

Příloha D (informativní)

Navrhování pomocí zkoušek

D.1 Rozsah platnosti a účel

(1) Tato příloha poskytuje pokyny k článkům 3.4, 4.2 a 5.2.

(2) Příloha není určena k tomu, aby nahradila pravidla uvedená v harmonizovaných evropských specifikacích pro výrobky, v dalších specifikacích pro výrobky nebo v normách pro provádění.

D.2 Značky

V této příloze platí následující značky.

Velká písmena latinské abecedy

$E(.)$	průměrná hodnota $(.)$
V	variační koeficient [$V = (\text{směrodatná odchylka})/(\text{průměrná hodnota})$]
V_X	variační koeficient veličiny X
V_δ	odhad variačního koeficientu odchylky δ
$\underline{X}$	vektor j základních veličin $X_1 \dots X_j$
$X_{k(n)}$	charakteristická hodnota zahrnující statistickou nejistotu pro náhodný výběr o velikosti n , neuvažuje se převodní součinitel
$\underline{X}_m$	vektor průměrných hodnot základních veličin
$\underline{X}_n$	vektor nominálních hodnot základních veličin

Malá písmena latinské abecedy

b	opravný součinitel
b_i	opravný součinitel pro i -tý zkušební vzorek
$g_{rt}(\underline{X})$	funkce odolnosti (základních veličin $\underline{X}$) použitá jako návrhový model
$k_{d,n}$	koeficient kvantilu návrhové hodnoty
k_n	koeficient kvantilu charakteristické hodnoty
m_X	průměr veličiny X stanovený z n výsledků náhodného výběru
n	počet experimentů nebo numerických výsledků zkoušek
r	hodnota odolnosti
r_d	návrhová hodnota odolnosti
r_e	hodnota experimentálně stanovené odolnosti
r_{ee}	extrémní (maximální nebo minimální) hodnota experimentálně stanovené odolnosti (např. taková hodnota r_e , která se nejvíce odchyluje od průměrné hodnoty r_{em})
r_{ei}	experimentálně stanovená odolnost i -tého vzorku
r_{em}	průměrná hodnota experimentálně stanovené odolnosti
r_k	charakteristická hodnota odolnosti
r_m	hodnota odolnosti vypočtená pomocí průměrných hodnot $\underline{X}_m$ základních veličin
r_n	nominální hodnota odolnosti
r_t	teoretická odolnost stanovená na základě funkce $g_{rt}(\underline{X})$

r_{ti}	teoretická odolnost stanovená prostřednictvím měřených parametrů $\underline{X}$ pro i -tý vzorek
s	odhadnutá směrodatná odchylka pro σ
s_{Δ}	odhadnutá hodnota pro σ_{Δ}
s_{δ}	odhadnutá hodnota pro σ_{δ}

Velká písmena řecké abecedy

Φ	distribuční funkce normovaného normálního rozdělení
Δ	logaritmus odchylky δ [$\Delta_i = \ln(\delta_i)$]
$\bar{\Delta}$	odhad hodnoty $E(\Delta)$

Malá písmena řecké abecedy

α_E	součinitel citlivosti podle metody FORM (spolehlivostní metoda prvního řádu) pro účinky zatížení
α_R	součinitel citlivosti podle metody FORM (spolehlivostní metoda prvního řádu) pro odolnost
β	index spolehlivosti
δ	odchylka
δ_i	pozorovaná odchylka pro i -tý zkušební vzorek získaná z porovnání experimentálně stanovené odolnosti r_{ei} a průměrné hodnoty opravené teoretické odolnosti br_{ti}
η_d	návrhová hodnota převodního součinitele (pokud není zahrnut v dílčím součiniteli odolnosti γ_M)
η_k	redukční součinitel pro případ apriorní znalosti
σ	směrodatná odchylka ($\sigma = \sqrt{\text{rozptyl}}$)
σ_{Δ}^2	rozptyl veličiny Δ

D.3 Druhy zkoušek

(1) Je potřebné rozlišovat následující druhy zkoušek:

- zkoušky pro přímé stanovení mezní odolnosti, provozních vlastností konstrukce nebo nosných prvků s danými zatěžovacími podmínkami; takové zkoušky se mohou například provádět pro zatížení na únavu nebo nárazové síly;
- zkoušky pro získání specifických materiálových vlastností prostřednictvím specifických zkušebních postupů; například zkoušky základové půdy in situ nebo v laboratoři, nebo zkoušky nových materiálů;
- zkoušky pro snížení nejistot parametrů v modelech zatížení nebo v modelech účinků zatížení; např. zkoušky ve větrných tunelech nebo zkoušky, pomocí nichž se zjistí zatížení vlnami nebo proudy;
- zkoušky pro snížení nejistot parametrů použitých v modelech odolnosti; např. zkoušky nosných prvků nebo sestav nosných prvků (např. střešní nebo stropní konstrukce);
- kontrolní zkoušky pro ověření identity nebo jakosti dodaných výrobků nebo shody výrobních charakteristik; např. zkoušky kabelů pro mosty nebo zkoušky betonových krychlí;
- zkoušky prováděné během výstavby pro získání údajů potřebných pro etapu výstavby; např. zkoušky únosnosti pilot, zkoušky sil v kabelech během výstavby;
- kontrolní zkoušky pro ověření skutečného chování konstrukce nebo nosných prvků po dokončení výstavby, např. aby se zjistil pružný průhyb, frekvence kmitání nebo tlumení;

(2) Tam, kde je to proveditelné, mají se u zkoušek typu (a), (b), (c), (d) odvodit návrhové hodnoty z výsledků zkoušek prostřednictvím přijatých statistických metod. Viz D.5 až D.8.

POZNÁMKA Pro vyhodnocení výsledků zkoušek typu (c) mohou být potřebné speciální metody.

(3) Pokud nejsou v době návrhu k dispozici výsledky zkoušek, pak se mohou zkoušky typu (e), (f), (g) považovat za přejímací zkoušky. Návrhové hodnoty mají být konzervativními odhady, o nichž se předpokládá, že jsou v dalším stádiu schopny splnit přejímací kritéria (zkoušky (e), (f), (g)).

D.4 Plánování zkoušek

Před prováděním zkoušek se má plán zkoušek odsouhlasit se zkušební organizací. Tento plán má zahrnovat cíle zkoušek a všechny specifikace potřebné pro výběr vzorků nebo výrobu zkušebních těles, pro provedení zkoušek a jejich vyhodnocení. Plán zkoušek má zahrnovat:

- cíle a rozsah;
- predikci výsledků zkoušek;
- specifikaci zkušebních vzorků a náhodného výběru;
- specifikaci zatěžování;
- uspořádání zkoušek;
- měření;
- vyhodnocení a protokol o zkoušce.

Cíle a rozsah: Cíle zkoušek se mají jasně vytyčit, např. požadované vlastnosti, vliv určitých návrhových, během zkoušek proměnných parametrů, a rozsah platnosti. Je třeba stanovit omezení zkoušek a potřebné převody (např. vliv velikosti).

Predikce výsledků zkoušek: V úvahu se vezmou všechny vlastnosti a okolnosti, které mohou ovlivnit predikci výsledků zkoušek včetně:

- geometrických parametrů a jejich proměnnosti;
- geometrických imperfekcí;
- vlastností materiálů;
- parametrů ovlivněných výrobou a postupy provádění;
- míry vlivu podmínek prostředí, případně s uvážením jejich postupného působení.

Mají se popsat očekávané způsoby porušení a/nebo výpočetní modely včetně příslušných proměnných veličin. Pokud existuje značná pochybnost o tom, který ze způsobů porušení může být kritickým, pak se zpracuje plán zkoušek na základě zkoušek pilotních.

POZNÁMKA Je třeba věnovat pozornost skutečnosti, že k porušení nosného prvku může dojít zásadně odlišnými způsoby.

Specifikace zkušební vzorku a výběru: Zkušební vzorky se mají určit nebo získat na základě náhodného výběru tak, aby byly popsány podmínky skutečné konstrukce.

Faktory, které se mají uvážit, zahrnují

- rozměry a odchylky;
- materiál a výrobu prototypů;
- počet zkušebních vzorků;
- postupy výběru vzorků;
- omezující podmínky.

