

Jedrska tehnika in energetika

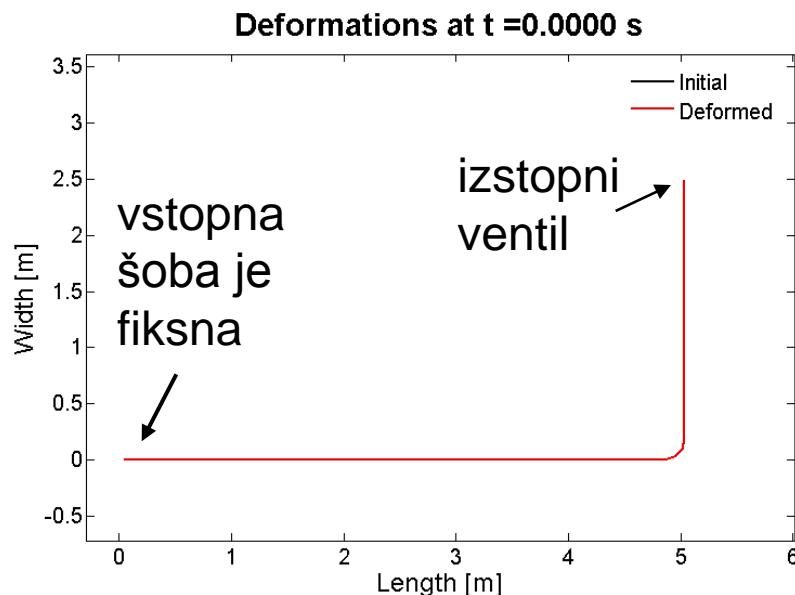
Predavatelj se predstavi

Iztok Tiselj

red. prof. s področja jedrske tehnike

Raziskovalec na Odseku za Reaktorsko tehniko IJS
(Reaktorski center Podgorica)

Raziskovalno delo - simulacije na področju jedrske termohidravlike.



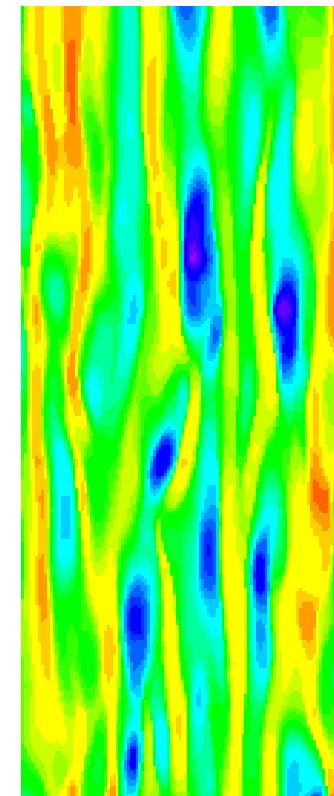
Nihanje cevi po zaprtju ventila na izstopu.

Govorilne ure:

Kadarkoli:

iztok.tiselj@ijs.si,
telefon 01 5885333,

V živo - po dogovoru



Jedrska tehnika in energetika

načrt dela

ENERGIJA: PORABA, VIRI, "ZALOGE"

- Fosilna goriva
- Sončno sevanje
- Veter, voda, biomasa
- Geotermalna energija
- Jedrska energija, fisija, fuzija.

Ocena:

Seminarji + pisni in ustni izpit

JEDRSKA TEHNIKA

- Reaktorska fizika, reaktorska kinetika.
- Procesi in sistemi v jedrskih elektrarnah.
- Prenos topote.
- Jedrska in sevalna varnost.
- Gorivni krog.
- Varnostne analize.
- Odpadki.

Seminarji:

Študentje pripravijo kratek seminar (~20 minutna predstavitev) in ga predstavijo v okviru vaj oz. predavanj.

Teme seminarjev

Energija sonca - fotovoltaika

Plin iz naftnih skrilavcev

TEŠ6

Gradnja JE Olkiluoto

Odlagališče visokoradioaktivnih odpadkov Onkalo

Fukušima – potres, cunami, prizadete JE

Fukušima Daiči - Nesreča

Fukušima – radiološke posledice

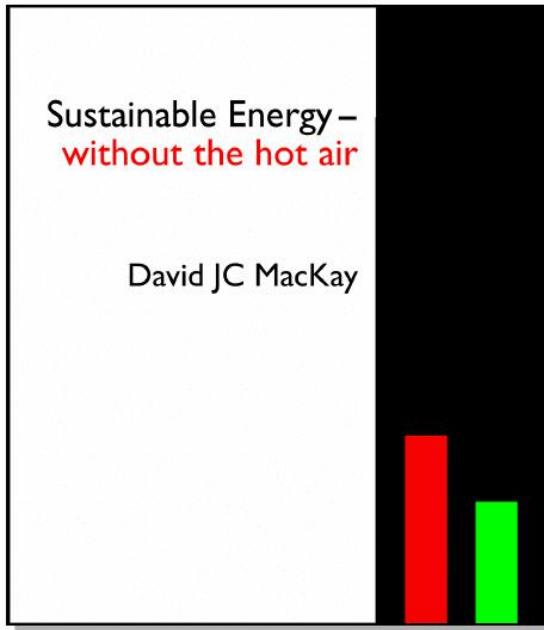
Fukušima - sanacija

Jedrska tehnika in **energetika**

Literatura: David MacKay:

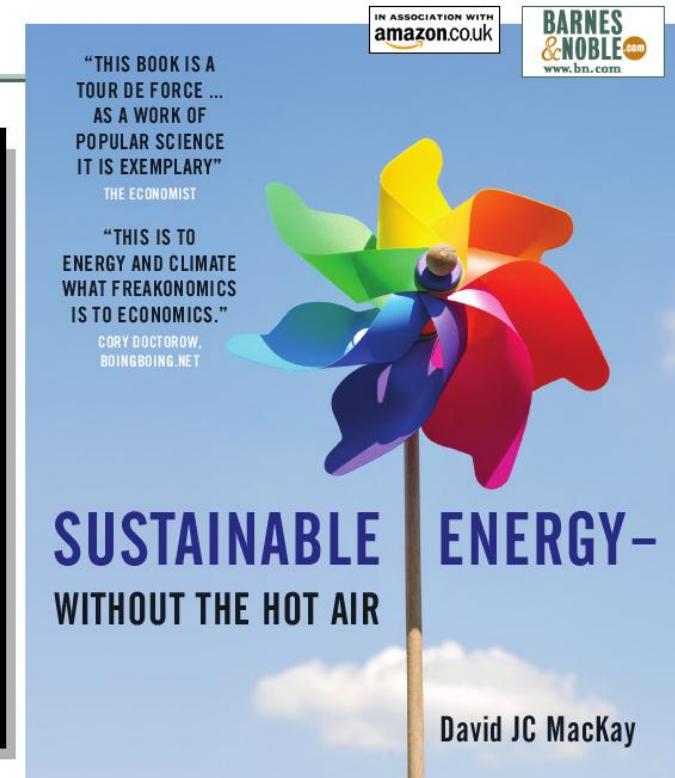
Sustainable Energy - without the hot air

This book is free online



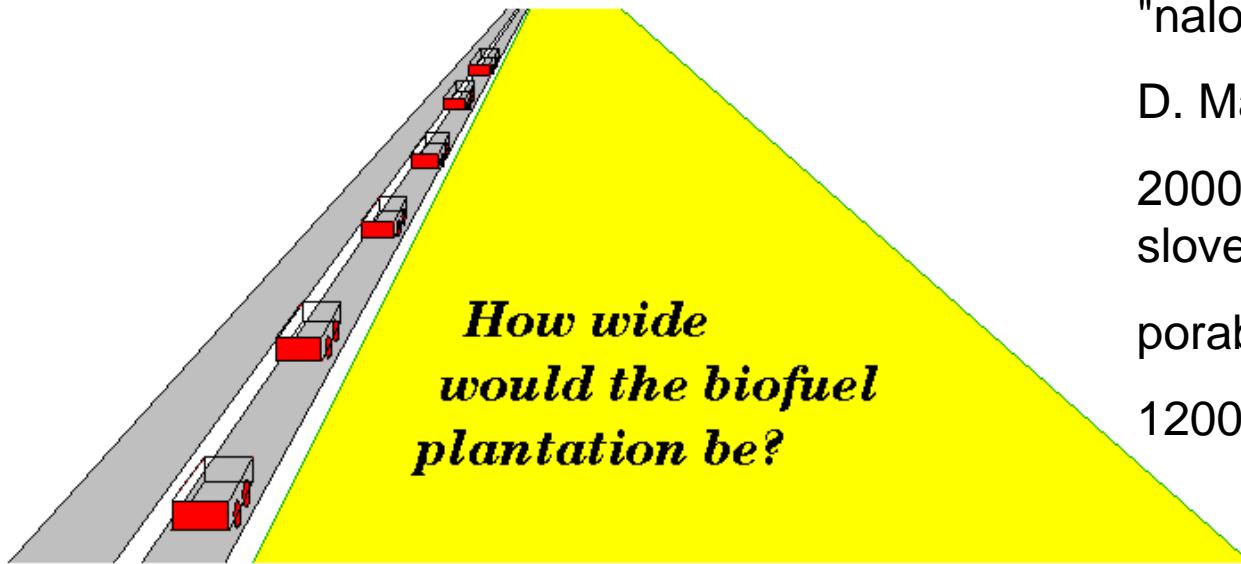
Janez Stepišnik, FMF

materiali predmeta:
"Fizika energijskih virov"



www.withouthotair.com

Branje in premetavanje številk



"naloge" po :

D. MacKay

20000 vozil/dan (tipična slovenska avtocesta),

poraba 7 l/100 km

1200 l biogoriva/ha/leto

Kako široka naj bo njiva z biogorivom (oljna repica) ob cesti?

