

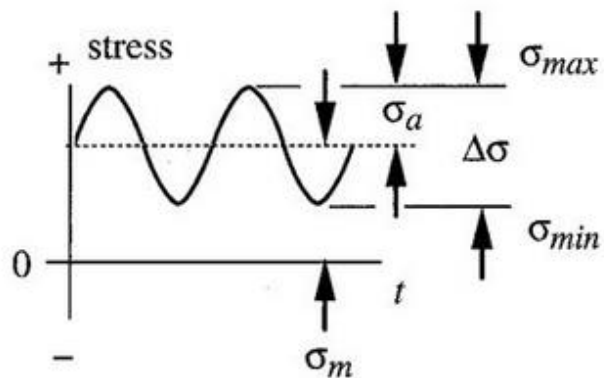
Přednášky

část 4

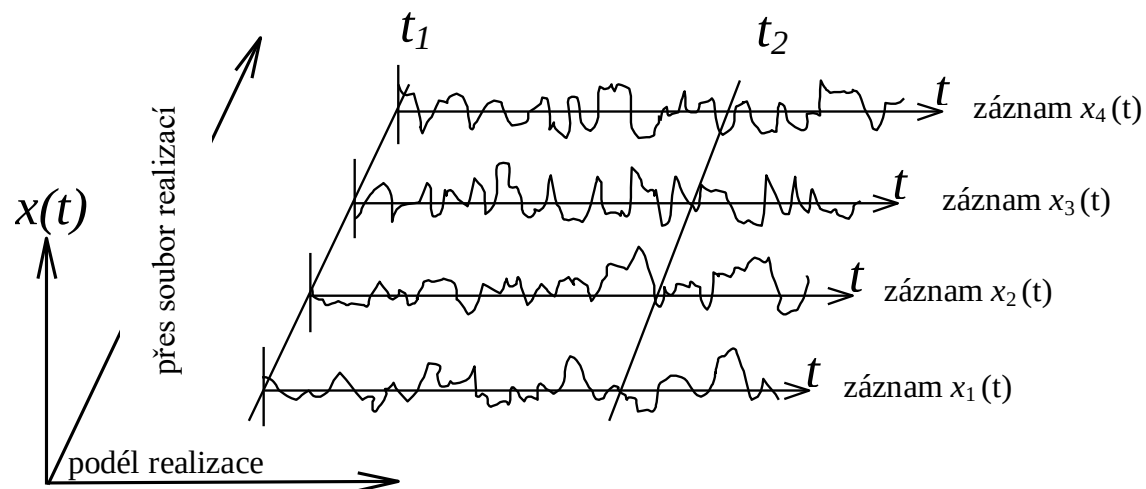
Analýza provozních zatížení a hypotézy kumulace poškození, příklady

Milan Růžička

Analýza dynamických zatížení

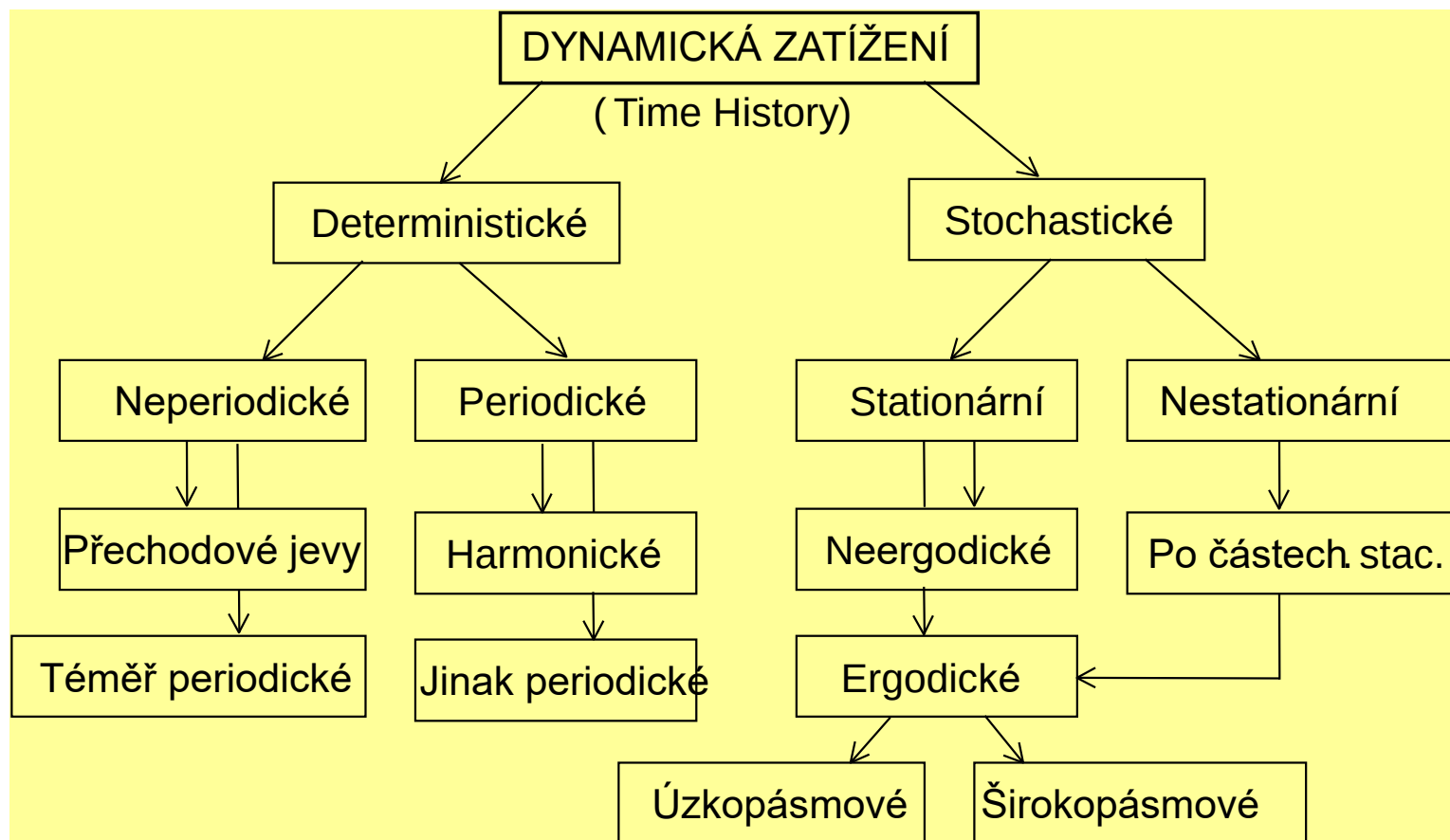


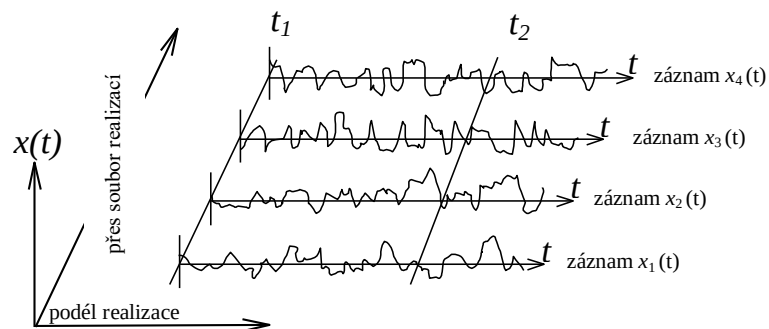
Harmonické zatížení



Stochastické (náhodné) zatížení
(vícenásobná realizace)

Rozdělení zatěžovacích procesů

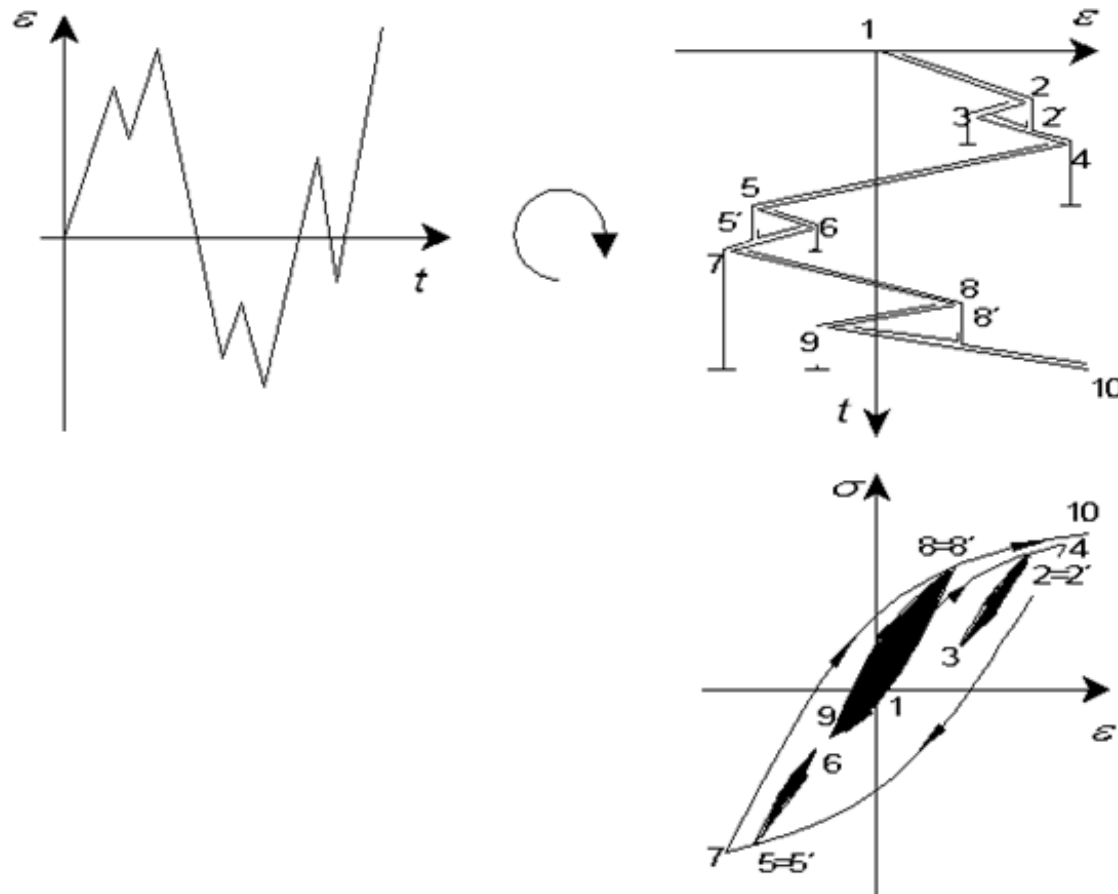




Typ zatížení	Procenta výskytu
Sinusové s konst. amplitudou	2
Trapézové, trojúhelník periodické	5
Blokové s konst. amplitudou	12
Stacionární náhodné	9
Nestacionární náhodné	13
Po částech stacionární	41
Přechodové jevy	13
Ostatní	5

