických podmínek). Metodika odhadu životnosti vychází z přístupu kumulace únavového poškození. Materiálové charakteristiky jsou dány experimentálně změřenou únavovou křivkou.

Vlastní výpočet životnosti je tvořen iteračním algoritmem, který postupně simuluje odezvu od provozního zatížení. Iterační krok odpovídá délce experimentálně změřeného záznamu napětí. Pro každý iterační krok je stanovena vždy nová únavová křivka. Hlavními částmi metodiky jsou tedy :

- simulace provozního zatížení,
- generování únavových křivek.

Simulace provozního zatížení je realizována pomocí simulační metody Monte Carlo. Simulovaný záznam má náhodný charakter, je stacionární a pravděpodobnostně odpovídá experimentálně změřenému záznamu. Simulace je umožněna modifikovanou metodou dvouparametrického „Stékajícího deště“ (Rain Flow). Modifikace spočívá v zahrnutí časového hlediska.

Experimentálně stanovená křivka je zpravidla dána omezeným počtem bodů (dle normy min. 10). Tento handicap je v metodice zohledněn pomocí generování únavových křivek. Pro experimentálně danou únavovou křivku je sestaven pás spolehlivosti, ve kterém jsou následně generovány nové únavové křivky.

Na základě simulovaného záznamu napětí a na základě vygenerované únavové křivky je proveden odhad životnosti ocelové konstrukce. Tento odhad může být realizován pomocí libovolné hypotézy využívající přístupu kumulace únavového poškození .

Disertační práce je zaměřena zejména na realizaci navržené metodiky. Výsledkem je počítačový program, kterým je metodika realizována. Pomocí tohoto programu byly již realizovány některé výpočty odhadu životnosti ocelových konstrukcí (ocelový most, podvozek železničního vozidla, karoserie autobusu). Výsledné odhady životnosti jsou kvalitnější než odhady „klasické“.

**Práce obsahuje :**

počet stran	:	101
počet obrázků	:	107
počet tabulek	:	9
počet příloh	:	14

## Poděkování :

Touto cestou děkuji školiteli Prof. Ing. Jaroslavu Menčíkovi, CSc. za vedení v průběhu doktorského studia. Kolegům na katedře dopravní infrastruktury za spolupráci při realizaci experimentálních měření na mostních konstrukcích. Děkuji také své rodině za pochopení a zázemí, které mi v průběhu mého studia vytvořila.

---

## Summary

The thesis meets requirements for life estimation using the probability approach. The life estimate is based on a new method of fatigue life evaluation.

The method is proposed in order to allow inclusion of those types of stress into the life estimate calculation, which need not present during the experimental measurement of traffic load response (e.g. effects of temperature, ageing of the structure, corrosion, external climatic conditions). The life estimate method is based on the approach of cumulative fatigue damage. Material characteristics are defined by experimental fatigue curve.

The life calculation itself uses iterative algorithm that successively simulates the traffic load response. An iteration cycle corresponds to the length of experimentally measured stress record. A new fatigue curve is always determined for each iteration cycle. The main parts of the method then are:

- Simulation of the traffic load.
- Generating of the fatigue curves.

Simulation of the traffic load uses the Monte Carlo method. The simulated record is of random nature, stationary and as to the probability, it corresponds to the experimental record. The simulation is enabled by the modified method of two-parameters “Rain Flow”. The modification means that the time factor is included.

The experimental curve is usually defined by a limited number of points (minimum 10 according to the standard). This handicap is compensated for in the method by generating the fatigue curves. There is a reliability range construed for each experimental fatigue curve where new fatigue curves are consequently generated.

Based on the simulated stress record and the generated fatigue curve, the life of the steel structure will be estimated. Such estimate can be realized by means of any hypothesis that uses the cumulative fatigue damage approach.

The dissertation thesis is aimed in particular at the realization of the proposed method. As a part of thesis, a computer program has been developed, which was used for the estimation of fatigue life of several structures (steel bridge, rail carriage chassis, bus body). The resultant estimates are better than the “classic” ones.

---

## Zusammenfassung

Die Arbeit geht aus den Festlegungsanforderungen der Lebensdauerschätzung mittels des Wahrscheinlichkeitszugangs hervor. Die Lebensdauerschätzung wird aufgrund einer neuen Bewertungsmethodik der Lebensdauerermüdung realisiert.

Die Methodik wurde so vorgeschlagen, damit in die Berechnungen der Lebensdauerschätzungen auch die Einrichtungsarten mit einbezogen werden können, die sich im Verlauf der experimentellen Reaktionsmessungen nicht äußern (z. B. Temperatureinfluss, Einfluss des Alterungsprozesses der Konstruktion, Korrosionseinfluss, Einfluss äußerer klimatischer Bedingungen). Die Methodik der Lebensdauerschätzung geht aus der Häufigkeitseinstellung der Alterungsprozessbeschädigungen hervor. Die Materialcharakteristiken sind durch die experimentell gemessene Ermüdungskurve gegeben.

Die eigentliche Berechnung der Lebensdauer wird durch den Algorithmuszyklus gegeben, der stufenweise die Reaktion der Betriebsbelastung simuliert. Der Zyklusschritt entspricht der Länge der experimentell gemessenen Spannungsaufzeichnung. Für jeden Zyklusschritt wird immer eine neue Ermüdungskurve festgelegt. Die Hauptteile der Methodik bilden:

- die Simulation der Betriebsbelastung und
- das Generieren der Ermüdungskurven.

Die Simulation der Betriebsbelastung wird mittels der Simulationsmethode Monte Carlo realisiert. Die simulierte Aufzeichnung besitzt einen zufälligen Charakter, ist stationär und der Wahrscheinlichkeit nach entspricht diese der experimentell gemessenen Aufzeichnung. Die Simulation wird durch die modifizierte Methode des doppelparametrischen „ablaufenden Regens“ (Rain Flow) ermöglicht. Die Modifikation beruht auf der Miteinbeziehung der Zeit.

Die experimentell festgelegte Kurve wird in der Regel durch die eingeschränkte Punktzahl gegeben (entsprechend der Norm min. 10). Dieses Handicap wird in der Methodik mittels generierter Ermüdungskurven berücksichtigt. Für die experimentell gegebene Ermüdungskurve wird ein Zuverlässigkeitsstrang erstellt, in welchem anschließend neue Ermüdungskurven generiert werden.

Aufgrund der simulierten Spannungsaufzeichnung und aufgrund der generierten Ermüdungskurve wird eine Schätzung der Stahlkonstruktionslebensdauer durchgeführt. Diese Schätzung kann mittels einer beliebigen Hypothese realisiert werden, die den Häufigkeitszugang der Ermüdungsbeschädigung nutzt.

Die Dissertation wurde insbesondere auf die Realisierung der vorgeschlagenen Methodik gerichtet. Das Ergebnis ist ein Rechnerprogramm, mittels dem die Methodik realisiert wird. Mit Hilfe dieses Programms wurden bereits einige Berechnungen von Stahlkonstruktionslebensdauerschätzungen (Stahlbrücke, Fahrgestell eines Eisenbahnfahrzeuges, Buskarosserie) realisiert. Endlebensdauerschätzungen sind qualitativ hochwertiger als „klassische“ Schätzungen.

---

## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>3. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>10</b>
<b>4. METODIKA HODNOCENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI.....</b>	<b>12</b>
4.1. POJMY.....	12
4.2. SIMULACE PROVOZNIHO ZATÍŽENÍ .....	15
4.2.1. Simulace s „konstantní“ odezvou od provozního zatížení.....	15
4.2.2. Simulace s „proměnnou“ odezvou od provozního zatížení .....	17
4.3. STANOVENÍ ÚNAVOVÉ KŘIVKY .....	20
4.3.1. Určení únavové křivky ve výpočtu životnosti .....	21
4.4. VLASTNÍ POSTUP STANOVENÍ ODHADU ŽIVOTNOSTI.....	23
4.4.1. Použití metody Monte Carlo pro simulaci jednotlivých parametrů.....	23
4.4.2. Generování náhodných čísel na číslicovém počítači .....	24
4.5. POUŽITÉ HYPOTÉZY ODHADU ŽIVOTNOSTI .....	24
4.5.1. Hypotézy využívající diskretizaci náhodného procesu napětí.....	24
4.5.2. Hypotézy využívající statistických charakteristik náhodného procesu napětí.....	25
4.6. STRUKTUROVANÉ ŘEŠENÍ VÝPOČTU ODHADU ŽIVOTNOSTI .....	27
<b>5. REALIZACE HODNOCENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI.....</b>	<b>29</b>
5.1. SIMULACE ODEZVY OD PROVOZNIHO ZATÍŽENÍ .....	29
5.1.1. Rain-Flow zdrojového záznamu z měření .....	30
5.1.1.1. „Tříparametrický“ RF .....	36
5.1.1.2. Generování matic Rain-Flow .....	38
5.1.3. Simulace záznamu napětí.....	42
5.1.3.1. Generování nových amplitud .....	44
5.1.4. Rozšíření o významový koeficient.....	48
5.2. SIMULACE ÚNAVOVÉ KŘIVKY .....	50
5.2.1. Stanovení regresní únavové křivky.....	51
5.2.2. Generování únavové křivky .....	51
5.2.3. Transformace únavové křivky pro danou střední hodnotu .....	52
5.3. VÝPOČET DÍLČÍCH POŠKOZENÍ A STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI.....	54
5.3.1. Statistické vyhodnocení dílčích poškození a životnosti.....	55
5.4. STRUČNÝ POPIS VYTVOŘENÉHO PROGRAMU „PLZEN“ .....	57
5.4.1. Popis kontrolních souborů .....	57
5.4.2. Stručný popis jednotlivých částí programu.....	58
5.4.2.1. Úvodní obrazovka .....	58
5.4.2.2. Vlastní prostředí programu .....	58
5.4.2.3. Položka „Otevřít záznam měření“ z menu „Soubor“ .....	59
5.4.2.4. Položka „Otevřít únavovou křivku“ z menu „Soubor“ .....	60
5.4.2.5. Položka „Otevřít významový koeficient“ z menu „Soubor“ .....	60
5.4.2.6. Položka „Vytvoření matice RF“ z menu „Výpočet“ .....	61
5.4.2.7. Položka „Generování matic RF“ z menu „Výpočet“ .....	62
5.4.2.8. Položka „Simulace zdrojového záznamu“ z menu „Výpočet“ .....	62

5.4.2.9. Položka „Rozšíření o významový koeficient“ z menu „Výpočet“ .....	63
5.4.2.10. Položka „Vytvoření únavové křivky“ z menu „Výpočet“ .....	63
5.4.2.11. Položka „Generování únavové křivky“ z menu „Výpočet“ .....	63
5.4.2.12. Položka „výpočet životnosti“ z menu „Výpočet“ .....	63
5.4.3. Postup zadávání .....	65
5.5. HARDWARE A SOFTWARE.....	65
5.5.1. Požadavek hardware .....	65
5.5.2. Software .....	66
<b>6. ANALÝZA A TESTY KVALITY.....</b>	<b>66</b>
6.1. TESTY CITLIVOSTI SIMULOVANÉHO ZÁZNAMU NA KVALITU RF .....	66
6.1.1. Test citlivosti na rozměr matice RF .....	66
6.1.2. Test citlivosti na zadanou max. amplitudu .....	68
6.1.3. Test citlivosti na zadanou stř. hodnotu rozkmitu .....	69
6.1.4. Test citlivosti na zadanou amplitudovou citlivost matice .....	70
6.2. OVĚŘENÍ KVALITY (ANALÝZA) SIMULOVANÉHO ZÁZNAMU NAPĚTÍ .....	71
6.2.1. Ověření kvality porovnáním matic RF .....	71
6.2.2. Ověření kvality porovnáním „distribučních“ funkcí.....	74
<b>7. VÝPOČET ODHADU ŽIVOTNOSTI – VERIFIKACE ZPŮSOBU VÝPOČTU .....</b>	<b>76</b>
7.1. VÝPOČET ODHADU ŽIVOTNOSTI OCELOVÉHO MOSTU .....	76
7.1.1. Výpočet odhadu životnosti ocelového mostu „klasicky“ .....	79
7.1.2. Výpočet odhadu životnosti ocelového mostu „pravděpodobnostně“ (program „Plzen“).....	81
7.2. VÝPOČET ODHADU ŽIVOTNOSTI RÁMU ŽELEZNIČNÍHO PODVOZKU Y 25 .....	85
7.2.1. Výpočet odhadu životnosti rámu podvozku Y-25 „klasicky“ .....	87
7.2.2. Výpočet odhadu životnosti rámu podvozku Y-25 „pravděpodobnostně“ (program „Plzen“).....	88
7.3. ROZBOR VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ ŽIVOTNOSTI DOSAŽENÝCH PROGRAMEM „PLZEN“ .....	90
<b>8. ZÁVĚR .....</b>	<b>92</b>
8.1. METODIKA ODHADU ŽIVOTNOSTI.....	92
8.2. REALIZACE METODIKY VE VYTVOŘENÉM VÝPOČETNÍM PROGRAMU .....	93
8.3. APLIKACE METODIKY NA ODHAD ŽIVOTNOSTI .....	94
8.4. POROVNÁNÍ ODHADŮ ŽIVOTNOSTÍ .....	95
8.5. NÁMĚTY PRO DALŠÍ VÝZKUM .....	95
8.6. PŘÍNOSY PRO PRAXI .....	95
<b>LITERATURA .....</b>	<b>97</b>
<b>VLASTNÍ PUBLIKACE.....</b>	<b>99</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>101</b>

#### Upozornění :

Na disertační práci se vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon.

---

## Seznam použitých zkratk a označení

$D_C$	je celkové dílčí poškození
$D_P$	je dílčí poškození od zatížení provozního
$D_S$	je dílčí poškození od stárnutí konstrukce
$D_V$	je dílčí poškození od vnějších klimatických podmínek
$D_O$	je dílčí poškození od ostatních zatížení.
$\sigma_{CN}$	je celkové napětí v konstrukci v daný časový okamžik
$k_T$	je významový koeficient od „zatížení teplotou“ (vlivu změny teploty)
$k_S$	je významový koeficient zohledňující stárnutí konstrukce
$k_V$	je významový koeficient od „zatížení vnějšími klimatickými podmínkami“ (vlivu změny klimatických podmínek)
$k_O$	je významový koeficient od ostatních zatížení
$\sigma_P$	je napětí v konstrukci v daný časový okamžik od provozního zatížení
$\sigma_R$	je amplituda namáhání
$\log \sigma_R$	je únavová pevnost vyjádřená v logaritmickém tvaru
$\sigma_C$	je mez únavy
$\sigma_D$	je mez únavy při konstantní amplitudě
$\sigma_L$	je amplituda prahového rozkmitu napětí
$N$	je počet kmitů (cyklů) napětí
$\log N$	je počet kmitů (cyklů) napětí vyjádřený v logaritmickém tvaru
$m$	je konstanta sklonu křivky únavové pevnosti (u mostních konstrukcí trilineární křivka se sklony 3 a 5)
$\log a$	je konstanta únavové křivky, platná v určené oblasti $N$ .
$n_i$	je počet cyklů dané amplitudy
$N_p$	je počet cyklů největší amplitudy do poruchy
$h_z$	je celkový počet kmitů všech amplitud
$\sigma_{ai}$	je výchylka dané amplitudy
$\sigma_{ap}$	je výchylka maximální amplitudy
$k$	je redukce únavové křivky
$f$	je frekvence [Hz]
$F_\sigma(f)$	je výkonová spektrální hustota procesu namáhání [ $\text{MPa}^2 \cdot \text{s}$ ]
$P(\chi^2_{m+2} > a^2)$	je komplement distribuční funkce $\chi^2$ rozdělení
$N_0$	je bazový počet cyklů, tj. počet cyklů na mezi únavy
$a = \frac{\sigma_c}{S_\sigma}$	je dolní mez integrace
$S_\sigma$	je směrodatná odchylka procesu namáhání.
$n_0$	je počet průchodů střední hodnotou procesu v obou směrech za jednotku času
$n_e$	je počet maxim a minim procesu za jednotku času
$m_j$	je $j$ -tý moment výkonové spektrální hustoty procesu napětí
konst	je konstanta únavové křivky
$\sigma_{ar}$	je transformovaná amplituda namáhání
$\sigma_{mi}$	je střední hodnota rozkmitu
$\varphi$	je součinitel sbíhavosti Smithova diagramu
konst2	je transformovaná konstanta únavové křivky.
$\sigma_a$	je amplituda napětí
$+\sigma_m$	je kladná střední hodnota rozkmitu
$-\sigma_m$	je záporná střední hodnota rozkmitu



## 1. ÚVOD

Únavová životnost ocelových konstrukcí a částí strojů namáhaných náhodným procesem zatížení patří k stěžejním ukazatelům spolehlivosti vyráběných a provozovaných konstrukcí. Ukazuje se, že je nutné neustále zdokonalovat stávající a hledat nové postupy hodnocení životnosti. V praxi se většinou používají standardní postupy založené na kumulaci únavového poškození, přehledně jsou jednotlivé postupy popsány např. v pracích [1,2].

Uvedené postupy posuzování na únavu vycházejí z hypotéz kumulace únavového poškození [7]. Některé z nich se vyskytují v normách pro navrhování ocelových konstrukcí a mostů [3,4,5].

Dalším přístupem k posuzování životnosti konstrukcí je posuzování z hlediska lomové mechaniky. Tento přístup se volí v případě, kdy se na konstrukci již objeví trhliny a je nezbytné určit kritickou délku trhliny k stanovení zbytkové životnosti [2,6].

Možným postupem při posuzování na únavu je také posuzování pomocí tzv. ekvivalentního rozkmitu napětí [4]. Tento způsob je využíván při navrhování nové konstrukce, kdy neznáme skutečnou odezvu od zatížení. Do výpočtu odhadu životnosti v tomto případě vstupují součinitele vlivu objemu dopravy, návrhové doby života mostu, vlivu těžké dopravy na dalších jízdních pružích (kolejích), meze únavy, typu nosníku.

Testování standardních postupů hodnocení životnosti ocelových konstrukcí [48] ukázalo, že ne vždy je můžeme s úspěchem použít.

Ze standardních postupů se jako výhodnější jeví použití hypotéz, které respektují střední hodnotu rozkmitu napětí a amplitudu napětí i pod mezí únavy. Takovou hypotézou je např. hypotéza Corten-Dolanova. Tato hypotéza je s úspěchem využívána v oboru kolejových vozidel. Vzhledem k tomu, že je univerzální, je možné ji využít i u ocelových mostů [48].

Východiskovým podkladem při řešení odhadu životnosti ocelových konstrukcí je objektivně správné stanovení provozních podmínek. Provozní podmínky reprezentované silovými účinky a dalšími vlivy určují provozní namáhání. Protože toto namáhání má u ocelových konstrukcích většinou charakter složitého náhodného procesu, je na místě použít při odhadu životnosti pravděpodobnostní přístup, který vede k dokonalejšímu stanovení reprezentativní odezvy od provozního zatížení.

Stejným způsobem je nutné přistupovat i k druhému nezbytnému podkladu pro hodnocení životnosti, tj. k materiálovým charakteristikám. I zde je ve hře mnoho vlivů, které náhodným způsobem působí na materiál konstrukce v průběhu předpokládaného technického života konstrukce. Přitom je třeba si uvědomit, že i samotné stanovení např. Wöhlerovy charakteristiky standardním postupem zkouškami konstrukčních uzlů na dynamickém stavu má řadu náhodných prvků, které je třeba posuzovat na základě pravděpodobnostního přístupu.

V souvislosti s neustálými snahami o zdokonalení metodik hodnocení únavové životnosti konstrukcí, je nutné hledat i zcela nové přístupy k řešení této problematiky. Jednou z cest by mohl být postup navržený v této práci.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíle disertační práce jsou následující :

- vypracovat metodiku pravděpodobnostního přístupu hodnocení životnosti (využit simulačních metod),
- aplikovat navrženou metodiku pro odhad životnosti reálné konstrukce namáhané složitým náhodným procesem zatížení,
- porovnat výsledky odhadu životnosti dosažené standardním postupem s výsledky vyhodnocenými navrženou metodikou,
- porovnat vypočtené životnosti se životnostmi zjištěnými experimentálně.

## 3. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Hodnocení únavové životnosti lze provádět v zásadě dvěma různými přístupy [7]:

- přístup vycházející z kumulace únavového poškození (wöhlerovský přístup),
- přístup vycházející z lomové mechaniky.

Přístup vycházející z **lomové mechaniky** (v praxi dosud lineární lomové mechaniky) předpokládá existenci počáteční trhliny určité délky a počítá se šířením až do její mezní délky. Vhodnost tohoto přístupu je vázána na stávající konstrukce, u nichž již vznikla vlivem provozního zatížení trhlina. Využitelnost je zaměřena na stanovení zbytkové životnosti ocelových konstrukcí. Přístup lomově mechanický, který je podrobně popsán v [např. 1,2,35], je v současnosti stále častěji využíván, mimo jiné také díky prudkému rozvoji výpočetní techniky. Přesto nemůže plně nahradit přístup vycházející z kumulace únavového poškození.

**Wöhlerovský přístup**, je popsán v mnoha normách [např. 3,4,5], odborné literatuře [1,2,6,7,9,11], využíván při navrhování konstrukcí [4] a hodnocení stávajících konstrukcí [např. 7,10,14].

Počátek Wöhlerovského přístupu je datován k přelomu 19. a 20. století. V průběhu uplynulých let vzniklo v této oblasti velké množství hypotéz odhadu únavové životnosti. Jeden z možných pohledů na jejich zařazení je následující :

- 1) Standardní způsoby
  - postupy využívající diskretizace procesu napětí,
  - postupy založené na znalosti statistických charakteristik,
  - postupy využívající k odhadu únavové životnosti lokální napjatosti ve vrubu.
- 2) Normové přístupy
  - stávající konstrukce,
  - navrhované konstrukce.
- 3) Nové pravděpodobnostní přístupy
  - využívání „obecných“ programových prostředků,
  - využívání „speciálních“ programových prostředků.

Nejširší skupinou jsou postupy využívající diskretizace (dekompozice) procesu napětí. Různé metody diskretizace jsou podrobně popsány např. v [1]. Nejvíce využívanou hypotézou je modifikovaná hypotéza **Palmgren-Minerova**. Setkáme se s ní ve většině případů hodnocení únavové životnosti [9,17], v normách [3,4,5], v odborné literatuře. Další, velmi významnou, hypotézou je hypotéza **Corten-Dolanova**. Tato hypotéza umožňuje, při zachování lineární únavové křivky, zahrnout do výpočtu napětí pod mezí únavy. Další hypotézy (dnes méně používané) jsou popsány v [1,2].

Mezi nejvýznamnější zástupce postupů založených na znalosti statistických charakteristik patří hypotézy **Rajcherova** a **Novarovova** [1,2,11,13,48]. Podkladem pro tyto hypotézy je frekvenční analýza a na jejím základě sestavená spektrální výkonová hustota. Tyto hypotézy přímo pracují s teorií pravděpodobnosti, k výpočtu využívají Pearsonovo rozdělení pravděpodobnosti, Gama funkci. Hypotéza je blíže popsána v kapitole 4.5. této práce.

Hypotézy **Langrafova** a **Wetzelova** [1] jsou hypotézy kumulace únavového poškození, které vychází z lokální napjatosti v kořeni vrubu, kde v omezeném objemu materiálu dochází často k elasticko-plastické deformaci. S tímto typem hypotéz jsem se setkal pouze v odborné literatuře.

Normové přístupy odhadu životnosti stávajících konstrukcí vychází z hypotézy **Palmgren-Minerovy**. U ocelových mostů dále k výpočtu využívají tri-lineární únavovou křivku. Pro vybrané kategorie detailu jsou únavové křivky popsány v normách [3,4,5]. Normy umožňují použití experimentálně stanovené únavové křivky, počet měření však v tomto případě nesmí být menší než deset.

Normové přístupy odhadu životnosti nově navrhovaných konstrukcí (**ve statickém výpočtu – posouzení na únavu**), vycházejí z empirických vztahů, kdy do výpočtu vstupují koeficienty materiálové (součinitel spolehlivosti únavového zatížení, součinitel asymetrie cyklu, součinitel vlivu tloušťky materiálu, součinitel spolehlivosti únavové pevnosti), koeficienty únavové (ekvivalentní konstantní rozkmit normálového napětí, dynamický součinitel únavového zatížení, rozkmit na mezi únavy) a koeficienty zatížení (počet cyklů za rok, rozkmit napětí, součinitel ekvivalentního poškození – u železničních ocelových mostů daný typem nosníku, objemem dopravy, návrhovou dobou života, počtem kolejí na mostě). Podrobný popis posouzení na únavu je uveden v [3,4].

Problematikou únavové životnosti mostních ocelových konstrukcí a konstrukcí kolejových vozidel se také kontinuálně zabývají **výbory znalců ERRI** (European Rail Research Institute). Výsledky jejich práce jsou uvedeny např. ve zprávách ERRI [39,40,41].

V posledních letech, v souvislosti s prudkým rozmachem výpočetní techniky, se začínají využívat nové – pravděpodobnostní přístupy, principiálně vycházející z výše uvedených hypotéz. Tyto nové přístupy využívají ke stanovení odhadu životnosti **pravděpodobnostní metody** (např. metoda Monte Carlo, metoda Zobecněných latinských čtverců, metoda Odezvové plochy). Podstatou těchto metod je velké množství výpočtů-simulací [23,24].

K odhadu životnosti se používá počítačových výpočetních systémů. Prvním typem těchto systémů jsou programy, které nejsou specificky zaměřené, tzn. že jejich využití je možné v mnoha směrech a výpočet životnosti je pouze jednou z možností využití. Mezi tyto systémy patří např. systém **M-Star**, **Ant-Hill (metoda SBRA)** a systém **VaP** [36,37]. Tyto systémy umožňují provést výpočet odhadu životnosti na požadovanou pravděpodobnost poruchy. Komplexní pohled na odhad životnosti však předpokládá flexibilní výpočtový systém, umožňující reagovat na změnu zatížení, změnu materiálových charakteristik, umožňující zahrnutí všech druhů zatížení do výpočtu (ne pouze provozní zatížení dané jednorázovým experimentálním měřením). Uvedené pravděpodobnostní systémy toto neumožňují.

Komplexním pohledem na odhad životnosti by do budoucna měly být přístupy využívající při výpočtu „speciální“ **počítačové výpočetní systémy**, které by do výpočtu zahrnovaly kromě jiného časový parametr změny v průběhu předpokládaného technického života konstrukce (následnost rozkmitů). V současné době mi není znám žádný software, který by tento komplexní pohled na životnost ocelových konstrukcí splňoval. Ve svém studiu a praxi jsem se setkal pouze s metodami, které by toto umožňovaly [11,38], ovšem nejsou

programově zpracovány. Z tohoto hlediska je má metodika a její realizace v podobě počítačového programu novým postupem.

#### 4. METODIKA HODNOCENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

V práci navržená metodika hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí respektuje obecně náhodný charakter zatížení, resp. odezvy konstrukce na zatížení. Metodika je postavena tak, aby v maximální možné míře byly respektovány i ty druhy vlivů, které se podstatnou měrou podílejí na době života konstrukce a které nejsou soudobými přístupy ve výpočtu respektovány (vliv teploty, vliv koroze, vliv větru, vliv vodních srážek, vliv stárnutí konstrukce).

Metodika dále zohledňuje i nejistoty v experimentálně získaných údajích o materiálových charakteristikách (reprezentovaných únavovými křivkami).

Podstatou metodiky je **syntéza** teoretických a experimentálních **metod řešení** :

- **experimentální metody**
  - tenzometrická měření ocelových konstrukcí
  - měření teploty ovzduší a povrchové teploty konstrukcí
  - hydrometeorologická měření tlaku větru
  - hydrometeorologická měření množství vodních srážek
  - defektoskopická měření ocelových konstrukcí
  - experimentální měření stárnutí oceli
- **teoretické metody**
  - zpracování záznamů experimentálních měření (filtrace, dekompozice)
  - metody statistického vyhodnocení záznamů experimentálních měření
  - metody počítačové simulace
  - metody hodnocení životnosti
  - teoretické rozborů jednotlivých problémů
  - analýza výsledků řešení.

Na obr.4.1. je uvedeno **blokové schéma metodiky**, které schematicky zobrazuje jednotlivé části metodiky a jejich vzájemné vazby. Řešení jednotlivých bloků je popsáno v následujících kapitolách práce.

#### 4.1. POJMY

##### *Zatížení*

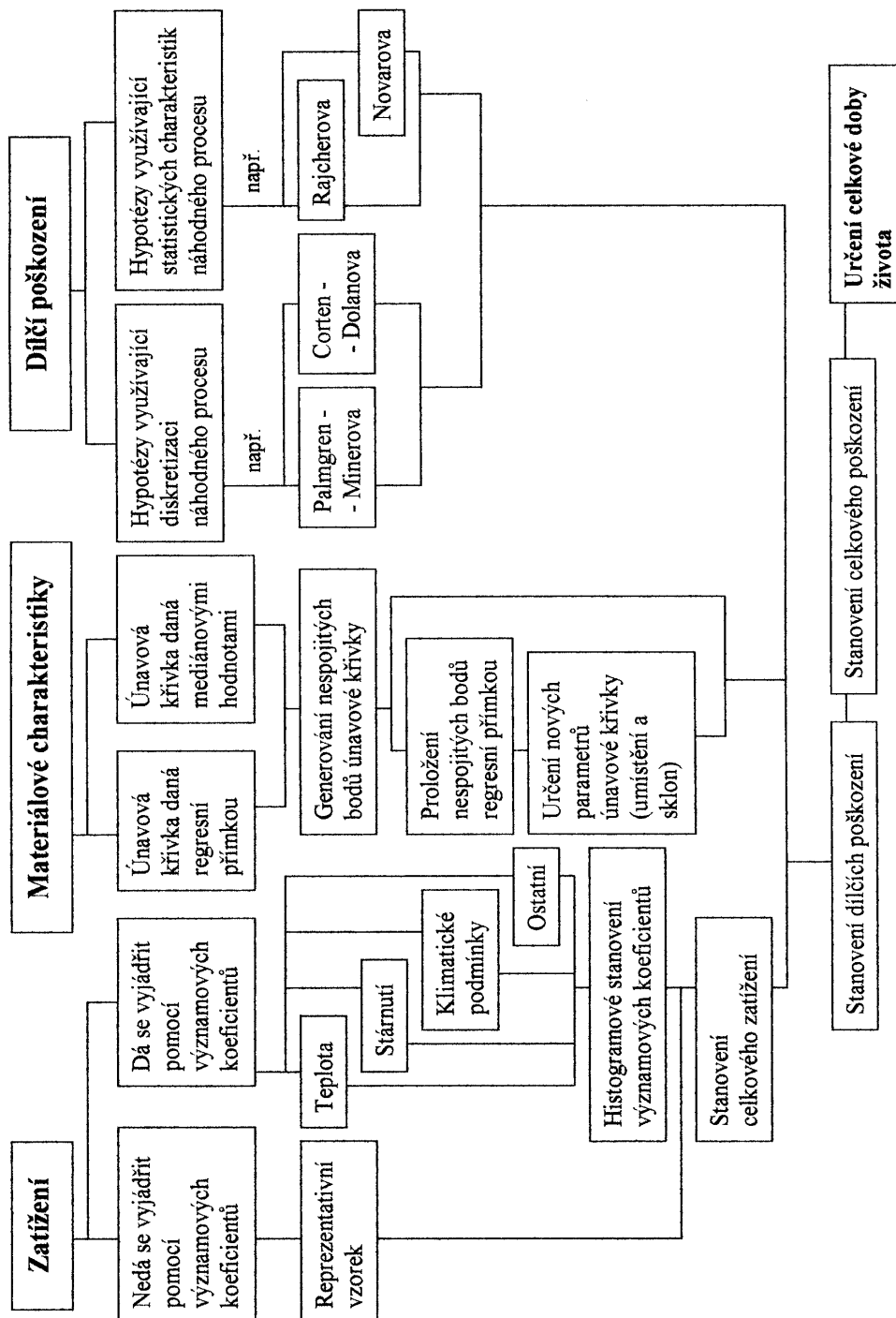
Náhodný proces vyvolá v konstrukci napěťovou odezvu, kterou lze popsat buď parametricky (např. dvouparametrickou metodou stékajícího deště), nebo funkcionálně (např. pomocí spektrální výkonové hustoty). Vycházíme-li z předpokladu kumulace únavového poškození, způsobí každé časově omezené zatížení v konstrukce tzv. dílčí poškození. **Celkové dílčí** poškození lze charakterizovat jako součet dílčích poškození :

$$D_C = D_P + D_T + D_S + D_V + D_O \quad (4.1)$$

kde	$D_C$	je celkové dílčí poškození
	$D_P$	je dílčí poškození od provozního zatížení
	$D_S$	je dílčí poškození od „stárnutí konstrukce“
	$D_V$	je dílčí poškození od „vnějších klimatických podmínek“

$D_0$  je dílčí poškození od ostatních zatížení.

V praxi však existuje pouze možnost změřit v daném časovém okamžiku nebo úseku pouze odezvu od celkového zatížení. Pokud však provedeme měření několikrát při zachování (přibližném zachování) všech podmínek zatížení kromě jediné, můžeme určit (např. procentuálně) význam té podmínky, která se výrazně změnila (např. teplota, povětrnostní podmínky). Provedenými testy a následným statistickým zpracováním určíme významové koeficienty (popsané dále).



Obr. 4.1 Blokové schéma metodiky

### Významové koeficienty

Odezvu od zatížení získáme většinou v podobě časového záznamu napětí detailu konstrukce. V každý časový okamžik vyvolá zatížení v konstrukci odezvu, kterou lze změřit ve formě mechanického napětí. Časový okamžik odpovídá frekvenci snímání napětí v konstrukci. **Celkové napětí v konstrukci** v daný časový okamžik pak lze vyjádřit vztahem :

$$\sigma_{CN} = k_T * k_S * k_V * k_O * \sigma_P \quad (4.2)$$

kde	$\sigma_{CN}$	je celkové napětí v konstrukci v daný časový okamžik
	$k_T$	je významový koeficient od „zatížení teplotou“ (vlivu změny teploty)
	$k_S$	je významový koeficient zohledňující stárnutí konstrukce
	$k_V$	je významový koeficient od „zatížení vnějšími klimatickými podmínkami“ (vlivu změny klimatických podmínek)
	$k_O$	je významový koeficient od ostatních zatížení
	$\sigma_P$	je napětí v konstrukci v daný časový okamžik od provozního zatížení
	*	vyjadřuje matematickou funkci popisující vztah mezi významovými koeficienty a napětím v konstrukci (násobek, součet, podíl, rozdíl).

**Významové koeficienty** zesilují nebo zeslabují v daný časový okamžik vztažné napětí („provozní napětí“). Je nutno říci, že se tyto koeficienty mění s časem. Významové koeficienty se mění v závislosti na své frekvenci změny, která je podstatně nižší než frekvence snímání. Pro výpočet životnosti je nutné, aby významové koeficienty byly po celou dobu měření vzorového (reprezentativního) záznamu pokud možno konstantní.

Pomocí významových koeficientů můžeme do výpočtu zahrnout odezvy od zatížení, které mají dlouhodobý charakter. Odezvy, jejichž změna se neprojeví v průběhu experimentálního měření.

Pozn.: Stanovit tyto významové koeficienty a jejich vztah k provoznímu zatížení je námětem pro další výzkum a není tématem této disertační práce. V příloze č.1 jsou uvedeny odezvy od zatížení, které by mohly být pomocí významových koeficientů vyjádřeny a které mají na životnost ocelových konstrukcí (např. ocelových mostů) významný vliv.

### Reprezentativní vzorek

Reprezentativní vzorek musí být určen měřením, které odpovídá provozu, tzn. odezva od zatížení (reprezentativní) musí odpovídat zatížení, které se v době života vyskytuje v největší míře (s největší pravděpodobností). Např. je velký rozdíl mezi zatížením mostu při běžném provozu a při omezeném provozu.

Reprezentativní vzorek je tím **reprezentativnější**, čím větší je časový interval, po který byl zaznamenáván, a čím přesněji jsou s příslušnými váhami do něho zahrnuty jednotlivé provozní vlivy. Délka záznamu je však omezena neměnností vnějších podmínek.

Kolisání vnějších podmínek je třeba vyjádřit pomocí významových koeficientu. (v některých případech toto kritérium můžeme splnit – viz. výše)..

## Provozní zatížení

Provozním zatížením rozumíme zatížení, které má **rozhodující podíl** na stanovení doby života. Toto zatížení je většinou souhrnem více zatížení. Např. v případě mostní konstrukce je kromě jiného toto provozní zatížení ovlivněno rychlostí jízdy vozidel po mostě, hmotností na nápravu projíždějících vozidel. Provozní zatížení v sobě může zahrnovat zatížení, které lze vyjádřit pomocí významových koeficientů, vždy však v sobě zahrnuje také zatížení, které pomocí významových koeficientů vyjádřit nelze (např. boční rázy). Dobře provedený statistický výběr provozního zatížení tvoří reprezentativní vzorek provozního zatížení.

Protože všechna ostatní zatížení nám v podstatě pomocí významových koeficientů zesilují nebo zeslabují velikost provozního zatížení, je třeba, aby toto zatížení (respektive odezva na toto zatížení) bylo co nejvíce přesné. Odezva od provozního zatížení je statisticky tím přesnější, čím delší je jeho časový záznam.

### 4.2. SIMULACE PROVOZNÍHO ZATÍŽENÍ

Měření odezvy od provozního zatížení lze nepřetržitě provádět po **omezenou dobu**. Např. tenzometrické měření mostní konstrukce na 20 místech lze reálně provádět po dobu několika dnů až týdnů. Z hlediska vlivů, projevujících se v průběhu celkové doby života konstrukce (vliv teploty v průběhu roku, vliv koroze, vliv stárnutí materiálu), je tato doba zanedbatelná.

Protože se tyto **vlivy v průběhu měření neprojeví**, musí se do výpočtu zahrnout dodatečně (mimo fázi měření odezvy). V některých případech může být délka měření dostatečná na to, aby se vlivy, které chceme do odhadu životnosti zahrnout dodatečně, částečně projevíly. Následným zahrnutím těchto vlivů do výpočtu by docházelo k jejich duplicitě. Proto je nutné dobu měření upravit tak, aby se tyto důležité vlivy v průběhu měření neprojevíly – byly pokud možno konstantní. Znamená to tedy, že délka měření nesmí být časově nadměrně dlouhá (nad rámec změny těchto vlivů).

Následné zahrnutí zmíněných vlivů do výpočtu podle vztahu (4.2) naopak předpokládá časovou délku záznamu napětí od provozního zatížení minimálně stejnou, jako je nejvyšší perioda změny jednotlivých vlivů. Toto tvrzení je v protikladu s tvrzením předešlým (kdy naopak požadujeme čas měření provozního zatížení omezit). Aby vztah (4.2) byl řešitelný, je nutné záznam z měření provozního zatížení v časovém parametru prodloužit pomocí výpočtové simulace.

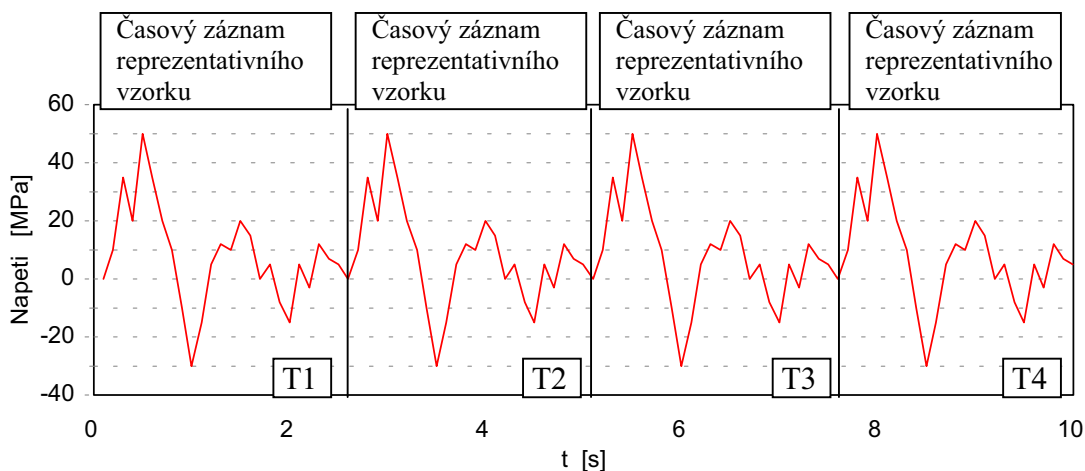
**Simulaci provozního zatížení** lze provést dvojím způsobem :

- 1) simulace s „konstantní“ odezvou od provozního zatížení,
- 2) simulace s „proměnnou“ odezvou od provozního zatížení.

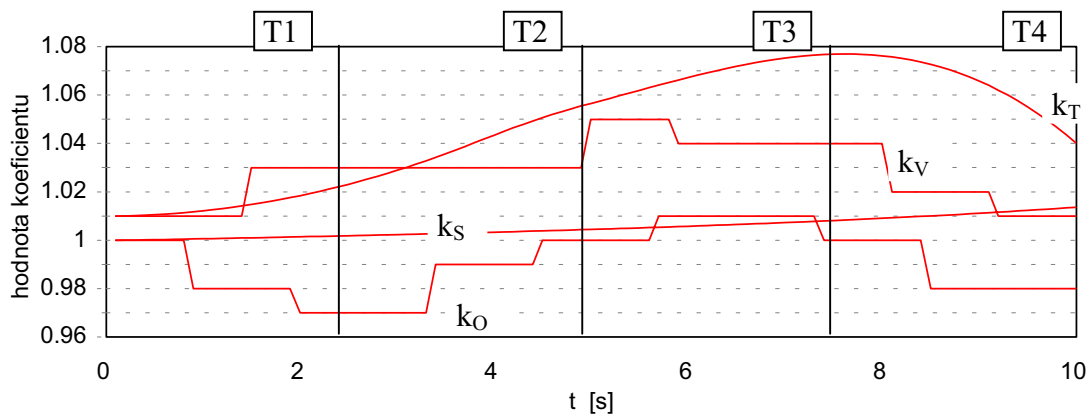
#### 4.2.1. Simulace s „konstantní“ odezvou od provozního zatížení

Nejjednodušší simulací je **postupné načítání** vždy stejného a neměnného časového záznamu reprezentativního vzorku odezvy od provozního zatížení (obr.4.2.).

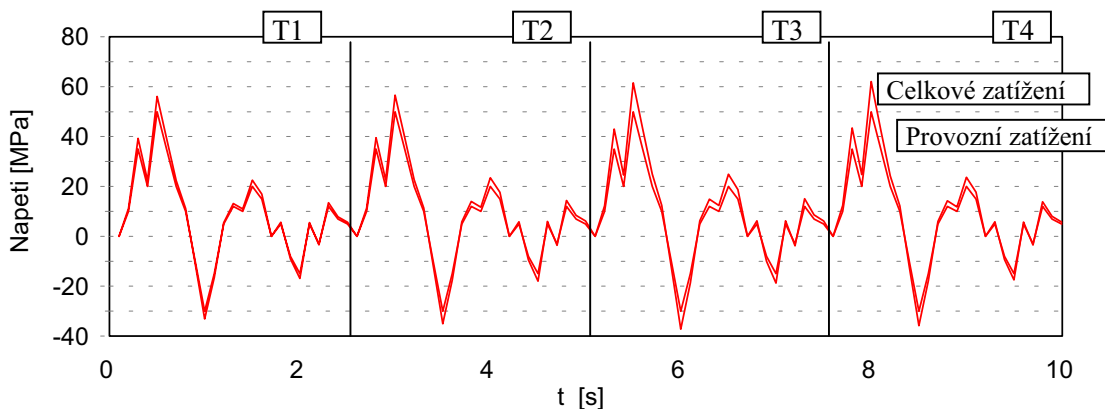
Celkové zatížení  $\sigma_{CN}$  následně určím úpravou tohoto prodlouženého záznamu významovými koeficienty ostatních zatížení (obr.4.3.,obr.4.4.).



Obr. 4.2. Simulace s konstantní odezvou



Obr. 4.3. Časová změna významových koeficientů



Obr. 4.4. Průběh celkového zatížení

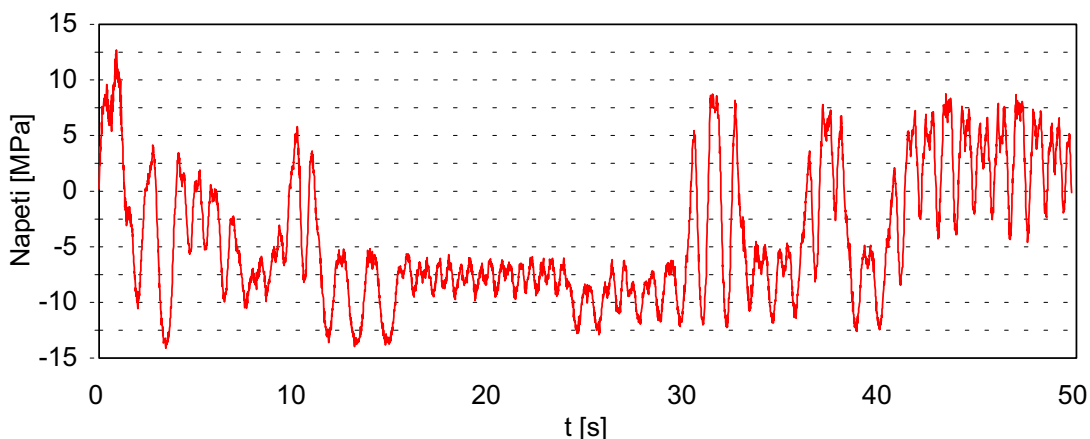
Tento způsob lze použít v případech, kdy je **provozní zatížení** při stejných vnějších podmínkách vždy stejné (respektive obdobné). Takovéto případy nacházíme např. u



obráběcích strojů, válcoven, apod.. V ostatních případech takovou simulaci považujeme za velmi zjednodušenou.

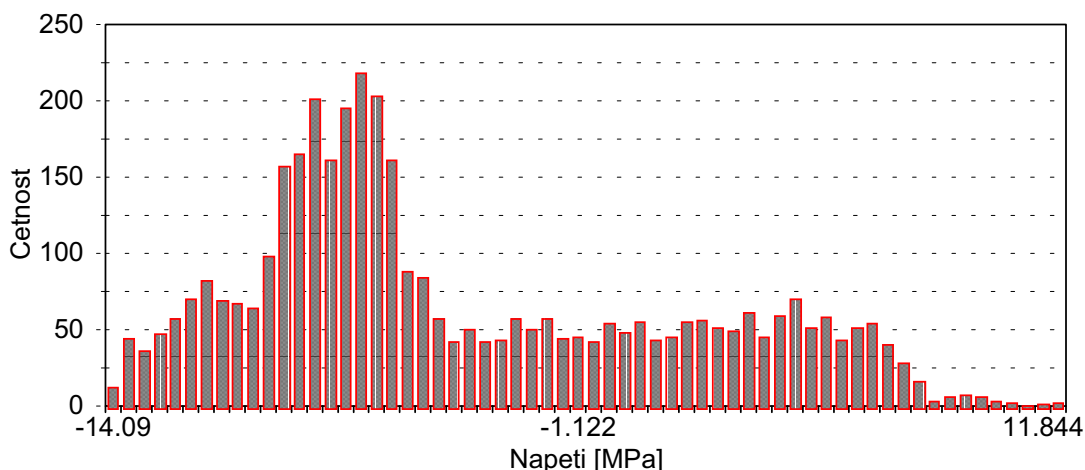
#### 4.2.2. Simulace s „proměnnou“ odezvou od provozního zatížení

V mnohých případech je tvar reprezentativního vzorku tak jedinečný, že nemůžeme použít předchozí způsob simulace. V takovémto případě musíme při simulaci reprezentativního vzorku použít pravděpodobnostní metody (Monte Carlo). Tato metoda využívá generátorů náhodných čísel.



Obr.4.5. Reprezentativní záznam napětí

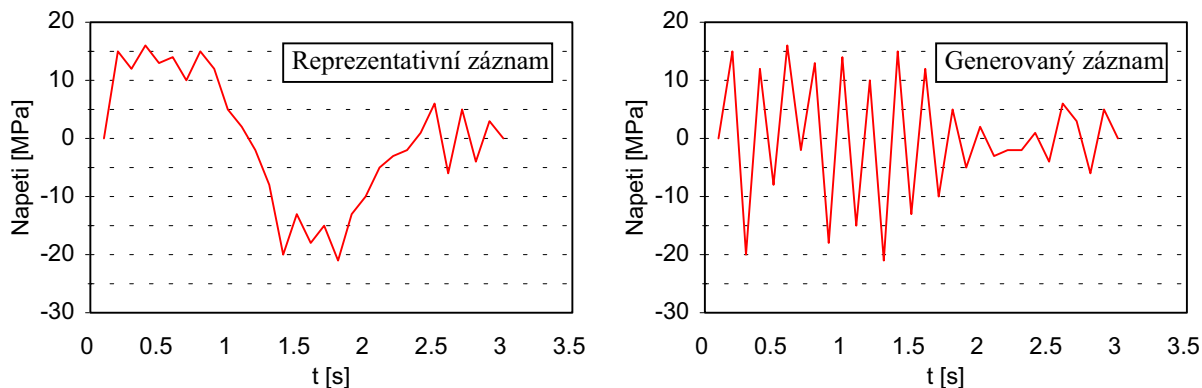
Simulaci záznamu provádím tak, aby **pravděpodobnostně** odpovídala reprezentativnímu vzorku, tzn. aby četnosti jednotlivých výchylek za stejný časový interval, který odpovídá časovému intervalu zaznamenávání reprezentativního vzorku, byly obdobné. K tomu, abych tento způsob mohl použít, musím nejprve statisticky vyhodnotit reprezentativní vzorek, tzn. určím četnosti jednotlivých výchylek a zpracuji je pomocí histogramů četnosti(obr.4.5.,obr.4.6.).



Obr.4.6. Histogram četnosti jednotlivých výchylek

Při dostatečně jemném vzorkování histogram v podstatě vystihuje hustotu pravděpodobnosti výskytu jednotlivých výchylek. Na základě této hustoty lze generovat náhodné výchylky.

Nevýhodou tohoto způsobu generování je, že **nerespektuje** střední hodnotu rozkmitu, tzn. že může nastat případ uvedený na obr.4. 7.

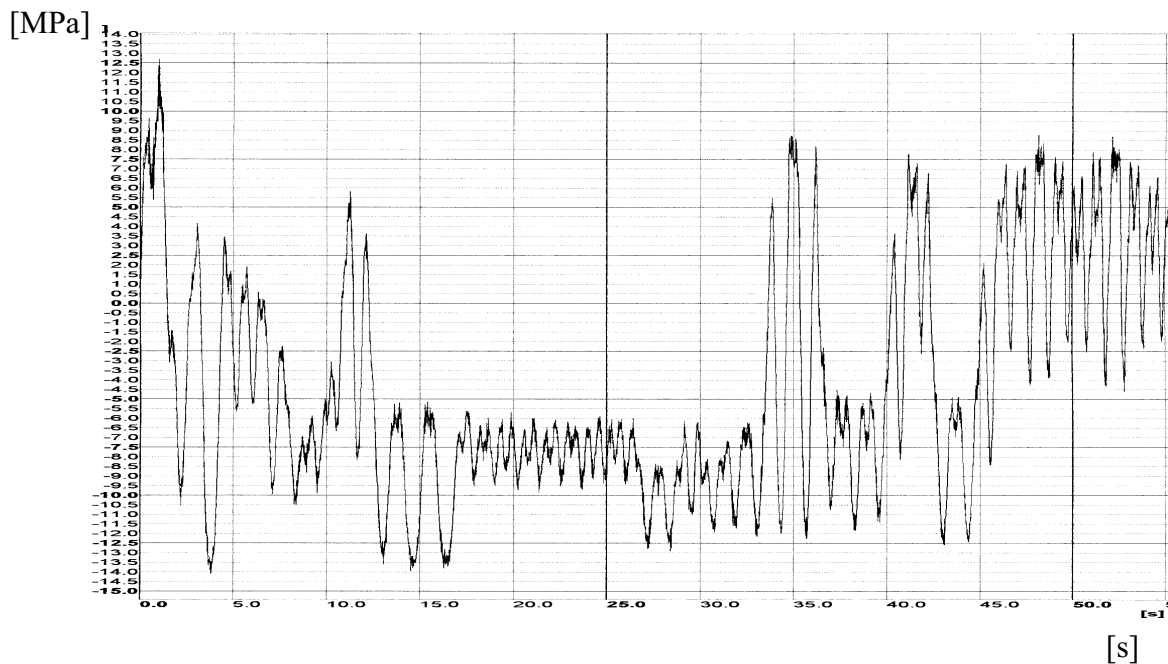


Obr.4.7. Chybné generování odezvy od zatížení

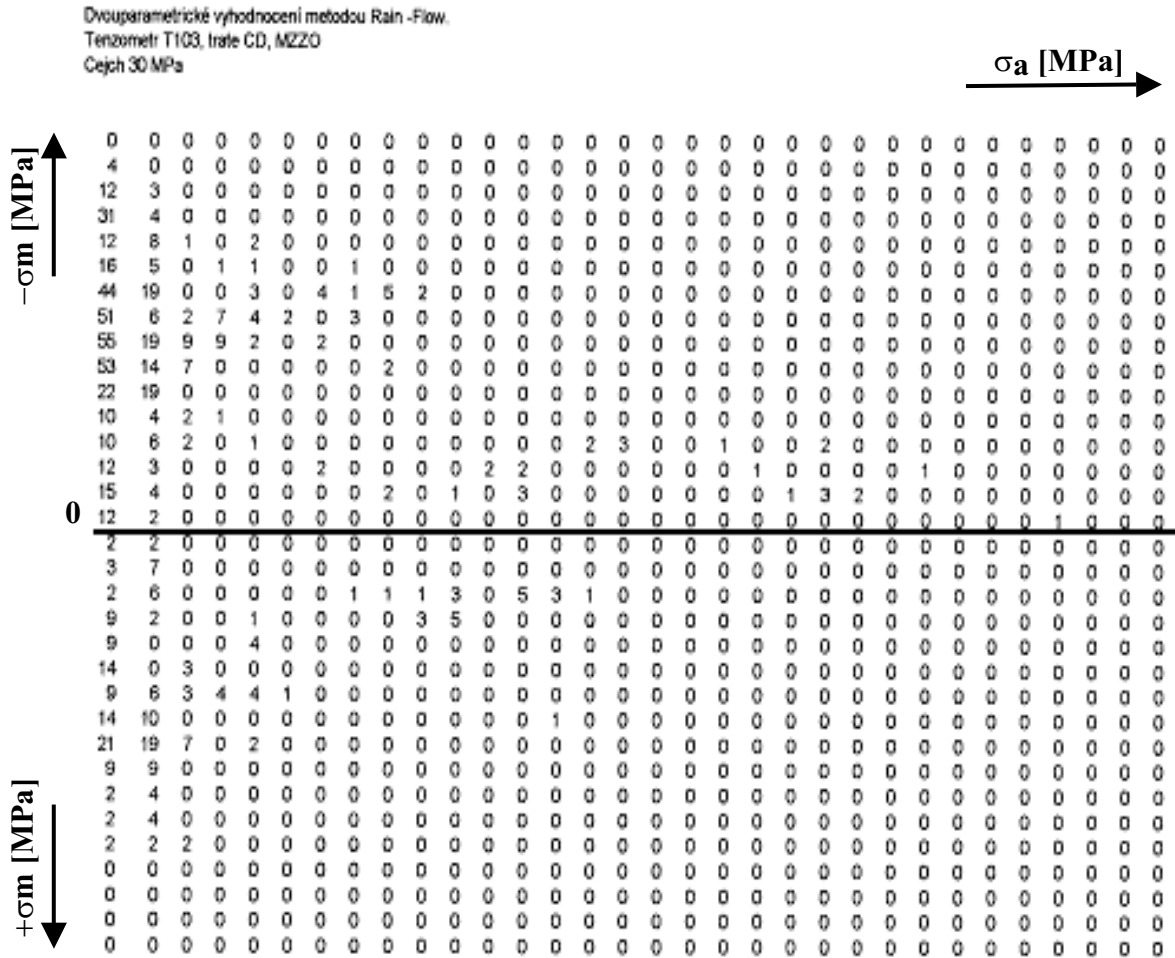
Vhodnějším způsobem jak diskretizovat náhodný proces použitím metody **Rain-Flow** ve dvouparametrickém vyjádření. Výhodou této metody je respektování střední hodnoty (obr.4.8., obr.4.9.).

Na jednotlivých hladinách předpětí pak dostáváme **hustotu pravděpodobnosti výskytu jednotlivých amplitud** (obr.4.10.).

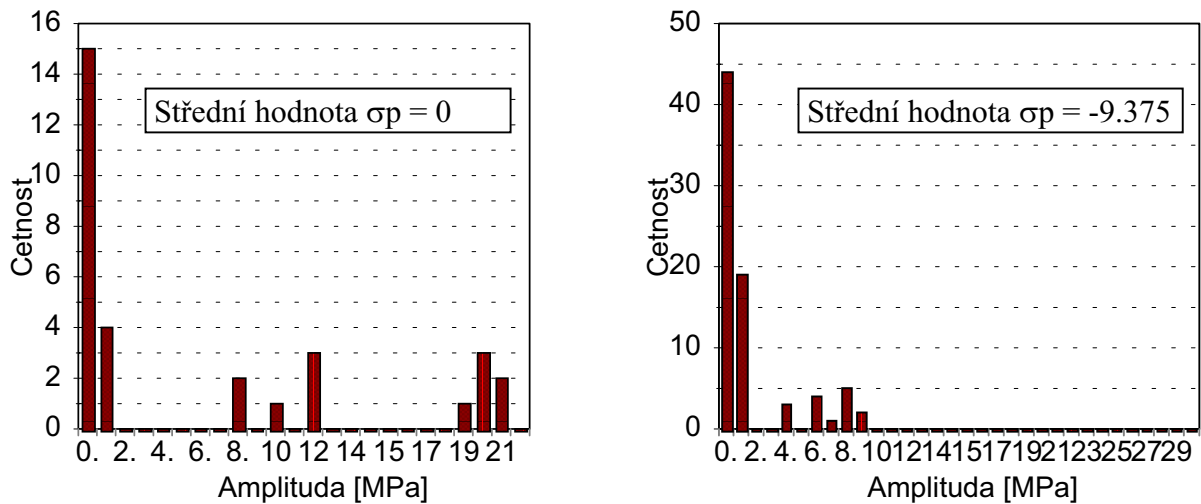
Na základě takto vytvořených hustot můžeme na každé hladině předpětí generovat amplitudy. Po vygenerování jednotlivých hladin předpětí můžeme tyto hladiny náhodně dělit a náhodně řadit za sebou (obr.4.11.). Tímto způsobem dostaneme signál, který je odlišný od reprezentativního, ale pravděpodobnostně mu odpovídá.



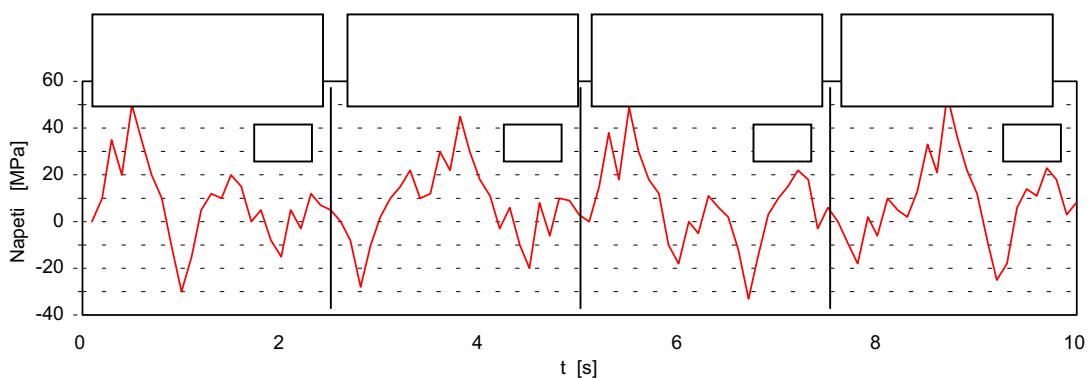
Obr.4.8. Reprezentativní záznam napětí



Obr.4.9. Vyhodnocení metodou Rain – Flow (dvouparametrická matice)

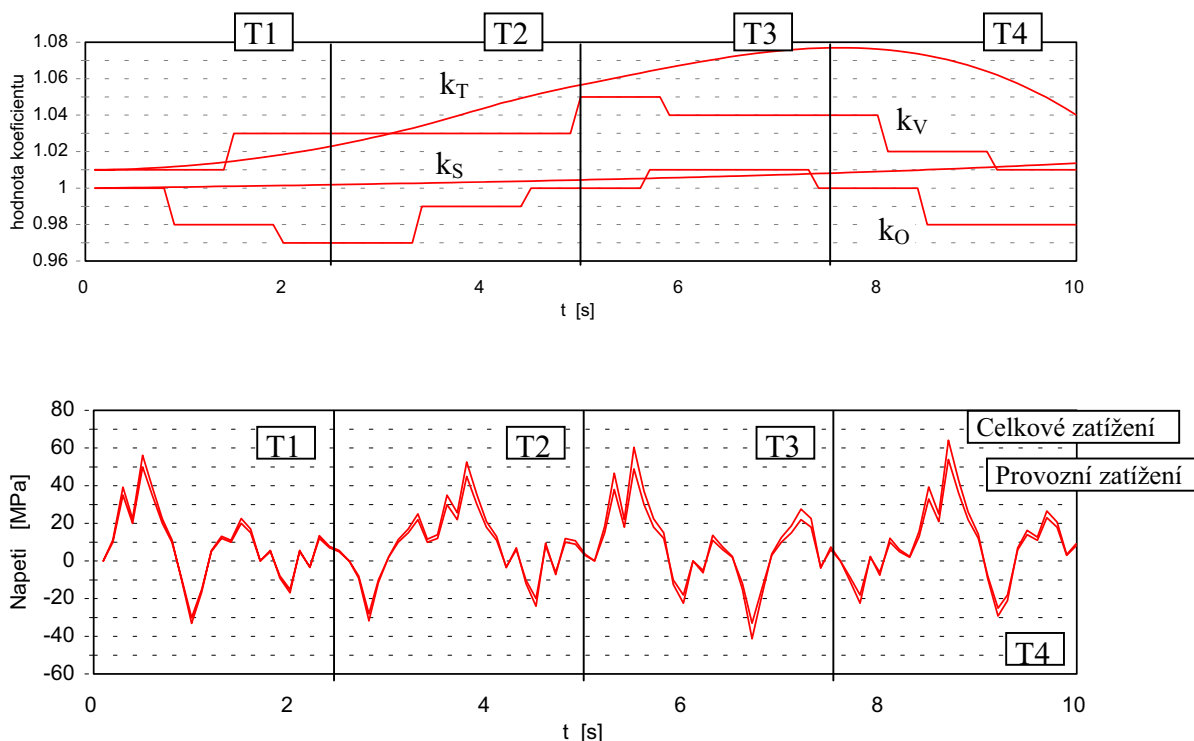


Obr.4.10. Ukázky „hustoty pravděpodobnosti výskytu“ jednotlivých amplitud na různých středních hodnotách.



Obr.4.11. Simulace s proměnnou odezvou

Celkové zatížení určíme obdobným způsobem, jako v kapitole 4.2.1. (obr.4.12.).



Obr.4.12. Časová změna významových koeficientů a průběh celkového zatížení

### 4.3. STANOVENÍ ÚNAVOVÉ KŘIVKY

Jako materiálovou charakteristiku používáme v únavové životnosti **Wöhlerovu křivku**. Křivku lze uvažovat jako spojitou funkci vyjadřující závislost počtu cyklů do porušení na dané amplitudě napětí, která má v logaritmických souřadnicích tvar :

$$\log N = \log a - m \times \log \sigma_R \quad (4.3)$$

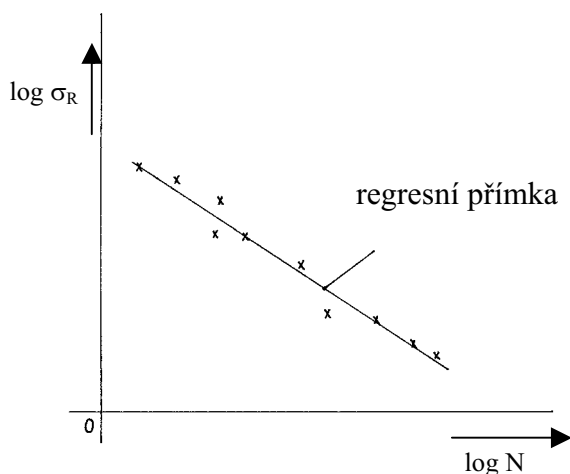
kde  $\sigma_R$  amplituda střídavého zatěžování,  
 $N$  je počet kmitů napětí,

$m$  je konstanta sklonu křivky únavové pevnosti (u mostních konstrukcí trilineární křivka se sklony 3 a 5),  
 $\log a$  je konstanta, platná v určené oblasti  $N$ .

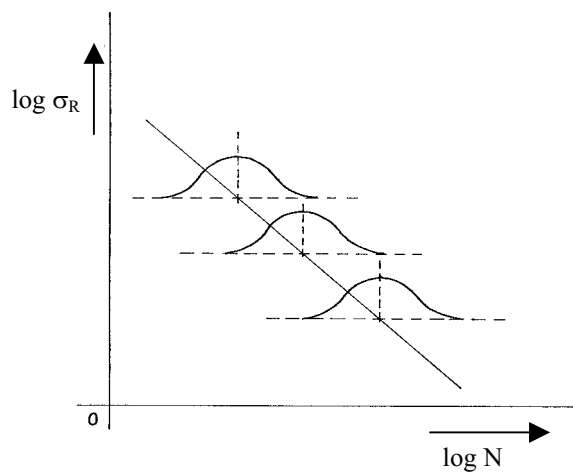
Nejlépe lze křivku určit zkouškami sledovaných konstrukčních uzlů na dynamickém stavu.

V případě, že jsme omezeni počtem testovaných vzorků, použijeme pro stanovení Wöhlerovy charakteristiky dále uvedený způsob 1), v případě, že nejsme omezeni počtem vzorků, použijeme způsob 2) :

- 1) **Testování je omezené** na několik pokusů (minimálně však deset). Takto získanými hodnotami proložíme regresní přímku, která představuje únavovou křivku zobrazenou na obr.4.13.
- 2) **Testování není omezené** počtem pokusů. Získanými mediánovými hodnotami opět proložíme regresní přímku, která odpovídá únavové křivce na obr.4.14.



Obr.4.13. Únavová křivka určená regresní přímkou proloženou jednotlivými body měření

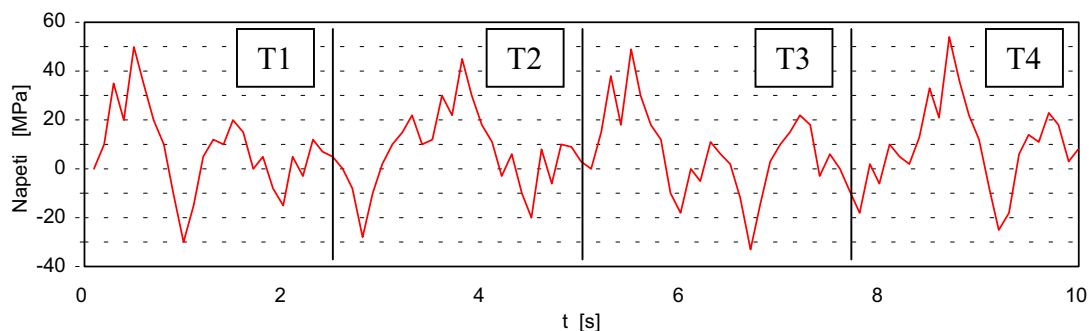


Obr.4.14. Únavová křivka určená regresní přímkou proloženou mediánovými hodnotami

Další postupy, jako např. empirické určení únavové křivky na základě znalosti meze pevnosti a na základě znalosti detailu konstrukce, pomocí tvarových a vrubových součinitelů nejsou vhodné (jsou pouze přibližné a nelze u nich určit pravděpodobnostní charakteristiku křivky).

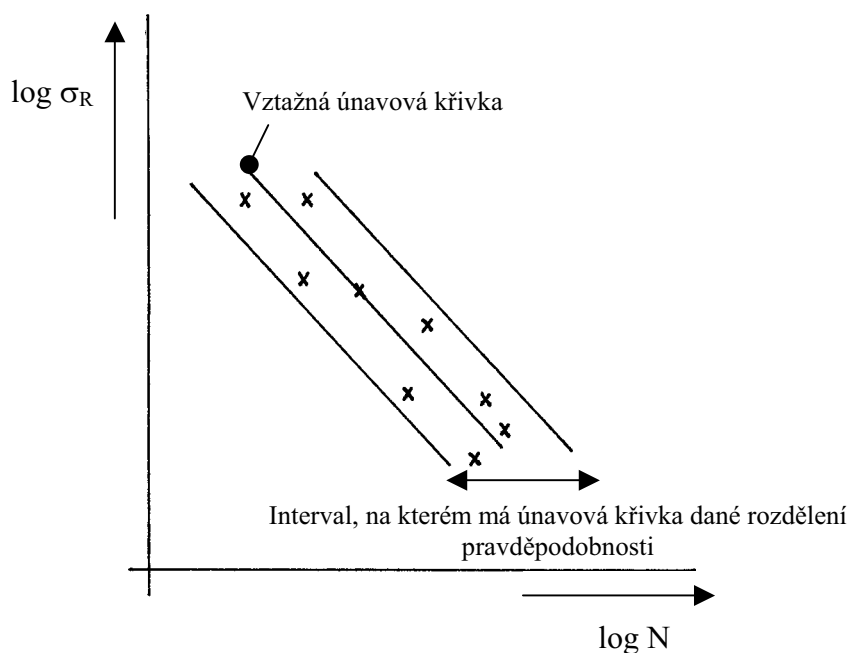
#### 4.3.1. Určení únavové křivky ve výpočtu životnosti

K aplikaci únavové křivky pro výpočet životnosti ocelové konstrukce navrhuji postup, který vychází z experimentálně získané křivky, v jejímž pásmu spolehlivosti generují pomocí metody Monte Carlo jednotlivé únavové křivky příslušné pro každý **výpočtový cyklus**. (Experimentálním stanovením únavové křivky se zabývá např. zpráva ERRI D191/RP4.) Výpočtový cyklus je časový interval záznamu celkové odezvy napětí  $\sigma_{CN}$ , který je shodně dlouhý, jako reprezentativní záznam odezvy od provozního zatížení (obr.4.15.).