~4 km

Fosilna goriva, obnovljivi viri energije, jedrska energija - osnovna vprašanja

- Zakaj se ukvarjamo z energetiko?

Fosilna goriva, obnovljivi viri energije, jedrska energija - osnovna vprašanja

- Zakaj se ukvarjamo z energetiko?
 - Fosilnih goriv zmanjkuje - imamo "privilegij" izkoriščati energijske vire, ki so nastajali več milijard let !?
 - Države običajno stremijo k energetski neodvisnosti.
 - Uporaba fosilnih goriv zelo verjetno povzroča klimatske spremembe.
- Smo lahko proti-jedrski, proti-premogu, proti-nafti, proti-vse-ostalo..?
- Kako lahko zmanjšamo porabo energije (in ohranimo svoj način življenja ;-)?
- Kaj lahko storimo z obnovljivimi viri energije?
- Je jedrska energija obnovljiv vir?

Številke in enote

New Scientist, Vol 200, Iss. 2685, dec. 2008

(povzetek tudi v Delovi prilogi Polet, 2009...)

"Crystals turn roads into power stations"

Nov vir električne energije - piezoelektrični pod plastjo asfalta:

Polet: "...Poskusno vgrajujejo sisteme v ceste in v podjetju Innowattech obljudljajo, da bi lahko na enem kilometru prometne avtoceste, kjer naštejejo dvajset avtomobilov in tovornjakov na minuto, pretvorili kar en megavat na uro."

Podjetje "Innowattech" je (v 2008) obljudljalo: 1 MWh energije na uro na "opremljen" kilometer ceste pri 1500 vozilih na uro.

Naloga: Preveri številke.

Pozor, na FMF velja 1. glavni zakon termodinamike!!!

Kako iz 0.3 MWh mehanske energije narediti 1 MWh električne?

Številke in enote

Osnovna enota za energijo [J]

"neprijetna" lastnost:

cena 1 J električne energije ali 1 J energije
bencina v EUR

- izogniti se želimo milijonom, milijardam, bilijonom, trilijonom...
- enote naj bodo **razumljive** in **primerljive**
- računamo "**na osebo**", na eno vodilno "**decimalko**"
- enota za energijo
kWh
- enota za moč
kWh/dan \approx 40 W

(Sledimo predlogu D. MacKay-s)



Slika: Wikipedia

Primeri:

žarnica 24 ur - 1kWh

hrana - 3 kWh/dan

kopel - 5 kWh

liter bencina - 10 kWh

aluminijasta pločevinka - 0.6 kWh



80 kWh/dan
(130 km)

I.T. poraba
energije



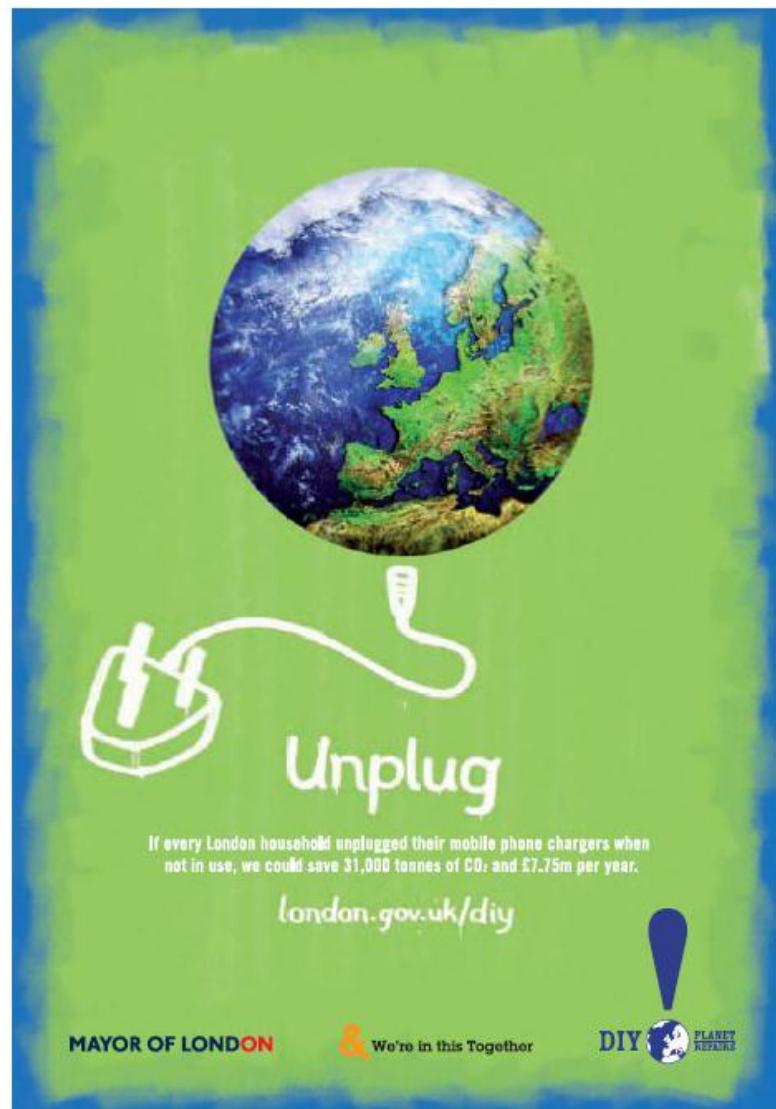
150 kWh/dan
30 kWh/dan/osebo
(25 ogrevanje, 5 elektrika)



