

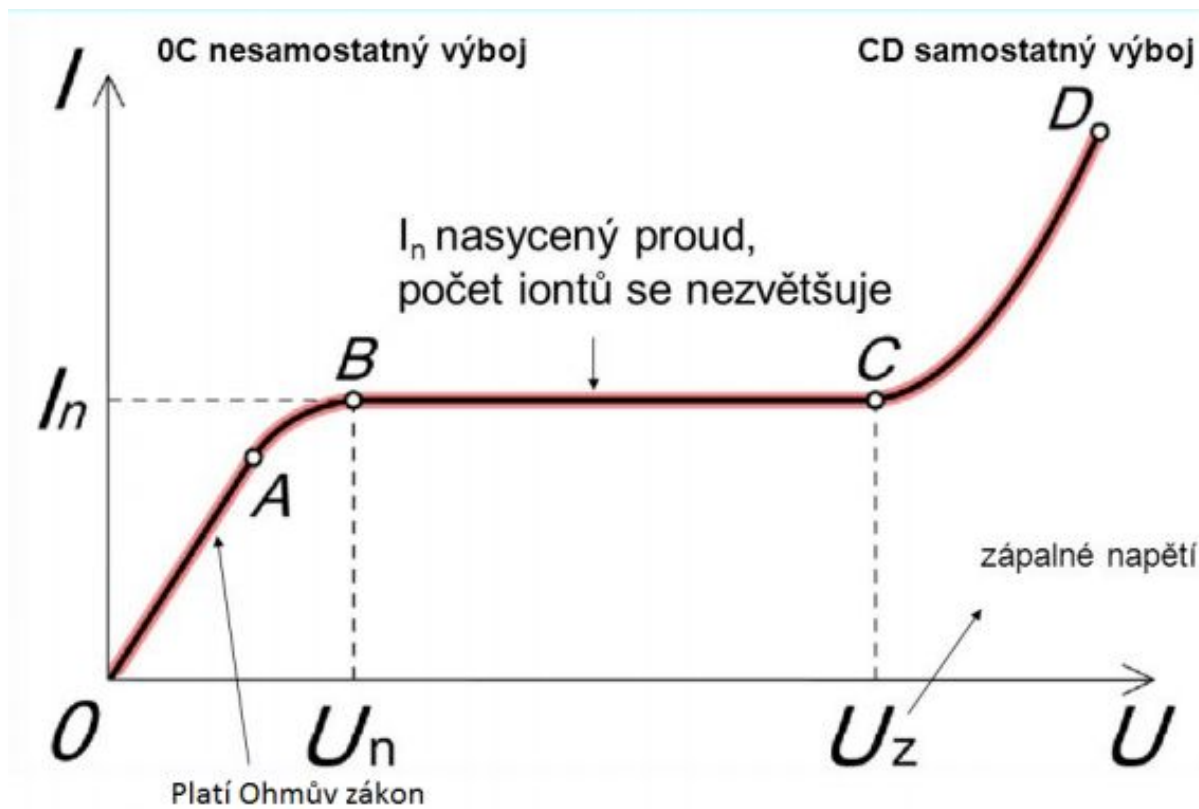
Breakdown Studies

Eliška Jelínková, Ondřej Čermák, Vojtěch Juráš

FYS FJFI

2018

Elektrické výboje



Elektrické výboje - příklady:

Jiskrový



<http://www.zsvltava.cz/fyzika/?p=745>

Koróna



[https://cs.wikipedia.org/wiki/Kor%C3%B3na_\(elektrotechnika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kor%C3%B3na_(elektrotechnika))

Doutnavý



https://cs.wikipedia.org/wiki/Doutnav%C3%B9D_v%C3%BDboj

Friedrich Paschen

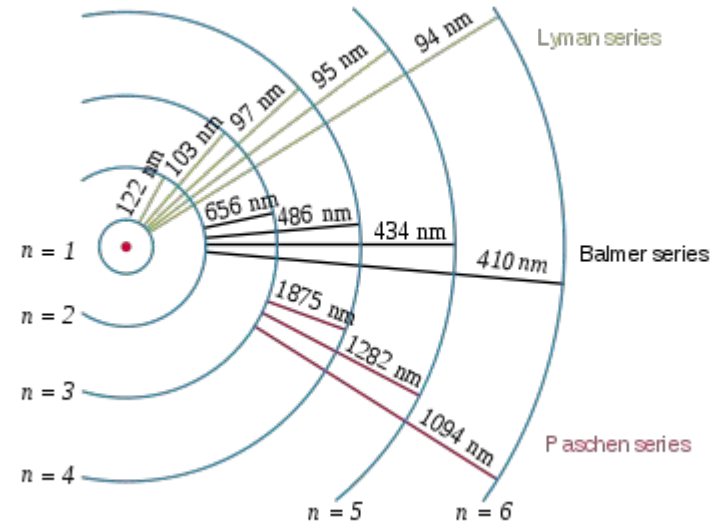
- Paschenova série - 1908
- studia v Berlíně a Štrasburku
- 1925 - čestným profesorem na univerzitě v Berlíně
- *“Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drücken erforderliche Potentialdifferenz”*



https://cs.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Paschen

Friedrich Paschen

- Paschenova série - 1908
- studia v Berlíně a Štrasburku
- 1925 - čestným profesorem na univerzitě v Berlíně
- *“Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drücken erforderliche Potentialdifferenz”*



Paschenova křivka

Paschenův zákon:

„Je-li ve dvou výbojových trubicích s rovinnými elektrodami a tímtéž plynem součin pd (součin tlaku a vzdálenosti elektrod) stejný, je stejné i zápalné napětí.“

Paschenova křivka

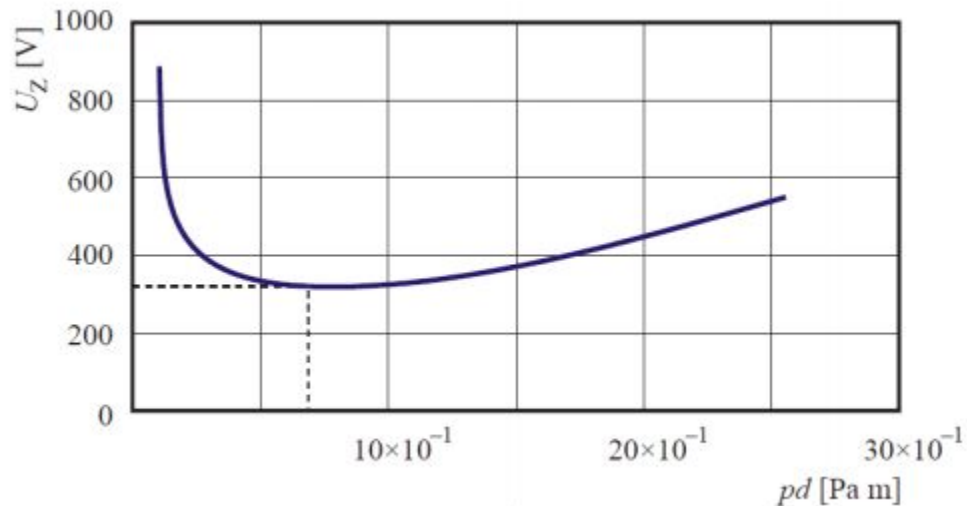
Paschenův zákon:

$$U_z = A \frac{pd}{\ln \left[B \frac{pd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]}$$