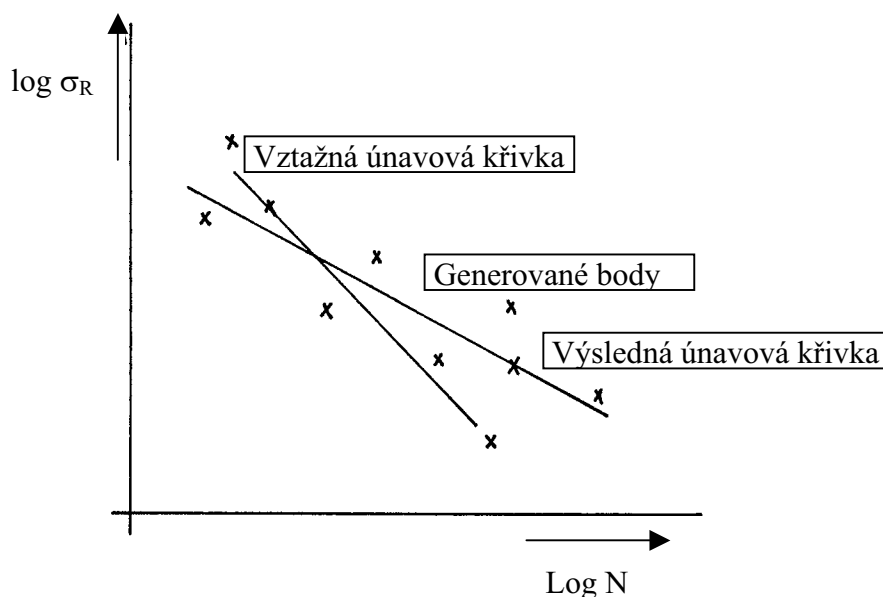
Obr.4.15. Výpočtové cykly (T1,T2,T3,T4)

Únavovou křivku uvažují jako **množinu vzájemně nespojitých bodů**. Tyto body generují na základě znalosti rozdělení pravděpodobnosti únavové křivky (obr.4.16.).



Obr.4.16. Únavová křivka daná rozdělením pravděpodobnosti

**Vygenerovanými body** únavové křivky proložíme regresní přímku, z které určíme potřebný sklon ( $m$ ) a konstantu ( $\log a$ ) únavové křivky (obr.4.17.).



Obr.4.17. Vygenerovaná únavová křivka pro příslušný výpočtový cyklus

#### 4.4. VLASTNÍ POSTUP STANOVENÍ ODHADU ŽIVOTNOSTI

- Naměřit reprezentativní vzorek napětí.
- Na základě statistického vyhodnocení experimentů nebo pozorování či analytickým vyjádřením určit významové koeficienty.
- Podle výše popsaných postupů generování (simulování) zpracovat odezvy napětí.
- Po každé periodě, odpovídající délce časového intervalu měření, určit únavovou křivku.
- Po každé periodě určit v závislosti na použité hypotéze dílčí poškození.
- Přičíst dílčí poškození k celkovému poškození.
- Testovat celkového poškození, zda nedosáhlo úrovně pro stav porušení.
- Při dosažení úrovně pro stav porušení ukončit výpočet a stanovit odhad životnosti.

Tento způsob výpočtu je možný pouze pro **velký počet simulovaných odezev** napětí. Jedině pak se zachovají pravděpodobnostní charaktery jednotlivých veličin vstupujících do výpočtu. Výsledná pravděpodobnost odhadu životnosti je funkcí pravděpodobností jednotlivých činitelů vstupujících do výpočtu.

##### 4.4.1. Použití metody Monte Carlo pro simulaci jednotlivých parametrů

Metoda Monte Carlo je postup, který na základě znalosti pravděpodobnostních charakteristik (hustota pravděpodobnosti, distribuční funkce) náhodných parametrů vstupujících do výpočtu zkoumané veličiny, simuluje chování této veličiny. Charakteristiky náhodných parametrů vyplývají buď ze statistického zpracování experimentů s těmito parametry, nebo ze statistického zpracování chování těchto parametrů v praxi. **Metoda Monte Carlo** je realizována pomocí číslicových počítačů. Náhodný charakter parametrů výpočtu je

realizován pomocí čísel, která jsou generována v souladu s pravděpodobnostními charakteristikami těchto parametrů.

#### 4.4.2. Generování náhodných čísel na číslicovém počítači

Pro metodu Monte Carlo je charakteristické, že k řešení dospívá operacemi velmi jednoduchými, jichž je ale potřeba vykonat velký počet, aby výsledky byly dostatečně přesné. Náhodná čísla, která umožňují výpočet pomocí této metody, je možné získat pomocí fyzikálních generátorů. Tabulkové zpracování náhodných čísel je velmi časově náročné (pokud chceme zachovat velký počet těchto čísel). **Softwarové generátory** generují čísla, která nejsou zcela náhodná, proto je nazýváme čísla pseudonáhodnými. Je známo, že čísla generovaná počítačem mají periodu opakování. Pro výše popsané simulace je třeba, aby tato perioda byla co největší.

Např.: Snímací frekvence napětí činí 200 Hz. Předpokládaná životnost ocelové konstrukce je 50 let. Na počítači budu simulovat dobu života za pomoci metody Monte Carlo. Generátor náhodných čísel musí generovat tato čísla po celou dobu života při snímací frekvenci. Perioda náhodných čísel by měla být alespoň o 2 až 5 řádů vyšší než je délka života při snímací frekvenci (abychom zůstali na bezpečné straně).

Výpočtová perioda :  $200 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 75 = 4,7304 \cdot 10^{11}$

Požadovaná perioda :  $10^{13}$  až  $10^{15}$

Pro výpočet je třeba použít ověřené generátory náhodných čísel.

#### 4.5. POUŽITÉ HYPOTÉZY ODHADU ŽIVOTNOSTI

Metodika umožňuje **použití jakékoli hypotézy** využívající kumulace únavového poškození při odhadu životnosti. Mezi nejvíce využívané patří hypotézy využívající diskretizaci náhodného procesu napětí a hypotézy využívající statistických charakteristik náhodného procesu napětí. V [48] jsem provedl testování vhodnosti těchto hypotéz pro odhad životnosti mostních ocelových konstrukcí, výsledky je možné vztáhnout na ocelové konstrukce obecně. Hypotézy popsané v následujících podkapitolách byly z daných typů nejvhodnější.

##### 4.5.1. Hypotézy využívající diskretizaci náhodného procesu napětí

Experimentálně bylo prokázáno, že hladiny napětí pod mezí únavy v kombinaci s přetěžováním nad mezí únavy, mají poškozující účinek. **Hypotéza Corten Dolanova** tento poznatek respektuje a počítá poškození ze všech  $\sigma_{ai} > 0$ , které vztahuje k únavové křivce se změněným exponentem  $r = k \cdot m$  (viz obr. 4.18.). Únavová křivka je v tomto případě uvažována v lineárním tvaru - v souladu s [3].

Celkový počet kmitů  $H_{(CD)}$  do poruchy je dán vztahem :

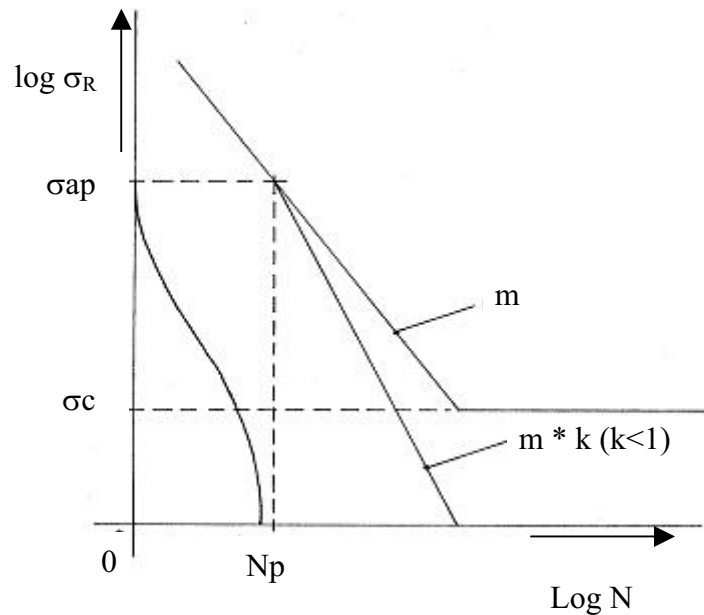
$$H_{(CD)} = \frac{\sum_{i=1}^p n_i}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_p} * \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{ap}} \right)^{k \cdot m}} = \frac{N_p}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{h_z} * \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{ap}} \right)^{k \cdot m}} \quad (4.4)$$

kde  $n_i$  je počet cyklů dané amplitudy



- $N_p$  je počet cyklů největší amplitudy do poruchy  
 $h_z$  je celkový počet kmitů všech amplitud  
 $\sigma_{ai}$  je výchylka dané amplitudy  
 $\sigma_{ap}$  je výchylka maximální amplitudy  
 $m$  je exponent únavové křivky  
 $k$  je redukční koeficient únavové křivky

Konstanta  $k = 0.7$  až  $1.2$  je redukční koeficient exponentu  $m$  únavové křivky, závisí na poměru  $\sigma_c/R_m$  použitého materiálu. ( $\sigma_c$  je mez únavy,  $R_m$  je mez pevnosti materiálu).



Obr.4.18. Schéma hypotézy Corten-Dolanovy

Pokud je  $k = 1$ , je Corten – Dolanova hypotéza shodná s hypotézou Palmgren – Minerovou s tím, že se započítává i poškozující účinky amplitud menších než je smluvní mez mez únavy.

V testech různých typů hypotéz provedených v [48] byly výsledky odhadů životnosti dle hypotézy Corten Dolanovy ( $k=1$ ) nejbližše reálné délce života konstrukce.

#### 4.5.2. Hypotézy využívající statistických charakteristik náhodného procesu napětí

Pro širokopásmové procesy, předložil **Rajcher** hypotézu kumulace únavového poškození, která je podrobně popsána v [13,34]. Uvedená hypotéza vychází z předpokladu, že únavové poškození, způsobené stacionárním gaussovským procesem dynamického namáhání s výkonovou spektrální hustotou  $F_\sigma(f)$ , je na jednotlivých frekvencích úměrné dodávanému výkonu a je možné ho v celém rozsahu frekvencí funkce  $F_\sigma(f)$  jednoduše sečíst.

Únavové poškození, nakumulované v kritickém místě součásti **za jednu sekundu** při působení procesu namáhání s výkonovou spektrální hustotou  $F_\sigma(f)$ , lze podle dané hypotézy vyjádřit vztahem :

$$D = \frac{J_1 \left[ \int_0^\infty f^{\frac{2}{m}} * F_\sigma(f) df \right]^{\frac{m}{2}}}{\sigma_c^m * N_0} \quad (4.5)$$

kde

$$J_1 = \int_{a^2}^{\infty} x^{m+1} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 2^{\frac{m}{2}} * \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) * P(\chi^2_{m+2} > a^2) \quad (4.6)$$

- m - sklon šikmé větve Wöhlerovy charakteristiky sledovaného místa součásti  
 f - frekvence [Hz]  
 $F_{\sigma}(f)$  - výkonová spektrální hustota procesu namáhání [MPa<sup>2</sup> \* s]  
 $P(\chi^2_{m+2} > a^2)$  - komplement distribuční funkce  $\chi^2$  rozdělení  
 $\sigma_c$  - mez únavy sledovaného místa součásti  
 $N_0$  - bazový počet cyklů, tj. počet cyklů na mezi únavy  
 $a = \frac{\sigma_c}{S_{\sigma}}$  - dolní mez integrace  
 $S_{\sigma}$  - směrodatná odchylka procesu namáhání.

**Novarov** na základě zkoušek vzorků namáhaných náhodnými procesy se zadanou šířkou spektra upravil vztah (4.5) tak, že zavedl **korekci meze únavy**  $\sigma_c$  s ohledem na širokopásmovost. Pro poškození D podle Novarova platí :

$$D = \frac{J_1 \left[ \int_0^{\infty} f^{\frac{2}{m}} * F_{\sigma}(f) df \right]^{\frac{m}{2}}}{\left[ \frac{\sigma_c}{\kappa(\varepsilon)} \right]^m * N_0} \quad (4.7)$$

kde  $\kappa(\varepsilon)$  je koeficient korekce meze únavy, který závisí na šířce spektra  $\varepsilon$  náhodného procesu dynamického namáhání.

Závislost  $\kappa(\varepsilon)$  odvozená Novarovem má tvar :

$$\kappa(\varepsilon) = 1.93 * \varepsilon^{0.707} + 1 \quad (4.8)$$

kde  $\varepsilon$  je šířka spektra procesu namáhání, která se určí ze vztahu :

$$\varepsilon = \sqrt{1 - v^2} \quad (4.9)$$

kde  $v$  je součinitel strukturální složitosti procesu definovaný vztahem :

$$v = \frac{n_0}{n_e} = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 * m_4}} \quad (4.10)$$

- kde  $n_0$  - počet průchodů střední hodnotou procesu v obou směrech za jednotku času  
 $n_e$  - počet maxim a minim procesu za jednotku času  
 $m_j$  - j-tý moment výkonové spektrální hustoty procesu napětí, který se vypočte ze vztahu :

$$m_j = \int_0^{\infty} f^j * F_{\sigma}(f) df \quad (4.11)$$

Vztah (4.7) se dá upravit zavedením normované výkonové spektrální hustoty :

$$g_{\sigma}(f) = \frac{F_{\sigma}(f)}{S_{\sigma}^2} \quad (4.12)$$

Pro vyjádření závorky ze vztahu (4.5) pomocí  $g_{\sigma}(f)$  platí :

$$\left[ \int_0^{\infty} f^{\frac{2}{m}} * F_{\sigma}(f) df \right]^{\frac{m}{2}} = S_{\sigma}^m * \left[ \int_0^{\infty} f^{\frac{2}{m}} * g_{\sigma}(f) df \right]^{\frac{m}{2}} = S_{\sigma}^m * f_e \quad (4.13)$$

kde

$$f_e = \left[ \int_0^{\infty} f^{\frac{2}{m}} * g_{\sigma}(f) df \right]^{\frac{m}{2}} \quad (4.14)$$

je tzv. *efektivní frekvence* procesu.

Pro D lze s použitím vztahu (4.13) psát :

$$D = \frac{J_1 * S_{\sigma}^m * f_e}{\left[ \frac{\sigma_c}{\kappa(\varepsilon)} \right]^m * N_0} \quad (4.15)$$

Únavové poškození, způsobené stacionárním gaussovským procesem dynamického namáhání s výkonovou spektrální hustotou  $F_{\sigma}(f)$  za dobu  $t(h)$ , se určí ze vztahu :

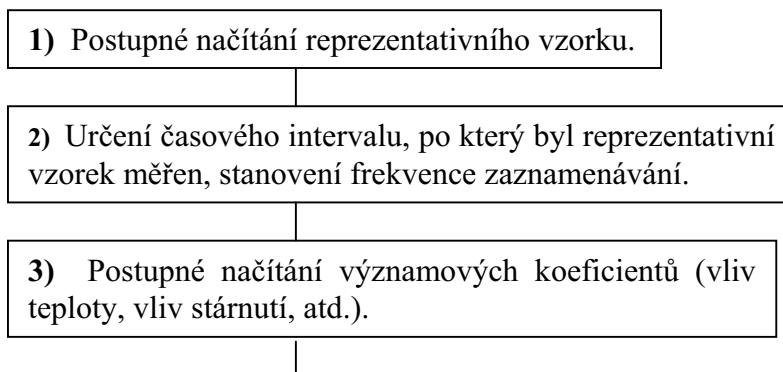
$$D_h = D * t * 3600 \quad (4.16)$$

Při znalosti mezního poškození  $D_m$  a dosazením za D z rovnice (4.15) lze pro dobu do poruchy vyjádřit :

$$t[h] = \frac{N_0 * \left[ \frac{\sigma_c}{\kappa(\varepsilon)} \right]^m * D_m}{S_{\sigma}^m * J_1 * f_e * 3600} \quad (4.17)$$

Doba do poruchy je v tomto případě určena v hodinách.

#### 4.6. STRUKTUROVANÉ ŘEŠENÍ VÝPOČTU ODHADU ŽIVOTNOSTI



**4)** Stanovení časových intervalů významových koeficientů, přizpůsobení jejich frekvencí reprezentativnímu vzorku.

**5)** Zvolení algoritmu simulování zatížení (odezvy od zatížení) provozem.

**6)** Na základě zvoleného algoritmu simulování, generovat odezvy od zatížení provozem. Časový interval generování musí odpovídat časovému intervalu reprezentativního vzorku.

**7)** Stanovení celkové odezvy od zatížení v délce časového intervalu odpovídajícího časovému intervalu reprezentativního vzorku. Celkovou odezvu stanovíme pro daný časový okamžik vztahem pro významové koeficienty a odezvu od provozního zatížení.

**8)** Načtení únavové křivky

**9)** Zohlednění způsobu, jakým byla únavová křivka určena. (Regresí jednotlivých bodů, regresí mediánových hodnot).

**10)** V případě stanovení únavové křivky pomocí regresní křivky proložené jednotlivými body, stanovit interval spolehlivosti této křivky a v tomto intervalu spolehlivosti stanovit rozdělení pravděpodobnosti. V případě stanovení únavové křivky pomocí regresní křivky proložené mediánovými hodnotami, určit rozdělení pravděpodobnosti pomocí normového postupu.

**11)** Zvolení hypotézy pro výpočet dílčích poškození od jednotlivých kmitů napětí.

**12)** Pomocí zvolené hypotézy životnosti stanovit dílčí poškození pro časový interval odpovídající délce časového intervalu reprezentativního vzorku napětí.

**13)** Přičtení dílčího poškození k celkovému poškození.

14) Porovnání celkového poškození, zda nedosáhlo kritické hodnoty. V případě, že tomu tak není, opakovat v cyklu celý postup od bodu 6) až do dosažení kritické hodnoty poškození.

15) Stanovení odhadu životnosti.

## 5. REALIZACE HODNOCENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

Odhad životnosti ocelových konstrukcí provedený podle uvedené metodiky je realizovatelný pouze s pomocí velmi výkonné výpočetní techniky zvládající náročné simulační výpočty. Software pro odhad životnosti, který je důležitou částí disertační práce, byl vyvíjen v programovém prostředí Delphi. V následující části práce popíši, jakým způsobem jsem naprogramoval jednotlivé kroky metodiky (program má pracovní označení „Plzen“, protože jeho původní verze (Plzen1 - beta verze), zaměřená na stanovení životnosti dopravních prostředků, byla vyvíjena v rámci grantů č. 15-00/244/98, č. 15-00/189/99 a č. 15-00/179/2000, které jsem řešil ve spolupráci s firmou Škoda Výzkum s.r.o. Plzeň).

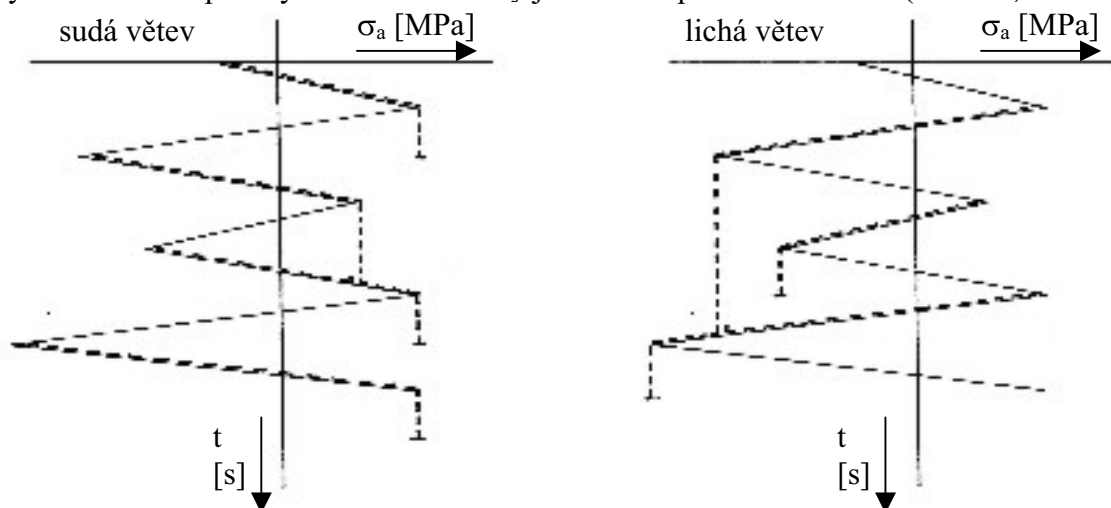
### 5.1. SIMULACE ODEZVY OD PROVOZNÍHO ZATÍŽENÍ

Důvodem simulace záznamu napětí je nutnost prodloužit časový záznam této odezvy tak, abychom do výpočtu mohli zahrnout vlivy, které se v této odezvě nevyskytují, nebo jsou v časovém úseku snímání této odezvy neměnné. Stručný popis této problematiky je uveden v části metodiky 4.2.2. **Simulace je prováděna postupně** v časových úsecích, které odpovídají délce časového intervalu původní odezvy od provozního zatížení. Tyto časové úseky jsou následně modifikovány o významové koeficienty. Konkrétní postup simulace je následující :

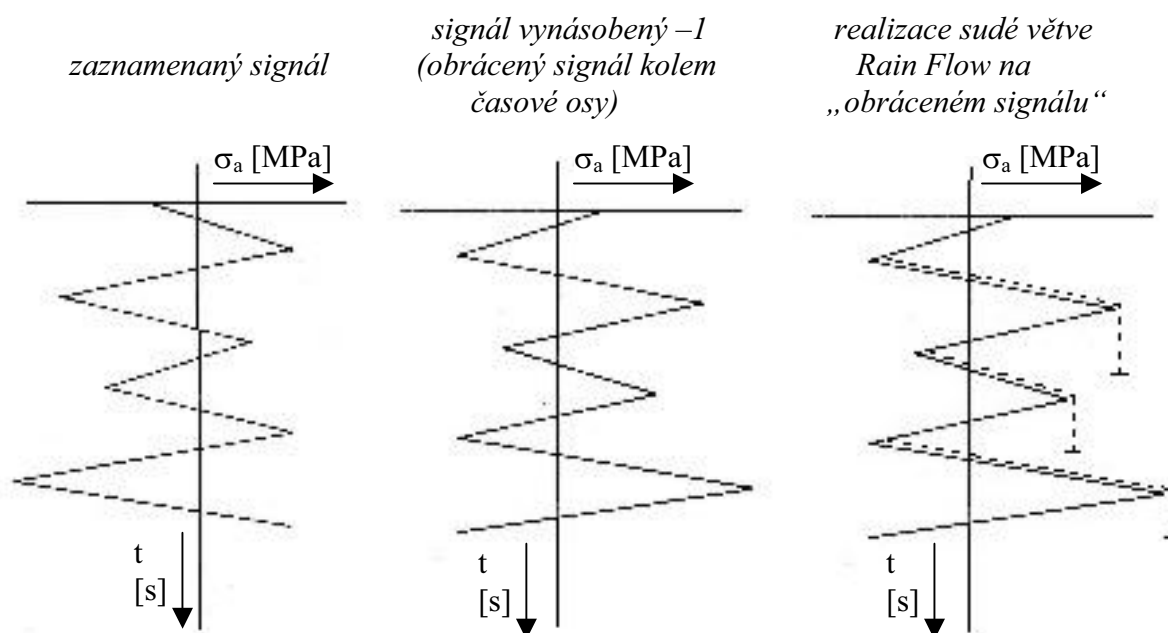
- **Převod textového souboru** s odezvou od provozního zatížení do binárního souboru (důvodem je zkrácení záznamu a tím i urychlení výpočtu).
- **Odstranění mezilehlých hodnot.** (Experimentální měření je zaměřeno na přesné stanovení lokálních extrémů napětí. Aby tyto extrémy byly přesně změřeny, je nutné měření provádět vysokou vzorkovací frekvencí (1 – 2 kHz). V důsledku této vysoké frekvence pak záznam obsahuje i velké množství hodnot , které nemají mechanický původ, nebo jsou mezilehlými hodnotami mezi extrémy. Tyto hodnoty však pro následující vyhodnocení životnosti nemají žádný význam. Z důvodů zkrácení záznamu (velikost v bytech) a tím i urychlení výpočtu jsou tyto hodnoty odstraněny ze záznamu speciální filtrací.
- **Provedení metody „tříparametrického“ stékajícího deště** (Rain Flow – RF) (Získání matice RF a souborů s časy příslušných buněk matice – zohlednění parametru času. Podrobný popis této metody je uveden v bodě 5.1.1.1.).
- **Vygenerování nové matice.**
- **Simulace nové odezvy.** (Simulace pomocí vygenerované matice a časů buněk z „tříparametrické“ matice RF původní odezvy.).
- **Rozšíření simulované odezvy** o vliv významových koeficientů.

### 5.1.1. Rain-Flow zdrojového záznamu z měření

Popis a princip metody RF je uveden např. v [10]. V mém programu je RF **rozdělen na dvě výpočetní větve** (obr.5.1). Tento způsob RF jsem zvolil proto, abych mohl provádět dekompozici libovolně dlouhého záznamu bez nutnosti načítat celý záznam do paměti počítače. Nejprve je počítána sudá větev, následně pak lichá větev. Algoritmus pro obě větve je v podstatě shodný, pouze pro lichou větev se signál „převrátí“ (vynásobení „-1“), přičemž při vyhodnocení amplitudy a střední hodnoty je na tuto úpravu brán zřetel (obr.5.2.).



Obr.5.1. Výpočetní větve Rain Flow



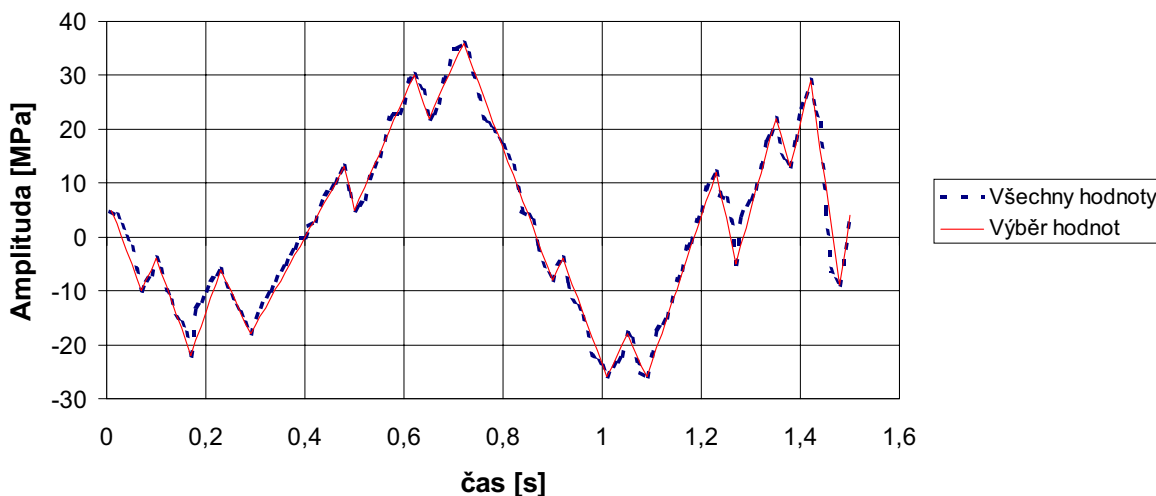
Obr.5.2. Schématické znázornění převedení liché větve na sudou

**Realizace stékajícího** deště je provedena následujícím způsobem :

- 1) Odstranění mezilehlých hodnot ze zaznamenaného signálu napětí (viz. příloha č. 3). Po odstranění vznikne upravený signál, kde se střídají lokální maxima a minima (obr.5.3.). Smyslem této operace je podstatné zkrácení zaznamenaného signálu

v datové rovině. Zkrácení v časové rovině není žádné, protože zbývajícím hodnotám v signálu (lokální extrém) zůstane přiřazen jejich původní čas.

### Odstranění mezilehlých hodnot

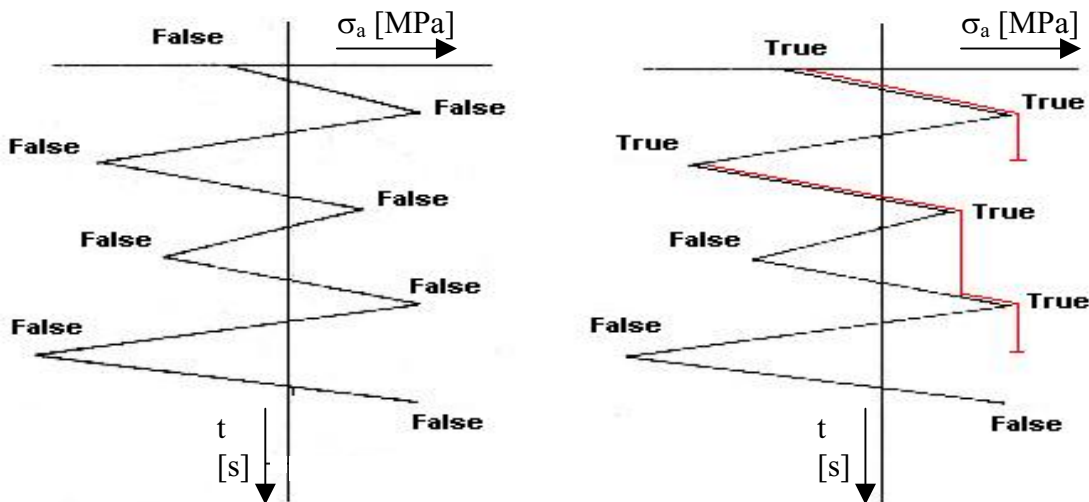


Obr.5.3. Úprava signálu (vynechání nedůležitých hodnot záznamu)

- 2) Převod signálu z textové do **binární podoby**. Tímto převodem opět redukuje množství dat v bytech. (binární tvar vyjadřuje číslo v hexadecimální soustavě, přičemž každý typ čísla má pevně danou velikost v bytech, zatímco v textové podobě každý znak v čísle zabírá 1 byte).

*Před spuštěním algoritmu RF označím všechny lokální extrém hodnotou „False“.*

*V průběhu výpočtu postupně označuji lokální extrém na „True“ v závislosti na protékání „proudu deště“.*



Obr.5.4. Postupné označování lokálních extrémů

- 3) Ke každému extrému přiřadím logickou hodnotu (false, true). Hodnoty „true“ a „false“ budou následně v průběhu výpočtu označovat proud deště. V případě, že daný extrém je již zahrnut do proudu deště, bude extrém označen hodnotou „true“, v opačném

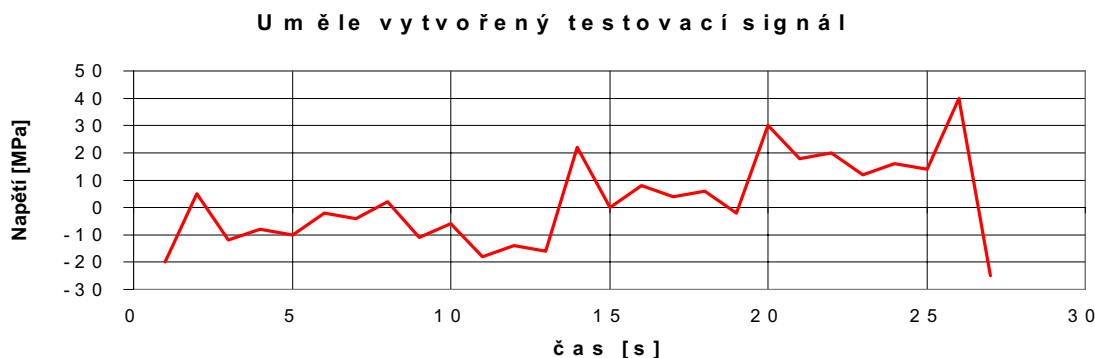
případě hodnotou „false“ (obr.5.4.). V této fázi (zahájení výpočtu) budou všechny extrémy označeny jako „false“.

- 4) Vlastní realizace stékajícího deště spočívá v tom, že program ke každému minimu hledá maximum (minima označí jako „true“), vybraná maxima označuje také jako „true“. **Algoritmus** je následující :

- a) Načtu minimum (první, které je označeno jako „false“).
- b) Toto minimum označím jako „true“.
- c) Načtu maximum.
- d) Zkontroluji, zda je maximum „false“, když bude „true“, tak načtu maximum před minimem, následně načtu nové minimum před maximem. Pokud nové minimum bude menší než původní minimum, tak poslední načtené maximum je maximum požadované. Pokud nové minimum nebude menší než původní minimum, tak celý proces opakuji tak dlouho, dokud nenajdu minimum, které je menší než původní minimum. Po nalezení maxima a minima příslušného rozkmitu zapíši nalezenou amplitudu a střední hodnotu. Pokračuji bodem a).
- e) Označím maximum jako „true“.
- f) Načtu další minimum.
- g) Pokud nové minimum je menší než původní minimum, zapíši amplitudu a střední hodnotu. Pokračuji bodem a).
- h) Načtu další maximum.
- i) Zkontroluji, zda je nové maximum označeno jako „false“. Když bude označeno jako „true“, tak načtu maximum před minimem, následně načtu nové minimum před maximem. Pokud nové minimum bude menší než původní minimum, tak poslední načtené maximum je maximum požadované. Pokud nové minimum nebude menší než původní minimum, tak celý proces opakuji tak dlouho, dokud nenajdu minimum, které je menší než původní minimum. Po nalezení maxima a minima zapíši nově nalezenou amplitudu a střední hodnotu. Pokračuji bodem a).
- j) Zkontroluji, zda je nové maximum větší než předchozí nalezené maximum. Pokud ano, označím toto nové maximum jako „true“.
- k) Pokračuji bodem f).

V průběhu výpočtu neustále sleduji, zda není konec záznamu. **Blokové schéma** algoritmu je uvedeno na obr.5.6a., 5.6b. Ukázky zpracování zdrojového záznamu do podoby dvouparametrických matic RF jsou uvedeny v příloze č. 4.

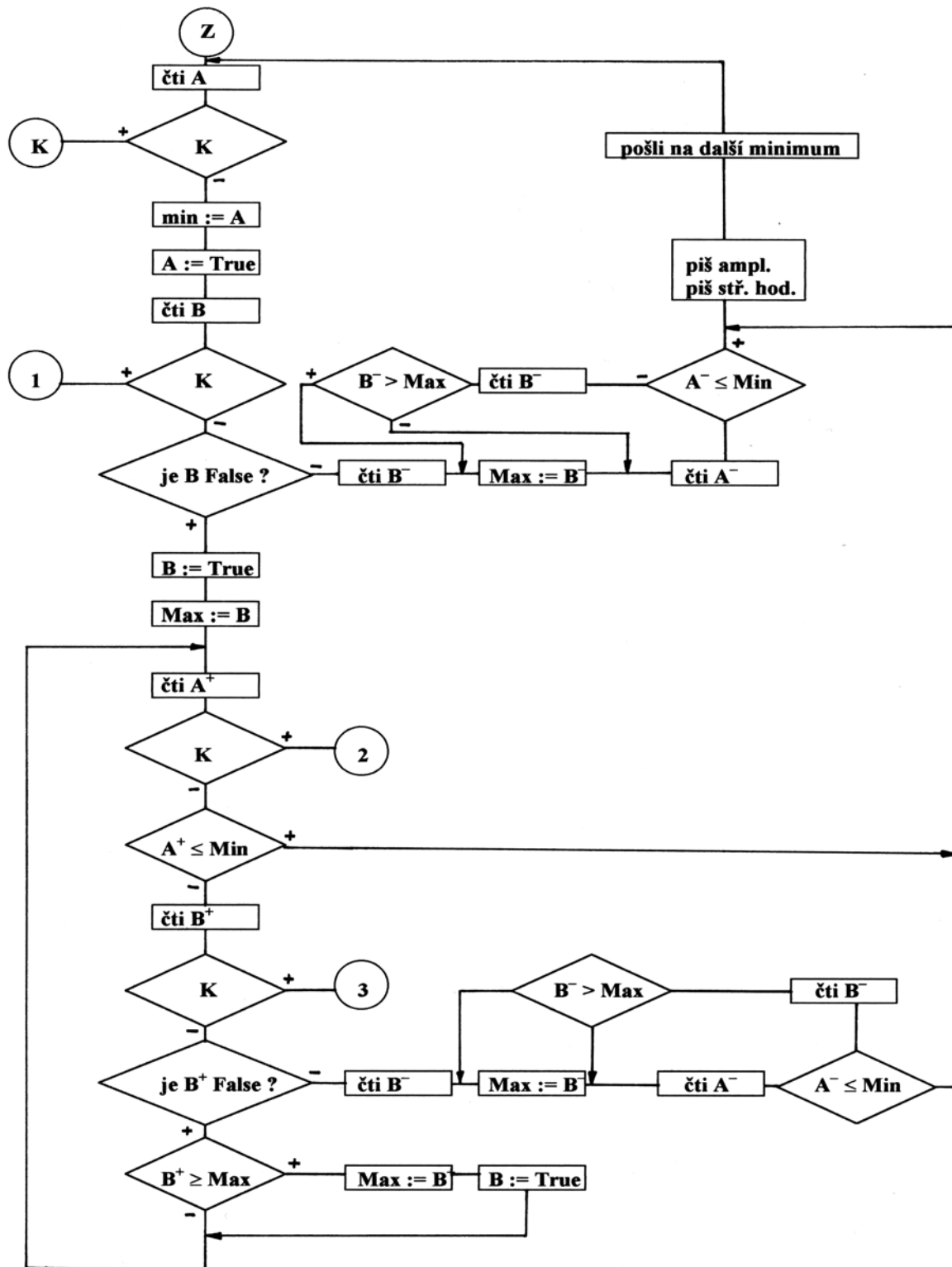
Naprogramovaná metoda RF, která pracuje jako autonomní součást celkového programu, byla otestována na uměle vytvořeném signálu (obr.5.5.) a (tab.5.1.).



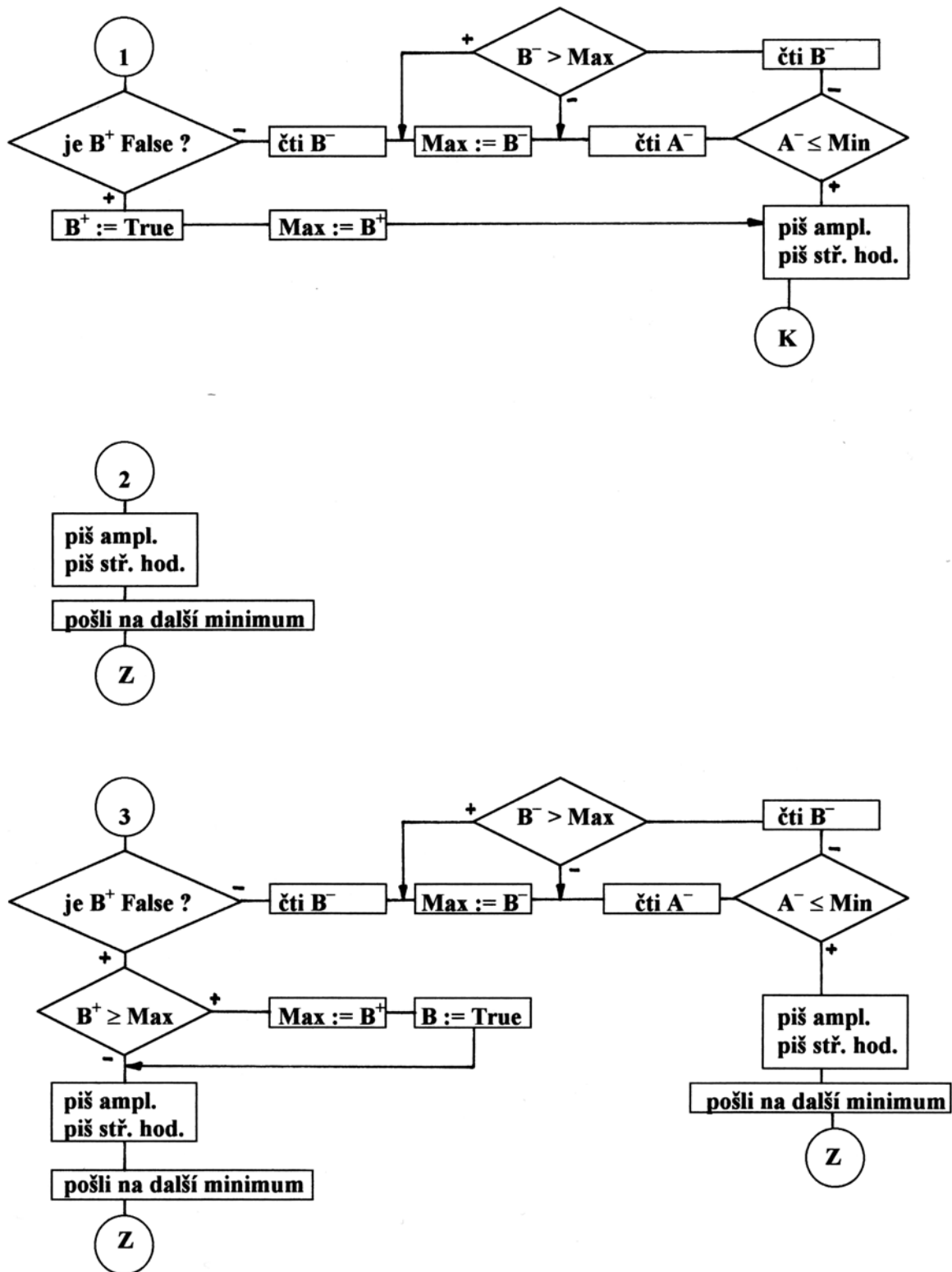
Obr.5.5. Uměle vytvořený zdrojový záznam



Další testy byly provedeny pomocí programu DISYS od firmy MERLIN na deseti záznamech dodaných Škodou Plzeň a na celkovém součtovém záznamu. (Všech deset záznamu bylo načteno za sebe a následně vyhodnoceno metodou RF.) Ukázka porovnání matice RF stanovené mým programem a programem DISYS firmy Merlin pro celkový záznam je uvedena na obr 5.7a., 5.7b. Ostatní porovnání jsou součástí přílohy č.6.



Obr.5.6a. Blokové schéma metody RF-sudá větve - první část



kde „Z“ je začátek programu, „K v kroužku“ je konec programu, „K v kosočtverci“ je dotaz na konec programu, indexy „+“ a „-“, značí směr načítání (dopředný, zpětný), „1,2,3“ jsou podprogramy

Obr.5.6b. Blokové schéma metody RF-sudá větev - druhá část





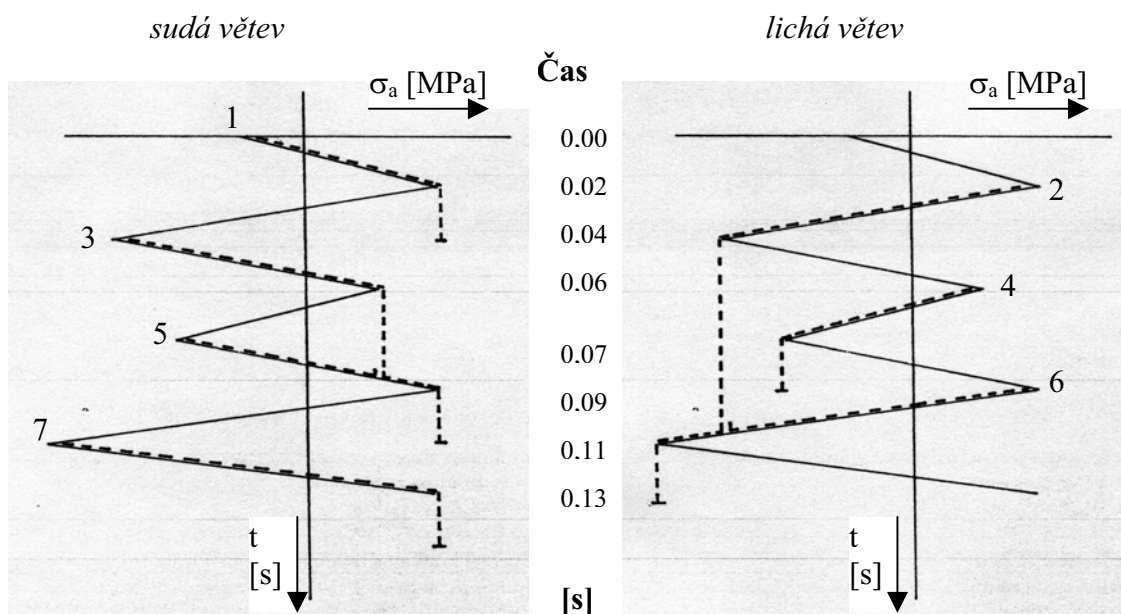
Matice RF vyhodnocená programem Plizen					
Citlivost matice : 0.00 MPa					
Rozměr matice : 5x5					
Max.Amplituda : 50 MPa					
Max. stf. hodnota : 50 MPa					
					$-\sigma_a$ [MPa]
$-\sigma_m$ [MPa]	0	0	0	0	0
	2369	32	0	0	0
<b>0</b>	137566	2627	<b>219</b>	5	0
	<b>2404</b>	34	0	0	0
$+\sigma_m$ [MPa]	0	0	0	0	0

Obr.5.8b. MaticeRF (5x5)

Tab.5.2. Soubory s časy (velikost je v Bytech) :

Soubor	Velikost	Soubor	Velikost	Soubor	Velikost	Soubor	Velikost	Soubor	Velikost
Bunka1_1	0	Bunka2_1	14214	Bunka3_1	825396	Bunka4_1	14424	Bunka5_1	0
Bunka1_2	0	Bunka2_2	192	Bunka3_2	15762	Bunka4_2	204	Bunka5_2	0
Bunka1_3	0	Bunka2_3	0	Bunka3_3	1314	Bunka4_3	0	Bunka5_3	0
Bunka1_4	0	Bunka2_4	0	Bunka3_4	30	Bunka4_4	0	Bunka5_4	0
Bunka1_5	0	Bunka2_5	0	Bunka3_5	0	Bunka4_5	0	Bunka5_5	0

Časy jednotlivých amplitud v buňkách **odpovídají** počátkům stékání deště (obr.5.9.), (tab.5.3.).



Obr.5.9. Sudá a lichá větev RF s vyznačenými čísly jednotlivých amplitud a příslušnými časy

Tab.5.3. Časy jednotlivých amplitud:

Číslo amplitudy (začátek stékání deště)	Čas [s]
1	0,00
2	0,02
3	0,04
4	0,06
5	0,07
6	0,09
7	0,11

### 5.1.2. Generování matic Rain-Flow

Zpracováním zdrojového záznamu metodou RF získám matici RF zdrojového záznamu. Abych mohl vytvořit (simulovat) pokračování zdrojového záznamu, je nutné získat matice RF, ze kterých zpětně sestavuji záznam napětí. Pro zachování náhodného charakteru zpětně sestaveného záznamu, musí být generované matice RF odlišné od matice zdrojového záznamu, ale musí jí **pravděpodobnostně** odpovídat. Odlišnost je náhodná a je dána různými četnostmi amplitud na dané střední hodnotě. V rámci jedné střední hodnoty (jednoho řádku matice) se ale četnosti neliší, pouze rozložení amplitud na dané střední hodnotě je odlišné (obr.5.10a., 5.10b.).

Matice RF vyhodnocená programem Plzen1																		
Citlivost matice : 0.00 MPa																		
Rozměr Matice : 16x16																		
Max. amplituda : 50 MPa																		
Max. stř. hodnota : 50 MPa																		
Celková četnost amplitud matice : 145256																		
																-σa [MPa]	Četnosti	
-σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	113	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127
	692	101	38	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	833
	5356	1085	490	149	43	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7135
	0	47131	5937	2221	993	415	179	74	34	9	2	1	0	0	0	0	0	56996
	63493	6109	2272	834	311	152	83	63	19	6	2	0	0	0	0	0	0	73344
	4299	861	349	136	52	14	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5715
	827	129	60	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1030
	50	16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr.5.10a. Ukázka původní matice RF a četností na jednotlivých středních hodnotách

Kontrolní podmínkou správnosti realizovaného generování nové matice je to, že **celková četnost** původní matice a matice vygenerované se neliší. **Algoritmus** programu pro vytvoření nové matice RF je následující :

- Rozdělení původní matice na jednotlivé střední hodnoty.
- Pro každou střední hodnotu rozkmitu napětí tvořit „distribuční“ funkci (týká se to pouze těch, které mají četnost amplitud nenulovou).
- Na základě znalosti „distribuční“ funkce generovat náhodná čísla a k těmto náhodným číslům přiřazovat příslušné amplitudy (obr.5.11f).

- d) Postupné generování amplitud a jejich zařazování do nové matice. Generování probíhá tak dlouho, dokud četnosti amplitud na daných středních hodnotách nové a původní matice nejsou stejné.
- e) Výsledné sestavení generované matice.

Matice RF vygenerovaná programem Plzen1																	
Citlivost matice : 0.00 MPa																	
Rozměr Matice : 16x16																	
Max. amplituda : 50 MPa																	
Max. stř. hodnota : 50 MPa																	
Celková četnost amplitud matice : 145256																	
																-σa [MPa]	Četnosti
-σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	116	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127
	689	100	41	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	833
	5372	1077	493	129	49	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7135
	0	47193	5909	2231	981	408	162	75	26	8	2	1	0	0	0	0	56996
	63615	6051	2256	792	299	156	95	56	20	4	0	0	0	0	0	0	73344
	4325	859	346	119	50	12	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5715
	828	113	68	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1030
	52	13	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr.5.10b. Ukázka vygenerované matice RF a četností na jednotlivých středních hodnotách

Na obr. 5.11a. až 5.11g. a v tab.5.4. je ukázka generování jednoho řádku matice RF (generování amplitud na vybrané střední hodnotě). Ukázky původní matice RF a generovaných matic RF jsou uvedeny v příloze č.7.

Původní matice RF vyhodnocená programem Plzen1																	
Citlivost matice : 0.00 MPa																	
Rozměr Matice : 16x16																	
Max. amplituda : 50 MPa																	
Max. stř. hodnota : 50 MPa																	
Celková četnost amplitud matice : 12566																	
																-σa [MPa]	Četnosti
-σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	82	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	812	152	50	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	4011	526	149	43	15	15	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4969	610	163	54	4	2	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	540	124	26	6	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	148	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+σm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[MPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr.5.11a. Matice RF původního záznamu

Histogram pro střední hodnotu 6,25 MPa	
Amplituda	Četnost
3,125	812
6,25	152
9,375	50
12,5	6
15,625	2
18,75	2
21,875	0
25	0
28,125	0
31,25	0
34,375	0
37,5	0
40,625	0
43,75	0
46,875	0
50	0

Obr.5.11b. Histogram četností amplitud na dané stř. hodnotě

Distribuční funkce pro střední hodnotu 6,25 MPa	
Amplituda	Df
0	0
3,125	0,793
6,25	0,941
9,375	0,99
12,5	0,996
15,625	0,998
18,75	1
21,875	1
25	1
28,125	1
31,25	1
34,375	1
37,5	1
40,625	1
43,75	1
46,875	1
50	1

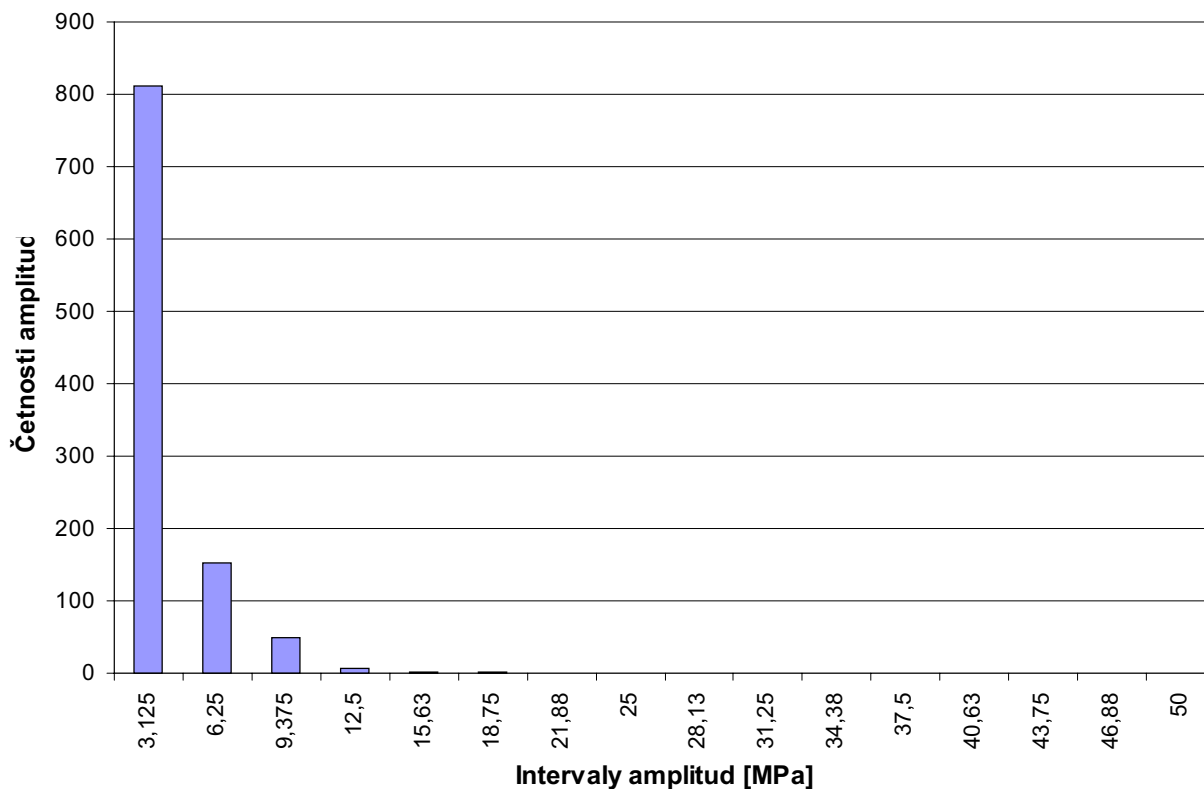
Obr.5.11c. Sestavená „distribuční“ funkce amplitud na dané stř. hodnotě

Vygenerovaný histogram pro stř. hodnotu 6,25 MPa	
Amplituda	Četnost
3,125	821
6,25	150
9,375	45
12,5	5
15,625	0
18,75	3
21,875	0
25	0
28,125	0
31,25	0
34,375	0
37,5	0
40,625	0
43,75	0
46,875	0
50	0

Obr.5.11d. Nově vygenerovaný histogram četností amplitud na dané stř. hodnotě

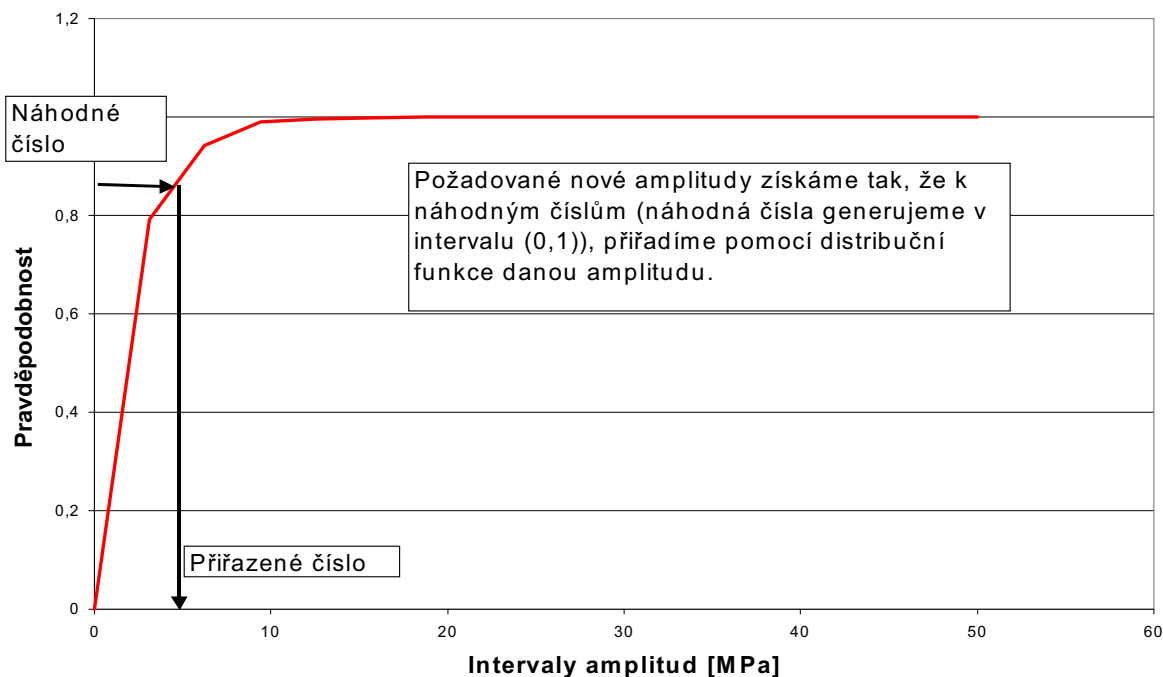


**Původní histogram četností amplitud na stř. hodnotě -6,25 MPa**

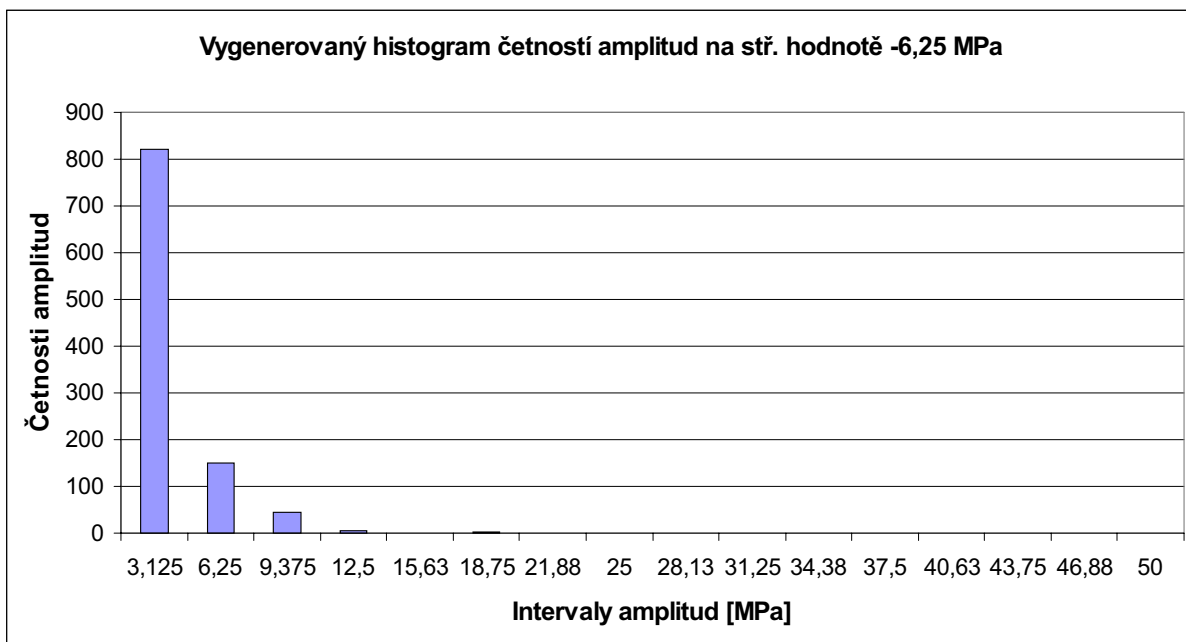


Obr.5.11e. Grafické znázornění Histogramu četností amplitud na dané stř. hodnotě

**Distribuční funkce pro stř. hodnotu -6,25 MPa**



Obr.5.11f. Grafické znázornění „distribuční“ funkce pro zvolenou stř. hodnotu a naznačení postupu generování nového histogramu



Obr.5.11g. Grafické znázornění vygenerovaného histogramu

Tab.5.4. Tabulka srovnání původního a vygenerovaného histogramu na dané stř. hodnotě:

Interval amplitud [MPa]	Původní četnost	Nová četnost
( 0 – 3,125 )	812	821
( 3,125 – 6,25 )	152	150
( 6,25 – 9,375 )	50	45
( 9,375 – 12,5 )	6	5
( 12,5 – 15,625 )	2	0
( 15,625 – 18,75 )	2	3
( 18,75 – 21,875 )	0	0
( 21,875 – 25 )	0	0
( 25 – 28,125 )	0	0
( 28,125 – 31,25 )	0	0
( 31,25 – 34,375 )	0	0
( 34,375 – 37,5 )	0	0
( 37,5 – 40,625 )	0	0
( 40,625 – 43,75 )	0	0
( 43,75 – 46,875 )	0	0
( 46,875 – 50 )	0	0

### 5.1.3. Simulace záznamu napětí

Abych mohl provést simulaci odezvy, musím nejprve vygenerovat novou matici dle bodu 5.1.2. Vlastní simulace pak probíhá v následujících fázích :

- generování nových amplitud
- přiřazování časů k nově vygenerovaným amplitudám
- seřazení amplitud podle časů

- úprava stejných časů a střídání maxim a minim.

Generování nových amplitud a přiřazování časů k nově vygenerovaným amplitudám probíhá **současně**. Vlastní generování amplitud je podrobně popsáno v bodě 5.1.3.1. Přiřazení času probíhá následovně :

- vygenerování příslušné amplitudy a její střední hodnoty
- zjištění, ze které buňky matice byla amplituda generována
- otevření souboru s časy, příslušejícími k dané buňce matice
- náhodné vybrání jednoho času
- přiřazení času ke generované amplitudě.

Dalším krokem je opětovné vytvoření časové posloupnosti. Jednou z neúčinnějších metod seřazení dat vzestupně podle velikosti ( v našem případě podle času) je metoda Quicksort [30,31]. Jedná se o metodu založenou na principu rekurze. Tuto metodu jsem použil také ve své práci.

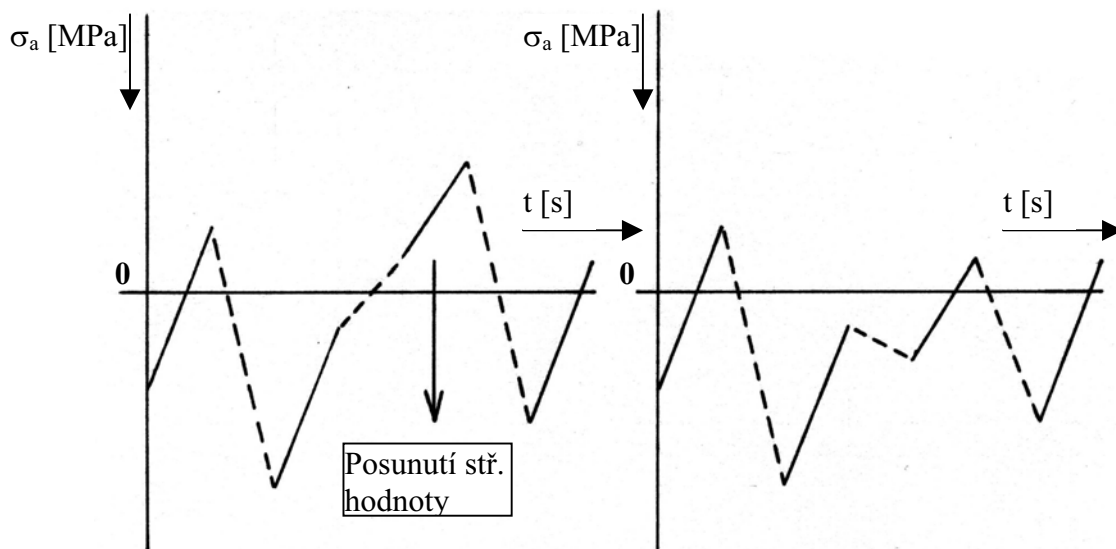
Závěrečnou částí je **úprava signálů z hlediska časů a z hlediska následnosti maxim a minim**. V průběhu generování nových amplitud a dochází k případům, že daný čas je přiřazen dvěma a více amplitudám. Aby simulovaný záznam byl kontinuální v čase, je třeba těmto amplitudám přiřadit čas odlišný, proto provádím úpravu signálů z hlediska času. Úprava signálů z hlediska časů je prováděna postupným přičítáním časového intervalu o interval odpovídající délce časového záznamu snímání původního záznamu (tab.5.5.).

Tab.5.5. Úprava následnosti časů v simulovaném záznamu:

Původní záznam		Upravený záznam	
Amplituda [MPa]	Čas [s]	Amplituda [MPa]	Čas [s]
15	0,00	15	0,00
20	0,02	20	0,02
6	0,02	6	0,04
3	0,04	3	0,06
8	0,06	8	0,08
11	0,10	11	0,10
2	0,10	2	0,12
19	0,16	19	0,16
12	0,20	12	0,20
6	0,22	6	0,22
4	0,22	4	0,24
9	0,26	9	0,26
13	0,26	13	0,28
15	0,28	15	0,30

Z uvedené tabulky je patrné, že v důsledku úpravy signálu z hlediska času může dojít k nepatrnému **prodloužení** signálu. Jak již bylo řečeno, časy jsou k amplitudám přiřazovány náhodně, přičemž dochází k případům, že některé časy jsou přiřazeny k více amplitudám. Protože ne všechny časy jsou pro generovaný záznam využity, dochází v generovaném záznamu k situacím, že časové rozestupy mezi amplitudami jsou větší než interval snímání. V tomto místě je možné generovaný záznam zkrátit tak, aby tyto intervaly odpovídaly intervalům snímání. Tento efekt kompenzuje případy, kdy je k více generovaným amplitudám přiřazen shodný čas.

Úprava signálů z hlediska maxim a minim je prováděna následovně. Aby nedocházelo k **chybě**, kdy následující minimum má vyšší hodnotu než předchozí maximum, což by ohrožovalo spojitost signálu, je v případě nastání této chyby postupně snižována střední hodnota následující amplitudy tak dlouho, až je následující minimum nižší než předchozí maximum o požadovanou hodnotu. V programu jsem nastavil tuto požadovanou hodnotu na 0,1 MPa. (obr.5.12.). Uvedená úprava se v charakteru záznamu vzhledem k citlivě nastavené požadované hodnotě posunu střední hodnotě projeví **minimálně**.



Obr.5.12. Úprava středních hodnot amplitud tak, aby se střídalo maximum s minimem

Tato fáze výpočtu je časově nejnáročnější. Aby se maximálně urychlil výpočet, je zde využíváno principu **dynamických proměnných**, kdy je celý signál načten do paměti RAM počítače (paměť RAM je řádově 100x rychlejší než pevný disk počítače, který by byl využíván v případě volby jiného principu). Při užití dynamických proměnných rychlost výpočtu závisí zejména na výkonu procesoru počítače.

### 5.1.3.1. Generování nových amplitud

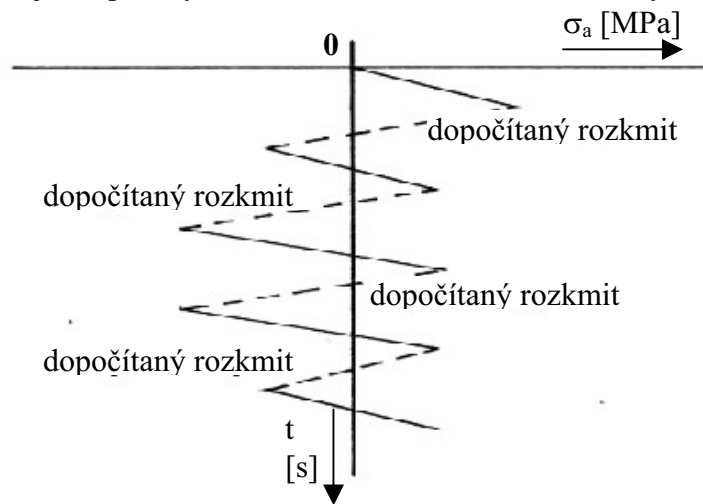
Simulovaný záznam napětí získám **zpětnou transformací** z matice RF. Pro zpětnou transformaci použiji vygenerované matice RF. Aby byla dodržena náhodnost záznamu, je nutné zvolit vhodný způsob řazení jednotlivých amplitud do simulovaného záznamu. Každá matice RF obsahuje amplitudy v obou směrech (sudý a lichý). Pro vytvoření simulovaného záznamu je zařazení všech amplitud v obou směrech nereálné, protože vygenerované matice RF neodpovídají změřenému záznamu napětí (matice změřeného záznamu obsahují amplitudy pro obě větve RF, generované matice obsahují také amplitudy pro obě větve, tyto dvě větve jsou však v důsledku generování odlišné, nelze z nich opětovně vytvořit záznam). Proto pro zjednodušení simulace **uvážuji pouze jeden směr RF** (jednu větev) a druhý dopočítávám (obr.5.13.).

Konkrétní postup je následující :

- Ze všech četností matice na příslušné střední hodnotě se vypracuje histogram (obr.5.14a., 5.14b.). (u každé četnosti se zároveň registruje velikost amplitudy a střední hodnoty na které se nachází).
- Histogram se následně vydělí dvěma, lichá čísla se po vydělení zaokrouhlí směrem nahoru (obr.5.15.). (Tímto způsobem zjednodušeně získám požadovaný jeden směr RF.)
- Na základě znalosti histogramu se určí „distribuční“ funkce (obr.5.16.), pomocí které lze náhodně generovat amplitudy napětí s danou střední hodnotou.

Při řazení amplitud na daných středních hodnotách je bráno v úvahu to, že amplitudy a příslušné střední hodnoty jsou v matici RF řazeny do intervalů, které jsou dány velikostí maximální střední hodnoty a maximální amplitudy, počtem řádků matice a počtem sloupců matice. Tyto parametry se v programu zadávají před vytvořením matice RF.

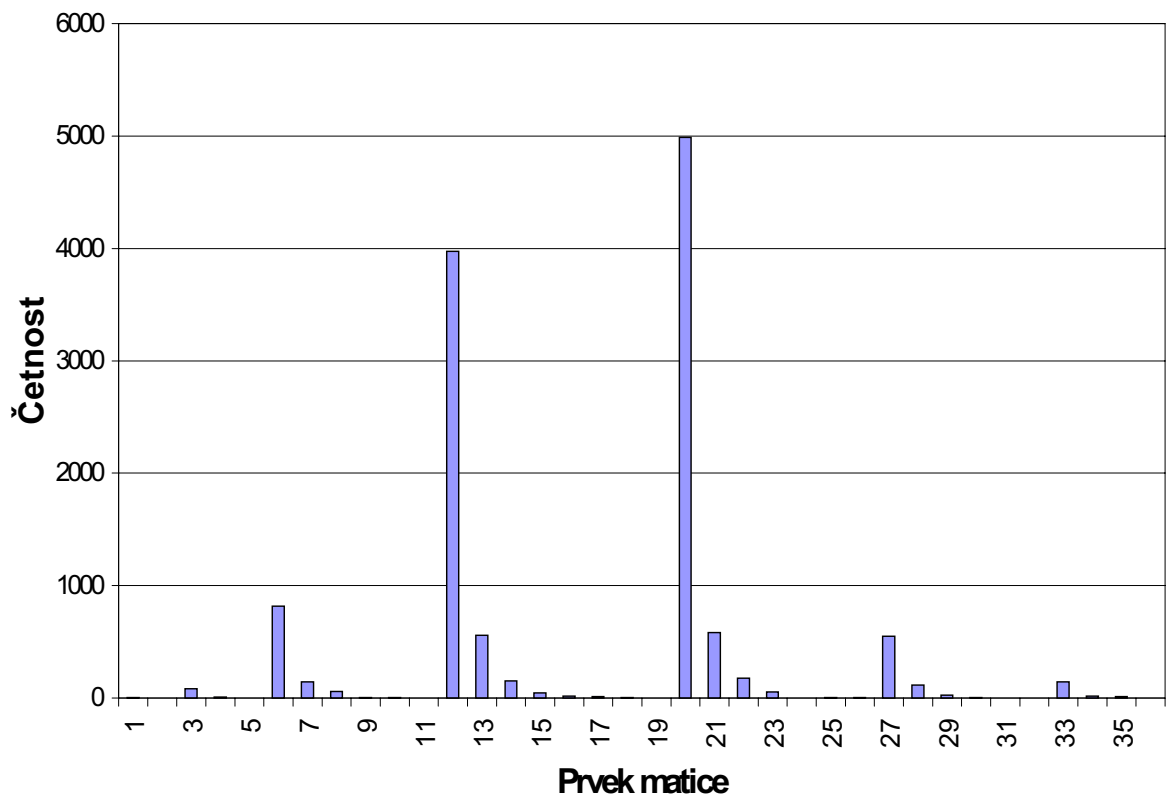
V rámci jednotlivých intervalů uvažují rovnoměrné rozdělení. Na základě tohoto rozdělení se generují amplitudy se středními hodnotami, ze kterých se tvoří simulovaný záznam.



