

# Navrhování experimentů

## Design of Experiment (DOE)

Petr Misák

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví

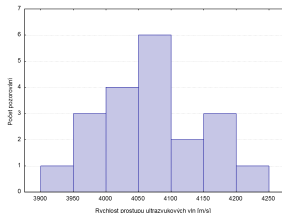
Brno 2017



- slavné vynálezy - žárovka, antibiotika
- **Sir Ronald Fisher**  
"Pokud zavoláte statistika až po provedení experimentu, je to jako byste ho požádali o provedení pitvy. Možná vám řekne, na co pacient zemřel."
- **George E. P. Box**  
"Všechny modely jsou mylné, některé však mohou být užitečné."

# Vyjádření proměnlivosti výsledků

- Grafické znázornění
  - puntíkový graf
  - histogram
  - krabicový graf
- Vyjádření proměnlivosti číslem
  - odchylka
  - rozptyl (výběrový rozptyl)
  - směrodatná odchylka (výběrová směrodatná odchylka)



- **DOE - Design Of Experiment**
- přístup pro efektivní a účinné **využití vztahu příčiny a následku** mezi více faktory procesu a **výstupní či sledovanou proměnnou procesu**
- identifikuje **důležité zdroje variability** faktorů
- **identifikuje faktory**, které mají největší vliv na výsledky
- **kvantifikuje efekty** (vlivy) důležitých faktorů, včetně jejich interakcí
- **vytvoří rovnici** - vztah mezi faktory
- **predikce** zisku (či ztráty) způsobeného změnou podmínek v procesu

- **kvantifikování** kvality pomocí vhodného spojitého znaku
- dosažení **optimální úrovně** sledovaného znaku kvality z hlediska jeho průměrné odezvy
- **snížení variability** hodnot sledovaného znaku kvality procesu (nejedná se o regulaci procesu)

- posouzení **významnosti** různých vlivů
- stanovení **vzájemné interakce** faktorů
- nalezení **optimálních podmínek**

## Experiment

souhrn pokusů uspořádaných podle určitého schématu

## Pokus

jedna zkouška, provedená pro určitou kombinaci úrovní faktorů

## Výsledek pokusu

hodnota pozorované náhodné veličiny (odezva), která je charakteristikou znaku jakosti

## Faktor

veličina (kvalitativní i kvantitativní) která, působí na pozorovanou náhodnou veličinu

## Verze faktoru

varianta (obměna) faktoru vyjádřena číselně (kvantitativní) nebo slovně (kvalitativní)

## Úroveň faktoru

verze kvantitativního faktoru



## Efekt faktoru

číselná hodnota, která je rozdílem hodnot odezvy odpovídající různým verzím faktoru

## Interakce faktoru

významná odlišnost efektů faktorů při různých úrovních jednotlivých faktorů, rozdíl hodnot efektů daných faktorů

## Odezva

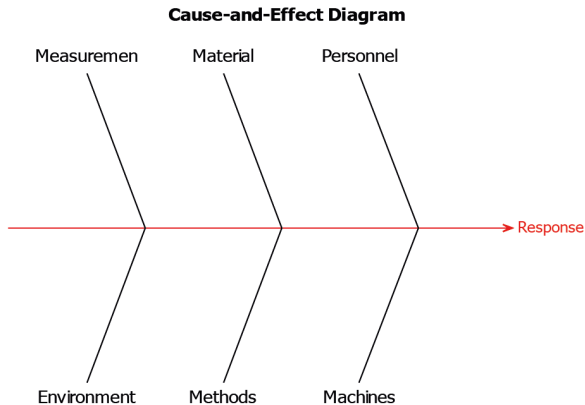
výstup, měřená veličina

1. **Plánování experimentu** – nejdůležitější etapa procesu. Řešitelský tým musí danou problematiku ovládat.
2. **Návrh experimentu** – V této fázi je potřeba odladit všechna omezení.
3. **Provedení experimentu** – Vše připravit a provést experiment v co nejkratším čase.
4. **Analýza výsledku** – pomocí SW, grafického znázornění a statistických metod.
5. **Aplikace výsledků** – Před zavedením výsledků se doporučuje provést potvrzení výsledku opakováním experimentu, nebo jinou spolehlivou metodou.