0.01 kWh/dan

Polnilec mobitela (MacKay)

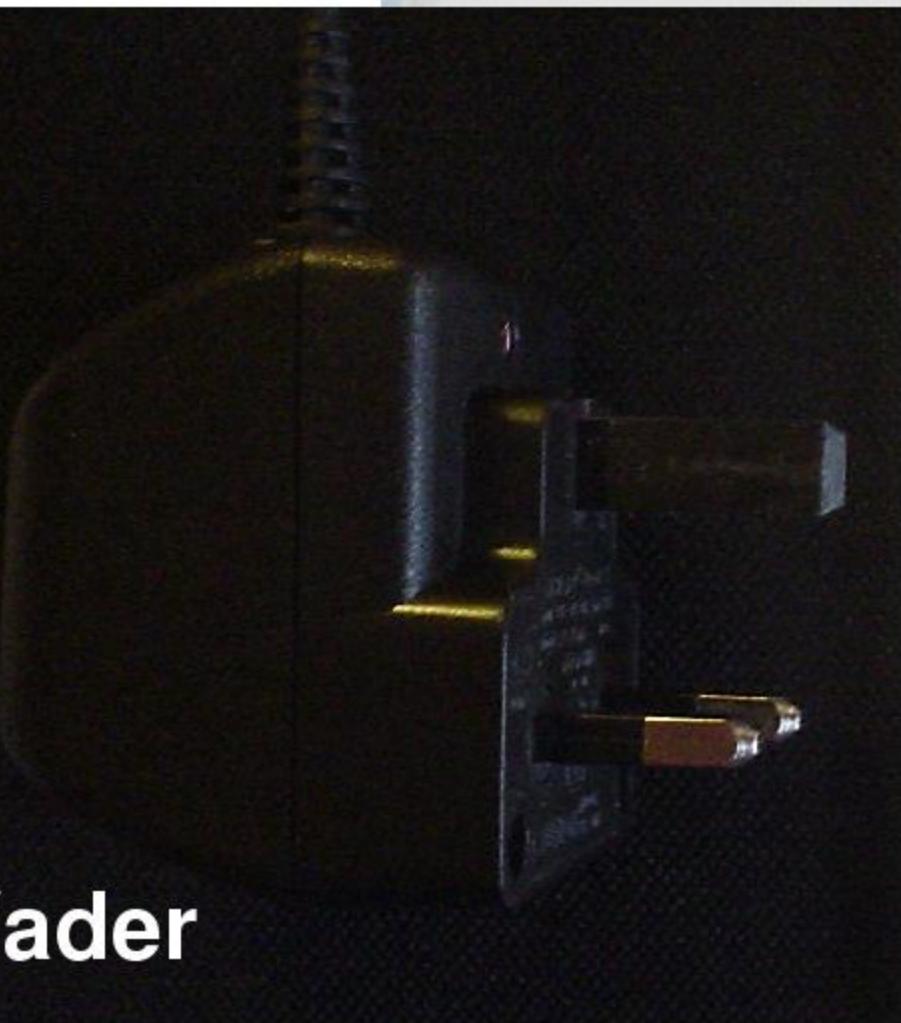
June 2007



'If every London household unplugged their mobile phone chargers when not in use,
we could save 31,000 tonnes of CO₂ and 7.75m per year.'

Are they related?

Vader



Charger



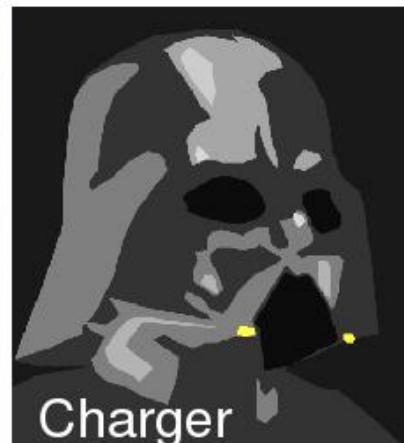
MAYOR OF LONDON

We're in this Together

DIY
PLANET
REBELS

'If every London household unplugged their mobile phone chargers when not in use,
we could save 31,000 tonnes of CO₂ and 7.75m per year'

Številke (MacKay)



prihranek energije, če ga
izklopimo za 1 dan

=

energija, ki jo porabi
povprečen avto **v 1 sekundi**

$$0.5 \text{ W} \times 86400 \text{ s}$$

=

$$40.000 \text{ W} \times 1 \text{ s}$$

$$=0.01 \text{ kWh}$$

Enote

gostota poselitve

število kvadratnih metrov na osebo

SLO: 10.000 m² na osebo

100 prebivalcev/km²

- moč na površino

W na m²

(Sledimo predlogom D. MacKay-s)