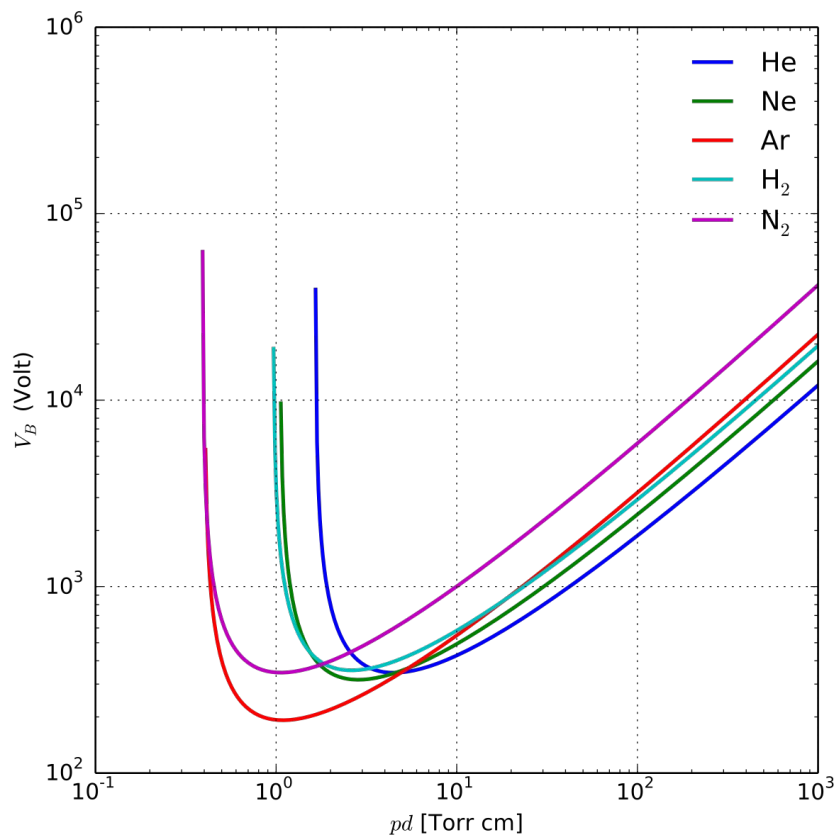
Konstanta B je počet srážek na jednotku dráhy elektronu při jednotkovém tlaku, konstanta A poté vyjadřuje součin konstanty B a ionizačního potenciálu daného plynu a konstanta γ je druhá Townsendova konstanta udávající počet elektronů vzniklých nárazy iontů na elektrodu.

Paschenova křivka

VZDUCH:

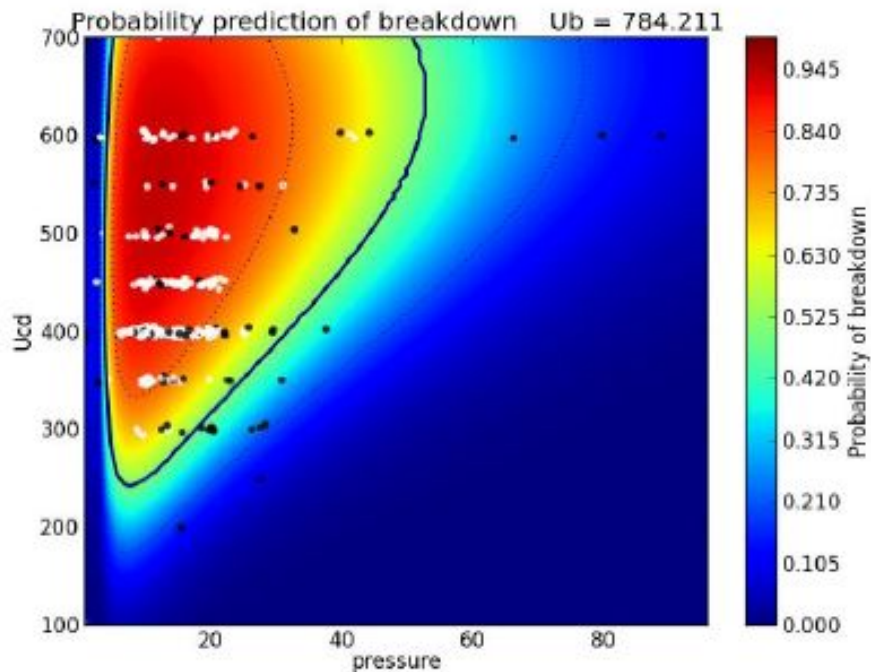


Paschenova křivka



https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s_law

Paschenova křivka



Termojaderná fúze

- Proces slučování lehkých jader
- Energie potřebná k roztržení vazby odpovídá hmotnostnímu úbytku podle

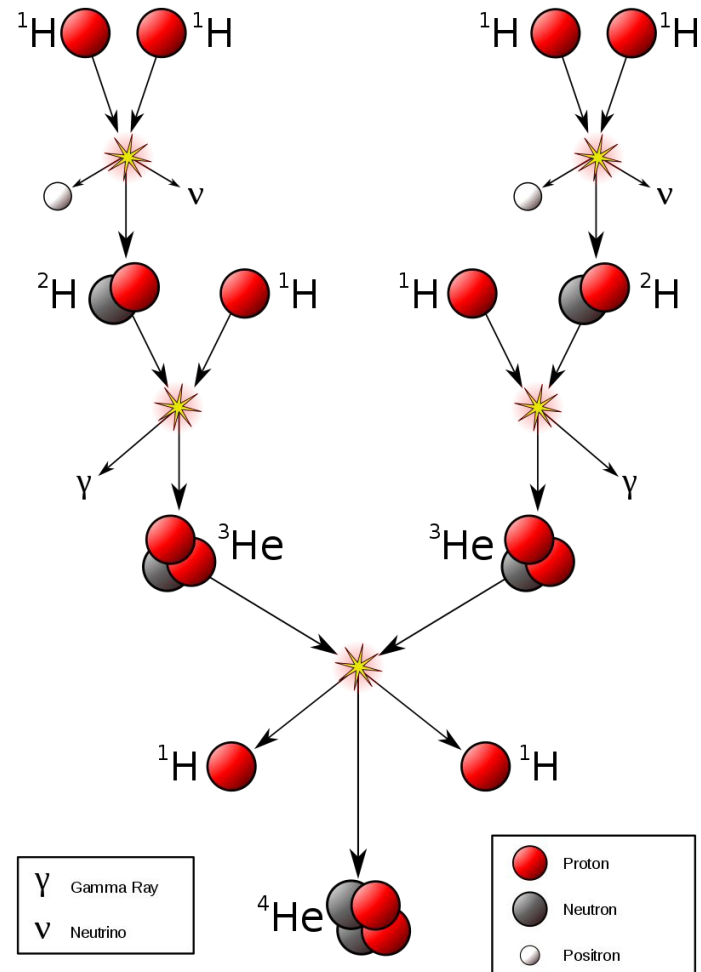
vztahu:

$$Q = \Delta mc^2$$

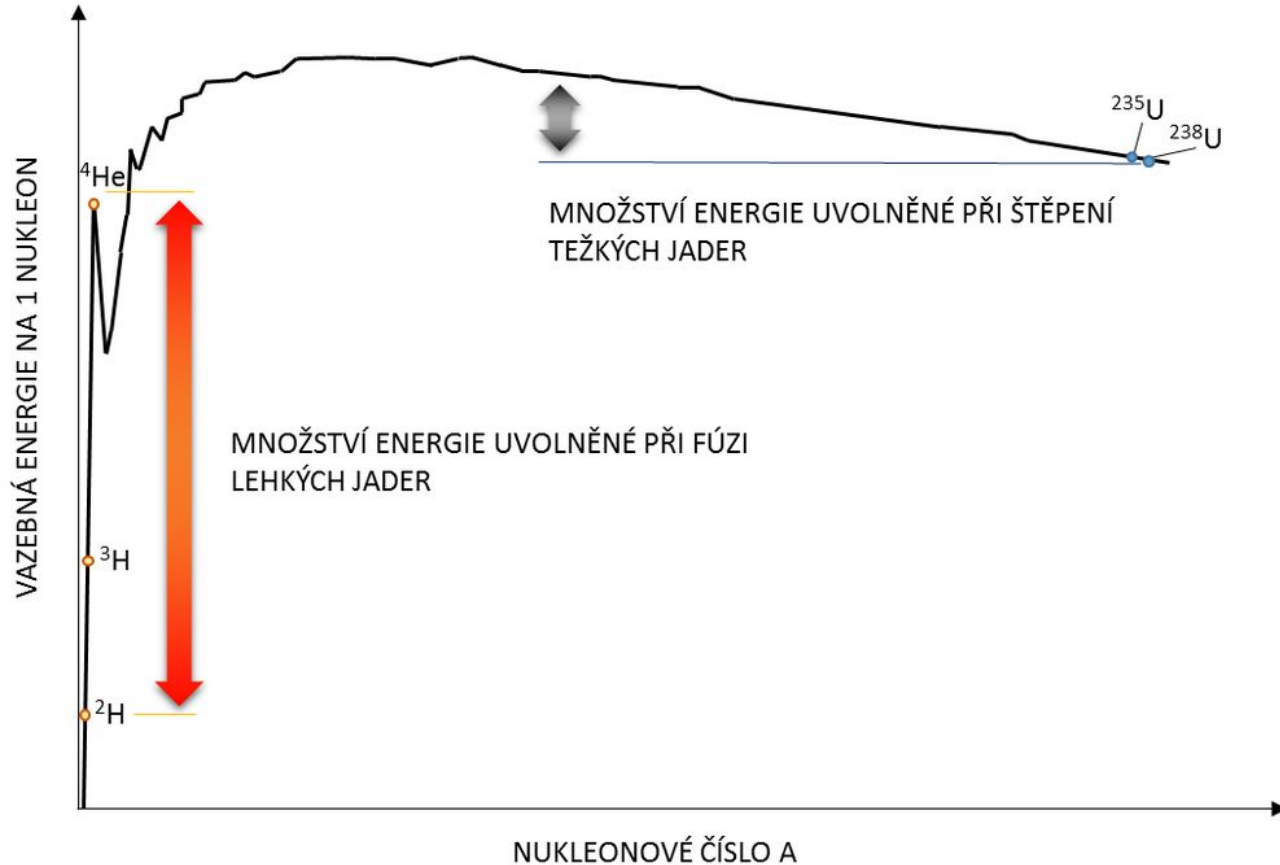
- Tato energie se uvolňuje při fúzi těchto nukleonů