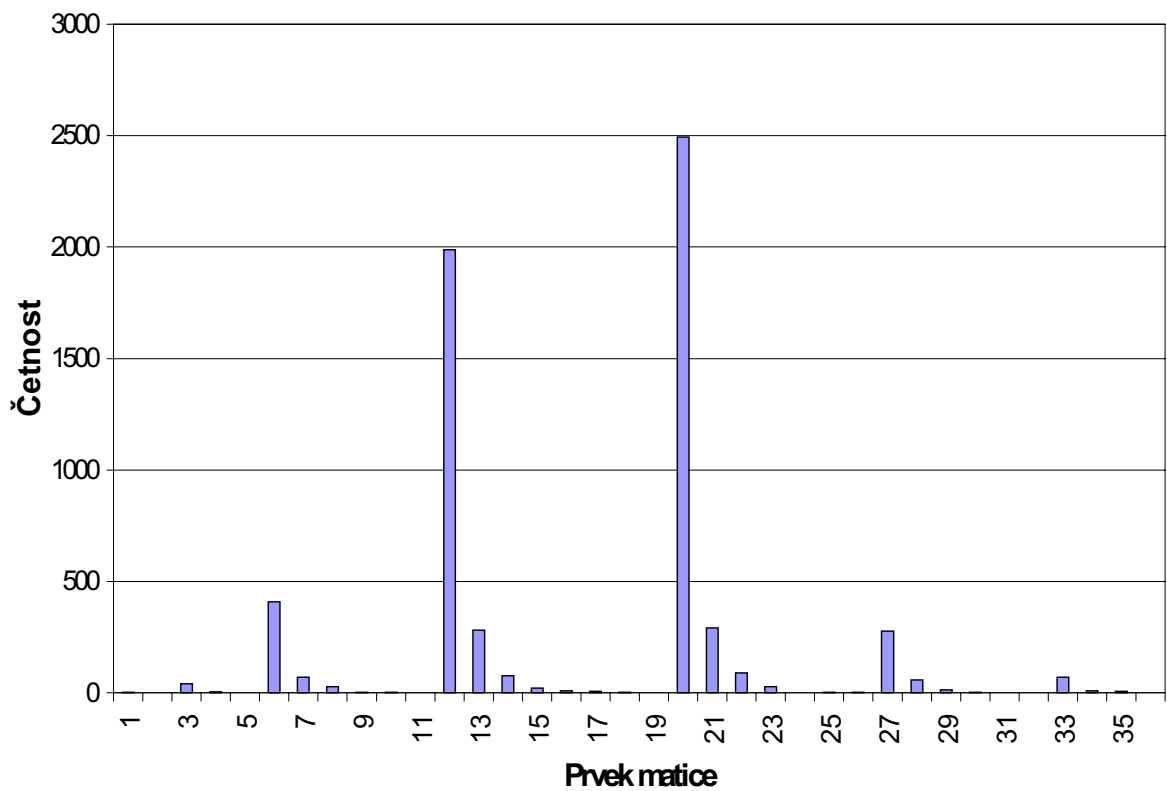
Obr.5.13. Dopotání druhého směru RF.

Matice RF vyhodnocená programem Plizen1															
Citlivost matice : 0.00 MPa															
Rozměr Matice : 16x16															
Max. amplituda : 50 MPa															
Max. stř. hodnota : 50 MPa															
Celková četnost amplitud matice : 12566															
															<b>-σa [MPa]</b>
<b>-σm</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>[MPa]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	816	142	56	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>0</b>	3976	559	151	44	17	11	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	4985	583	177	54	0	1	5	0	3	0	0	0	0	0	0
	551	116	23	6	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	142	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>+σm</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>[MPa]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

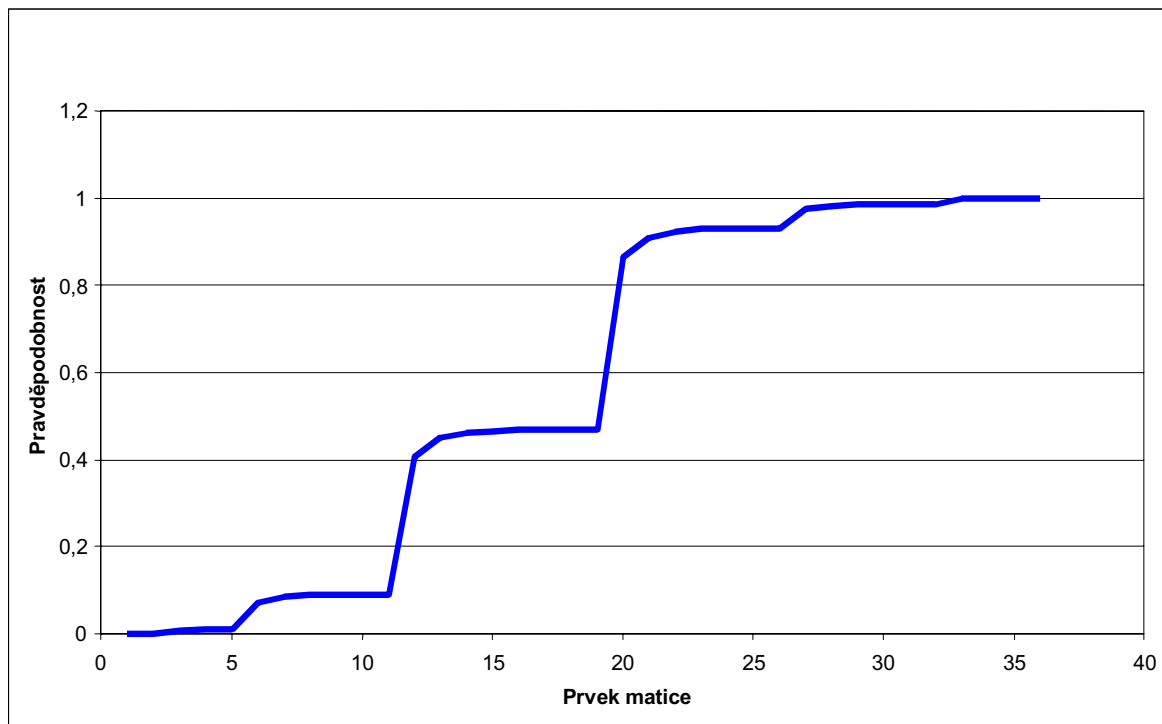
Obr.5.14a. Matice RF



Obr.5.14b. Histogram všech prvků matice

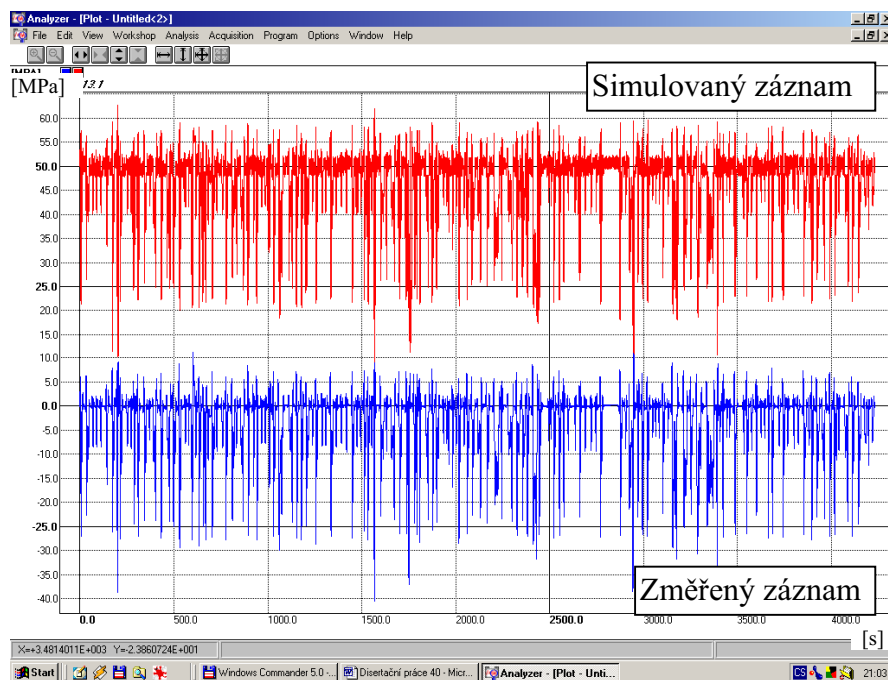


Obr.5.15. Histogram všech prvků matice vydělený dvěma

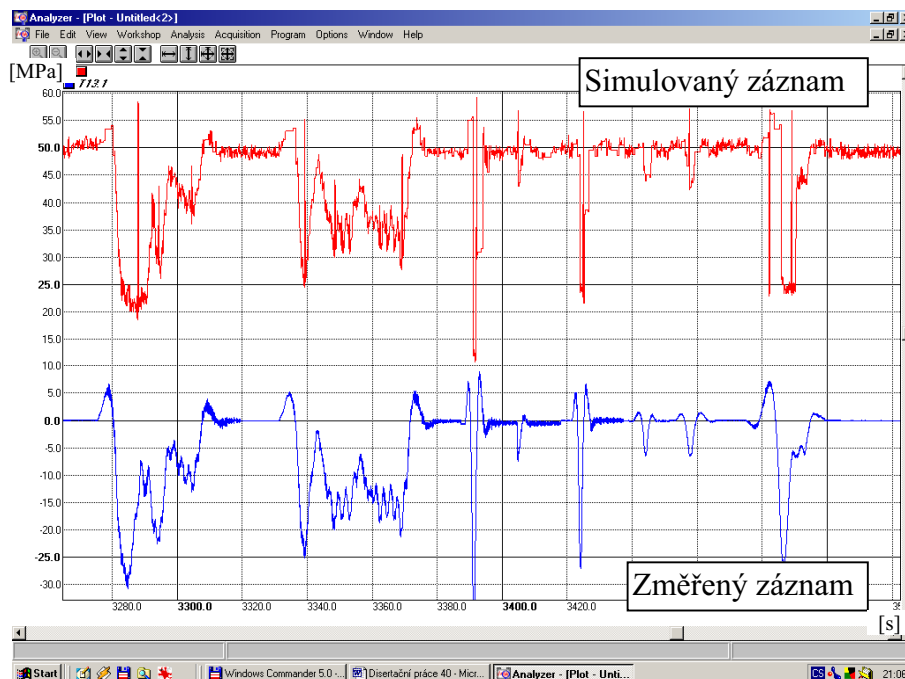


Obr.5.16. „Distribuční“ funkce všech prvků matice

Výsledkem uvedeného postupu je simulovaný záznam, který pravděpodobnostně odpovídá změřenému záznamu. Záznam však **není shodný** a při opakované simulaci je zachována náhodnost záznamu. Ukázka simulovaného záznamu je na obr.5.17. Detailní pohled na část simulovaného záznamu je na obr.5.18. Reálné simulace záznamů a jejich porovnání se změřenými záznamy jsou součástí přílohy č.8.



Obr.5.17. Simulovaný záznam



Obr.5.18. Detailní pohled na část simulovaného záznamu

### 5.1.4. Rozšíření o významový koeficient

Podle metodiky popsané v předchozích kapitolách významové koeficienty zesilují nebo zeslabují v daný časový okamžik vztažné napětí (od provozního zatížení). Toto zesílení (zeslabení) je popsáno vztahem (4.2). Pro zjednodušení výpočtu redukuji významové koeficienty na jeden „souhrnný“ významový koeficient. Tento souhrnný koeficient vyjádřím jako matematickou funkci všech ostatních významových koeficientů :

$$k_W = k_T * k_S * k_V * k_O \tag{5.1}$$

kde

$k_W$	je „souhrnný“ významový koeficient
$k_T$	je významový koeficient od zatížení vlivem teploty
$k_S$	je významový koeficient zohledňující stárnutí konstrukce
$k_V$	je významový koeficient od zatížení vlivem vnějších klimatických podmínek
$k_O$	je významový koeficient od ostatních zatížení
*	vyjadřuje matematickou funkci popisující vztah mezi významovými koeficienty (násobek, součet, podíl, rozdíl).

Celkové napětí pak vyjádřím :

$$\sigma_C = k_W * \sigma_P \tag{5.2}$$

kde

$\sigma_C$	je celkové napětí v konstrukci v daný časový okamžik
$k_W$	je „souhrnný“ významový koeficient
$\sigma_P$	je napětí v konstrukci v daný časový okamžik od provozního zatížení.

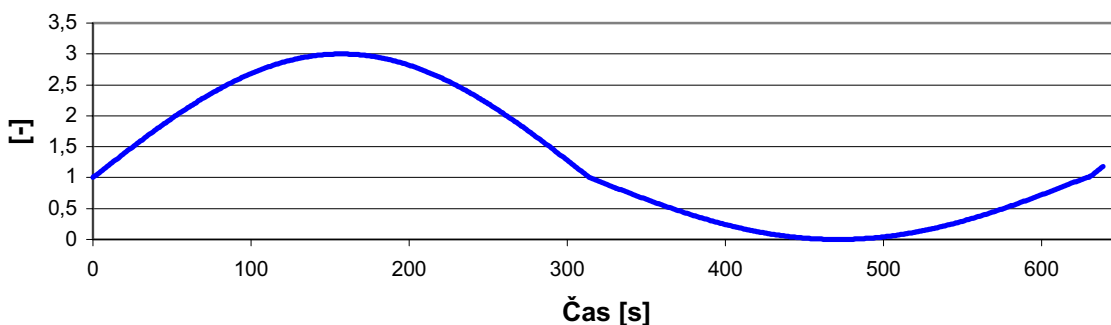
Tímto způsobem **zjednoduší** výpočet. Aby tento způsob byl aplikovatelný, je nutné významové koeficienty upravit a sloučit je. Toto je možné provést pomocí standardního softwaru [32]. Ukázka transformace simulované odezvy pomocí „souhrnného“ významového



koeficientu je na obr.5.19a., 5.19b. Pro simulaci na tomto obrázku byl použit zkrácený záznam dodaný Škodou výzkum s.r.o. Pro ukázkou byl zadán časový interval snímání odezvy 0,02 s a časový interval změny významového koeficientu 1s. Pro redistribuci pomocí RF byly zadány následující údaje :

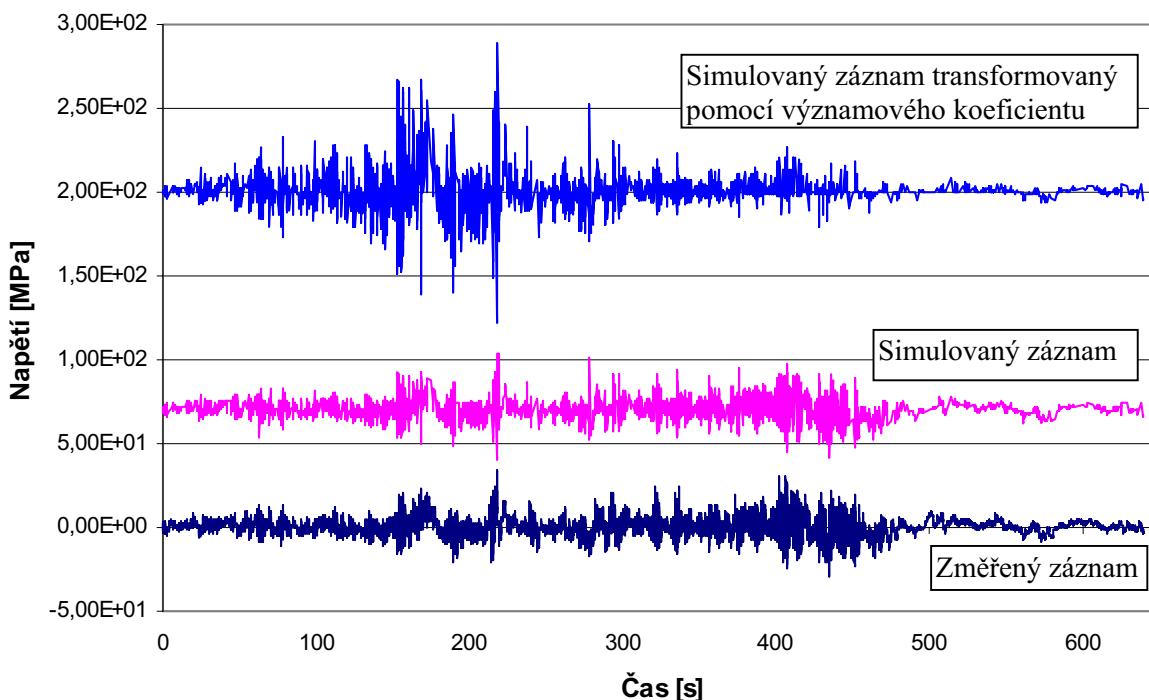
Amplitudová citlivost matice :	0,5 MPa
Počet sloupců :	32
Počet řádků :	32
Maximální amplituda :	50 MPa
Maximální střední hodnota :	30 MPa

**"Souhrnný" významový koeficient**



Obr.5.19a. Průběh a velikost „souhrnného“ významového koeficientu

**Simulace odezvy**



Obr.5.19b. Úprava simulovaného záznamu o významový koeficient (pro přehlednost byly simulované záznamy posunuty , tak aby jejich střední hodnoty byly 70 MPa a 200MPa)

## 5.2. SIMULACE ÚNAVOVÉ KŘIVKY

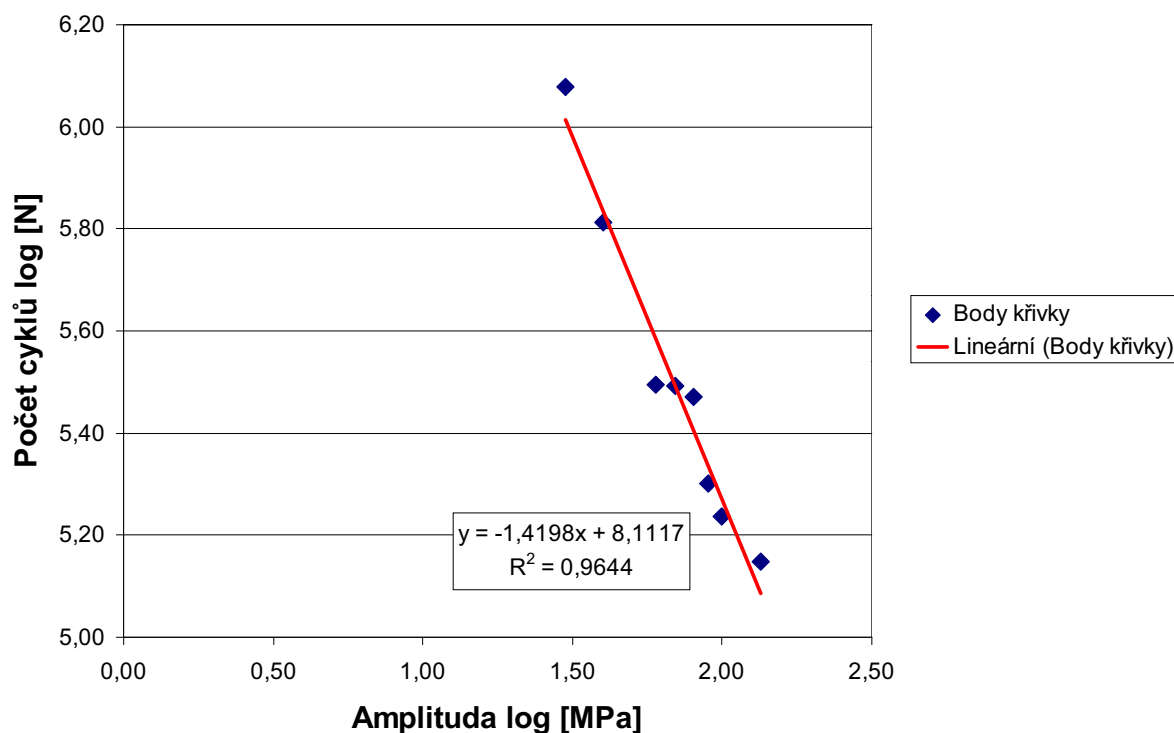
Pro výpočet životnosti je kromě znalosti zdrojových záznamů napětí vyšetřovaných kritických míst konstrukce (zpracovaných do podoby matic RF) **nutná znalost materiálových charakteristik** (únavových křivek) daných míst.

Program je postaven tak, že příslušná únavová křivka je do něho zadávána souřadnicově množinou bodů. Předpokladem je, že únavová křivka byla získána **experimentální cestou**, tzn. že křivka je stanovena souřadnicově. Pokud je křivka daná funkcionálně, je nutné z programových důvodů nejprve převést tuto křivku na souřadnicové zadání (stanovení dvou bodů křivky pomocí souřadnic). Únavová křivku je následně programem vyjádřena v logaritmickém tvaru proložení lineární regresní funkce souřadnicemi (tab.5.6., obr.5.20.).

Tab.5.6. Souřadnicově zadaná únavová křivka :

Amplituda	Počet cyklů
135	1,41E+5
100	1,72E+5
90	2,00E+5
80	2,96E+5
70	3,11E+5
60	3,12E+5
40	6,50E+5
30	1,20E+6

Regresí stanovená W křivka



Obr.5.20. Stanovení regresní únavové křivky

Množina souřadnic však obsahuje **náhodné chyby vzniklé při experimentech** a vlivem většinou omezeného (nedostatečného) počtu vzorků i chybu statistickou. Proto jsem v metodice (kapitola 4.3.) řešil i tuto otázku pomocí simulace únavové křivky dle následujících kroků :

- stanovení regresní únavové křivky
- generování únavové křivky
- transformace únavové křivky pro danou střední hodnotu.

Protože ale pro následný výpočet životnosti je nutné, aby únavová křivka měla funkcionální vyjádření, je v závěru kroku : „generování únavové křivky“ vyjádřena únavová křivka **funkcionálně**. Podrobný popis jednotlivých kroků simulace únavové křivky je popsán v následujících kapitolách.

### 5.2.1. Stanovení regresní únavové křivky

K eliminaci náhodných odchylek únavové křivky je nutné množinou experimentálně změřených bodů proložit křivku. Pro tento účel se více **hodí logaritmické vyjádření únavové křivky**, kde prokládaná křivka má tvar přímky. Tuto přímku lze získat pomocí **regresní funkce**. Pro odhad parametrů regresní funkce jsem použil metodu nejmenších čtverců. Po získání přímky je důležité vyhodnotit také tzv. „Koefficient determinace“, který vyjadřuje, nakolik je daný model lineární regrese schopen vysvětlit výběrový rozptyl dané proměnné. Oceňuje tedy kvalitu daného modelu. Vždy je  $0 \leq R^2 < 1$ , přičemž  $R^2 > 0,95$  se často považuje za kritérium pro přijetí modelu [33]. Vyhodnocení lineární regresní únavové křivky z naměřených dat a srovnání vyhodnocených parametrů s podklady dodanými Škodou výzkum s.r.o. a výsledky docílenými standardním softwarem MS EXCEL jsou uvedeny v tab.5.7.

Tab.5.7. Porovnání výsledků lineární regrese ( $R^2$  vyjadřuje koeficient determinace. Podklady pro funkcionální stanovení únavové křivky jsou uvedeny v předchozí tab.5.6.) :

Rovnice únavové křivky : $\log N = A + B * \log S$			
Druh výpočtu	A	B	$R^2$
Plzen	8.1116E+00	-1.4198E+00	9.6445E-01
EXCEL 97	8.1117	-1.4198	0.9644
Škoda výzkum s.r.o.	8.1128	-1.4205	-

Z tabulky je zřejmá dobrá shoda výsledků, tzn. že i v tomto kroku pracuje program „Plzen“ spolehlivě.

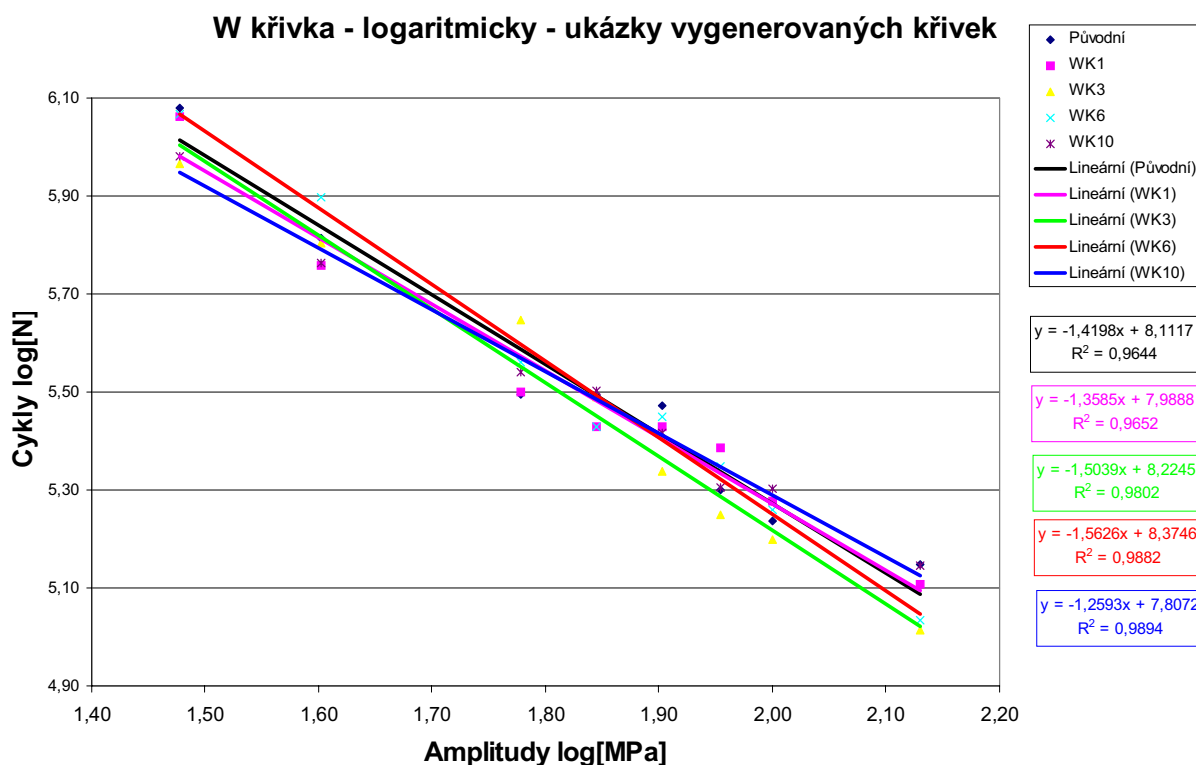
### 5.2.2. Generování únavové křivky

Protože únavová křivka (stanovená experimentem) je dána pouze omezeným počtem hodnot (většinou minimem 10 vzorků zkoušeného konstrukčního uzlu), nelze ji považovat za plně směrodatnou. Je velmi pravděpodobné, že **skutečný tvar křivky je odlišný** (jak v jejím sklonu, tak v konstantě). Proto je nutné na základě pravděpodobnosti uvažovat i jiné tvary únavové křivky. Tyto jiné tvary (soubor únavových křivek) získám tak, že budu generovat jinou množinu hodnot, která pravděpodobnostně odpovídá experimentálně získané únavové

křivce. Následně pak proložím touto množinou hodnot regresní přímkou. Postup získání nové únavové křivky je následující :

- Z původních, experimentálně zjištěných bodů získám regresní únavovou křivku.
- Určím odchylky nejvzdálenějších bodů od křivky.
- Stanovím „konfidenční interval“.
- V rámci tohoto intervalu generuji náhodná čísla (uvažuji zde normální rozdělení pravděpodobnosti).
- Nově vygenerovanými čísly proložím regresní křivku.
- Stanovím novou únavovou křivku.
- Opakováním celého postupu obdržím „n“ nových vygenerovaných křivek, které pak použiji při výpočtu odhadu životnosti konstrukce.

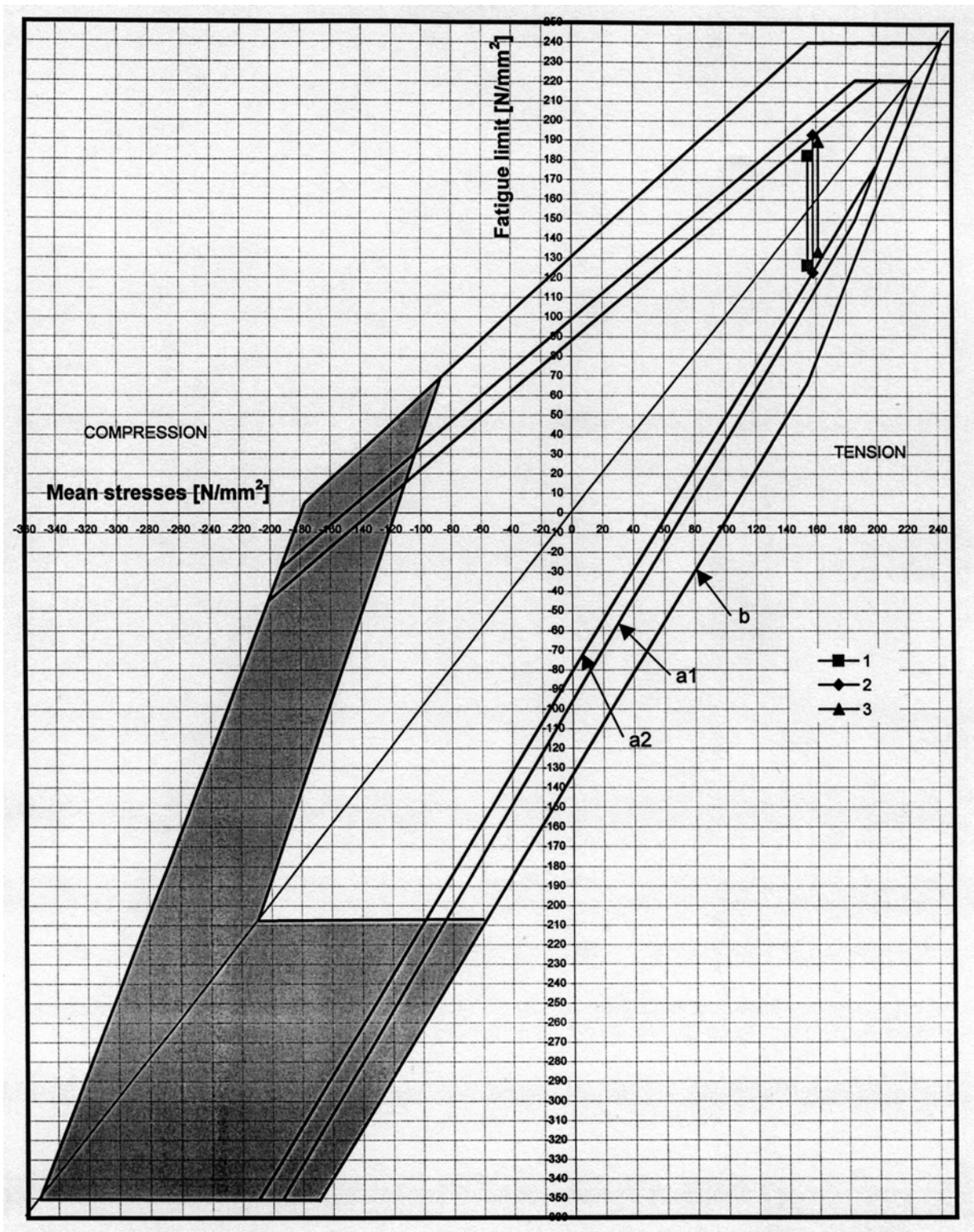
Zjednodušeně jsou ukázky vygenerovaných křivek znázorněny na obr.5.21. Ukázky původní únavové křivky a vygenerovaných únavových křivek jsou detailněji uvedeny v příloze č.9.



Obr.5.21. Ukázky vygenerovaných únavových křivek

### 5.2.3. Transformace únavové křivky pro danou střední hodnotu

Únavové křivky, které jsem získal výše uvedeným způsobem, odpovídají namáhání na **nulové střední hodnotě**. Protože jsme metodou dvouparametrického stékajícího deště získali matici RF s různými středními hodnotami, je nutné každou únavovou křivku pro tyto střední hodnoty **transformovat**. K transformaci únavové křivky jsem použil princip Smithova diagramu (obr.5.22.). Podrobně je problematika Smithových diagramů popsána ve [39].



Obr.5.22. Smithův diagram

Pro transformaci únavové křivky jsem použil následující vztahy :

$$\log N = konst - m \times \log \sigma_R \quad (5.3.)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_R \times \sigma_c}{\sigma_c - \frac{1-\varphi}{\varphi} \times \sigma_{mi}} \quad (5.4.)$$

$$konst2 = \log N + w \times \log \sigma_{ar} \quad (5.5.)$$

kde

N	je počet cyklů
m	je směrnice únavové křivky
$\sigma_R$	je amplituda namáhání (pro transformaci nabývá libovolné hodnoty, ve výpočtu jsem tuto hodnotu stanovil na 50 MPa)
konst	je konstanta únavové křivky
$\sigma_{ar}$	je transformovaná amplituda namáhání
$\sigma_c$	je mez únavy
$\sigma_{mi}$	je střední hodnota rozkmitu
$\varphi$	je součinitel sbíhavosti Smithova diagramu
konst2	je transformovaná konstanta únavové křivky.

### 5.3. VÝPOČET DÍLČÍCH POŠKOZENÍ A STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI

K odhadu životnosti je možné dosadit do programu „Plzen“ **libovolnou hypotézu kumulace únavového poškození**. Odhad životnosti je prováděn standardně v následujících krocích :

- zvolení vhodného typu hypotézy kumulace únavového poškození,
- zpracování záznamu napětí podle požadavků dané hypotézy (metoda Stékajícího deště, Spektrální výkonová hustota),
- zadání únavové křivky ve funkcionálním tvaru,
- výpočet dílčích poškození pro daný záznam napětí,
- stanovení odhadu životnosti pro daný záznam napětí.

Podrobný popis metodiky vlastního odhadu životnosti je popsán v [48]. Na základě výsledků v [48] jsem k odhadu životnosti použil **Corten-Dolanova hypotézu** kumulace únavového poškození.

V programu „Plzen“ je předchozí postup odhadu životnosti modifikován. Postup se neustále opakuje dokud součet všech dílčích poškození či celkový počet cyklů výpočtu nedosáhne požadované hodnoty celkové hodnoty poškození. Modifikovaný postup je následující :

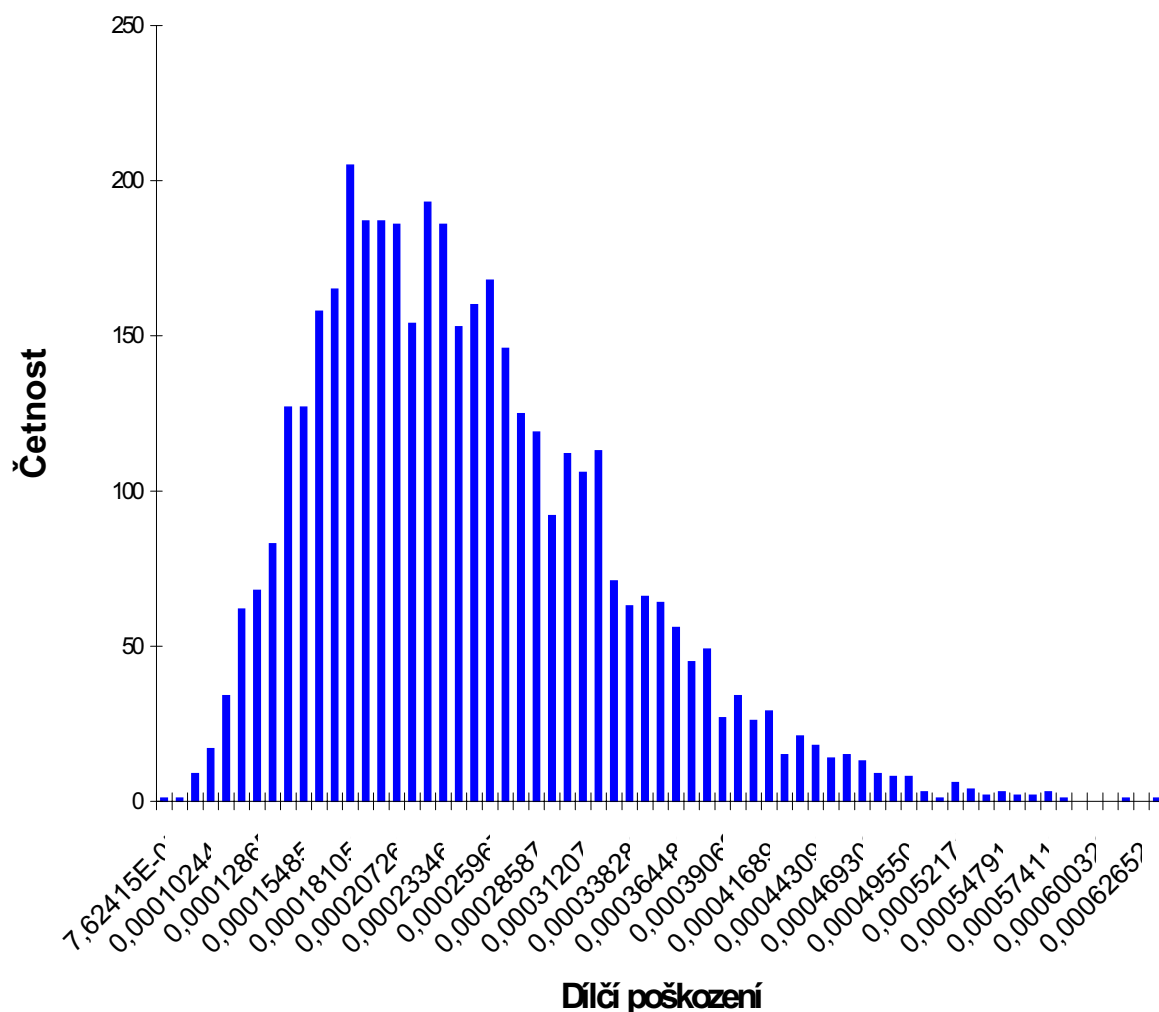
- simulace záznamu
- zpracování záznamu (metoda Stékajícího deště)
- simulace únavové křivky
- výpočet dílčích poškození pro simulovaný záznam napětí
- stanovení odhadu životnosti pro simulovaný záznam napětí
- uložení dílčího poškození na pevný disk
- uložení odhadu životnosti na pevný disk.

Dílčí poškození či odhad životnosti lze po ukončení výpočtu statisticky vyhodnotit pomocí standardního softwaru MS EXCEL.

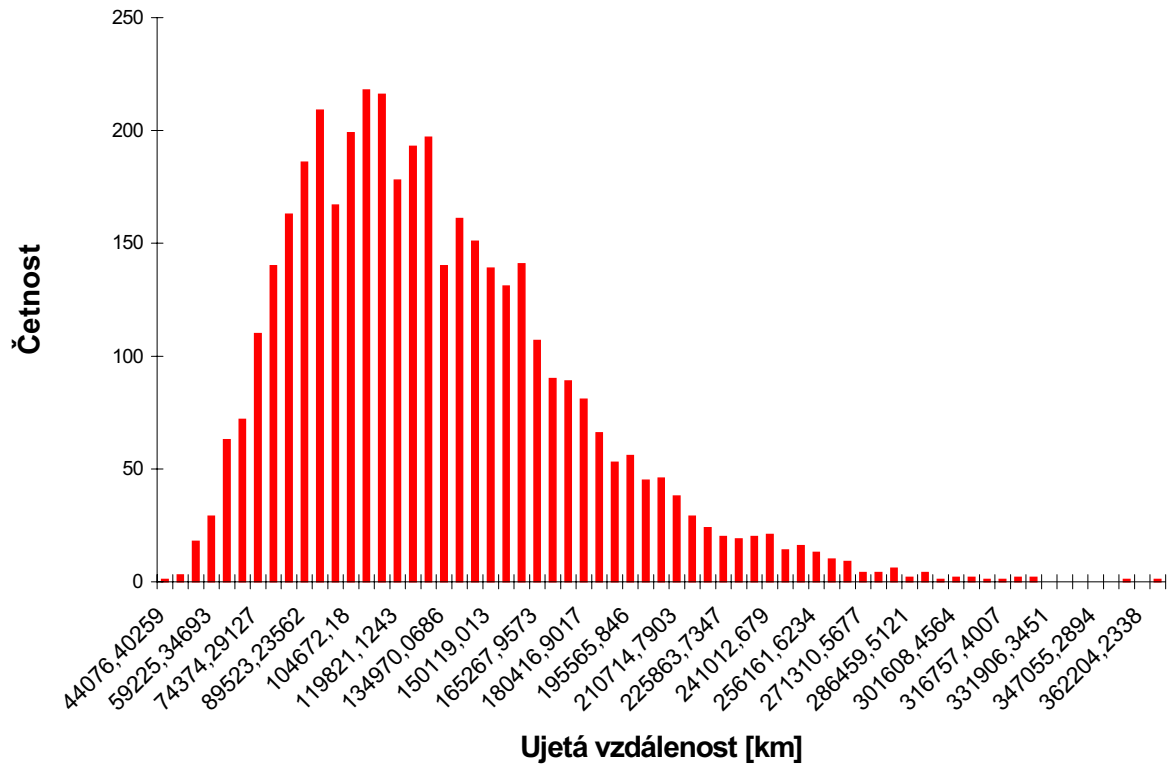
### 5.3.1. Statistické vyhodnocení dílčích poškození a životnosti

Jak již bylo výše řečeno, dílčí poškození je postupně stanovováno pro každou část vygenerovaného záznamu. Tím je umožněno provedení statistického vyhodnocení formou **histogramového zpracování výsledků** výpočtu (obr.5.23.). Obdobným způsobem lze provést vyhodnocení odhadu životnosti (obr.5.24.).

Pokud histogram životností převedu na „distribuční“ funkci, lze odhad životnosti vyjádřit pravděpodobnostně, tzn. že mohu určit s jakou pravděpodobností má daná konstrukce (detail konstrukce) dobu života, respektive kilometrický proběh (obr.5.25.).

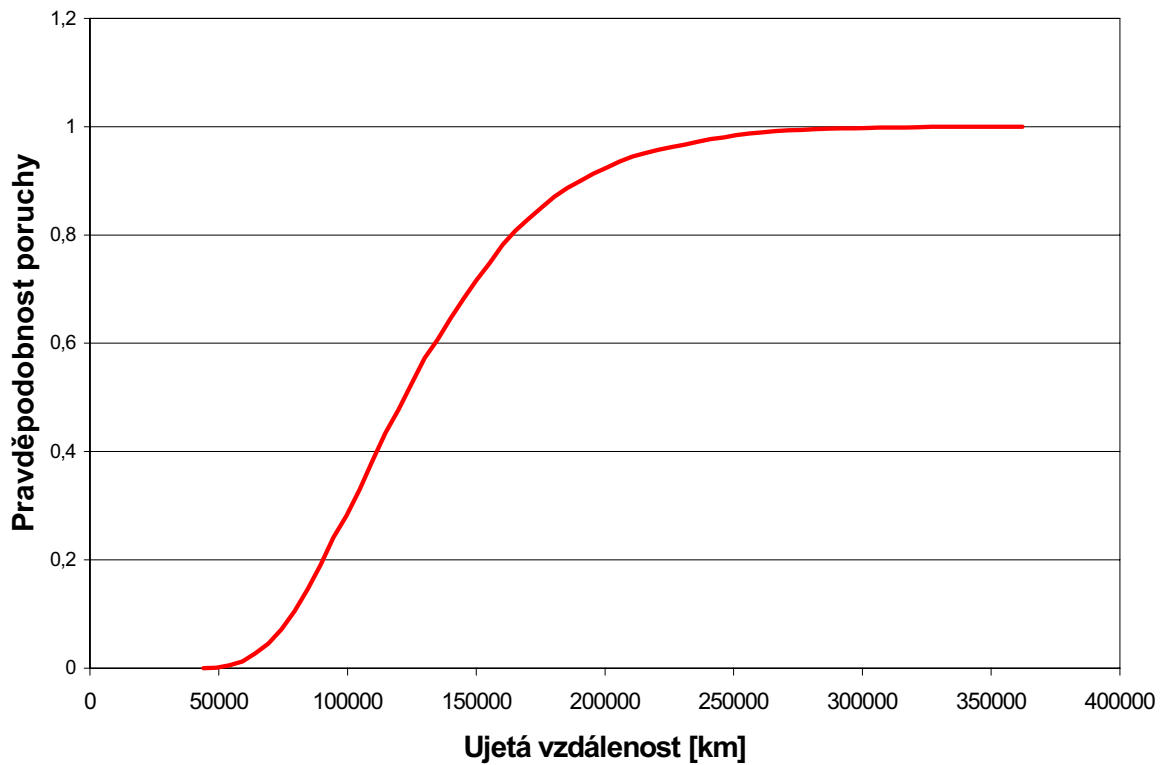


Obr.5.23. Histogram dílčích poškození



Obr.5.24. Histogram odhadů životnosti

**"Distribuční" funkce odhadů životnosti**



Obr.5.25. Pravděpodobnostní vyhodnocení odhadu životnosti



#### 5.4. STRUČNÝ POPIS VYTVOŘENÉHO PROGRAMU „PLZEN“

Program je určen k pravděpodobnostnímu odhadu životnosti. Jako programovací jazyk jsem zvolil produkt firmy Borland, **Delphi IV**. „Plzen“ je simulační program a proto časová délka výpočtu odhadu životnosti je velmi závislá také na použitém hardwaru počítače.

Program je koncipován tak, aby jednotlivé kroky při výpočtu odhadu životnosti bylo možné použít bez nutnosti provedení celého výpočtu. To umožňuje využít program i **k dalším účelům** jako je např. stanovení Rain Flow libovolného záznamu. Další předností tohoto řešení je snadná kontrola kroků výpočtu. Program „Plzen“ se skládá z následujících částí :

- 1) Zpracování matice Rain Flow původního (změřeného) záznamu napětí.
- 2) Generování nových matic Rain Flow.
- 3) Simulace zdrojového záznamu napětí.
- 4) Rozšíření o významový koeficient.
- 5) Vytvoření únavové křivky z experimentálně získaných dat.
- 6) Generování nových únavových křivek.
- 7) Výpočet životnosti.

V poslední sedmé části „Výpočet životnosti“ jsou „soustředěny“ výsledky všech předešlých kroků.

V průběhu výpočtu vznikají v adresáři, ve kterém se nachází program „Plzen“, soubory, které slouží jako zdrojová data k dalšímu výpočtu nebo mají čistě kontrolní charakter. Jednotlivé kroky na sebe navazují, proto se uvedené soubory nesmí vymazat v průběhu běhu programu. V případě celkového výpočtu jsou tyto soubory na konci výpočtu automaticky rušeny.

##### 5.4.1. Popis kontrolních souborů

Krok výpočtu	Název Souboru	Kontrolní funkce
Vytvoření matice RF	maticeRF.txt	vytvořená matice RF
Vytvoření matice RF	[maticeRF]	adresář obsahující soubory s časy jednotlivých buněk matice RF
Vytvoření matice RF	Bunka $l$ _ $m$ .bin	Soubor s časy buňky, $l$ _ $m$ vyjadřuje pozici buňky v matice RF, $l$ = řádek, $m$ = sloupec
Vytvoření matice RF	Bunka $l$ _ $m$ .txt	Kontrola binárních souborů s časy
Vytvoření matice RF	pomocRF.bin	binární soubor vzorového záznamu (vynechání nepotřebných hodnot)
Vytvoření matice RF	pomocS.txt	kontrola binárního souboru
Generování matic RF	matRF2.txt	upravená původní matice
Generování matic RF	RF1...RF $x$	vygenerované nové matice RF
Simulace zdrojového záznamu	distribS.txt	výpis distribuční funkce na nulové stř. hodnotě původní matice
Simulace zdrojového záznamu	simRF.bin	vygenerovaný záznam v binární podobě
Simulace zdrojového záznamu	simRF.txt	kontrola vygenerovaného záznamu
Simulace zdrojového záznamu	simulac2.txt	popis nenulových prvků matice vydělených dvěma
Simulace zdrojového záznamu	zbytekS.txt	kontrola generování simulovaného záznamu

Simulace zdrojového záznamu	simRF2.bin	Upravený vygenerovaný záznam v binární podobě (seřazený vzestupně podle časů)
Simulace zdrojového záznamu	simRF2.txt	kontrola generování simulovaného záznamu
Rozšíření o významový koeficient	SimRF2koef.bin	vygenerovaný záznam v binární podobě rozšířený o významový koeficient
Rozšíření o významový koeficient	SimRF2koef.txt	kontrola generování simulovaného záznamu
Vytvoření únavové křivky	beta0_1.txt	popis regresní únavové křivky v logaritmickém tvaru
Genrování únavové křivky	WK1...WK <sub>x</sub>	vygenerované nové únavové křivky v souřadnicovém tvaru
Výpočet životnosti	dilcipos.txt	<b>nejdůležitější soubor</b> , obsahuje všechna vypočtená dílčí poškození
Výpočet životnosti	zivotnost.txt	<b>nejdůležitější soubor</b> , obsahuje všechny vypočtená životnosti

## 5.4.2. Stručný popis jednotlivých částí programu

### 5.4.2.1. Úvodní obrazovka

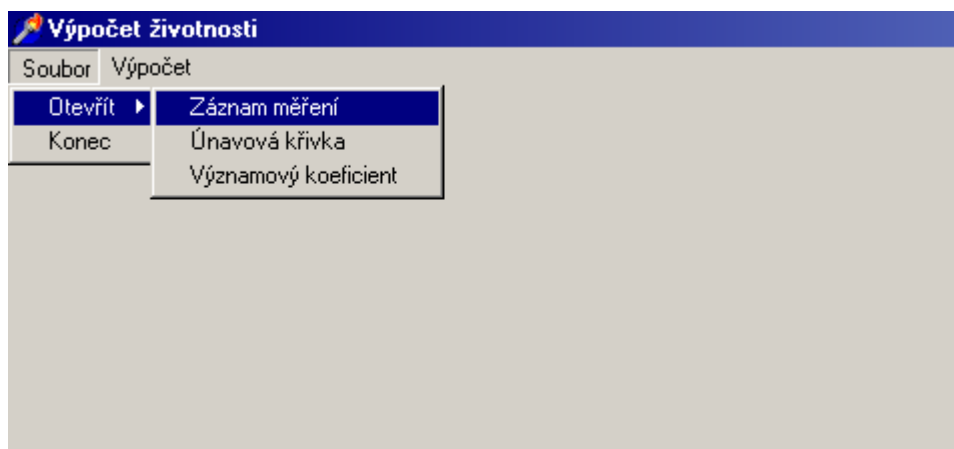
Úvodní obrazovka informuje uživatele o druhu programu, nejde uživatelsky uzavřít. Po uplynutí cca 3 vteřin úvodní obrazovka sama zmizí a je nahrazena prostředím vlastního programu.

### 5.4.2.2. Vlastní prostředí programu

Vlastní prostředí programu obsahuje dvě menu :

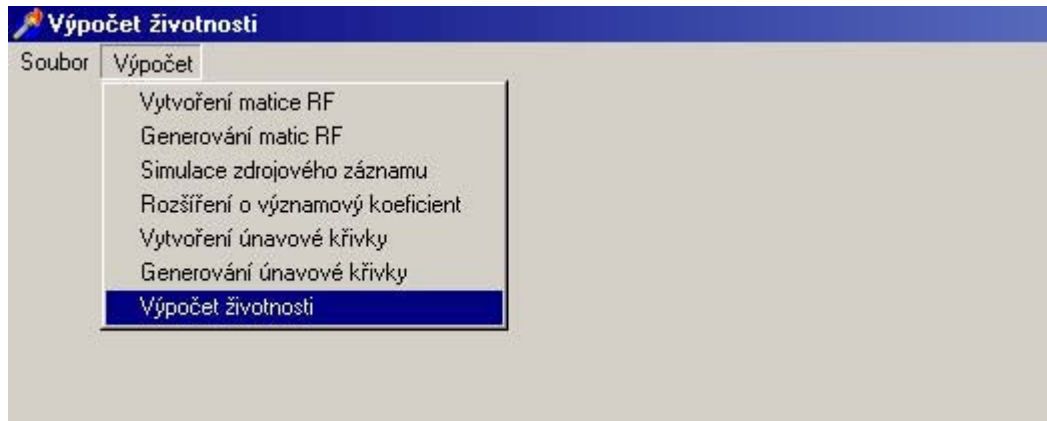
- 1) Soubor
- 2) Výpočet

Menu „Soubor“ je určeno k načtení zdrojových dat, záznamu napětí a únavové křivky v souřadnicovém tvaru. Způsob zadávání zdrojových dat (souborů s daty) je obdobný jako v ostatních programech ve Windows. Menu soubor dále také obsahuje položku umožňující ukončení programu (obr.5.27.).



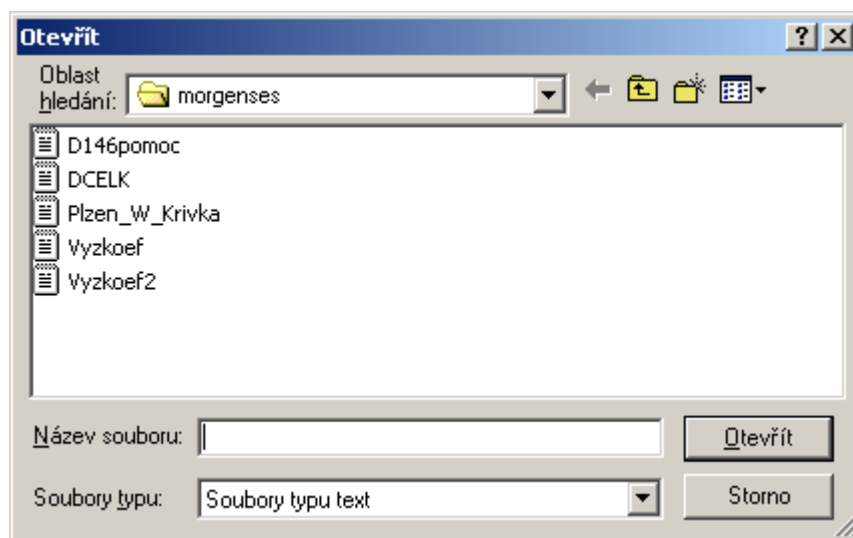
Obr.5.27. Menu „Soubor“

Menu „Výpočet“ je určeno výhradně k zadávání jednotlivých kroků výpočtu, případně k zadání výpočtu celkové životnosti (obr.5.28.). Aby menu „Vypočet“ bylo funkční je nutno nejdříve načíst zdrojová data pomocí předchozího menu. V současné době není v programu zakomponována ochrana proti chybnému postupu. V případě že se spustí výpočet některého kroku v menu „Výpočet“ bez předchozího zadání vstupních dat, dojde ke kolizi programu.



Obr.5.28. Menu „Výpočet“

#### 5.4.2.3. Položka „Otevřít záznam měření“ z menu „Soubor“

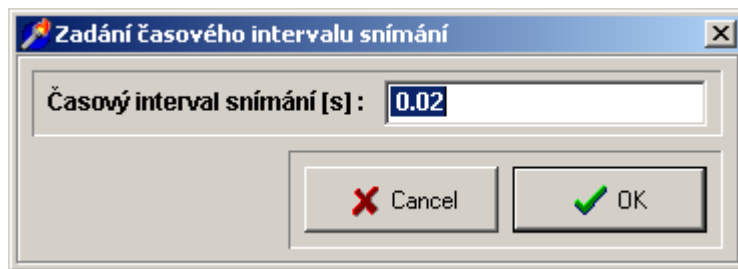


Obr.5.29. Dialogové okno „Otevřít“

Po zadání této položky se zobrazí dialogové okno „Otevřít“, ve kterém standardním způsobem zadáme soubor se zdrojovými daty (obr.5.29.).

Soubor musí obsahovat pouze zdrojová data, tzn. číselné vyjádření aktuálních výchylek. Nesmí obsahovat žádné texty a data musí být zadána již od prvního řádku. Soubor musí být v textovém formátu (\*.txt).

Po zadání tohoto souboru se zobrazí dialogové okno, kde je nutné zadat interval snímání jednotlivých položek ve zdrojovém souboru (obr.5.30.).



Obr. 5.30. Zadávání intervalu snímání

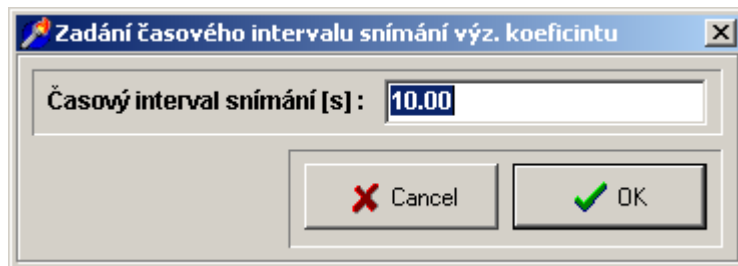
Tento interval vyplývá z frekvence snímání dat.

#### 5.4.2.4. Položka „Otevřít únavovou křivku“ z menu „Soubor“

Průběh zadávání souboru obsahujícího souřadnice experimentálně určených bodů křivky je obdobný jako u položky „Otevřít záznam měření“. Soubor musí opět obsahovat pouze číselné vyjádření únavové křivky. Číselná data musí mít podobu dvou sloupců oddělených tabulátorem. V levém sloupci jsou sestupně řazeny amplitudy. V pravém příslušný počet cyklů do lomu. Soubor musí být v textovém formátu (\*.txt).

#### 5.4.2.5. Položka „Otevřít významový koeficient“ z menu „Soubor“

Průběh zadávání souboru obsahujícího zdrojová data významového koeficientu je obdobný jako u položky „Otevřít záznam měření“. Soubor musí obsahovat pouze zdrojová data, tzn. číselné vyjádření aktuálních výchylek. Nesmí obsahovat žádné texty a data musí být zadána již od prvního řádku. Soubor musí být v textovém formátu (\*.txt).



Obr.5.31. Interval snímání významového koeficientu

Po zadání tohoto souboru se zobrazí dialogové okno, kde je nutné zadat interval snímání jednotlivých položek významového koeficientu ve zdrojovém souboru (obr.5.31.).

## 5.4.2.6. Položka „Vytvoření matice RF“ z menu „Výpočet“

Obr.5.32. Zadávání parametrů RF

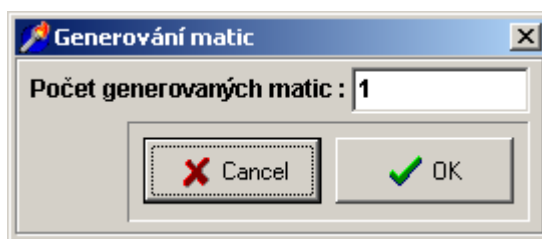
Pro vytvoření matic RF je nutno zadat parametry RF (obr.5.32). Jedná se o následující parametry :

- **Amplitudová citlivost matice**  
V některých případech se při měření může ve vzorovém záznamu objevit nežádoucí „šum“. Jedná se o velmi malé amplitudy na vysokých frekvencích.. Amplitudová citlivost jednoduchým způsobem umožňuje tyto malé amplitudy odfiltrovat. V průběhu Rain Flow program sleduje, zda zjištěná amplituda je větší než amplitudová citlivost, pokud ne, tak ji do výsledné matice RF nezařadí.
- **Počet sloupců (intervalů amplitud)**  
Pro stanovení matice RF je dále nutno říci, jaký bude mít matice rozměr. Rozměr ve vodorovném směru zadáváme v této položce. Počet sloupců může být libovolné číslo od jedné do šedesáti čtyř. Čím větší bude počet sloupců, tím podrobnější bude maticový popis RF. Při realizaci RF se získávají jednotlivé amplitudy. U náhodného signálu se amplitudy liší. Abychom sestavili matici RF, musíme tyto amplitudy rozřadit do předem stanovených intervalů. Počet těchto intervalů je shodný s počtem sloupců matice RF.
- **Počet řádků (intervalů stř. hodnot)**  
Rozměr matice RF ve svislém směru zadáváme v této položce. Počet řádků, respektive sloupců může být libovolné číslo od jedné do šedesáti čtyř. Jak již bylo řečeno, při RF se třídí ze signálu amplitudy napětí a u dvouparametrického RF také střední hodnoty jednotlivých rozkmitů napětí. Tyto střední hodnoty mají také náhodný charakter. Proto se musí, podobně jako u amplitud, zařadit do předem stanovených intervalů. Počet těchto intervalů je shodný s počtem řádků matice RF.
- **Maximální amplituda [MPa]**  
Citlivost matice (její popisná funkce) je dána nejen počtem intervalů, ale hlavně velikostí intervalů. Velikost intervalů amplitud je v programu zvaná jako „Amplitudový krok“. Tento amplitudový krok je dán jako podíl „maximální amplitudy“ a počtu sloupců (intervalů amplitud) matice RF. Je důležité, aby „maximální amplituda“ byla větší než kterákoli amplituda v záznamu. V opačném případě je matice RF chybná, protože amplitudy vyšší než „maximální amplituda“ nejsou do matice RF zařazeny.

- **Maximální střední hodnota [MPa]**

V této položce nepřímo zadáváme velikost intervalů stř. hodnot (řádků matice) matice RF. Velikost intervalů stř. hodnot je v programu zvaná jako „StrHodnota krok“. Tento „StrHodnota krok“ je dán jako podíl „maximální střední hodnoty“ a polovičního počtu řádků. Zde je proti výpočtu amplitudového kroku změna. Je to z toho důvodu, že v matici RF jsou záporné i kladné střední hodnoty. „Maximální střední hodnota“ se zadává v absolutní hodnotě, tzn. že postihuje kladnou i zápornou část matice RF. Do výpočtu vstupují přímo příslušné střední hodnoty napětí.

**5.4.2.7. Položka „Generování matic RF“ z menu „Výpočet“**

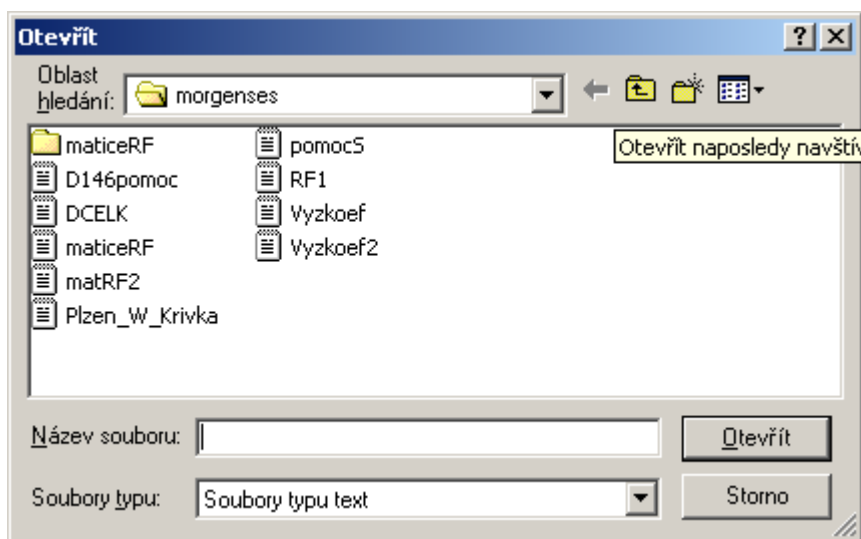


Obr.5.33. Zadání počtu generovaných matic

Pro výpočet životnosti podle principu popsaného v této práci je nutné generovat matice RF. V této části programu lze generovat libovolný počet matic RF (obr.5.33.). Tyto matice se následně mohou porovnat s maticí původního záznamu nebo případně statisticky vyhodnotit.

**5.4.2.8. Položka „Simulace zdrojového záznamu“ z menu „Výpočet“**

Simulace zdrojového záznamu je principiálně nejdůležitější částí programu. Na kvalitě simulace záznamu závisí i pozdější stanovení odhadu životnosti. Po kliknutí na tuto položku se zobrazí dialogové okno, ve kterém se stanoví, ze které matice RF se bude simulovat záznam napětí (obr.5.34.).



Obr.5.34. Stanovení matice RF pro simulaci

#### 5.4.2.9. Položka „Rozšíření o významový koeficient“ z menu „Výpočet“

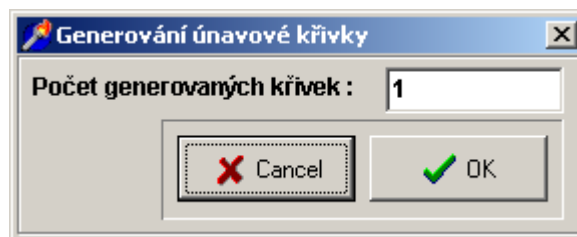
Rozšíření simulovaného záznamu o významový koeficient je časově nenáročné. Proto tento výpočetní krok nevyžaduje žádné další zobrazení. Pokud významový koeficient nebyl zadán (viz. bod.5.4.2.5.), tato fáze neproběhne.

#### 5.4.2.10. Položka „Vytvoření únavové křivky“ z menu „Výpočet“

Únavová křivka je zadána souřadnicově. Pro vyhodnocení životnosti je nutné získat únavovou křivku ve funkcionálním vyjádření. Převod ze souřadnicového do funkcionálního tvaru (pomocí lineární regrese) je uskutečňován v této části programu.

#### 5.4.2.11. Položka „Generování únavové křivky“ z menu „Výpočet“

Jak již bylo řečeno, souřadnicové údaje o únavové křivce byly získány experimentální cestou. Počet souřadnic je ale obvykle z hlediska statistiky nedostačující. Aby byl tento nedostatek kompenzován, zavádí se do programu výpočtu životnosti vygenerování únavových křivek. Generování se provádí pomocí generátoru náhodných čísel. Počet generovaných křivek se zadává v dialogovém okně (obr.5.35.).



Obr.5.35. Zadání počtu generovaných křivek

#### 5.4.2.12. Položka „výpočet životnosti“ z menu „Výpočet“

V této části programu je realizován kompletní výpočet odhadu životnosti. Jsou v ní integrovány všechny předchozí části. Odhad životnosti je proveden na základě do programu zapracovaného principu Corten-Dolanovy hypotézy. Po spuštění této položky se zobrazí dialogové okno (obr.5.36).

Zadávání Rain Flow zdrojového souboru bylo popsáno u položky „Zadávání matice RF“. Pro výpočet odhadu životnosti je nutné určit dílčí poškození simulovaných záznamů. Toto dílčí poškození se určí pomocí RF simulovaného záznamu. Z různých důvodů je možné požadovat, aby RF zdrojového záznamu bylo odlišné od RF sloužícího k simulaci záznamu. RF simulovaného záznamu se zadává položkou „Zadání RF pro generovaný záznam“. Dalšími položkami zadávání jsou (obr.5.37.):

- **Zadání součinitele sbíhavosti**

Zadání součinitele sbíhavosti je nezbytné pro transformování únavové křivky pro různé střední hodnoty. Součinitel sbíhavosti vychází z principu Smithova diagramu [1].

- **Zadání meze únavy**

Zadání meze únavy slouží k transformaci únavové křivky pro různé střední hodnoty [1].

- **Délka zdrojového záznamu**

Během výpočtu získáme dílčí poškození z každé vygenerované matice RF. Celkové dílčí poškození se určí jako součet dílčích poškození z jednotlivých matic. Pokud celkové dílčí poškození dosáhne požadované hodnoty, je výpočet u konce. Každá

- matice RF odpovídá jedné délce zdrojového záznamu. Odhad životnosti se stanoví jako počet vygenerovaných matic vynásobený délkou zdrojového záznamu.
- **Výpočet zastavit při poškození** (týká se zastavení výpočtu při určitém stupni poškození) Protože výpočet samotný je časově velice náročná operace, má uživatel možnost výpočet zkrátit. Cenou tohoto zkrácení je omezení počtu simulací a tím i určité zkreslení výpočtu. Standardním způsobem výpočet probíhá až do dosažení celkového poškození.
  - **Požadované celkové poškození** Ve většině případů je odhad životnosti stanovován pro sumu dílčích poškození rovnou jedné. Tato suma je v programu nazývána „požadované celkové poškození“. Z různých důvodů (otázka bezpečnosti) může uživatel tuto hodnotu snížit.

**Výpočet**

**Zadání RF pro zdrojový soubor :**

Amplitudová citlivost matice : 0.00

Počet sloupců (intervalů amplitud) : 32

Počet řádků (intervalů stř. hodnot) : 32

Maximální amplituda [MPa] : 210.00

Maximální střední hodnota [MPa] : 210.00

**Zadání RF pro generovaný záznam :**

Amplitudová citlivost matice : 0.00

Počet sloupců (intervalů amplitud) : 32

Počet řádků (intervalů stř. hodnot) : 32

Maximální amplituda [MPa] : 210.00

Maximální střední hodnota [MPa] : 210.00

**Zadání součinitele sblhavosti :**

0.80

**Zadání meze únavy [MPa]:**

30.00

**Počet kroků výpočtu :**

0

**Dosažené poškození :**

0.0000000000000000E+0000

**Čas výpočtu :** 12:01:12      **Dny výpočtu :** 0

**Délka zdrojového záznamu v odpovídajících jednotkách :**

1.0000000000000000E+0003

**Výpočet zastavit při poškození :**

1.0000000000000000E+0000

**Požadované celkové poškození :**

1.0000000000000000E+0000

**Stav výpočtu matice RF zdrojového záznamu :** 0%

**Stav simulace nového záznamu :** 0%

**Stav výpočtu matice RF simulovaného záznamu :** 0%

**Celkový stav výpočtu :** 0%

Cancel OK

Obr.5.36. Zadávání vstupních údajů pro výpočet životnosti

Popis Zbývajících údajů :

- **Počet kroků výpočtu** Počet kroků výpočtu popisuje pořadí momentálně simulovaného záznamu. Jeho funkcí je také popis stavu výpočtu.



- **Dílčí poškození**  
V tomto řádku se zobrazuje údaj o momentálním celkovém poškození. V průběhu výpočtu se tento údaj zvyšuje. Po dosažení hodnoty uvedené v „výpočet zastavit při poškození“ se výpočet ukončí.
- **Čas výpočtu**  
Po zobrazení tohoto dialogového okna se v tomto řádku zobrazuje aktuální čas. Po spuštění výpočtu životnosti se tento údaj změní na čas běhu výpočtu. Čas se vždy po 24 hodinách výpočtu nuluje. Pomocí údaje časového a údaje o dílčím poškození se dá odhadnout zbývající čas výpočtu.
- **Dny výpočtu**  
Po zobrazení tohoto dialogového okna se v tomto řádku zobrazuje počet dnů, po které je spuštěn výpočet.