Cílem náhodného výběru je získat statisticky reprezentativní vzorek.

Má se věnovat pozornost každému rozdílu mezi zkušebními vzorky a základním souborem výrobků, který by mohl ovlivnit výsledky zkoušek.

Specifikace zatížení: Pro zkoušku se mají určit podmínky zatěžování a prostředí, které zahrnují

- zatěžovací body;
- postup zatěžování;
- omezující podmínky;

- teploty;
- relativní vlhkost;
- řízení zatěžování na základě kontroly deformací nebo sil, atd.

Průběh zatěžování se má vybrat tak, aby reprezentoval očekávané funkční uplatnění nosného prvku za normálních a nepříznivých podmínek. V příslušných případech se má uvážit spolupůsobení mezi konstrukcí a zkušebními zařízeními.

Jestliže chování konstrukce závisí na účincích jednoho nebo více zatížení, která se nemění systematicky, stanoví se tyto účinky prostřednictvím jejich reprezentativních hodnot.

Uspořádání zkoušek: Zkušební zařízení má odpovídat daným druhům zkoušek a očekávanému rozsahu měření. Zvláštní pozornost se má věnovat tomu, aby zařízení pro zatěžování a pro podepření měla dostatečnou pevnost a tuhost a aby se zajistila vůle pro průhyby atd.

Měření: Před zahájením zkoušek se má stanovit seznam všech vlastností každého zkušební vzorku, které se budou sledovat. Navíc se má zhotovit seznam:

- a) měřicích míst;
- b) postupů pro zaznamenávání výsledků:
 - časového průběhu posuvů;
 - rychlostí;
 - zrychlení;
 - poměrných přetvoření;
 - sil a tlaků;
 - požadovaných frekvencí;
 - přesnosti měření a
 - odpovídajících měřicích zařízení.

Vyhodnocení a protokol o zkoušce: Specifické pokyny jsou v člancích D.5 až D.8. Mají se uvést všechny normy, podle nichž se zkoušky provádějí.

D.5 Odvození návrhových hodnot

(1) Návrhové hodnoty materiálových vlastností, modelových parametrů nebo odolnosti se mají odvodit z výsledků zkoušek jedním z následujících postupů:

- a) stanovená charakteristická hodnota se dělí dílčím součinitelem a v případě potřeby násobí převodním součinitelem (viz D.7.2 a D.8.2);
- b) návrhová hodnota se určí přímo, s implicitním nebo explicitním uvážením konverze výsledků a celkové požadované spolehlivosti (viz D.7.3 a D.8.3).

POZNÁMKA Obecně je preferována metoda a), jestliže se hodnota dílčího součinitele určí pomocí běžného návrhového postupu (viz níže uvedený odstavec (3)).

(2) Při odvození charakteristické hodnoty ze zkoušek (metoda (a)) se má uvážit:

- a) rozptyl zkušebních dat;
- b) statistická nejistota z hlediska počtu zkoušek;
- c) apriorní statistická znalost.

(3) Pokud je dostatečná shoda zkoušek a běžného rozsahu aplikace dílčích součinitelů při numerickém ověřování, pak se má pro charakteristickou hodnotu použít dílčí součinitel podle příslušného Eurokódu.

(4) Pokud odezva konstrukce nebo nosného prvku, nebo odolnost materiálu závisí na vlivech, které nejsou dostatečně zachyceny zkouškami, jako jsou

- účinky času a doby trvání,
- účinky měřítka a velikosti,

- rozdílné prostředí, zatěžovací a okrajové podmínky,
- vliv odolnosti,

pak se mají tyto vlivy příslušně uvážit ve výpočetním modelu.

(5) Ve zvláštních případech, v nichž se použije metoda podle D.5(1)b), se při určení návrhových hodnot vezmou v úvahu

- příslušné mezní stavy;
- požadovaná úroveň spolehlivosti;
- slučitelnost s předpoklady pro zatížení ve výrazu (C.8a);
- požadovaná návrhová životnost;
- apriorní znalost z podobných případů.

POZNÁMKA Další informace lze nalézt v D.5, D.7 a D.8.

