

Destruktivní, nedestruktivní a zatěžovací zkoušky stavebních materiálů

*Přednáška je součástí projektu DG16P02M050
Optimalizace sledování a hodnocení informací
o památkových stavbách, podporovaného
Ministerstvem kultury ČR.*

Miroslav Vokáč

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

Základní ČSN pro existující konstrukce

- ČSN ISO 13822:2014 Zásady navrhování konstrukcí -
Hodnocení existujících konstrukcí.

*„Po provedení zkoušek vzorků se vlastnosti materiálů musí
stanovit z výsledků zkoušek, pokud možno na základě
statistických metod.“*

- ČSN 73 0038:2014 Hodnocení a ověřování existujících
konstrukcí - Doplňující ustanovení.

Obsah

1. Tvrdoměrné zkoušky betonu (Schmidtův tvrdoměr)
 - Přehled norem
 - Příklady výsledků z diagnostiky
2. Tvrdoměrné metody na oceli
 - Přehled metod
 - Vliv mikrostruktury na tvrdost
 - Převody tvrdostí a pevností
3. Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí
 - Vývoj ČSN 73 2030
 - Zatěžovací zkoušky v zahraničních předpisech
 - Vydána revidovaná ČSN 73 2030:2019

Základní přehled norem pro Schmidtův tvrdoměr

- ČSN 73 2011:2012 Nedestruktivní zkoušení
betonových konstrukcí.
- ČSN 73 1370:2011 Nedestruktivní zkoušení betonu -
Společná ustanovení.
- ČSN 73 1373:2011 Nedestruktivní zkoušení betonu -
Tvrdoměrné metody zkoušení betonu.
- ČSN EN 12504-2:2013 Zkoušení betonu v
konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení -
Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem.
- ČSN EN 13791:2007 Posuzování pevnosti betonu
v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných
betonových dílcích.



Rozdíly ČSN 73 1373 x EN 13791

ČSN 73 1373

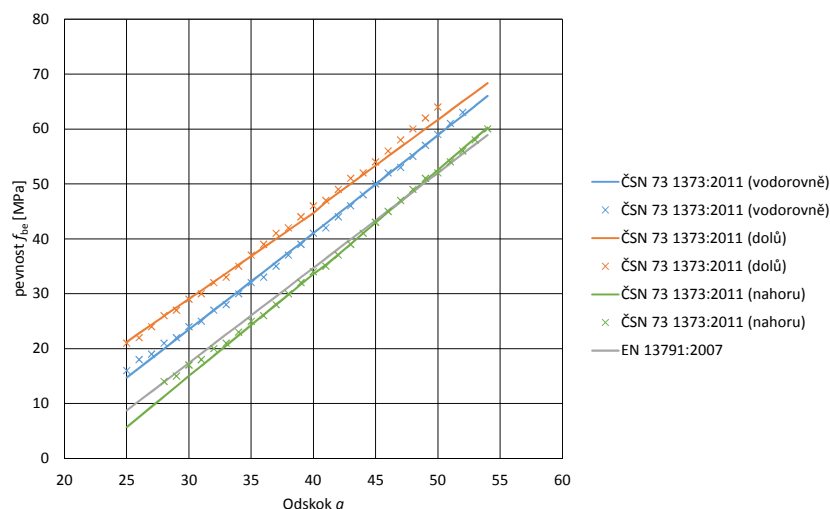
- Uvádí 3 obecné kalibrační vztahy pro 3 směry →, ↑ a ↓.
- Upřesněný kalibrační vztah je odvozen z průměrných hodnot destruktivních a nedestruktivních zkoušek.

EN 13791

- Uvádí je jednu základní křivku (odpovídá ↑).
- Aktualizovaná křivka na základě destruktivních zkoušek odpovídá 10% dolnímu kvantilu (90 % výsledků destruktivních zkoušek je nad aktualizovanou křivkou).