# 1. Plánování experimentu

- **identifikace** problému
- stanovení **cílů** experimentu
- vhodně zvolit řešitelský **tým**
- stanovení **výstupní veličiny** závislé na vstupních faktorech
- určení všech **faktorů** ovlivňujících zkoumanou veličinu
- stanovení **úrovně faktorů**
- odhad **interakce** mezi faktory

# Výběr faktorů experimentu



## 2. Návrh experimentu

- volba **typu** návrhu experimentu
- musíme předem počítat s **experimentální chybou**
- **počet kroků** může snížit vliv chyb

## 2. Návrh experimentu

Č.	Faktor	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								



*Existuje*



*Neexistuje*



*Neví se*

## Faktoriální (úplný) experiment

$$U^F = K \quad (1)$$

$U$  ... počet úrovní faktorů

$F$  ... počet faktorů

$k$  ... počet kroků

## 3. Provádění experimentu

### Randomizace

znáhodnění pořadí jednotlivých kroků

- eliminace systematických chyb
- jakékoliv nenadálé situace a vlivy, které nastanou během experimentu, musí být zaznamenány pro další analýzu



## 4. Analýza výsledků

- různé způsoby vyhodnocení
- **Paretova analýza** významnosti faktorů
- grafická statistická analýza
- **analýza rozptylu (ANOVA)**

# Faktoriální (úplný) experiment - příklad

Faktory	Dolní úroveň	Horní úroveň
A	1	2
B	1	2
C	1	2

# Faktoriální (úplný) experiment - příklad

		Úroveň faktoru			
Pořadové číslo	Náhodné pořadí	A	B	C	Odezva
1	2	1	1	1	$y_1$
2	6	2	1	1	$y_2$
3	1	1	2	1	$y_3$
4	3	2	2	1	$y_4$
5	8	1	1	2	$y_5$
6	7	2	1	2	$y_6$
7	5	1	2	2	$y_7$
8	4	2	2	2	$y_8$

# Faktoriální (úplný) experiment - odezвовá tabulka

P	NP	Odezva	A		B		C	
			1	2	1	2	1	2
1	2	$y_1$	$y_1$		$y_1$		$y_1$	
2	6	$y_2$		$y_2$	$y_2$		$y_2$	
3	1	$y_3$	$y_3$			$y_3$	$y_3$	
4	3	$y_4$		$y_4$		$y_4$	$y_4$	
5	8	$y_5$	$y_5$		$y_5$			$y_5$
6	7	$y_6$		$y_6$	$y_6$			$y_6$
7	5	$y_7$	$y_7$			$y_7$		$y_7$
8	4	$y_8$		$y_8$		$y_8$		$y_8$
Průměr odezvy		$\bar{y}$	$A(1)$	$A(2)$	$B(1)$	$B(2)$	$C(1)$	$C(2)$

# Faktoriální (úplný) experiment - efekt faktorů

- Faktor  $A$

$$A\bar{(2)} - A\bar{(1)} \quad (2)$$

- Faktor  $B$

$$B\bar{(2)} - B\bar{(1)} \quad (3)$$

- Faktor  $C$

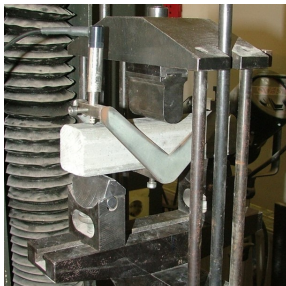
$$C\bar{(2)} - C\bar{(1)} \quad (4)$$

# Faktoriální (úplný) experiment - efekty interakcí

Pořadí	Faktory			Interakce			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem

- výstupní veličina - pevnost v tahu ohybem
- rychlost zatěžování: 0,04 - 0,4 mm/min
- provedení zářezu na vzorku: ano × ne
- úplný experiment:  $2^2 = 4$  kroků



# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem

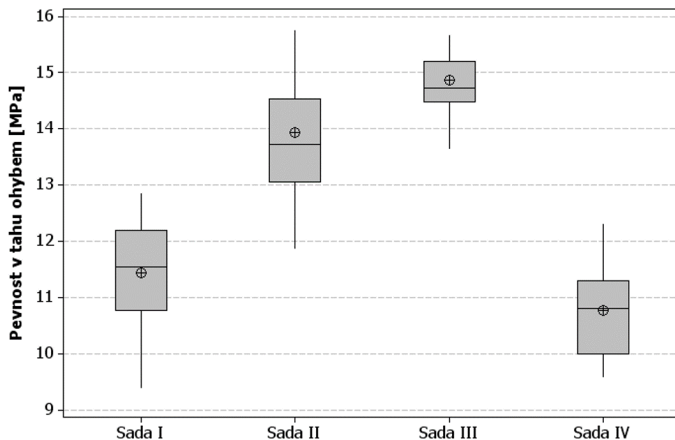
Sada	I	II	III	IV
Rychlost zatěžování [mm/min]	0,4	0,4	0,04	0,04
Zářez	ano	ne	ano	ne



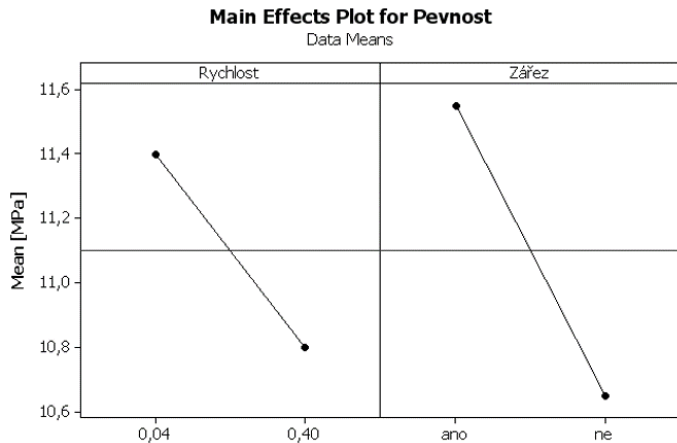
## Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem

Charakteristika	Sada I	Sada II	Sada III	Sada IV
$\bar{x}$ [MPa]	11,4	13,9	14,9	10,8
$s_0$ [MPa]	0,94	1,12	0,79	0,78
$V_x$ [-]	0,08	0,08	0,05	0,07

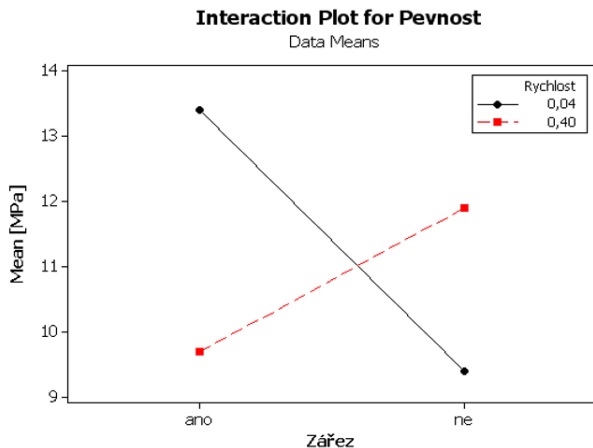
# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem



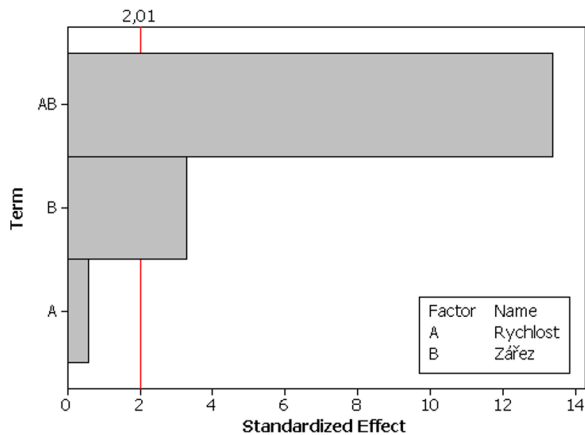
# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem



# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem



# Příklad - Stanovení pevnosti v tahu ohybem



# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu

<b>Cement / Plasticiser [%]</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>0</b>	R	-	-
<b>I</b>	0/1	1/1	-
<b>II</b>	0/2	1/2	2/2
<b>III</b>	0/3	1/3	2/3

# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu

	Mixture								
	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3
c [kg]	248	308	357	392	295	349	394	338	386
0-4 [kg]	953	925	889	826	927	897	846	905	854
4-8 [kg]	173	182	174	195	185	185	192	183	207
8-16 [kg]	675	696	693	669	689	693	684	667	671
W [kg]	201	203	201	208	177	175	183	176	181
P [kg]	0	0	0	0	0.71	0.91	0.95	1.77	2.01
w/c [-]	0.75	0.61	0.53	0.50	0.55	0.46	0.43	0.48	0.44

# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu

## Zkušební metody

- TPT
- GWT
- ISAT



# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu

Použité modely

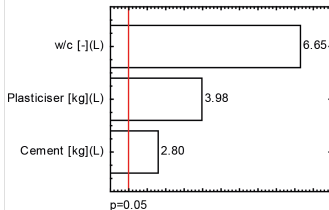
$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (5)$$

$$y = a_1x_1 + a_2x_2^2 + \dots + a_5x_3 + a_6x_3^2 \quad (6)$$

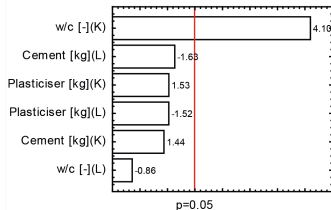
$$y = a_1x_1 + \dots + a_3x_3 + a_4x_1^2 + \dots + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + \dots + a_9x_2x_3 \quad (7)$$

# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - TPT

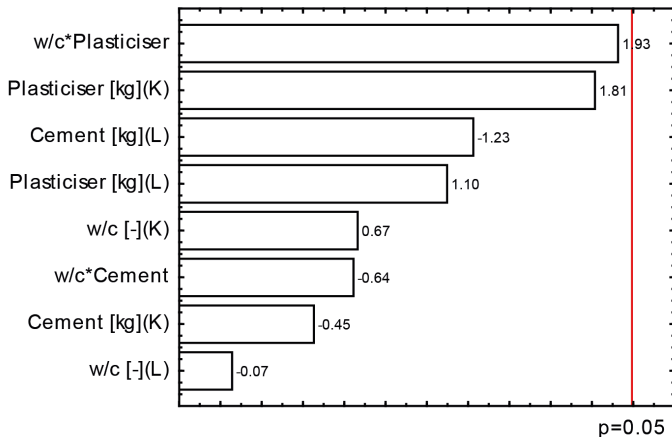
a)



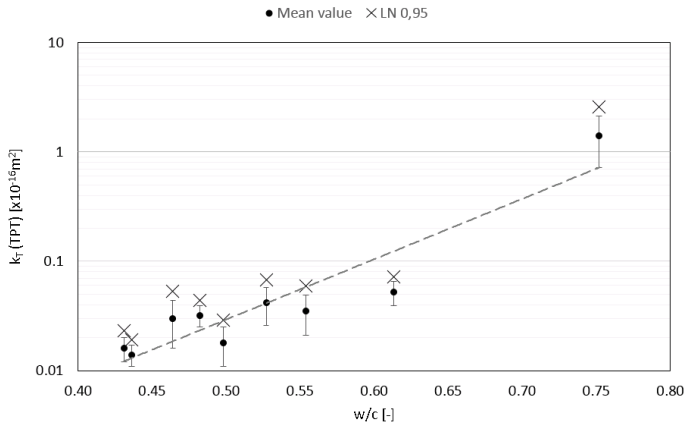
b)



# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - TPT

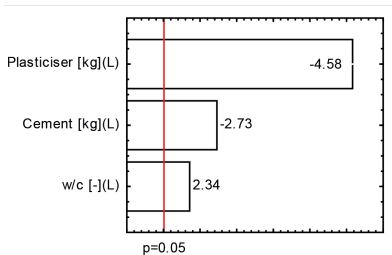


# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - TPT

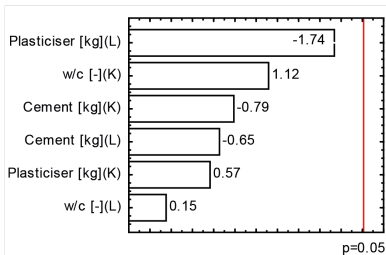


# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - ISAT

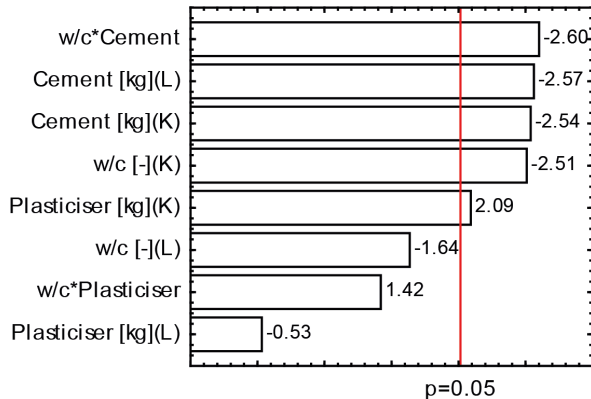
a)



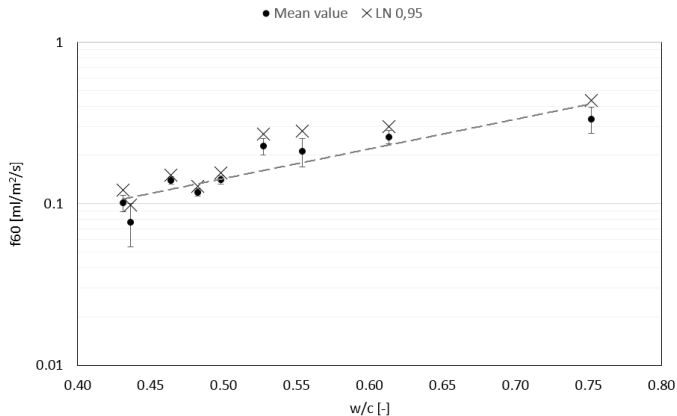
b)



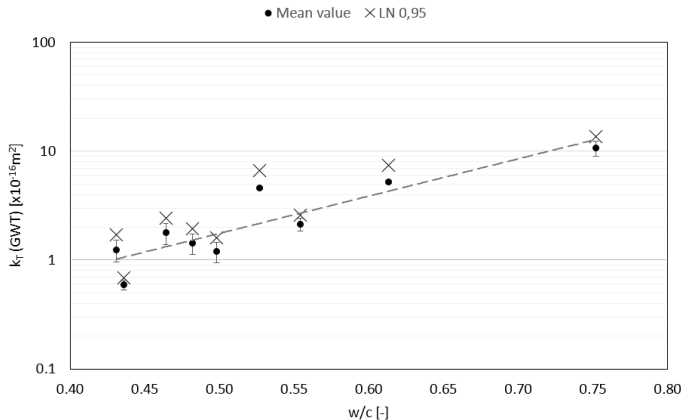
# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - ISAT



# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - ISAT



# Příklad - Permeabilita povrchové vrstvy betonu - GWT







I. Miller.

*DOE - Návrh a analýza experimentu s pomocí Minitab* ®  
Interquality, 2010.



[http://documents.software.dell.com/Statistics/  
Textbook/Experimental-Design](http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Experimental-Design)



PÖSSL, P.; MISÁK, P.; KOCÁB, D.; ROZSYPALOVÁ, I.;  
STAVARŤ, T. Statistical View of Evaluating Concrete Surface  
Layer Permeability Tests in Connection with Changes in  
Concrete Formula. 2015. ISBN 978-961-92518-8-1.

# Dotazy?

**Petr Misák**

[petr.misak@vutbr.cz](mailto:petr.misak@vutbr.cz)

*Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav stavebního zkušebnictví*

[szk.fce.vutbr.cz](http://szk.fce.vutbr.cz)