### 5.4.3. Postup zadávání

Postup zadávání výpočtu je následující :

- 1) Zadání zdrojového záznamu.
- 2) Zadání únavové křivky.
- 3) Zadání významového koeficientu (tento krok je nepovinný, v případě, že do výpočtu významový koeficient nebude zařazen) – viz. bod 5.4.2.5.
- 4) Výpočet.
  - a) Postupná zadávání jednotlivých kroků.
  - b) Zadání výpočtu životnosti (pokud nebyl zadán významový koeficient, výpočet proběhne bez významového koeficientu, tzn. nedojde k rozšíření simulované odezvy).

## 5.5. HARDWARE A SOFTWARE

Výpočet odhadu životnosti programem „Plzen“ je proces velmi náročný na strojový čas počítače. Při použití standardního PC (PII-350MHz, 128MB RAM) trvá 12 až 15 dnů. Neúnosně dlouhou dobu výpočtu lze radikálně řešit výkonnější výpočetní technikou (PC PIII-Celeron 950 MHz, 128MB RAM – výpočet trvá 3 až 4 dny).

### 5.5.1. Požadavek hardware

Pro složitost a zejména četnost výpočtových kroků během výpočtu odhadu životnosti obecně doporučuji spouštět výpočet na co **nejvýkonnějším** počítači třídy PC.

- Testovací konfigurace (na této konfiguraci byl program sestaven a testován)
  - procesor PIII – 550MHz
  - paměť SDRAM 196MB – 100MHz
  - pevný disk SCSI Ultra160
  - 17“ monitor, rozlišení 1024x768
  - operační systém Windows 2000
- Doporučená konfigurace
  - 2 x procesor PIV – 2,4 GHz
  - paměť RIMM 1GB – 800 MHz
  - pevný disk SCSI Ultra160
  - 17“ monitor, rozlišení 1024x768
  - operační systém Windows XP

Doporučená konfigurace stojí na vrcholu soudobé technologie třídy PC. Odhadní cena takové konfigurace se pohybuje kolem 150 000,- Kč. Výpočet by se však zkrátil řádově na hodiny. Výhodou je také neustálý prudký vývoj počítačové technologie. V jeho důsledku prudce klesají ceny technologii jen nepatrně starších než je soudobý vrchol. Díky tomu je zde předpoklad, že se odhadní cena doporučené konfigurace během 1 roku sníží řádově o polovinu.

### 5.5.2. Software

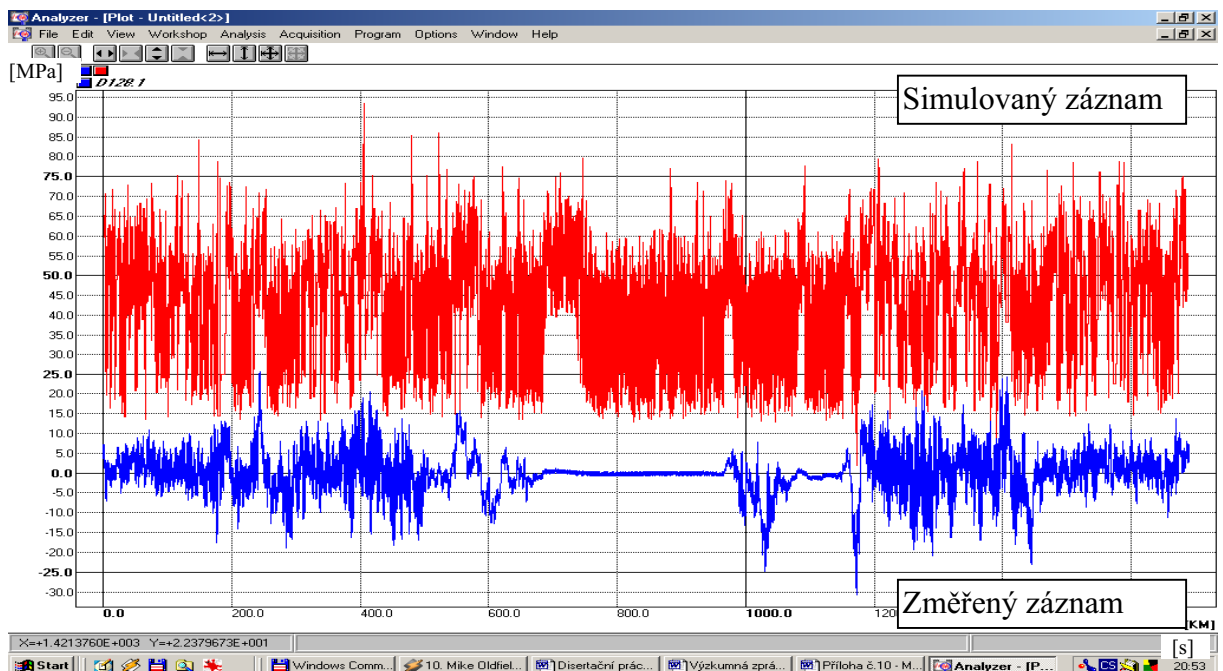
Při programování jsem se snažil využít postupů maximálně urychlujících výpočet (metoda Quicksort apod.). Do programu jsem doplnil některé interaktivní sekvence, které **umožňují sledovat** běh výpočtu. Výpočet umožňuje (pod operačním systémem Windows 2000) běh více aplikací. Do programu nebyla integrována nápověda a ochrana proti lidskému faktoru (chybný postup zadávání veličin, chybné zadání zdrojových dat, překlepy, apod.). K odstranění zmíněných nedostatků by bylo třeba více času na řešení. I přes uvedené nedostatky je však program plně funkční.

## 6. ANALÝZA A TESTY KVALITY

### 6.1. TESTY CITLIVOSTI SIMULOVANÉHO ZÁZNAMU NA KVALITU RF

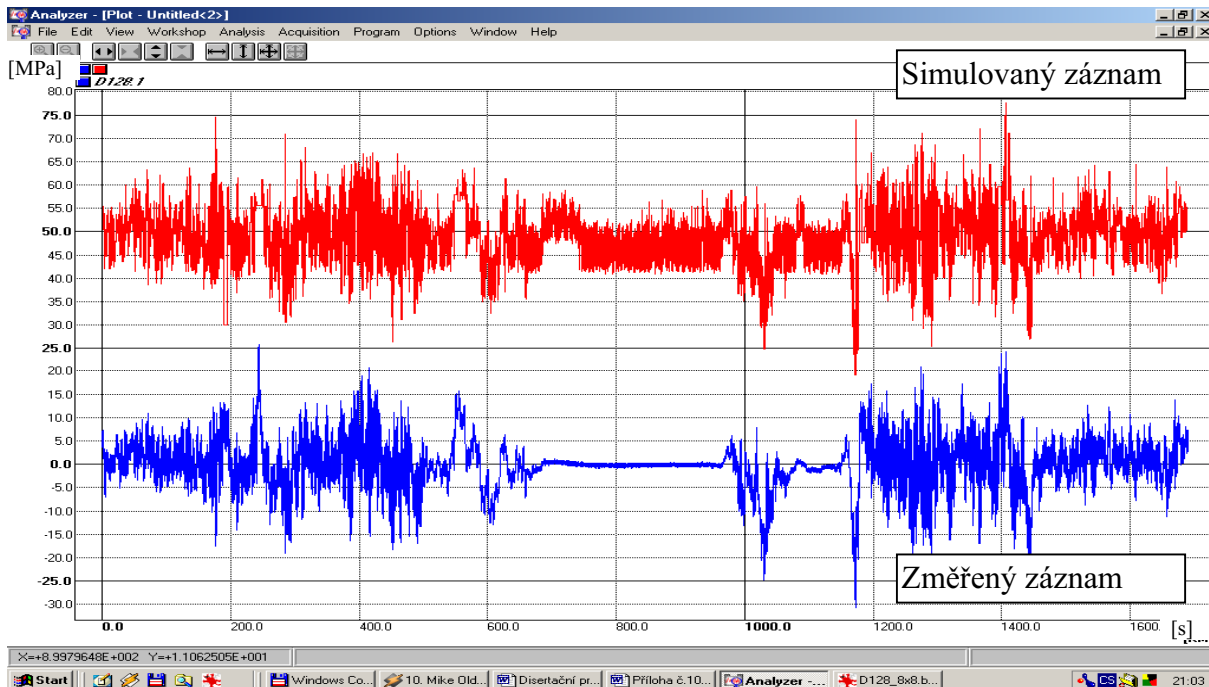
Simulovaný záznam je velmi citlivý na kvalitu provedení metody stékání deště. Metoda stékání deště závisí na vstupních parametrech (kapitola 5.4.2.6. a 5.4.2.12.). Dále je simulovaný záznam přímo závislý na způsobu generování nových matic, ze kterých je následně tvořen (kapitola 5.1.3.). Simulované záznamy jsou v následujících grafech pro větší přehlednost posunuty ve střední hodnotě o +50 MPa.

#### 6.1.1. Test citlivosti na rozměr matice RF

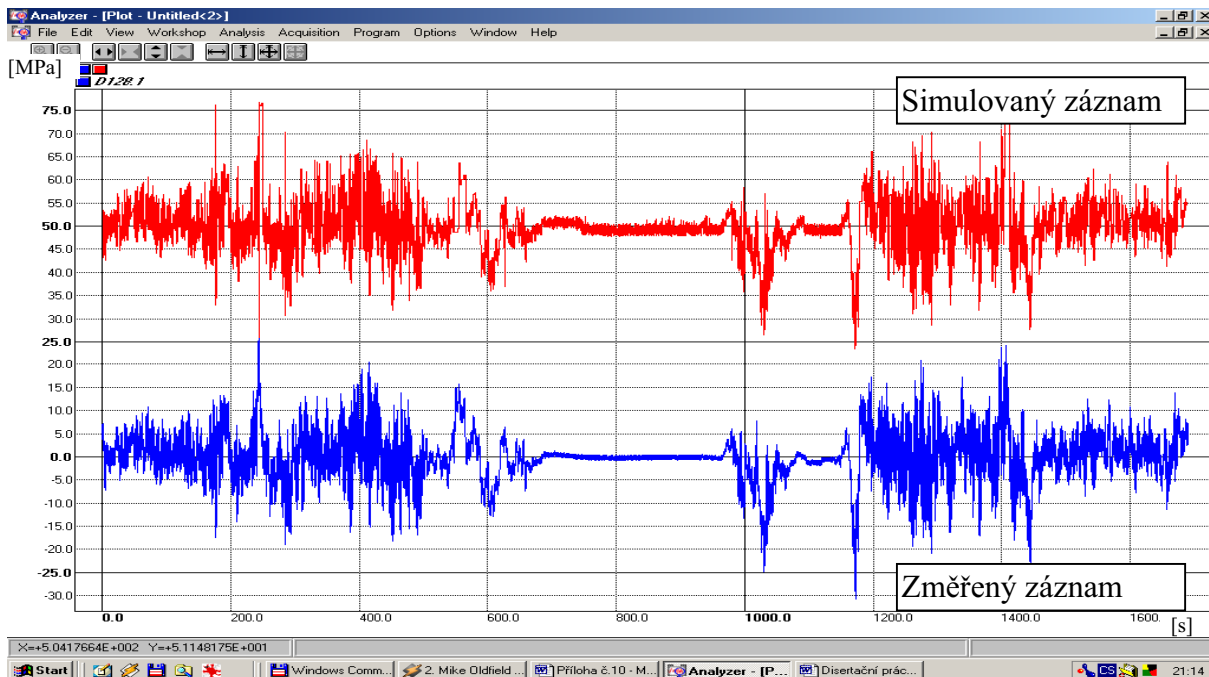


Obr.6.1. Rozměr matice RF 4x4

V průběhu testů se ukázalo, že simulace je tím **přesnější**, čím je rozměr matice vyšší. Důvodem je přesnější zařazení jednotlivých amplitud do intervalů (intervaly jsou „užší“). Negativním jevem vyššího rozměru je vyšší nárok na strojový čas výpočtu. Na obr.6.1., 6.2. a 6.3. je ukázka citlivosti simulovaného záznamu na rozměr matice RF. Podrobnější ukázky jsou součástí přílohy č. 10.



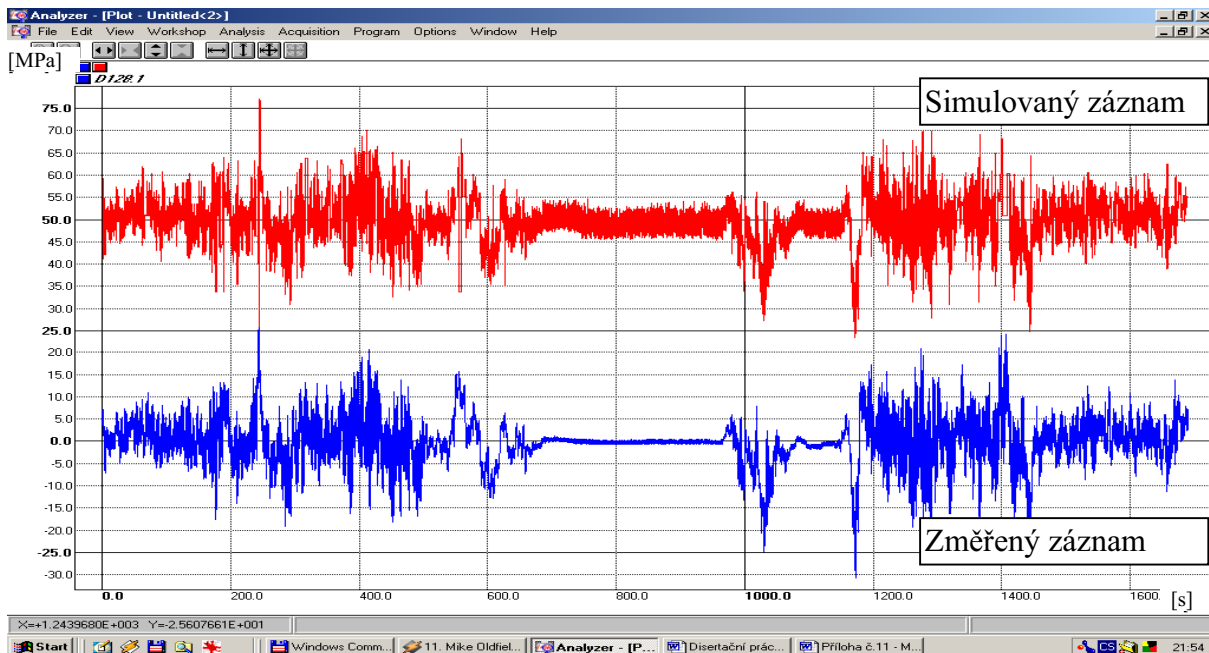
Obr.6.2. Rozměr matice RF 16x16



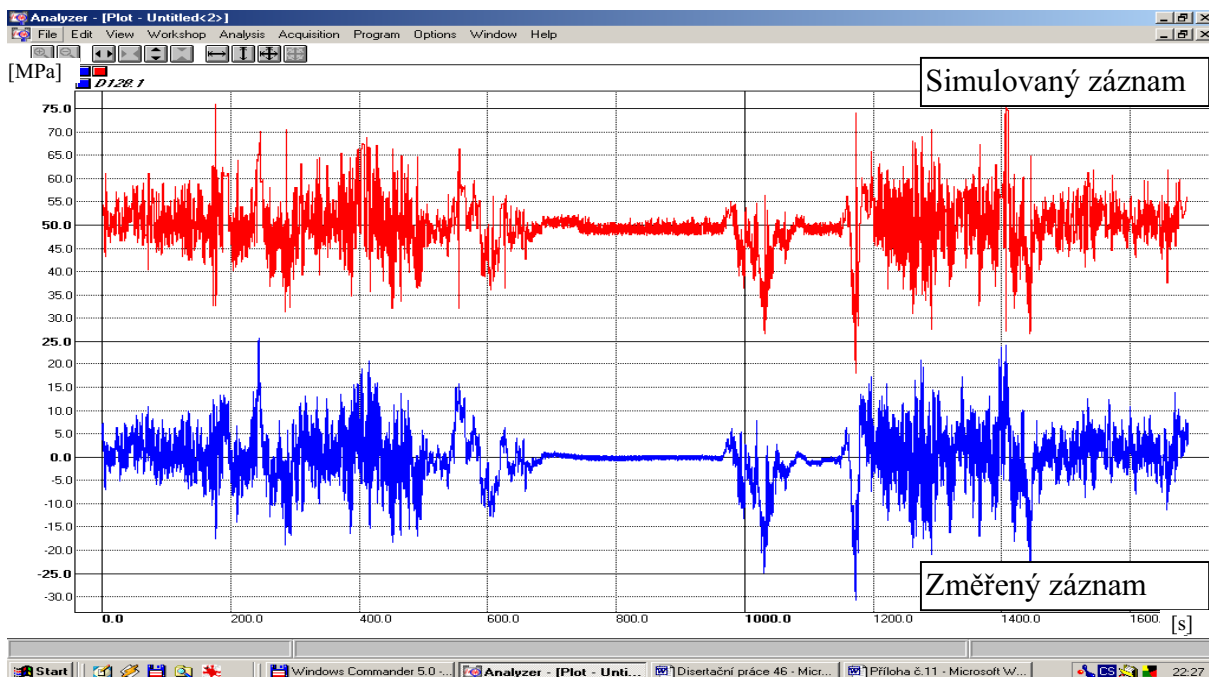
Obr.6.3. Rozměr matice RF 64x64

### 6.1.2. Test citlivosti na zadanou max. amplitudu

Zadaná max. amplituda vymezuje rozsah („cejch“) matice RF ve vodorovném směru. Z obr.6.4. a 6.5 je zřejmé, že simulace je tím přesnější čím je zadaná max. amplituda bližší skutečné max. amplitudě v záznamu. Zadané max. amplituda však **nesmí** být menší než max. amplituda v záznamu, v opačném případě matice RF nebude tuto nejvyšší amplitudu (amplitudy) obsahovat. Podrobnější zpracování testu citlivosti na zadanou max. amplitudu je součástí přílohy č. 11.



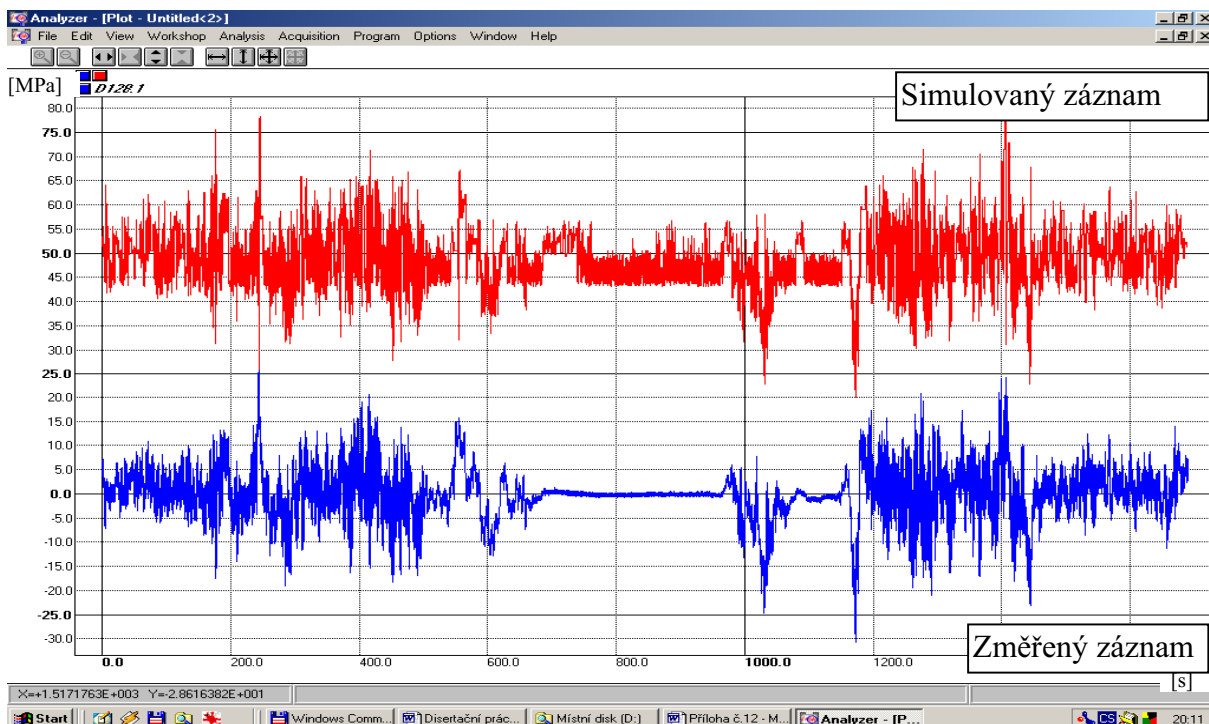
Obr.6.4. Zadaná max. amplituda 200 MPa



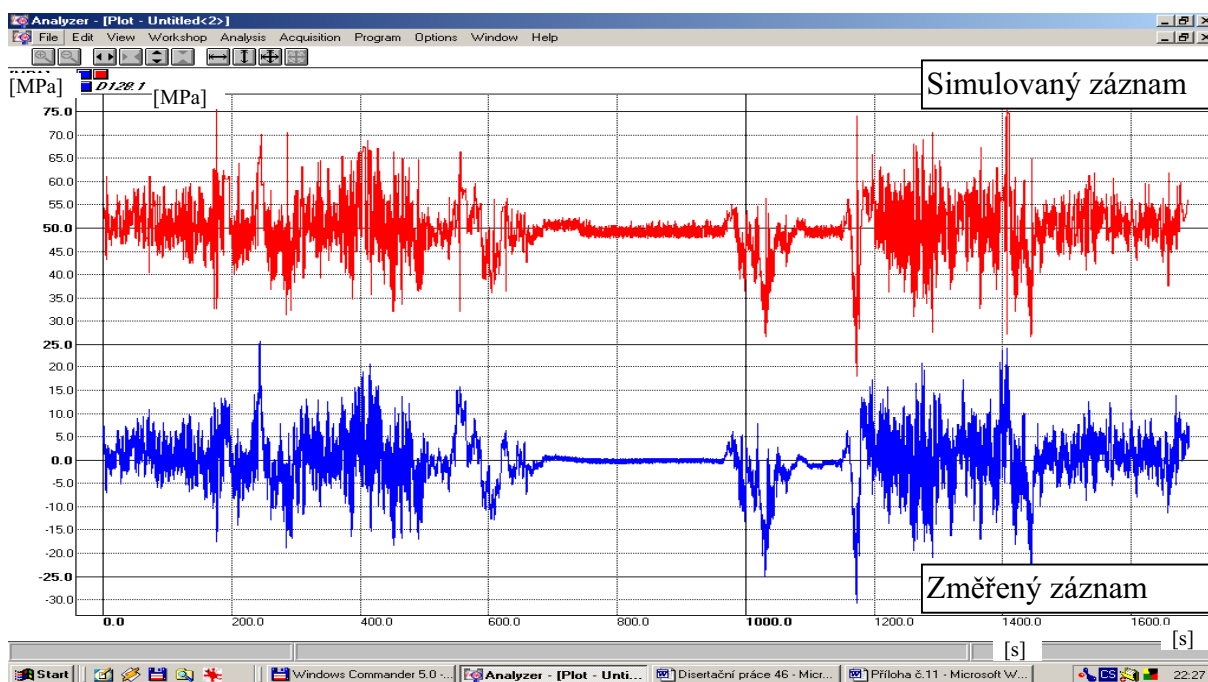
Obr.6.5. Zadaná max. amplituda 50 MPa

### 6.1.3. Test citlivosti na zadanou stř. hodnotu rozkmitu

Zadaná střední hodnota rozkmitu je vstupní parametr, který při simulaci záznamu stanovuje kvalitu zařazování vygenerovaných amplitud do tohoto záznamu. Na základě zadané stř. hodnoty se vypočítává intervalový rozsah buněk matice RF ve svislém směru. Citlivost simulovaného záznamu na zadanou stř. hodnotu je zobrazen na obr.6.6. a 6.7. Podrobnější zpracování tohoto testu je součástí přílohy č. 12.



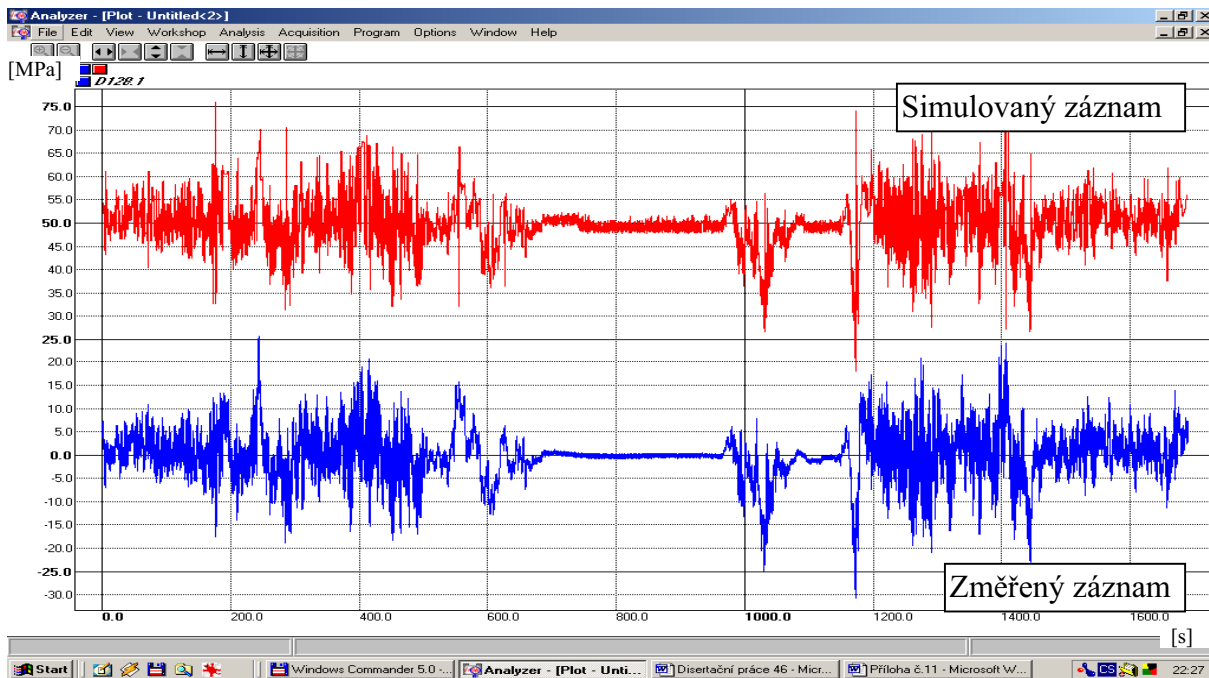
Obr.6.6. Zadaná max. stř. hodnota 200 MPa



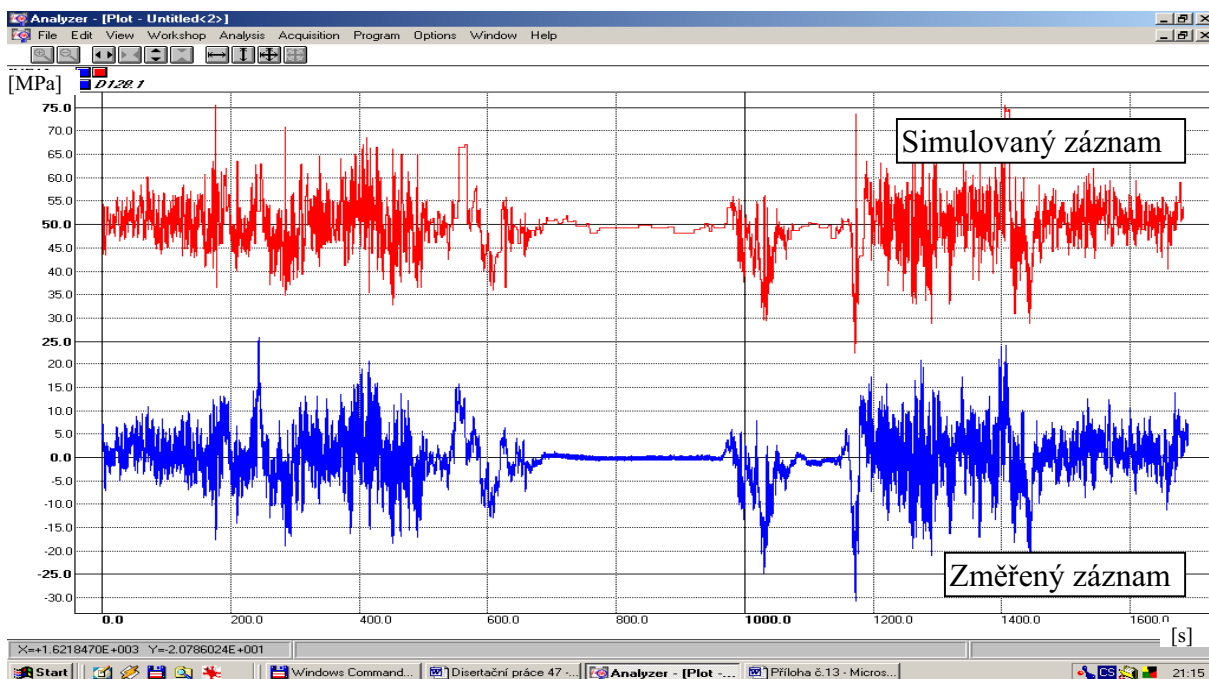
Obr.6.7. Zadaná max. stř. hodnota 50 MPa

### 6.1.4. Test citlivosti na zadanou amplitudovou citlivost matice

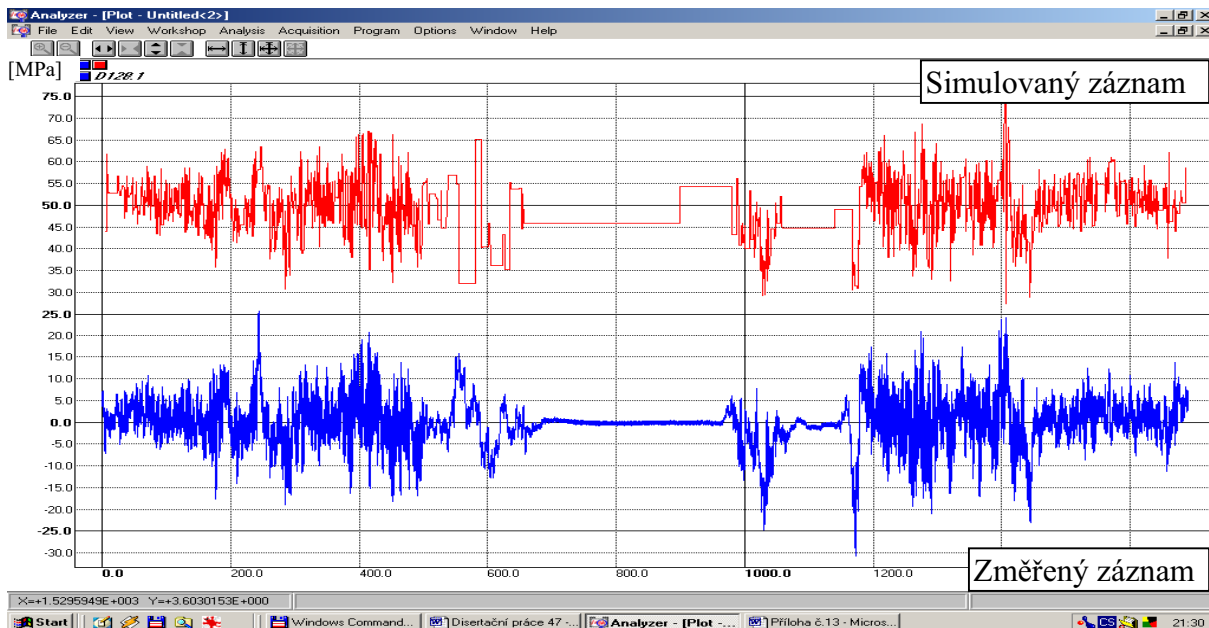
Jak již bylo řečeno (bod 5.4.2.6.), v některých případech se při měření může ve vzorovém záznamu objevit nežádoucí „šum“. Amplitudová citlivost jednoduchým způsobem umožňuje tento „šum“ odfiltrovat. **Citlivost simulovaného záznamu na tento filtr** je zobrazena na obr.6.8, 6.9 a 6.10. podrobněji je test citlivosti na zadanou amplitudovou citlivost zpracován v příloze č. 13.



Obr.6.8. Zadaná amplitudová citlivost 0,00 MPa



Obr.6.9. Zadaná amplitudová citlivost 0,50 MPa



Obr.6.10. Zadaná amplitudová citlivost 2,00 MPa

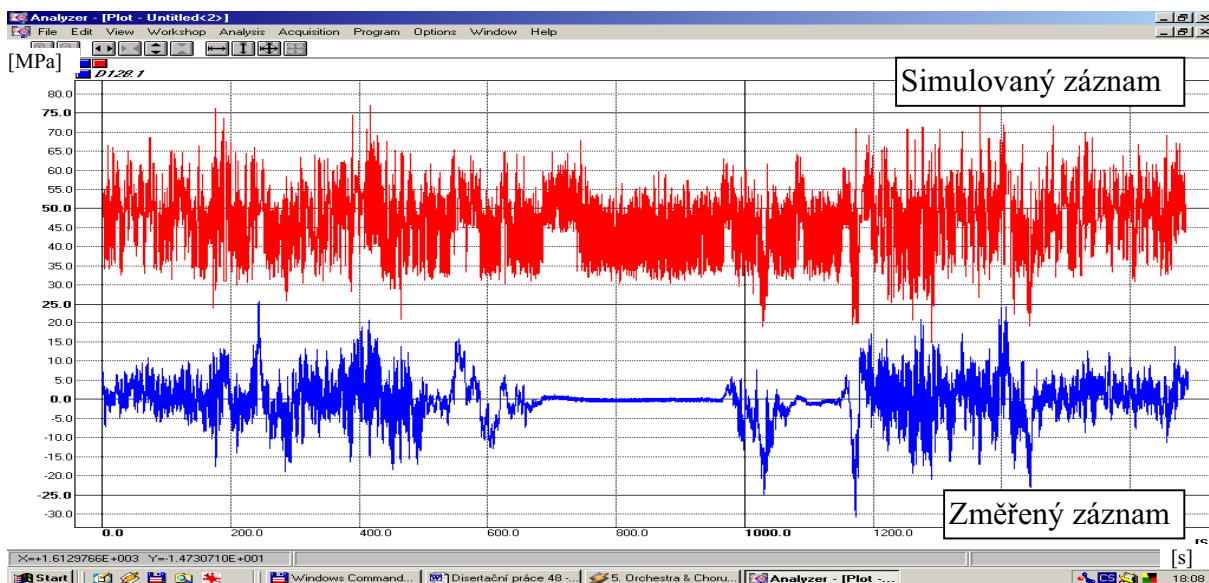
## 6.2. OVĚŘENÍ KVALITY (ANALÝZA) SIMULOVANÉHO ZÁZNAMU NAPĚTÍ

Kvalitu simulovaného záznamu ověřuji pomocí :

- porovnání **matic RF** změřeného a simulovaného záznamu,
- porovnáním **distribučních funkcí** změřeného a simulovaného záznamu.

### 6.2.1. Ověření kvality porovnáním matic RF

Vzhledem ke způsobu generování je simulovaný záznam velmi závislý na nastavení vstupních parametrů metody RF (kapitola 6.1). Vstupní parametry je třeba vyladit **před vlastním spuštěním** výpočtu odhadu životnosti. Ukázka chybného nastavení je uvedena na obr.6.11., 6.12. a 6.13. Korektní (správné) nastavení je uvedeno na obr. 6.14., 6.15. a 6.16.



Obr.6.11. Simulovaný záznam při chybném nastavení vstupních parametrů RF

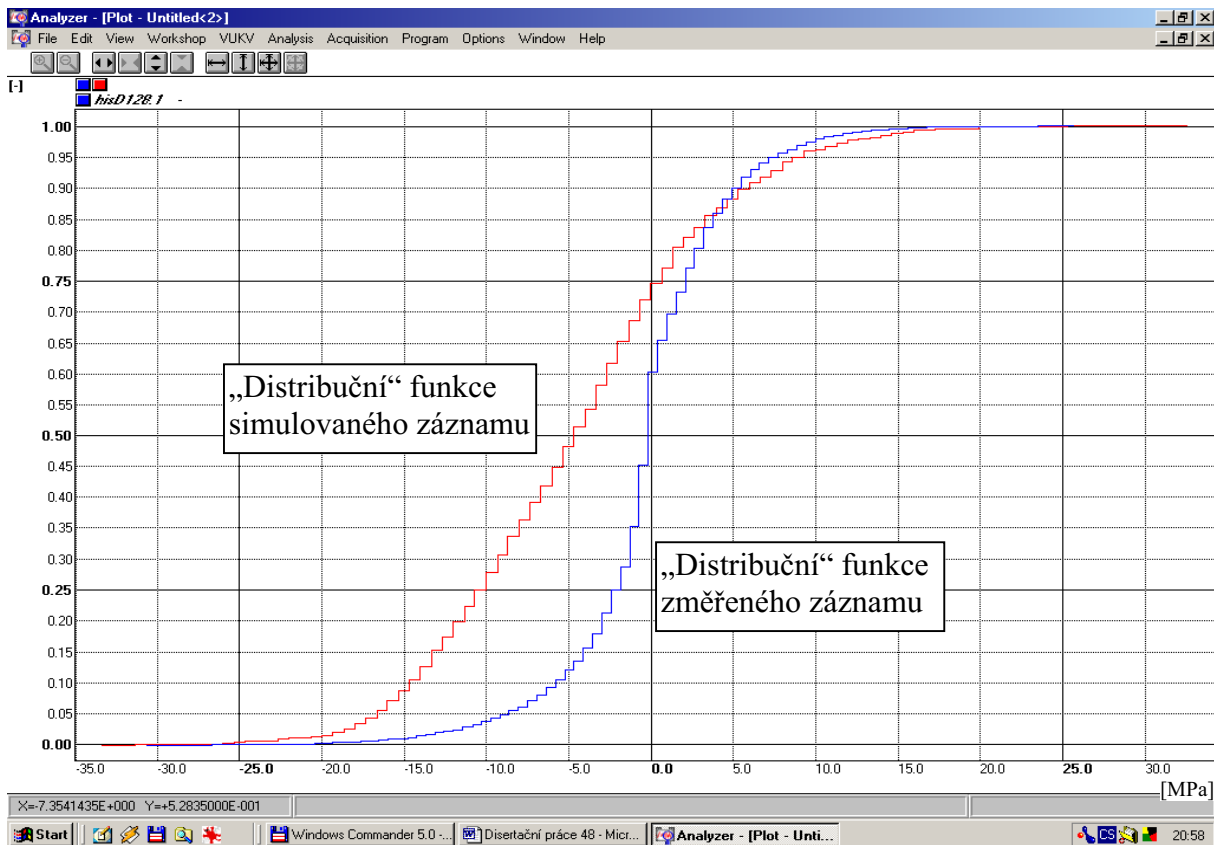




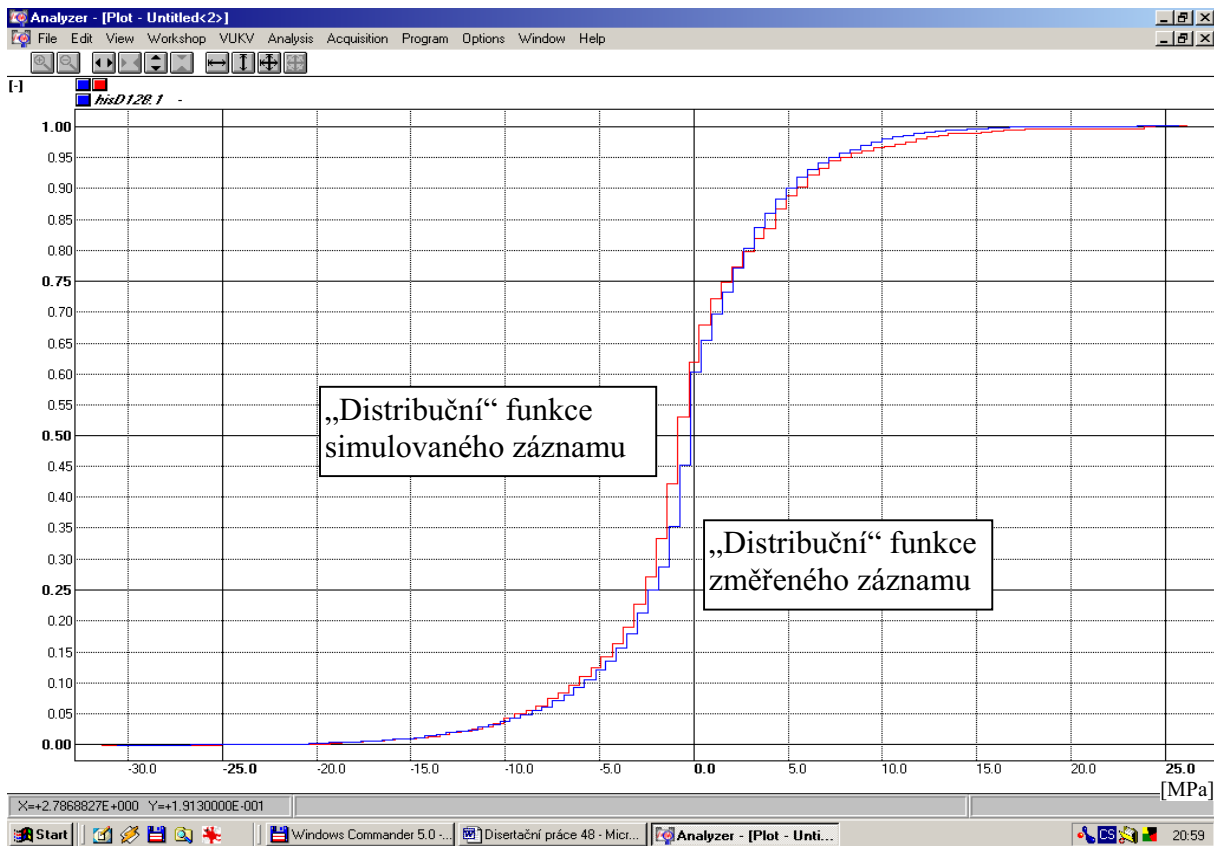








Obr.6.17. Porovnání distribučních funkcí chybné simulace záznamu a změřeného záznamu



Obr.6.18. Porovnání distribučních funkcí korektní simulace záznamu a změřeného záznamu

## 7. VÝPOČET ODHADU ŽIVOTNOSTI – VERIFIKACE ZPŮSOBU VÝPOČTU

Program „Plzen“ jsem použil pro stanovení odhadu životnosti dvou reálných konstrukcí. V rámci řešení grantů [60,64] jsem hodnotil životnost železničního ocelového mostu a v rámci příspěvku konference [68] jsem pomocí programu „Plzen“ hodnotil životnost podvozku železničního vozidla. V obou případech jsem výsledky odhadu životnosti stanovené pomocí programu „Plzen“ porovnával se **skutečnou životností**, respektive s odhady životností získanými klasickým způsobem výpočtu.

### 7.1. VÝPOČET ODHADU ŽIVOTNOSTI OCELOVÉHO MOSTU

Podkladem pro odhad životnosti bylo **tenzometrické měření** ocelového železničního mostu přes Labe, které jsem spolu se svými kolegy z katedry infrastruktury (DFJP Pardubice) uskutečnil v roce 1999. Popis měření je součástí přílohy č.2.

Únavová křivka byla získána pomocí **empirických vztahů**. Podrobný popis stanovení únavové křivky je uveden v [57].

Výpočet odhadu životnosti byl proveden z důvodu porovnání dvojím způsobem :

- klasicky (hypotézy Palmgren-Minerova, Corten-Dolonava, Novarova)
- pravděpodobnostně (program „Plzen“)

Na obr. 7.1 a 7.2 je zobrazena měřená konstrukce.

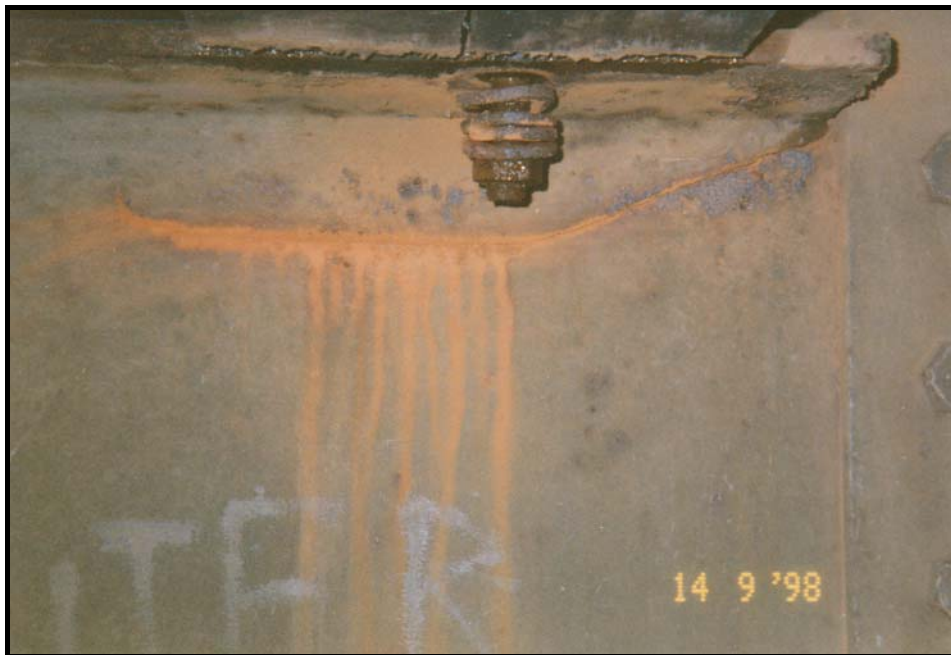


*Obr. 7.1. Mostní ocelová konstrukce (pohled č.1)*



Obr.7.2. Mostní ocelová konstrukce (pohled č.2)

Při kontrolní prohlídce mostu **byly zjištěny únavové trhliny** v místech připojení podélníků na příčník (obr. 7.3., 7.4.). Z tohoto důvodu jsem na „zdravý“ podélník (bez trhliny), do stejného místa, kde se u některých podélníků trhliny vyskytovaly (obr. 7.5.) umístil tenzometr T39K.

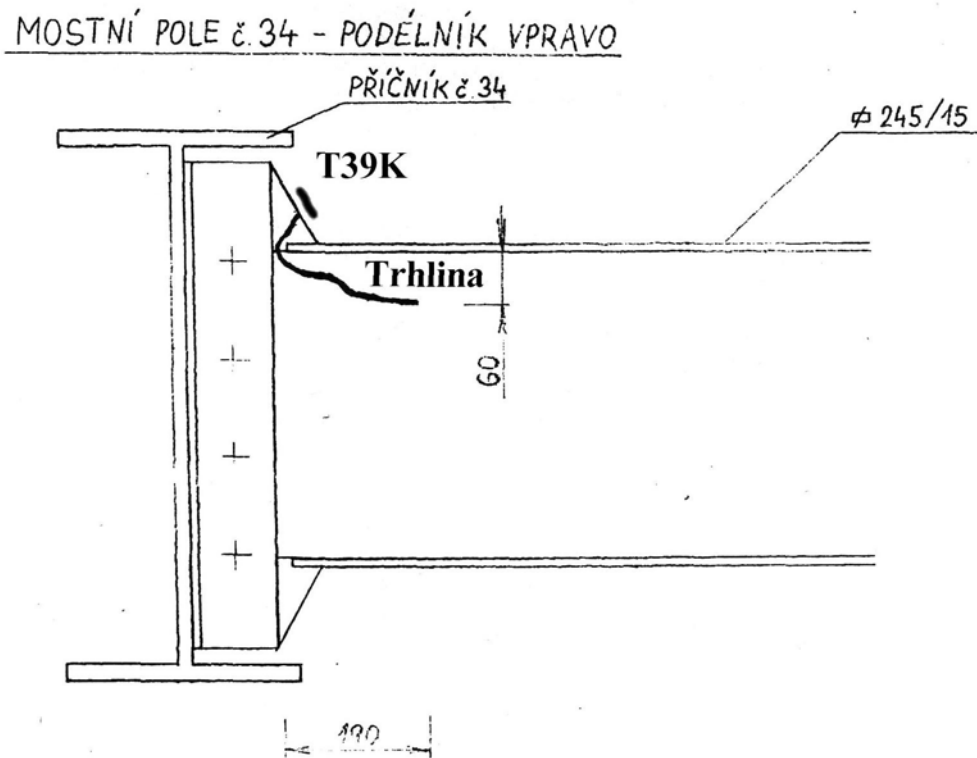


Obr.7.3. Únavová trhлина – pohled č.1.





Obr.7.4. Únavová trhlina – pohled č.2.



Obr.7.4. Umístění tenzometru T39K

### 7.1.1. Výpočet odhadu životnosti ocelového mostu „klasicky“

Podrobný popis odhadu životnosti ocelové mostní konstrukce přes Labe pomocí hypotéz Palmgren-Minerova, Corten-Dolanovy, Novarovy je uveden v [57]. Hodnoty únavové křivky a meze únavy pro místo měření T39K dle [57] jsou :

$$\begin{aligned} m &= 3 \text{ (sklon křivky)} \\ \log a &= 11,44758 \text{ (konstanta křivky)} \\ \sigma_C &= 52 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Pro výpočet odhadu životnosti „klasickým“ způsobem jsem použil **software ZIVOT2**, který jsem vytvořil ve spolupráci s Prof. Ing Bohumilem Culkem, CSc. v letech 1996 – 1998. Výstupem tohoto programu je 3D graf s hodnotami dílčího poškození a odhadu životnosti (obr.7.5., 7.6.).

**Výsledky odhadů životnosti** dle daných hypotéz jsou :

- Palmgren-Miner : 1169 let (mimo realitu)
- Corten-Dolanova : 19 let
- Novarova : 43 988 let (mimo realitu)

V případě výpočtu podle Palmgren-Minera byla použita modifikovaná hypotéza (dle normy ČSN 731401), která připouští poškozující účinek amplitud napětí pod mezí únavy. Tento účinek zohledňuje užitím tri-lineární únavové křivky (obr.7.7.), kde parametry jednotlivých částí křivky jsou následující:

1. část :

$$\begin{aligned} m &= 3 \text{ (sklon křivky)} \\ \log a &= 11,44758 \text{ (konstanta křivky)} \\ \sigma_D &= 38 \text{ MPa} \end{aligned}$$

2. část :

$$\begin{aligned} m &= 5 \text{ (sklon křivky)} \\ \log a &= 11,44758 \text{ (konstanta křivky)} \\ \sigma_L &= 14 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. část :

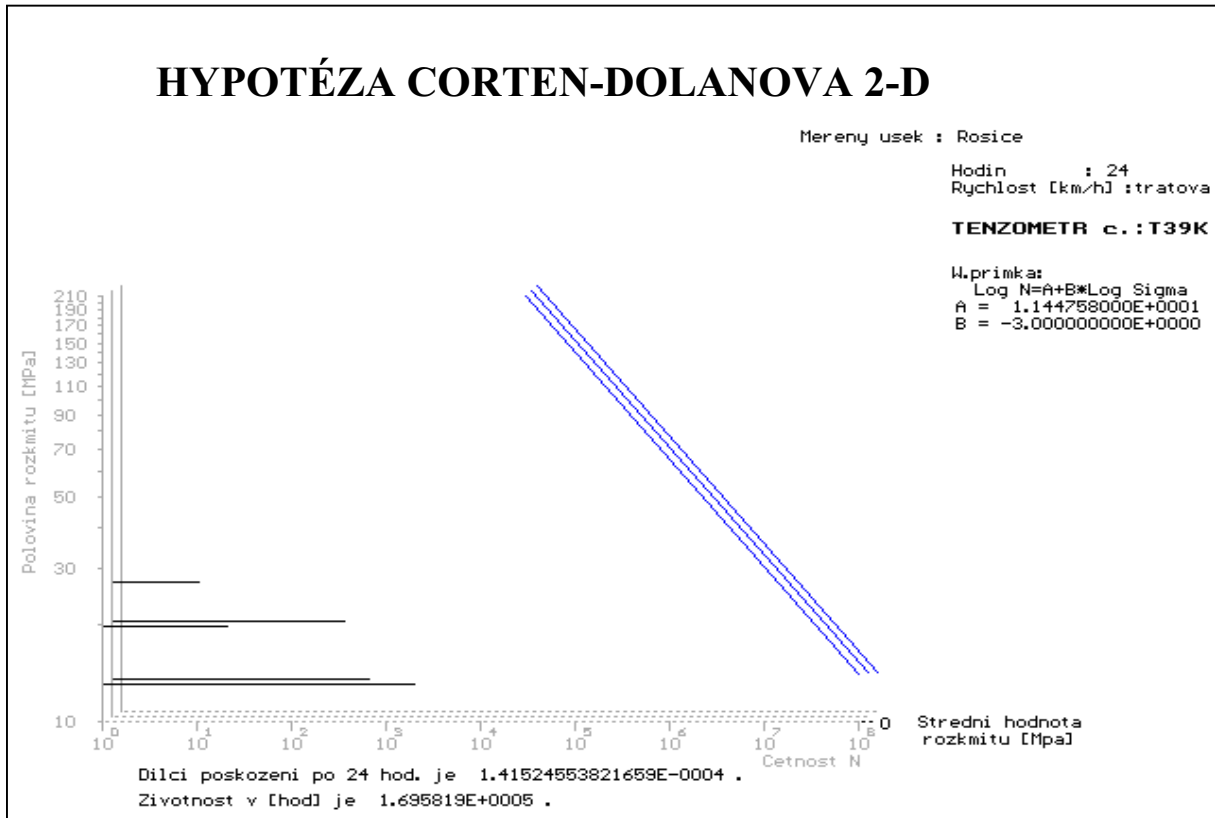
$$\text{konstanta } \sigma_L = 14 \text{ MPa}$$

kde  $\sigma_D$  je mez únavy při konstantní amplitudě  
 $\sigma_L$  je amplituda prahového rozkmitu napětí

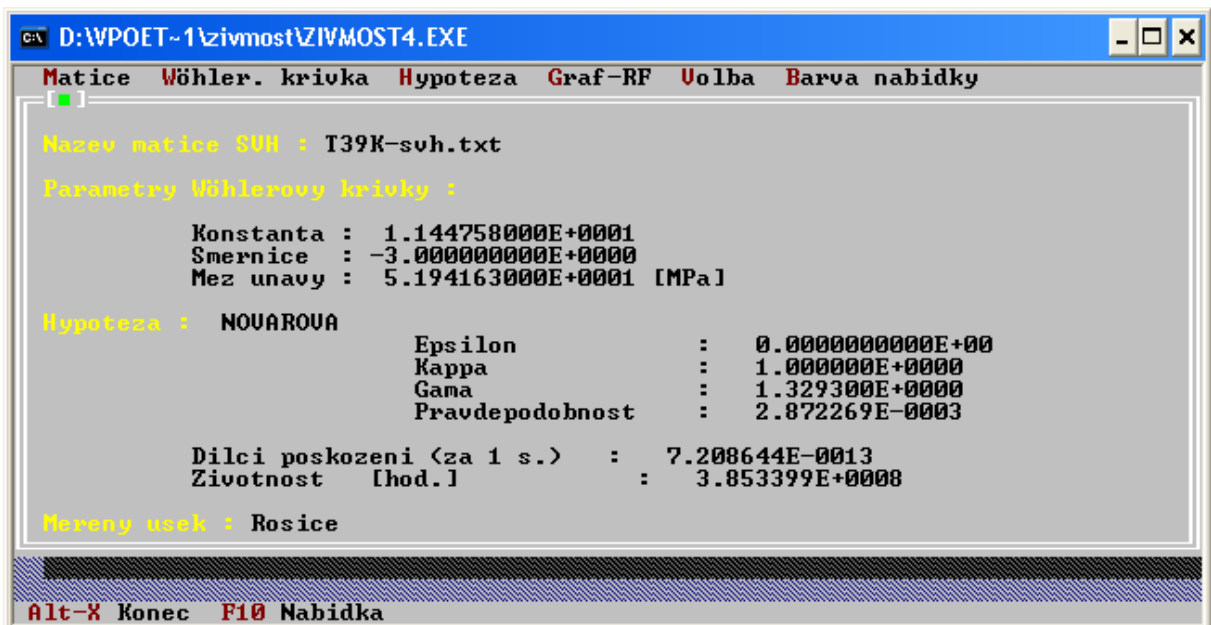
Odhad životnosti dle modifikované Palmgren-Minerovy hypotézy je tak vysoký (1169 let), protože celé spektrum napětí je pod mezí únavy při konstantní amplitudě  $\sigma_D$  (viz obr.7.7.), kde je poškozující účinek spektra napětí díky upravenému sklonu křivky menší (sklon křivky je 5) a významná část spektra je dokonce pod prahovým rozkmitem napětí  $\sigma_L$ , kde se poškozující účinek nezohledňuje vůbec.

Hypotéza Novarova vychází z frekvenční analýzy (spektrální výkonová hustota), která není vhodná pro tento typ konstrukce.

Hypotéza Corten-Dolanova (CD) potvrdila kritické místo konstrukce z hlediska životnosti. Pro výpočet dle hypotézy CD byl použit redukční koeficient  $k=1$  a lineární únavová křivka (křivka c, viz obr.7.7.). Hypotéza CD v tomto tvaru je v souladu s výše zmíněnou normou.

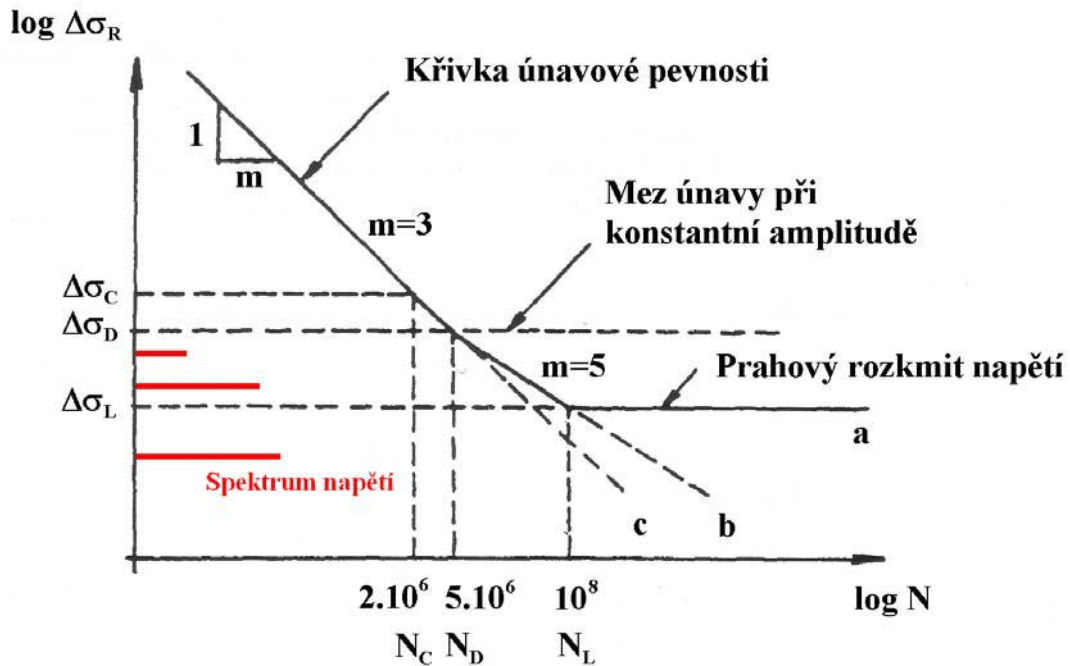


Obr.7.5. „Klasický“ odhad životnosti v místě tenzometru T39K dle Corten-Dolana



Obr.7.6. „Klasický“ odhad životnosti v místě tenzometru T39K dle Novarova





Obr.7.7.

### 7.1.2. Výpočet odhadu životnosti ocelového mostu „pravděpodobnostně“ (program „Plzen“)

Vstupní data, tzn. experimentálně naměřené údaje a empiricky daná únavová křivka, jsou shodné s daty uvedenými v kapitole 7.1.1. této práce. Odhad životnosti jsem provedl pro **kritické místo** z hlediska životnosti T39K.

Výpočet pomocí pravděpodobnostního přístupu lze rozdělit do fází :

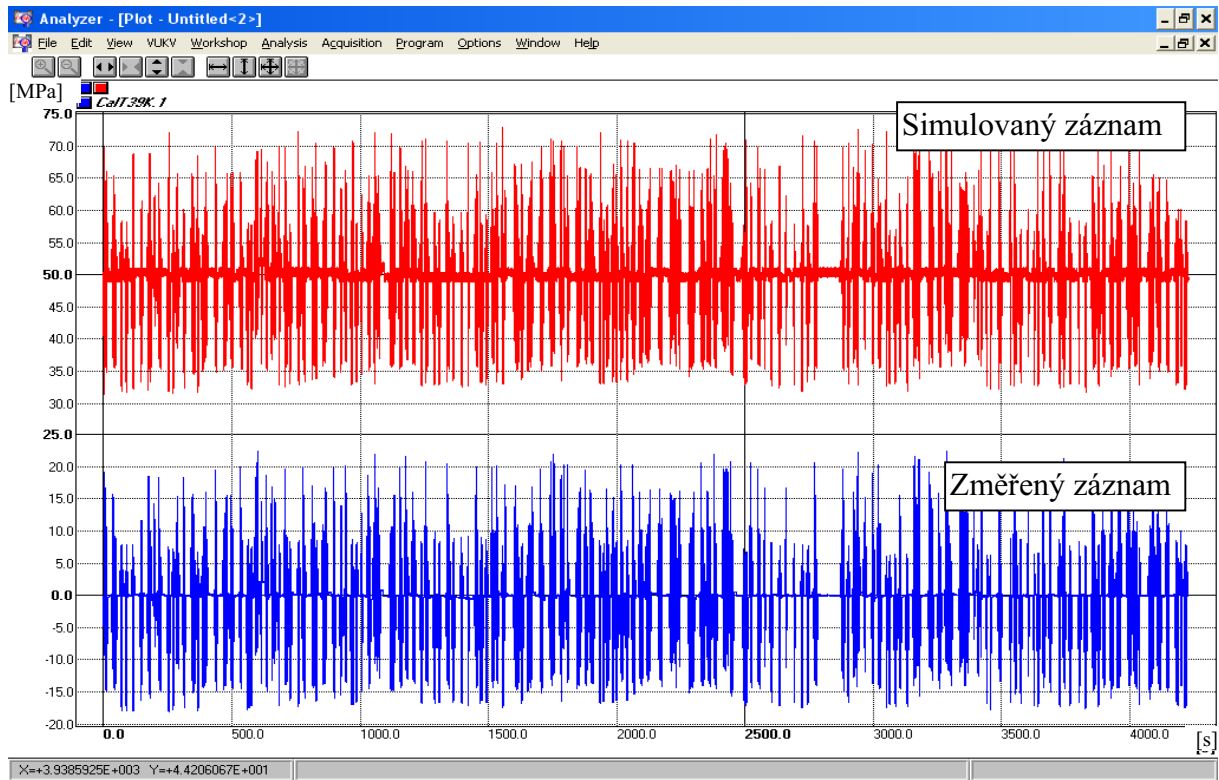
- 1) nalezení optimálních parametrů pro simulaci napětí,
- 2) vlastní výpočet odhadu životnosti.

#### 1) Nalezení optimálních parametrů

Pro odhad životnosti pomocí metodiky uvedené v této disertační práci je nejdůležitější **kvalita simulovaného záznamu**. Testy citlivosti na jednotlivé vstupní parametry jsou uvedeny v kapitole 6. této práce. Postupným laděním jsem pro místo tenzometru T39K zjistil tyto vstupní parametry RF :

Amplitudová citlivost matice	:	0,02
Počet sloupců (intervalů amplitud)	:	64
Počet řádků (intervalů stř. hodnot)	:	64
Maximální amplituda [MPa]	:	25
Maximální střední hodnota [MPa]	:	25

Na obr.7.8. je uvedena ukázka simulovaného a změřeného záznamu, na obr.7.9. porovnání „distribučních“ funkcí, na obr.7.10. a 7.11. matice RF změřeného a simulovaného záznamu



Obr. 7.8. Simulovaný a změřený záznam napětí v místě T39K

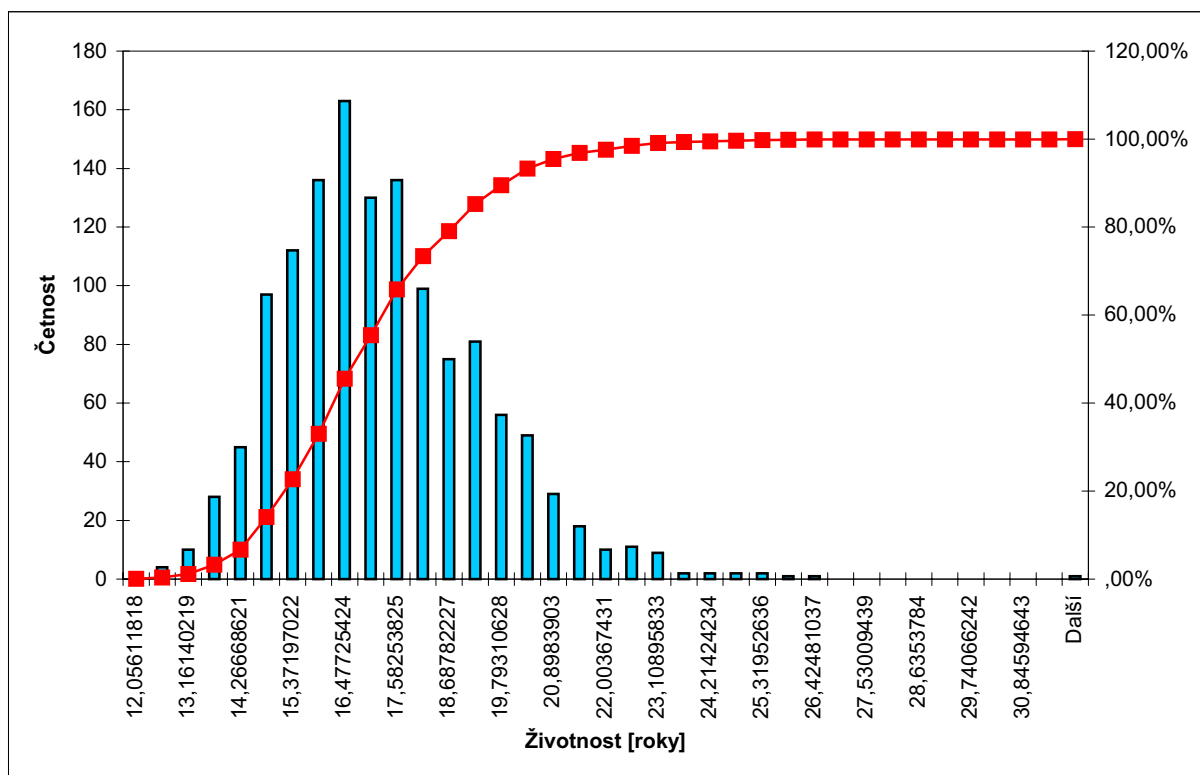
## 2) výpočet odhadu životnosti

Při výpočtu pomocí programu „Plzen“ jsem použil následující **vstupní parametry** :

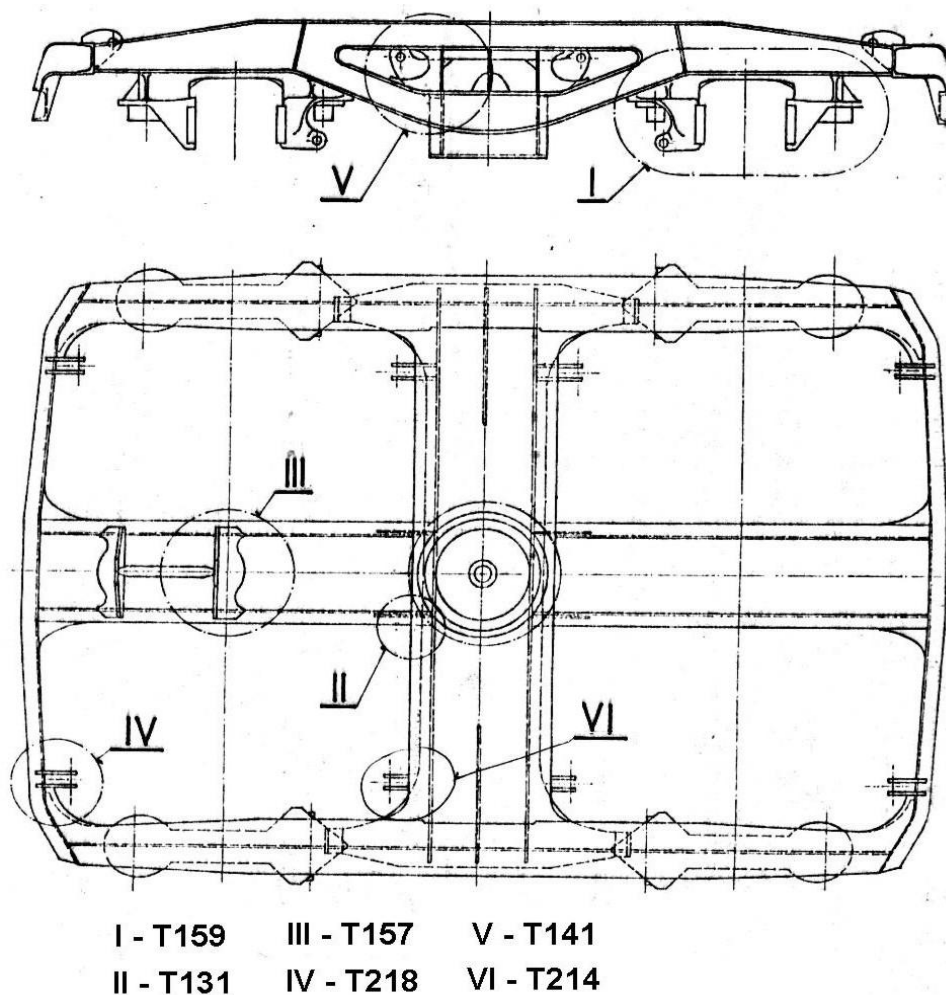
- Zadání RF pro zdrojový soubor
  - Amplitudová citlivost matice : 0,02
  - Počet sloupců (intervalů amplitud) : 64
  - Počet řádků (intervalů stř. hodnot) : 64
  - Maximální amplituda [MPa] : 25
  - Maximální střední hodnota [MPa] : 25
- Zadání RF pro generovaný záznam
  - Amplitudová citlivost matice : 0,00
  - Počet sloupců (intervalů amplitud) : 32
  - Počet řádků (intervalů stř. hodnot) : 32
  - Maximální amplituda [MPa] : 25
  - Maximální střední hodnota [MPa] : 25
- Zadání součinitele sbíhavosti : 0,80
- Zadání meze únavy [MPa] : 52
- Délka zdrojového záznamu v odpovídajících jednotkách : 24 hod.
- Výpočet zastavit při poškození : 0,01
- Požadované celkové poškození : 1,0
- Interval snímání : 0,02 s
- Významový koeficient nebyl zadán











Obr.7.15. Schéma umístění tenzometrů na rámu podvozku Y-25

### 7.2.1. Výpočet odhadu životnosti rámu podvozku Y-25 „klasicky“

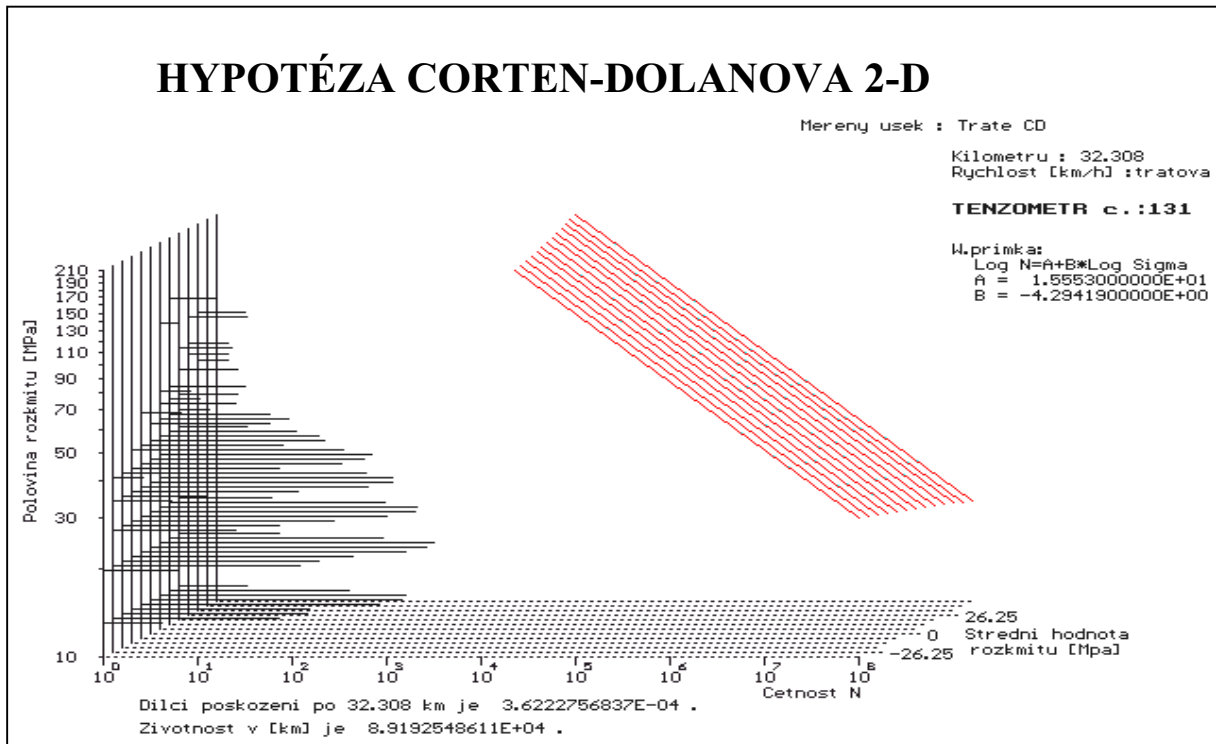
Hodnoty únavové křivky a meze únavy pro místo měření T131 byly **stanoveny experimentálně** a jejich hodnoty dle [11] jsou :

$$\begin{aligned} m &= 4,294 \text{ (sklon křivky)} \\ \log a &= 14,12 \text{ (konstanta křivky)} \\ \sigma_c &= 66 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Pro výpočet odhadu životnosti „klasickým“ způsobem jsem použil **software ZIVOT2**. Výstup programu je zobrazen na obr. 7.14. Výsledkem odhadu životnosti dle použité hypotézy je počet najetých km do vzniku trhliny:

$$- \text{Corten-Dolanova : } 89193 \text{ km}$$

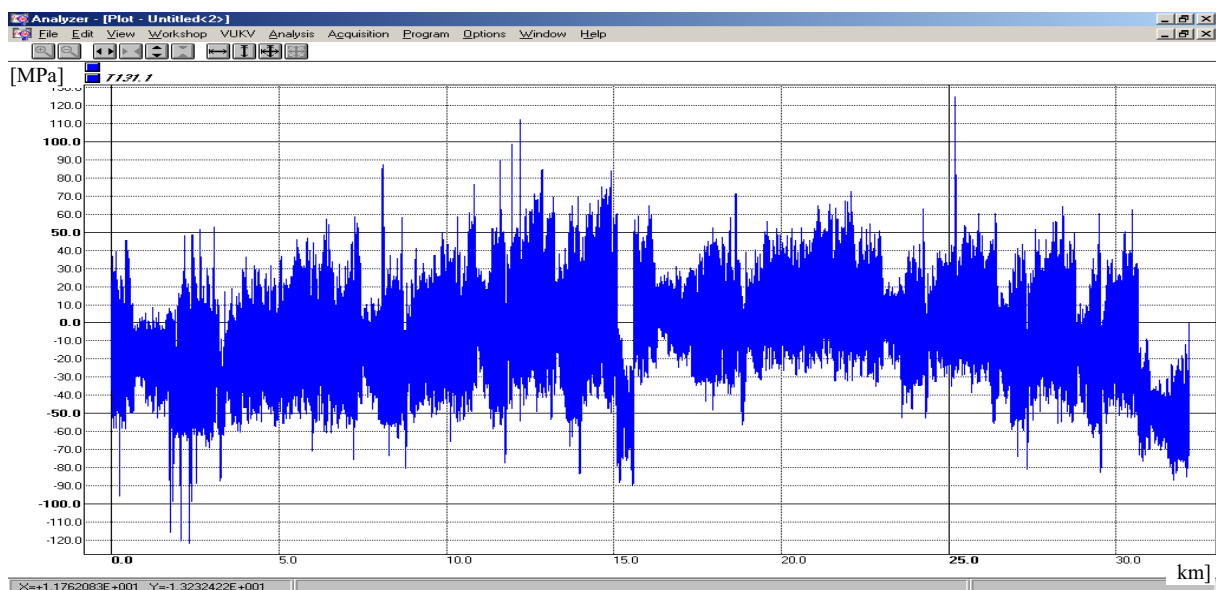
Odhad životnosti **odpovídá 50 %** pravděpodobnosti poruchy. Výpočet zohledňuje vliv střední hodnoty (transformace únavové křivky pro danou střední hodnotu pomocí Smithova diagramu).