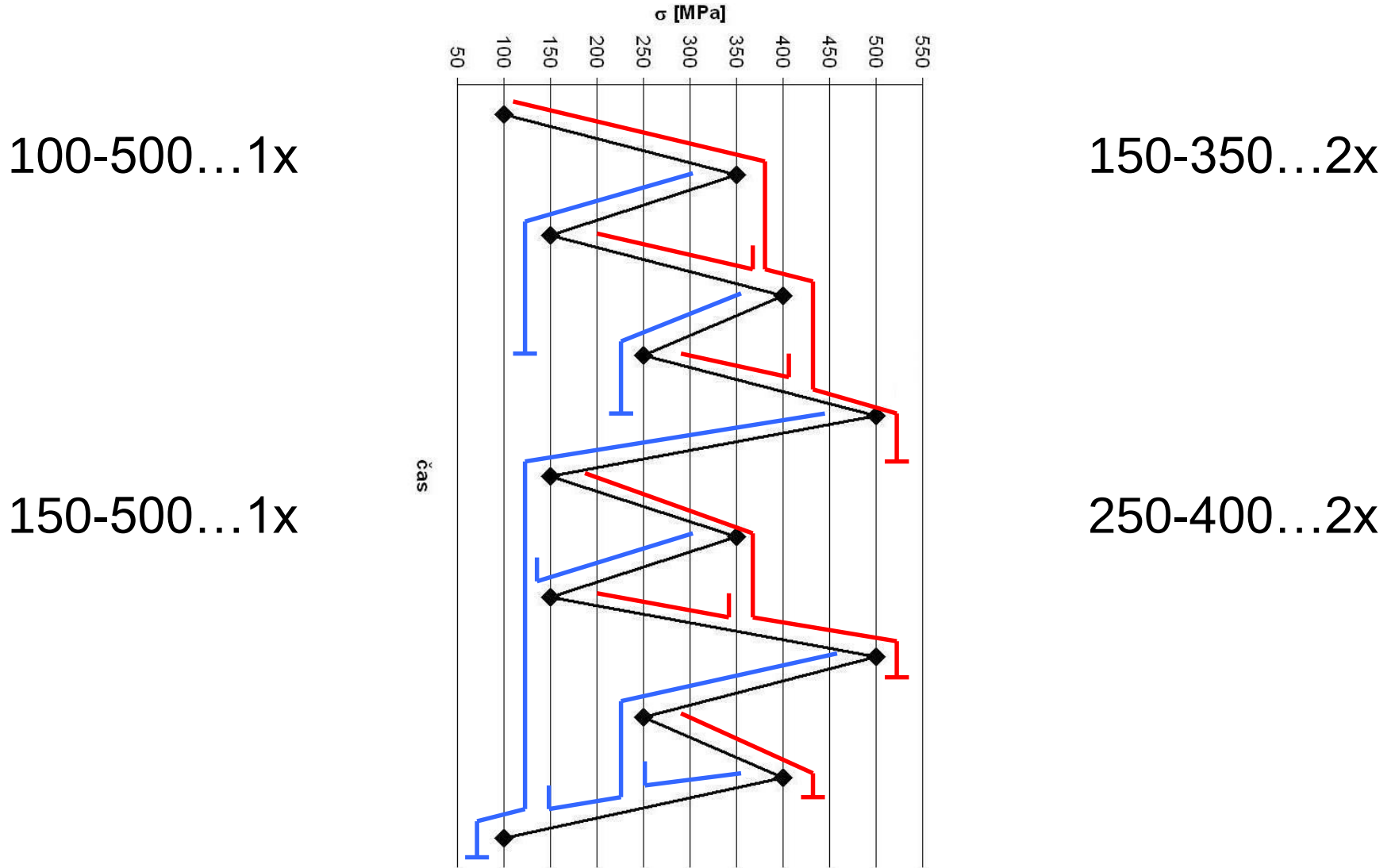
Metoda stékání deště (Rain Flow Method)

Jedna mnoha metod tzv. dekompozice signálu na dílčí kmitů, které mají na konstrukci „identický“ degradační efekt



Rain Flow

otočená sekvence z **globálního** extrému do **globálního** extrému



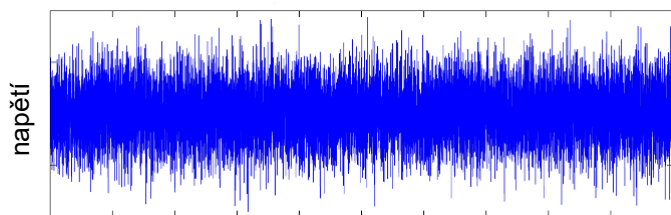
Rain Flow – doporučený postup

- sekvence se nakreslí od globálního extrému do globálního extrému
- otočení o 90°
- spouštění lokálních proudů zleva doprava
 - postupuje se od nejnižších lokálních minim k vyšším
 - proudy se spouští a tečou dokud nevytečou ze sekvence nebo nenarazí na proud tekoucí z nižšího lokálního minima nebo stejného dříve vyřešeného
 - v případě několika stejných minim je doporučeno je řešit, jak jdou za sebou v zátěžné sekvenci
- spouštění lokálních proudů zprava doleva
 - postupuje se od nejvyšších lokálních maxim k nižším
 - proudy se spouští a tečou dokud nevytečou ze sekvence nebo nenarazí na proud tekoucí z vyššího lokálního maxima nebo stejného dříve vyřešeného
 - v případě několika stejných maxim je doporučeno je řešit, jak jdou za sebou v zátěžné sekvenci
- skládání „půlek“ uzavřených kmitů k sobě
 - v případě některého neuzavřeného umělé uzavření nebo $n_i=0,5$

Rain Flow Matrix

(Dvourozměrný histogram četnosti)

U složitých sekvenci zpracování histogramu pomocí tříd (intervalů)

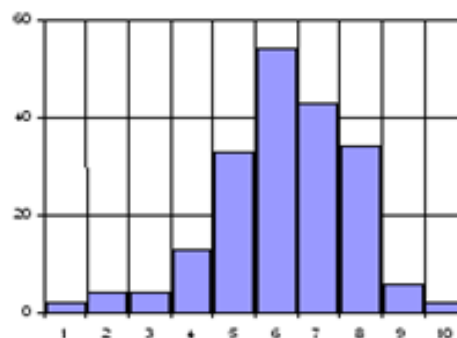


čas



amplituda

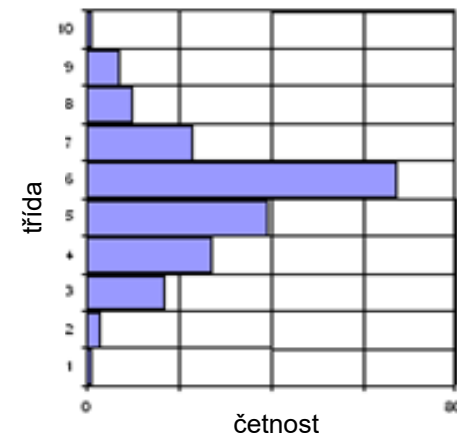
Frequencie h	2	4	4	13	33	54	43	34	6	2
Rank of Stress	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



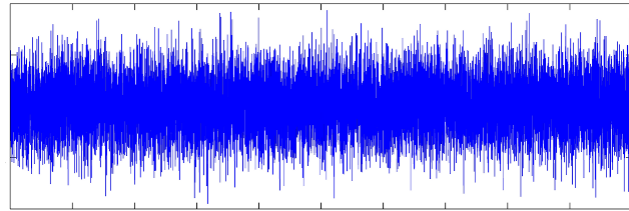
1										
	2		1							
1	2	4	3	6	1					
			6	7	8	6				
			3	8	15	8	4	1		
				12	25	18	12			
					4	5	12	2		
						4	3	2	1	
						1	2	3	1	
										1

střední hodnota

i	h
1	1
2	3
3	17
4	27
5	39
6	67
7	23
8	10
9	7
10	1



Příklad výsledků zpracování



čas

amplituda

střední hodnota

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Stress		5,8	11,5	17,3	23,1	28,8	34,6	40,4	46,1	51,9	57,7	63,4	69,2	75,0	80,7	86,5	92,3	98,0
1	92,3	2216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	86,5	52662	70	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	80,7	117563	470	291	128	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	75,0	224083	1808	1277	967	633	228	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	69,2	484437	5230	4254	3536	2853	2166	1421	511	26	0	0	0	0	0	0	0	0
6	63,4	595637	12660	11029	10082	8317	6652	5491	3892	2505	882	21	0	0	0	0	0	0
7	57,7	707337	25016	22852	19237	17427	15385	12848	10019	7804	5001	2755	853	27	0	0	0	0
8	51,9	515361	32292	32957	29348	27834	23797	19573	14905	11454	7803	5041	2971	1540	366	8	0	0
9	46,1	799791	44092	40207	33883	31901	27683	22900	16582	12035	8043	5406	3185	2005	1226	611	133	3
10	40,4	761950	42624	39696	34955	29851	23951	19520	13601	9934	6452	3928	2557	1717	850	404	174	62
11	34,6	566618	38427	34735	28981	25726	21128	15092	9816	6890	4367	2801	1294	609	258	102	61	21
12	28,8	407707	33583	28874	23968	19997	14892	10328	6943	4185	1985	847	412	187	76	42	10	10
13	23,1	352578	33715	27725	20992	16036	10935	6760	3331	1511	740	339	127	67	27	17	2	1
14	17,3	316091	35248	26163	18462	11870	5574	2486	1067	502	248	88	34	19	9	1	0	0
15	11,5	484954	36980	23099	10561	4428	1908	7039	286	120	38	21	10	4	1	1	0	0
16	5,8	13676088	20425	7904	3094	1148	363	129	40	16	9	2	1	1	0	0	0	0
17	-5,8	36882477	7834	1356	344	87	22	9	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
18	-11,5	9818	17	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	-17,3	618	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-23,1	124	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	-28,8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	-34,6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	-40,4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	-46,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	-51,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	-57,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	-63,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	-69,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	-75,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	-80,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	-86,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	-92,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum		56958119	370497	302426	238538	198113	154684	123601	80995	56784	35568	21249	11444	6177	2812	1186	380	97