Ostale enote

Statistični letopis RS uporablja različne enote:

- GWh za elektriko
- TJ za toploto
- (k)toe "ton oil equivalent" ekvivalent tone nafte - za celotno energijsko bilanco

$$\text{toe} = 11.630 \text{ kWh}$$

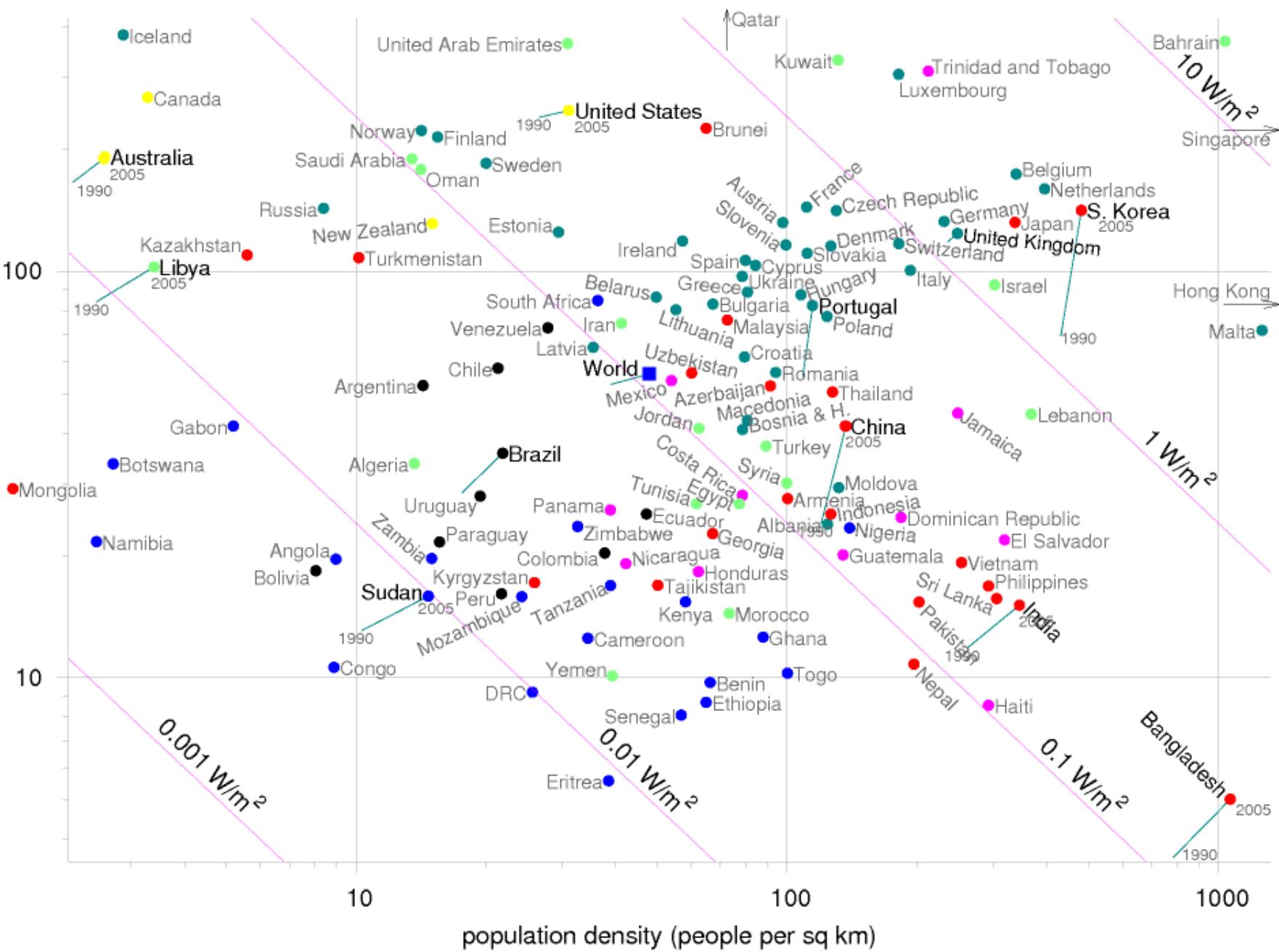
<http://www.stat.si/letopis/>

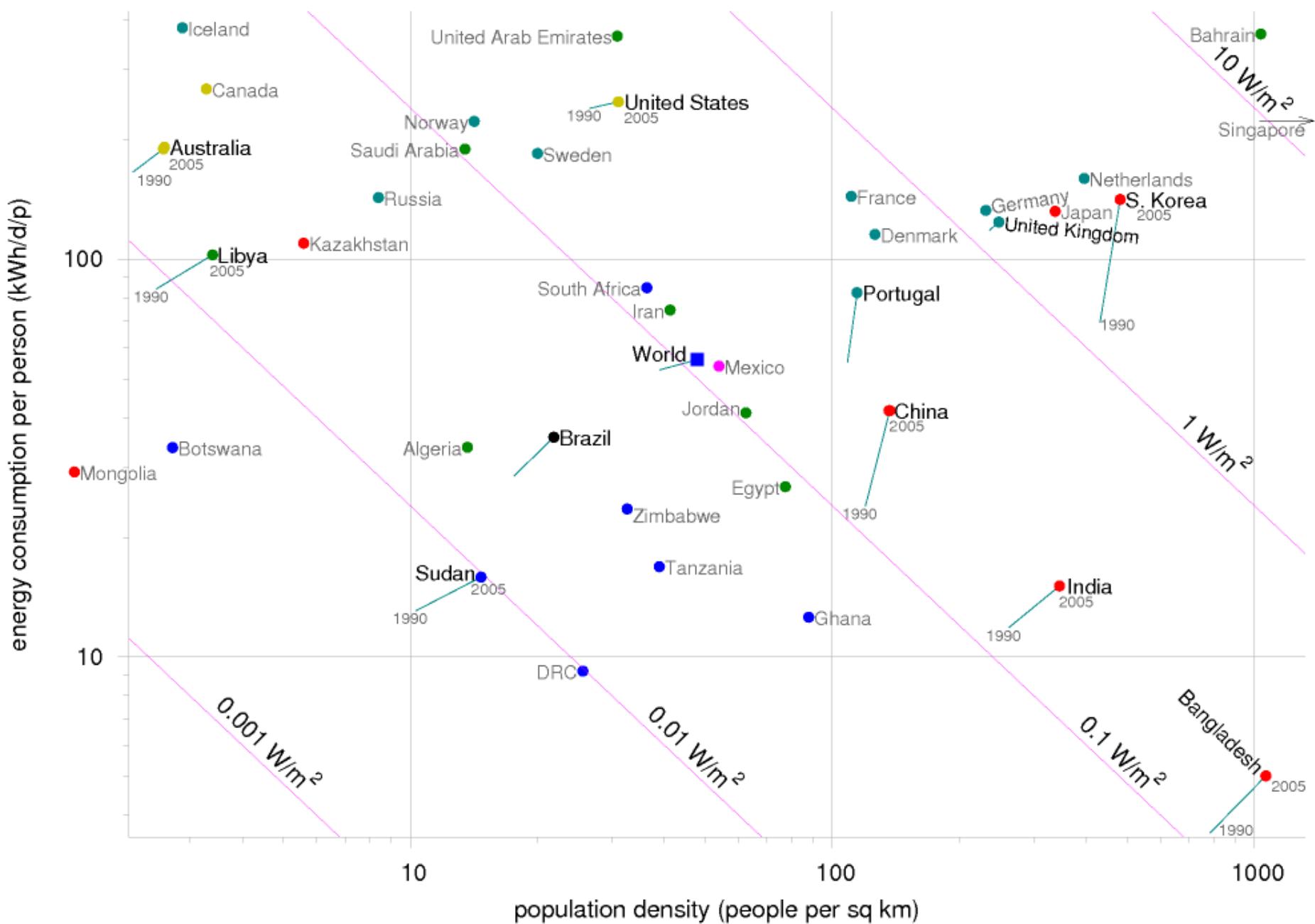
- "Nova elektrarna bo proizvedla dovolj energije za oskrbo 10 gospodinjstev." 1 gospodinjstvo = 11-13 kWh elektrike/dan