D.6 Obecné zásady statistického hodnocení

(1) Při hodnocení výsledků zkoušek se má porovnat chování zkušebních vzorků a způsoby porušení s teoretickými předpoklady. Pokud nastane značná odchylka od předpokladu, je třeba hledat vysvětlení; to může zahrnovat doplňující zkoušky, pravděpodobně za jiných podmínek, nebo změnu teoretického modelu.

(2) Výsledky zkoušek se mají hodnotit na základě statistických metod, pomocí dostupných statistických znalostí o typu rozdělení a jeho příslušných parametrech. Metody uvedené v této příloze se mají použít pouze tehdy, pokud jsou splněny následující podmínky:

- statistické údaje (včetně apriorních informací) jsou převzaty ze známých základních souborů, které jsou dostatečně homogenní, a
- je k dispozici dostatečný počet pozorování.

POZNÁMKA: Při hodnocení výsledků zkoušek se mohou rozlišovat tři hlavní kategorie:

- pokud se provádí pouze jedna zkouška (nebo velmi málo zkoušek), není možné klasické statistické hodnocení. Pouze za předpokladu, že se použijí rozsáhlé apriorní informace spojené s hypotézou o relativních stupních důležitosti těchto informací a výsledků zkoušek, lze hodnocení pojmout jako statistické (Bayesovské postupy, viz ISO 12491);
- pokud se pro odhad parametru provádí řada zkoušek, je možné klasické statistické hodnocení. Běžnější případy jsou pojednány jako příklady v D.7. Toto pojetí bude ještě vyžadovat použití apriorní informace o parametru; v běžných případech to však bude méně potřebné než ve výše uvedeném případě.
- pokud se z důvodu kalibrace modelu (jako funkce) a s ním spojeným jedním nebo více parametry provádí řada zkoušek, je možné klasické statistické hodnocení.

(3) Výsledek hodnocení zkoušky se má považovat za platný pouze pro specifikace a charakteristiky zatížení uvažované při zkouškách. Pokud se výsledky extrapolují tak, aby se pokryly další návrhové parametry a zatížení, mají se použít doplňující informace z předchozích zkoušek nebo založené na teoretickém podkladě.

D.7 Stanovení jedné nezávislé vlastnosti statistickými metodami

D.7.1 Všeobecně

(1) Jestliže se použijí metody hodnocení (a) a (b) z D.5(1), pak tento článek poskytuje výpočetní vztahy pro odvození návrhových hodnot ze zkoušek typu (a) a (b) podle D.3(1) jednu nezávislou vlastnost (např. pevnost).

POZNÁMKA Uvedený výraz, který používá Bayesovské postupy s „vágním“ apriorním rozdělením, vede téměř ke stejným výsledkům jako klasická statistická metoda s úrovní konfidence 0,75.

(2) Jedna nezávislá vlastnost X může představovat:

- a) odolnost výrobku,

b) vlastnost, která přispívá k odolnosti výrobku.

(3) V případě a) se mohou postupy D.7.2 a D.7.3 použít přímo pro stanovení charakteristických nebo návrhových hodnot nebo hodnot dílčích součinitelů.

(4) V případě b) se má uvažovat, že návrhová hodnota odolnosti také zahrne:

- účinky dalších vlastností;
- modelové nejistoty;
- další účinky (velikosti, objemu, atd.).

(5) Tabulky a výrazy v článcích D.7.2 a D.7.3 vycházejí z následujících předpokladů:

- všechny veličiny jsou normálně nebo lognormálně rozděleny;
- neexistuje apriorní znalost průměru;
- v případě „ V_X neznámý“ neexistuje apriorní znalost variačního koeficientu;
- v případě „ V_X známý“ je variační koeficient plně znám.

POZNÁMKA Přijetí lognormálního rozdělení pro určité veličiny má tu výhodu, že nemůže dojít k výskytu záporných hodnot např. u geometrických veličin a parametrů odolnosti.

Ve skutečnosti bývá často výhodnější použít případ „ V_X známý“ spolu s konzervativním horním odhadem V_X , než aplikovat pravidla uvedená pro případ „ V_X neznámý“. Navíc, pokud je V_X neznámý, nemá se uvažovat menší než 0,10.