Obr.7.16. Odhad životnosti rámu podvozku Y-25 v místě T131 pomocí „klasického“ přístupu

### 7.2.2. Výpočet odhadu životnosti rámu podvozku Y-25 „pravděpodobnostně“ (program „Plzen“)

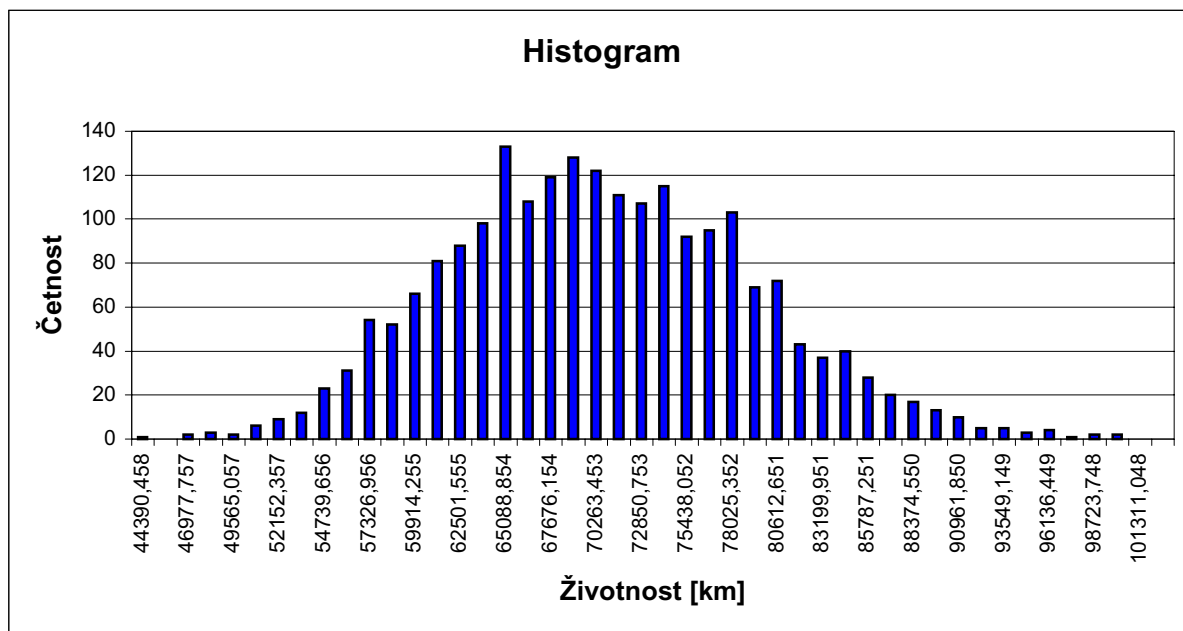
Vstupní data, tzn. experimentálně naměřené údaje a experimentálně daná únavová křivka, jsou shodné s daty uvedenými v bodě 7.2.1. Odhad životnosti jsem provedl pro kritické místo z hlediska životnosti T131. Experimentální záznam napětí pro místo T131 je zobrazen na obr.7.17.



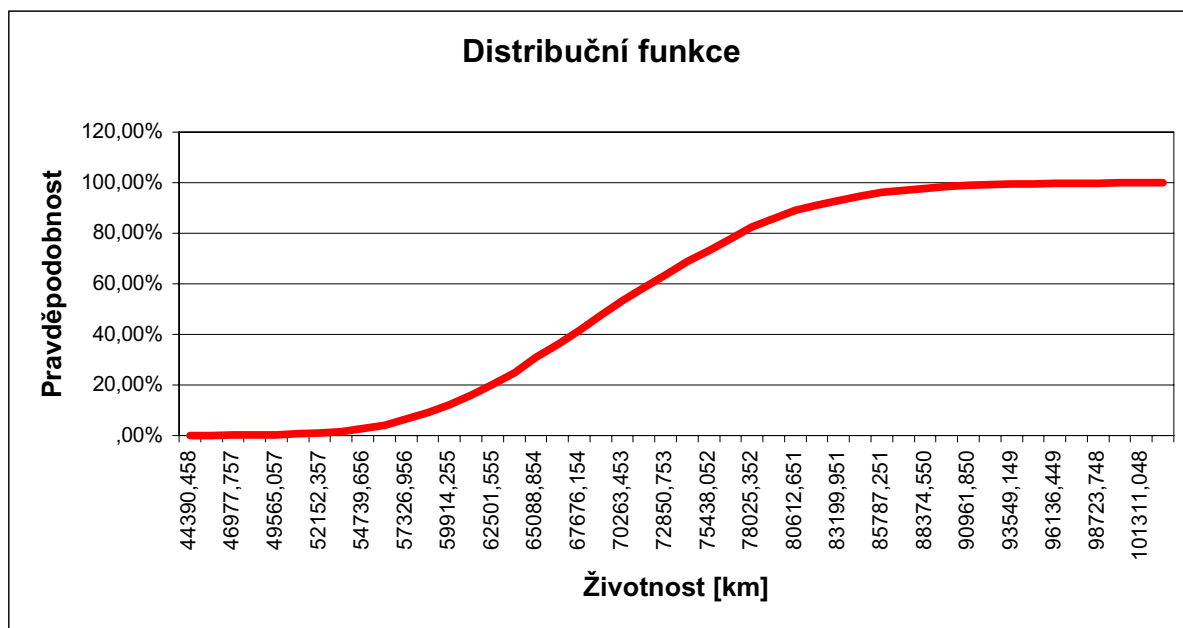
Obr.7.17. Experimentální záznam napětí pro místo T131



Postup odhadu životnosti rámu podvozku Y25 je shodný s postupem odhadu mostní ocelové konstrukce (kapitola 7.1.). Výsledkem je hustota pravděpodobnosti odhadů životnosti (obr.7.18.) a distribuční funkce odhadů životnosti (obr.7.19.), na jejímž základě mohou stanovit odhad životnosti konstrukce pro **libovolnou pravděpodobnost poruchy**.



Obr.7.18. Hustota pravděpodobnosti odhadů životnosti pro místo T131



Obr.7.19. Distribuční funkce odhadů životnosti pro místo T131

Odhad životnosti pro 50 % pravděpodobnost poruchy, který je porovnatelný s „klasickým“ odhadem, činí při použití Corten – Dolanovy hypotézy 69 507 km.

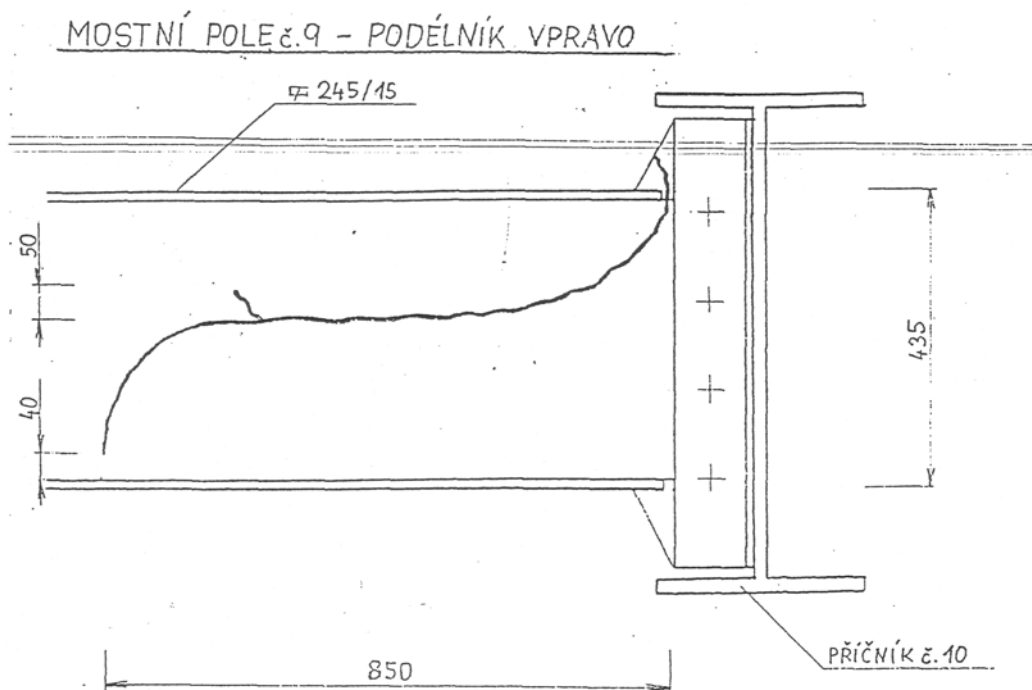
Výsledná hodnota odhadu životnosti se od výpočtu pomocí „klasického“ přístupu liší o 19 686 km.

### 7.3. ROZBOR VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ ŽIVOTNOSTI DOSAŽENÝCH PROGRAMEM „PLZEN“

Rozbor byl proveden na základě porovnání vypočítaných hodnot životnosti s reálnými životnostmi mostní ocelové konstrukce a rámu podvozku v jejich kritických místech. Rozbor výsledků na základě porovnání s odhady životností docílenými klasickými postupy (viz. body 7.1.1 a 7.2.1) není aktuální vzhledem k existenci zjištěných reálných životností obou konstrukcí.

#### 1) Mostní konstrukce

V případě mostní konstrukce byla životnost v některých kritických místech již **vyčerpána** (T39K). Trhliny dosahovaly délek od 20 cm do 120 cm. Nejdelší trhlina (obr.7.20.) narušila stěnu podélníku v celé její výšce a „zastavila“ se na spodní pásnici podélníku. Při průjezdu osobního vlaku (motorové vozy ř. 810 – velmi nízké zatížení) docházelo k rozevření trhliny o cca 10 mm. Stanovení rychlosti šíření a na jejím základě určení přibližné doby vzniku trhliny je možné na základě aplikace lomové mechaniky [35].



Obr.7.20. Trhlina na mostní konstrukci

Za předpokladu, že stáří trhliny nebude vyšší než cca 10 let, je reálná životnost mostní ocelové konstrukce přes Labe do vzniku trhliny **cca 32 let**. Výpočet odhadu životnosti vycházel z reálných záznamů napětí získaných během 24 hodinového měření. Během měření byl na mostní konstrukci běžný provoz. Den měření byl zvolen tak, aby zatížení bylo reprezentativní z hlediska roku 1999.

Výpočtem (kapitola 7.1.) byla odhadnuta životnost v rozmezí 12 až 27 let. Padesátiprocentní pravděpodobnosti poruchy odpovídá odhad životnosti 16 let. Uvedená hodnota je **přibližně poloviční** než skutečná životnost konstrukce.

Důvody nepřesného odhadů lze hledat v těchto bodech:

- 1) empiricky stanovená únavová křivka,
- 2) nebyla uvažována změna dopravního zatížení v průběhu let.

Únavová křivka byla stanovena na základě **empirických vztahů**, pro výpočet byla zadána souřadnicově. Způsob zadání nepřipouštěl variace únavové křivky pro každý cyklus výpočtu (sklon a konstanta křivky byly neměnné). Pro přesnější výpočet je požadavek experimentálně stanovené únavové křivky nezbytný.

Nejdůležitější z hlediska životnosti mostní konstrukce je její **provozní zatížení**, toto zatížení se u českých drah mění s grafikonem vlakové dopravy (1x ročně). V záznamu se změna projeví změnou četností amplitud ve spektru napětí. Program „Plzen“ v současné podobě tento problém neřeší, je zde pouze připravena platforma pro zahrnutí změny zatížení za předpokladu, že se bude měnit pouze četnost vlaků a nebude docházet k zásadní změně v hmotnostech na nápravu.

Výpočet odhadu životnosti mostní ocelové konstrukce ukázal, že použitý výpočetní systém je velmi citlivý na **kvalitu vstupních údajů**. Při nedostatečně stanovené únavové křivce, nestanovených významových koeficientech a nezahrnutí změny provozního zatížení v průběhu let je pravděpodobnostní výpočet pouze přibližný (informativní), vzhledem k časové náročnosti aplikace pravděpodobnostního přístupu doporučuji v tomto případě použít z tohoto hlediska nenáročný výpočet „klasický“.

## 2) Rám podvozku Y25

Výpočet odhadu životnosti byl proveden pro záznam napětí v místě T131. Skutečná (reálná) životnost, zjištěná při **dlouhodobých provozních zkouškách** podvozku při jízdách na Malém železničním zkušebním okruhu (MŽZO), při kterých byl zaznamenán vznik trhlin v tomto místě rámu u 50 % vzorků, je 65 000 km [11]. Ukázka trhliny je zobrazena na obr.7.19.

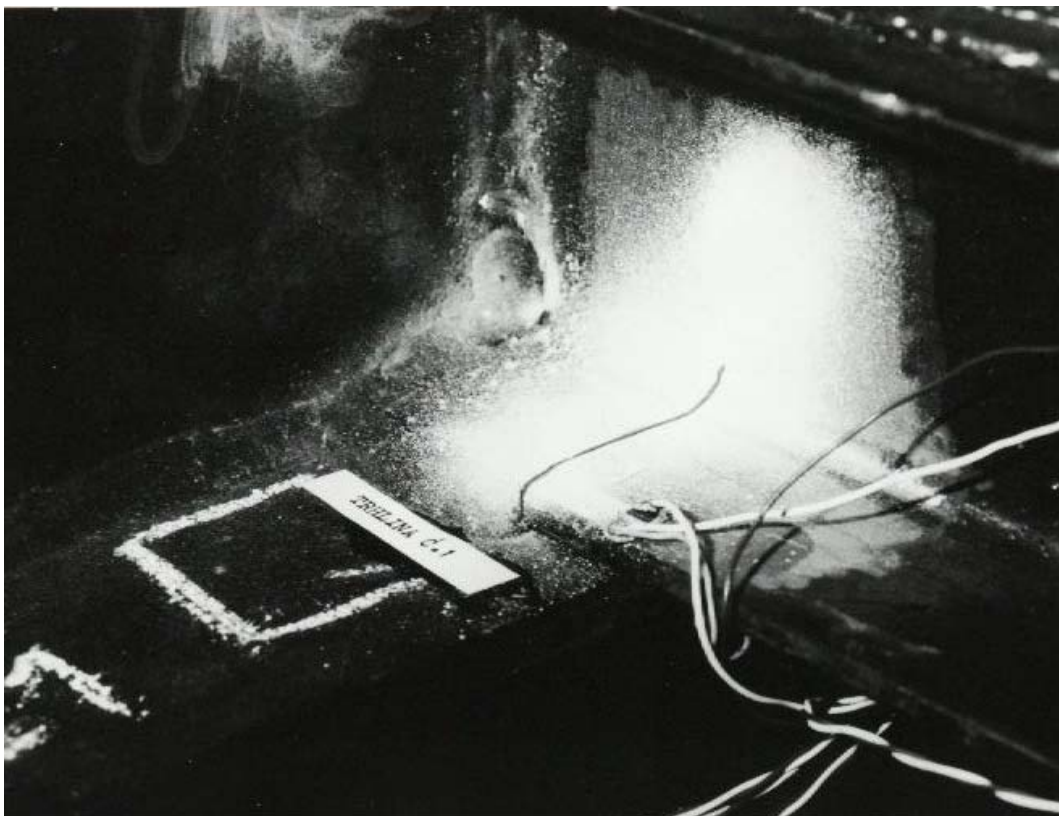
Výpočtem (kapitola 7.2.) byla odhadnuta životnost v rozmezí 44 000 až 101 000 km. Padesátiprocentní pravděpodobnosti poruchy odpovídá odhad životnosti 69 500 km. Uvedená hodnota **odpovídá reálné životnosti**. Odchylka cca 4500 km je způsobena tím, že do výpočtu nebyl zahrnut vliv provozního brzdění.

Odhad životnosti rámu podvozku závisí na záznamu napětí a únavové křivce. Na rozdíl od mostní konstrukce se ve výpočtu vliv ostatních druhů zatížení (např. vliv teploty) projeví v zanedbatelné míře.

Výpočet odhadu životnosti byl proveden na základě **experimentálních měření** podvozku při jízdách na MŽZO. Volba režimů jízdy byla taková, aby odpovídala skutečnému zatížení v provozu.

Únavová křivka byla zjištěna **experimentální cestou**. Její hodnoty však nejsou zadány formou několika souřadnic, ale funkcionálně [11]. K únavové křivce chyběly pravděpodobnostní charakteristiky (konfidenční interval, rozptyl, atd.). Z tohoto důvodu výpočet neumožňoval variace únavové křivky pro výpočtové cykly. Tato nepřesnost se zřejmě projevila v odchylce výsledků odhadu oproti reálné životnosti (cca 4000 km).

Podkladem pro výpočet odhadu životnosti byly experimentální měření (záznam napětí, únavová křivka). Výpočet prokázal v tomto případě výhodu pravděpodobnostního výpočtu proti „klasickému“ (možnosti stanovit životnost pro zvolenou hodnotu pravděpodobnosti vzniku poruchy).



Obr.7.19. Trhlina na rámu podvozku Y25

## 8. ZÁVĚR

V současné době je problematika stanovení životnosti ocelových konstrukcí vysoce aktuální. S rozvojem výpočetní techniky se při odhadu životnosti uplatňují nástroje dříve nemyslitelné. Jde zejména o simulační metody založené na pravděpodobnostních principech.

**Cílem disertační práce** bylo navrhnout a vypracovat novou metodiku pravděpodobnostního přístupu k odhadu životnosti, aplikovat tuto metodiku na odhad životnosti reálné konstrukce a porovnat výsledky odhadů s odhady provedenými „klasicky“ a životnostmi zjištěnými experimentálně (reálnými životnostmi konstrukce).

V souladu s cíly jsem disertační práci rozdělil do čtyř hlavních tematických bloků :

- popis metodiky odhadu životnosti
- realizace metodiky vytvořeným výpočetním programem
- aplikace metodiky na odhady životností reálné konstrukce
- porovnání takto získaných odhadů životností s odhady „klasickými“ a s reálnými životnostmi konstrukcí.

### 8.1. METODIKA ODHADU ŽIVOTNOSTI

Metodika umožňuje zahrnout do výpočtu odhadu životnosti i ty druhy zatížení, které se v průběhu experimentálního měření odezvy od provozního zatížení neprojeví (např. vliv teploty, vliv stárnutí konstrukce, vliv koroze, vliv vnějších klimatických podmínek).

Vlastní výpočet životnosti je tvořen **iteračním algoritmem**, který postupně simuluje odezvu od provozního zatížení, upravuje simulovanou odezvu o vliv zatížení (který se při experimentálním měření provozního zatížení neprojevil), generuje únavovou křivku a

stanovuje odhad životnosti. Iterační krok odpovídá délce experimentálně změřeného záznamu napětí. Výpočet odhadu životnosti v iteračním kroku má následující body :

- Zpracování experimentálně změřené odezvy metodou Rain Flow.
- Generování nové matice RF.
- Simulace nového záznamu napětí.
- Rozšíření simulace o významové koeficienty.
- Provedení lineární regrese souřadnic únavové křivky.
- Generování nové únavové křivky.
- Zpracování simulované odezvy metodou Rain Flow.
- Stanovení dílčího poškození.
- Stanovení odhadu životnosti.

#### **Hlavními částmi metodiky jsou**

- simulace provozního zatížení,
- generování únavových křivek.

**Simulace provozního zatížení** je realizována pomocí simulační metody Monte Carlo. Simulovaný záznam má náhodný charakter, je stacionární a pravděpodobnostně odpovídá experimentálně změřenému záznamu. Simulace je umožněna modifikovanou metodou dvouparametrického „Stékajícího deště“ (Rain Flow). Modifikace spočívá v zahrnutí časového parametru. Postup simulace je následující :

Experimentálně stanovená křivka je zpravidla dána omezeným počtem bodů (dle normy min. 10). Tento handicap je v metodice zohledněn pomocí **generování únavových křivek**. Pro experimentálně danou únavovou křivku je sestaven pás spolehlivosti, ve kterém jsou následně generovány nové únavové křivky.

Na základě simulovaného záznamu napětí a na základě vygenerované únavové křivky je proveden odhad životnosti ocelové konstrukce. Tento odhad může být realizován pomocí libovolné hypotézy využívající přístupu kumulace únavového poškození .

## **8.2. REALIZACE METODIKY VE VYTVOŘENÉM VÝPOČETNÍM PROGRAMU**

Metodika je realizována pomocí programu „Plzen“, jehož první (beta) verzi jsem vyvíjel v rámci grantů [47,52,58]. Program jsem vytvořil v prostředí Delphi IV firmy Borland.

Při realizaci jsem se zaměřil na vyřešení následujících problémů :

- aplikace metody Rain Flow na velmi dlouhé záznamy,
- řešení algoritmu „tříparametrické metody RF (zahrnutí parametru času),
- řešení algoritmu generování nových matic,
- řešení algoritmu zpětné transformace záznamu,
- variace únavové křivky.

Při výpočtu odhadu životnosti je prováděn **vysoký počet simulací**, každá simulace je vzhledem ke složitosti operací velmi náročná na strojový čas počítače. Proto jsem při realizaci kladl maximální důraz na urychlení výpočtu :

- zkrácení experimentálně změřeného záznamu vynecháním hodnot mezi lokálními extrémy,
- převedení textové podoby souborů do binární,
- maximální využívání paměti RAM počítače.

Pro urychlení výpočtu jsem rovněž využil rekurzivních metod (QuickSort) a principů dynamických polí.

I přes uvedené nástroje pro urychlení výpočtu trval odhad životnosti mostní ocelové konstrukce na testovacím PC (PII-350 MHz, 128 MB RAM) cca 14 dní. Výpočet lze efektivně zkrátit zvýšením hardwaru PC (PIV-2,2 GHz 512 RAM, cca 2 dny).

### 8.3. APLIKACE METODIKY NA ODHAD ŽIVOTNOSTI

V disertační práci jsem se zaměřil na odhady životnosti mostní ocelové železniční konstrukce přes Labe a rámu železničního podvozku Y25. Před provedením vlastních odhadů bylo nutné provést testy metodiky zejména na citlivost vstupních parametrů. Z provedených testů vyplynulo, že **přesnost** odhadu životnosti je přímo úměrná kvalitě simulovaného záznamu.

Simulace záznamu napětí závisí na vstupních parametrech metody Rain Flow. Vstupní parametry jsou :

- amplitudová citlivost matice RF
- rozměr matice
- max. amplituda napětí
- max. stř, hodnota napětí

Nejvíce je simulace závislá na **rozměru matice RF**. Max. rozměr, který program „Plzen“ připouští, je 64x64. Při tomto rozměru jsem dosáhl nejlepších výsledků. Bohužel rozměr matice RF se také nejvíce projeví v nárocích na strojový čas výpočtu.

Ostatní parametry (amplitudová citlivost a max. hodnoty) mají spíše doladující charakter.

Nejdůležitějším kritériem pro nastavení vstupních parametrů je porovnání matic RF, přičemž matice simulovaného záznamu musí odpovídat (tvarem i četností položek) matici experimentálně změřeného záznamu. Dalšími kritérii je grafické porovnání simulovaného a změřeného záznamu a porovnání distribučních funkcí simulovaného a změřeného záznamu.

Vlastní vyladění vstupních parametrů je třeba provést **před každým odhadem životnosti**.

Odhad životnosti mostní ocelové konstrukce přes Labe jsem provedl na základě znalosti experimentálně zjištěných údajů odezvy od provozního napětí a empiricky stanovené únavové křivky. Při odhadu jsem nezohlednil změnu provozního zatížení v průběhu života konstrukce (program v současné době toto neumožňuje, je v něm pouze připravena platforma pro zohlednění této změny) a nezapočítal jsem do odhadu významové koeficienty (nebyly k dispozici). Také empiricky stanovená únavová křivka nemá kvalitu křivky stanovené experimentální cestou.

Z uvedených důvodů provedený odhad neodpovídal reálné životnosti mostní konstrukce (odhad byl přibližně poloviční). Přesto je možné výsledek odhadu považovat za úspěch, protože **prokázal funkčnost programu „Plzen“**.

Odhad životnosti rámu železničního podvozku Y25 jsem provedl na základě experimentálně zjištěných údajů odezvy od provozního napětí a experimentálně stanovené únavové křivky. Tato konstrukce je z hlediska odhadu životnosti podstatně jednodušší, protože se nemění charakter zatížení podvozku a vliv zatížení rozdílných od provozního se projevuje v minimální míře.

Z těchto důvodů byl odhad velmi přesný a odpovídal reálné životnosti rámu podvozku ve stanoveném místě konstrukce. V tomto případě výpočet **prokázal správnost výpočtu** a značnou výhodu proti „klasickému“ přístupu k odhadu životnosti (možnost stanovení odhadu životnosti pro stanovenou pravděpodobnost poruchy).

#### 8.4. POROVNÁNÍ ODHADŮ ŽIVOTNOSTÍ

Ačkoli pro odhad životnosti pomocí pravděpodobnostního přístupu (program „Plzen“) je možné použít **libovolnou hypotézu** kumulace únavového poškození, přiklonil jsem se na základě [11,48] k hypotéze Corten-Dolanově, která v obecném měřítku při bi-lineárně stanovené únavové křivce poskytuje nejpřesnější výsledky (Tri-lineární únavovou křivku v podobě, v jaké je uvedena v normách [3,4,5] pro mostní konstrukce, program prozatím neumožňuje použít.).

Odhady životnosti stanovené pomocí pravděpodobnostního přístupu jsem porovnával s „klasickými“ odhady provedenými programem Zivot2. Dále jsem tyto odhady porovnával se skutečnými (reálnými) životnostmi konstrukcí. Porovnávané konstrukce byly :

- mostní ocelová konstrukce přes Labe,
- rám železničního podvozku Y25.

Odhady životností a reálné životnosti jsou uvedeny v tab. 8.1. V tabulce jsou uvedeny hodnoty pro 50 % pravděpodobnost poruchy.

Tab.8.1 Odhady životností a reálné životnosti konstrukcí

Konstrukce	Pravděpodobnostní odhad	„Klasický“ odhad	Reálná životnost (do vzniku trhliny)
Most pře Labe	16 let	19 let	32 let
Rám podvozku Y25	69 500 km	89 000 km	65 000 km

**Vysvětlení rozdílů v uvedených životnostech** : viz část 7.3 disertační práce.

#### 8.5. NÁMĚTY PRO DALŠÍ VÝZKUM

V práci je uveden nový přístup (metodika) spočívající v pravděpodobnostním odhadu životnosti. Tento přístup je realizován programem „Plzen“. Testy a provedené odhady **prokázaly životaschopnost** tohoto přístupu, přesto nelze výzkum, na jehož základě jsem uvedenou metodiku vymyslel a posléze realizoval, považovat za **uzavřený**. Ačkoli je navržený pro odhad životností ocelových konstrukcí obecně, jeho primárním cílem bylo stanovení odhadů životnosti pro konstrukce mostní.

V tomto směru navržená metodika **nepokrývá** problematiku odhadu beze zbytku. V následujících pracích a výzkumu je třeba se zabývat problémem zahrnutí změny provozního zatížení mostních konstrukcí v době života konstrukce a predikcí změny dopravního zatížení. Dalším námětem pro výzkum je také experimentální stanovení významových koeficientů, které považují pro odhady ocelových mostních konstrukcí za velmi potřebné.

#### 8.6. PŘÍNOSY PRO PRAXI

Metodika odhadu životnosti je realizována pomocí „stále zkušební verze“ (beta verze) programu „Plzen“. Po doplnění o standardní uživatelské prostředí je možné tuto beta-verzi využít v praxi. Z hlediska budoucího uživatele jsou důležité **následující přínosy** :

- bezkolizní práce s experimentálně získanými daty (napětí, únavová křivka, významové koeficienty),

- metodika nevyžaduje další úpravy naměřených dat (např. histogramy, spektra napětí, distribuční funkce), s daty pracuje přímo,
- jednoduchý způsob stanovení odhadu životnosti (po zadání vstupních údajů a spuštění výpočtu uživatel do průběhu výpočtu dále nezasahuje – výpočet probíhá automaticky),
- výsledky výpočtu jsou uvedeny ve formátu txt souborů (možnost dalšího vyhodnocení a analýzu prostřednictvím tabulkového procesoru – např. MS EXCEL),
- na základě výsledků lze stanovit odhad životnosti pro libovolnou pravděpodobnost poruchy konstrukce (konstrukčního uzlu),
- výpočet zohledňuje variabilitu a náhodnost naměřených dat, čímž dochází ke zpřesnění výpočtu oproti „klasickému“ přístupu k odhadu životnosti,
- při znalosti zatěžování konstrukce v průběhu jejího stávajícího života je možné stanovit její zbytkovou životnost pro požadovanou pravděpodobnost poruchy.

Na závěr chci poznamenat, že **obecným předpokladem** pro využití nových postupů odhadu životnosti v praxi jsou následující základní podmínky :

- 1) vyšší přesnost než stávající postupy,
- 2) snadná ovladatelnost (ze strany uživatele),
- 3) časová dostupnost (délka výpočtu).

Program „Plzen“ v současné podobě splňuje bod 1), částečně naplňuje bod 2) a při „silném“ hardware splňuje bod 3), viz. informace v části 5.5. na str. 65. V dalším vývoji a úpravách programu je nutné zefektivnit algoritmy výpočtu (zkrácení strojového času výpočtu) a doplnit uživatelské prostředí. Tím bude vyhověno všem třem základním podmínkám v plném rozsahu.



**Literatura**

- [1] Růžička M., Hanke M., Rost M.: Dynamická pevnost a životnost, skripta ČVÚT Praha 1987.
- [2] Bílý M., Ivanova V. S., Terentev V.F.: Pevnosť súčastí a materiálov pri premennom zaťažení, Veda, Bratislava 1976.
- [3] ČSN 731401, Navrhování ocelových konstrukcí, Český normalizační institut 1998.
- [4] ČSN 736205 P ENV 1993-2, Eurokód 3 : Navrhování ocelových konstrukcí. Část 2 : Ocelové mosty, Český normalizační institut 1998.
- [5] prEN 1993-1-9 : 20xx, Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1.9 : Fatigue strength of steel structures, European Committee for Standardisation, March 2000.
- [6] Klesnil M., Lukáš P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha 1975.
- [7] Frýba L.: Dynamika železničních mostů, Academia, Praha 1992.
- [8] Schwarz L.: Measurements on Railway Bridges to determine Axle Loads and Stress Range Spectra, Report, IABSE workshop, Lausanne 1997.
- [9] Hirt M.A., Kunz P.M.: Ermüdungssicherheit bestehender Brücken aus Stahl, Stahlbau 65, Heft 11, 1996.
- [10] Vojtíšek J.: Výpočty a ověřování životnosti strojních částí namáhaných náhodným stacionárním zatížením, zpráva ÚVZÚ Škoda Plzeň 1977.
- [11] Culek B. st. : Stanovení životnosti konstrukce železničního vozidla v podmínkách provozu na tratích ČSD a Železničního zkušebního okruhu, disertační práce, Praha 1991.
- [12] Malkovský Z.: Odhad únavové životnosti na základě znalosti spektrální výkonové hustoty, zpráva VÚKV, Praha 1988.
- [13] Rajcher V.L.: Gipoteza spektralnogo summirovania i jejo primenenie dlja opredelenia ustalostnej dolgovečnosti pri dejstvii slučajnych nagruzok, Trudy CAGI č. 1143. Moskva 1969.
- [14] Sedlacek G., Stranghöner N., Stötzel G., Dahl W., Langenberg P., Liessem A.: Die Tragsicherheit, die Ermüdungssicherheit und das Sprödbruchproblem, Stahlbau 65, Heft 11, 1996.
- [15] Morf U., Schindler H.: Nachweis der Sprödbruchsicherheit für geschweißte Stahlkonstruktionen, Stahlbau 65, Heft 11, 1996.
- [16] Brandes K., Knapp J., Herter J.: Messungen an älteren Stahlbrücken zur Zustandsanalyse und Ermüdungsbeurteilung, Stahlbau 65, Heft 11, 1996.
- [17] Akesson B., Edlund B.: Remaining Fatigue Life of Riveted Railway Bridges, Stahlbau 65, Heft 11, 1996.
- [18] Čačko J., Bílý M., Bukovec J.: Meranie, vyhodnocovanie a simulácia prevádzkových náhodných procesov, VEDA, Bratislava 1983.
- [19] Kropáč O.: Náhodné jevy v mechanických soustavách, SNTL, Praha 1987.
- [20] Antoch J., Vorlíčková D.: Vybrané metody statistické analýzy dat, Academia, Praha 1992.
- [21] Ventcel'ová J. S.: Teória pravdepodobnosti, ALFA, Bratislava 1973.
- [22] Marek P., Guštar M., Bathon L.: Tragwerksbemessung von deterministischen zu probabilistischen Verfahren, Academia, Praha 1998.
- [23] Vlk M.: Posouzení spolehlivosti konstrukcí namáhaných na únavu s využitím simulační techniky Monte Carlo, skripta VUT, Brno 1996.
- [24] Menčík J.: Posuzování spolehlivosti metodou Monte Carlo při omezeném množství hodnot, konference „Spolehlivost v Technice 98“, Brno 1998.
- [25] Hořejší J., Šafka J. a kol. : Statické tabulky, SNTL Praha, Praha 1987.

- 
- [26] Bažant Z., Nedoma A., Spála K. : Technický průvodce 3 – Nauka o pružnosti a pevnosti, SNTL Praha, Praha 1955.
- [27] Šertler H., Tomica V., Vičan J.: Kovové konstrukce, skriptum Univerzity Žilina, fakulta stavební, Žilina 1994.
- [28] ČSN 736203, zatížení mostů, Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření 1986.
- [29] Vičan j.: Kovové konstrukce – příklady výpočtů, skriptum Univerzity Žilina, fakulta stavební, Žilina 1994.
- [30] Wirth N.: Algoritmy a štruktúry údajov, Alfa, Bratislava 1988.
- [31] Hušek R., Lauber J.: Simulační modely,Alfa, Bratislava 1987.
- [32] DISYS, Software for data acquisition & analysis, User's manual, Firma Merlin
- [33] Rektorys K. a spolupracovníci : Přehled užití matematiky II, Prometheus 1995.
- [34] Němec J., Rus L., Synek V., Kolář J., Krupička M.: Dynamické jevy, namáhání a porušování pojezdu lokomotiv, NADAS, Praha 1986.
- [35] Němec J.: Zvyšování životnosti dopravních zařízení, skripta Univerzita Pardubice 1994.
- [36] Marek P., Guštar M., Anagnos T.: Simulation-based reliability assessment for structural Engineers, CRC Press, Inc., 1996.
- [37] ETH : VaP for Windows<sup>TM</sup>, ETH – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich – Institute of Structural Engineering, Zürich, 1997.
- [38] Kliman V.: Hodnotenie únavovej životnosti pri premenlivých charakteristikách náhodného zaťažovania, Strojnícky časopis č.1, 1990.
- [39] Reemtsema K. a kol.: Versuchsprogramm für Güterwagen mit Untergestell und Wagenstrukturen aus Stahl, zpráva ERRI B12/RP17 (8. vydání), Utrecht, 1997.
- [40] Frýba L. a kol.: Statistische Verteilung von Achslasten und Spannungen in Eisenbahnbrücken, zpráva Ore D128/RP 5/D, Utrecht, 1976.
- [41] Frýba L. a kol.: Ermüdungsfestigkeit der orthotropen Platten mit offenen Flachstahlrippen, zpráva ERRI D191/RP4, Utrecht, 1996.

**Vlastní publikace**

- [42] Culek B. st., Culek B. ml.: Simulace provozního namáhání konstrukcí železničních vozidel. SCIENTIFIC PAPERS OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE, 1997
- [43] Culek B. st., Culek B. ml.: Ověřování dynamické pevnosti konstrukce železničního vozidla jízdni zkouškou. Seminář „Únava materiálu a konstrukcí 98“, Žinkovy 1998.
- [44] Culek B. ml., Menčík J.: Analýza přesnosti predikce únavové životnosti kovových konstrukcí. Konference „Spolehlivost v Technice 98“, Brno 1998.
- [45] Culek B. st., Culek B. ml.: Transformace napětí pro simulaci provozního namáhání konstrukce železničního vozidla. Konference „Experimentální analýzy napětí 98“, Podbanské 1998.
- [46] Culek B. ml.: Experimentální měření odezvy ocelové mostní konstrukce na dynamické zatížení. Seminář „Spolehlivost a diagnostika v dopravní technice '98“, Pardubice 1998.
- [47] Culek B. ml., Culek B. st.: Hodnocení únavové životnosti komponent při složitém namáhání. Zpráva, Pardubice 1998, Grant 15-00/244/98.
- [48] Culek B. ml.: Analýza přesnosti predikce únavové životnosti ocelových železničních mostů. Diplomová práce, Pardubice 1998.
- [49] Culek B. ml., Culek B. st.: Odhad životnosti železničních ocelových konstrukcí pomocí metody Monte Carlo. Konference „Druhá vědecká konference“, Pardubice 1999.
- [50] Šertler H., Culek B. ml.: Měření odezvy vybraných železničních mostů na provozní zatížení. Konference „Železniční mosty – správa a výstavba“, Praha 1999.
- [51] Culek B. ml., Culek B. st.: Počítačová simulace provozního namáhání. Konference „Spolehlivost a diagnostika v dopravě '99“, Pardubice 1999.
- [52] Culek B. ml., Culek B. st.: Hodnocení únavové životnosti komponent při složitém namáhání. Výzkumná zpráva, Pardubice 1999, Grant 15-00/189/99.
- [53] Menčík J., Culek B. st., Culek B. ml., Mazánek J.: Výpočtové modely pro posuzování spolehlivosti dopravních prostředků, výzkumná zpráva GAČR 101/98/0378, Pardubice 1999.
- [54] Culek B. ml.: Spolehlivost a životnost dopravních staveb. Příloha ke zprávě, Grantová úloha GA ČR 103/97/0139, Pardubice 1999.
- [55] Šertler H., Beran L., Culek B. ml., Lelek J.: Zpráva o zatěžovací zkoušce železničního mostu přes říčku Loučná v km 284,615 traťového úseku Uhersko – Choceň. Závěrečná zpráva. Pardubice 1999.
- [56] Šertler H., Kabatník M., Culek B. ml., Rudolf P., Beran L., Lelek J.: Interakce dopravních prostředků a dopravní cesty. Dílčí zpráva plnění výzkumného záměru, Pardubice 2000, institucionální výzkum MSM 255100002.
- [57] Beran L., Lelek J., Culek B. ml., Šertler H.: Simulování pohyblivého zatížení mostní konstrukce a porovnání odezvy od tohoto zatížení s experimentálně naměřenými údaji. Závěrečná zpráva k univerzitnímu grantu 51/99, Pardubice 2000.
- [58] Culek B. ml., Culek B. st.: Konečná softwarová realizace pravděpodobnostního přístupu pro hodnocení únavové životnosti komponent dopravních prostředků. Výzkumná zpráva, Pardubice 2000, Grant 15-00/179/2000.
- [59] Culek B. ml., Culek B. st.: Rozšířená počítačová simulace provozního namáhání. Konference „Spolehlivost a diagnostika v dopravní technice 2000 (dopravní stavby)“, Pardubice 2000.
- [60] Culek B. ml., Šertler H.: Pravděpodobnostní stanovení odhadu zbytkové životnosti stávající ocelové konstrukce ČD (trať Rosice – Hradec Králové, km. 2,814) a porovnání s výpočtem normovým. Výzkumná zpráva č. 5250/2100/IG500017, Pardubice 2001, vnitřní univerzitní grant.

- [61] Hřebíček Z., Rozbořil T., Culek B. ml., Rotrekl J., Trusina M.: Nové konstrukce a materiály železničního spodku a svršku (část A), výzkumná zpráva k ukončení E01/A projektu výzkumu a vývoje pro dopravu a spoje č. 803/130/121, VÚŽ Pardubice 2001.
- [62] Hřebíček Z., Zvěřina P., Culek B. ml., Rozbořil T.: Náklady na dopravní cestu způsobené provozem dopravních prostředků – část železniční, výzkumná zpráva k ukončení E02 projektu výzkumu a vývoje pro dopravu a spoje č 804/140/102, VÚŽ Pardubice, prosinec 2001.
- [63] Culek B. ml.: Stanovení odhadu životnosti v kritických místech mostní ocelové konstrukce, porovnání pravděpodobnostního přístupu s přístupem klasickým (taxativním), interní zpráva Z3 za rok 2001 ke grantu GAČR č. 103/01/0243, Pardubice 2001.
- [64] Culek B ml.: Stanovení zbytkové životnosti vybraných detailů konstrukcí na základě tenzometrického měření v roce 2000, interní zpráva č. 1.2 k dílčí zprávě výzkumného záměru „ Interakce dopravních prostředků a dopravní cesty“ za rok 2001, oblast Dopravní infrastruktura.
- [65] Culek B. ml.: Grafické hodnocení GPK, program pro vyhodnocování údajů z měřicího vozu ČD, VÚŽ Pardubice, 2002.
- [66] Culek B. jr, Culek B.: Processing of experimentally ascertained stresses of railway's steel construction based on probability approach, 40. mezinárodní konference Experimental stress analysis, Praha 2002.
- [67] Culek B. jun., Culek B. sen., Podruh J.: Schätzung einer Lebensdauer der Eisenbahnstahlkonstruktionen auf Basis von einer Wahrscheinlichkeitsannahme, Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, proceeding of 19<sup>th</sup> international colloquium, Pardubice 2002.
- [68] Culek B. jr., Culek B.: Probabilistic assessment of the service life of undercarriage railway frame, international conference Reliability and diagnostic of transport structures and means 2002, Pardubice 2002.
- [69] Culek B jr.: Method of three-parametric Rain Flow and its use at probability assessment of service life of bridge steel construction, IV. Medzinárodná konferencia TESE '02 – Účinky dopravy na koňstrukcie a prostredie, Rajecké teplice 2002.
- [70] Culek B ml.: Hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí při složitém namáhání”, veřejná přednáška, Pardubice 2002.

## Ohlasy

- 1) Oponentní řízení projektu MPO č. 15-00/179 : Výzkum moderních technologií dimenzování, testování a výroby ekologických dopravních prostředků, Plzeň, 2000.
- 2) Mečík J., Šertler H.: Evaluation of safety and residual life of existing steel bridges, the second international conference on Advances in Structural Engineering and mechanics – ASEM' 02, edited by C. K. Choin, Techno-PRESS, Daejeon Korea 2002.

## Seznam příloh

- Příloha č. 1: Odezvy od zatížení vyjádřitelné pomocí významových koeficientů.
- Příloha č. 2: Tenzometrické měření na ocelovém železničním mostu přes Labe, trať Rosice n./L. – Hradec Králové, km 2,184.
- Příloha č. 3: Odstranění mezilehlých hodnot ze zaznamenaného signálu napětí.
- Příloha č. 4: Ukázky zpracování zdrojového záznamu do podoby dvouparametrických matic RF.
- Příloha č. 5: Výpis sudé i liché větve RF provedené na testovacím záznamu.
- Příloha č. 6: Testy RF programu Plzen provedené pomocí programu DISYS od firmy MERLIN.
- Příloha č. 7: Ukázky původní matice RF a generovaných matic RF.
- Příloha č. 8: Reálné simulace záznamů a jejich porovnání se změřenými záznamy.
- Příloha č. 9: Ukázky změřené únavové křivky a vygenerovaných únavových křivek.
- Příloha č. 10: Test citlivosti simulovaného záznamu na rozměr matice RF.
- Příloha č. 11: Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou max. amplitudu.
- Příloha č. 12: Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou stř. hodnotu rozkmitu napětí.
- Příloha č. 13: Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou amplitudovou citlivost matice.
- Příloha č. 14: Výpis programu Plzen (vzhledem k rozsahu přílohy – více než 100 stran, výpis přiložen na CD-ROM).

# **PŘÍLOHY K DISERTAČNÍ PRÁCI**

**Hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí  
při složitém namáhání**

## **Příloha č.1.**

**Odezvy od zatížení vyjádřitelné pomocí významových koeficientů**

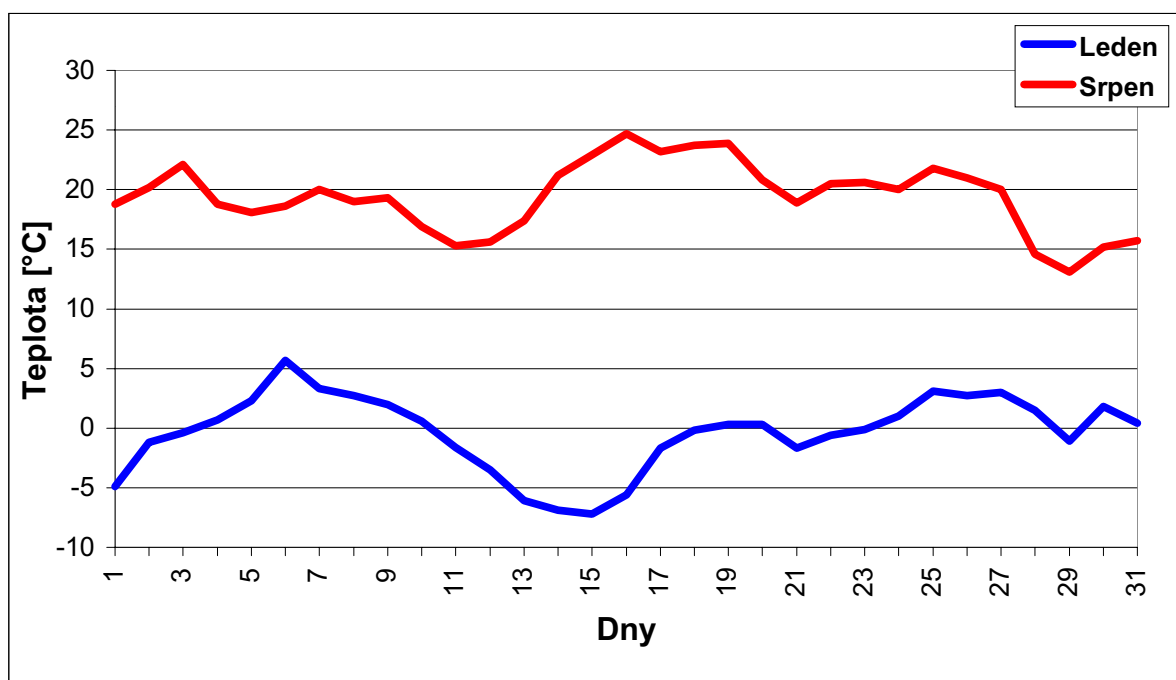
## Zatížení od vlivu změny teploty

Změna teploty může vyvolat v konstrukci vnitřní pnutí. Např. u bezстыkových kolejnic, kdy délky spojených kolejnicových pásů dosahují délek 300 a více metrů má vysoká změna teploty zásadní vliv na životnost. Vliv teploty na délku kolejnice lze v těchto případech vyjádřit jednoduchým vztahem :

$$\Delta l = l * \alpha * \Delta T \quad (1.1)$$

kde  $\Delta l$  je relativní prodloužení kolejnicového pásu  
 $l$  je délka kolejnicového pásu  
 $\alpha$  je součinitel teplotní roztažnosti  
 $\Delta T$  je rozdíl teplot

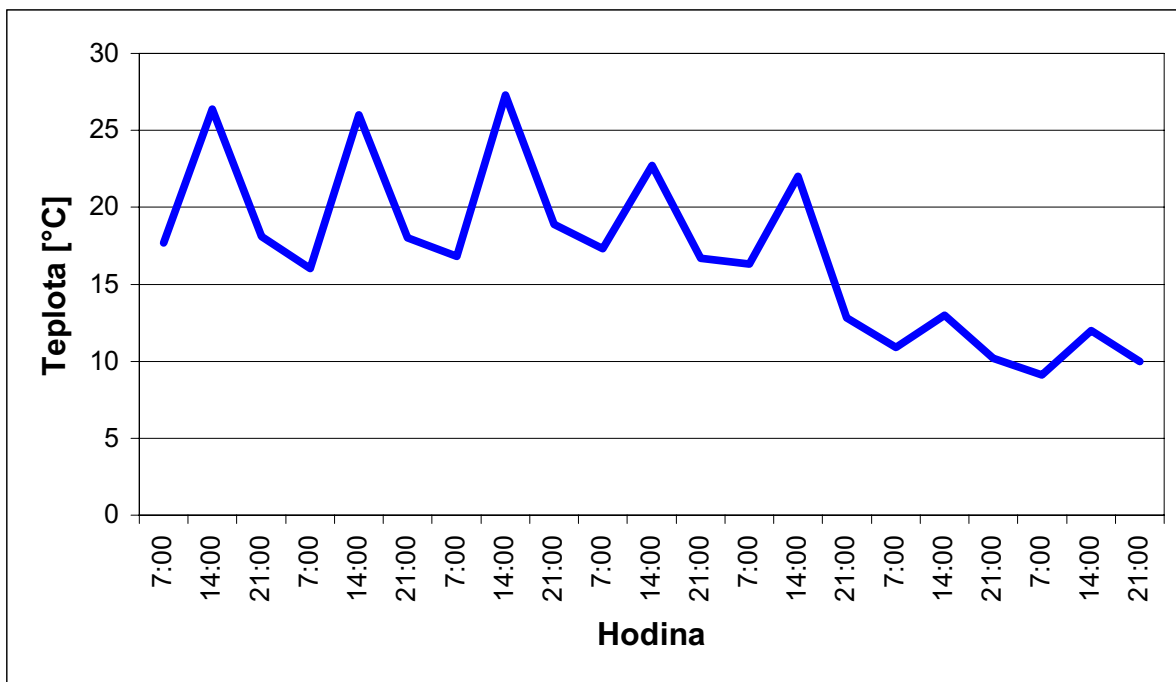
Změnu teploty ovzduší v průběhu roku sleduje Český hydrometeorologický ústav. Pro tuto práci poskytl hydrometeorologická data z hydrometeorologické stanice Pardubice (tab. P1.1). Ukázka změny průměrné teploty ovzduší v Pardubicích v průběhu měsíce (leden, srpen) je znázorněna na obr. P1.1. Ukázka kolísání teploty v průběhu jednoho týdne (1.5. – 7.5., teplota v 7:00, 14:00, 21:00) je znázorněna na obr. P1.2. Z obrázku vyplývá, že v období počátku května roku 2001 dosahovala teplota výkyvů až 20 °C.



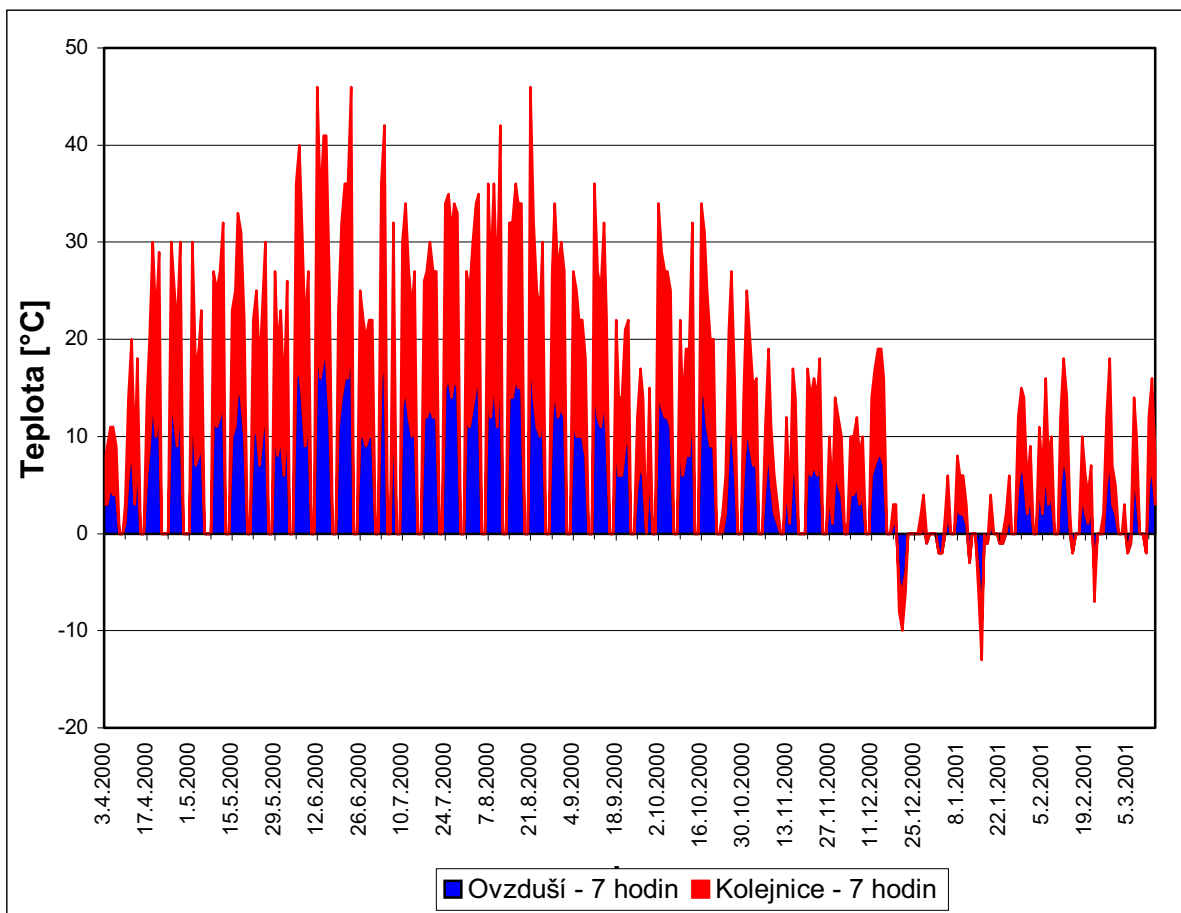
Obr.P1.1 Průměrná teplota ovzduší –Pardubice (leden,srpen)

U ocelových konstrukcí tohoto typu (kolejnice, ocelové mosty, atd.) není reálné sledovat změny teploty v průběhu roku přímo na konstrukci. V těchto případech však můžeme empiricky stanovit závislosti teploty konstrukce na aktuální teplotě ovzduší a oblačnosti v oblasti. Ukázka takovéto závislosti je na obr. P1.3. Údaje byly poskytnuty SDC Hradec Králové, ČD s.o. Údaje vyjadřují změnu teploty ovzduší a kolejnice v průběhu roku 2000 a 2001 (7:00 hod.). Kompletní údaje jsou součástí tabulky tab. P1.2.





Obr.P1.2 Teplota ovzduší –Pardubice (1.5. – 7.5., teplota v 7:00, 14:00, 21:00)



Obr.P1.3 Změna teploty ovzduší a kolejnice

Z obr.P1.3 je patrné, že teplota kolejnice kolísá v průběhu roku mezi  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $+45^{\circ}\text{C}$ , tzn. že  $\Delta T$  dosahuje  $60^{\circ}\text{C}$ . Teplota pro svařování kolejnic je stanovena předpisem ČD na minimální hodnotu  $-3^{\circ}\text{C}$ . Pro názornost provedeme **orientační vyčíslení** napětí v kolejnici vlivem teploty (neuvažujeme zbytková pnutí v kolejnici od svařování) :

Vstupní údaje :	teplota kolejnice při svařování	-	$T_0 = 0^{\circ}\text{C}$
	max. teplota kolejnice	-	$T_{\max} = 45^{\circ}\text{C}$
	min. teplota kolejnice	-	$T_{\min} = -15^{\circ}\text{C}$
	součinitel teplotní roztažnosti [34] (uhlíková ocel)	-	$\alpha = 0,000012$
	Youngův modul pružnosti	-	$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
	délka kolejnicového pásu	-	300 m

Pro tlaková napětí :  $\Delta T_1 = -45^{\circ}\text{C}$

Pro tahová napětí :  $\Delta T_2 = 15^{\circ}\text{C}$

Po dosazení do vztahu (1.1) :

$$\Delta l_1 = l \cdot \alpha \cdot \Delta T_1 = 300 \cdot 12E^{-6} \cdot (-45) = -0,162m \quad (1.2)$$

$$\Delta l_2 = l \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 = 300 \cdot 12E^{-6} \cdot (15) = 0,054m \quad (1.3)$$

Podle základních vztahů teorie pružnosti a pevnosti [35] platí:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.4)$$

kde  $\sigma$  je napětí v kolejnici  
 $\varepsilon$  je relativní prodloužení

Po dosazení vstupních údajů, výsledků (1.2) a (1.3) do (1.4) dostaneme :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l} = \frac{-0,162}{300} = -54E^{-5} \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l} = \frac{0,054}{300} = 18E^{-5} \quad (P1.6)$$

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E = -54E^{-5} \cdot 2,1E5 = -113,4 \text{ MPa} \quad (P1.7)$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_2 \cdot E = 18E^{-5} \cdot 2,1E5 = 37 \text{ MPa} \quad (P1.8)$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že v kolejnicovém pásu délky 300 m při uvažované teplotě kolejnic při svařování  $-3^{\circ}\text{C}$  se v průběhu jednoho roku může vyskytovat míjivé napětí způsobené vlivem teploty kolejnice, které nabývá hodnoty  $-113,4 \text{ MPa}$  až  $37 \text{ MPa}$ .

Tab.P1.1 Změnu teploty ovzduší v průběhu roku 2001 v Pardubicích (leden, červen) :

Legenda :      SRA 7:00      - úhrn vodních srážek v 7:00 hod.  
                   T AVG            - průměrná denní teplota ovzduší  
                   T 7:00            - teplota ovzduší v 7:00 hod.  
                   T 14:00          - teplota ovzduší v 14:00 hod.  
                   T 21:00          - teplota ovzduší v 21:00 hod.

		H3PARD01	H3PARD01	H3PARD01	H3PARD01	H3PARD01
m•síc	den	SRA	T	T	T	T
		07:00	AVG	07:00	14:00	21:00
01						
01	Val0 1	0,8	-4,9	-12,4	-1,8	-2,6
01	Val0 2	0,1	-1,2	-1,9	-0,4	-1,3
01	Val0 3	0,4	-0,4	-3	0,6	0,5
01	Val0 4	0,4	0,7	-3,6	3,6	1,4
01	Val0 5	6,2	2,3	-0,4	4	2,8
01	Val0 6	1,2	5,7	3,3	9,2	5,1
01	Val0 7	5,4	3,3	3,2	5,5	2,3
01	Val0 8	4,1	2,7	2,7	3,2	2,5
01	Val0 9	0	2	0	3,4	2,3
01	Val1 0	2,6	0,6	-1,8	2,8	0,7
01	Val1 1	0	-1,6	0,2	0	-3,2
01	Val1 2	0	-3,5	-6	-1,4	-3,2
01	Val1 3	0	-6,1	-6,6	-5,4	-6,2
01	Val1 4	0	-6,9	-7,6	-5,7	-7,2
01	Val1 5	0	-7,2	-11,7	-1,1	-8
01	Val1 6	0	-5,6	-14,1	-1	-3,7
01	Val1 7	0	-1,7	-3,3	-0,4	-1,6
01	Val1 8	0	-0,2	-1	1	-0,3
01	Val1 9	0	0,3	0,3	0,8	0,1
01	Val2 0	0	0,3	0,1	1	0
01	Val2 1	0,5	-1,7	-0,8	-0,8	-2,5
01	Val2 2	0,5	-0,6	-2,7	0	0,2
01	Val2 3	0	-0,1	-1,4	0,7	0,1
01	Val2 4	4,2	1	-0,8	2	1,4

01	Val2 5	0	3,1	1	6,4	2,4
01	Val2 6	0	2,7	2,7	5,9	1,1
01	Val2 7	0	3	-0,7	3,7	4,4
01	Val2 8	0	1,5	1,7	6,3	-1
01	Val2 9	0	-1,1	-4	2,2	-1,2
01	Val3 0	0	1,8	-0,1	3,8	1,8
01	Val3 1	0,4	0,4	-0,8	1,8	0,2
06						
06	Val0 1	7,5	11,3	10,3	15,6	9,6
06	Val0 2	5,9	13,4	12,3	16,6	12,4
06	Val0 3	0	10,2	9,1	14	8,8
06	Val0 4	0,3	9,4	8,7	9,1	9,9
06	Val0 5	0	11,5	11	15,8	9,6
06	Val0 6	0	15,7	12	20,4	15,2
06	Val0 7	0,1	16,1	15,4	19,8	14,6
06	Val0 8	21,9	15,9	13,6	20,2	14,8
06	Val0 9	1,2	14,4	12	19	13,2
06	Val1 0	4,9	15,4	14,2	18,2	14,5
06	Val1 1	3	11,1	10,6	13,6	10
06	Val1 2	0	14,5	11,5	17,1	14,7
06	Val1 3	0	16,5	13,3	22,1	15,3
06	Val1 4	0	17,5	14,6	24,8	15,2
06	Val1 5	0	18,7	16,3	24,8	16,9
06	Val1 6	2,9	17	18,8	18,1	15,5
06	Val1 7	5,6	15,4	14,5	19,5	13,8
06	Val1 8	2	15,7	14,2	18,9	14,8
06	Val1 9	0	13,8	13,6	13,6	14
06	Val2 0	0	15	12,1	17,9	14,9
06	Val2 1	5,3	16,2	15	22,1	13,8
06	Val2 2	7,1	11,8	14,1	14,7	9,2
06	Val2 3	0,2	13,4	11,8	14,1	13,8
06	Val2 4	0	17	14,8	21,1	16
06	Val2 5	0	17,7	15,9	23	16

06	Val2 6	0	18,4	15,7	24	16,9
06	Val2 7	0	20,3	17,2	28,2	17,8
06	Val2 8	0,1	20,8	19,8	24,8	19,3
06	Val2 9	0	19,8	18,4	25,2	17,8
06	Val3 0	7,4	20,6	18,1	25	19,6
06	Val3 1					

Tab.P1.2 Změna teploty ovzduší a kolejnic v průběhu roku srpen 2000 a únor 2001:

Porovnání teplot kolejnic a ovzduší ČD TO Meziměstí							
Datum	Teplota ovzduší			Teplota kolejnic			Počasí
	7 hod.	10 hod.	13 hod.	7 hod.	10 hod.	13 hod.	
1.8.2000	11	17	21	14	22	28	jasno
2.8.2000	13	18	24	17	24	32	jasno
3.8.2000	15	18	22	19	24	29	polojasno
4.8.2000	16	19	21	19	25	27	zataženo
5.8.2000							
6.8.2000							
7.8.2000	16	19	22	20	25	28	oblačno
8.8.2000	12	15	18	15	19	24	zataženo
9.8.2000	16	20	24	20	26	31	zataženo
10.8.2000	11	20	25	14	26	34	jasno
11.8.2000	18	21	24	24	27	32	jasno
12.8.2000							
13.8.2000							
14.8.2000	14	22	26	18	30	36	jasno
15.8.2000	14	23	27	18	31	37	jasno
16.8.2000	16	21	25	20	29	35	polojasno
17.8.2000	15	22	26	19	31	36	jasno
18.8.2000	15	23	26	19	31	36	jasno
19.8.2000							
20.8.2000							
21.8.2000	20	24	27	26	32	37	polojasno
22.8.2000	14	18	20	18	23	26	zataženo
23.8.2000	11	18	21	14	24	29	jasno
24.8.2000	10	17		13	23		jasno
25.8.2000	13	16	18	17	20	24	polojasno
26.8.2000							
27.8.2000							
28.8.2000	12	18	22	15	23	29	oblačno
29.8.2000	15	17	21	19	22	28	zataženo
30.8.2000	12	16	22	15	20	30	oblačno
31.8.2000	13	18	21	17	24	29	polojasno
1.2.2001	4	6	8	5	8	10	polojasno

2.2.2001							
3.2.2001							
4.2.2001	5	7	9	6	8	10	polojasno
5.2.2001	2	6	9	4	8	11	polojasno
6.2.2001	7	8	8	9	10	11	zataženo
7.2.2001	3	4	5	5	6	7	zataženo
8.2.2001	4	2	2	6	4	4	děšť
9.2.2001							
10.2.2001							
11.2.2001	5	5	6	7	7	7	děšť
12.2.2001	8	9	10	10	11	13	děšť
13.2.2001	6	6	7	8	8	9	zataženo
14.2.2001	0	2	4	2	3	5	polojasno
15.2.2001	-2	0	4	0	2	6	jasno
16.2.2001							
17.2.2001							
18.2.2001	4	3	4	6	5	6	zataženo
19.2.2001	2	3	5	4	5	7	polojasno
20.2.2001	1	3	3	3	4	4	děšť
21.2.2001	3	2	2	4	2	2	oblačno
22.2.2001	-4	-1	1	-3	-1	2	oblačno
23.2.2001							
24.2.2001							
25.2.2001	0	1	2	2	3	4	zataženo
26.2.2001	5	6	6	7	7	8	děšť
27.2.2001	8	9	8	10	12	11	Děšť
28.2.2001	3	4	6	4	6	8	zataženo

### Zatížení vlivem stárnutí konstrukce

Při cyklickém ději probíhají v kovech nevratné fyzikální procesy, které oslabují vazby krystalické mřížky. V důsledku toho klesá hodnota modulu pružnosti [2]. Průběh vnitřního opotřebení je následující :

- 1) Oslabení meziatomových vazeb, podmíněné zvýšením hustoty dislokací (hustota se zvyšuje s počtem cyklů). V počátcích se tento jev na struktuře materiálu projevuje pozitivně (zvýšením dislokací se zvyšuje statická pevnost materiálu). Toto pozitivní stadium se nazývá deformační zpevnění materiálu. Při vrůstajícím počtu cyklů je však zvyšování dislokací negativní (dochází k iniciaci a submikroskopickému porušení celistvosti).
- 2) Iniciační submikroskopických porušení nastává v oblastech kritické hustoty dislokací.
- 3) V této fázi dochází ke kumulaci porušení, jehož důsledkem je snižování materiálových charakteristik, jako je mikrotvrdość, pevnost, atd. V této fázi také dochází k výraznému snížení modulu pružnosti, zapříčiněné nejen oslabením, ale i porušením meziatomových vazeb.
- 4) Stadium kumulace poškození po určitém čase přechází od stádia kumulace poškození do stádia vlastního porušení – iniciace a šíření mikroskopických trhlin

do rozměru makrotrhlin. V tomto stadiu se progresivně snižuje pevnost a platicita, prudce však stoupá vnitřní tření.