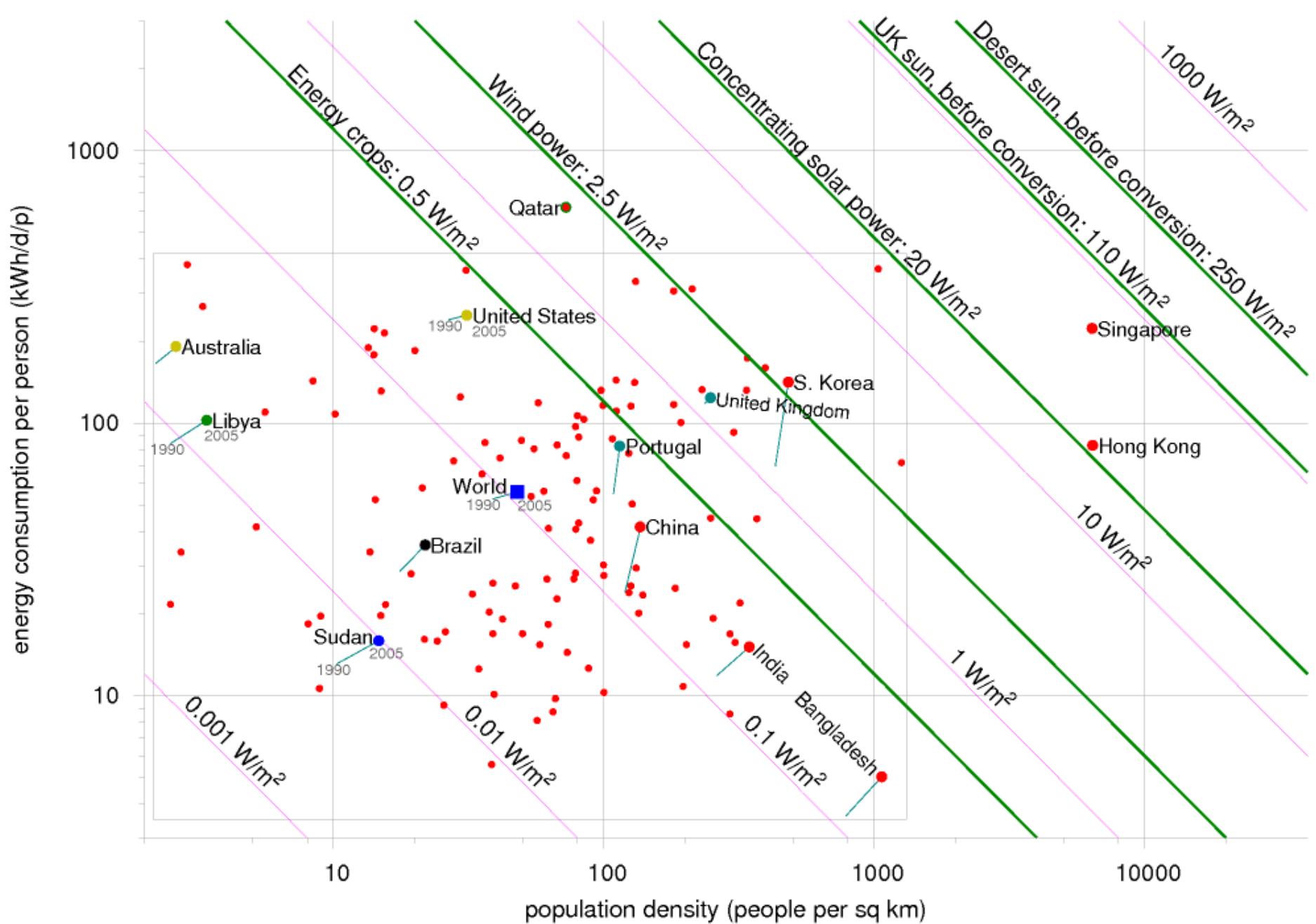
Masa

- količina nafte - tone
- plin - Sm³
- premog - tone

energy consumption per person (kWh/d/p)



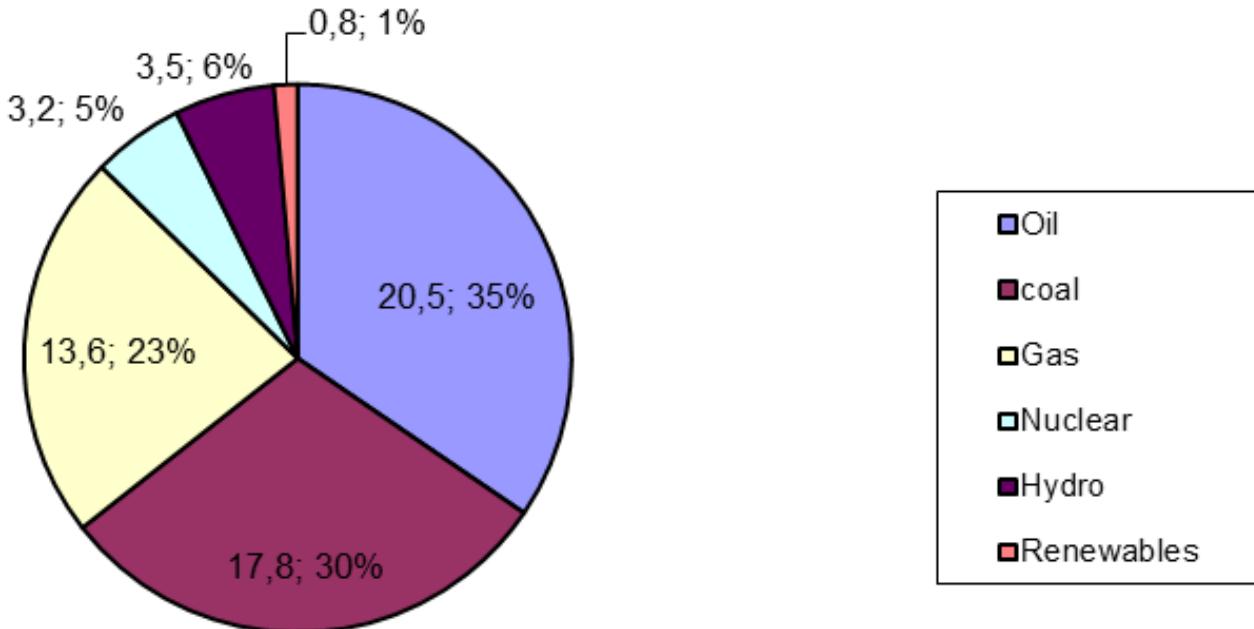




Energija - Svet porablja 15-16 TW

55 kWh/dan/osebo (2010)

Proizvodnja energije na povprečnega Zemljana v kWh/dan



Pozor- vsota v torti je 59 kWh/dan:
“Popravek” za Nuclear, Hydro !

vir: Energy Information Administration,
<http://www.eia.doe.gov/>

Preveri podatke za jedrsko energijo na prosojnic s "torto" svetovne porabe!!!