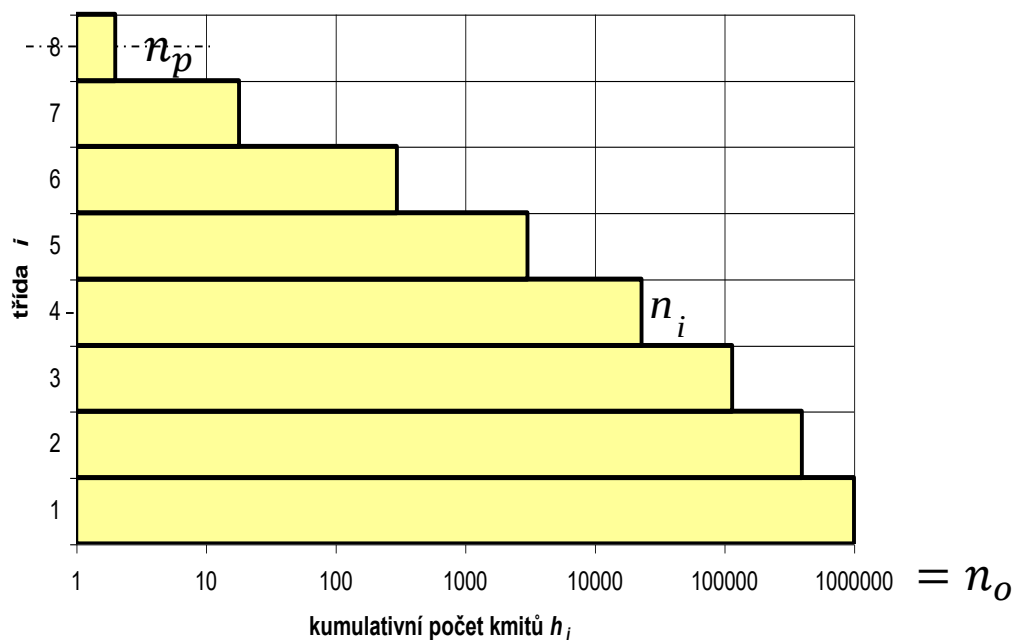
Rain Flow Matrix

četnost

„Spektrum“ namáhání

i	σ_a/σ_{ap}	h_i	n_i
1	0.125	1000000	605000
2	0.275	395000	280000
3	0.425	115000	92000
4	0.575	23000	20000
5	0.725	3018	2720
6	0.85	298	280
7	0.95	18	16
8	1	2	2

- četnost amplitud napětí v jednotlivých zatěžovacích hladinách za určitou dobu provozu

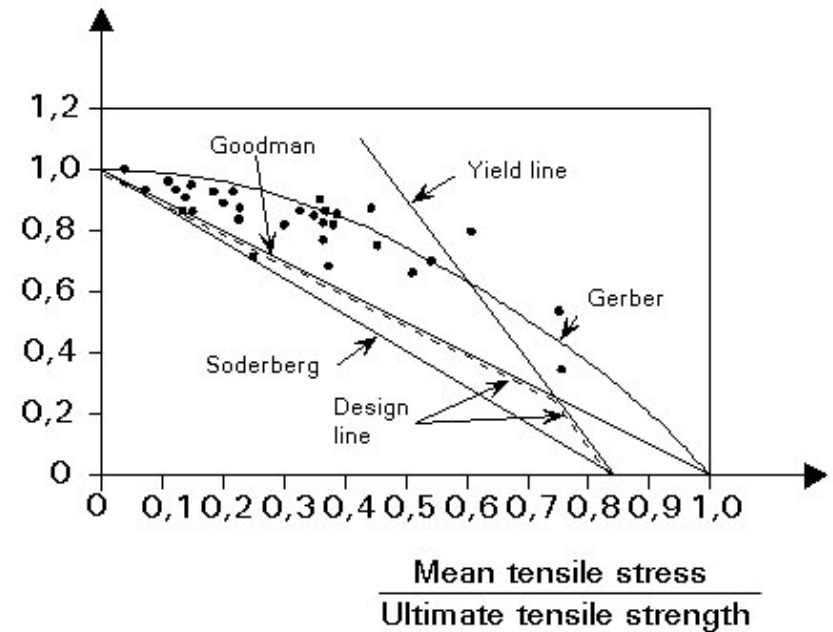
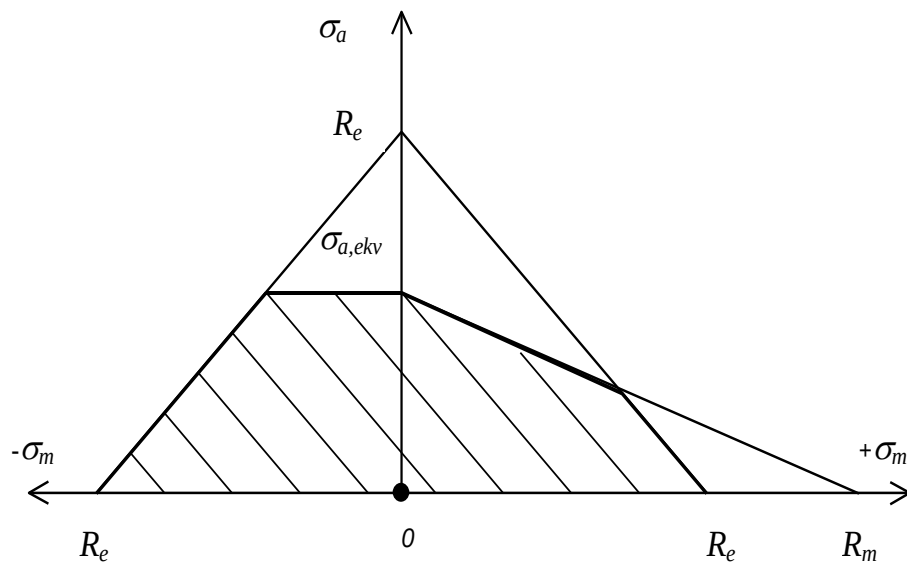
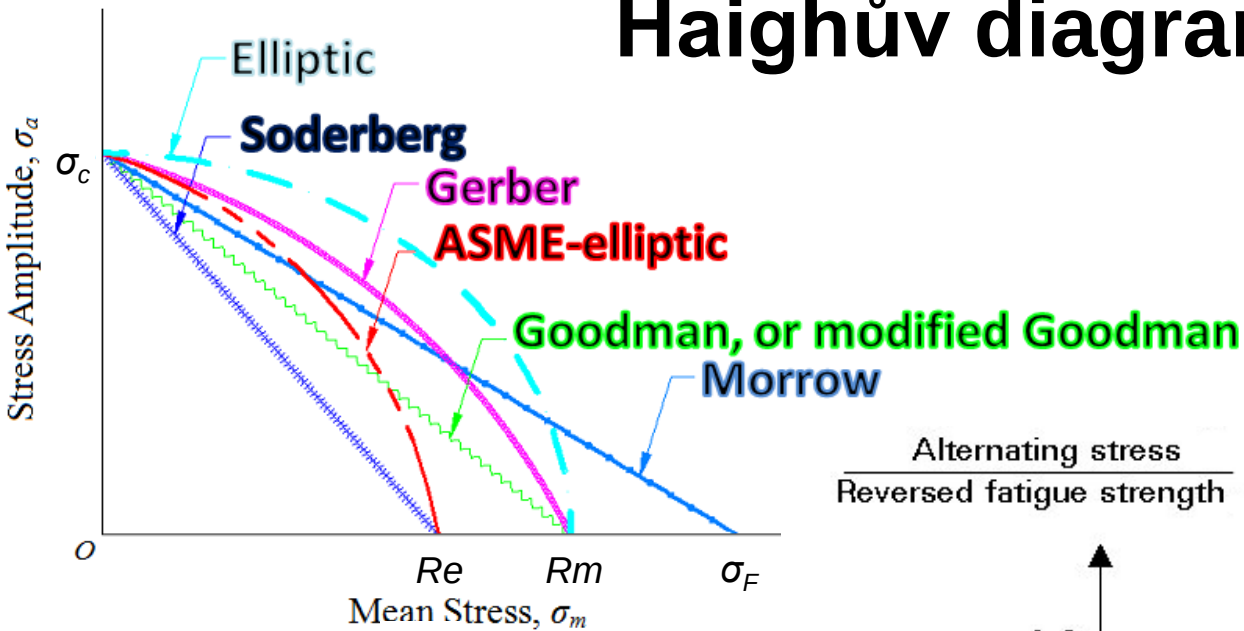


Aproximace třídni četnosti kmitů

$$n_i = n_0 \left(\frac{n_p}{n_0} \right) \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^s$$

**Ekvivalentní amplituda/horní napětí
kmitu**

Haigh's diagram



Přepočty na ekvivalentní ampl./horní napětí

Převod napěťových kmitů s různou střední složkou, na smluvní symetricky střídavé nebo míjivé kmity s podobným únavovým účinkem.

Přepočet podle Goodmana:

$$\sigma_{a,eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}}$$

Přepočet podle Gerbera:

$$\sigma_{a,eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2}$$

SWT parametr:

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)E\varepsilon_a}, \quad \sigma_m > 0$$
$$\sigma_{a,eq} = \sigma_a, \quad \sigma_m \leq 0$$

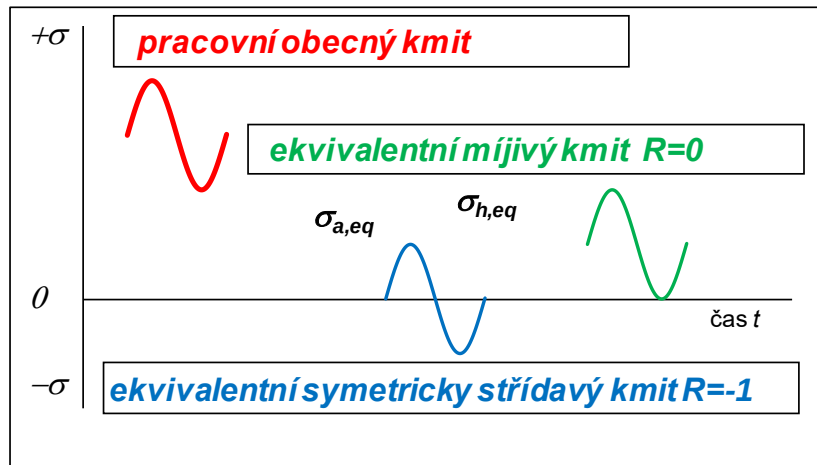
MIL HDBK:

$$\sigma_{h,eq} = (\sigma_a + \sigma_m)(1-R)^p$$

oceli a Al slitiny $p = 0,5$

Přepočet podle Odinga:

$$\sigma_{h,eq} = \sqrt{2(\sigma_a + \sigma_m)\sigma_a}, \quad \sigma_m > 0$$
$$\sigma_{h,eq} = \sqrt{2}\sigma_a, \quad \sigma_m \leq 0$$



Př. Přepočty S-N křivek

Ocel S355J0: k dispozici S-N křivky pro $R=-1$ i $R=0$ a $R_m=678$ MPa.