Zkouška ovlivněna: Stářím betonu, karbonatácí betonu, vlhkostí

Obecné kalibrační diagramy



Upřesněná zkouška dle ČSN 73 1370

- Zkouška vyhodnocená podle určujícího kalibračního vztahu nebo podle směrného, resp. obecného, kalibračního vztahu, který je upřesněn součinitelem α .

$$\alpha = \Sigma f_{ci} / \Sigma f_{ce,i}$$

- f_{ci} je pevnost stanovená na vývrtech a $f_{ce,i}$ je pevnost z nedestruktivního zkoušení.
 - Výsledek upřesněné zkoušky $f_{is,i}$ je dán vztahem
- $$f_{is,i} = \alpha f_{ce,i}$$
- Výsledek upřesněné zkoušky na jednom zkušebním místě se považuje za rovnocenný výsledku destruktivní zkoušky.

Vyhodnocení dle národní ČSN 73 2011

- Charakteristická hodnota betonu
- Součinitel β_n je součinitel odhadu 5% kvantilu
- Výběrová směrodatná odchylka je dána vztahy

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - \beta_n s_r$$

$$s_r^2 = s^2 + s_{rez}^2$$

$$s^2 = [\Sigma (f_{is,i} - f_{m(n),is})^2] / (n - 1)$$

$$s_{rez}^2 = [\Sigma (f_{ci} - f_{ce,i})^2] / (n_1 - 1)$$

- Pro zatřídění betonu dle EN 206 má platit

$$f_{ck,is} \geq 0,85 f_{ck}$$

1. Hala KOVOSVIT MAS v Sezimově ústí



- Konstrukce zajímavá pro šedové betonové skořepinové střechy.
- Zahájení výstavby 1939.

2. Trafostanice a měnična elektrických podniků na Klárově



- Novoklasicistní budova ak. arch. Viléma Kvasničky
- Realizace 1930-1934.
- Trafostanice byla pojmenována na počest fyzika a rektora ČVUT Václava Karla Zengera.

3. Kino Jas 70 v Pardubicích (dříve Kino Červeného kříže)



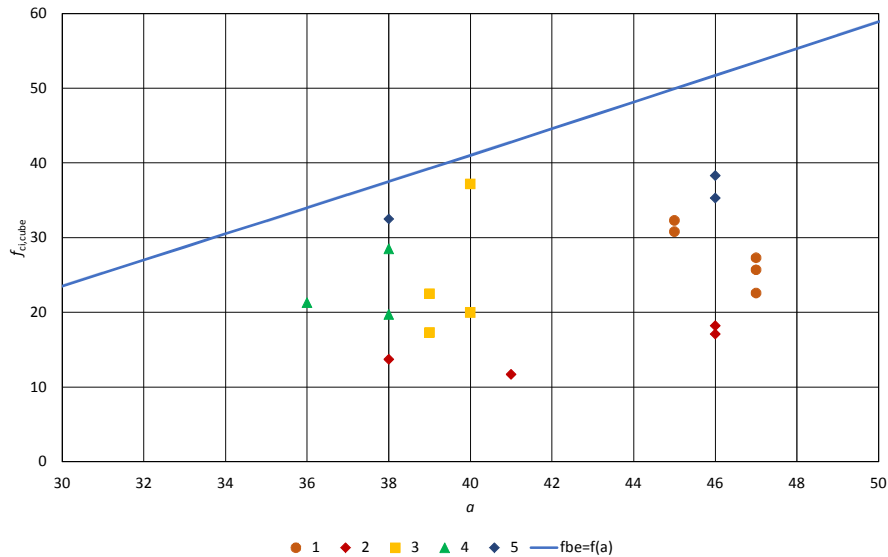
- Funkcionalistická budova arch. Karla Řepy
- Realizace 1932-1933.

4. Bytový dům Chocholouškova č.p. 35 a 5. Bytový dům Chocholouškova č.p. 37



- Postaveno přibližně ve 30. letech 20. století.