Stárnutí oceli také velmi závisí na chemickém složení a na způsobu zatěžování daného konstrukčního uzlu [27]. Stárnutí je ovlivněno zejména dusíkem a kyslíkem. Ocel bohatší na dusík je náchylnější ke stárnutí.

Zatížení stárnutím se velmi těžko vyjadřuje. Vnitřní opotřebení materiálu mnohem lépe zohledníme pomocí únavové křivky než pomocí zatížení. Nejvhodnější způsob stanovení tohoto opotřebení je na základě empirických vztahů, odvozených z jiných, obdobných konstrukcí.

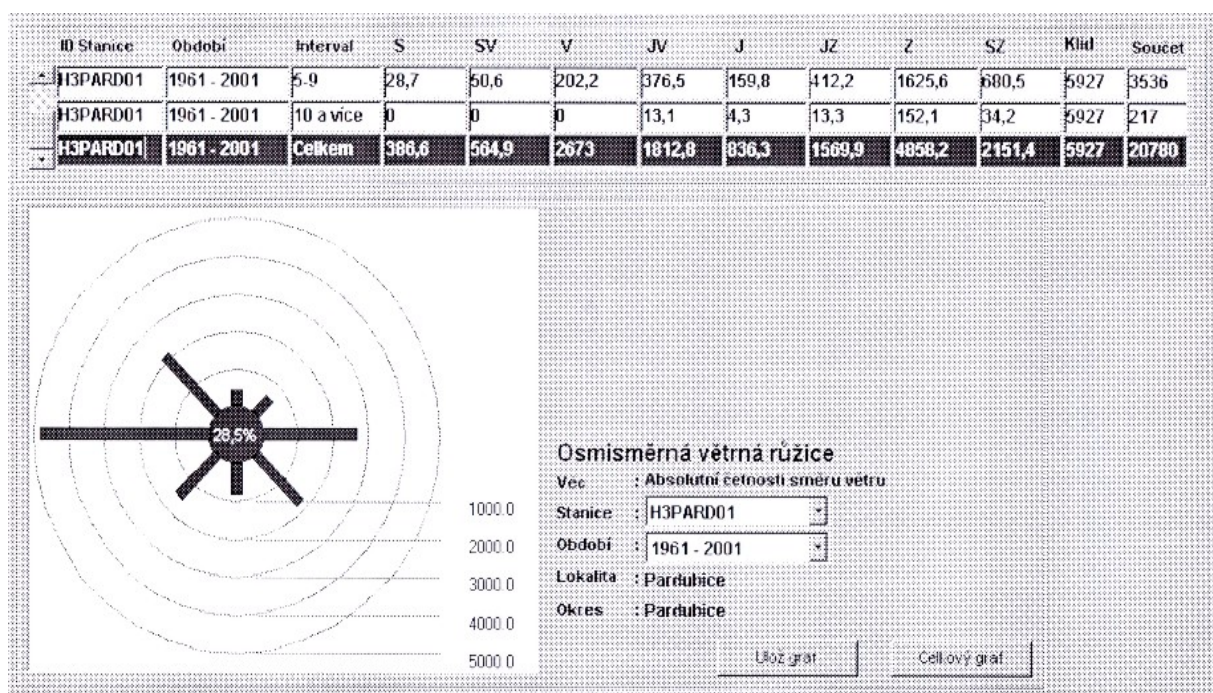
Významový koeficient stárnutí bude velmi záviset na typu konstrukce (popř. konstrukčního detailu), na stanovení míry údržby a kontroly. Dále bude záviset na způsobu namáhání konstrukce v provozu, na agresivitě prostředí, atd.

### Zatížení od vlivu změny vnějších klimatických podmínek

Zatížením od vlivu vnějších klimatických podmínek v závislosti na typu ocelové konstrukce rozumíme déšť, vítr, sníh, vlhkost, atd. U těchto zatížení lze určit (statisticky), kdy je jejich četnost vyšší a kdy nižší. Nevýhodou tohoto typu zatížení je, že má z hlediska časového většinou skokový charakter. Aby mělo statistické zpracování význam, je důležité ho vyhotovit pro delší časové období (jeden rok). Velmi užitečným zdrojem údajů je opět Český hydrometeorologický ústav, který sleduje úhrn vodních srážek, sílu a převládající směr větru.

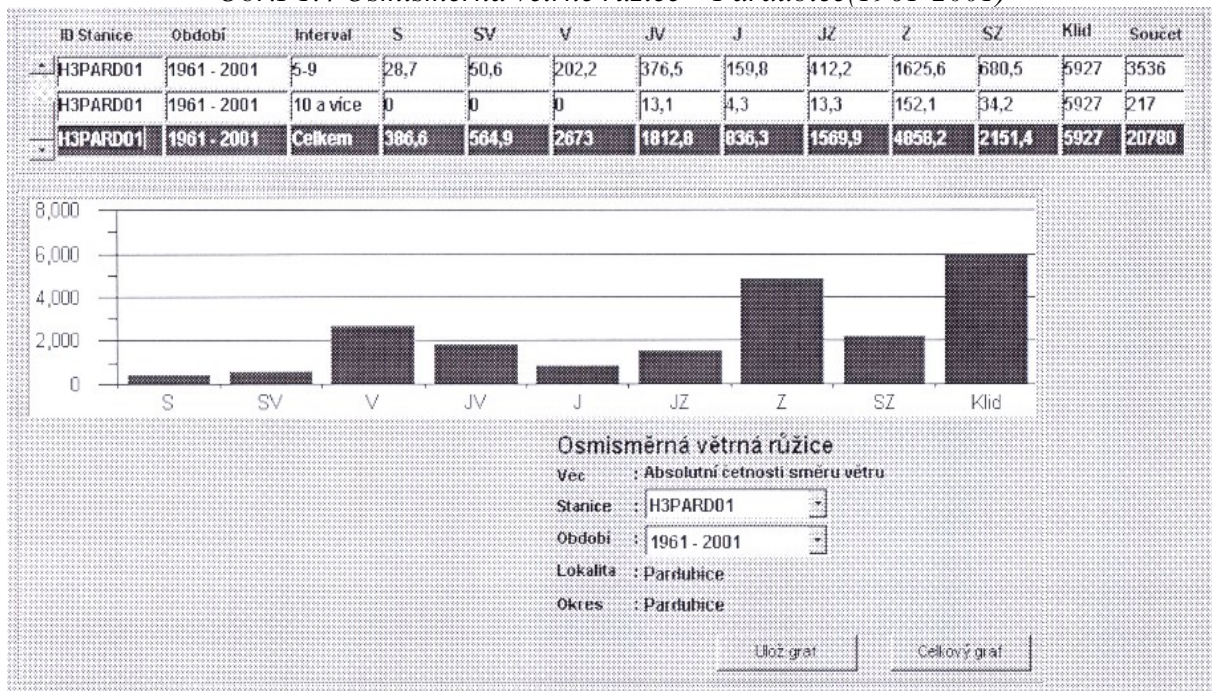
#### a) Zatížení od vlivu větru

Zatížení větrem je u mostních konstrukcí velmi významným zatížením, které je zohledňováno i ve statickém výpočtu těchto konstrukcí. Protože díky hydrometeorologickým datům lze v průběhu roku stanovit směry a rychlosti větru a účinek větru lze stanovit experimentem, je schůdná cesta vyjádřit tyto účinky pomocí významových koeficientů. Na obr.P1.4 a P1.5 jsou graficky uvedeny převládající směry větru v oblasti Pardubic (statistické zpracování odpovídající období 1961 – 2001).





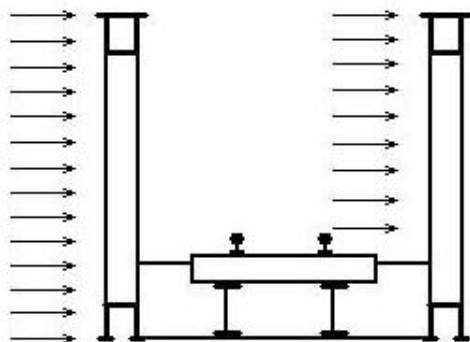
Obr.P1.4 Osmisměrná větrná růžice – Pardubice(1961-2001)



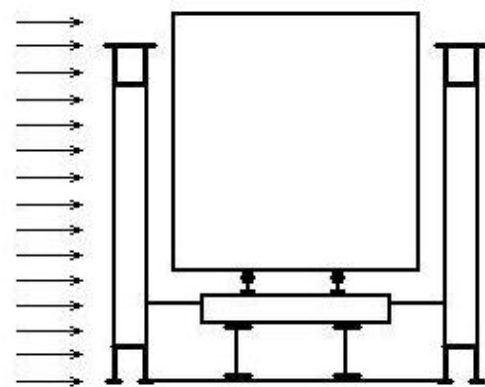
Obr.P1.5 Sloupcový graf osmisměrné větrné růžice – Pardubice(1961-2001)

Tlak větru se dle [28] uvažuje jako nahodilé vodorovné zatížení rovnoměrně rozdělené po ploše vystavené jeho působení :

- Pro nezatížený most (obr P1.6), návětrnou plochu tvoří pás mostovky, přecházející části obou hl. nosníků.
- Pro most zatížený pohyblivým zatížením. (obr P1.7), návětrnou plochu tvoří pás mostovky, přecházející části obou hl. nosníků a celý souvislý pás pohyblivého zatížení. Za plochu pohyblivého zatížení vystavenou větru se uvažuje obdélníkový pás výšky 3,6 m.



Obr.P1.6 Tlak větru na nezatížený most (příhradová konstrukce)



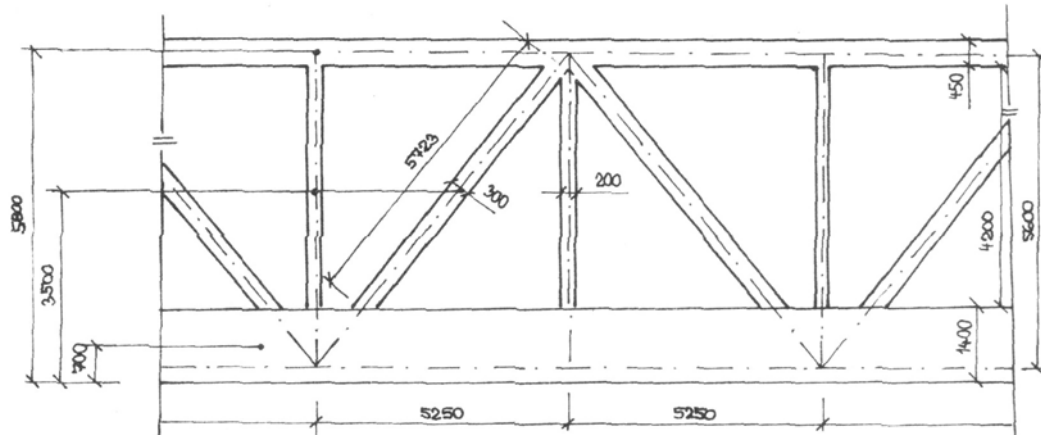
Obr.P1.7 Tlak větru na zatížený most (příhradové konstrukce)

Plocha zatěžovaná větrem (obr.P1.8) se přepočítává na 1m délky. Podrobný popis statického výpočtu zatížení větrem je uveden např. v [29].

Z hlediska významových koeficientů by se mělo k danému zatížení přistupovat obdobně, tzn. že rozdílný přístup pro zatížené a nezatížené konstrukce. Důležité je, uvědomit



si, že vítr na mostní konstrukci působí i nepřímo (přímé působení představuje vodorovný ohyb), tzn. způsobuje kroučící moment, který se v konečném efektu projeví jako svislé přetížení a odlehčení hlavních nosníků.

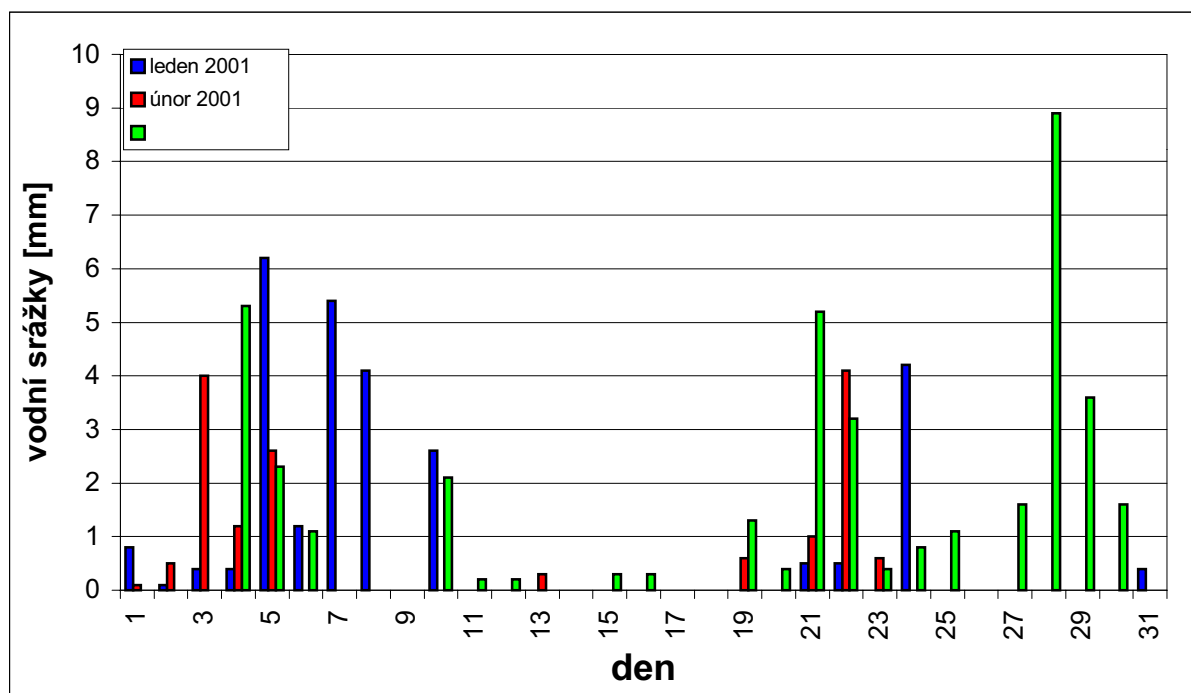


Obr.P1.8 Plocha příhradové mostní konstrukce nezatíženého mostu zatížená tlakem větru

#### b) Zatížení od vlivu vodních srážek

Zatížení vlivem vodních srážek v případech dobře odvodněných konstrukcí má v průběhu většiny roku prakticky zanedbatelný význam. Jinak je tomu v zimním období, kdy vodní srážky mají charakter sněhový a na konstrukcích se tvoří ledová a sněhová vrstva. V takovém případě má toto zatížení charakter dlouhodobě nahodilý. Zatížení sněhem je ve statickém výpočtu řešen dle normy ČSN 730035.

Hodnoty vodních srážek v průběhu roku lze stanovit na základě hydrometeorologických dat (obr.P1.9). Podrobnější údaje viz. tab. P1.1.



Obr.P1.9 Vodní srážky, stanice Pardubice, 7:00 hod.

## Zatížení od vlivu koroze

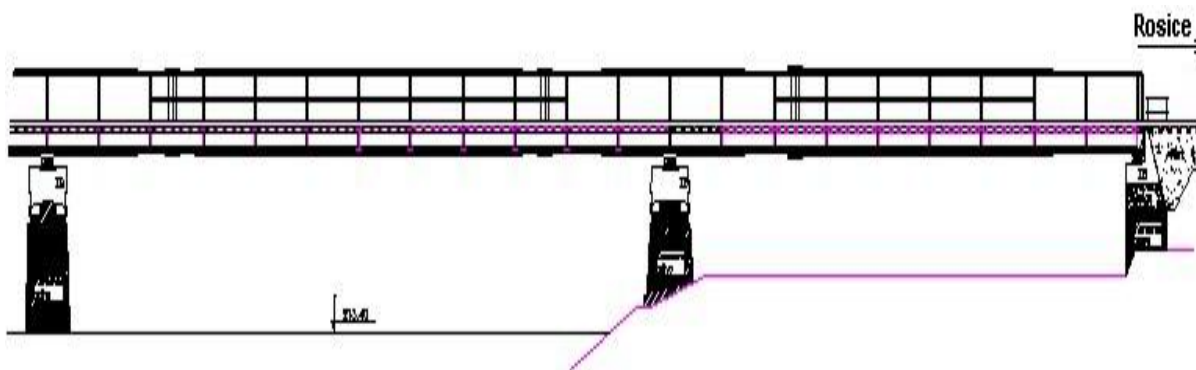
Jedním z největších nepřátel ocelových konstrukcí je koroze. Mám na mysli zejména atmosférickou korozi kovů, která je obecně závislá na míře vlhkosti vzduchu (srážky, kondenzace vodních par), na teplotě a chemických vlastnostech prostředí. Korozi se snažíme bránit systémem ochrany [27]. U většiny starších, zejména železničních, mostních konstrukcí je tento systém ochrany omezen (údržba mostních konstrukcí je zanedbána).

Z tohoto důvodu je nutné počítat s korozí jako s prvkem zatížení (koroze způsobuje oslabení materiálu, vruby, které se v konečném důsledku projeví zvýšením napětí v konstrukci při provozním zatížení).

Ve dnech 28.10.1999 – 30.10.1999 se pod mým vedením uskutečnilo tenzometrické měření na ocelovém železničním mostu přes Labe. Tomuto měření předcházela příprava, při které, mimo jiné, bylo nutné odbrousit v místech umístění tenzometrů zkorodovaný materiál až na hladký kov. V místě tenzometru T29 (horní pásnice příčnicku) jsme odbrousili cca 11 mm, což při celkové tloušťce pásnice 25 mm je významný údaj. Popis uvedené mostní konstrukce, popis tenzometrického měření a umístění tenzometrů je součástí přílohy č.2.

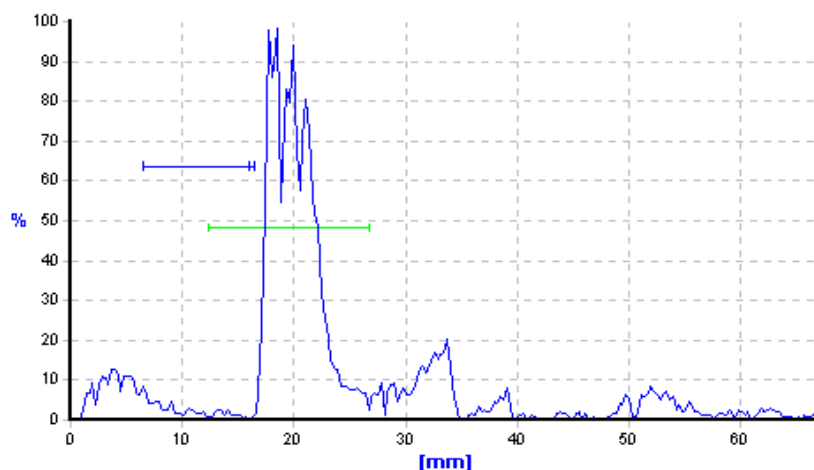
Míru koroze na ocelové konstrukci lze určit pomocí tloušťkoměrů. Ukázky použití ultrazvukového defektoskopu (tloušťkoměru) na uvedené mostní ocelové konstrukci v místech umístění tenzometrů jsou uvedeny na obr. P1.10 – obr. P1.27. Souhrnně jsou výsledky uvedeny v tab. P1.3. Měření jsem provedl ve spolupráci s Ing. Petráskem dne 12.4.2002.

Obr. P1.10 Náhled na mostní konstrukci :



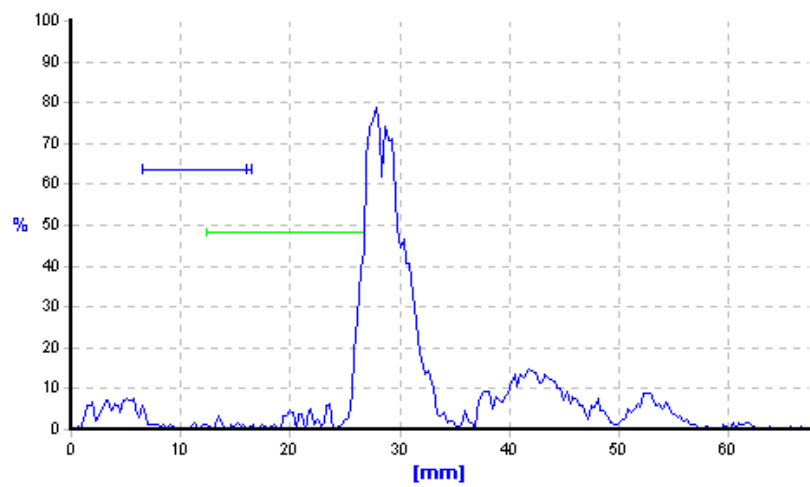
Obr. P1.11 – obr. P1.27  
Měření tloušťek  
(DIO562) :

1 pole směr Rosice

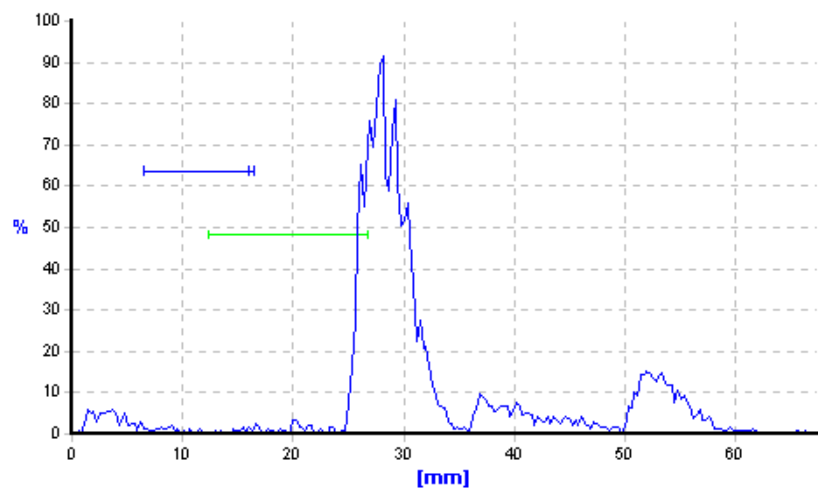


podélník (spodní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 17,221 \text{ mm}$   
(v blízkosti T24)

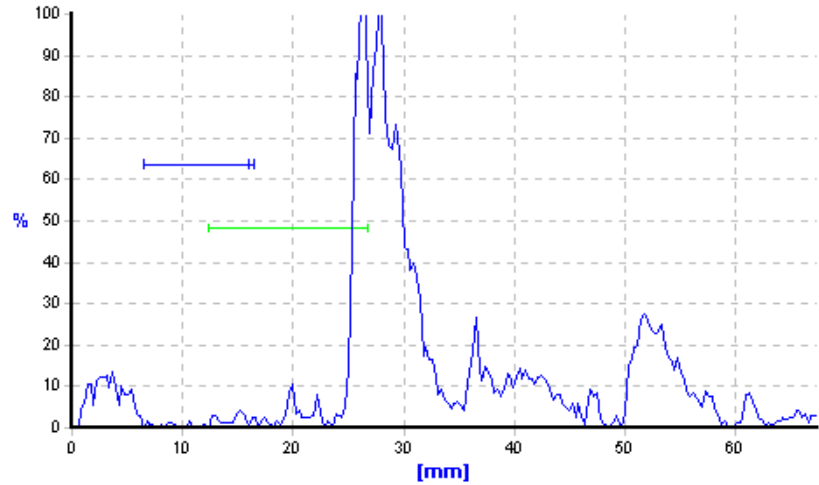
2 příčníc směr Rosice  
příčníc (spodní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 26,767 \text{ mm}$   
(v blízkosti T26)



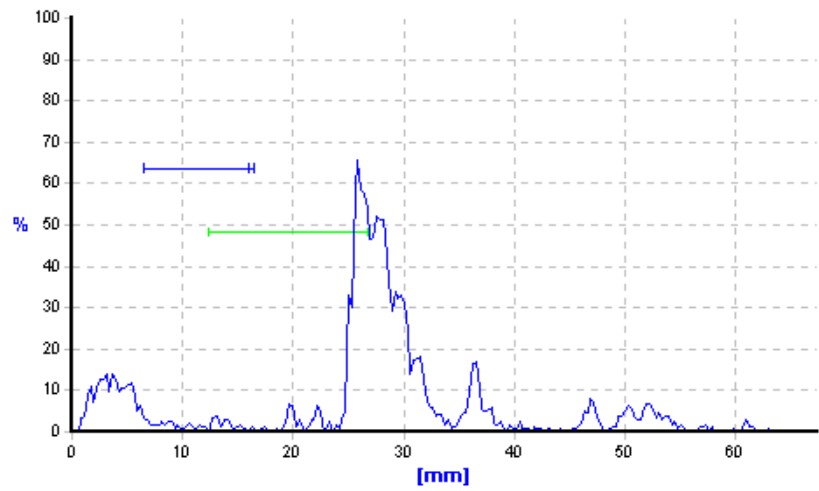
2 příčníc směr Rosice  
příčníc (spodní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 25,644 \text{ mm}$   
(v blízkosti T28)



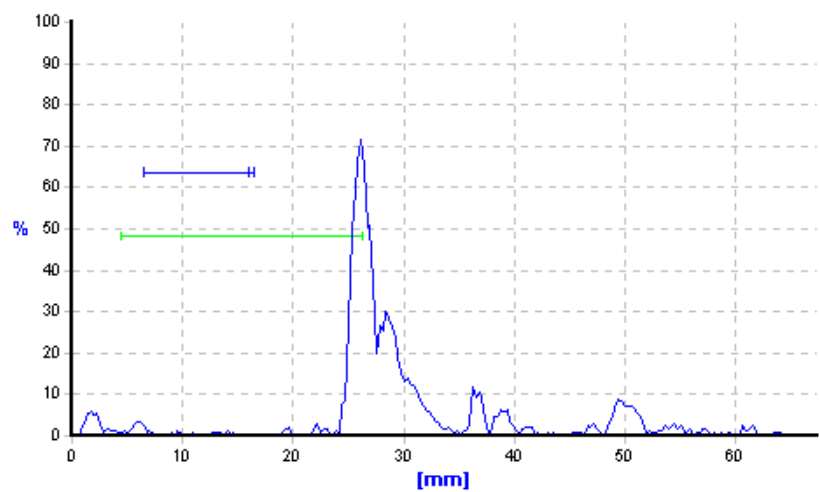
2 příčnick směr Rosice  
příčnick (horní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 25,457 \text{ mm}$   
(v blízkosti T27)



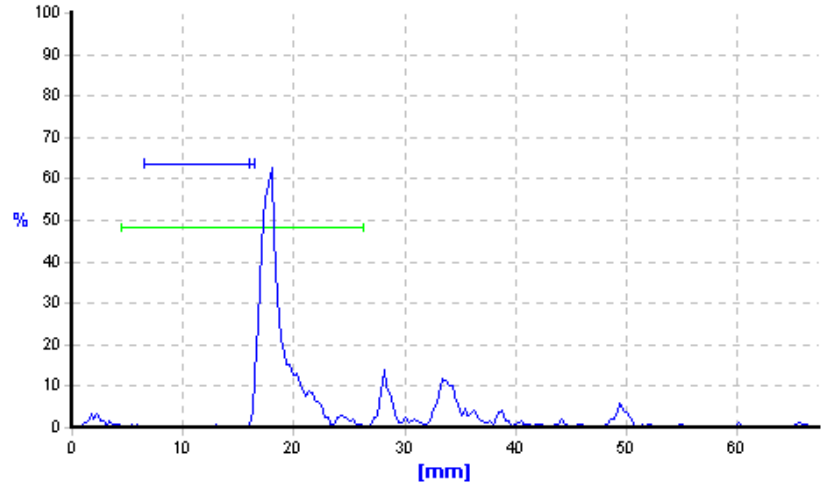
2 příčnick směr Rosice  
příčnick (horní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 25,270 \text{ mm}$   
(v blízkosti T25)



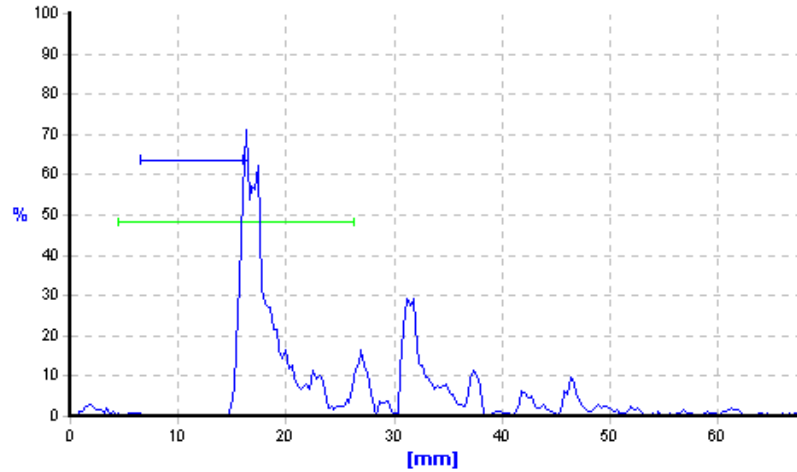
2 příčnick směr Rosice  
příčnick (horní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 25,176 \text{ mm}$   
(v blízkosti T29)



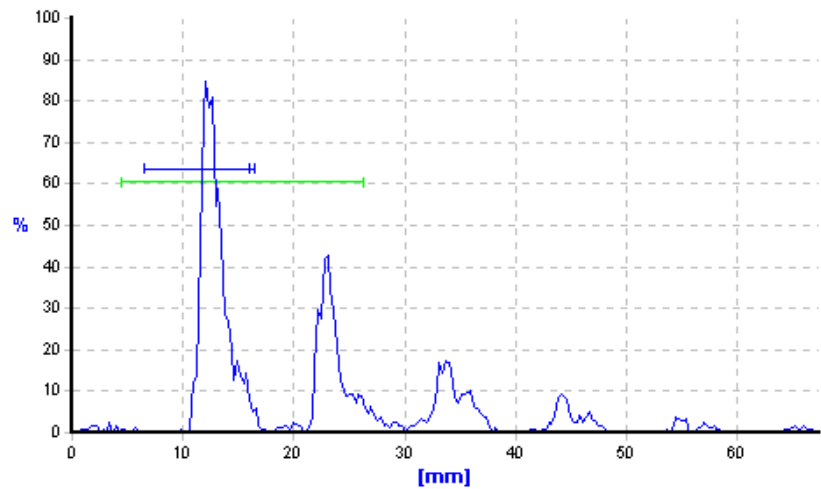
5 pole směr Rosice  
podélník (horní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 17,221 \text{ mm}$   
(v blízkosti T21)



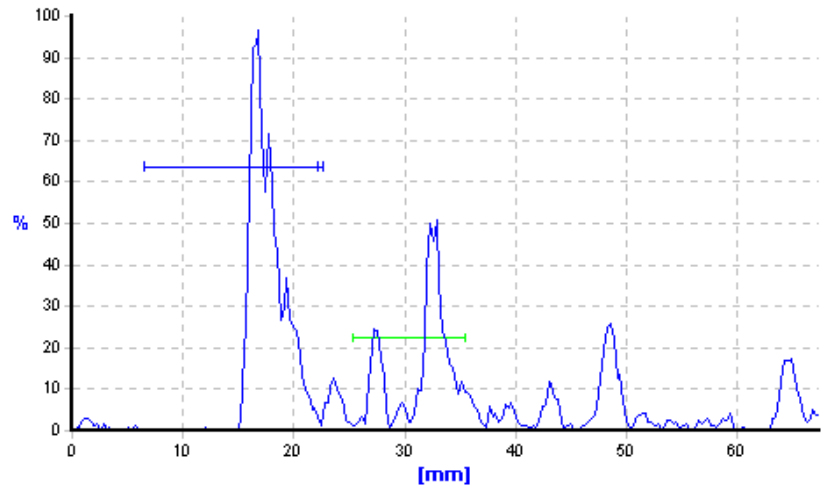
5 pole směr Rosice  
podélník (spodní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 15,817 \text{ mm}$   
(v blízkosti T22)



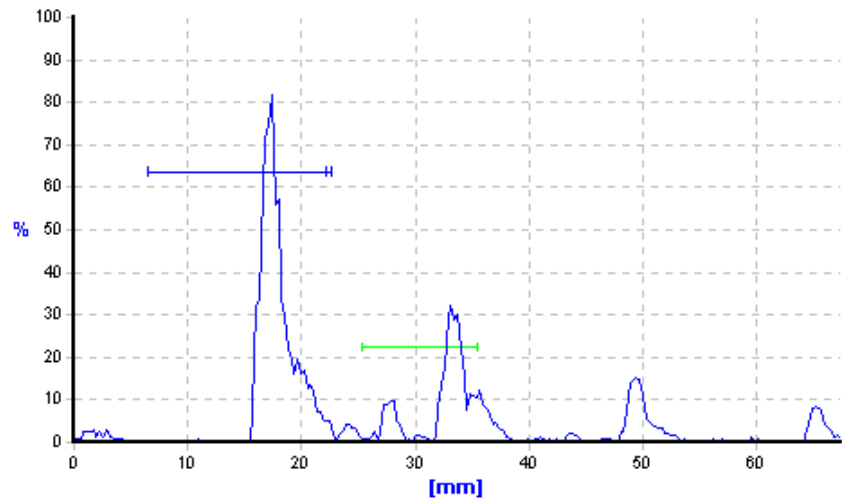
7 pole směr Rosice  
podélník (stojina)  
metoda 0-F  
 $t = 11,605 \text{ mm}$   
(v blízkosti T37, T38, T39)



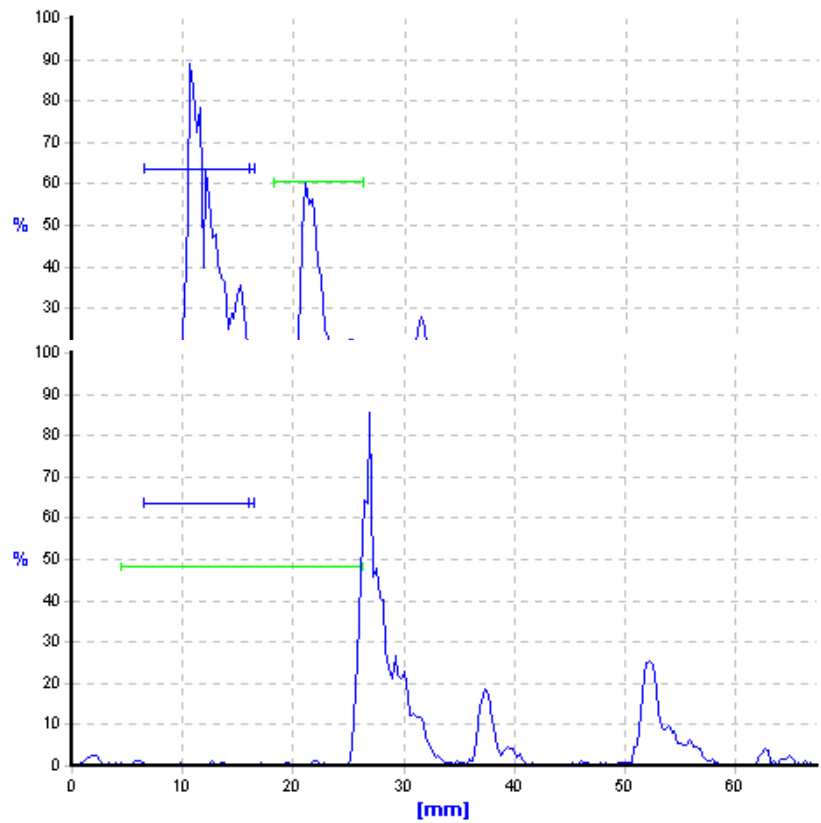
9 pole směr Rosice  
podélník (spodní pásnice)  
metoda F-F  
 $t = 10,856 \text{ mm}$



9 pole směr Rosice  
podélník (horní pásnice)  
metoda F-F  
 $t = 15,910 \text{ mm}$



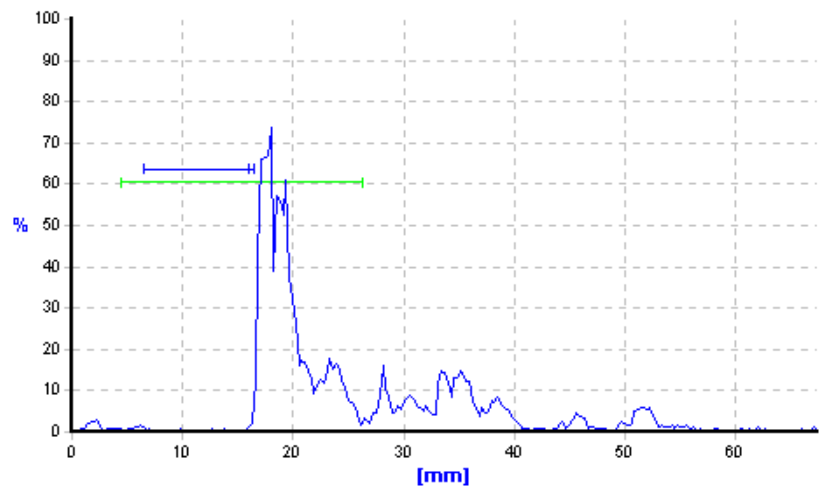
9 pole směr Rosice  
podélník (stojina)  
metoda F-F  
 $t = 10,482 \text{ mm}$



8 příčnick směr Rosice

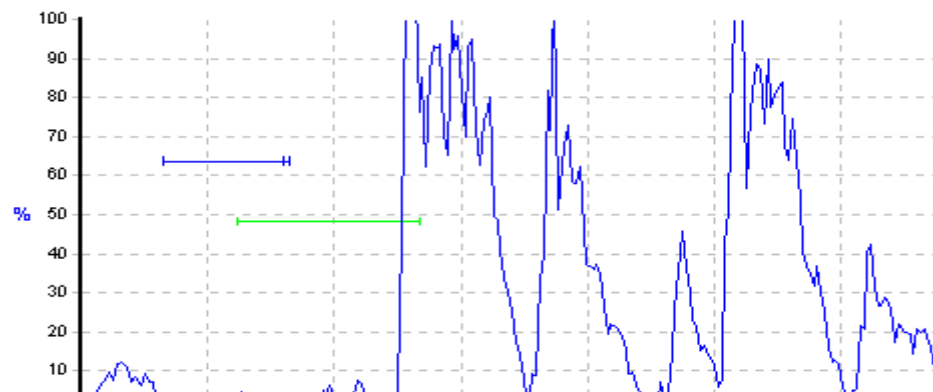
hl. nosník (spodní pásnice)  
metoda 0-F  
 $t = 26,206 \text{ mm}$

8 příčnic směr Rosice  
hl. nosník (stojina)  
metoda 0-F  
 $t = 17,034 \text{ mm}$

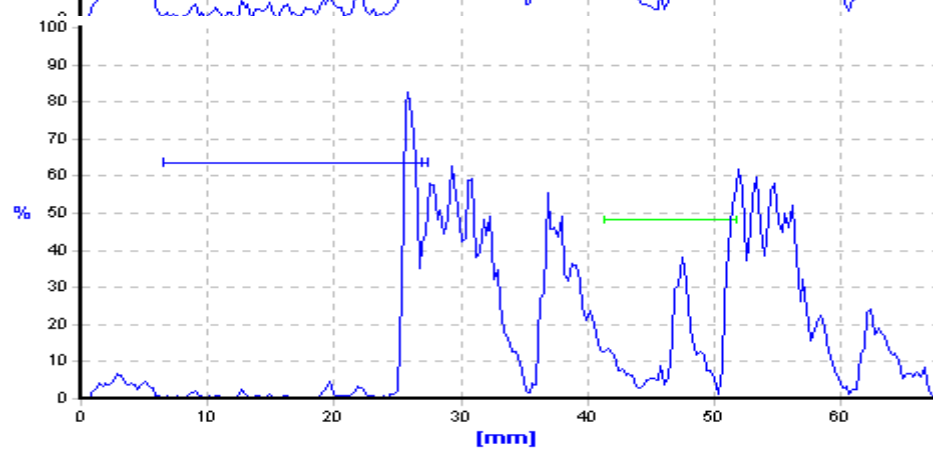


Kontrola měření byla provedena měřením na měrkách pomocí dvou typů metod měření :

metoda 0-F  
 $t = 25,457$



metoda F-F  
 $t = 25,644$



**Tab. P1.3 Souhrn výsledků měření**

Místo snímání	Tloušťka [mm]
podélník (spodní pásnice)	17,221
podélník (spodní pásnice)	15,817
podélník (spodní pásnice)	10,856
podélník (horní pásnice)	17,221
podélník (horní pásnice)	15,910
podélník (stojina)	11,605
podélník (stojina)	10,482
příčnick (spodní pásnice)	26,767
příčnick (spodní pásnice)	25,644
příčnick (horní pásnice)	25,457
příčnick (horní pásnice)	25,270
příčnick (horní pásnice)	25,176
hl. nosník (spodní pásnice)	26,206
hl. nosník (stojina)	17,034

**Ostatní zatížení**

Mezi ostatní zatížení řadím všechna zatížení, která nebyla v předchozích kapitolách specifikována, jež mají význam pro celkové zatížení a dají se popsat pomocí významového koeficientu (např vliv rychlosti jízdy soupravy po mostě).

Pro každý typ konstrukce nabývají některá zatížení na významu, naopak jiná na významu ztrácejí. Některá zatížení splývají s provozním zatížením, některá naopak můžeme od provozního zatížení zřetelně oddělit. Pokud zatížení splývá se zatížením provozním, pak ho pomocí významových koeficientů není třeba vyjadřovat.



## **Příloha č.2.**

**Tenzometrické měření  
na ocelovém železničním mostu přes Labe**

## Předběžná zpráva z tenzometrického měření

Ve zprávě je popis realizace tenzometrického měření na ocelovém železničním mostu přes Labe. Příprava a realizace měření byly provedeny ve dnech 28.10.1999 – 30.10.1999. V průběhu měření bylo zaznamenáno celkem 152 průjezdů vlaků oběma směry. Měření bylo realizováno pomocí dynamické ústředny DMC Plus firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) a přenosného počítače značky Toshiba Satellite.

Součástí zprávy jsou následující části :

- a) Mostní revizní zpráva 1998
- b) Ukázky záznamů vybraných průjezdů
- c) Seznam průjezdů
- d) Schéma umístění tenzometrů

### Popis objektu

Typ mostního objektu :	Plnostěnná svařovaná ocelová konstrukce s dolní mostovkou – spojitý nosník
Rozpětí :	29,97 + 39,41 + 39,99 + 30,01 m
Počet kolejí :	1
Nejvyšší dovolená rychlost :	70 km/h
Délka konstrukce :	140,50 m
Úhel křížení :	90°
Počet otvorů :	4
Délka mostu :	148,78 m
Výška mostního otvoru :	6,17 m
Výška objektu :	10,10 m
Délka přemostění :	138,53 m
Světlost mostních otvorů :	28,11 m; 37,73 m; 37,73 m; 28,25 m
Poloha osy koleje :	shodná s osou konstrukce
Vzdálenost zábradlí :	vlevo od osy koleje – 3,04 m vpravo od osy koleje – 3,04 m

Podrobnější popis stavu konstrukce je uveden v mostní revizní zprávě, která je uvedena v části a) této zprávy.

### Umístění tenzometrů

Tenzometry byly umístěny celkem na 30 místech. Označení tenzometrů je následující :

Hlavní pole :

T11, T12, T13, T13k, T14, T15

Krajní pilíř :

T16, T17, T39k

Krajní pole :

T18, T18k, T19, T21, T22, T23, T24, T25, T26, T27, T28, T29, T31, T32, T33, T34, T35, T36, T37, T38, T39

Přesné umístění tenzometrů je vyznačeno v části d). K měření byly použity tenzometry typu LY11-10/120A firmy (HBM). K lepení tenzometrů bylo použito rychle tuhnoucí lepidlo téhož výroby. Povrch pro umístění tenzometrů byl nejprve vybroušen na čistý kov, osmirkován, dokonale odmaštěn odmašťovačem firmy HBM. Na takto upravený povrch byly následně lepeny tenzometry.

Každé měřené místo bylo tvořeno dvěma tenzometry, zapojenými do polovičního Wheatstonova můstku. Jeden tenzometr byl nalepen na konstrukci, druhý na kovovou destičku umístěnou v blízkosti snímaného místa. Tímto způsobem byla kompenzovány vlivy od teploty.

Na ochranu proti vlhkosti byly nalepené tenzometry zakryty speciálním tmelem firmy HBM. Přes tento tmel byl dále nanesen včelí vosk.

### ***Měřicí místa***

Proti původnímu předpokladu měření na 30 vybraných místech bylo měření z ekonomických důvodů redukováno na 14 míst. Měření bylo uskutečněno v těchto místech :

T13, T14, T21, T22, T25, T26, T27, T28, T29, T35, T36, T37, T38, T39k

### ***Kalibrace***

Zaznamenávací aparatura byla zkalibrována tak, aby změřené hodnoty přímo odpovídaly napětí v konstrukci. Před každým průjezdem byla aparatura nulována. Snímací frekvence aparatury byla 50Hz.

### ***Měření***

Měření bylo prováděno 24 hodin, od 8,00 hod. dne 29.9.1999 do 8,00 hod. dne 30.9.1999. Celkem bylo zaznamenáno 152 průjezdů vlaků. Seznam průjezdů je uveden v části c). Ukázky záznamů průjezdů jsou uvedeny v části b).

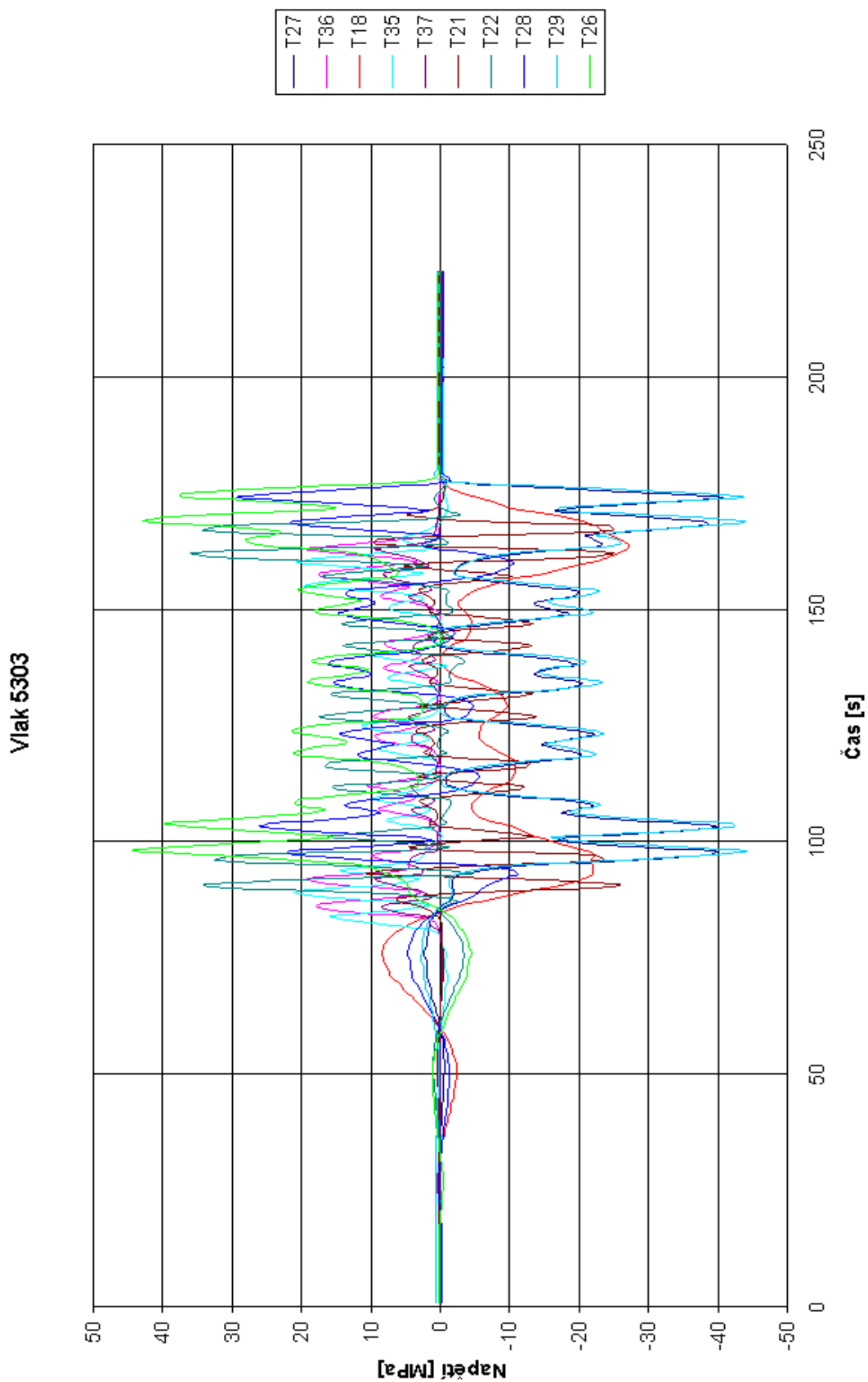
### ***Naměřené hodnoty***

Naměřené hodnoty napětí byly zaznamenány v MPa. Maximální hodnoty ve vybraných místech se pohybovaly na rozmezí +/- 60 MPa.

**část a) Mostní revizní zpráva z roku 1998**

Jedná se o důvěrný materiál Českých drah s.o., který mně byl dán k dispozici jako podklad v souvislosti s realizovaným tenzometrickým měřením. Vzhledem ke zmíněné důvěrnosti není v disertační práci mostní revizní zpráva uvedena.

## část b) Ukázky záznamů vybraných průjezdů











**část c) Seznam průjezdů**

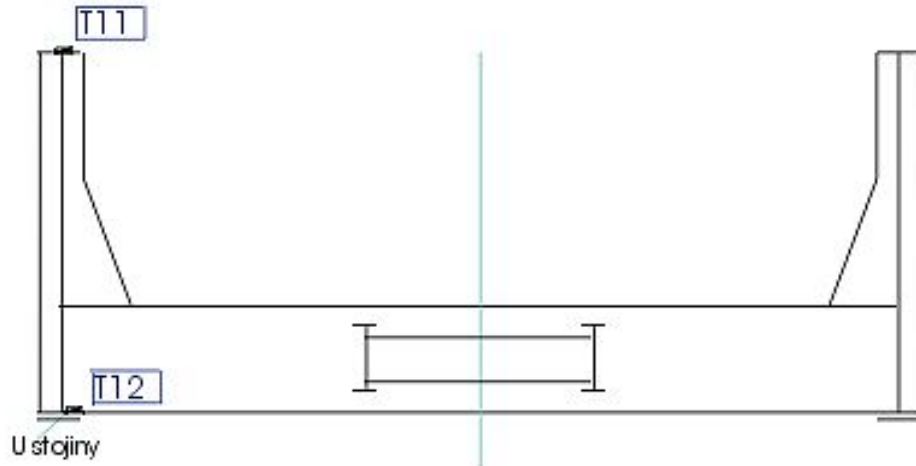
<b>Vlak</b>	<b>Lokomotiva</b>	<b>Čas</b>
5435	130008	8.13
680	750	8.23
5323	152	8.25
5323	152	8.28
70132	MVT+vozík	8.30
5400	130	8.52
181	181	8.54
683	130	9.08
5304	152	9.16
5304 2	152	9.19
91821	751	9.32
5453	130	10.01
5454	130	10.07
1980	750	10.19
5335	152	10.21
1980 2	750	10.23
5600	130	10.47
5305	750	10.56
5305 2	750	11.00
81813	751	11.29
5324	152	11.35
5324 2	152	11.39
81810	751	11.52
Jeřáb	jeřáb	11.55
5437	130	11.59
81813 3	751	12.10
5737	152	12.13
5436	130	12.15
5337	152	12.20
5307	152	12.47
5455	130	12.51
5306	750	12.54
5307 2	152	12.57
5306 2	750	12.59
5456	130	13.05
6194	podbíječka + vagón	13.09
5439	130	13.32
5332	152	13.34
5332 2	152	13.37
7025	mandelinka + vagón	13.40
5438	130	13.46
81810 2	751	13.52
5309	750	13.59
5402	130	14.10
5615	130	14.15
5309 2	750	14.17
5339	152	14.44
5441	130	14.47
5308	152	14.50
5339 2	152	14.53

5458	130	14.55
5308 2	152	14.57
5311	152	15.15
5334	152	15.26
5403	130	15.29
5311 2	152	15.31
5334 2	152	15.33
5440	163	15.39
5457	130	15.57
5341	152	16.03
5423N	181	16.09
5310	750	16.16
5341 2	152	16.18
5310 2	750	16.20
5442	130	16.28
91822	130	16.33
70126	čistička	16.39
70136	13	16.41
5443	130	16.49
1983	750	16.56
682	163	17.05
1983 2	750	17.07
5312	152	17.29
5312 2	152	17.31
5444	130	17.38
Podbíječka	podbíječka	17.45
5325 2	152	17.49
5405	130	17.53
5325 2	152	17.57
5460	130	18.24
1982	750	18.27
1982 2	750	18.32
681	750	18.35
81812	751	18.41
70129	750	18.57
5327	750	19.03
1982 3	130	19.06
5327 2	750	19.09
5459	130	19.11
81815	751	19.23
56111	130	19.33
5314	152	19.44
5314 2	152	19.46
5445	163	19.55
5602	130	20.04
81815a	750	20.07
5343	152	20.10
5343 2	152	20.15
81815 2	750	20.29
5315	152	20.53
5316	152	20.57
5315 2	152	21.02
5447	130	21.04

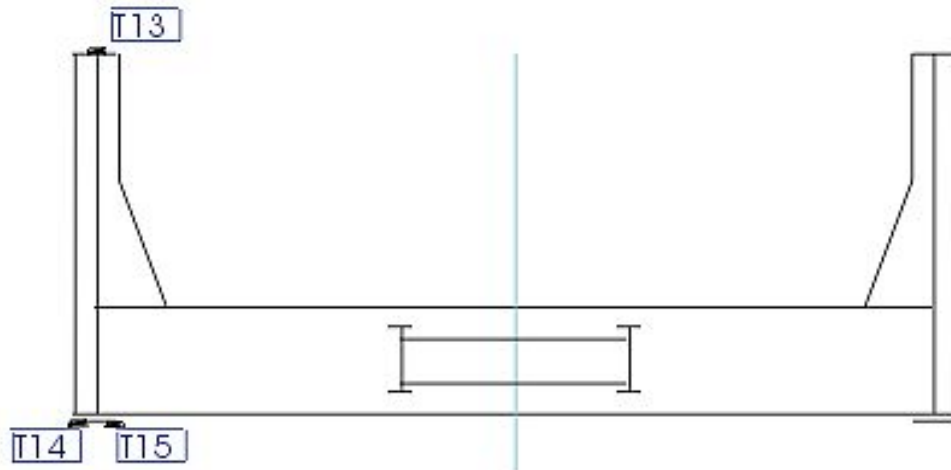
5462	130	21.10
5316 2	152	21.12
81812 2	751	21.15
70135	751	21.18
5446	130	22.06
5461	130	22.08
5326	152	22.25
5326 2	152	22.28
5329	152	23.00
5409	750	23.06
5329 2	152	23.08
81811	751	23.32
81814	751	23.42
5464	750	23.57
81811 2	751	0.17
81814 2	751	1.04
5409a	181	2.29
51610	130	3.15
70121	130	3.40
5321	152	4.21
5321 2	152	4.25
5430	363	4.30
5320	152	4.59
5420	130	5.03
5320 2	152	5.06
70130	751	5.12
5331	152	5.17
5331 2	152	5.21
5431	130	5.27
5432	130	5.42
5322	152	5.44
5611	130	5.49
5322 2	152	5.52
5330	152	6.13
5303	152	6.16
5434	130	6.23
5303 2	152	6.28
5613	130	6.31
5300	750	6.49
53002	750	6.54
5450	130	7.09
1681	163	7.13
5333	152	7.15
1981	750	7.28
5451	130	7.32
1981 2	750	7.35
5302	152	7.53
5452	130	7.54
5302 2	152	7.59

**část d) Schéma umístění tenzometrů**

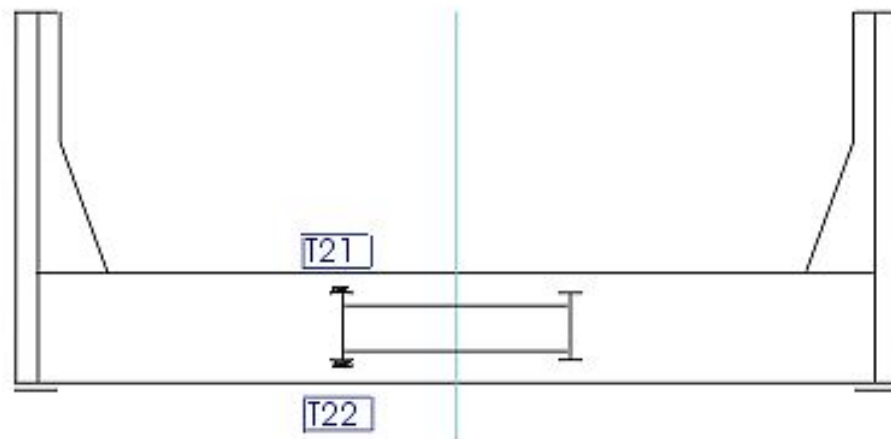
Rez A-A hlavní nosník



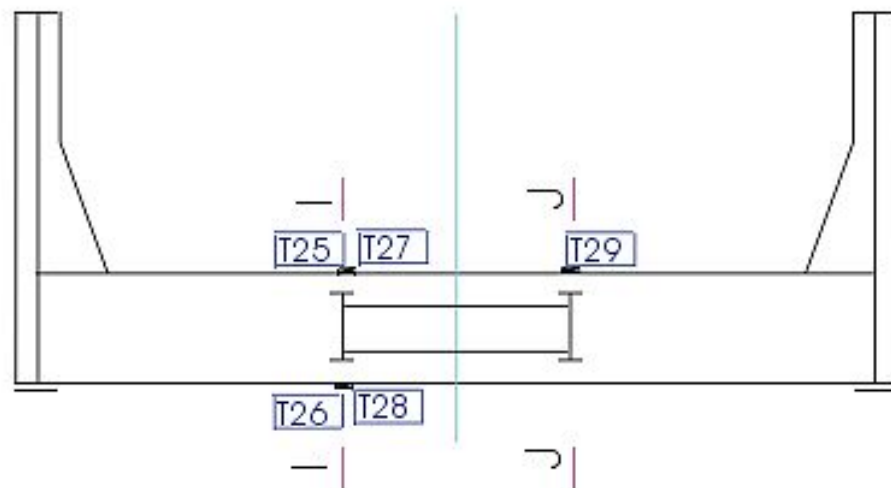
Rez B-B hlavní nosník



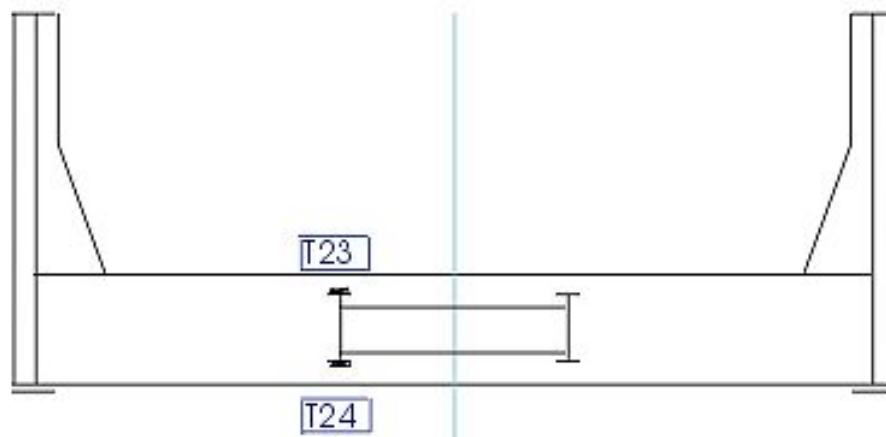
Rez F-F podélník



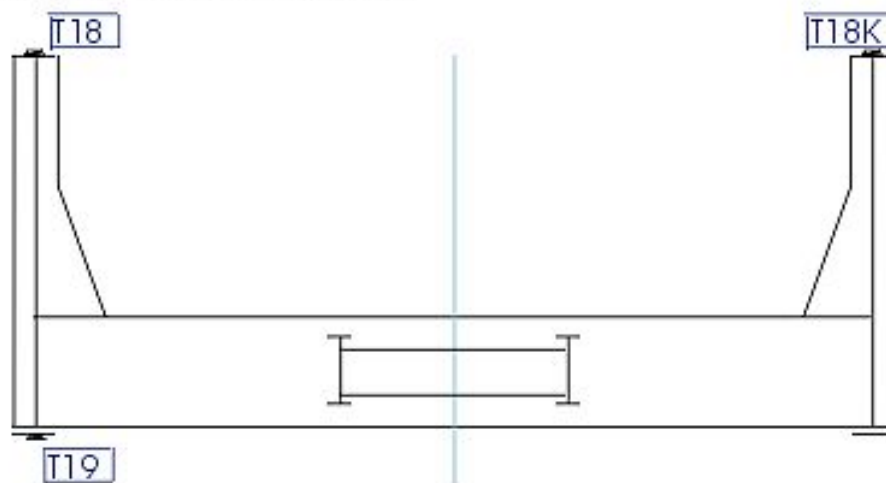
Rez G-G příčnik



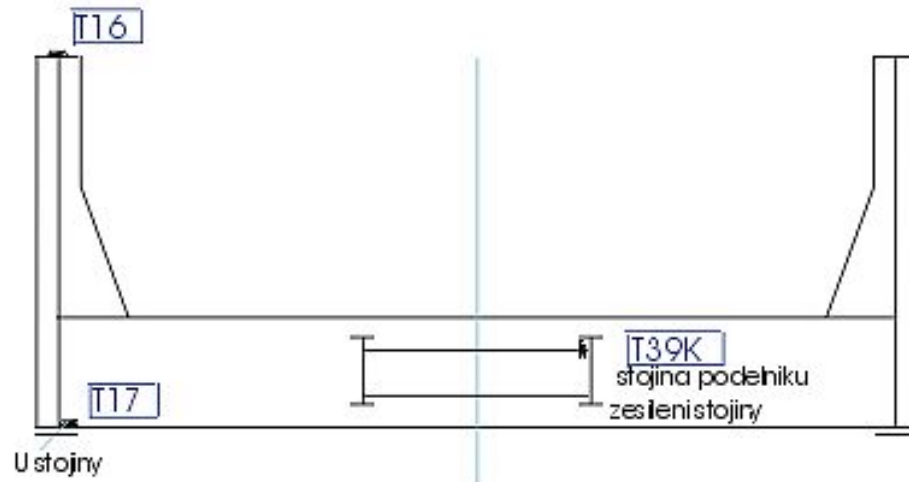
Rez H-H podélník



Rez K-K hlavní nosník

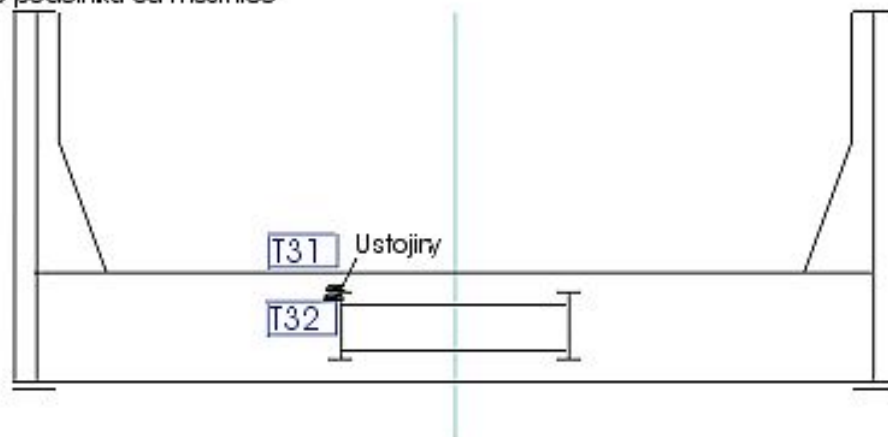


### Rez C-C hlavní nosník



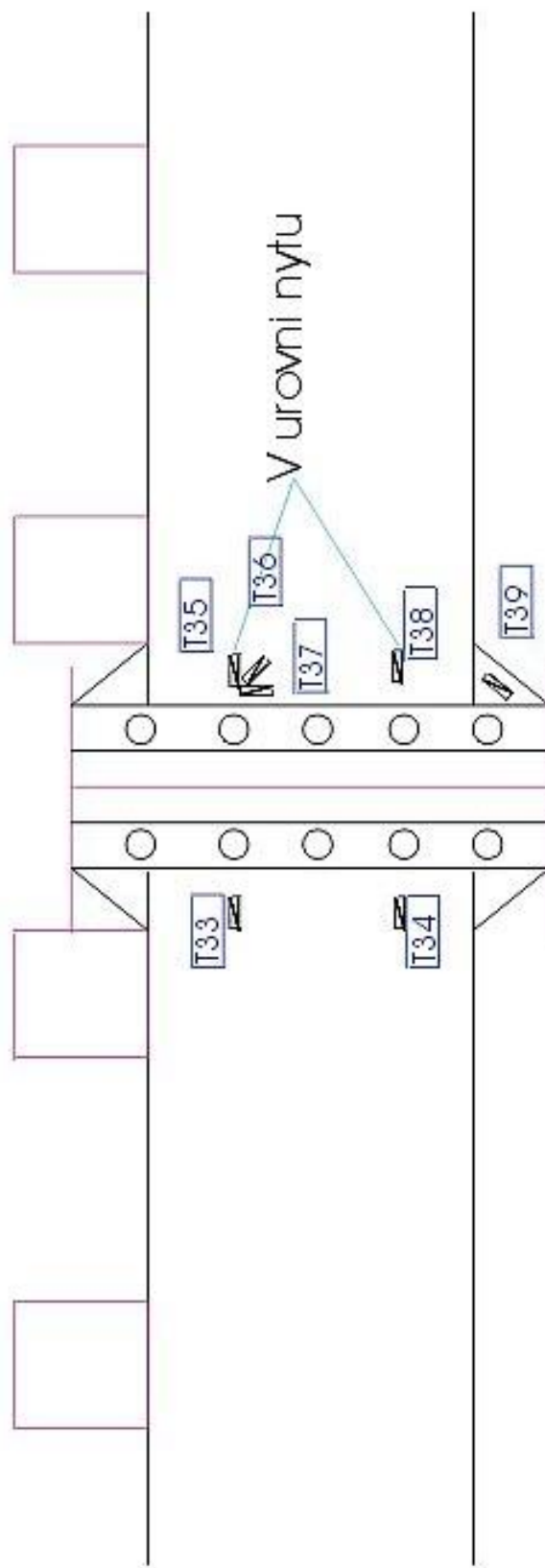
### Rez D-D

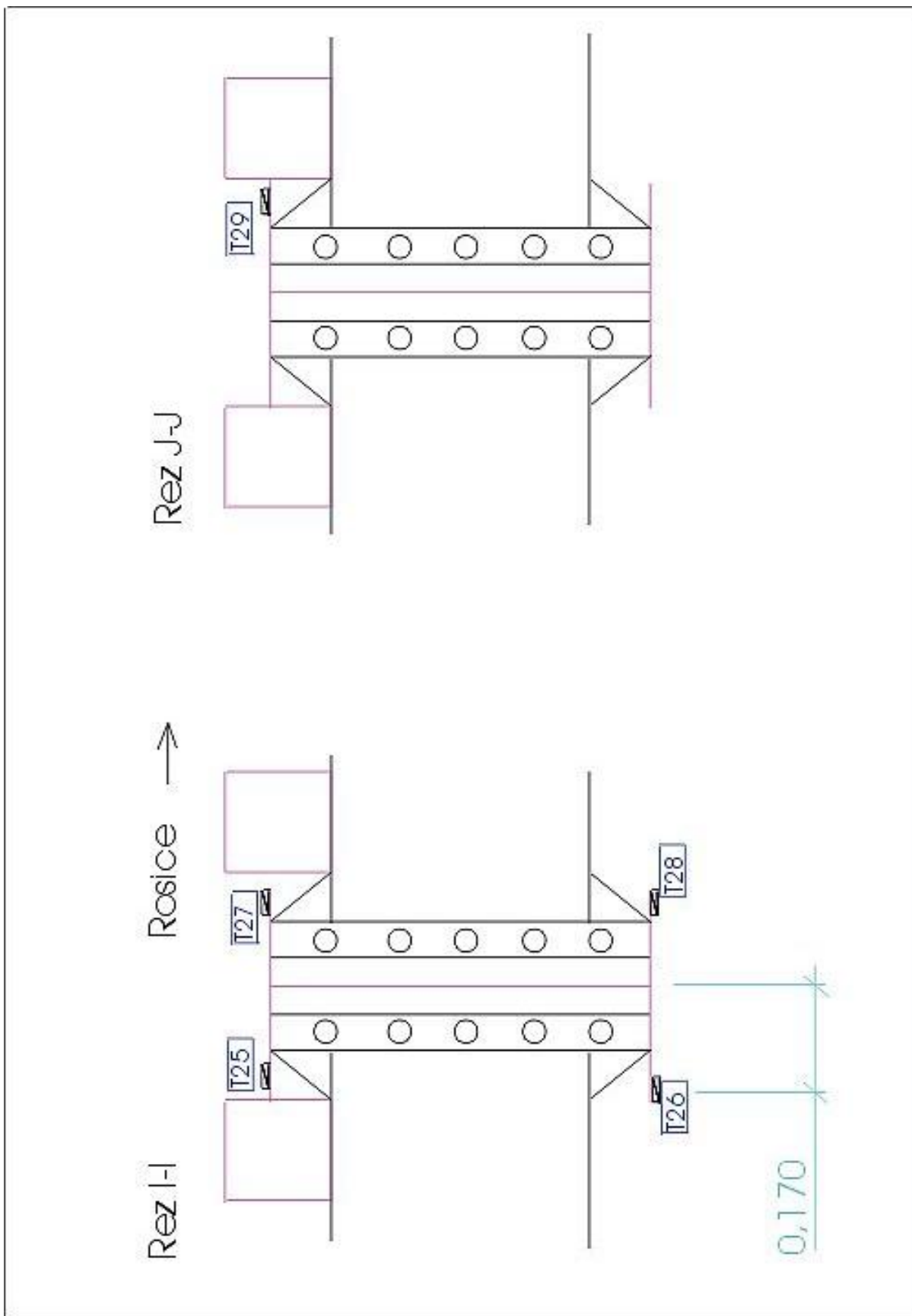
chyb podélníku od mostnice





Detail E  
pripojení podélníku na příčník





## **Příloha č.3.**

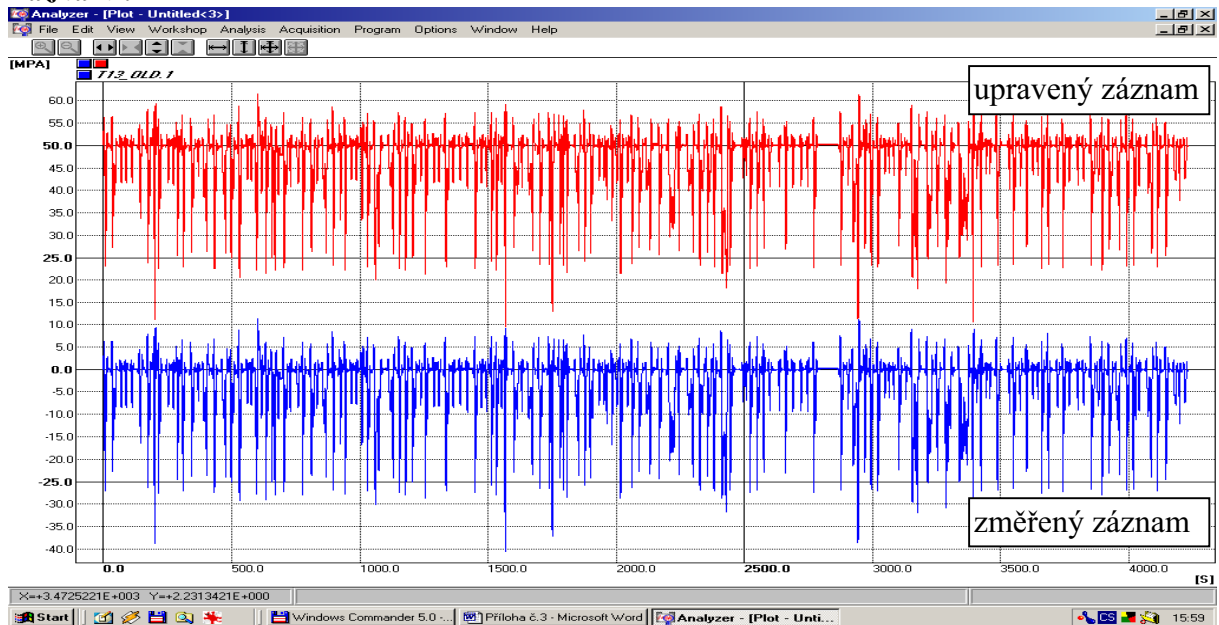
**Odstranění mezilehlých hodnot ze zaznamenaného signálu napětí**

Ukázky záznamů napětí (T13, T29, T39K) jsou z tenzometrického měření železničního ocelového mostu přes Labe. Popis měření včetně umístění snímačů na mostě je uveden v příloze č.2. Pro přehlednost byl upravený záznam posunut ve střední hodnotě o +50 MPa.