Fúze $H \rightarrow He$

- Rozdíl klidových hmotností atomu He a 2H
- $Q = \Delta mc^2$
- $Q = 28,3 \text{ MeV}$



Vazebná energie na 1 nukleon pro jednotlivé prvky



- Jaderné síly musí převládnout nad elektromagnetickými (odpudivými)
- Překonání Coulombovské bariéry $U_{coul} = k \frac{q_1 q_2}{r}$ $U_{coul} = \frac{k Z_1 Z_2 e^2}{r}$
(odpovídá potenciální energii v elektrickém silovém poli)

k - Coulombova konstanta ($k = 8.9876 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$)

q - náboje částic

r - interakční rádius

Z - protonové číslo

e - elementární náboj

- Pro 2 protony: 0,4 MeV

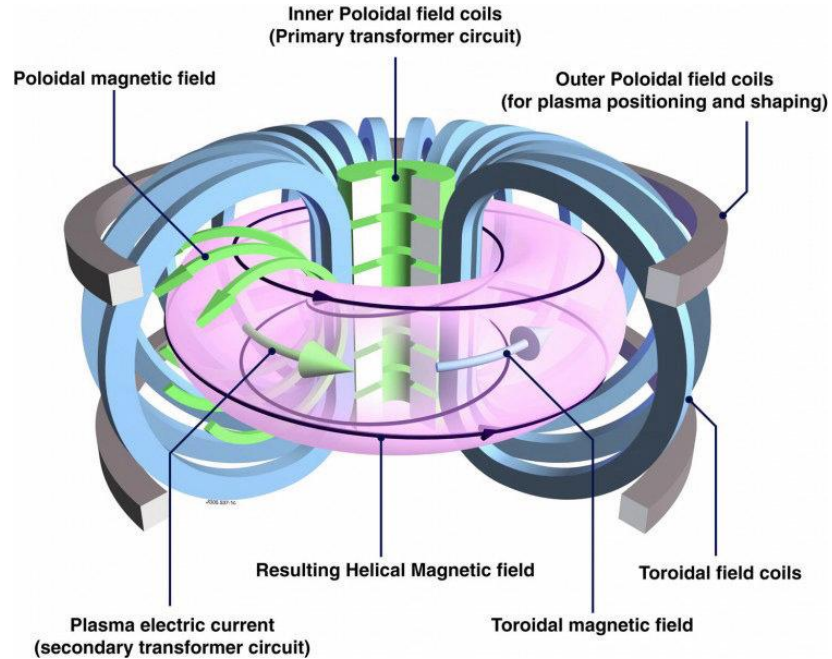
- V praxi potřebná vysoká teplota - pro H teplota 100 mil. K (veškerá hmota ve stavu plazmatu)
- Potřeba udržet plazma bez kontaktu s okolím - tokamak
- Zdroj energie hvězd - po Fe

Tokamak

- Zařízení na principu tjf, palivo deuterium a trícium
- Trícium 30 000\$/g, Deuterium 1\$/g, Vodík 12-16\$/kg
- Zkratka pro “toroidní komora v magnetických cívkách”
- 50. léta - Rusové Tamm a Sacharov
- Udržuje palivo ve vysokém tlaku a bez kontaktu se stěnami komory

Schéma tokamaku

- Toroidní vakuová komora - plazma drženo uprostřed
- Toroidní magnetické pole
- Poloidní cívky podél toroidní vakuové komory - udržení polohy plazmatu
- komora je závitem transformátoru ($k < 1$), indukovaný proud zahřívá palivo
- Výsledné pole tvaru šroubovice





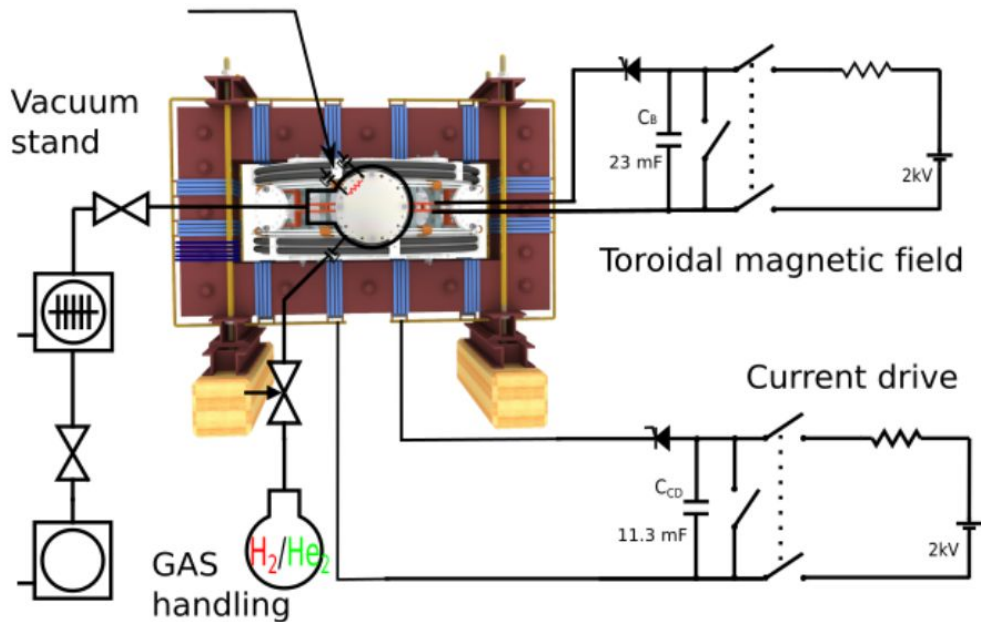
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Golem#/media/File:Prague-golem-reproduction.jpg>

Tokamak Golem

- Nejstarší a nejmenší tokamak na světě
- Vyroben v 50. letech v SSSR (TM-1)
- 1975 darován Československu (TM-1MH)
- 1984 přestavba (CASTOR)
- 2006 věnován FJFI (Golem)
- První dálkově ovládaný tokamak

This web interface will walk you through the process of configuring a discharge in the GOLEM tokamak. All settable values are perfectly safe. Proceed through each step by setting the desired values and then clicking the **Next** button. You can always go to a specific step by clicking its tab.