Odvodte rovnici S-N křivky pro amplitudu napětí mívivého kmitu ($R=0$)

$$\sigma_{a(R=-1)}^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36}$$

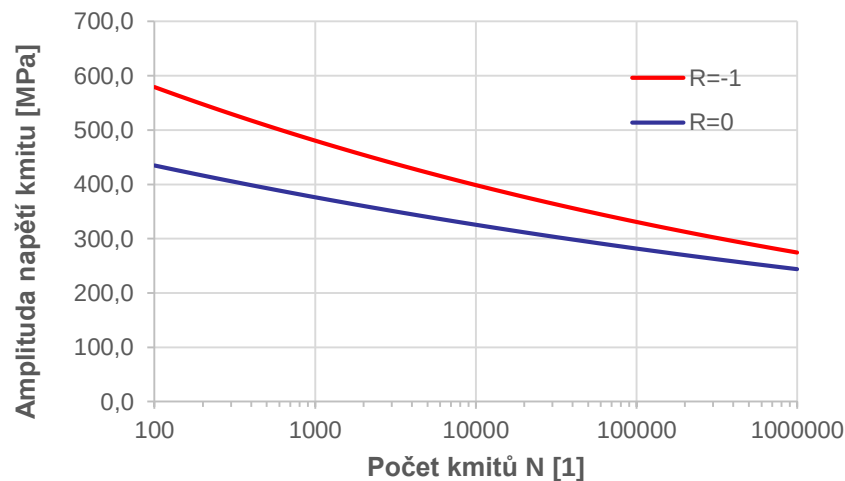
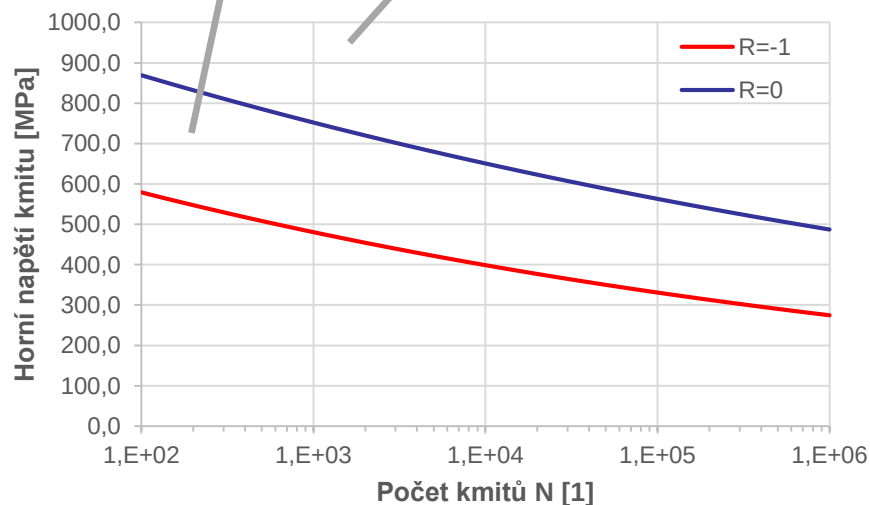
$$\sigma_{h(R=0)}^{15,92} N = 6,163 \cdot 10^{48}$$

$$15,92 \log(\sigma_{h(R=0)}) + \log N = \log(6,163 \cdot 10^{48})$$

$$15,92 \log(2\sigma_{a(R=0)}) + \log N = \log(6,163 \cdot 10^{48})$$

$$15,92 \log(\sigma_{a(R=0)}) + \log N = \log(6,163 \cdot 10^{48}) - 15,92 \log 2 = 43,997$$

$$\sigma_{a(R=0)}^{15,92} N = 9,94 \cdot 10^{43}$$

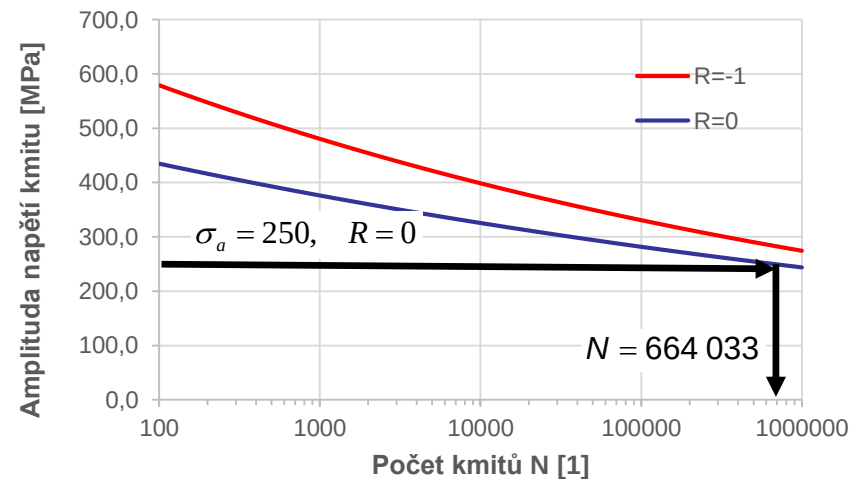
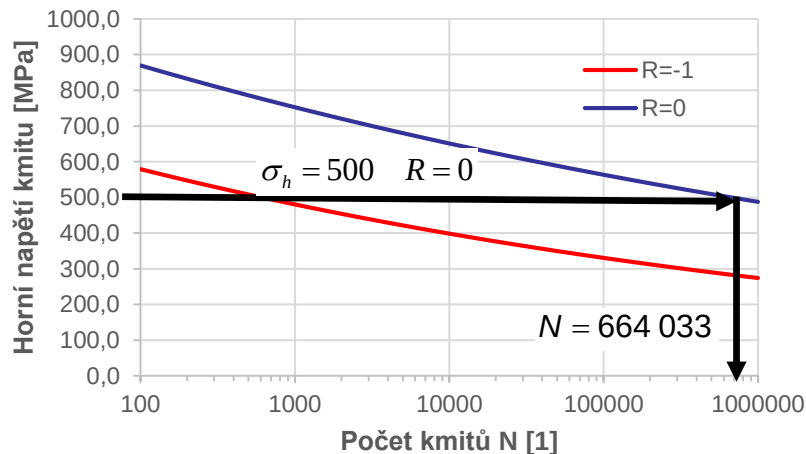


Př. Životnost v S-N křivkách

Přepočet míjivého cyklu o amplitudě 250 MPa (horním napětí 500 MPa) na ekvivalentní symetricky střídavý cyklus a životnost pro tento cyklus podle různých metod přepočtu...

$$\sigma_{a(R=0)}^{15,92} N = 9,94 \cdot 10^{43} \longrightarrow 250^{15,92} N = 9,94 \cdot 10^{43} \longrightarrow N = 664\,033$$

$$\sigma_{a(R=-1)}^{15,92} N = 6,163 \cdot 10^{48} \longrightarrow 500^{15,92} N = 6,163 \cdot 10^{48} \longrightarrow N = 664\,033$$

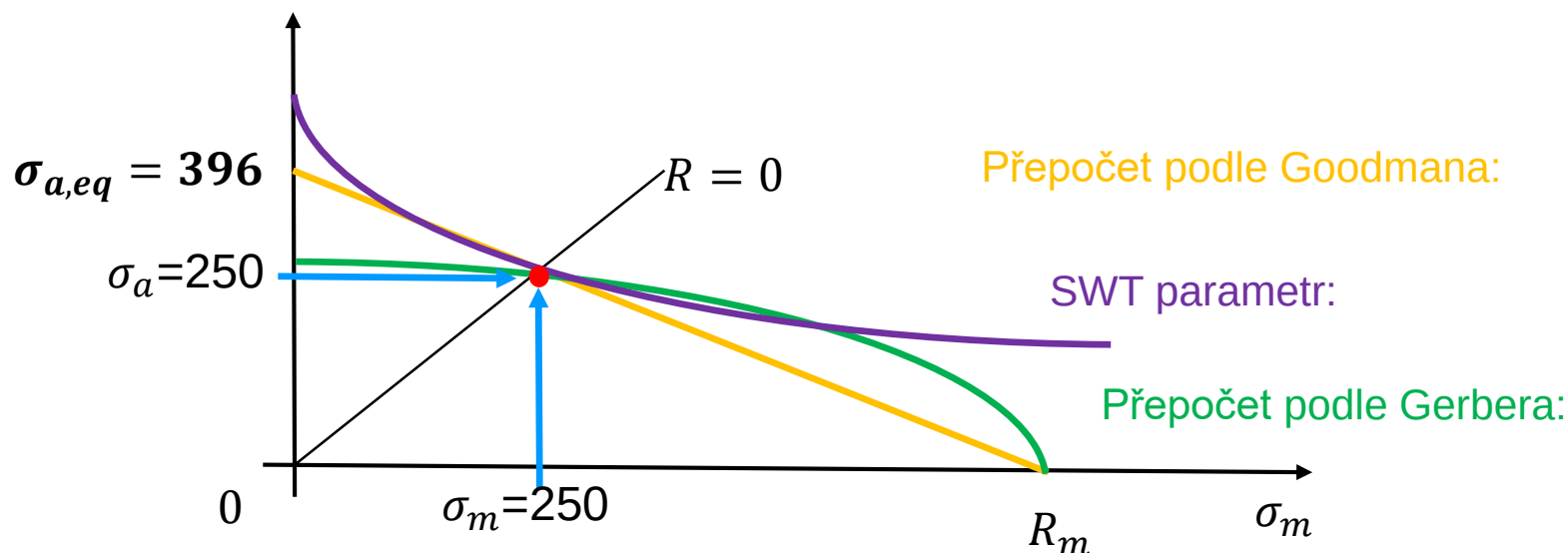


Př. Přepočty na ekvivalentní hodnoty

Přepočet míjivého cyklu o amplitudě 250 MPa (horním napětí 500 MPa) **na ekvivalentní symetricky střídavý cyklus** lze provést podle různých metod přepočtu (volí se dle zkušeností)...

a **životnost pro tento cyklus** se určí z S-N křivky pro $R=-1$

Grafické vyjádření obvyklých metod:



Př. Ekvivalentní napětí, životnost

Přepočet mívivého cyklu o amplitudě 250 MPa (horním napětí 500 MPa) na ekvivalentní symetricky střídavý cyklus a životnost pro tento cyklus podle různých metod přepočtu...