D.7.2 Hodnocení prostřednictvím charakteristické hodnoty

(1) Návrhová hodnota veličiny X se stanoví ze vztahu:

$$X_d = \eta_d \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} m_X \{1 - k_n V_X\} \quad (D.1)$$

kde η_d je návrhová hodnota převodního součinitele.

POZNÁMKA Odhad odpovídajícího převodního součinitele významně závisí na druhu zkoušky a typu materiálu.

Hodnotu k_n lze nalézt v tabulce D.1.

(2) Pokud se použije tabulka D.1, má se uvážit jeden ze dvou následujících případů:

- řada „ V_X známý“ se má použít, jestliže je variační koeficient V_X nebo jeho reálná horní hranice apriorně známa;

POZNÁMKA Apriorní znalost může vycházet z hodnocení předchozích zkoušek provedených ve srovnatelných situacích. Co je „srovnatelné“ je třeba stanovit pomocí inženýrského úsudku.

- řada „ V_X neznámý“ se má použít, jestliže variační koeficient V_X není apriorně znám a je potřebné ho odhadnout z náhodného výběru jako:

$$s_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_X)^2 \quad (D.2)$$

$$V_X = s_X / m_X \quad (D.3)$$

(3) Podle způsobu aplikace výsledků zkoušek se má zvolit dílčí součinitel γ_m .

Tabulka D.1 – Hodnoty k_n pro 5 % charakteristickou hodnotu.

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X známý	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_X neznámý	–	–	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

POZNÁMKA 1 Tabulka vychází z normálního rozdělení.

POZNÁMKA 2 Pro lognormální rozdělení nabývá výraz (D.1) tvar:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp[m_y - k_n s_y]$$

$$\text{kde } m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i)$$

Jestliže je V_X apriorně známý, $s_y = \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)} \approx V_X$

Jestliže V_X není apriorně známý, $s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - m_y)^2}$

D.7.3 Přímý odhad návrhové hodnoty pro ověřování mezních stavů únosnosti

(1) Návrhová hodnota X_d se má pro X nalézt prostřednictvím:

$$X_d = \eta_d m_X (1 - k_{d,n} V_X) \quad (\text{D.4})$$

V tomto případě má η_d zahrnovat všechny nejistoty, které nejsou pokryty zkouškami.

(2) $k_{d,n}$ se získá z tabulky D.2.

Tabulka D.2 – Hodnoty $k_{d,n}$ pro návrhové hodnoty v mezních stavech únosnosti

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X známý	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
V_X neznámý	–	–	–	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

POZNÁMKA 1 Tabulka vychází z předpokladu, že návrhová hodnota odpovídá součinu $\alpha_R \beta = 0,8 \times 3,8 = 3,04$ (viz příloha C) a že X je normálně rozdělené. Tím je dána 0,1 % pravděpodobnost výskytu nižší hodnoty.

POZNÁMKA 2 Pro lognormální rozdělení nabývá výraz (D.4) tvaru:

$$X_d = \eta_d \exp(m_y - k_{d,n} s_y)$$

D.8 Stanovení modelů odolnosti statistickými metodami

D.8.1 Všeobecně

(1) Záměrem tohoto článku je definovat postupy (metody) pro kalibraci modelů odolnosti a pro odvození návrhových hodnot ze zkoušek typu d) (viz D.3(1)). Použije se dostupná apriorní informace (znalosti nebo předpoklady).

(2) Na základě pozorování skutečného chování během zkoušek a teoretických předpokladů se vypracuje „návrhový model“, jehož účelem je odvození funkce odolnosti. Platnost modelu se má zkontrolovat na základě statistického zhodnocení všech dostupných zkušebních dat. V případě potřeby se návrhový model upraví tak, aby se dosáhlo dostatečné korelace mezi teoretickými hodnotami a údaji ze zkoušek.

(3) Na základě zkoušek se má také stanovit odchylka od předpokladů, která byla získána pomocí návrhového modelu. Tuto odchylku je nutno kombinovat s odchylkami dalších veličin ve funkci odolnosti, aby se zjistil odhad celkové odchylky. Tyto další veličiny zahrnují:

- odchylky pevnosti materiálů a tuhosti;
- odchylky geometrických vlastností.