Srovnání destruktivních a výsledků Schmidtova tvrdoměru



Zabarvení betonů s hlinitanovým cementem

• Trafostanice Klárov

• Hala v Sezimově Ústí



Srovnání zkoušek na vývrtech a výsledků Schmidtova tvrdoměru

Označení konstrukce	α	ν	ρ [kg/m ³]	$f_{ck,ls,cube}$ [MPa]	Třída betonu	Poznámka
1	0,52	0,17	2310	17,9	C16/20	Sloupy, hlinitanový cement
2a	0,32	0,17	2241	9,1	C8/10	Sloupy, hlinitanový cement
2b	0,34	0,05	2277	16,8	C16/20	Sloupy, hlinit. cem. nepotvrzen
3	0,61	0,09	2250	19,6	C16/20	Sloupy
4	0,65	0,06	2210	20,3	C16/20	Sloupy
5	0,75	0,15	2280	25,6	C20/25	Sloupy

Rovnoměrný beton dle ČSN 73 2011	Variační součinitel ν [%]	Rozdíl Δ [%]
Třída betonu		
C 12/15	16	30
C 16/20	16	30
C 25/30	14	30
C 30/37 až C 50/60	12	30

Ocel – Tvrdoměrné metody

- **Tvrdost podle Brinella HB (ISO 6506-1)**
 - Kulička z karbidu wolframu průměru D [mm] se zatlačuje silou F [kgf] ($30 \text{ kgf} = 294,2 \text{ N}$) po dobu 10 až 15 s
 - Hodnota tvrdosti = síla na zaoblenou plochu vtisku kuličky
 - 600 HBW 5/250 (TVRDOST HBW D/F), dříve ocelová kulička s označením **HB**
- **Tvrdost podle Vickerse HV (ISO 6507-1)**
 - Diamantové těleso čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° se zatlačuje silou F [kgf] po dobu 10 až 15 s
 - Hodnota tvrdosti = síla na plochu otisku jehlanu
 - 640 HV 30 (TVRDOST HV F)
- **Tvrdost podle Rockwella HR (ISO 6508-1)**
 - zatlačuje se diamantový kužel nebo kulička předběžným a celkovým zatížením, tvrdost se určí z rozdílu hloubky zatlačení
 - Stupnice běžné tvrdosti A až K (HRA, HRBW) a 6 stupnic povrchové tvrdosti (např. HR15N, HR45TW)

Ocel – Tvrdoměrné metody

• Tvrdost podle Leeba HL (ISO 16859-1)

- Jedná se o dynamickou tvrdost, zavedeno Proceq SA (1975)
- Tvrdost HL je dána tisícinásobkem poměru odrazivé a dopadové rychlosti tělesa.
- V současné době je několik standardů tvrdosti HL:

Test method	Kinetic impact energy [mJ]	Impact velocity [m/s]	Rebound velocity [m/s]	Maximum distance between indenter ball and test surface [mm]	Mass of impact body [g]	Spherical radius [mm]	Material of indenter	Application range
HLD	11.5	2.05	0.615 – 1.8245	2.00	5.45	1.5	WC-Co	300 – 890 HLD
HLS	11.4	2.05	0.82 – 1.886	2.00	5.40	1.5	C	400 – 920 HLS
HLE	11.5	2.05	0.615 – 1.886	2.00	5.45	1.5	PCD	300 – 920 HLE
HLDL	11.95	1.82	1.1092 – 1.729	2.00	7.25	1.39	WC-Co	560 – 950 HLDL
HLD+15	11.2	1.7	0.561 – 1.513	2.00	7.75	1.5	WC-Co	330 – 890 HLD+15
HLC	3.0	1.4	0.49 – 1.344	2.00	3.1	1.5	WC-Co	350 – 960 HLC
HLG	90.0	3.0	0.9 – 2.25	3.0	20.0	2.5	WC-Co	300 – 750 HLG