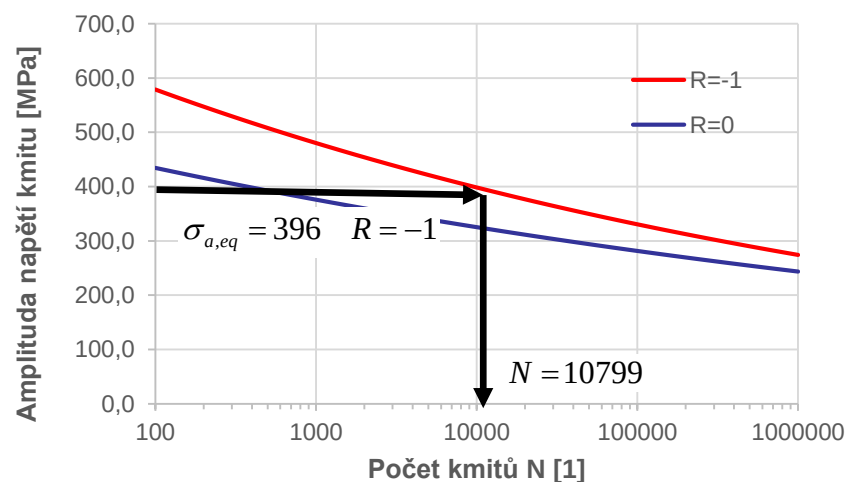
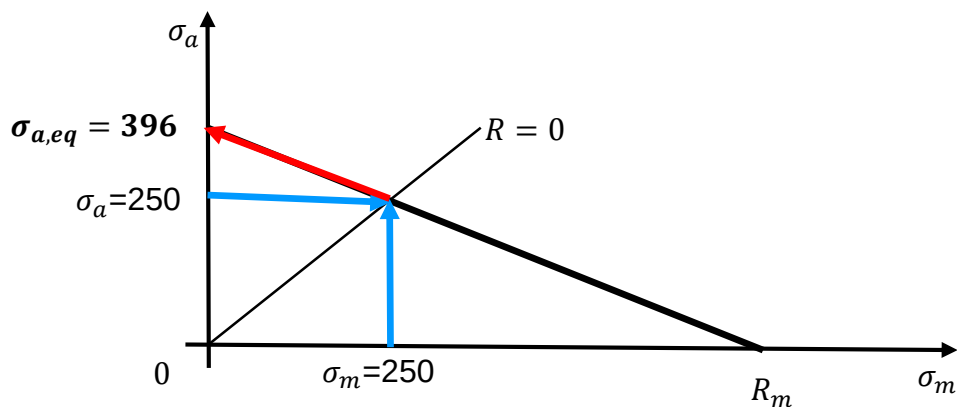
$$\sigma_{a(R=-1)}^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36}$$

$$\sigma_{a(R=-1)}^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow 396^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow N = 10799$$

Přepočet podle Goodmana:

$$\sigma_{a,eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}}$$

$$\sigma_{a,eq} = \frac{250}{1 - \frac{250}{678}} = 396 \text{ MPa}$$



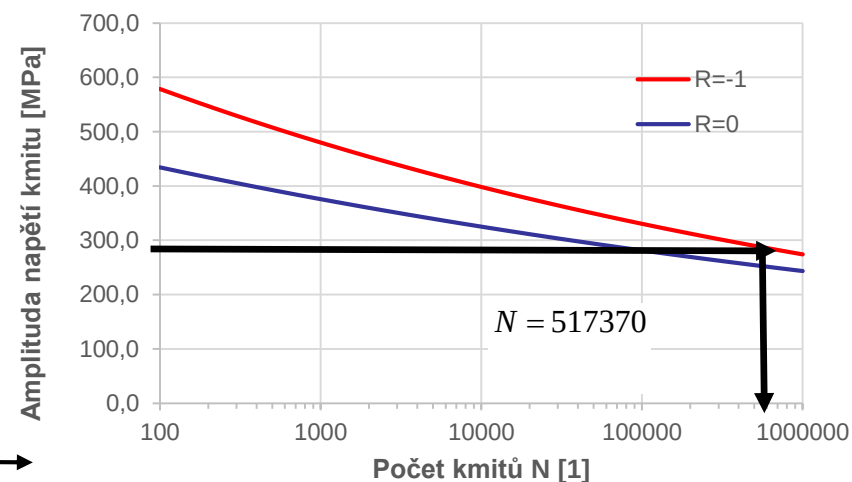
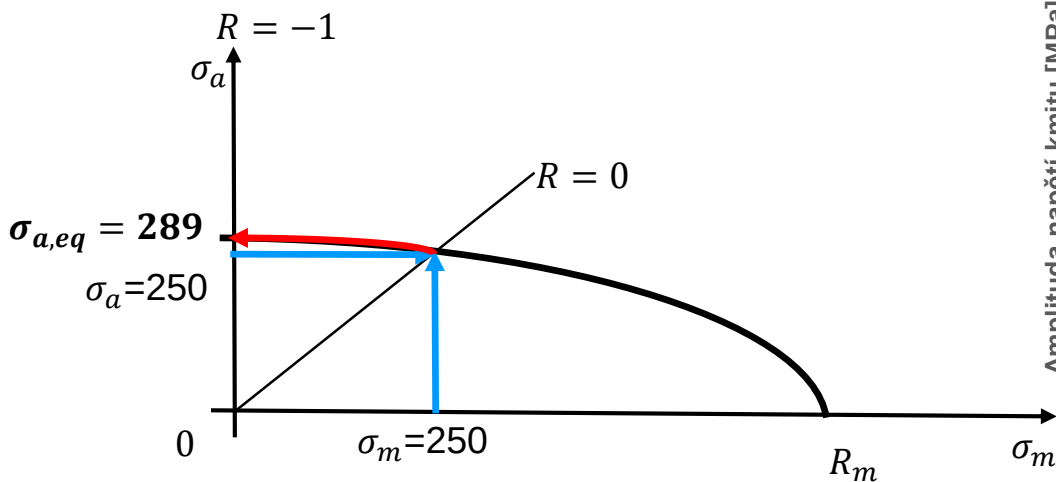
Př. Ekvivalentní napětí, životnost

Přepočet míjivého cyklu o amplitudě 250 MPa (horním napětí 500 MPa) na ekvivalentní symetricky střídavý cyklus a životnost pro tento cyklus podle různých metod přepočtu...

Podle Gerbera:

$$\sigma_{a,eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2} = \frac{250}{1 - \left(\frac{250}{678}\right)^2} = 289,34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a(R=-1)}^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow 289,34^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow N = 517\,370$$

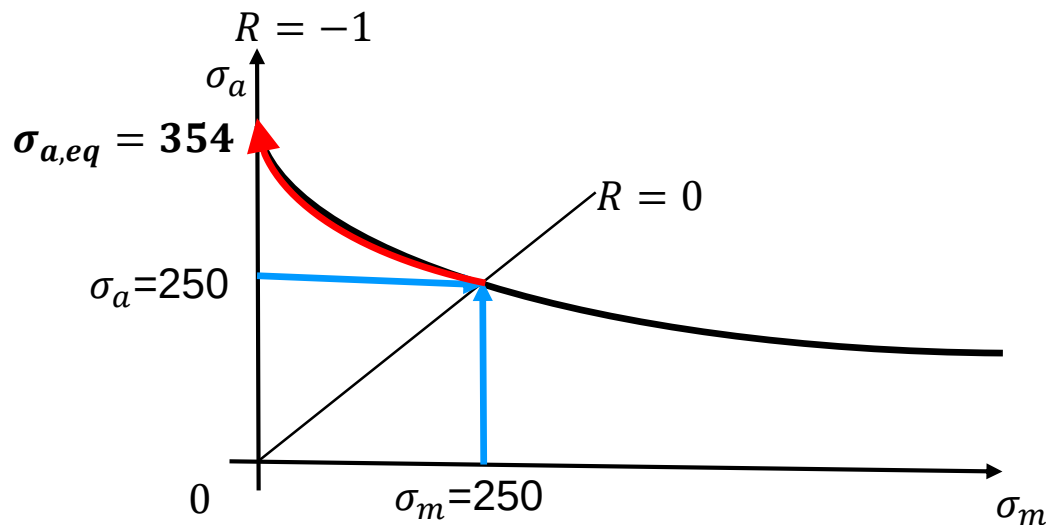


Př. Ekvivalentní napětí, životnost

Přepočet míjivého cyklu o amplitudě 250 MPa (horním napětí 500 MPa) na ekvivalentní symetricky střídavý cyklus a životnost pro tento cyklus podle různých metod přepočtu...

SWT parametr: $\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\sigma_a} = \sqrt{(250 + 250)250} = 353,55 \text{ MPa}$

$$\sigma_{a(R=-1)}^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow 353,55^{12,33} N = 1,156 \cdot 10^{36} \longrightarrow N = 43\,703$$



Kumulace poškození

Kumulace poškození

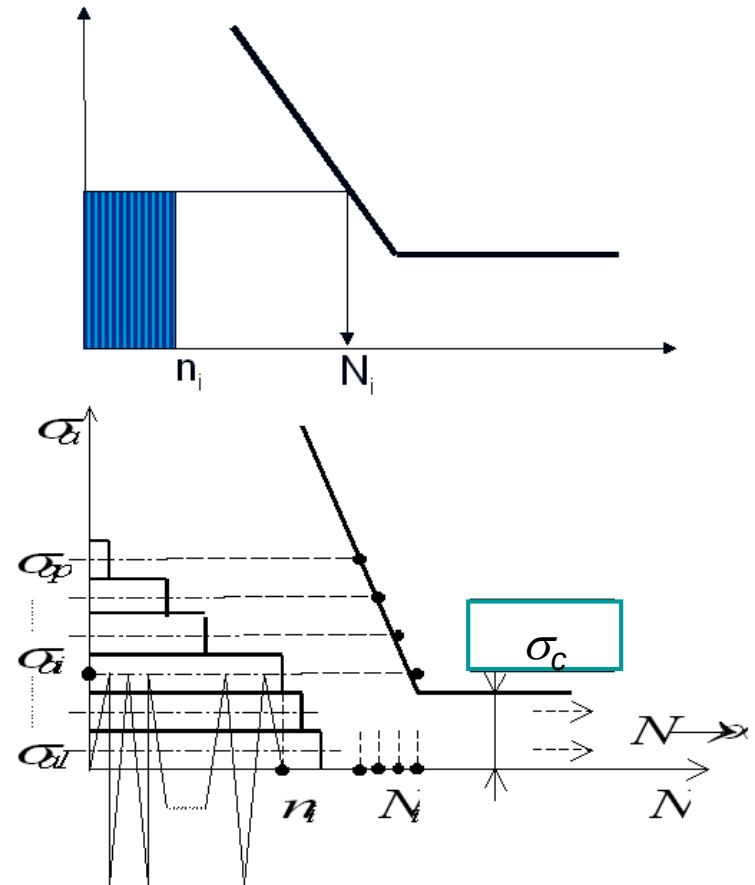
Forma zahrnutí poškození od různých dílčích hladin zatěžování konstrukce.