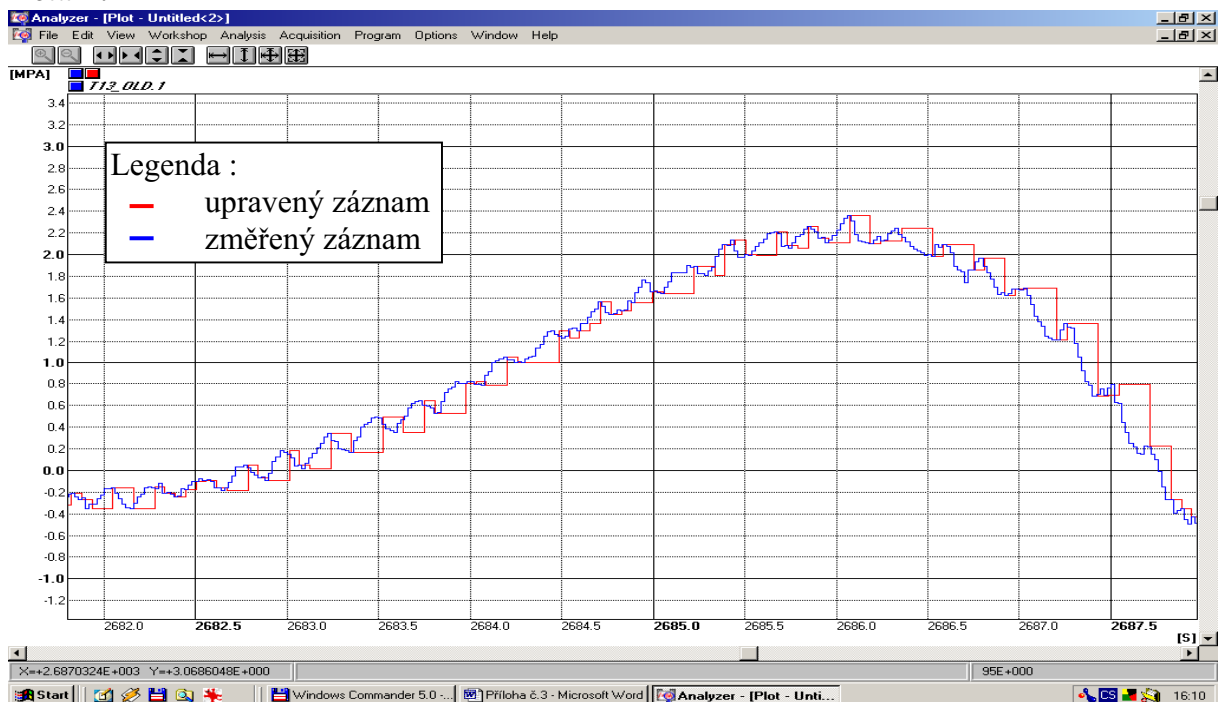
### T13 :

Typ souboru	Velikost [Byte]
změřený textový	2 044 030
upravený binární	597 000

### Záznam :



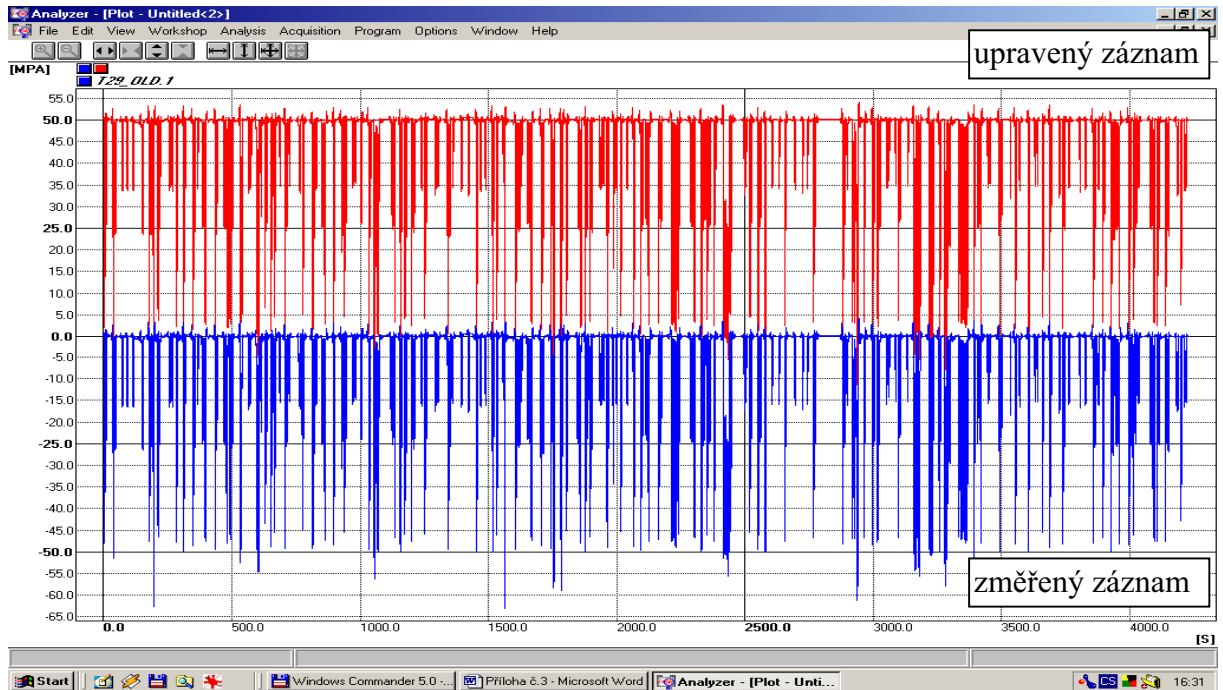
### Detail :



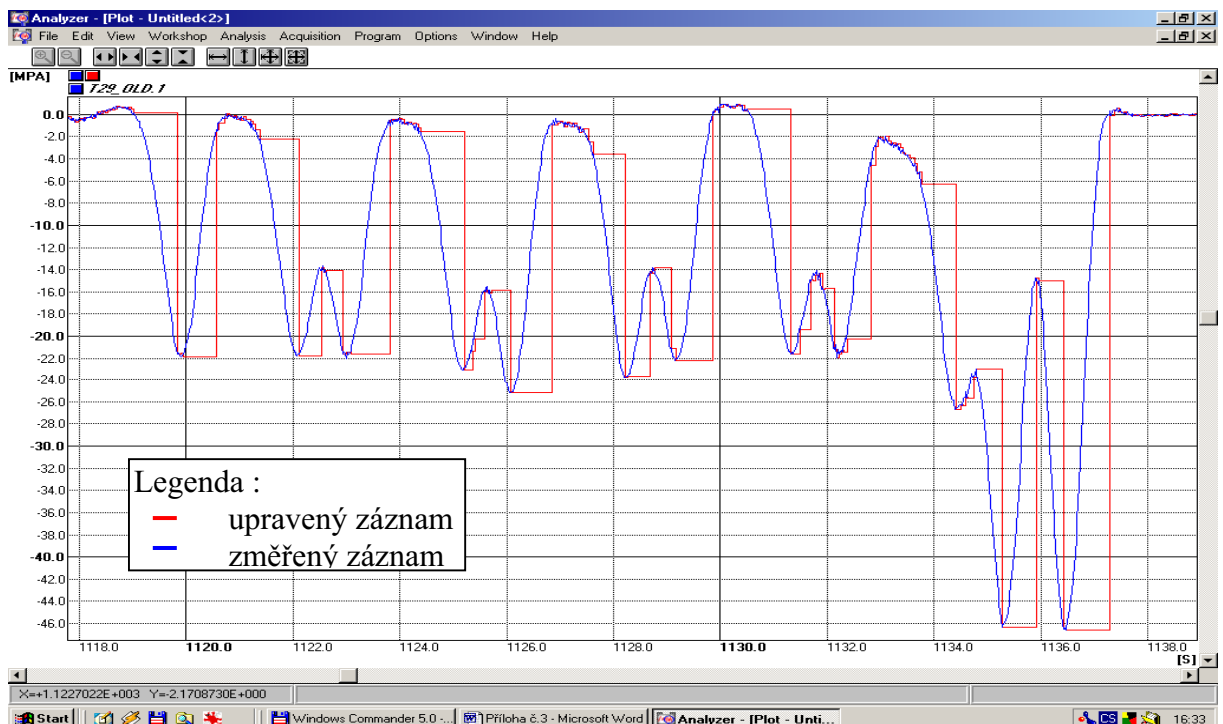
T29 :

Typ souboru	Velikost [Byte]
změřený textový	2 071 164
upravený binární	742 960

Záznam :



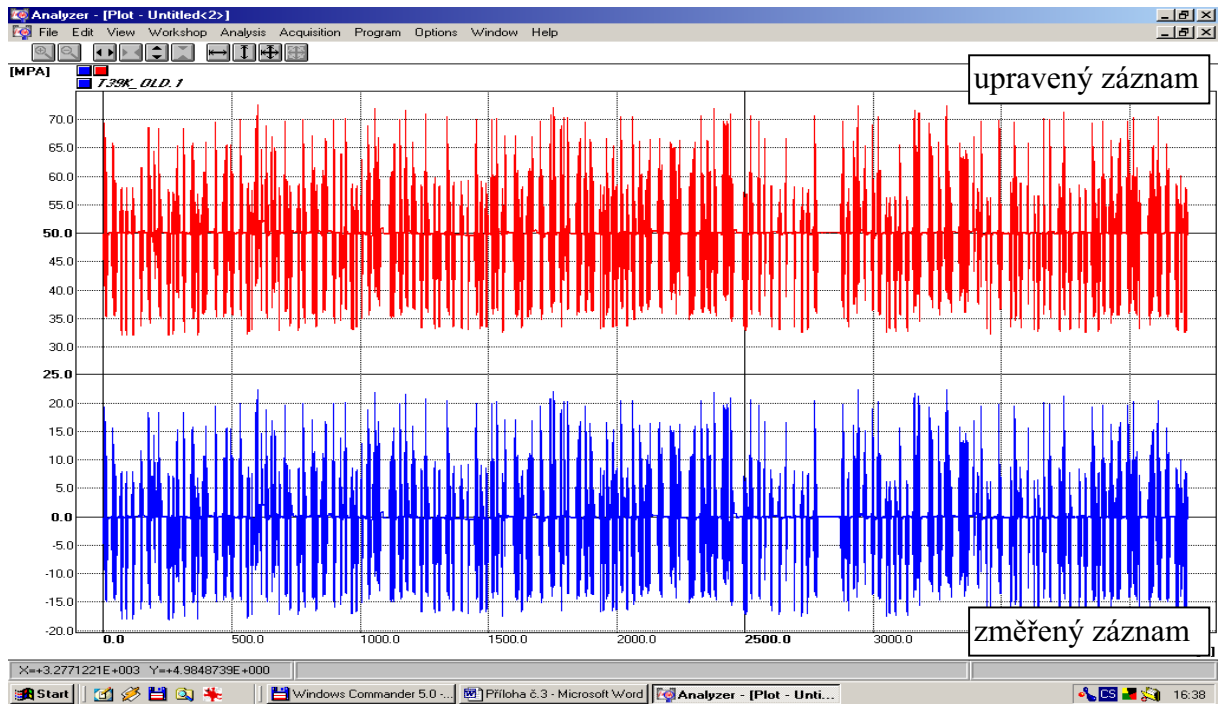
Detail :



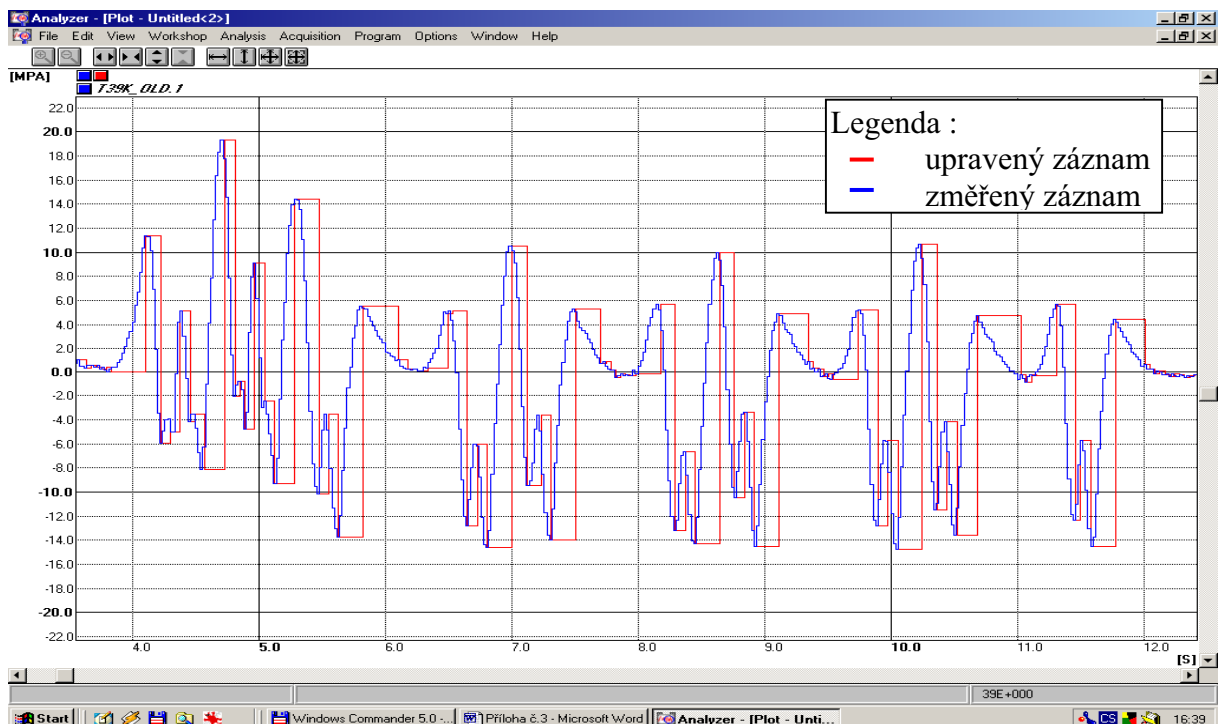
T39K :

Typ souboru	Velikost [Byte]
změřený textový	2 007 162
upravený binární	864 440

Záznam :



Detail :



## **Příloha č.4.**

**Ukázky zpracování zdrojového záznamu do podoby  
dvouparametrických matic RF**









## **Příloha č.5.**

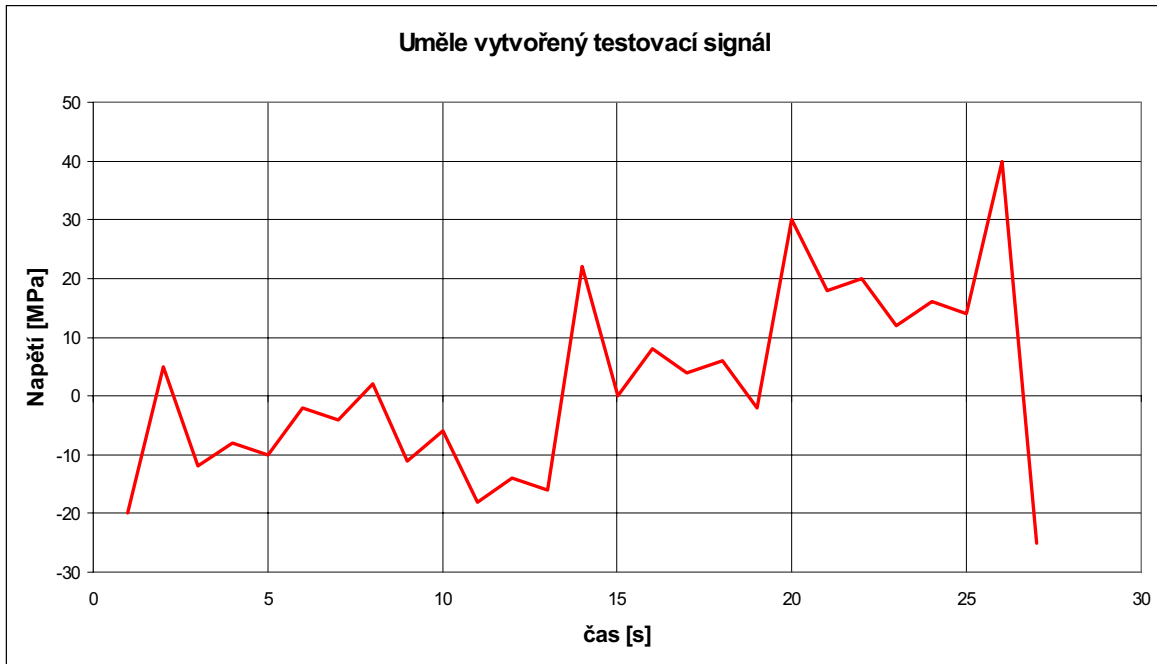
**Výpis sudé i liché větve RF provedené na testovacím záznamu**

**Uměle vytvořený záznam :**

Napětí [MPa]	-20	5	-12	-8	-10	-2	-4	2	-11	-6	-18	-14	-16
Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Napětí [MPa]	22	0	8	4	6	-2	30	18	20	12	16	14	40	-25
Čas [s]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

**Grafické znázornění uměle vytvořeného signálu :**



**Výpis hodnot pro sudou a lichou větve RF :**

	amplituda	střední hodnota	maximum	minimum
<b>sudá větev</b>	3,00E+01	1,00E+01	4,00E+01	-2,00E+01
	7,00E+00	-5,00E+00	2,00E+00	-1,20E+01
	1,00E+00	-9,00E+00	-8,00E+00	-1,00E+01
	1,00E+00	-3,00E+00	-2,00E+00	-4,00E+00
	2,50E+00	-8,50E+00	-6,00E+00	-1,10E+01
	1,15E+01	-6,50E+00	5,00E+00	-1,80E+01
	1,00E+00	-1,50E+01	-1,40E+01	-1,60E+01
	4,00E+00	4,00E+00	8,00E+00	0,00E+00
	1,00E+00	5,00E+00	6,00E+00	4,00E+00
	1,20E+01	1,00E+01	2,20E+01	-2,00E+00
	1,00E+00	1,90E+01	2,00E+01	1,80E+01
	9,00E+00	2,10E+01	3,00E+01	1,20E+01
	1,00E+00	1,50E+01	1,60E+01	1,40E+01



## **Příloha č.6.**

**Testy RF programu „Plzen“ provedené pomocí programu DISYS  
od firmy MERLIN**











## **Příloha č.7.**

**Ukázky původní matice RF a generovaných matic RF**













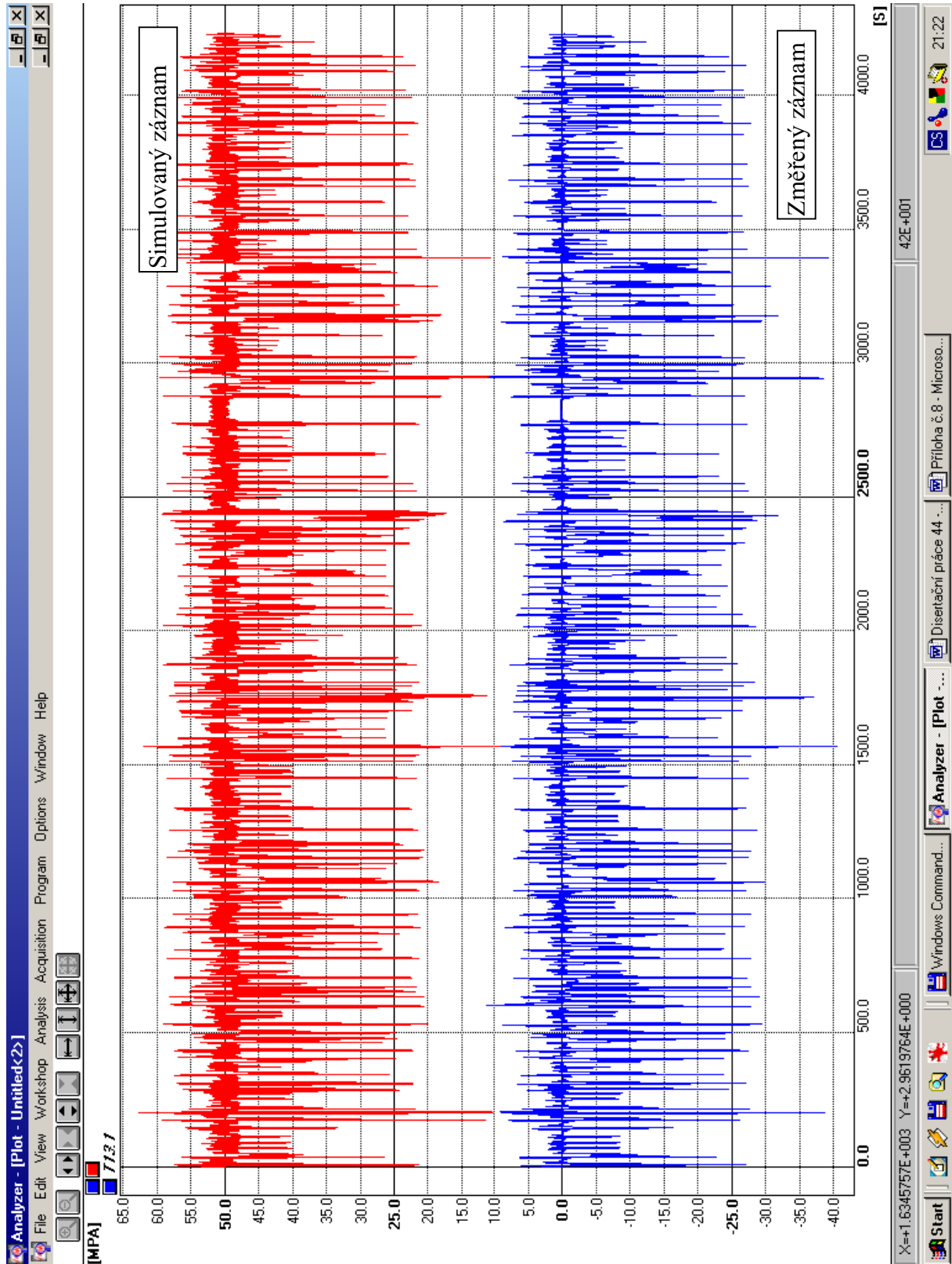


## **Příloha č.8.**

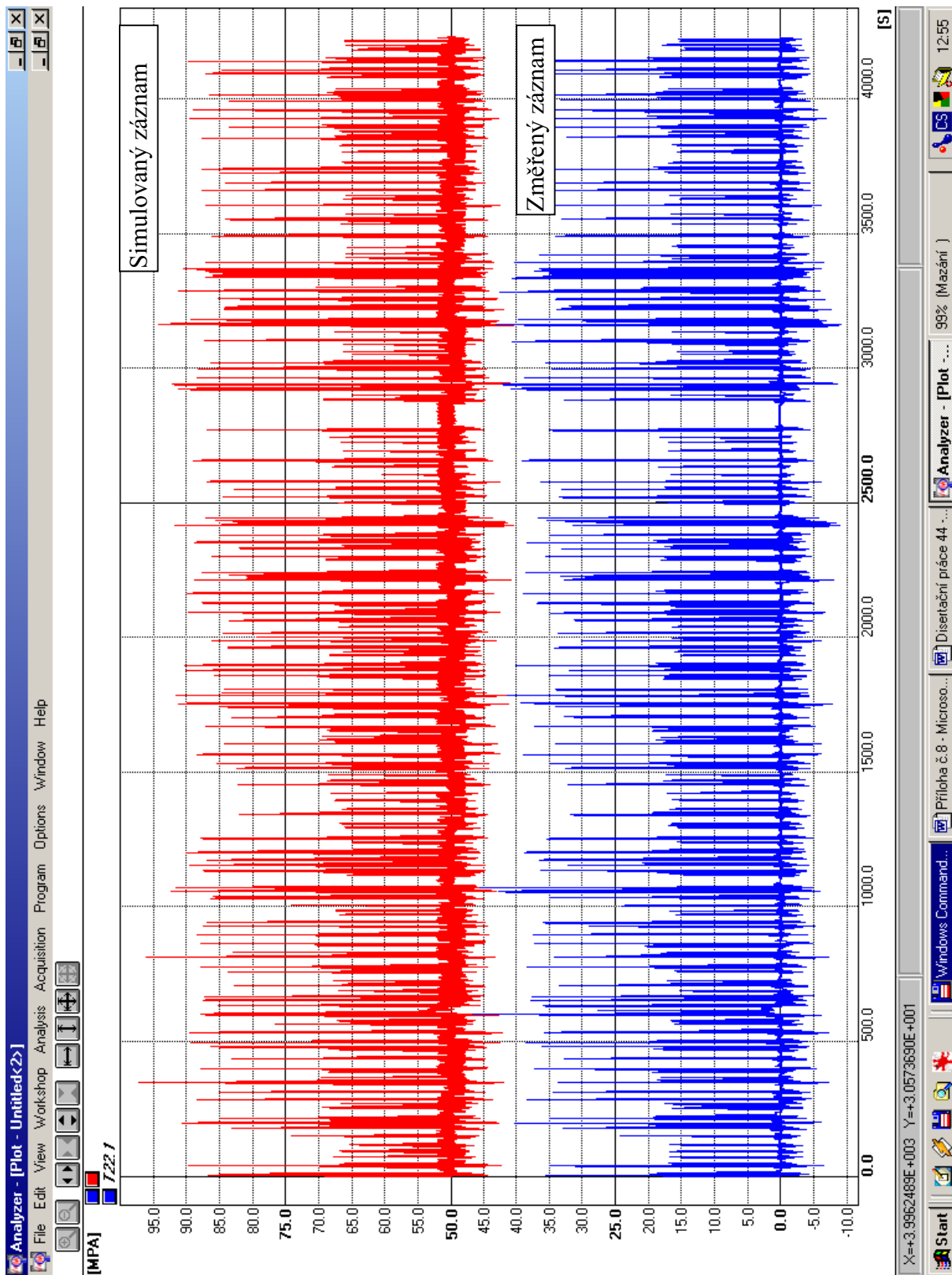
**Reálné simulace záznamů a jejich porovnání se změřenými  
záznamy**

Simulace byly provedeny na reálných záznamech získaných z tenzometrického měření železničního ocelového mostu pře Labe (příloha č.2). Simulované záznamy byly z důvodu větší přehlednosti posunuty o 50 MPa (T13, T22 a T29) a 15 MPa (T37).

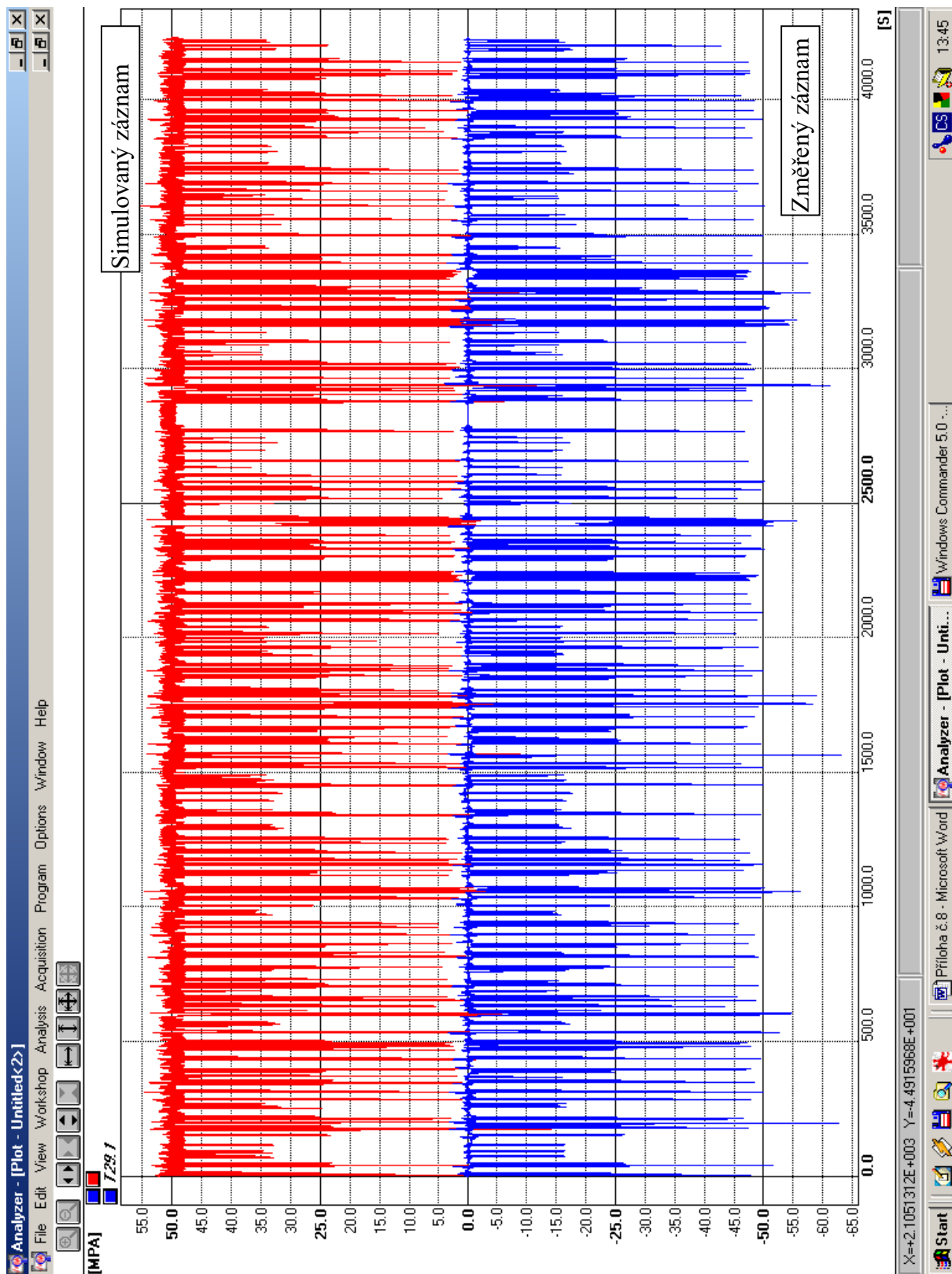
### Tenzometr T13 :



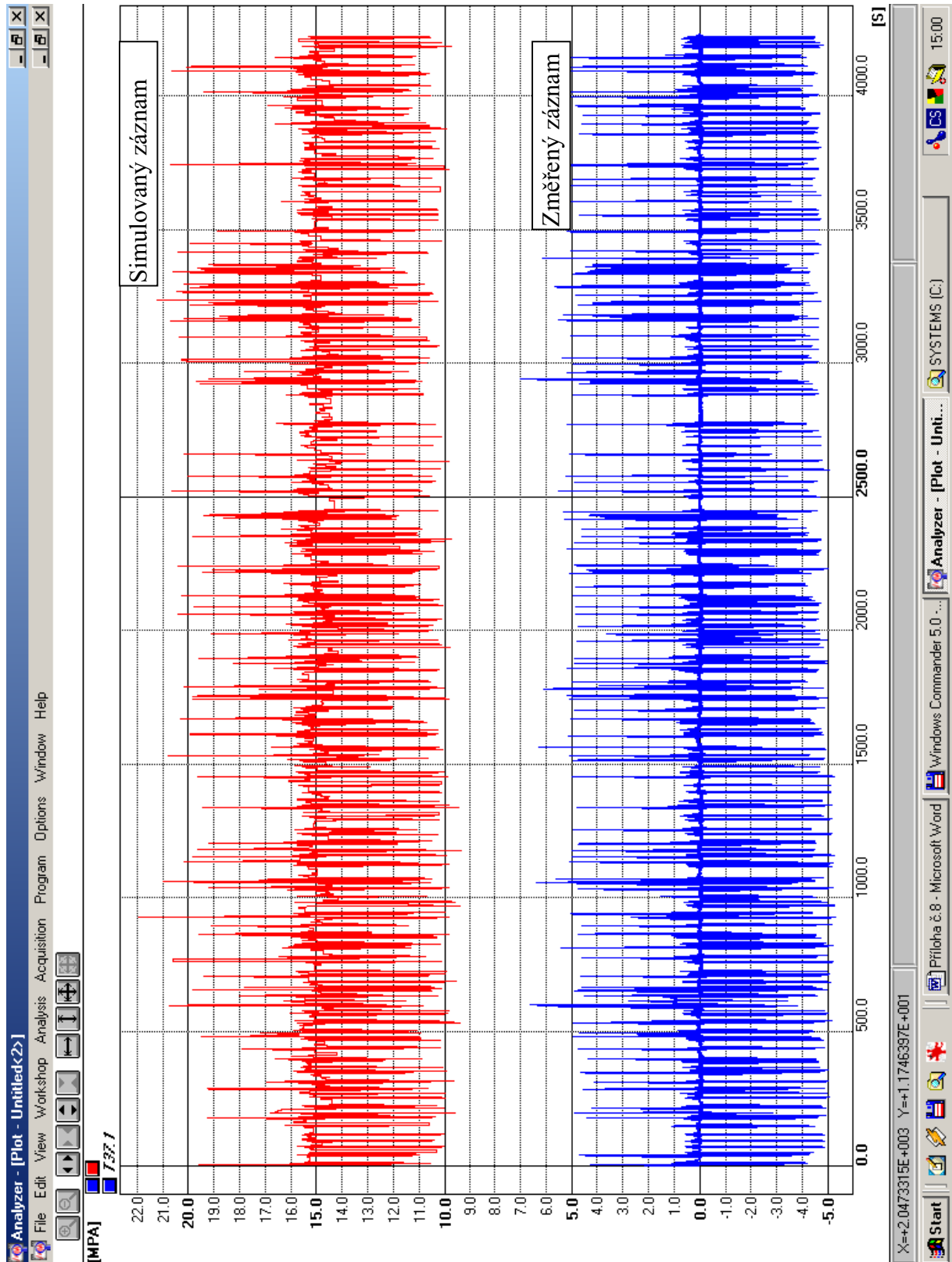
Tenzometr T22 :



Tenzometr T29 :



Tenzometr T37 :



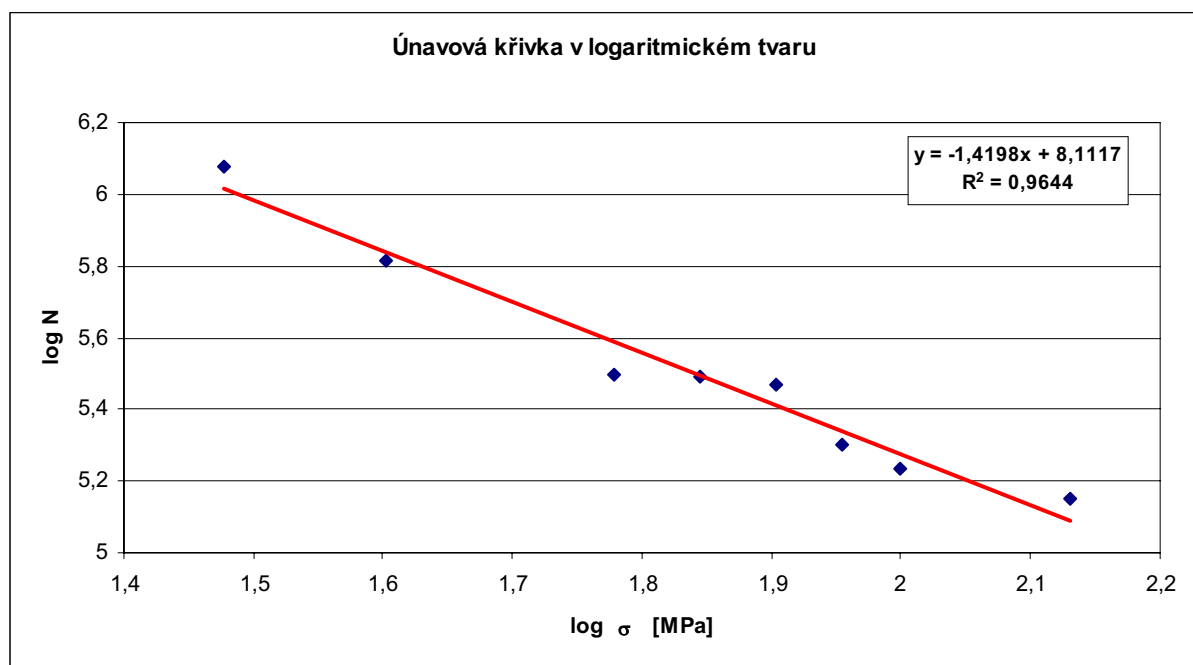
## **Příloha č.9.**

**Ukázky změřené únavové křivky a vygenerovaných únavových křivek**

Experimentálně změřené souřadnice únavové křivky byly poskytnuty Škodou výzkum s.r.o. Plzeň v rámci grantové úlohy č. 15-00/189/99. Porovnání experimentální křivky s křivkami generovanými je provedeno tabulkově a graficky. Křivka je v rozporu s normou [3] daná pouze 8 body.

Experimentálně daná únavová křivka :

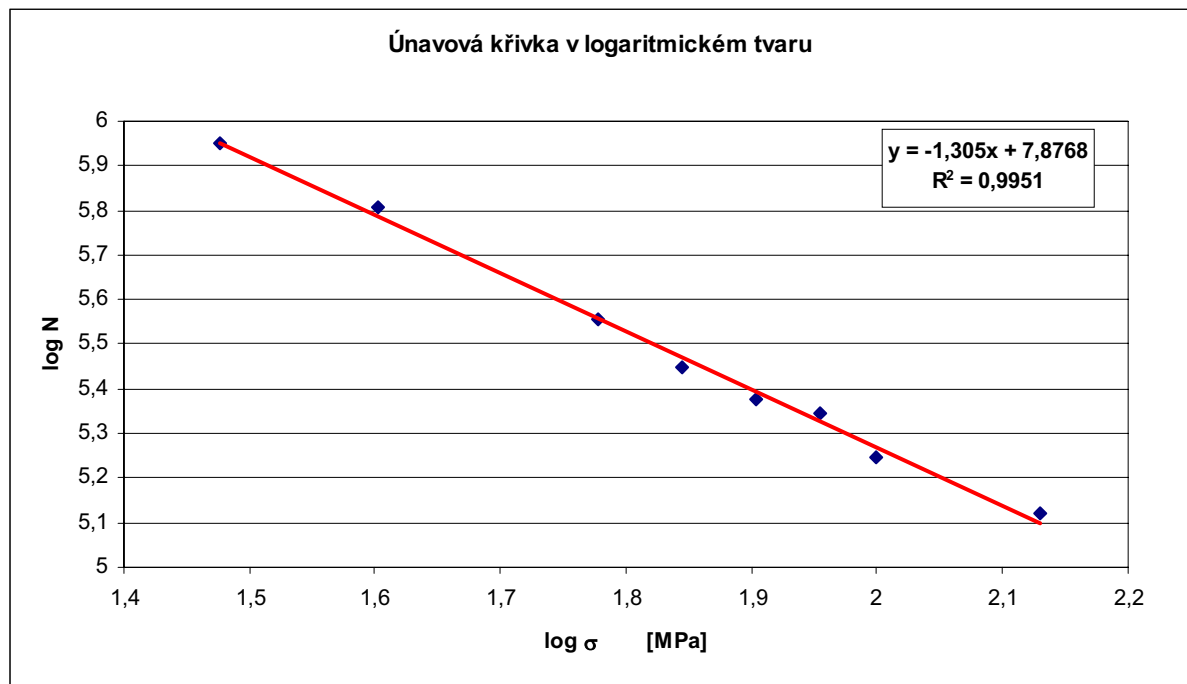
Amplituda [MPa]	počet cyklů do lomu
135	1.41E+05
100	
90	2.00E+05
80	2.96E+05
70	3.11E+05
60	3.12E+05
40	6.50E+05
30	1.20E+06



Generovaná křivka č.1 :

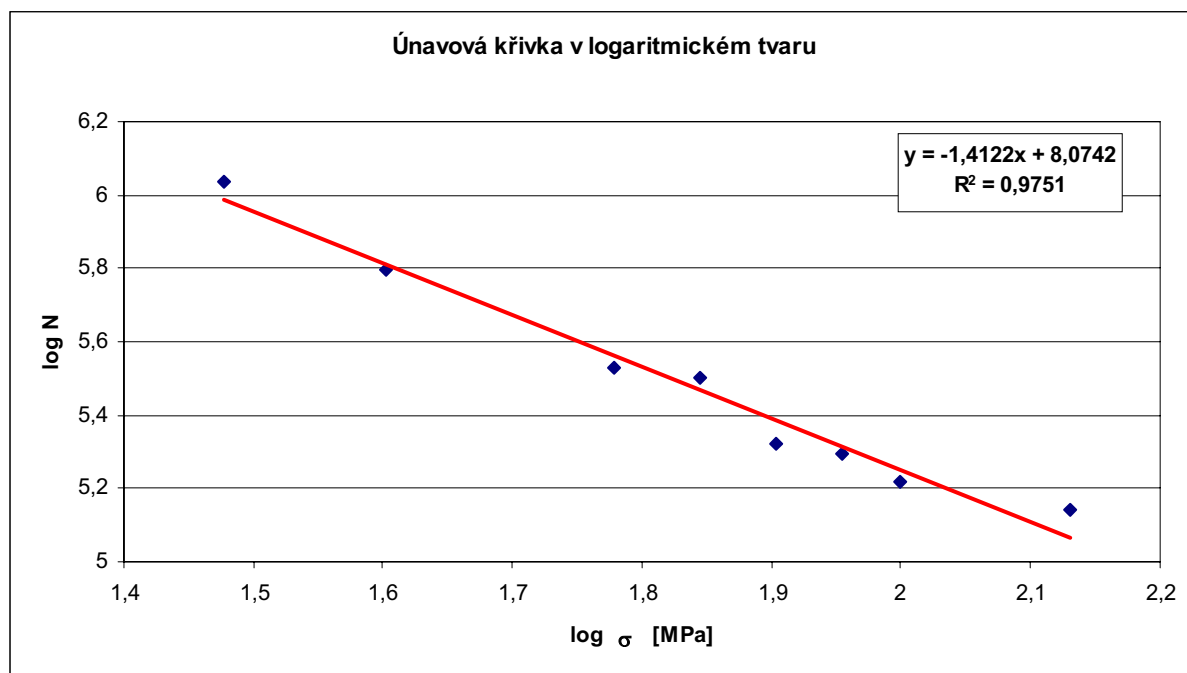
Amplituda [MPa]	počet cyklů do lomu
1,35E+02	1,33E+05
1,00E+02	1,76E+05
9,00E+01	2,21E+05
8,00E+01	2,37E+05
7,00E+01	2,80E+05
6,00E+01	3,59E+05
4,00E+01	6,40E+05
3,00E+01	8,89E+05





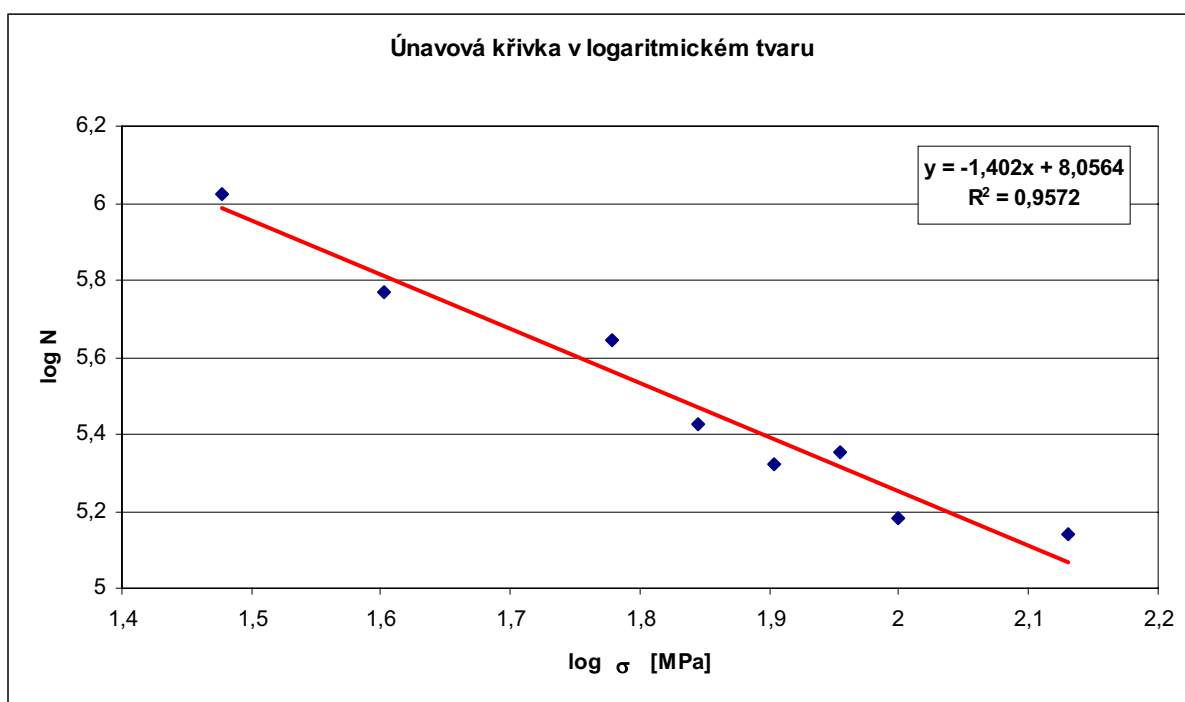
Generovaná křivka č.2 :

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,39E+05
1,00E+02	1,66E+05
9,00E+01	1,98E+05
8,00E+01	2,10E+05
7,00E+01	3,18E+05
6,00E+01	3,38E+05
4,00E+01	6,25E+05
3,00E+01	1,09E+06



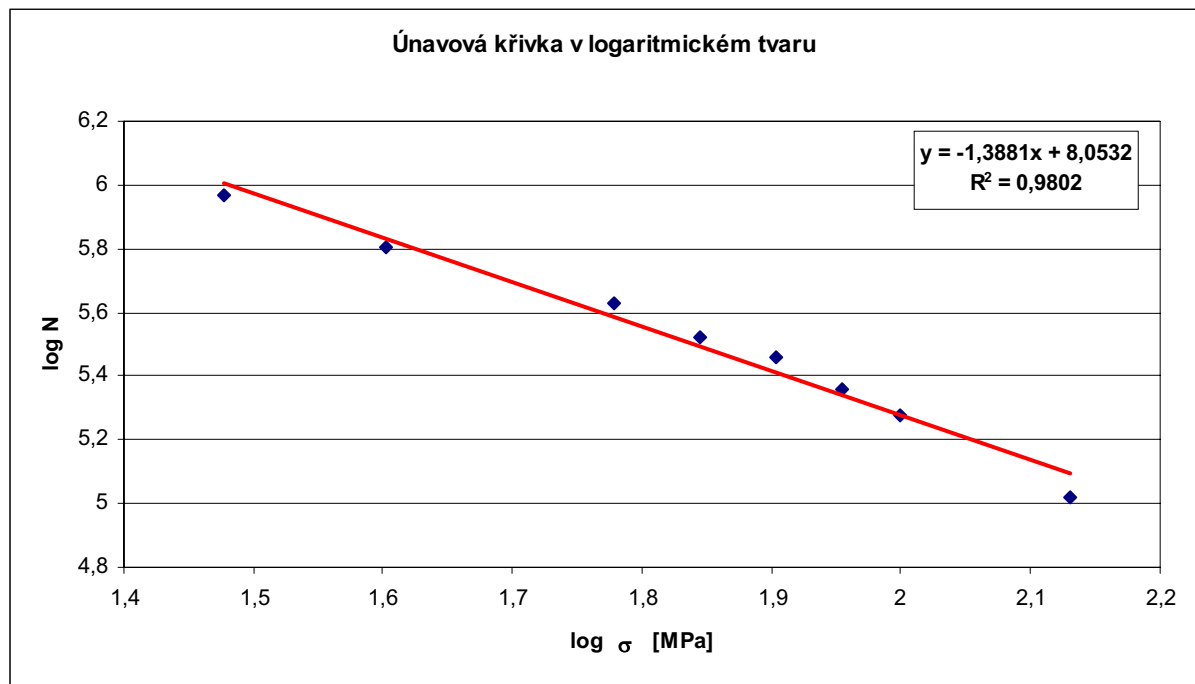
Generovaná křivka č.3 :

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,38E+05
1,00E+02	1,51E+05
9,00E+01	2,26E+05
8,00E+01	2,10E+05
7,00E+01	2,65E+05
6,00E+01	4,43E+05
4,00E+01	5,87E+05
3,00E+01	1,05E+06



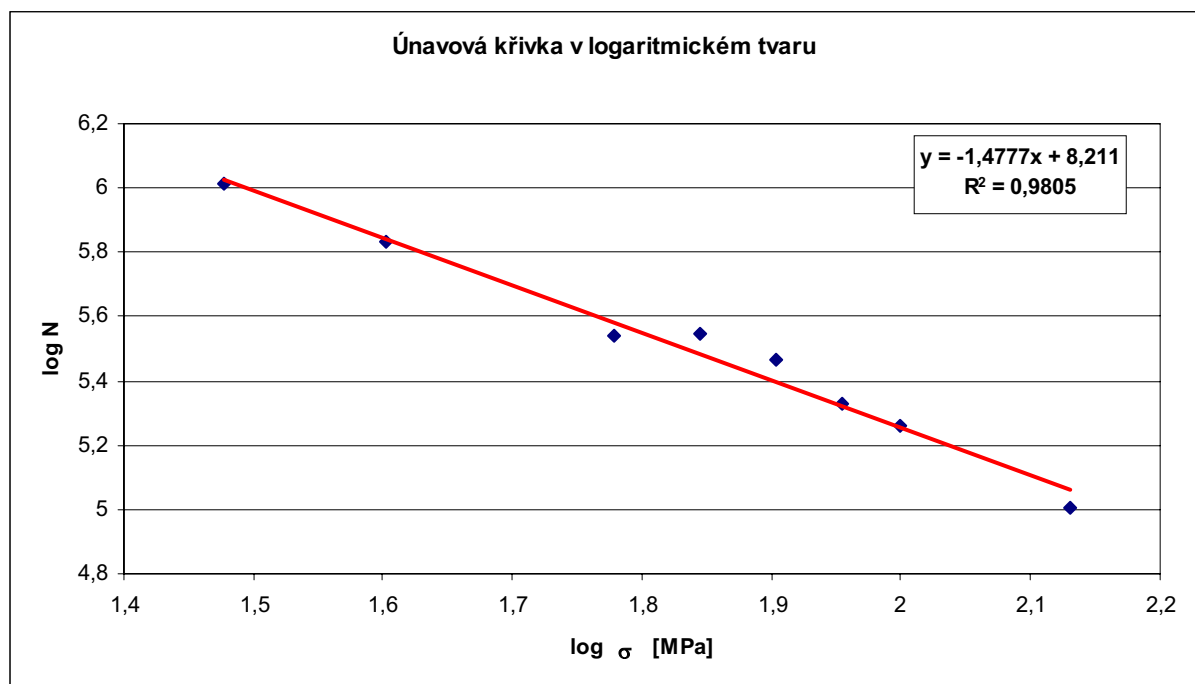
Generovaná křivka č.4 :

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,05E+05
1,00E+02	1,89E+05
9,00E+01	2,28E+05
8,00E+01	2,87E+05
7,00E+01	3,32E+05
6,00E+01	4,24E+05
4,00E+01	6,38E+05
3,00E+01	9,26E+05



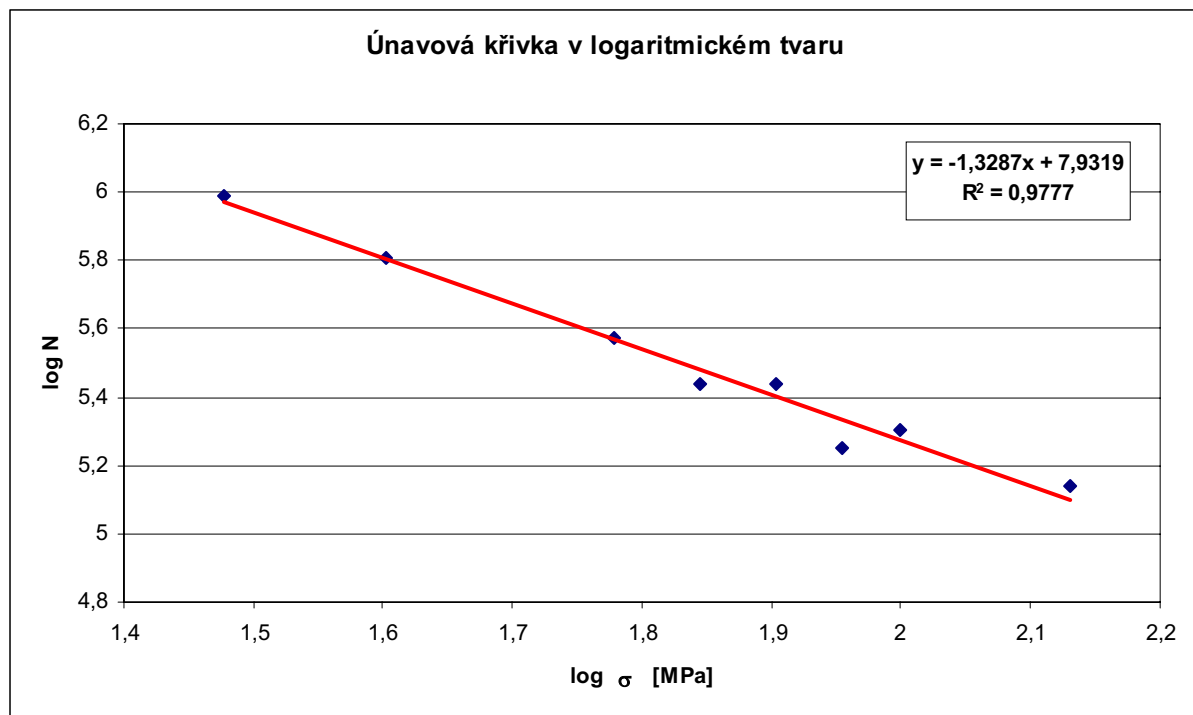
Generovaná křivka č.5 :

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,01E+05
1,00E+02	1,81E+05
9,00E+01	2,13E+05
8,00E+01	2,90E+05
7,00E+01	3,51E+05
6,00E+01	3,45E+05
4,00E+01	6,81E+05
3,00E+01	1,02E+06



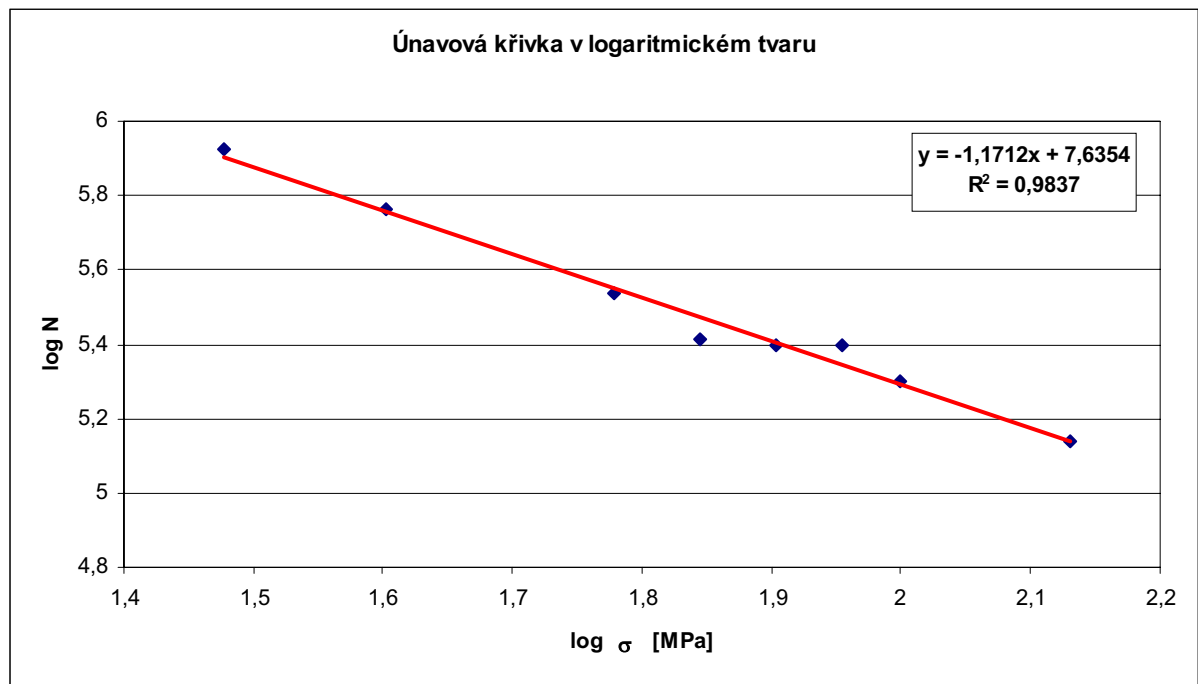
Generovaná křivka č.6 :

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,37E+05
1,00E+02	2,02E+05
9,00E+01	1,78E+05
8,00E+01	2,75E+05
7,00E+01	2,74E+05
6,00E+01	3,75E+05
4,00E+01	6,38E+05
3,00E+01	9,74E+05



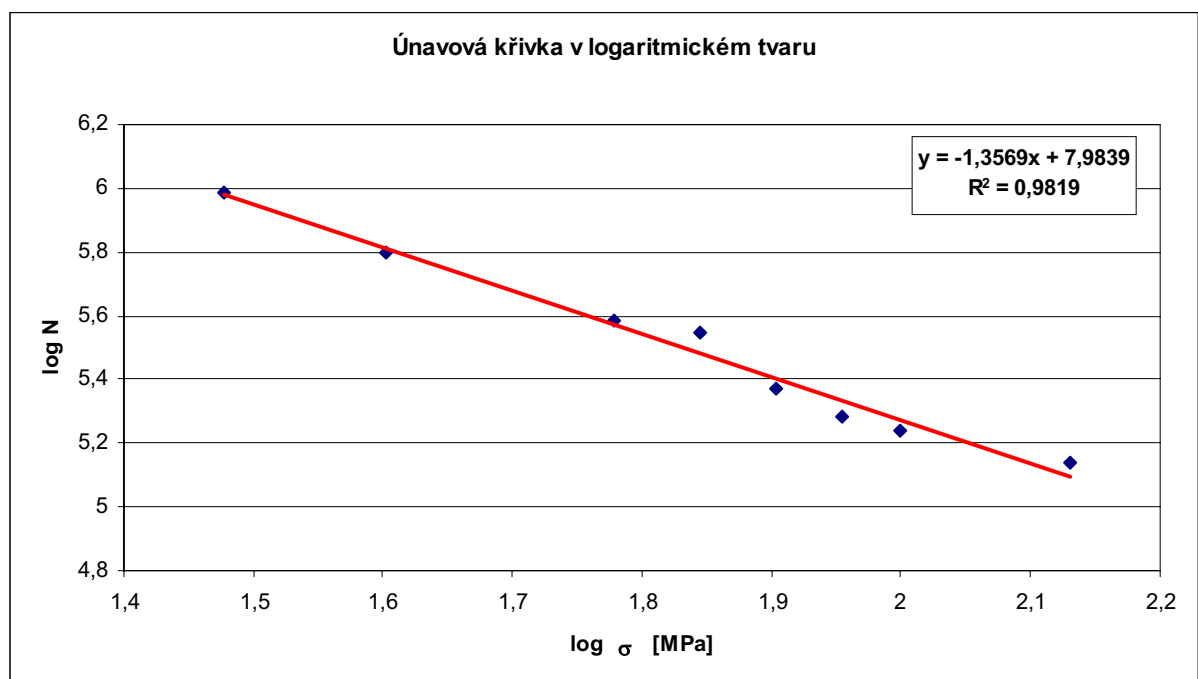
Generovaná křivka č.7:

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,38E+05
1,00E+02	2,01E+05
9,00E+01	2,50E+05
8,00E+01	2,50E+05
7,00E+01	2,59E+05
6,00E+01	3,44E+05
4,00E+01	5,78E+05
3,00E+01	8,42E+05



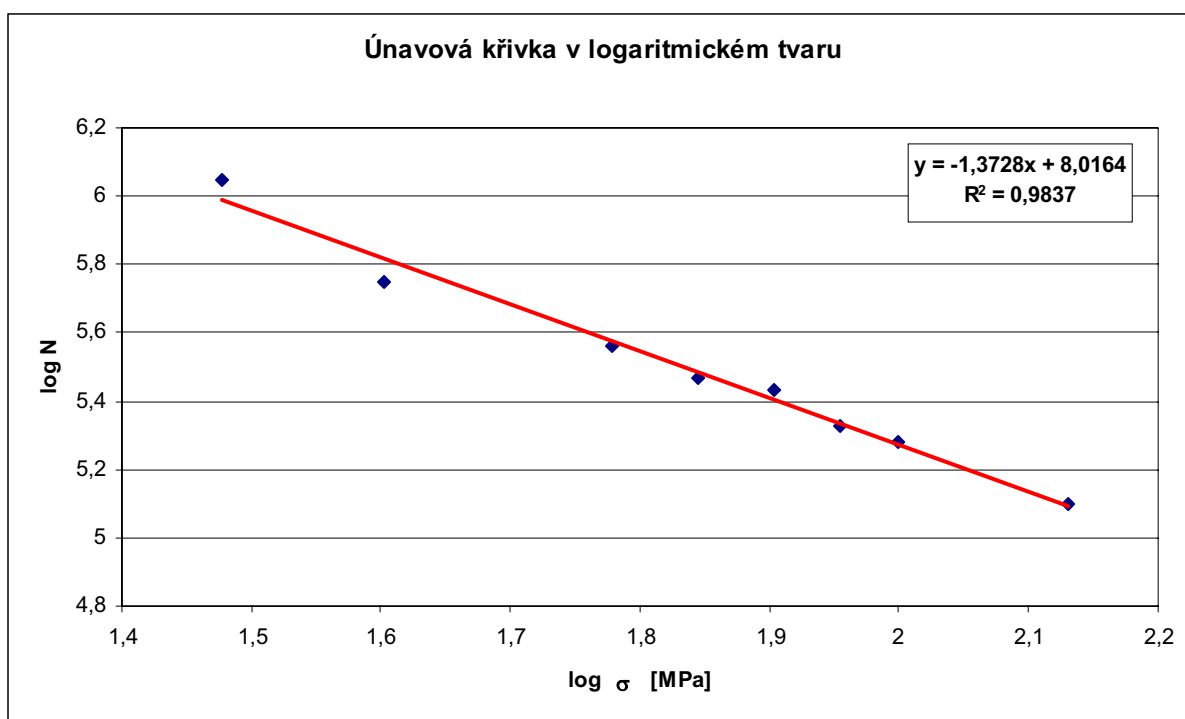
Generovaná křivka č.8:

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,37E+05
1,00E+02	1,74E+05
9,00E+01	1,91E+05
8,00E+01	2,34E+05
7,00E+01	3,50E+05
6,00E+01	3,83E+05
4,00E+01	6,27E+05
3,00E+01	9,69E+05



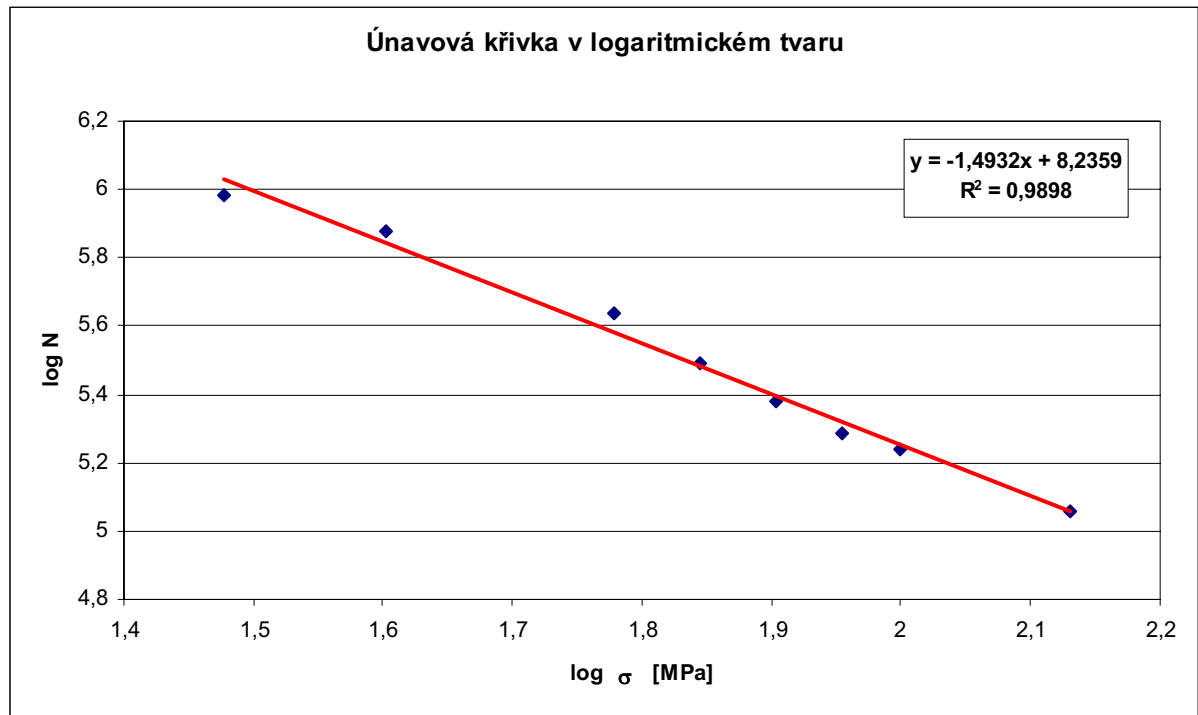
Generovaná křivka č.9:

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,25E+05
1,00E+02	1,91E+05
9,00E+01	2,12E+05
8,00E+01	2,72E+05
7,00E+01	2,95E+05
6,00E+01	3,66E+05
4,00E+01	5,58E+05
3,00E+01	1,12E+06



Generovaná křivka č.10:

Amplituda [MPa]	počet cyklů
1,35E+02	1,14E+05
1,00E+02	1,74E+05
9,00E+01	1,94E+05
8,00E+01	2,41E+05
7,00E+01	3,09E+05
6,00E+01	4,31E+05
4,00E+01	7,53E+05
3,00E+01	9,65E+05



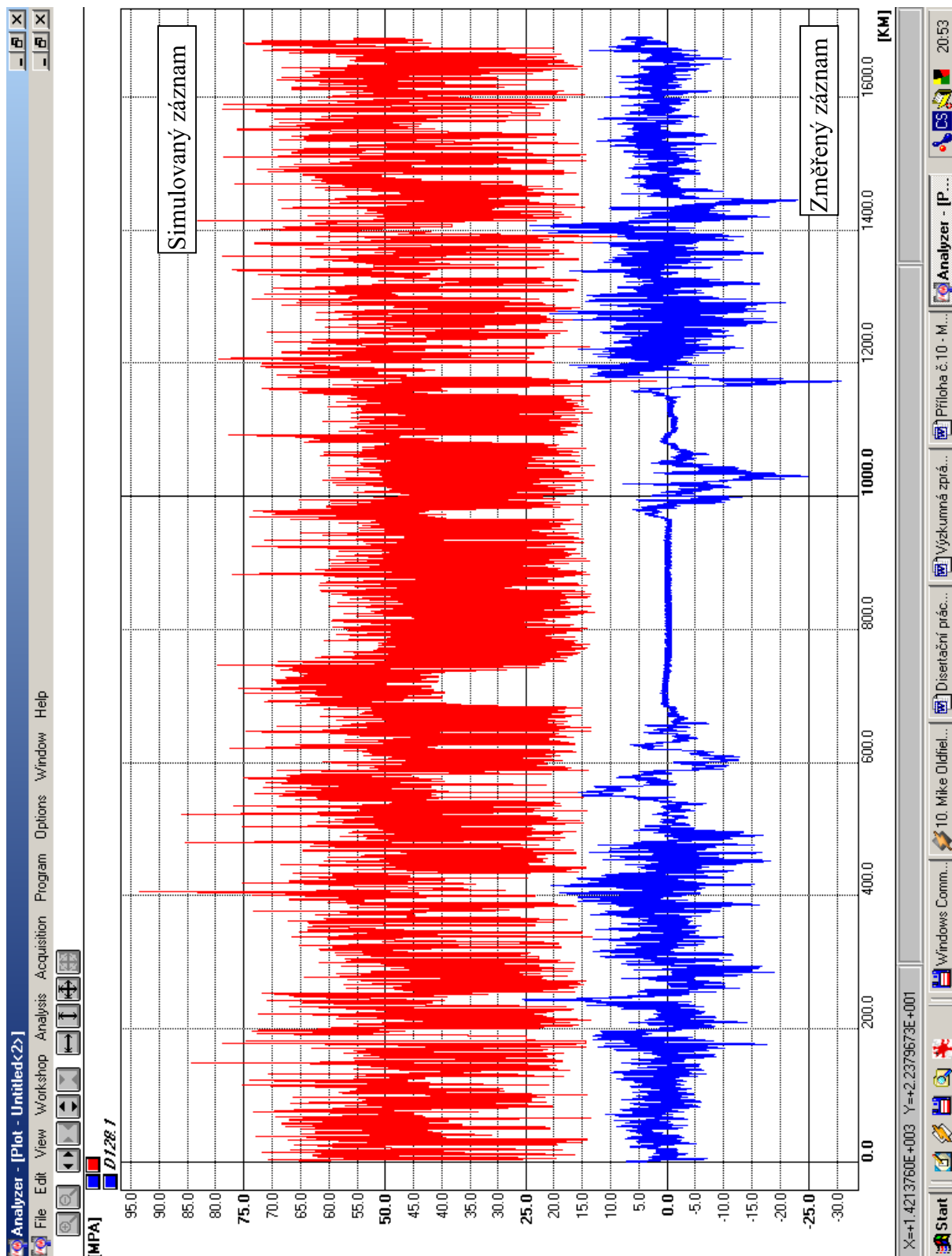
## **Příloha č.10.**

**Test citlivosti simulovaného záznamu na rozměr matice RF**

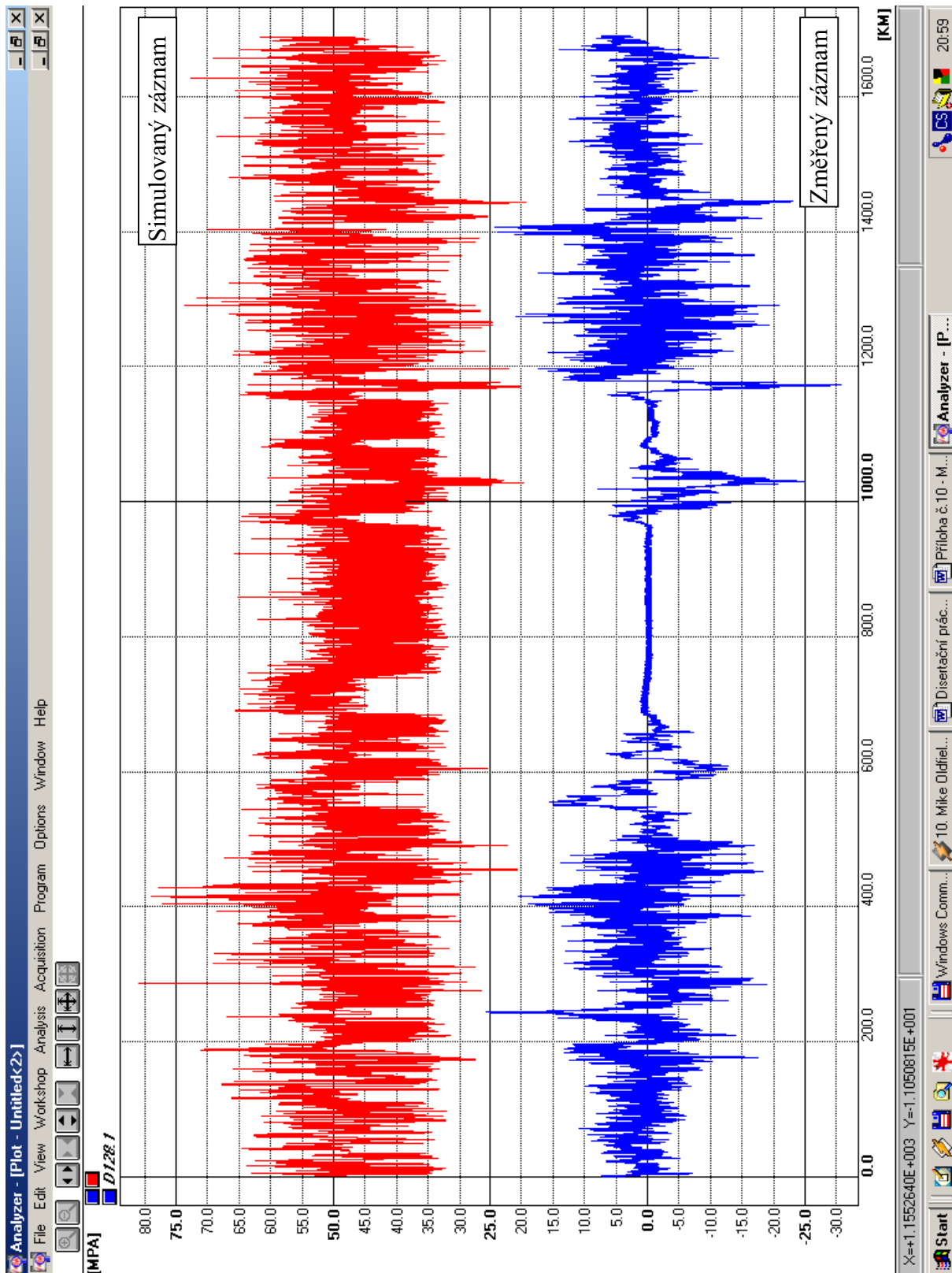


Experimentálně změřená data byla poskytnuta Škodou výzkum s.r.o. Plzeň v rámci grantové úlohy č. 15-00/189/99. Rozměr matice byl postupně zvyšován (4x4, 8x8,16x16, 32x32, 64x64). Ostatní vstupní parametry byly citlivost matice : 0.00, Max. amplituda : 50 MPa, Max. stř. hodnota : 50 MPa. Simulovaný záznam byl z důvodu lepší přehlednosti posunut o +50 MPa.