Ocel – Tvrdoměrné metody

• Tvrdost podle Leeba HL (ISO 16859-1)

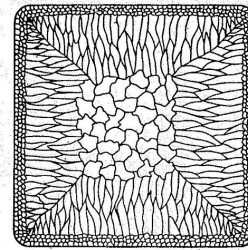
- Výsledek může být ovlivněn tuhostí ocelové konstrukce (subtilní ocelová konstrukce in-situ)
- Výrobce často převádí HL na HB již v přístroji

• Převody hodnot tvrdostí a pevností

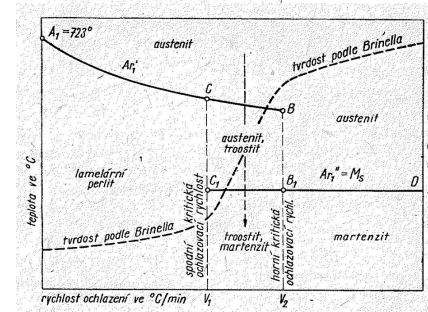
- Převodní tabulky tvrdostí HB, HV a HR obsahuje **ISO 18265** (neobsahuje HL)
- Tabulky vytvořeny na základě rozboru velkého náhodného výběru z mezilaboratorních zkoušek Stahlinstitut VDEH
- Upozorňuje na velký rozptyl v převodu tvrdostí
- Upozorňuje na ještě větší rozptyl při převodu na pevnost materiálu (odchyly až 100 MPa)



Tvrdost oceli – vliv zrnitosti a mikrostruktury oceli

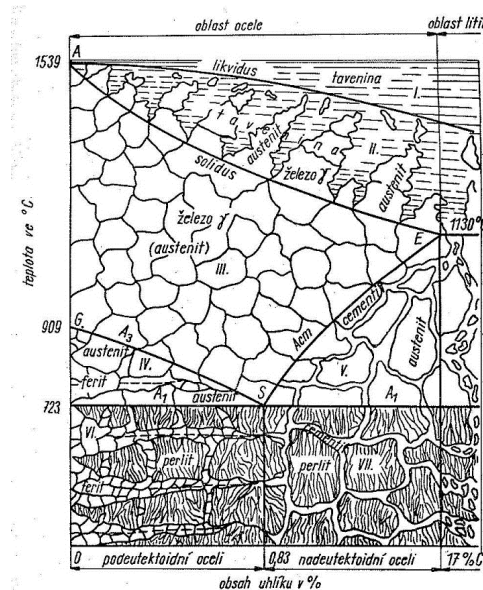


- Tvrdost oceli je ovlivněna mikrostrukturou materiálu.
- Viz krystalizace oceli lité do kokil.
- Viz vliv rychlosti chlazení austenitu na krystalizaci a tvrdost.