Preionization (electron gun)



Next

PARAMETRY:

Pracovní plyn (H,He)

Tlak (0 - 60 mPa)

Preionizace (1/0)

U toroidního magnetického pole C_B (0 - 1300 V)

U na závitech primární cívky C_{CD} (0 - 700 V)

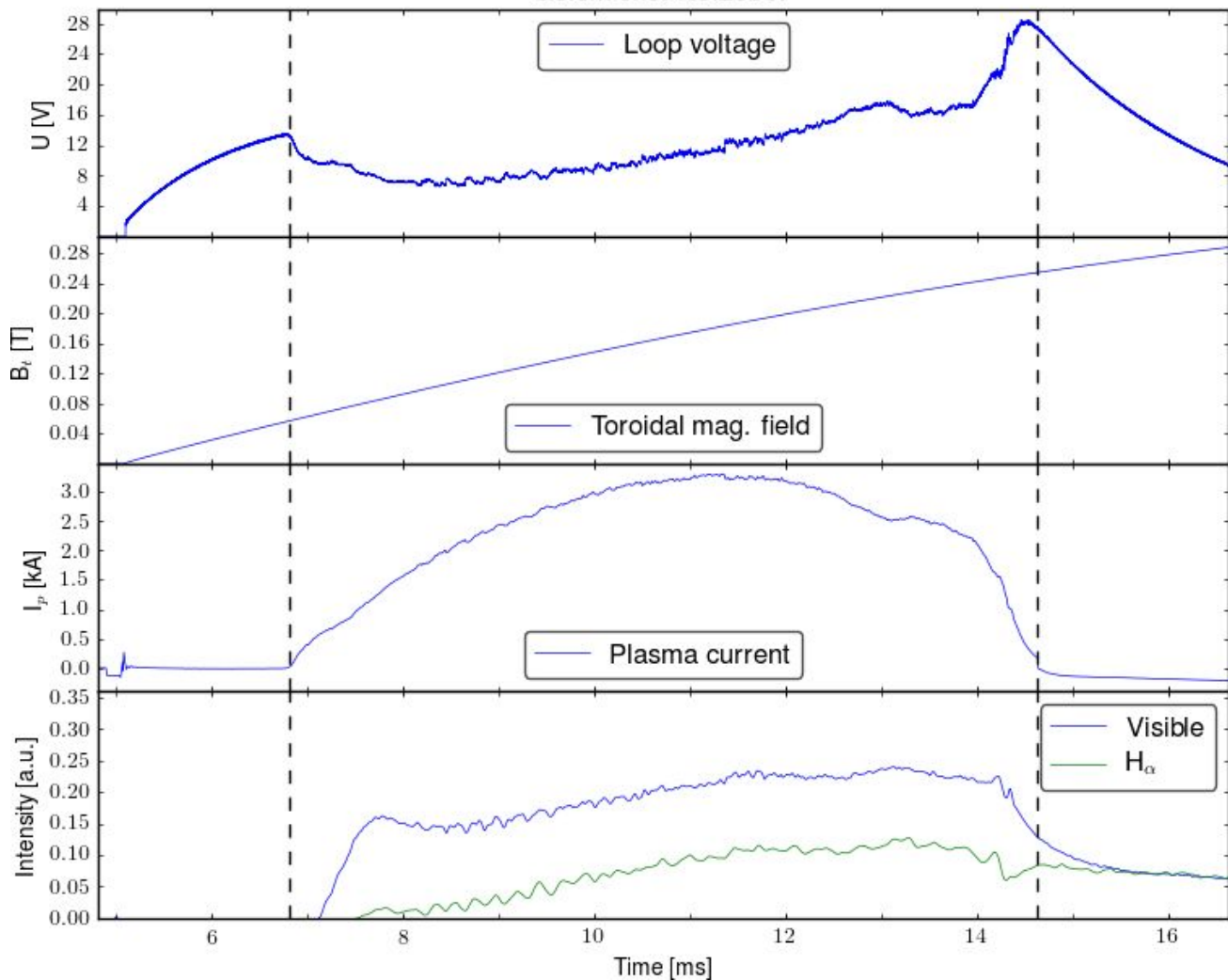
Zpoždění C_{CD} oproti C_B

Měření

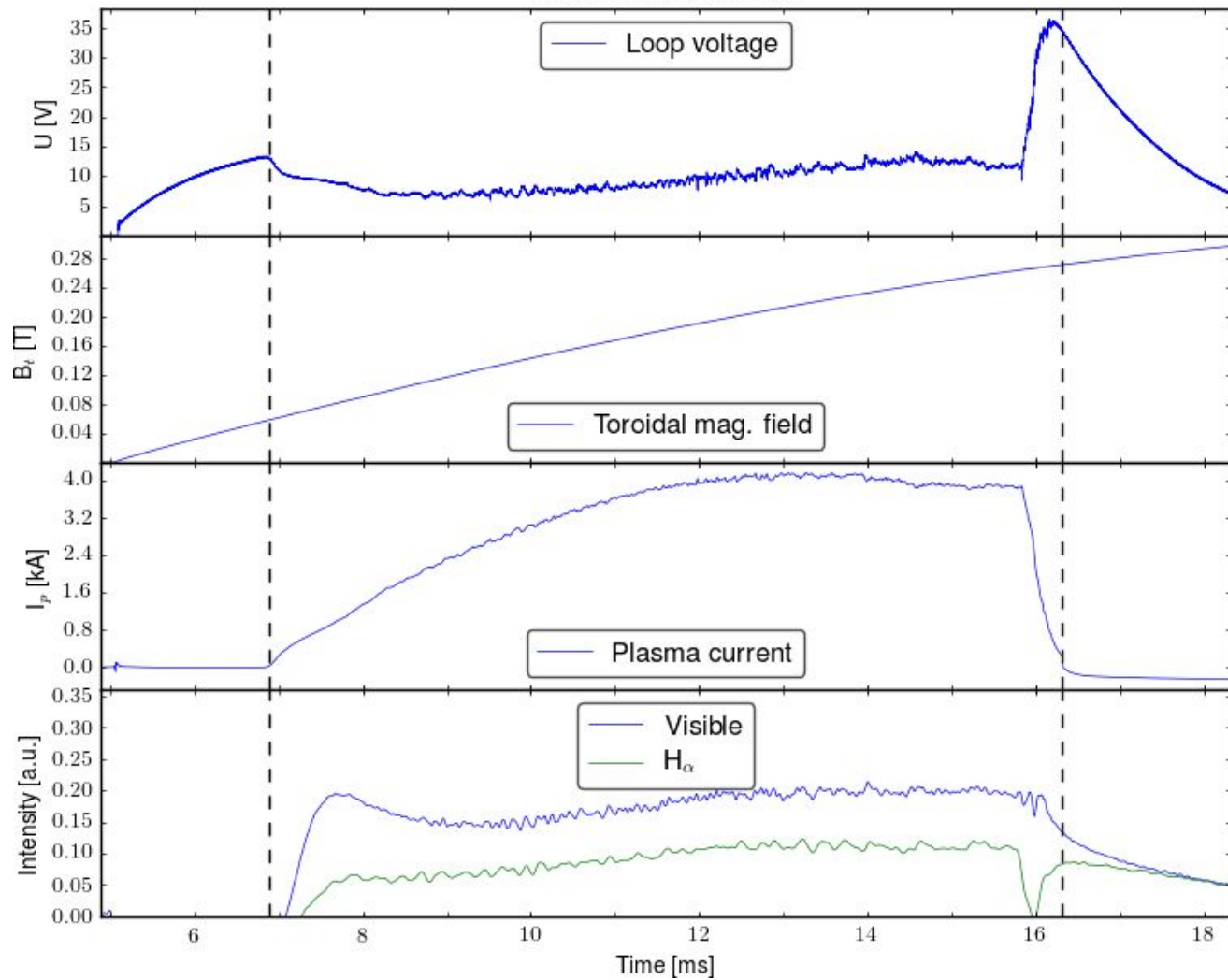
- Celkem 40 shotů
- U_b = konstantní
- P , U_{cd} = proměnné
- Gas: H
- S preionizací

Pár vybraných měření...