(4) Pro stanovení charakteristické odolnosti se mají vzít v úvahu odchylky všech veličin.

(5) V D.5(1) jsou rozlišeny dvě rozdílné metody. Tyto metody jsou uvedeny v D.8.2, resp. v D.8.3. Navíc jsou v D.8.4 uvedena některá možná zjednodušení.

Tyto metody jsou uvedeny prostřednictvím řady samostatných kroků, a jsou zavedeny a vysvětleny některé předpoklady týkající se zkušebního souboru; tyto předpoklady se považují pouze za doporučení, která pokrývají některé běžnější případy.

D.8.2 Standardní postup hodnocení (metoda (a))

D.8.2.1 Všeobecně

(1) Pro standardní postup hodnocení jsou zavedeny následující předpoklady:

- funkce odolnosti je funkcí řady nezávislých veličin $\underline{X}$;
- k dispozici je dostatečný počet výsledků zkoušek;
- měří se všechny příslušné geometrické a materiálové vlastnosti;
- ve funkci odolnosti neexistuje korelace (statistická závislost) mezi veličinami;
- všechny veličiny mají normální nebo lognormální rozdělení.

POZNÁMKA Výhodou přijetí lognormálního rozdělení pro veličinu je, že se nemohou vyskytnout záporné hodnoty.

(2) Standardní postup pro metodu D.5(1)a se skládá ze 7 kroků, které jsou uvedeny v D.8.2.2.1 až D.8.2.2.7.

D.8.2.2 Standardní postup

D.8.2.2.1 Krok 1: Stanovení návrhového modelu

(1) Na základě funkce odolnosti se má stanovit návrhový model teoretické odolnosti r_t uvažovaného prvku nebo konstrukčního detailu:

$$r_t = g_{nt}(\underline{X}) \quad (D.5)$$

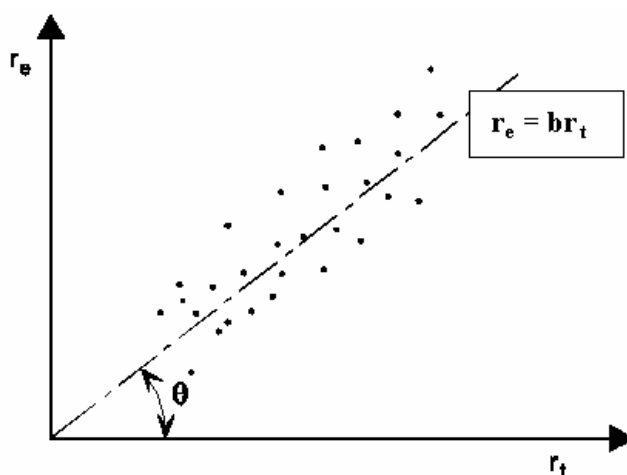
(2) Funkce odolnosti má zahrnout všechny odpovídající základní veličiny $\underline{X}$, které ovlivňují v příslušném mezním stavu odolnost.

(3) U každého i -tého vzorku (předpoklad c) v D.8.2.1) se mají měřit a pro vyhodnocování být k dispozici všechny základní veličiny.

D.8.2.2.2 Krok 2: Porovnání experimentálních a teoretických hodnot

(1) Naměřené vlastnosti se dosadí do funkce odolnosti tak, aby se získaly teoretické hodnoty r_{ti} , které budou výchozí pro porovnání s experimentálními hodnotami r_{ei} ze zkoušek.

(2) Body reprezentující dvojice odpovídajících hodnot (r_{ti} , r_{ei}) se mají zakreslit do grafu, jak je naznačeno na obrázku D.1.



Obrázek D.1 – graf $r_e - r_t$

(3) Pokud je funkce odolnosti přesná a úplná, pak všechny body leží na přímce pod úhlem $\theta = \pi/4$. Ve skutečnosti budou body vykazovat určitý rozptyl. Mají se vyšetřit příčiny jakékoliv systematické odchylky od této přímky, tak aby se ověřilo, zda to ukazuje na chybu v postupu zkoušek, nebo ve funkci odolnosti.