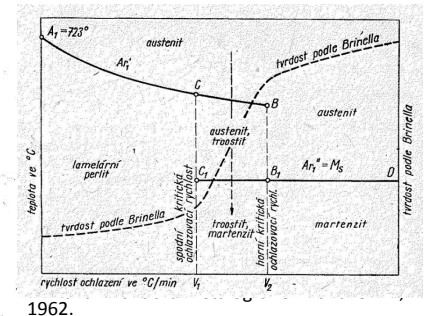


V. Walla: Praktická metalografie. Praha: SNTL, 1962.

Rovnovážný diagram

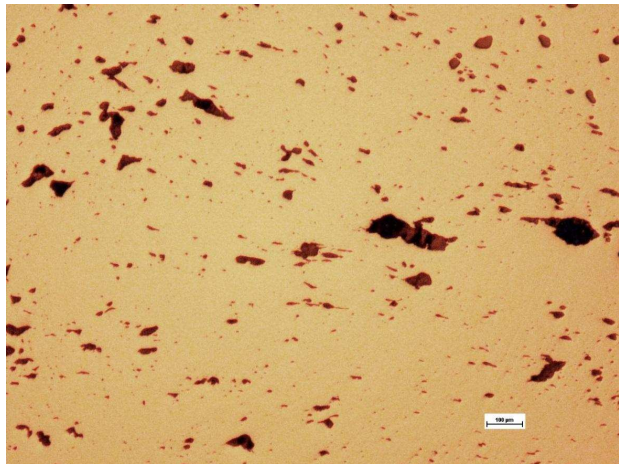


- Při chlazení materiálu je přeměna z austenitu na perlit podmíněna rychlostí chlazení.
- Podle rychlosti chlazení vzniká:
 - Perlit – pomalé chladnutí
 - Martenzit – rychlé ochlazení



1962.

Metalografická analýza



- Leštěný povrch oceli – dřík nýtu (konec 19. stol.)
- Hodnocení mikročistoty materiálu: více nečistot => větší křehkost materiálu

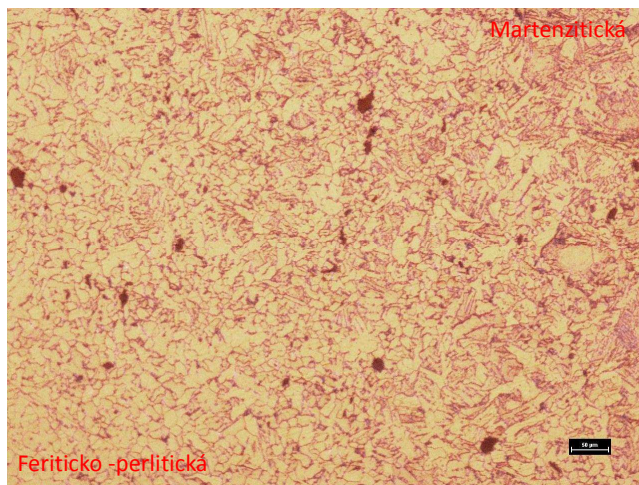
Příklad srovnání HB a (HL->HB) u dříku nýtu

Tvrdoměr WPM HPO 250	
Měření	HB
Vzorek 4	222
	249
	239
Vzorek 3	185
	180
	182
Průměr	210
Směrodatná odchylka	31,0
Variační koeficient	0,148

Přístroj METZIN MTH134	
Měření	HL->HB
1	90
2	116
3	112
4	114
5	127
6	123
7	122
8	116
Průměr	115
Směrodatná odchylka	11,30
Variační koeficient	0,098

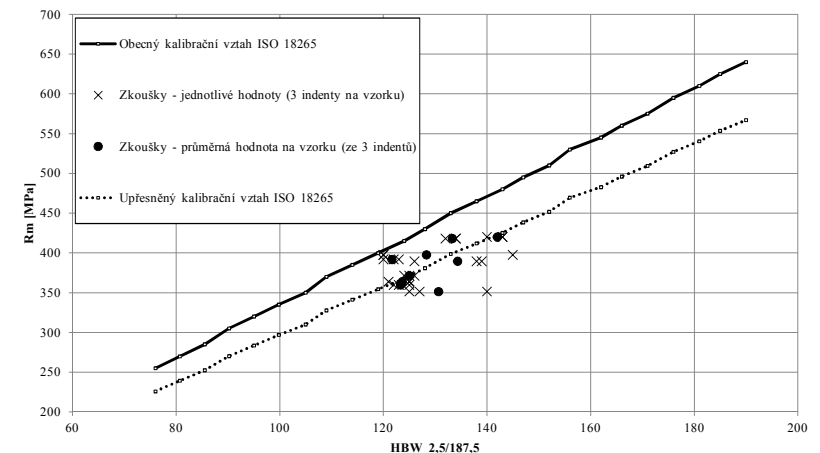
Norma ČSN EN ISO 18265 uvádí pro HB 210 mez pevnosti 705 MPa a pro HB 114 mez pevnosti 385 MPa.