únavové poškození: $D_i = \frac{n_i}{N_i}$

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^g$$

Lineární kumulace poškození
Palmgren-Miner (Miner 1945)

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_p}{N_p} = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i}$$



Omezený únavový život – predikce

kritická hodnota poškození:

$$D_{cr} = 1$$

počet opakování zátěžné
sekvence do lomu:

$$Z = \frac{D_{cr}}{D} = \frac{1}{D}$$

rozsah zátěžné sekvence (počet cyklů):

$$h_0 = \sum_{i=1}^p n_i$$

rozsah zátěžné sekvence (provozní parametry): $l = [\text{hodiny, kilometry, ...}]$

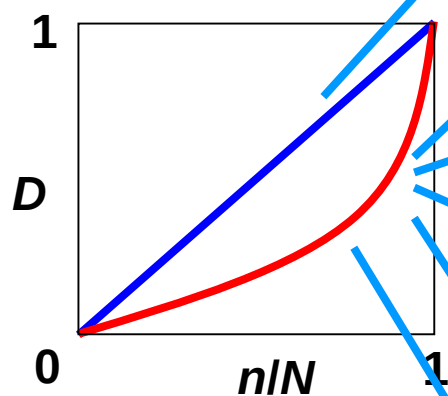
střední únavový život
(50% pravděpodobnost porušení):

$$\bar{L} = Z \cdot l$$

$$\bar{L} = Z \cdot h_0$$

$$\bar{L} = L_{50\%} = \frac{N_p}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{h_0} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w}$$

Kumulace poškození



Hypotéza	Únavové poškození	Střední únavový život	Poznámka
Palmgren-Miner	$D_{i,p-M} = \frac{n_i}{N_i}$	$L_{p-M} = \frac{N_p}{\sum_{i=r}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w}$	
Corten-Dolan	$D_{i,C-D} = \frac{n_i}{(N_i)_{kor}}$	$L_{C-D} = \frac{N_p}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^{kw}}$	$k = 0,7 \dots 1,0$
Serensen-Kogajev	$D_{i,s-K} = \frac{1}{a_p} \frac{n_i}{N_i}$	$L_{s-K} = \frac{a_p \cdot N_p}{\sum_{i=r}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w}$	$a_p = \frac{\frac{\sigma_{a,p}}{\sigma_C} \cdot \xi - \frac{\sigma_{a,r}}{\sigma_C}}{\frac{\sigma_{a,p}}{\sigma_C} - \frac{\sigma_{a,r}}{\sigma_C}}$ $\xi = \sum_{i=1}^p \frac{\sigma_{a,p}}{\sigma_C} \cdot \frac{n_i}{h_p}$
SVÚM (Linhart-Jelínek)	$D_{i,L-J} = \frac{n_i}{N_{i,p}}$	$L_{L-J} = \frac{b \cdot N_p}{\sum_{i=r}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w}$	$b = \frac{N_R}{N_{50}}$ spolehlivost $R = 95 \dots 99\%$
Sedláček	$D_{i,s} = \frac{n_i}{N_i} \frac{R_m}{R_m - \sigma_{a,p}}$	$L_s = \frac{s \cdot N_p}{\sum_{i=r}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w}$	$s = \frac{R_m - \sigma_{a,p}}{R_m}$
Energetická hypotéza	$D_{i,E} = \frac{\Delta U}{U_{cr}} n_i$	$L_E = \sum_{i=1}^p \frac{U}{\Delta U \cdot n_i} \cdot h$	kritickou energii U_{cr} z experimentu.

Bezpečný únavový život

Odvození přepočtu na bezpečný únavový život

$$S^2(x) = \mu^2(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - \mu(x)]^2 f(x) dx$$

Výpočty S při kombinaci náhodných dějů:

$$S^2(konst) = 0$$

$$S^2(konst \ X) = konst^2 S^2(X)$$

$$S^2(X \pm Y) = S^2(X) + S^2(Y)$$

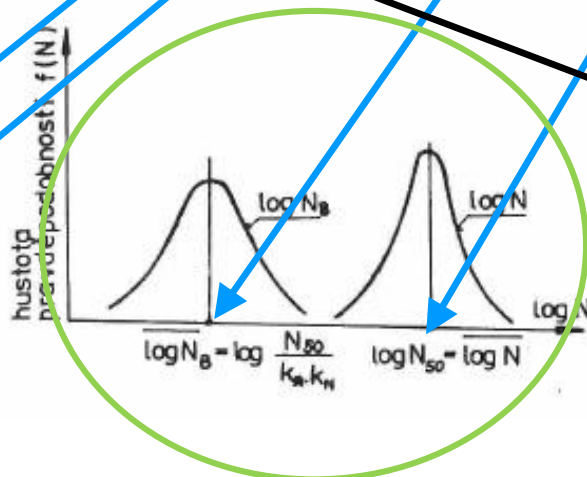
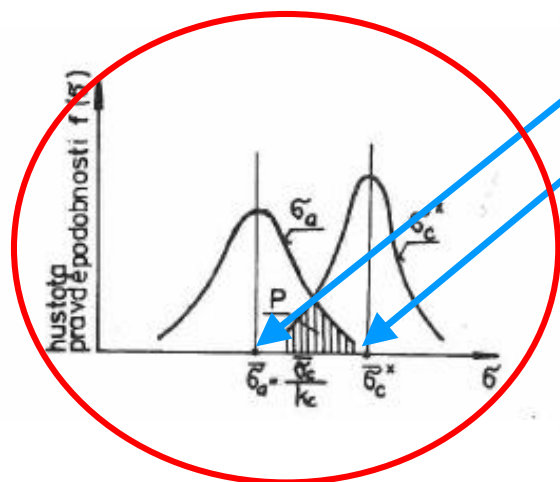
$$S^2(X) = \mu(X^2) - [\mu(X)]^2$$

teoreticky neomezená životnost
(příklad hřídele lokomotivy)

$$u_P = \frac{\bar{\sigma}_a - \bar{\sigma}_c^x}{S} = \frac{\bar{\sigma}_a - \bar{\sigma}_c^x}{\sqrt{S_a^2 + S_c^2}}$$

$$u_P = \frac{\log N_B - \log \bar{N}}{S} = \frac{\log N_B - \log \bar{N}}{\sqrt{S_{\log n}^2 + S_{\log N}^2}}$$

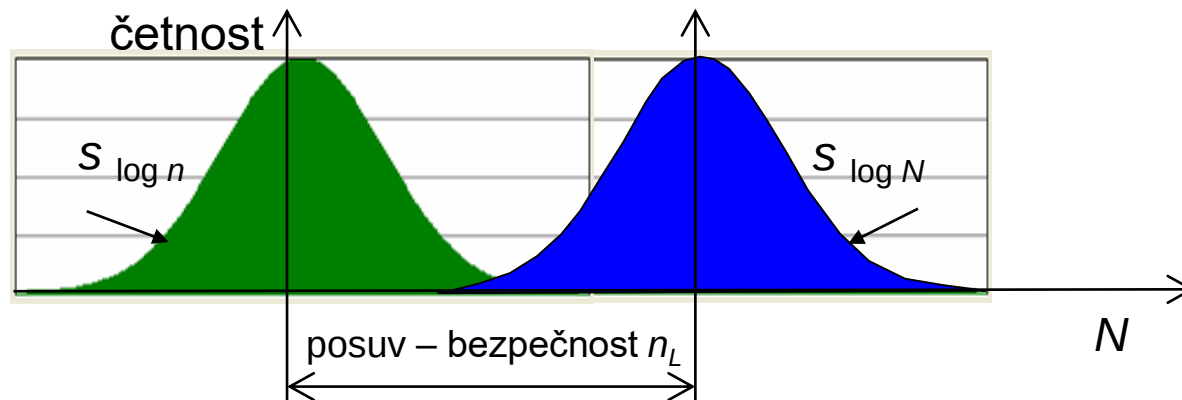
omezená životnost
(viz dále)



Využívá se přístup pro kombinaci dvou nezávislých náhodných dějů (rozdělení zátěže + rozdělení výdrže materiálu)

Bezpečný únavový život

bezpečný únavový život – pravděpodobnost poruchy $P \ll 1$ ($0,001\% \div 0,00001\%$)



směrodatná odchylka únavového života S-N křivky:

$S_{\log N}$

směrodatná odchylka únavového života zátěžné sekvence:

$S_{\log n}$

celková bezpečnost únavového života:

k_L

bezpečnost S-N křivky:

k_N

(3,0 ÷ 6,0)

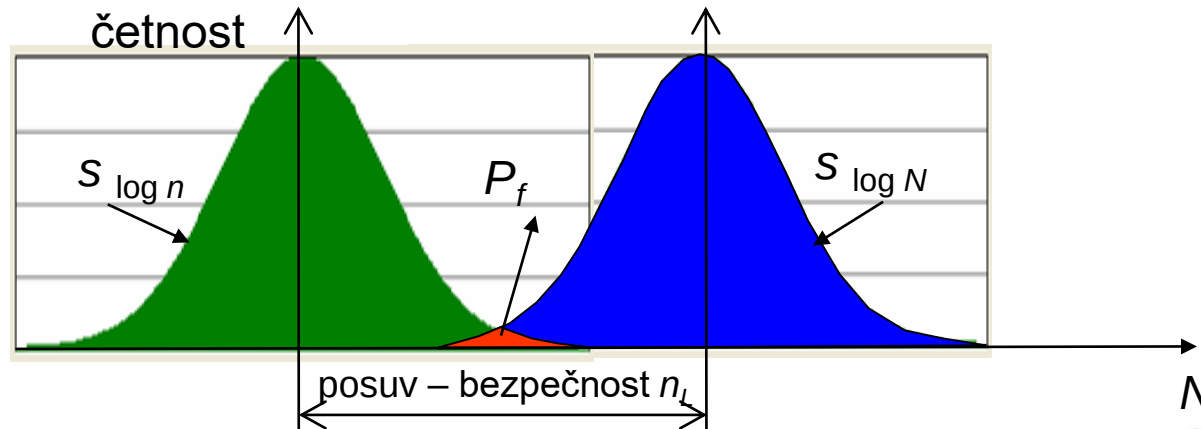
bezpečnost zátěžné sekvence:

k_n

(1,5 ÷ 2,0)

bezpečný únavový život:
$$L_B = \frac{L_{50\%}}{k_L} = \frac{L_{50\%}}{k_N k_n}$$