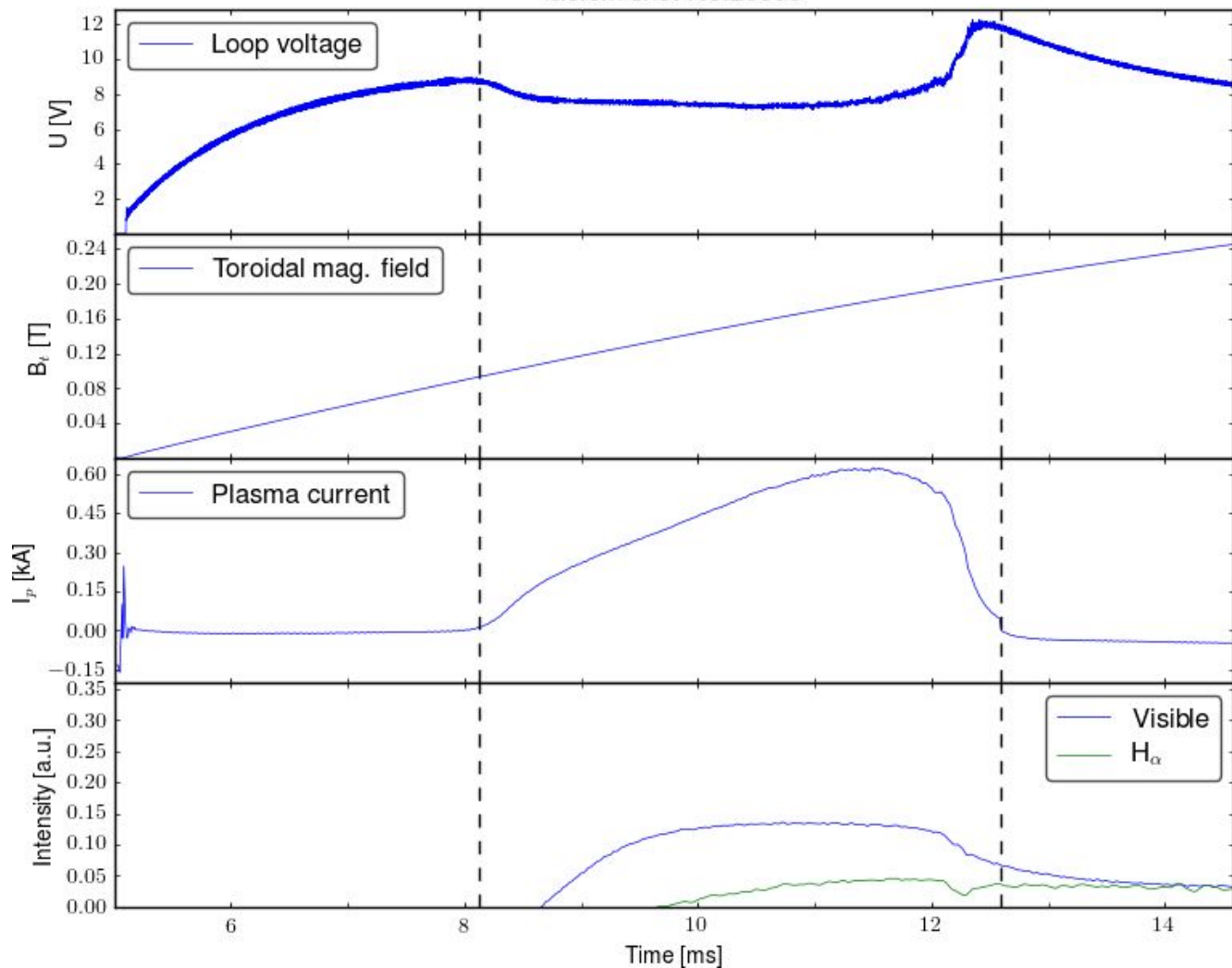
- $P=10.44\text{mPa}$
- Gas: H
- $U_b: 800\text{ V}$
- $U_{cd}: 600\text{ V}$
- prob: 91%
- time: 7.8 [ms]



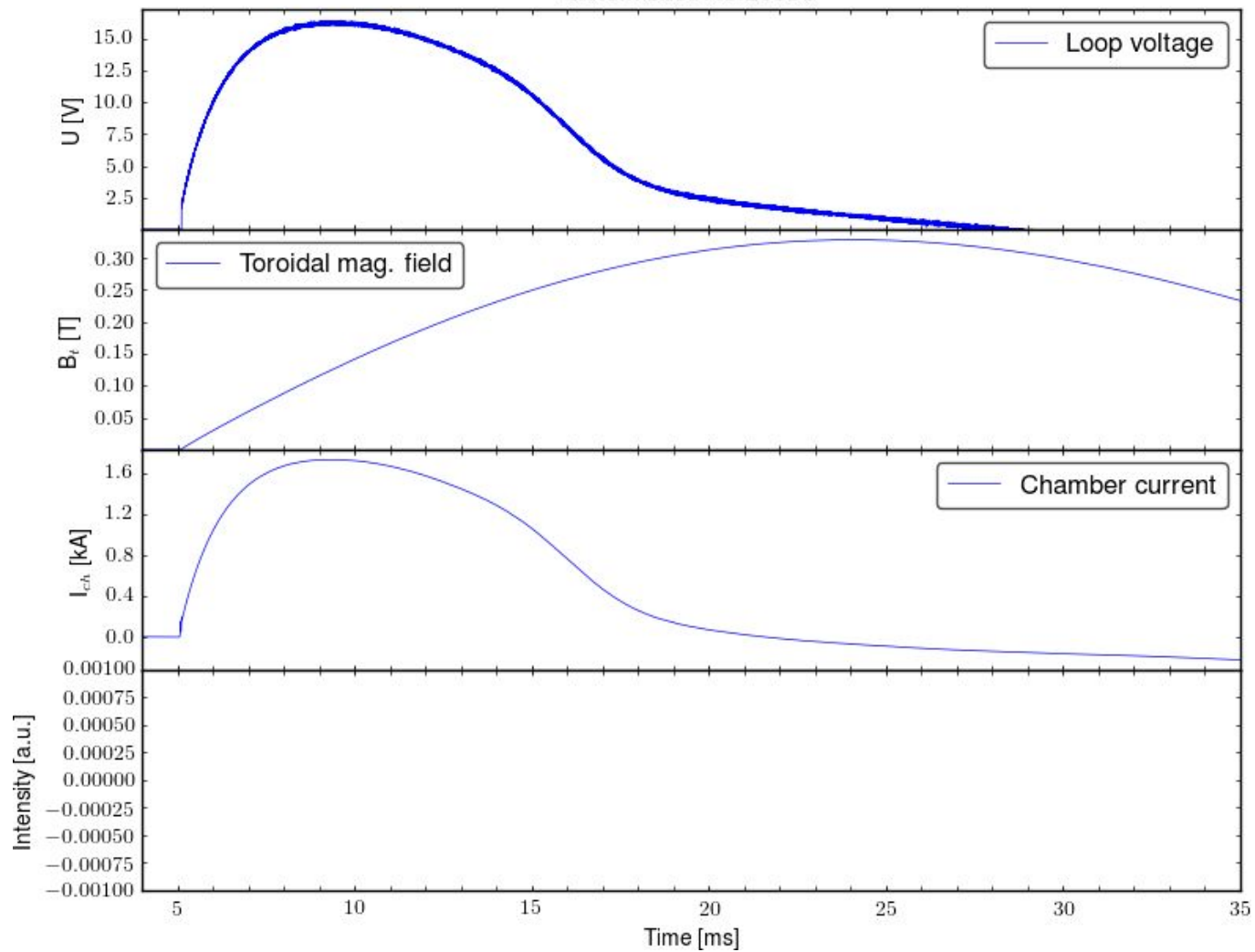
- $P=19.76\text{mPa}$
- Gas: H
- $U_b: 800\text{ V}$
- $U_{cd}: 600\text{ V}$
- prob: 92%
- time: 9.4 [ms]



- $P=21.44\text{mPa}$
- Gas: H
- $U_b: 800\text{ V}$
- $U_{cd}: 300\text{ V}$
- prob: 50%
- time: 4.5 [ms]