Metalografická analýza

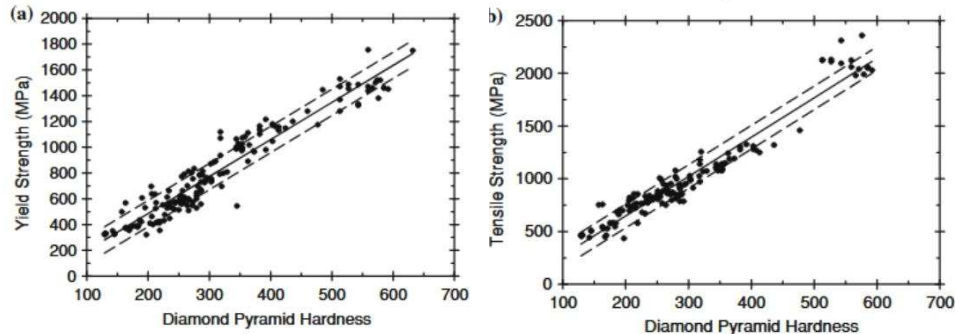


- Leptaný povrch (*leptadlo: Nital 2%*)
- Hodnocení struktury materiálu – při zpracování nýtu došlo k rychlému ochlazení a vzniku i martenzitické struktury

Příklad srovnání zkoušek HBW a pevnosti v tahu (ocelová konstrukce v Libni)



Porovnání HV s f_y a f_m



Pavlina, E.J. & Vantyne, Chester. (2008). Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 17. 888-893. 10.1007/s11665-008-9225-5.

Čárkovaně je vyznačena směrodatná odchylka. Je patrný značný rozptyl výsledků.

Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – vývoj ČSN 73 2030

• Norma ČSN 73 2030:1967

- Monotónní zatížení vnesené ve stupních po max. 25 % celkového zatížení
- Doba působení zkušebního zatížení od 1 h (ocel), 24 h (beton), a nebo až 72 h (dřevo)
- Stanovuje kritéria hodnocení podobně jako dnes
- Zkušební metoda byla publikována v zahraničí:

Bareš, R., FitzSimons, N. Load tests of Building Structures. Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. 5, May, 1975, pp. 1111-1123.

- Proto se dostala i do dosud platného předpisu:

ACI 437.2M-13, Code Requirements for Loading Testing of Existing Concrete Structures (ACI 437.2M-13) and Commentary. American Concrete Institute, 2014. ISBN 978-0-87031-891-7.

Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – vývoj ČSN 73 2030

• ČSN 73 2030:1977

- Norma byla revidovaná v roce 1977
- Později: Změna a V 01/88
- Dosud platný předpis na Slovensku

• ČSN 73 2030:1994

- Definuje zcela nový zatěžovací postup, působení zkušebního zatížení se zkracuje
- Změna: Z1 z roku 1995 - vypouští dřevěné konstrukce

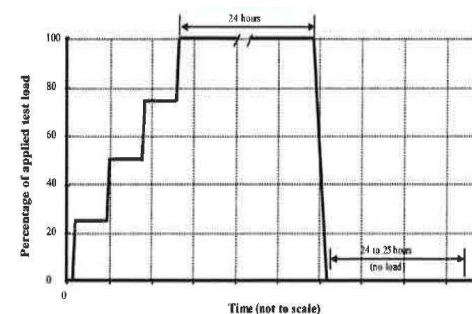
• ČSN 73 2030:2019

- Uvedeno do souladu s eurokódem (zkušební zatížení, hodnocení zkoušky)
- Pro existující ŽB kce převzatá kritéria pro ukončení zkoušky od DAfStb

ACI 437.2M-13, Code Requirements for Loading testing of Existing Concrete Structures