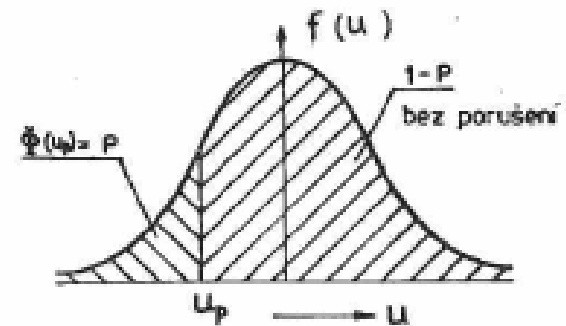
Pravděpodobnost poruchy



Předpoklad: log-normální rozdělení únavového života

Výpočet kvantilu a pravděpodobnosti porušení:

$$u_P = \frac{\log L_B - \log L_{50\%}}{\sqrt{s_{\log N}^2 + s_{\log n}^2}} = \frac{\log \frac{L_B}{L_{50\%}}}{\sqrt{s_{\log N}^2 + s_{\log n}^2}} = \frac{\log \frac{1}{k_L}}{\sqrt{s_{\log N}^2 + s_{\log n}^2}}$$

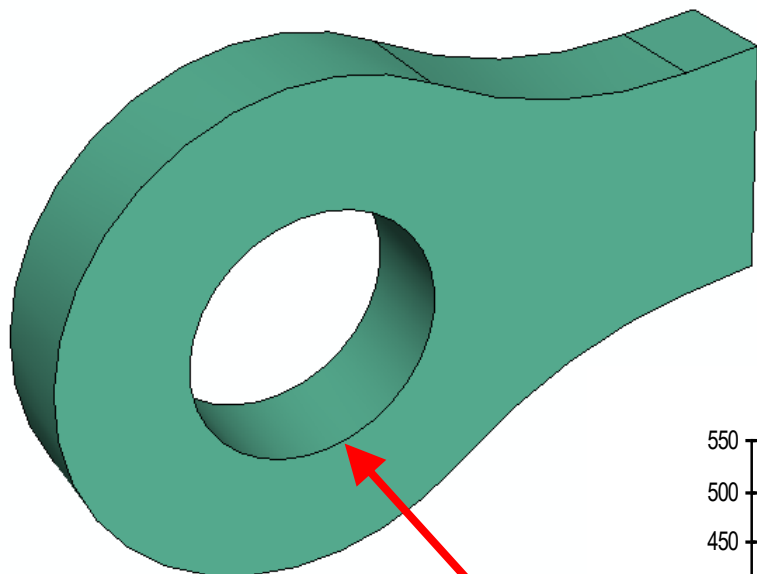


↔ P_f [%]

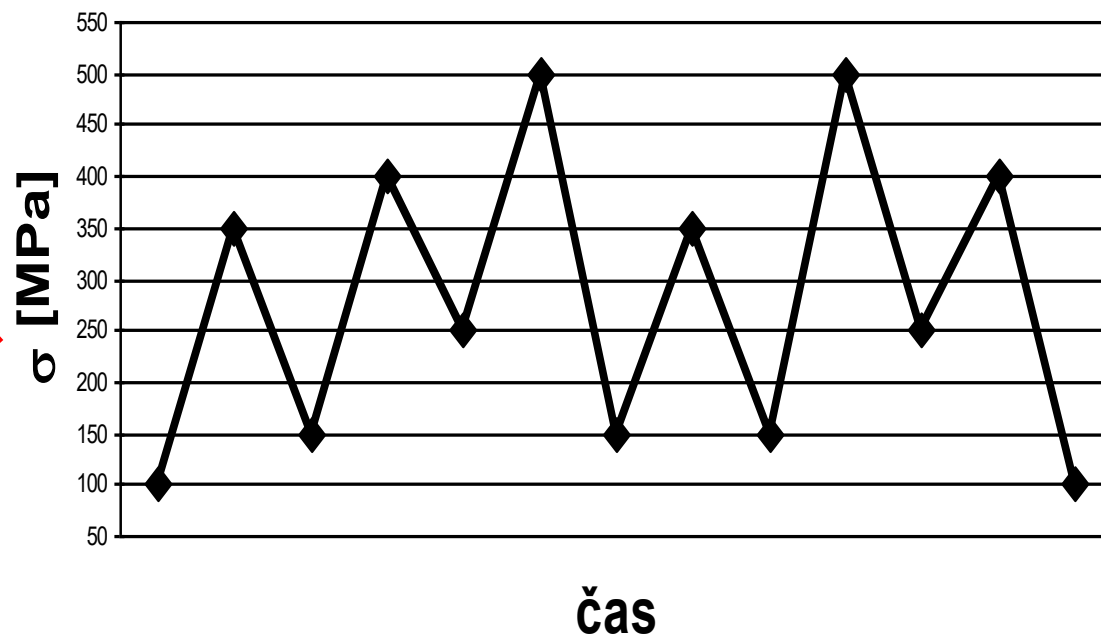
Př.: Životnost ocelového oka - zadání

- Vypočítat únavové poškození, střední a bezpečný únavový život ocelového závěsného oka namáhaného zkušební sekvencí zatížení (~ 100 km)
- Materiál: ocel L-ROL (14 331.7) $R_m = 1050$ MPa
- Součinitel bezpečnosti odvodit z podmínky pravděpodobnosti lomu na konci bezpečného života $P = 0,001$
- Únavová křivka napětí materiálu ($R = -1$) je dána na bázi 10^6 kmitů amplitudou $\sigma_c = 75$ MPa, $w_1 = 4$ pro $N < 10^6$, $w_2 = 8$ pro $N > 10^6$
- Směr. odchylka amplitud provozního zatížení $s_{\log n} = 0,12$
- Směr. odchylka únavové křivky $s_{\log N} = 0,15$

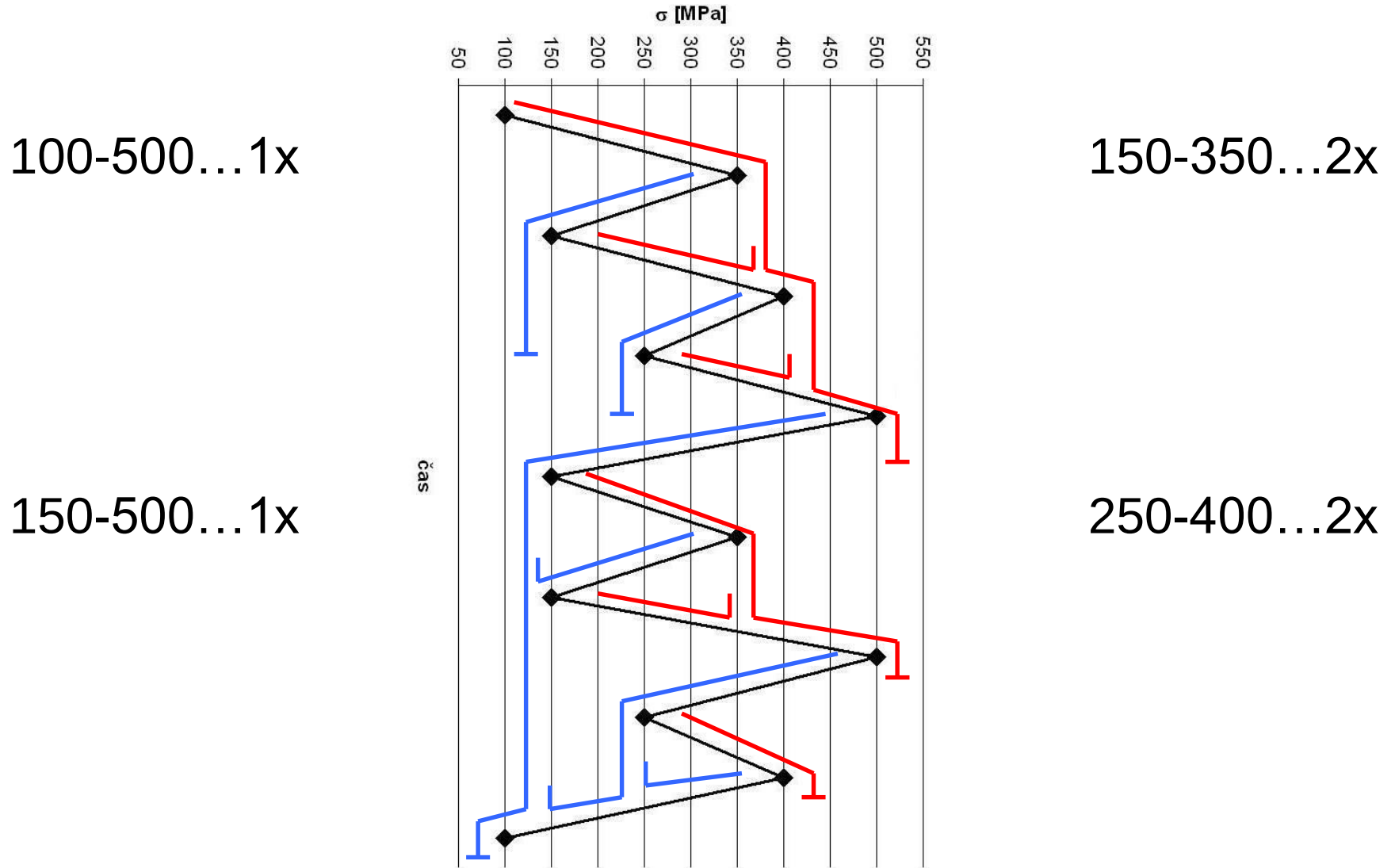
Zátěžná sekvence



sekvence napětí
pro kritické místo

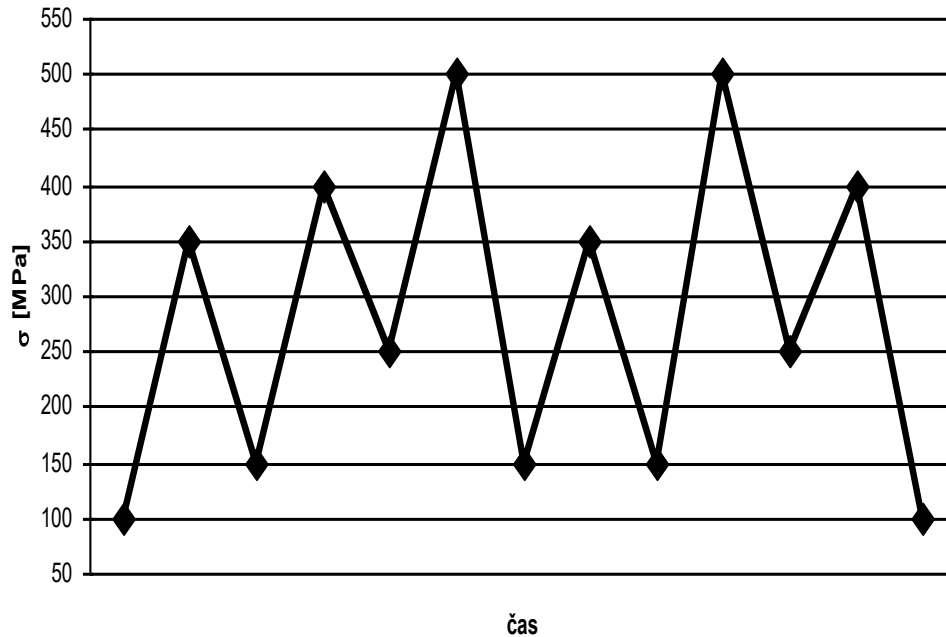


Rain Flow



Rain Flow - dekompozice

Dekompozice zatěžovacího histogramu do vypovídajících uzavřených napěťových cyklů