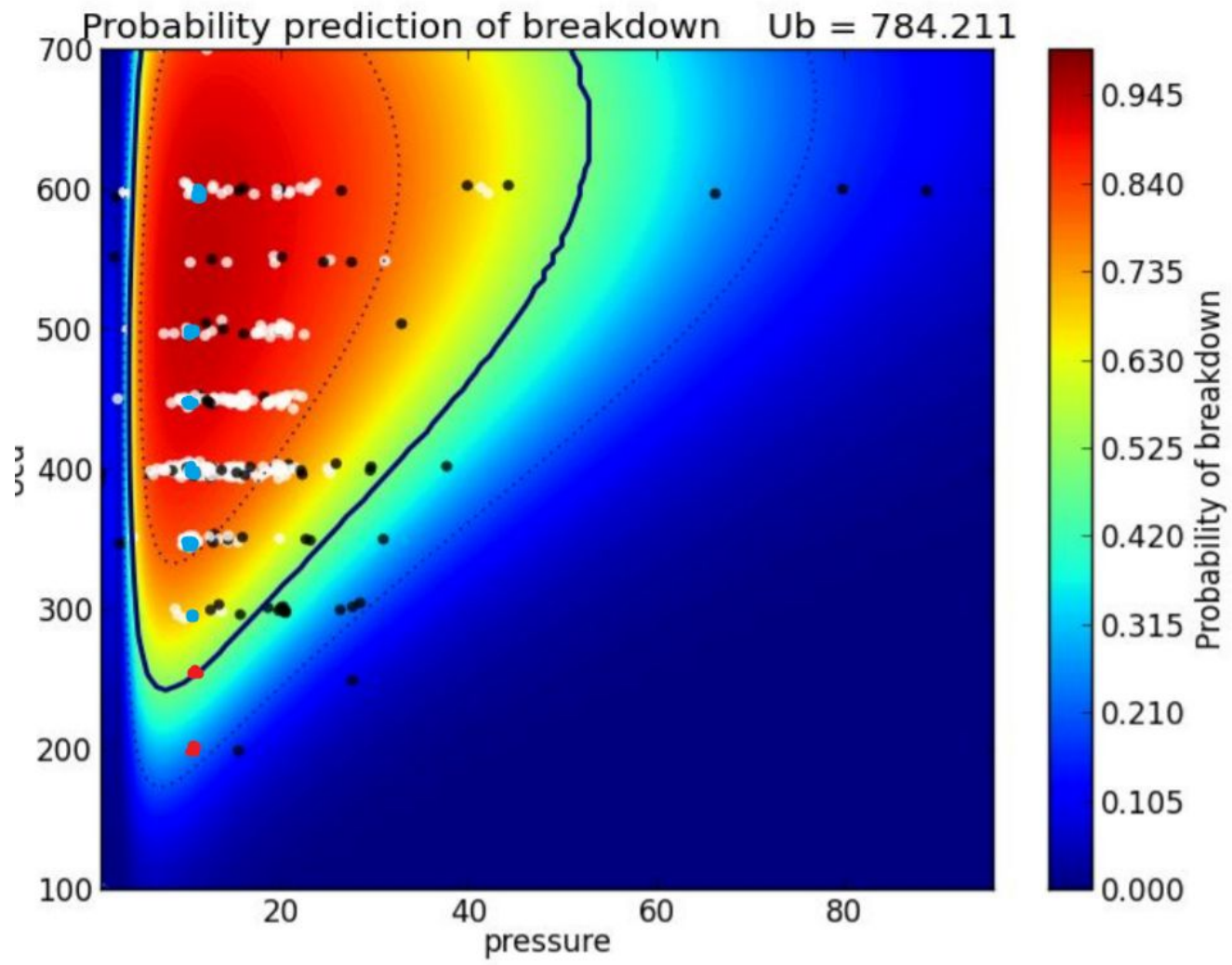
- $P=99.36\text{mPa}$
- Gas: H
- $U_b: 800\text{ V}$
- $U_{cd}: 600\text{ V}$
- prob: 3%