Monotonic loading protocol

Vychází z ČSN 73 2030:1967

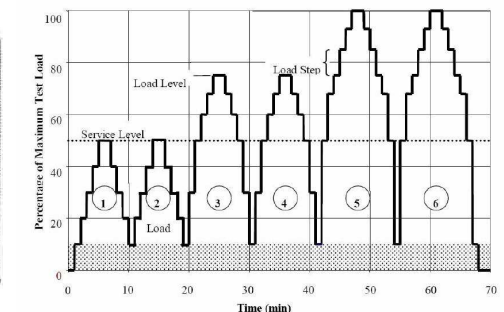


Kritéria:

Reziduální deformace do 25 %.

Max. průhyb do L/180.

Cyclic loading protocol

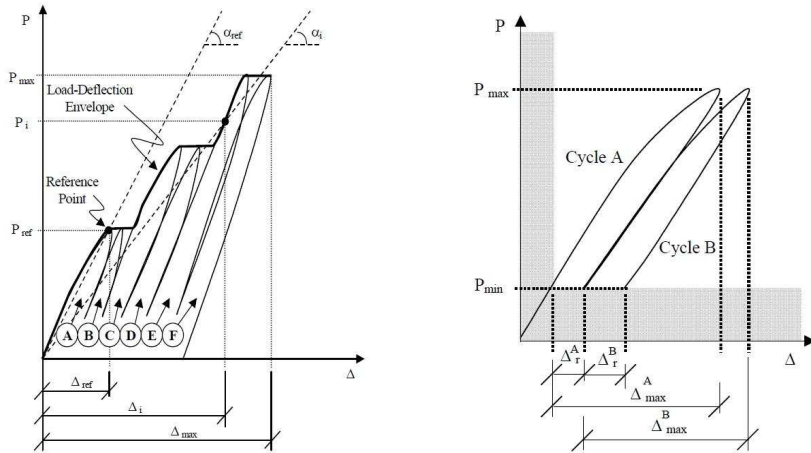


Kritéria pro přerušení zkoušky:

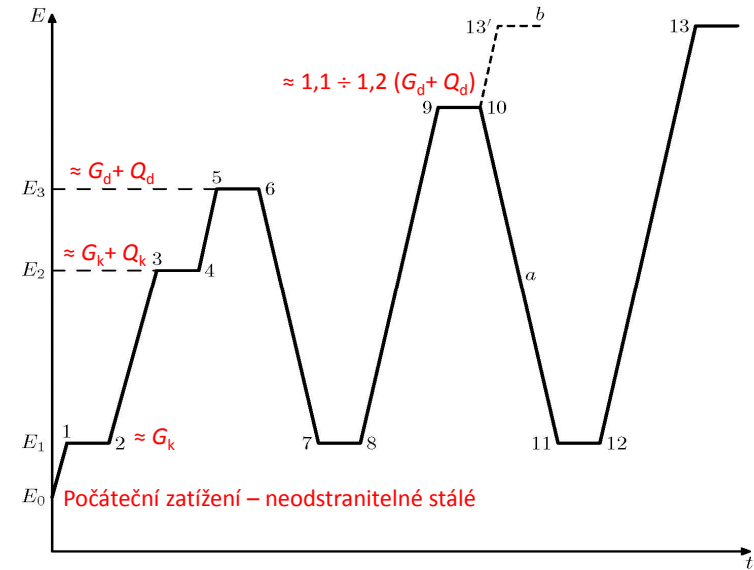
Hodnocení změny sečnové počáteční tuhosti a reziduálních deformací v každé úrovni zatížení.