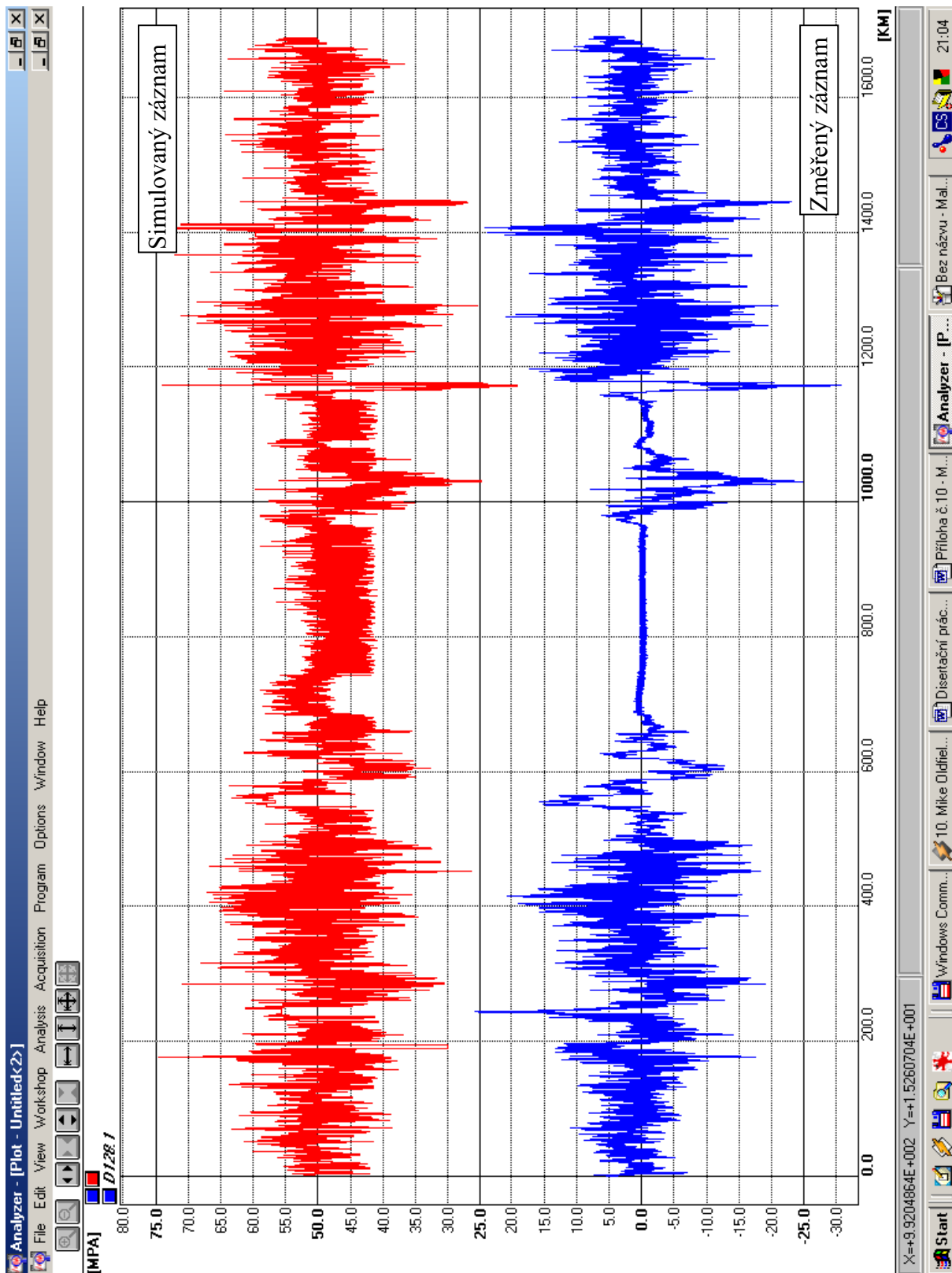
4x4 :



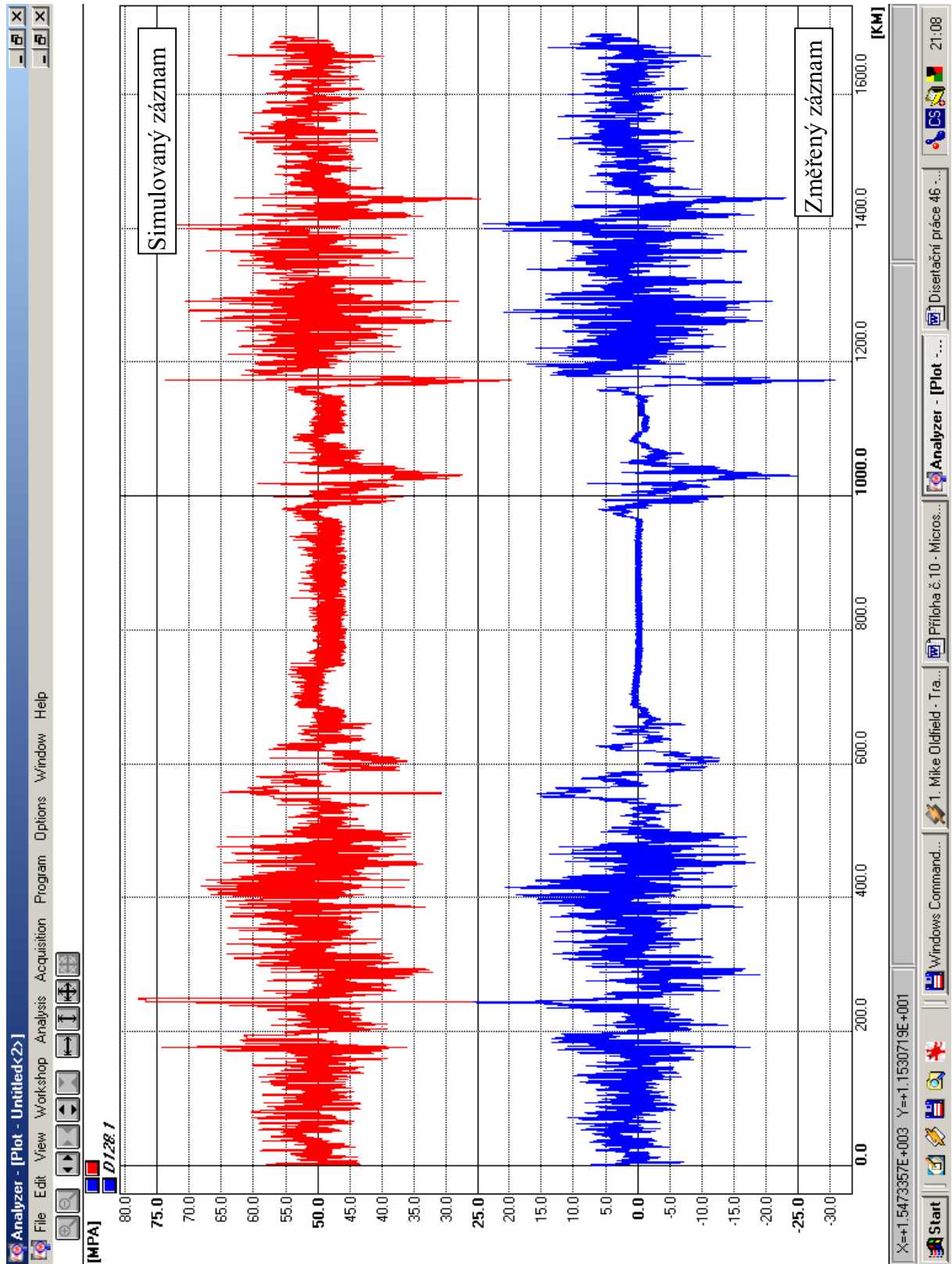
8x8 :



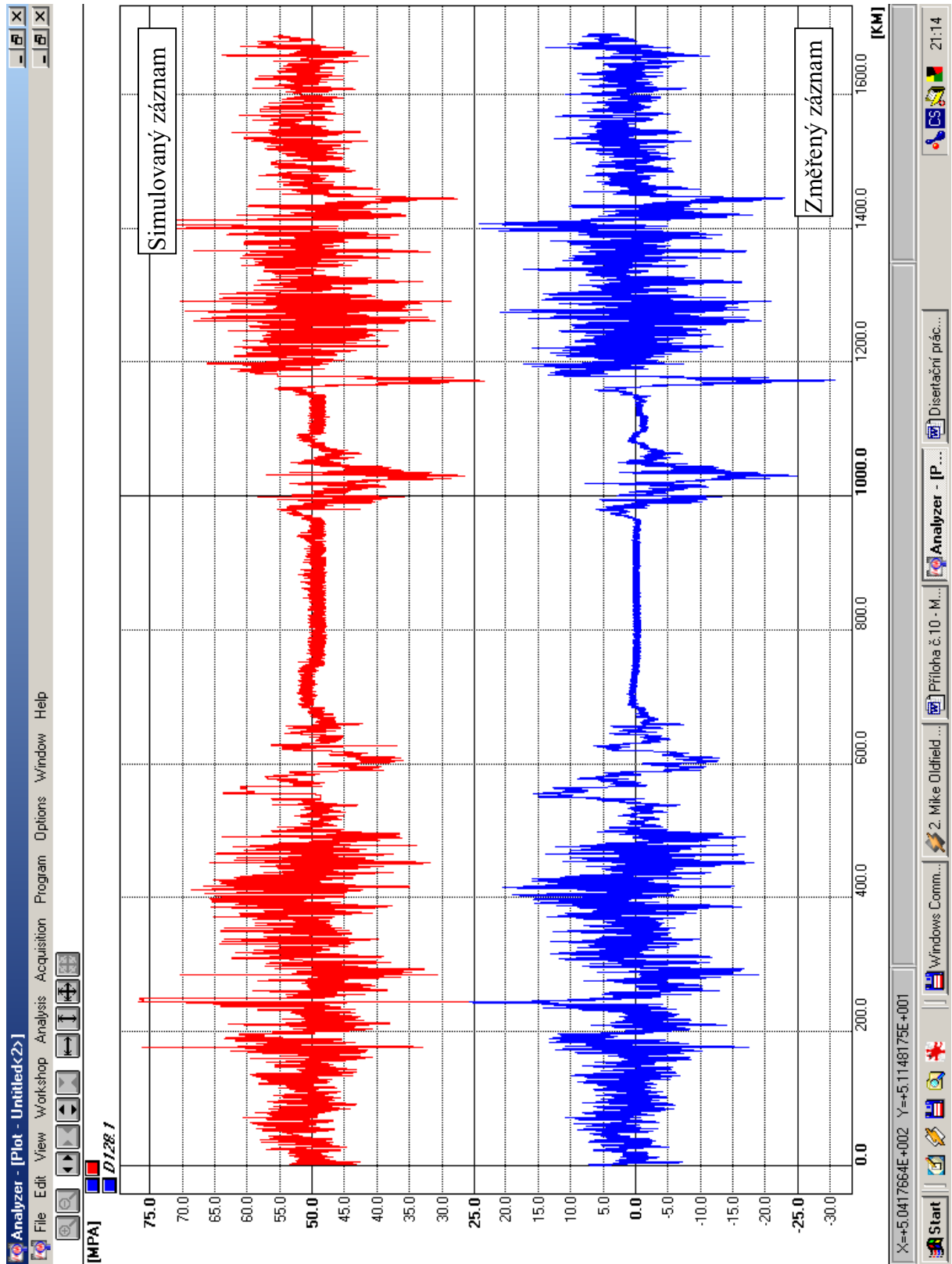
16x16 :



32x32 :



64x64 :

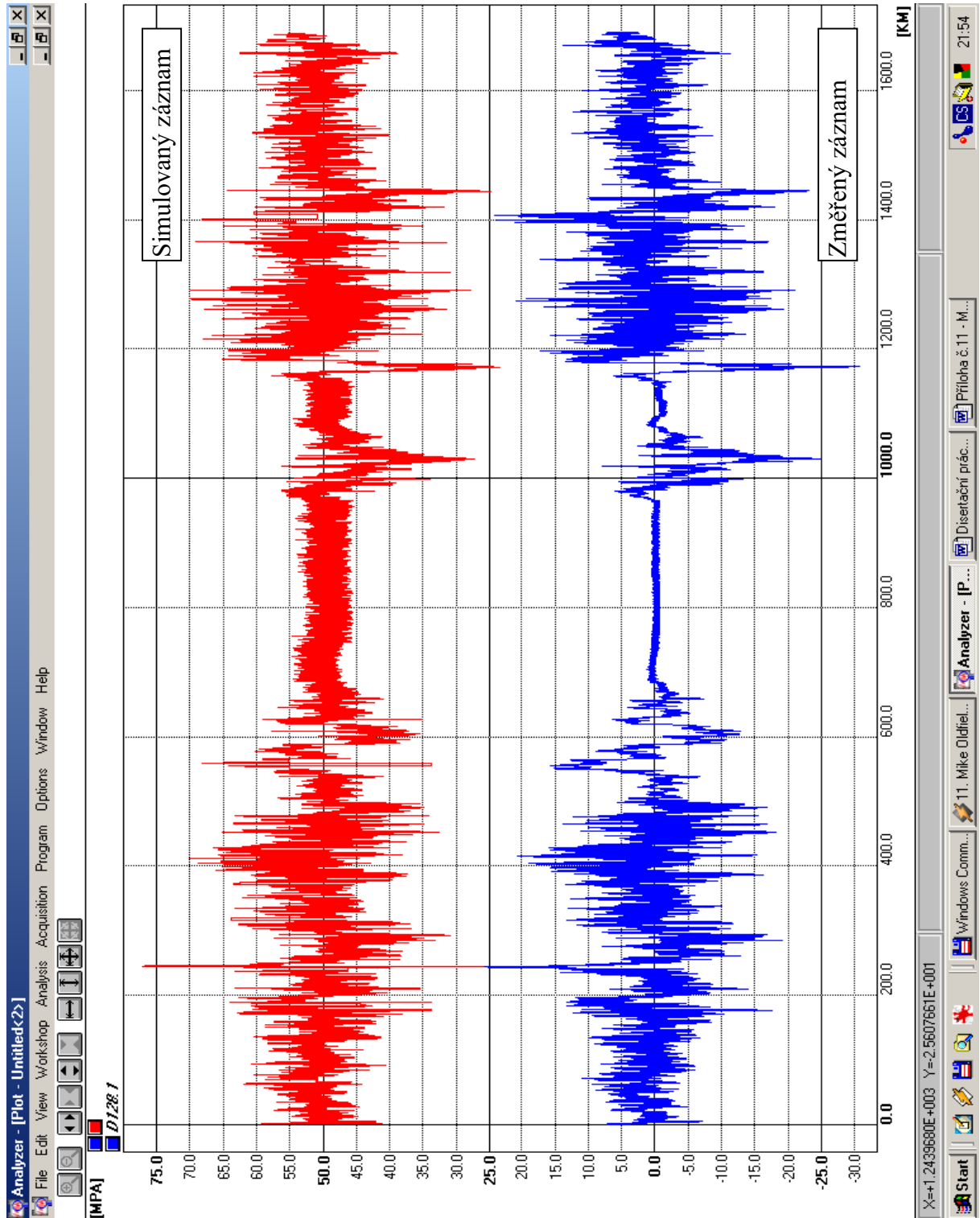


## **Příloha č.11.**

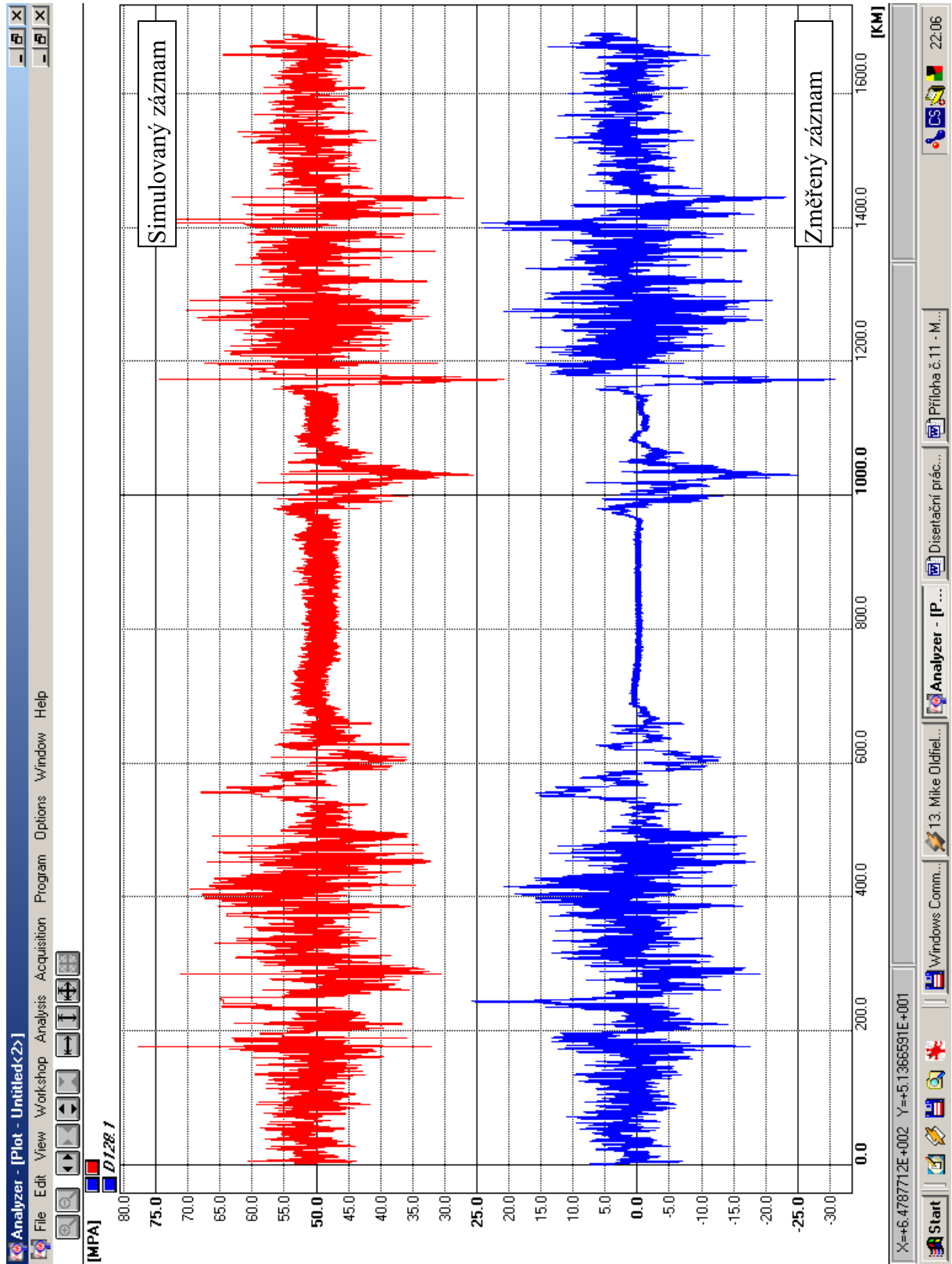
**Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou max. amplitudu**

Experimentálně změřená data byla poskytnuta Škodou výzkum s.r.o. Plzeň v rámci grantové úlohy č. 15-00/189/99. Zadaná max. amplitudy byla postupně snižována (200,150,100,50 MPa). Ostatní vstupní parametry byly rozměr matice : 64x64, citlivost matice : 0,00 MPa, Max. stř. hodnota 50 MPa. Simulovaný záznam byl z důvodu vyšší přehlednosti posunut o +50 MPa.

**200 MPa :**

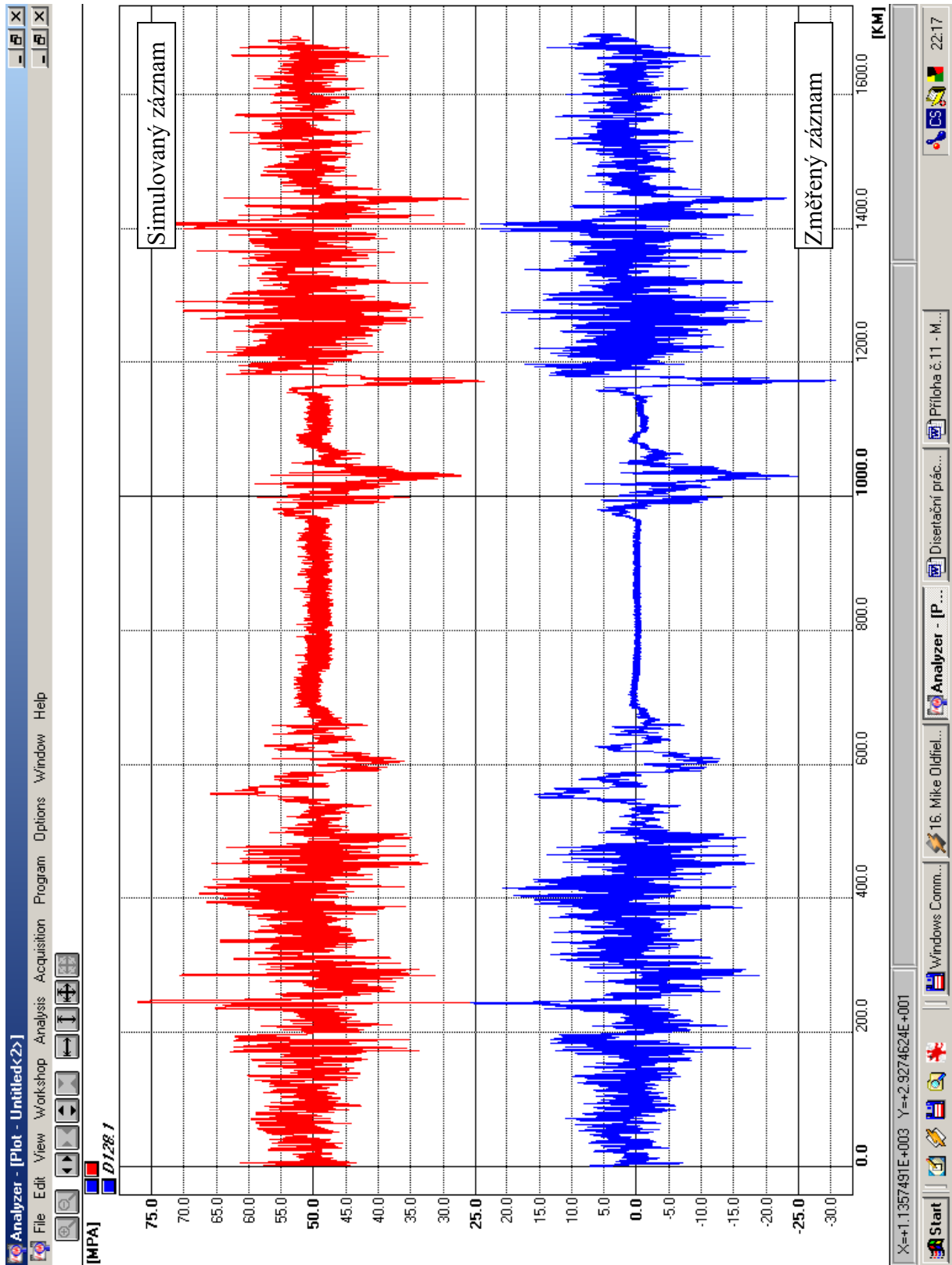


150 MPa :

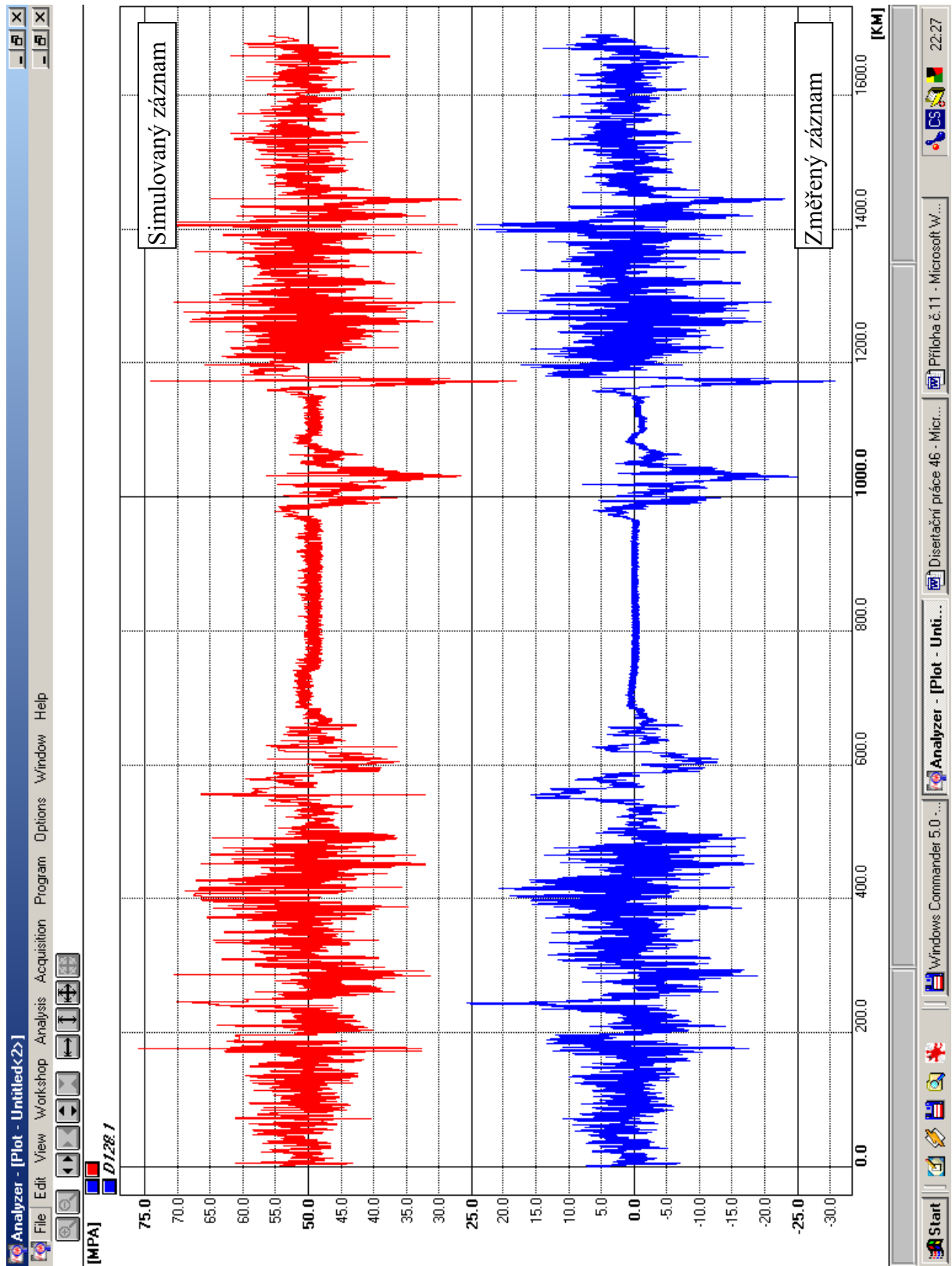




100 MPa :



50 MPa :

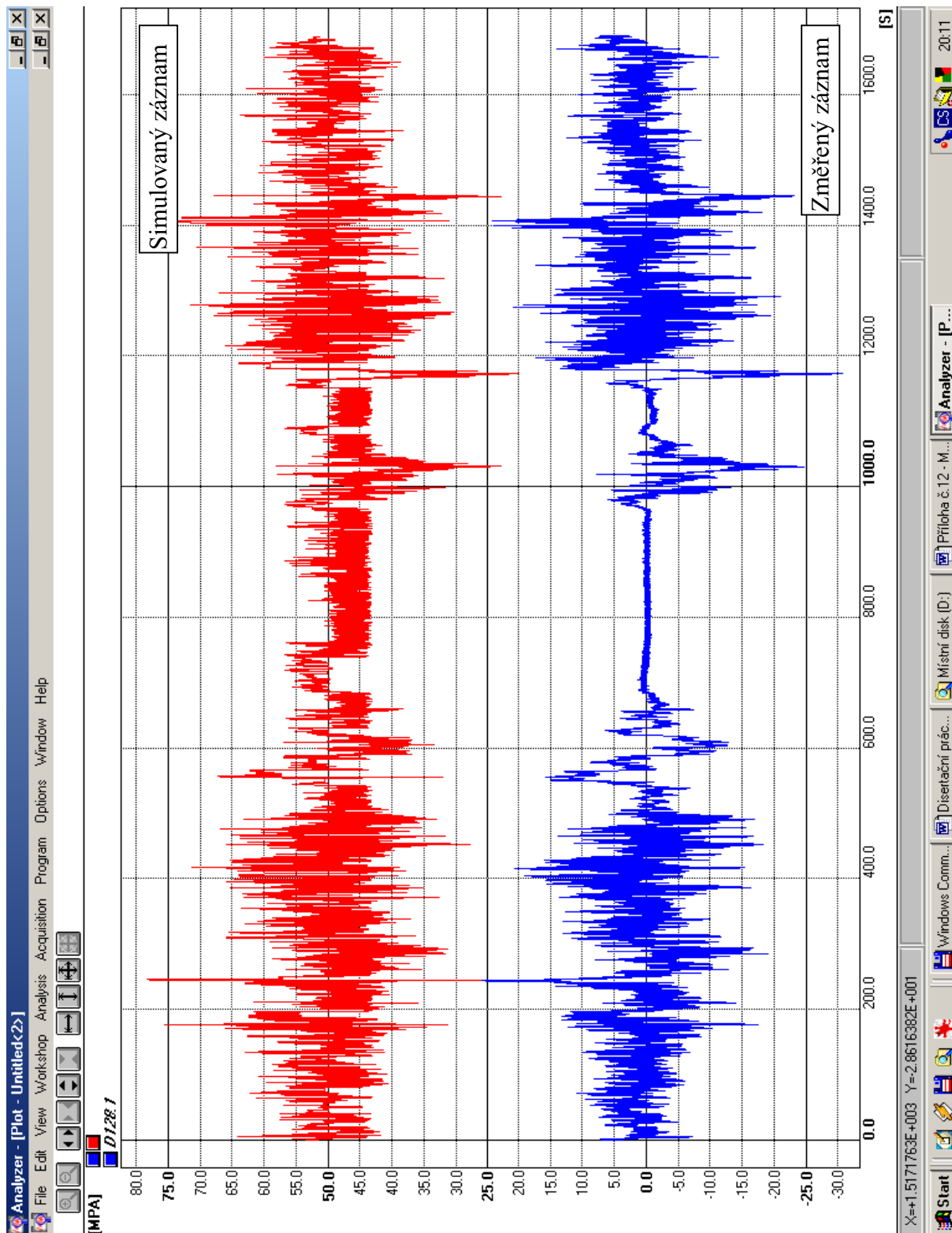


## **Příloha č.12.**

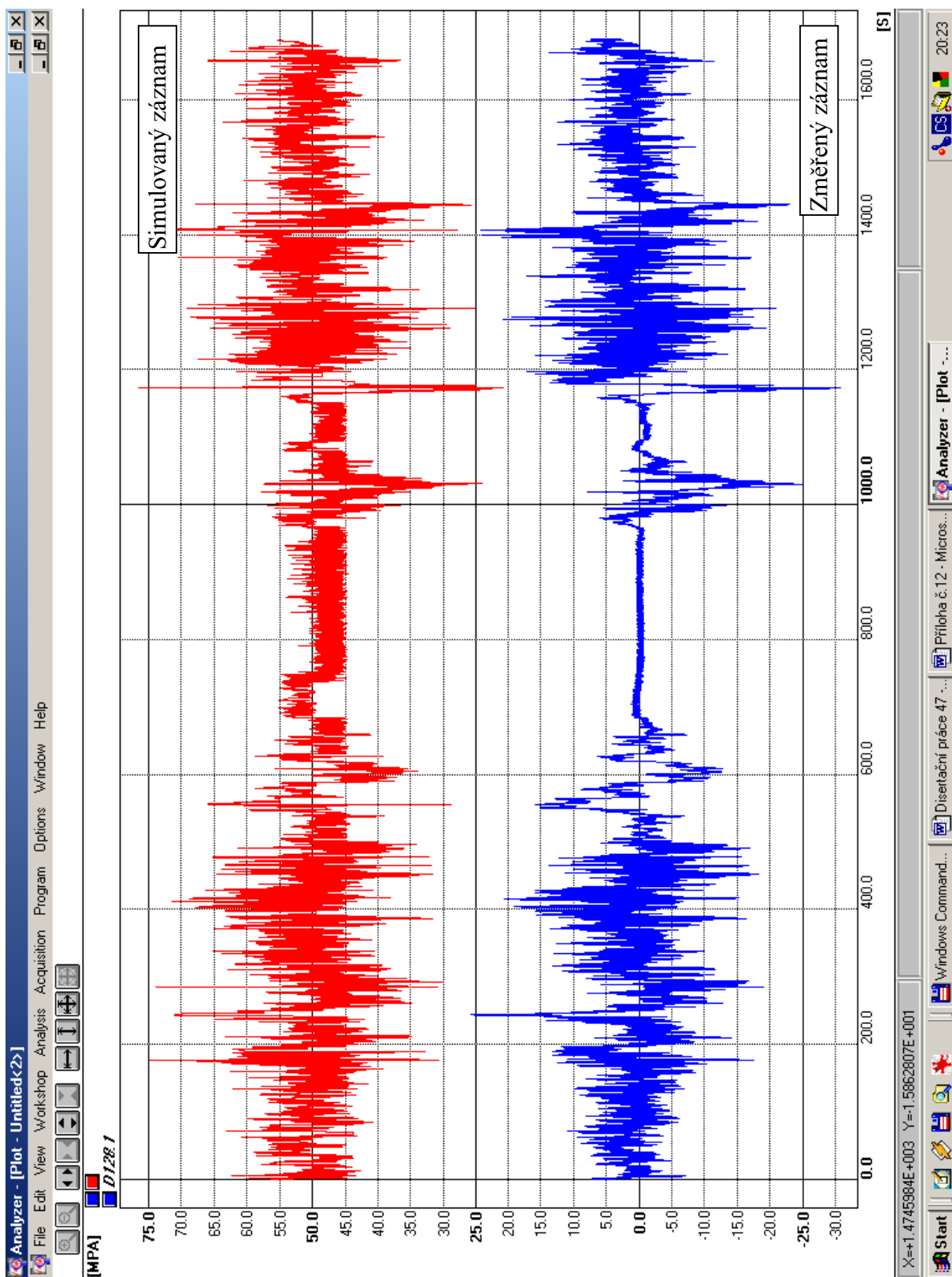
**Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou stř. hodnotu  
rozkmitu napětí**

Experimentálně změřená data byla poskytnuta Škodou výzkum s.r.o. Plzeň v rámci grantové úlohy č. 15-00/189/99. Zadaná stř. hodnota rozkmitu napětí byla postupně snižována (200,150,100,50 MPa). Ostatní vstupní parametry byly rozměr matice : 64x64, citlivost matice : 0,00 MPa, Max. amplituda : 50 MPa. Simulovaný záznam byl z důvodu vyšší přehlednosti posunut o +50 MPa.

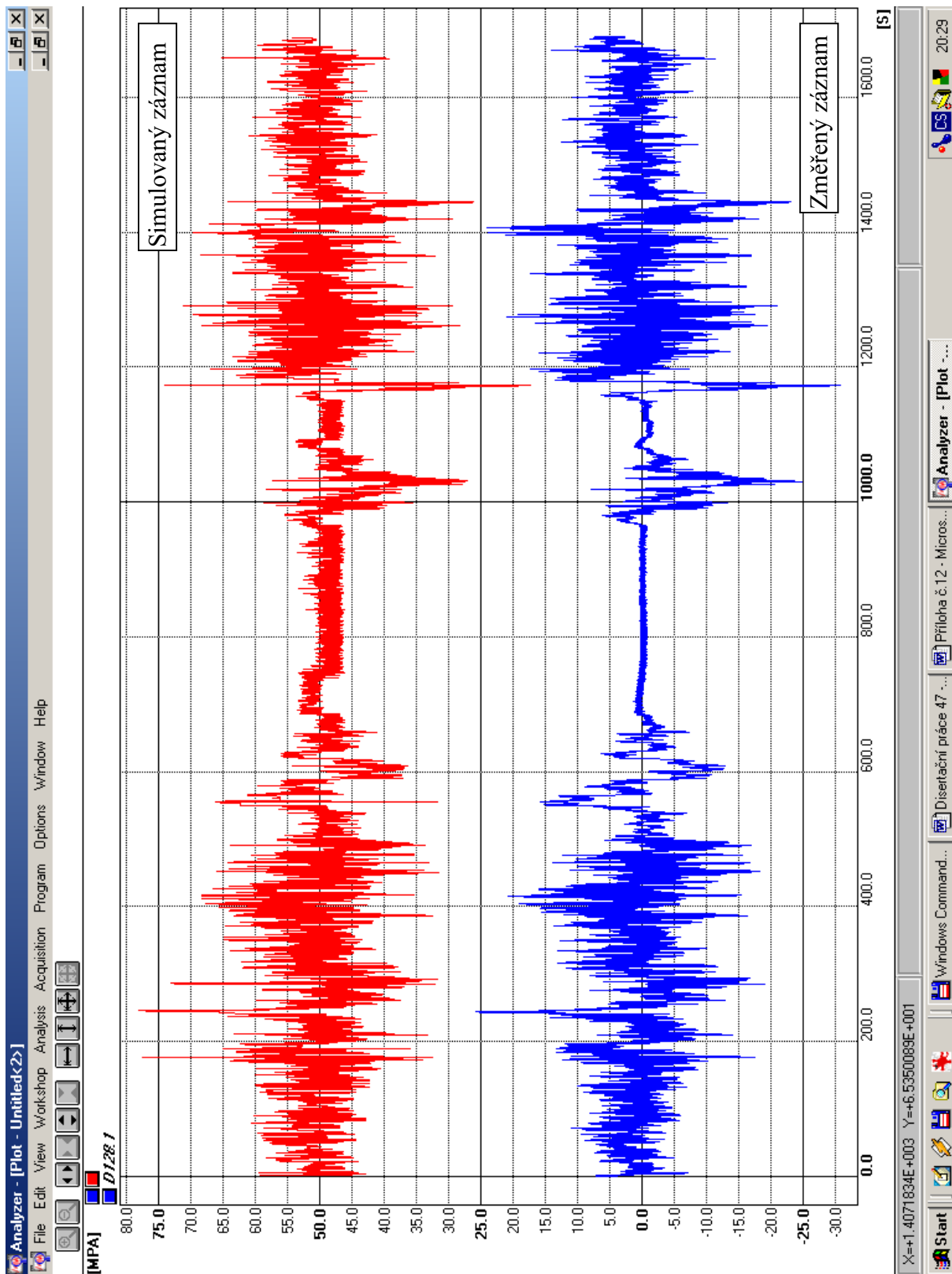
### 200 MPa :



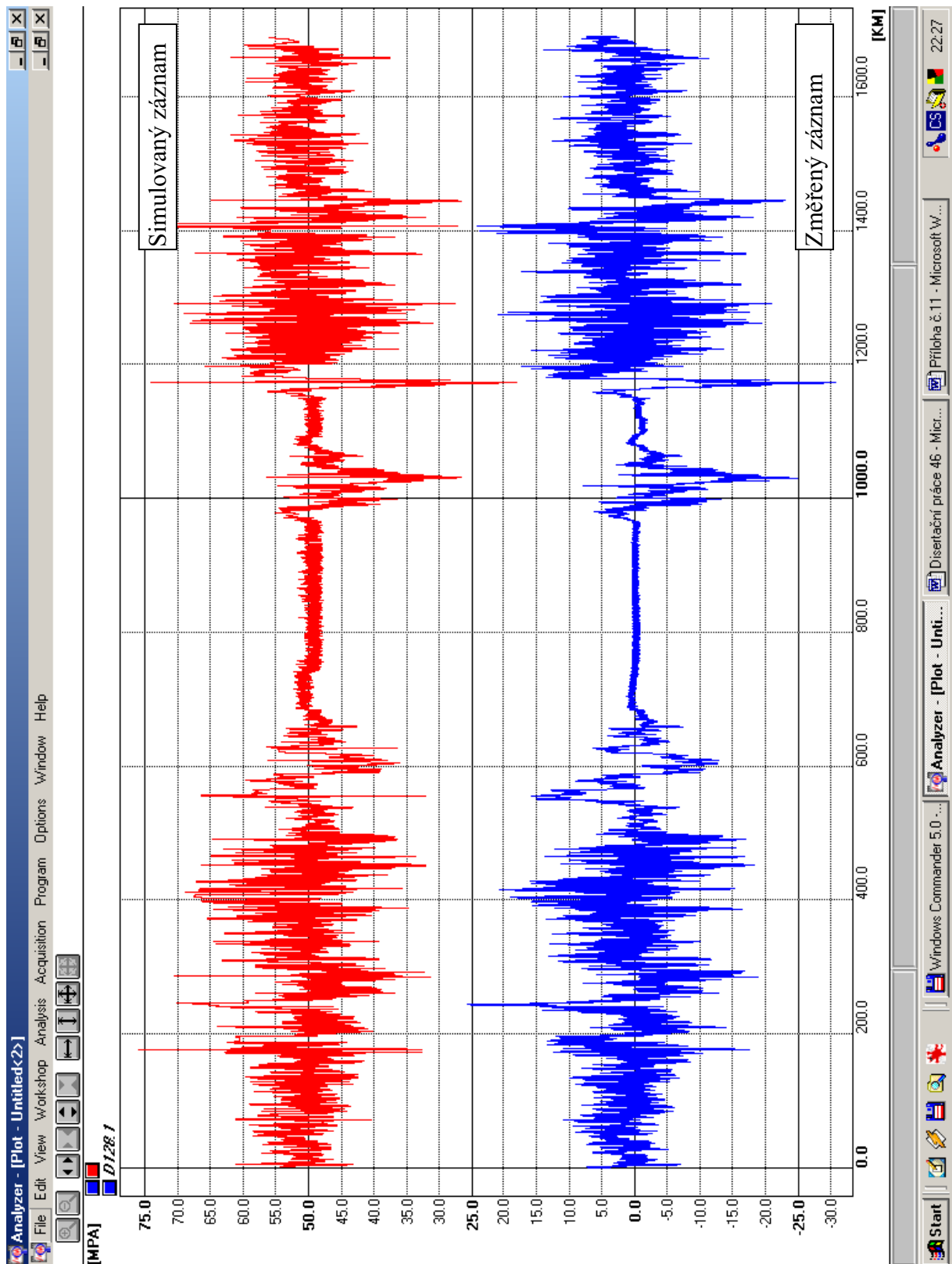
150 MPa :



100 MPa :



50 MPa :



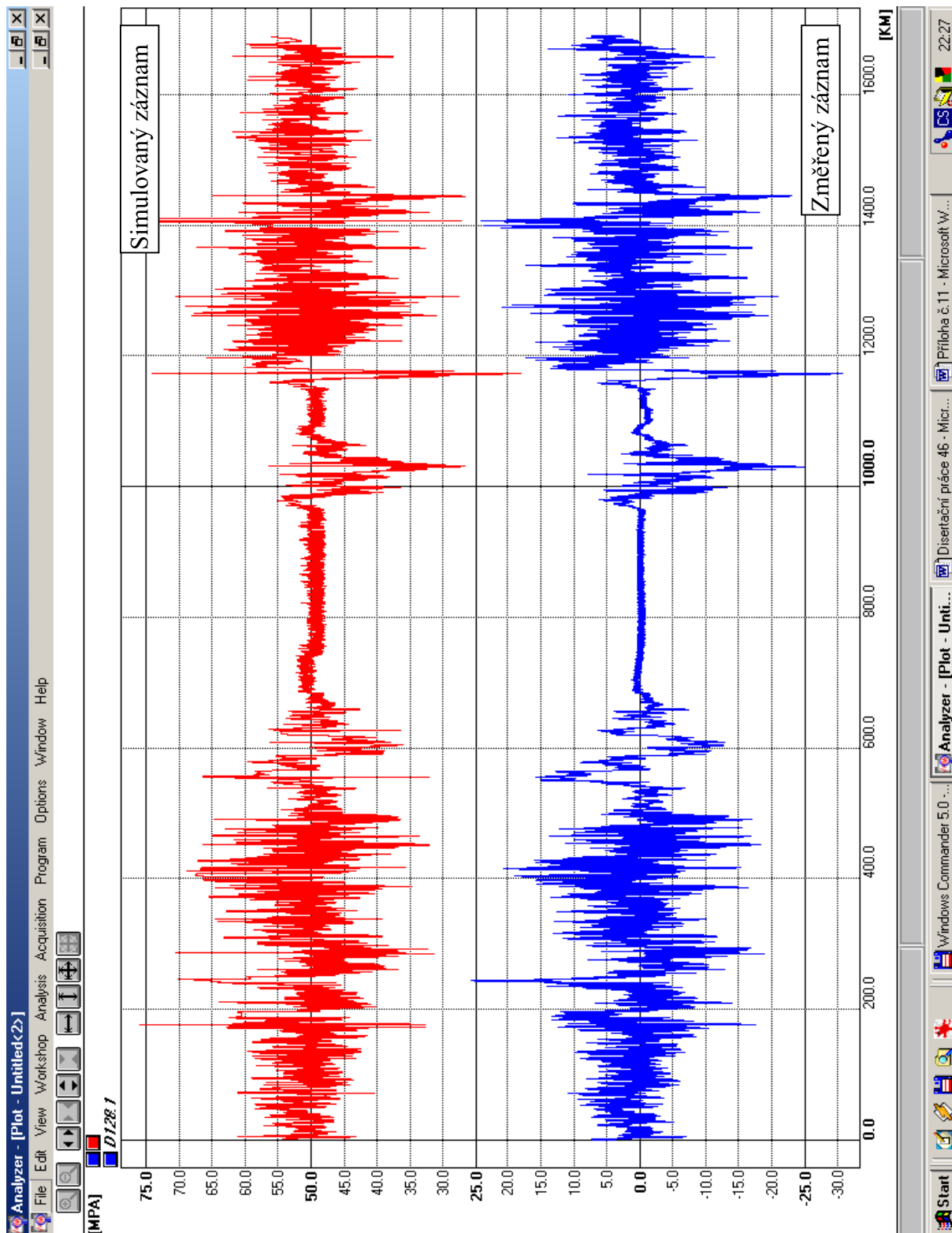
## **Příloha č.13.**

**Test citlivosti simulovaného záznamu na zadanou amplitudovou  
citlivost matice**

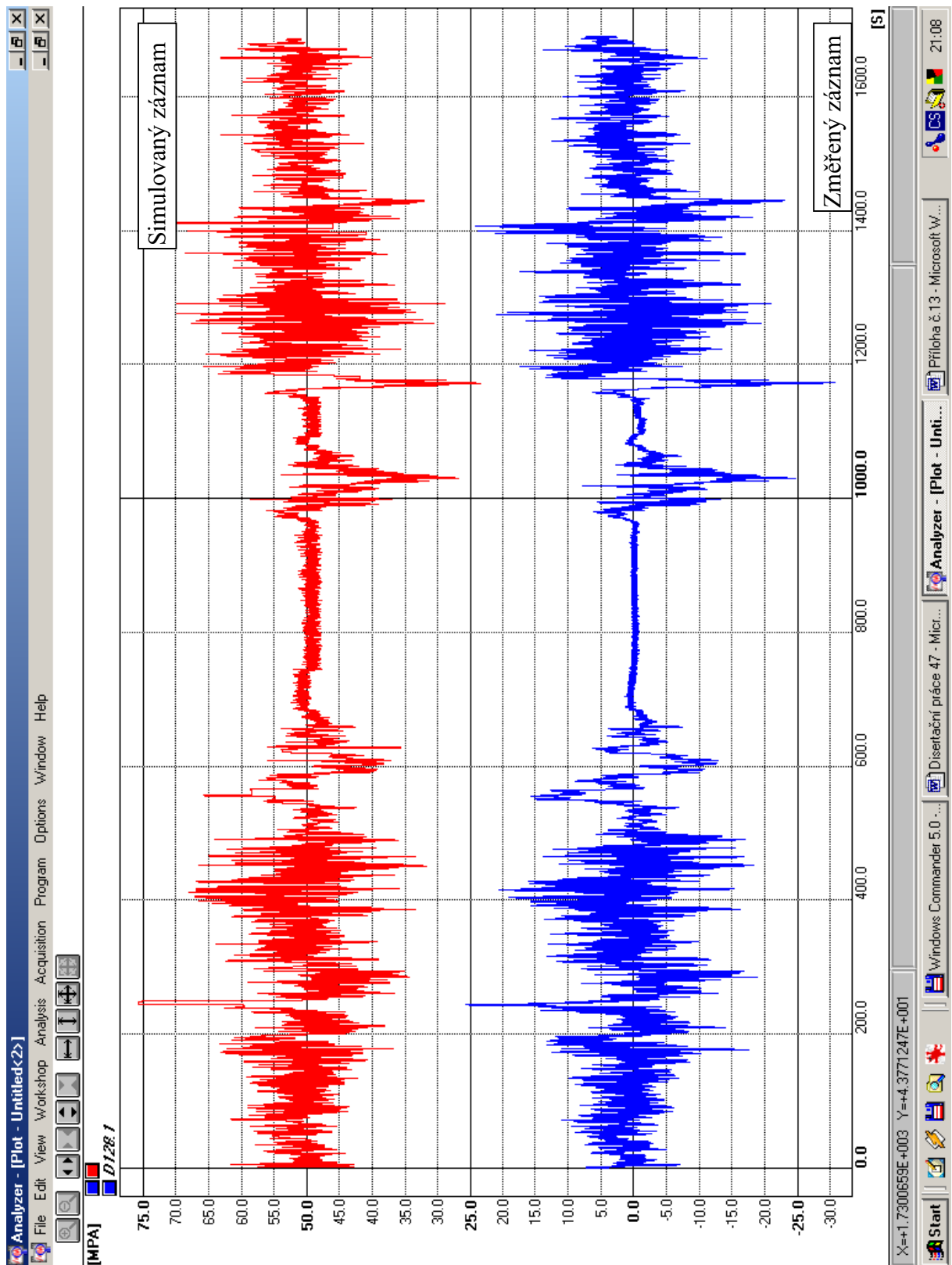


Experimentálně změřená data byly poskytnuta Škodou výzkum s.r.o. Plzeň v rámci grantové úlohy č. 15-00/189/99. Zadaná amplitudová citlivost byla postupně zvyšována (0.00, 0.10, 0.50, 1.00, 2.00, 5.00). Ostatní vstupní parametry byly rozměr matice : 64x64, Max. amplituda : 50 MPa, Max. stř. hodnota : 50 MPa. Simulovaný záznam byl z důvodu vyšší přehlednosti posunut o +50 MPa.

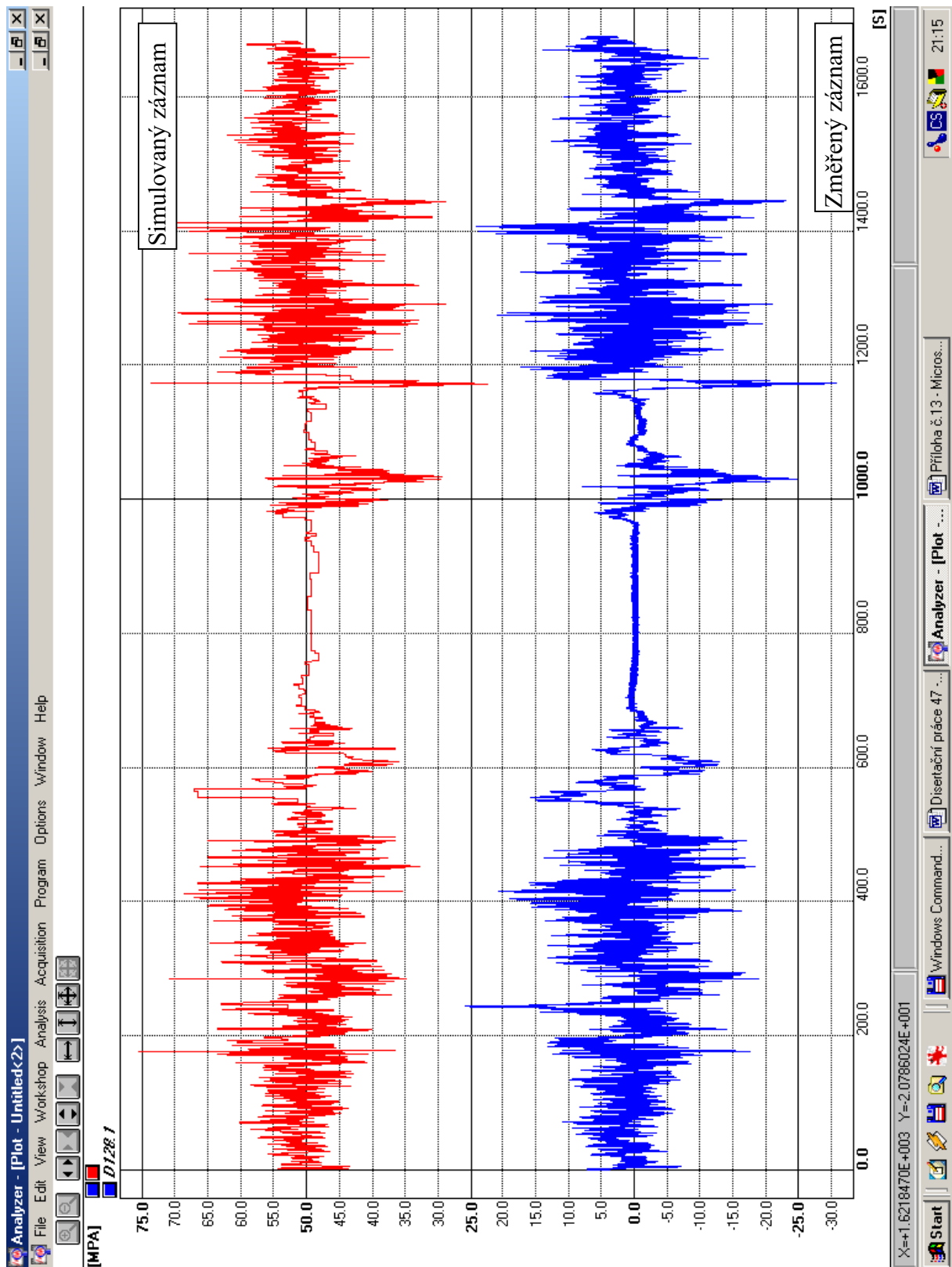
0.00



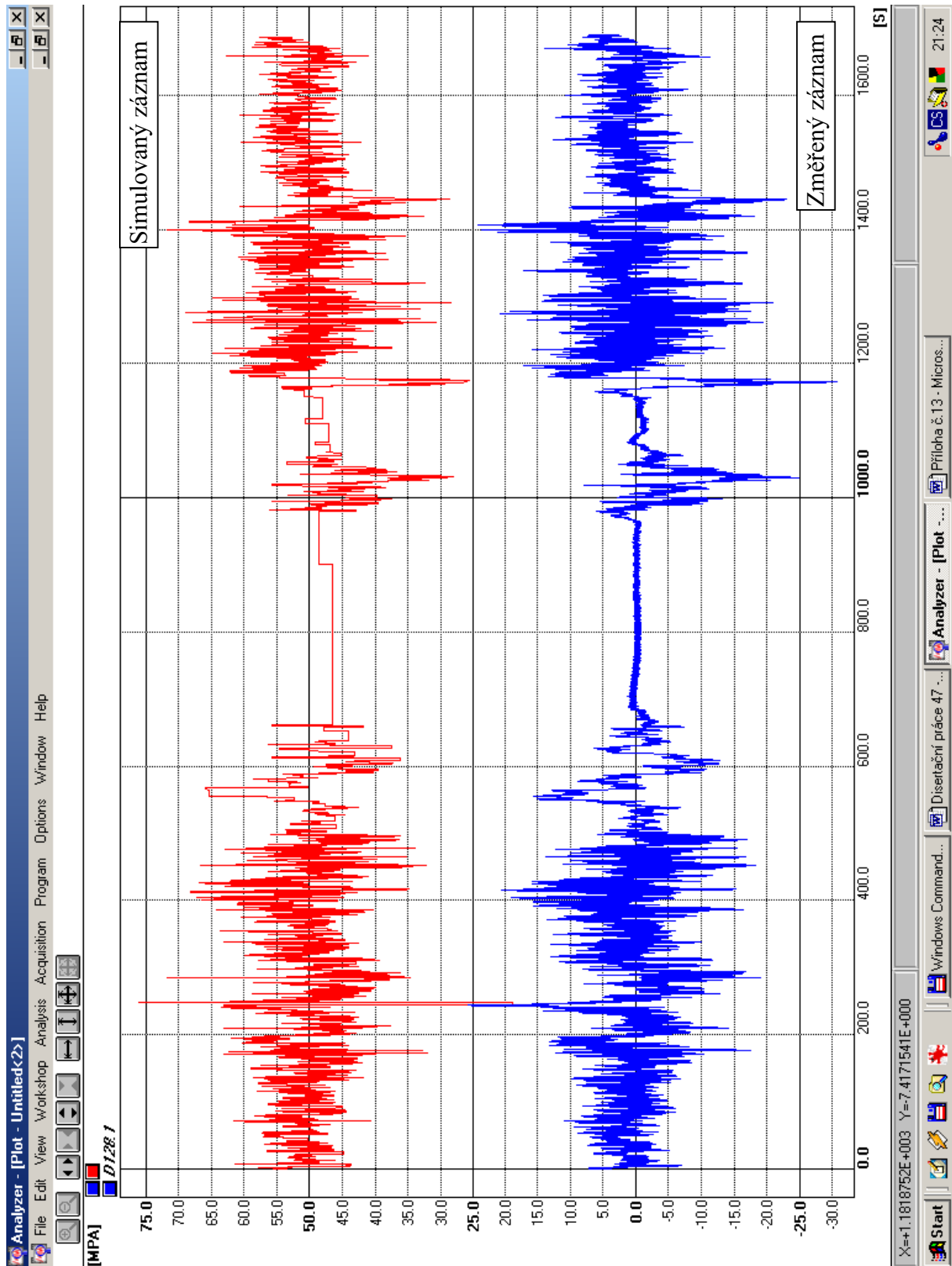
0.10



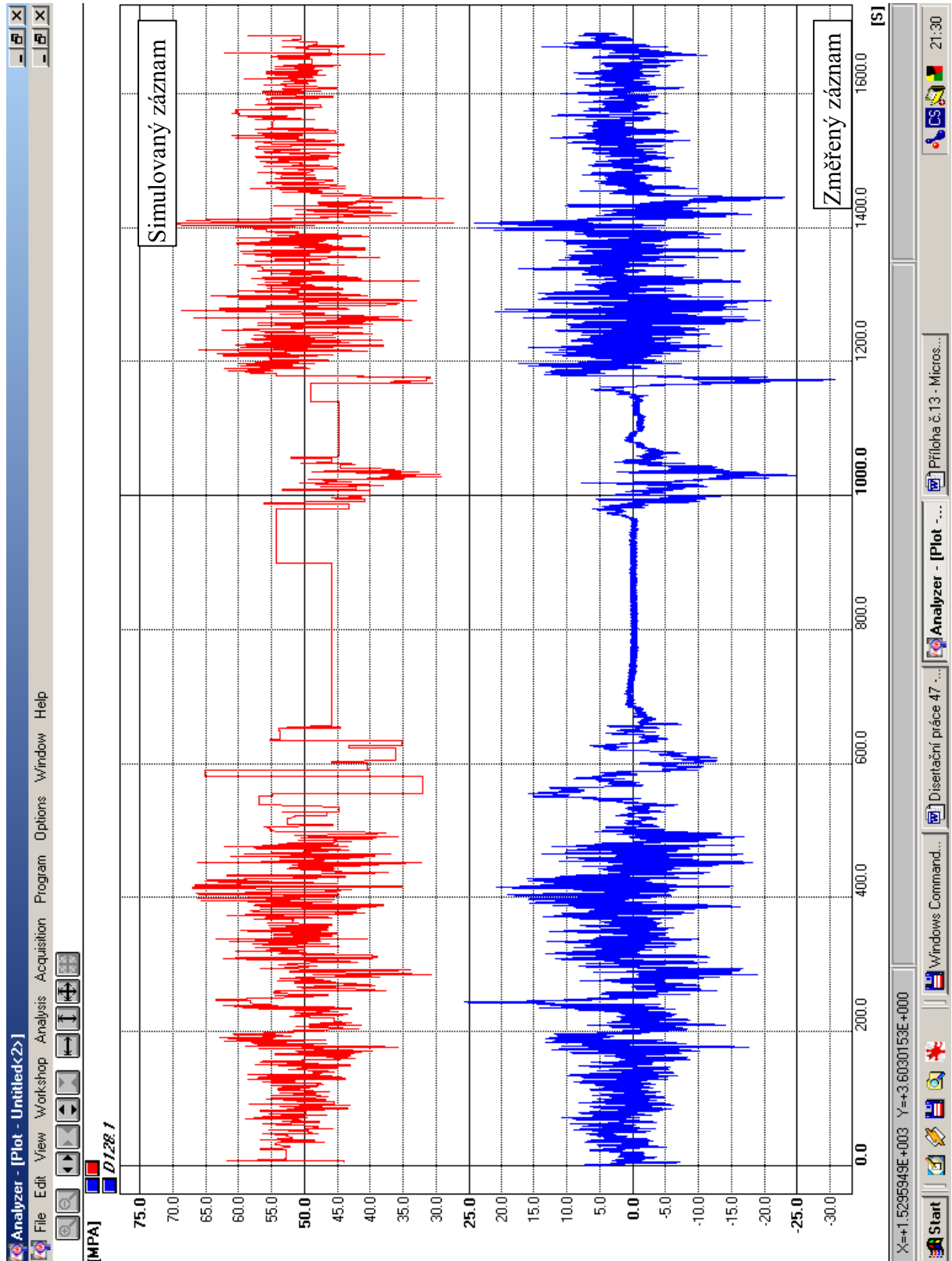
0.50



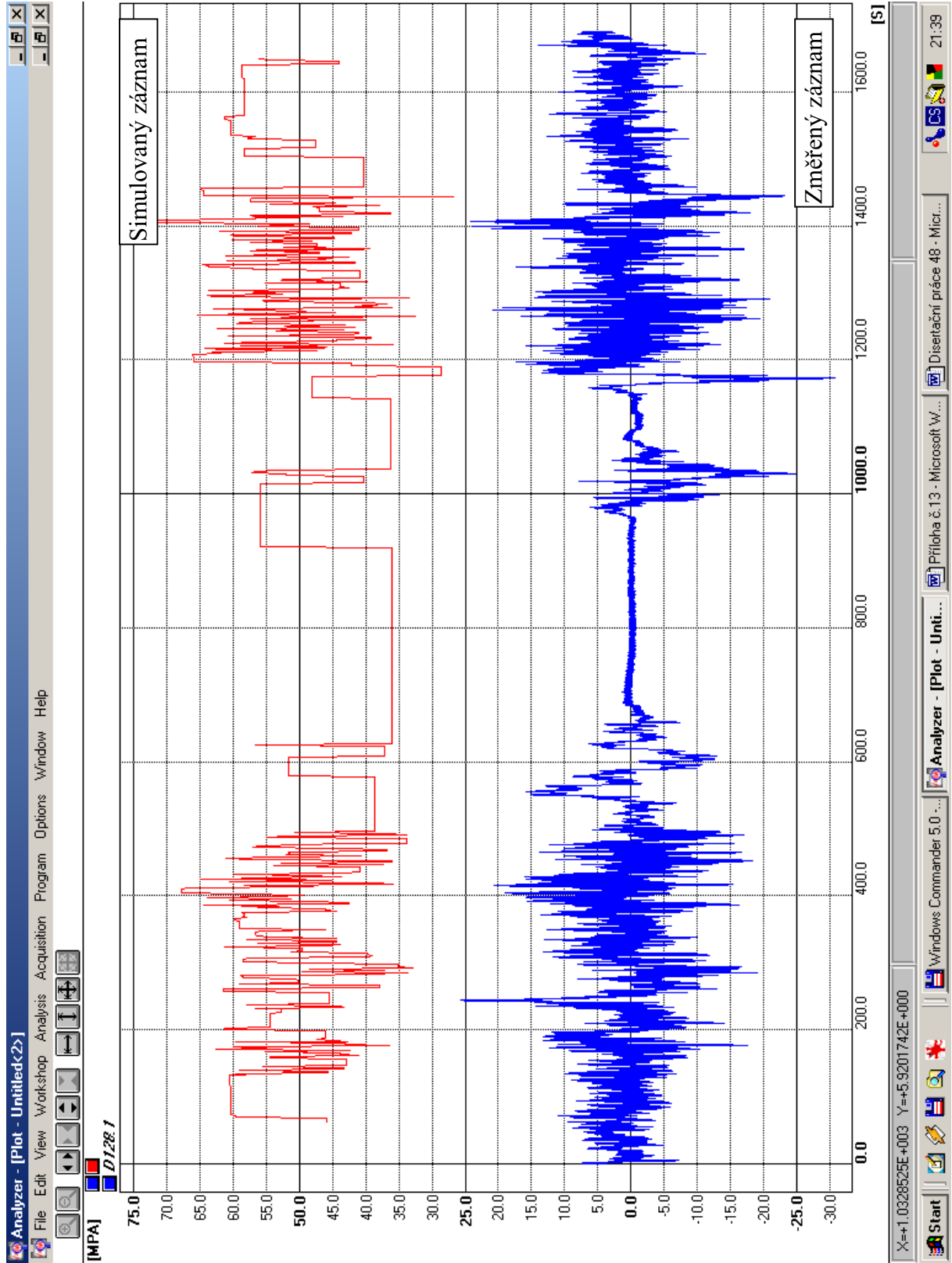
1.00



2.00



5.00



## **Příloha č.14.**

### **Výpis programu „Plzen“**

**(vzhledem k rozsahu přílohy – více než 100 stran, výpis přiložen na CD-ROM)**