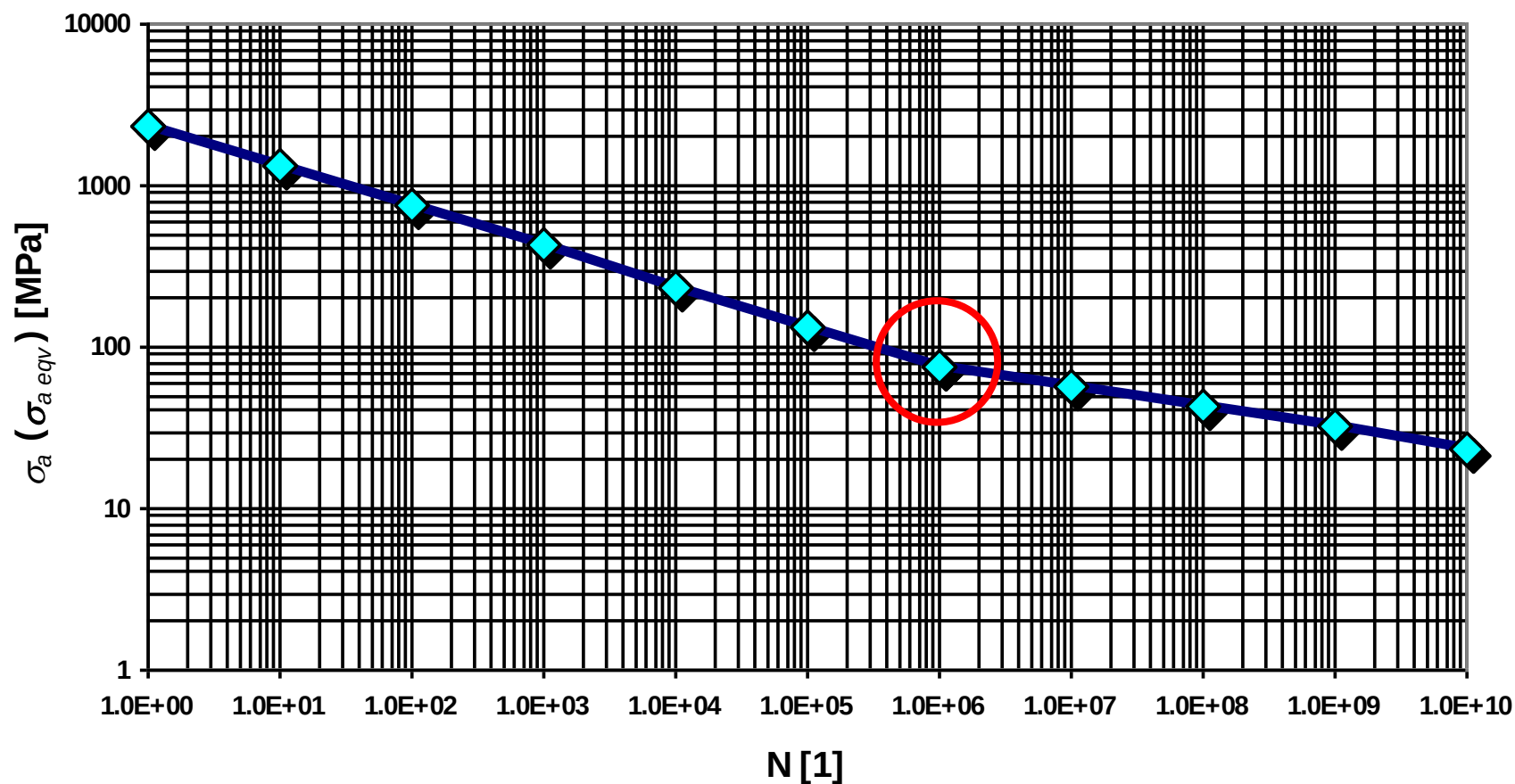
napětí [MPa]		četnost
dolní	horní	n_i
150	500	1
100	500	1
150	350	2
250	400	2

Uzavřené smyčky

σ_d [MPa]	σ_h [MPa]	R [1]	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	$\sigma_{a\text{ eqv}}$ [MPa]
150	500	0,3000	175	325	253
100	500	0,2000	200	300	280
150	350	0,4286	100	250	131
250	400	0,6250	75	325	109

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right)}$$

S-N křivka křivka oka



Kumulace poškození

$$N_i = \frac{C}{\sigma_{a,eqv}^w}$$

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

$\sigma_{a\,eqv}$ [MPa]	N_i [1]	n_i [1]	D_i [1]
253	7698	1	0,0001299069
280	5168	1	0,0001935116
131	107035	2	0,0000186854
109	228179	2	0,0000087651

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \dots = 0,000351$$

Pravděpodobnost poruchy

$$D = 0,000351$$

$$Z = \frac{1}{D} = \frac{1}{0,000351} = 2\,850,066$$

$$\bar{L} = 100 Z = 285\,007 \text{ km}$$

$$P = 0,001 \Rightarrow u_p = -3,09023$$

$$u_p = \frac{\log L_B - \log \bar{L}}{\sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}}$$

$$\log L_B = \log \bar{L} + u_p \sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}$$

$$\log L_B = \log \bar{L} + \log 10^{u_p \sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}}$$

$$k_L = \frac{\bar{L}}{L_B} = \frac{285\,007}{72\,651} = 3,923$$

$$L_B = \bar{L} 10^{u_p \sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}} = \dots = 72\,651 \text{ km}$$

Př.: Hladký hřídel – kumulace poškození

Hladký hřídel o průměru 12,0 mm je namáhán kombinací ohybu a krutu (symetricky střídavými). Je dána tabulka četností (histogram) amplitud ohybového a krouticího momentu, která odpovídá 12 měsícům provozu.

třída	M_o [N.mm]	M_k [N.mm]	n_i [kmitů]
1	20 000	50 000	10 000
2	50 000	75 000	5 000
3	70 000	100 000	200

Je dána Wöhlerova křivka (50% pravděp. poruš.) reálného hřídele při namáhání v tahu-tlaku popsána vztahem $\sigma_a^w N = \text{konst}$

Mez únavy 150 MPa pro bázi 10^6 cyklů. Exponent šikmé větve $w = 3,5$.

Jsou dány směrodatné odchylky logaritmů životů. Pro únavovou křivku $s_{\log N} = 0,15$. Pro zatížení $s_{\log n} = 0,2$.

Určit střední životnost hřídele, který je namáhán daným zatížením. Určit bezpečnou životnost hřídele tak, aby pravděpodobnost lomu nepřesáhla 1 % podle Palmgrenovy-Minerovy hypotézy kumulace poškození.

Zatížení

$$d = 12 \Rightarrow W_o = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi 12^3}{32} = 169,64 \text{ mm}^3 \quad W_k = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi 12^3}{16} = 339,29 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad \tau = \frac{M_k}{W_k} \quad \sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau^2}$$

třída	M_o [N.mm]	M_k [N.mm]	n_i [-]	σ_o [MPa]	τ [MPa]	σ_{red} [MPa]
1	20 000	50 000	10 000	117,89	147,37	281,16
2	50 000	75 000	5 000	294,73	221,05	483,17
3	70 000	100 000	200	412,62	294,73	656,40

Wöhlerova křivka, kumulace poškození, $L_{50\%}$

$$C = \sigma_a^w N = 150^{3,5} \cdot 10^6 = 4,13 \cdot 10^{13} \quad N_i = \frac{C}{\sigma_{red,a}^w} \quad D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

třída	$\sigma_{red,a}$ [MPa]	n_i [-]	N_i [-]	D_i [-]
1	281,16	10 000	110918,67	0,090156
2	483,17	5 000	16671,22	0,299918
3	656,40	200	5704,72	0,035059

$$D = \sum_{i=1}^3 D_i = \sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{N_i} = 0,425$$

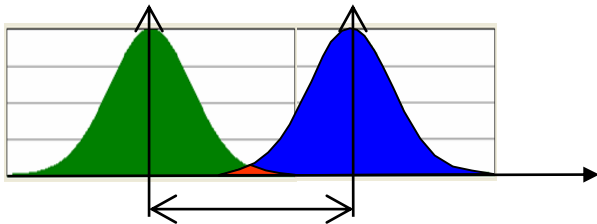
$$Z = \frac{1}{D} = \frac{1}{0,425} = 2,352$$

$$L_{50\%} = I Z = 12 \cdot 2,352 = 28,226 \text{ měsíců}$$

Bezpečný život

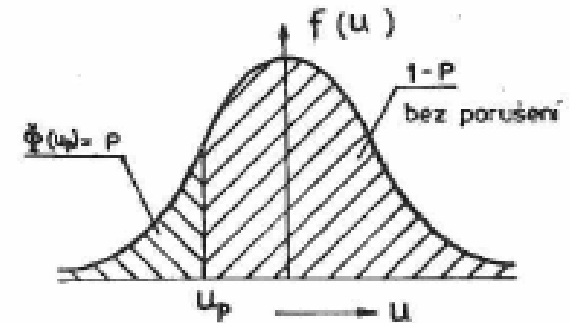
$$D = \sum_{i=1}^3 D_i = \sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{N_i} = 0,425$$

$$L_{50\%} = l \cdot Z = 12 \cdot 2,352 = 28,226$$



$$P = 0,01 \Rightarrow u_p = -2,362$$

EXCEL: NORMINV



$$L_B = L_{50\%} 10^{u_p \sqrt{s_{\log N}^2 + s_{\log n}^2}} = 28,226 \cdot 10^{-2,362 \sqrt{0,15^2 + 0,12^2}} = 7,392 \text{ měsíce}$$

$$k_L = \frac{L_{50\%}}{L_B} = \frac{28,226}{7,392} = 3,816$$