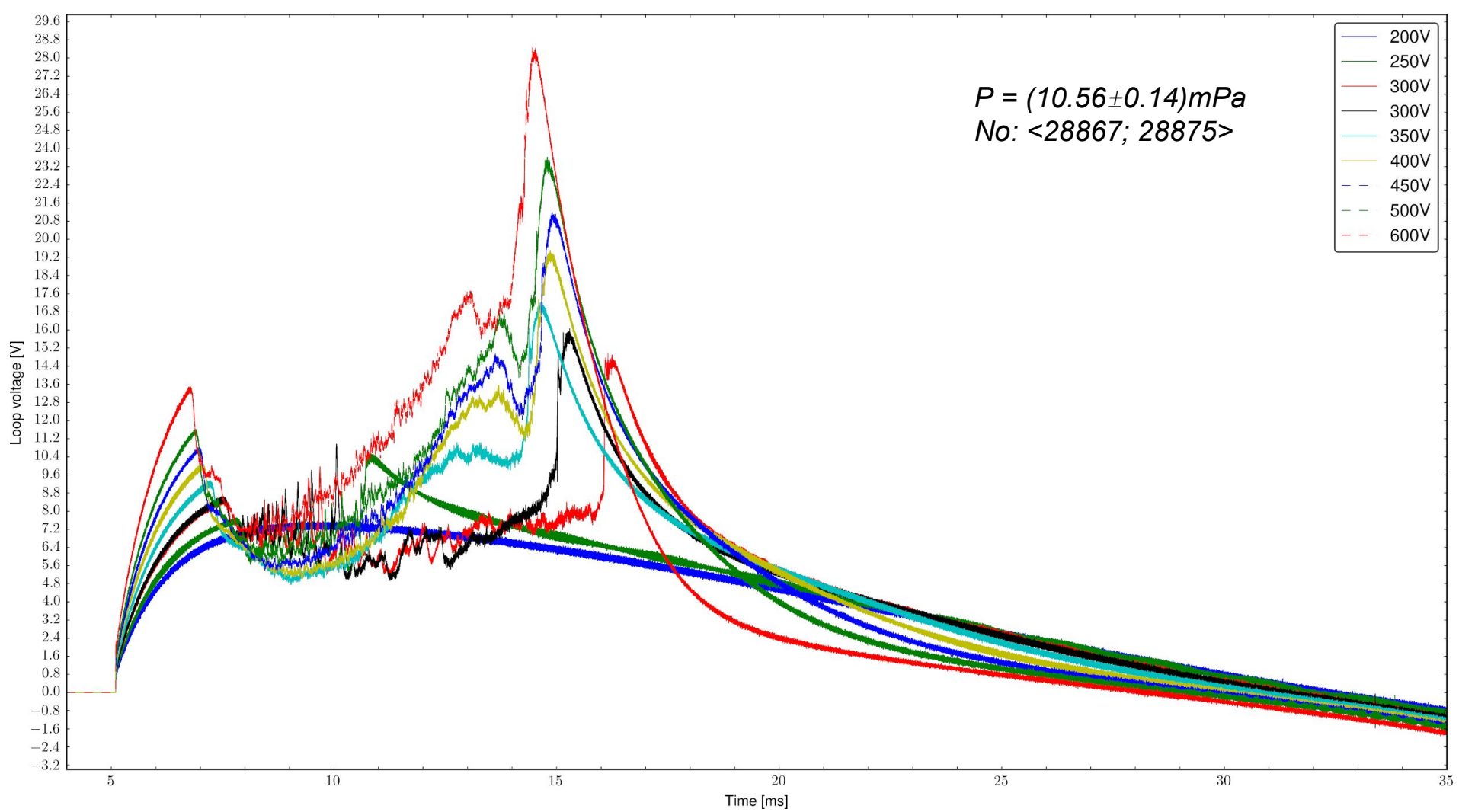


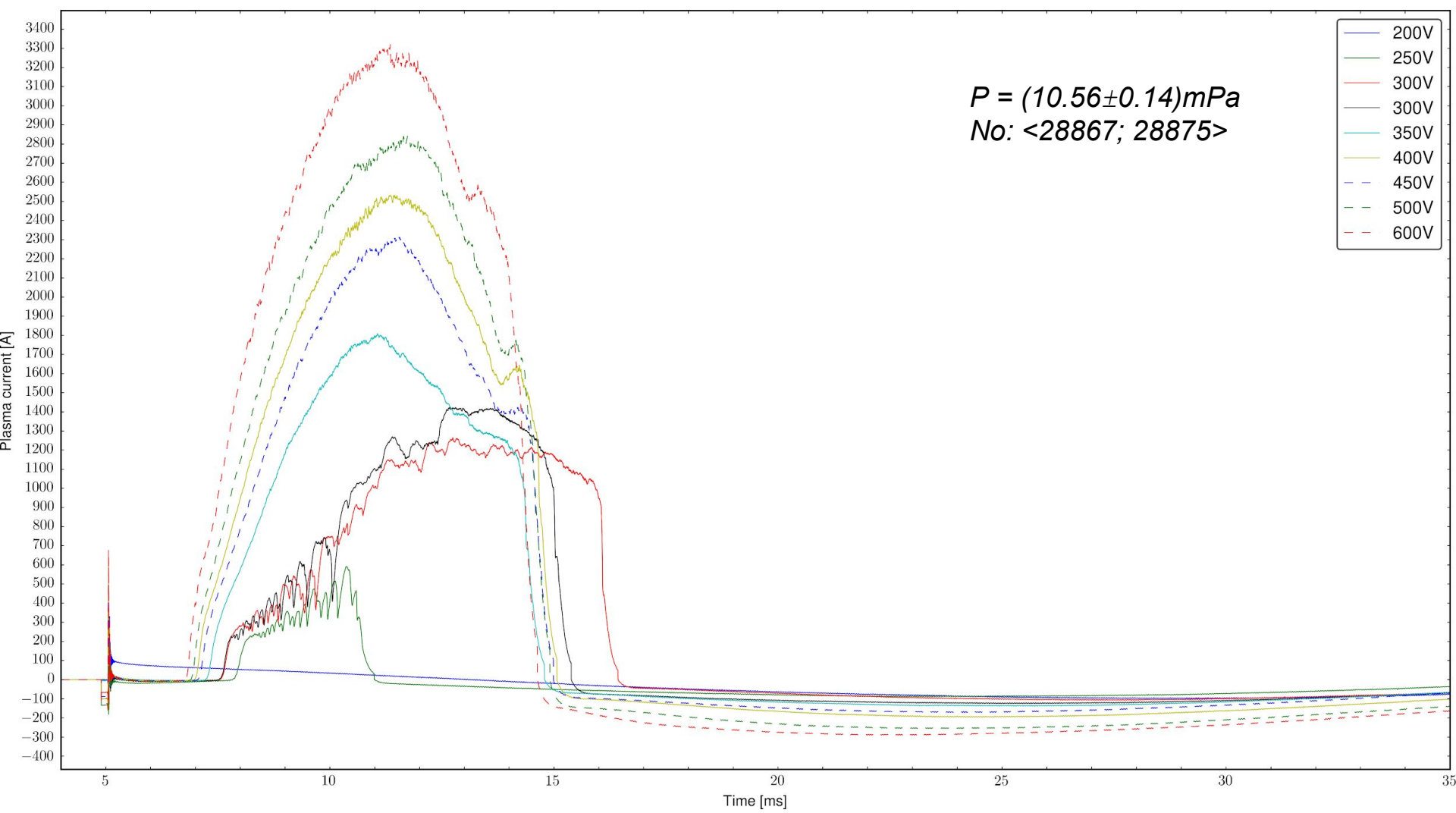
Sekvence měření s konstantním tlakem

- U_b a P zde byli konstantní ($P = (10.56 \pm 0.14) \text{ mPa}$)
- U_{cd} jsme postupně navyšovali (pohyb po ose y)
- Měření byly provedeny ihned po sobě

<i>No:</i>	<i>P[mPa]</i>	$U_{cd}[V]$	$I[kA]$	%
28867	10.44	600	2.55	91
28868	10.52	500	2.12	93
28869	10.63	400	1.63	90
28870	10.32	450	1.86	92
28871	10.56	350	1.33	86
28872	11.31	300	1.07	76
28873	10.12	300	1.08	78
28874	10.56	250	0.31	63
28875	10.56	200	--	41

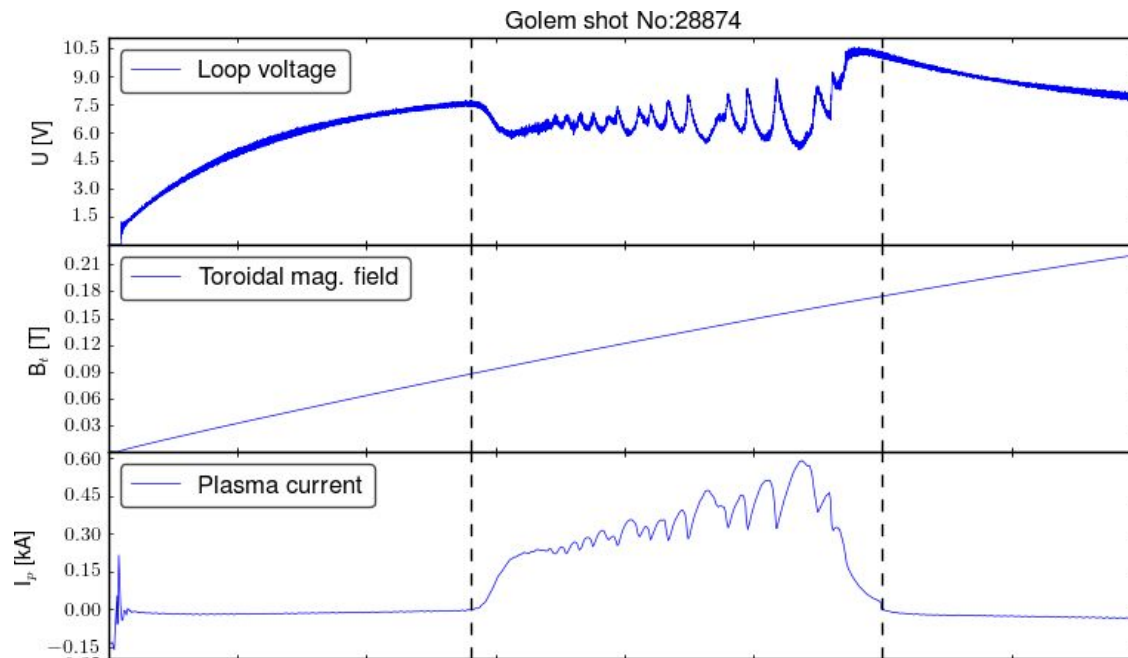






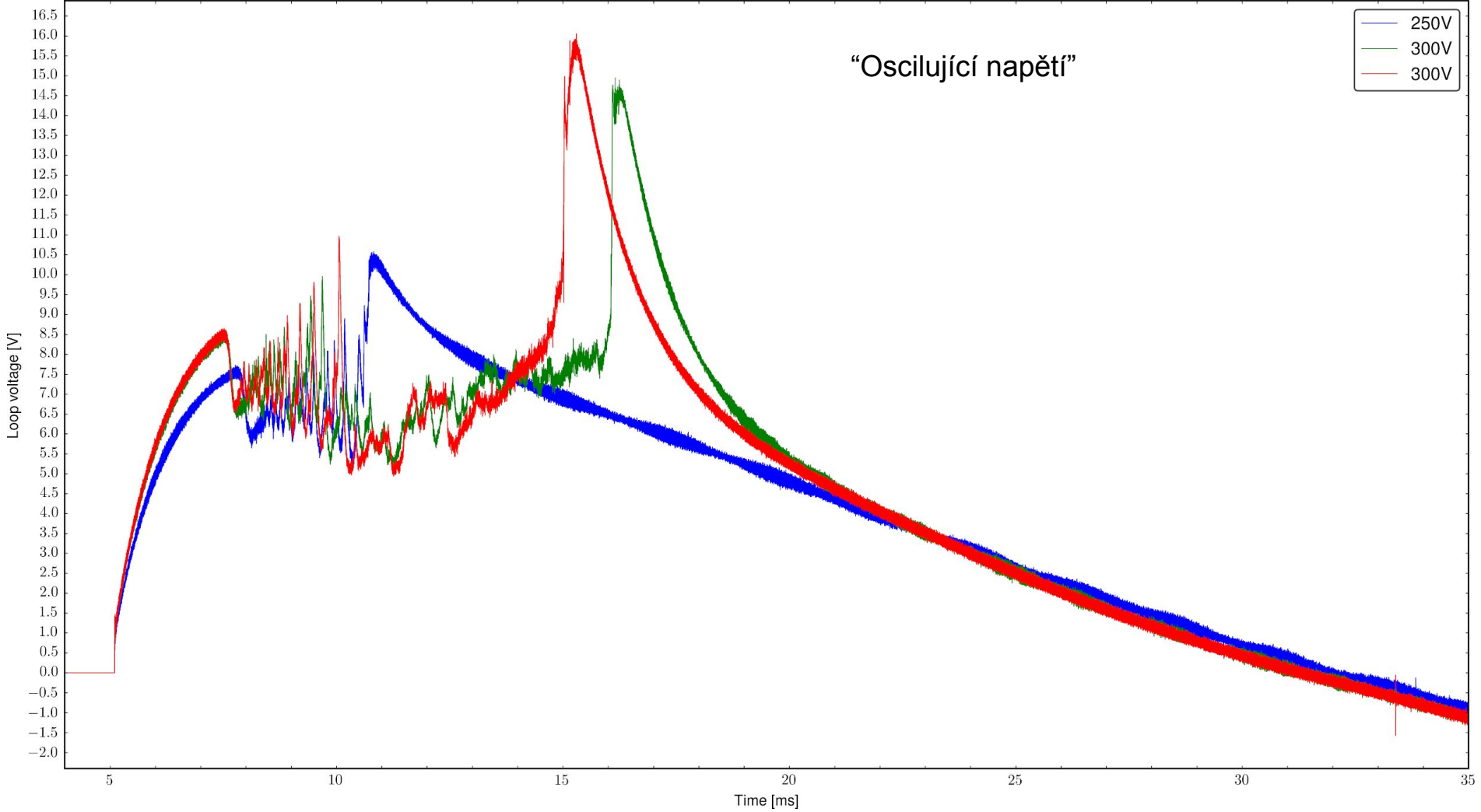
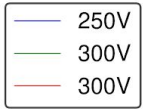
Oscilující napětí