ACI 437.2M-13, Code Requirements for Loading testing of Existing Concrete Structures

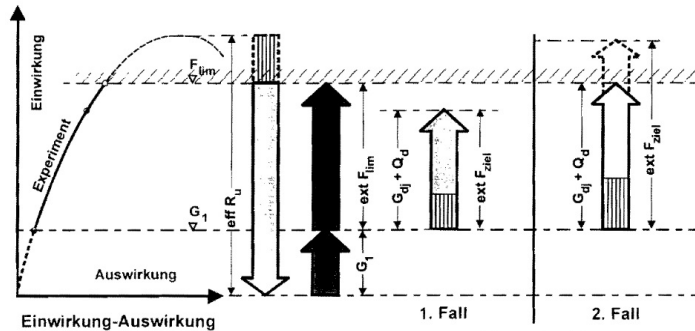
Cyclic loading protocol – kritéria pro přerušení zkoušky



ČSN 73 2030 – Základní zatěžovací diagram



DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken



- Zatěžuje se na návrhovou hodnotu nejméně ve 3 stupních a po každém se odtěhuje
- Při průběhu se kontrolují kritéria pro přerušení zkoušky (F_{lim}):
 - Limitní deformace výztuže a betonu
 - Přírůstek šířky trhlin, šířka nových trhlin
 - Trvalé deformace

ČSN 73 2030 – Experimentálně stanovená odolnost konstrukce

Stanovuje se v případě zatěžovací zkoušky do porušení konstrukce.

Uvedeno do souladu s EN 1990, příloha D.

Návrhová hodnota R_{ed} se vypočte ze vztahu:

$$R_{ed} = R_{ek} / \gamma_R$$

γ_R se uvažuje s ohledem na materiál, který rozhoduje o porušení.

Charakteristická hodnota R_{ek} se vypočte ze vztahu:

$$R_{ek} = m_{Re} (1 - k_n V_{Re})$$

kde k_n se stanoví dle EN 1990.

Při malém rozsahu náhodného výběru je možné použít postup pro známý variační koeficient a konzervativní odhad V_{Re} .

V ČSN 73 2030 jsou uvedeny informativně V_{Re} dle JCSS Probabilistic Model Code.

ČSN 73 2030 – Hodnocení výsledků zatěžovací zkoušky

1. Z hlediska mezního stavu únosnosti

- Odolnost R_{ed} odvozená z výsledků zkoušek je větší nebo rovna účinku zatížení v rozhodujícím průřezu stanovenému podle norem pro navrhování konstrukcí (*pokud se zkoušelo do porušení konstrukce*)
- Poměr trvalé a celkové deformace mezi stupni E_3 a E_1 musí splňovat:

$$S_{r,ULS} / S_{tot,ULS} \leq \lambda_1$$

2. Z hlediska mezního stavu použitelnosti

- Celkové naměřené deformace od zkušebního zatížení na stupni E_2 musí být od teoretických v mezích daných podmínkou:

$$S_{teor,SLS} (1 - \mu) \leq S_{tot,SLS} \leq S_{teor,SLS} (1 + \mu)$$

- Deformace v mezích dle norem pro navrhování
- Splněny další podmínky dle příloh A až D pro daný materiál

ČSN 73 2030 – zatěžování existujících betonových konstrukcí

- Zkušební zatížení E_3 se aplikuje nejméně v 5ti krocích,
- Na každém stupni se kontrolují kritéria pro přerušení zkoušky:
- Poměrná deformace v betonu $\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0}$ ($\epsilon_{c,lim} = 0,06 \%$, nebo $0,08 \%$ pro beton třídy C20/25 a vyšší, ϵ_{c0} je od počátečního zatížení)
- Poměrná deformace oceli $\epsilon_{s2} < 0,7 f_{ym}/E_s - \epsilon_{s02}$ nebo $\epsilon_{s2} < 0,9 f_{0,01m}/E_s - \epsilon_{s02}$ (ϵ_{s02} je od počátečního zatížení)
- Přírůstky stávajících trhlin $\Delta w \leq 0,3$ mm a šířky nových trhlin $w \leq 0,5$ mm
- U prvků, kde rozhoduje smyk, se ϵ redukuje na polovinu.