- Nápadité “hroty” na křivce napětí a “inverzní” k nim na křivce proudu



No:	P [mPa]	Ucd[V]	I [kA]	%
28872	11.31	300	1.07	76
28873	10.12	300	1.08	78
28874	10.56	250	0.31	63

“Oscilující napětí”



Body s vysokou pravděpodobností vzniku

- Tj. pravděpodobnost 60+%

$P[mPa]$	$U_{cd}[V]$	$I[kA]$	%
15.63	600	1.87	93
15.03	500	1.54	93
5.97	600	2.26	80
28.47	600	1.8	87
36.34	550	1.29	75
31.6	600	1.58	84
26.99	600	1.72	88
21.27	600	2.12	92
16.81	600	2.42	93
10.44	600	2.55	91
10.52	500	2.12	93
10.63	400	1.63	90
10.32	450	1.86	92

$P[mPa]$	$U_{cd}[V]$	$I[kA]$	%
10.56	250	0.31	63
10.6	300	1.69	77
12.38	400	2.37	90
19.76	600	3.67	92
33.58	500	2.16	73
6.55	250	1.5	64
22.64	500	2.75	89
35.5	600	2.95	79
29.86	600	2.85	86
10.56	350	1.33	86
11.31	300	1.07	76
10.12	300	1.08	78

Hraniční body

- Nazveme jimi všechny body ležící na “hraně” Paschenovy křivky ($\pm 50\%$)

P [mPa]	U_{cd} [V]	I [kA]	%
10.56	200	--	41
21.44	300	0.43	51
39.15	500	0.97	61
15.55	250	1.02	51
20.96	300	1.01	52

Nepravděpodobné body

- Pravděpodobnost *40% a nižší*
- Polovina neúmyslně

P [mPa]	U_{cd} [V]	I [kA]	%
73.44	350	--	0
99.36	600	--	3
41.1	350	--	14
12.37	200	--	37
130	400	--	0
0.28	600	--	7
168.3	500	--	0
136	600	--	0
14.87	600	--	0
154.7	600	--	0

Vyloučené měření

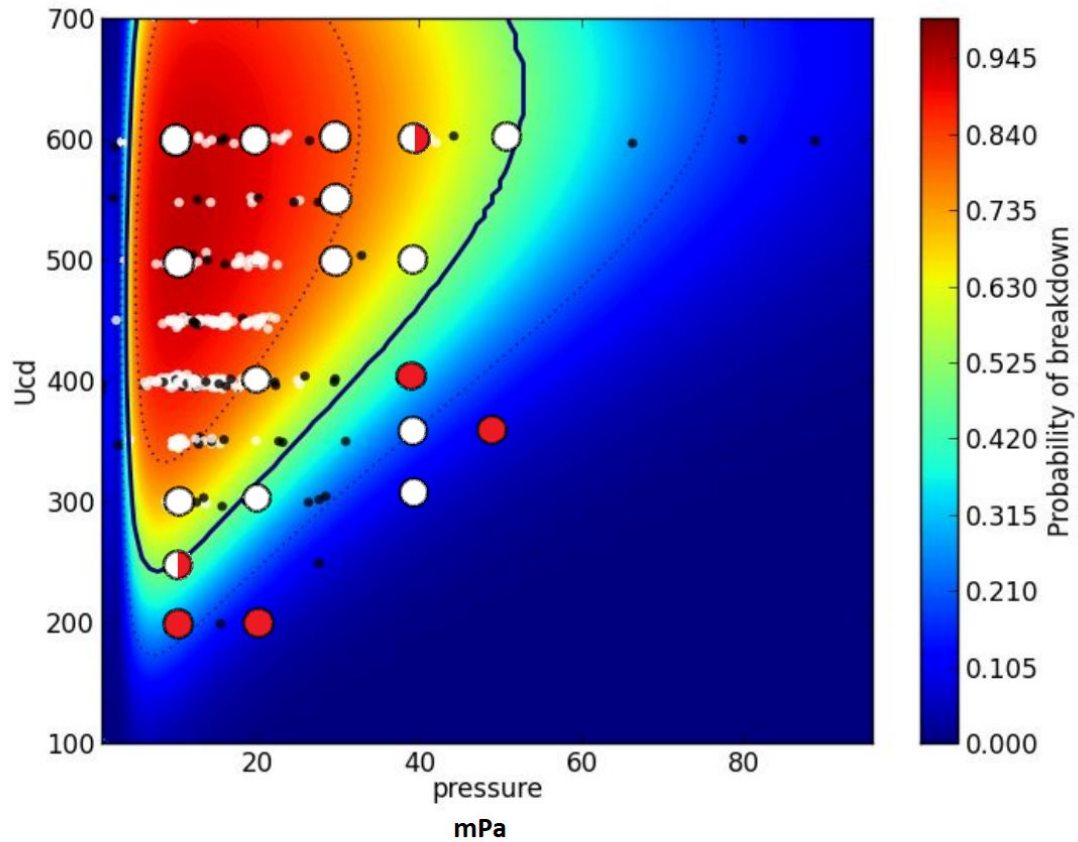
- Měřič špatně zpracoval tlak

<i>No:</i>	<i>P[mPa]</i>	<i>Ucd[V]</i>	<i>I[kA]</i>
28815	-450.53	500	2.73
28820	-496.42	500	1.84
28822	-502.6	600	2.84

Zadaný & skutečný tlak

Pressure [mPa]	Requested [mPa]		Pressure [mPa]	Requested [mPa]
17.84	20		168.3	20
12.37	20		-496.42	20
10.6	20		14.87	40
12.38	40		154.7	30
20.96	40		-502.6	20
130	40		19.76	20
-450.53	40		33.58	30
22.64	50		6.55	10
0.28	50		136	40
35.5	30		29.86	40

$U_B = 800 \text{ V}$



● Plazma nevzniklo

○ Plazma vzniklo

Diskuze

- Potvrdili jsme Paschenovu křivku?
- Co příště udělat lépe? (Ponaučení)
- Ovlivnil naše výsledky počet měření?

Děkujeme za pozornost

Zdroje:

- Michal Odstrčil: *Breakdown studies* [online], [cit. 10-12-2018], dostupné z: <https://sites.google.com/site/gomtraic/list-of-tasks/breakdown-studies>
- Jakub Mandula: *To what extent is it feasible to estimate the breakdown probability for a plasma discharge in the GOLEM tokamak using a machine learning algorithm trained using precedent discharge results?* [online], [cit. 12-12-2018], dostupné z: http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Students/HighSchools/JakubMandula/EEFF.pdf&ved=2ahUKEwj275-PsKrfAhVQmbQKHAWDewQFjAAegQIARAB&usg=AOvVaw2JtTFhn2BPVK6y5sl_iw5t&cshid=1545170511924
- D. Mueller: *The Physics of Tokamak* [online], [cit. 15-12-2018], dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1057465>