1) EIA: U.S. Energy Information Administration of
DOE: Department of Energy ("Secretary" Steven Chu)

<http://www.eia.doe.gov/pub/international/iealf/tablef7.xls>

Net Nuclear Electric Power Generation:

2006: 27.758 quad BtU (British Thermal Units) = 8100 TWh

2) World nuclear association (WNA)

<http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>

2500 TWh in 2006

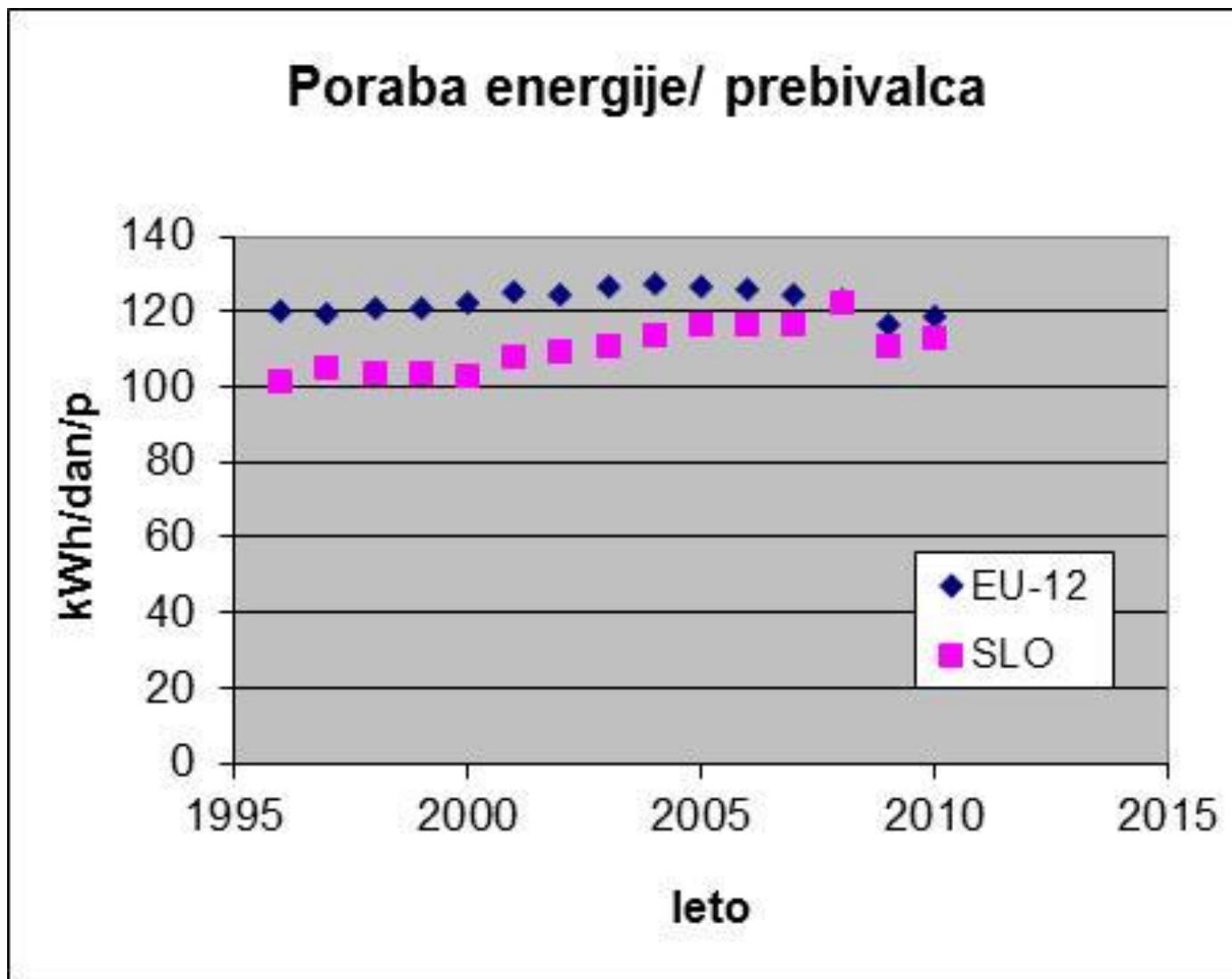
8100 TWh - toplotna energija, 2500 TWh električna energija

Isti "popravek velja za hidro-elektriko

RAZLIČNA VREDNOST RAZLIČNIH VRST ENERGIJE !!!

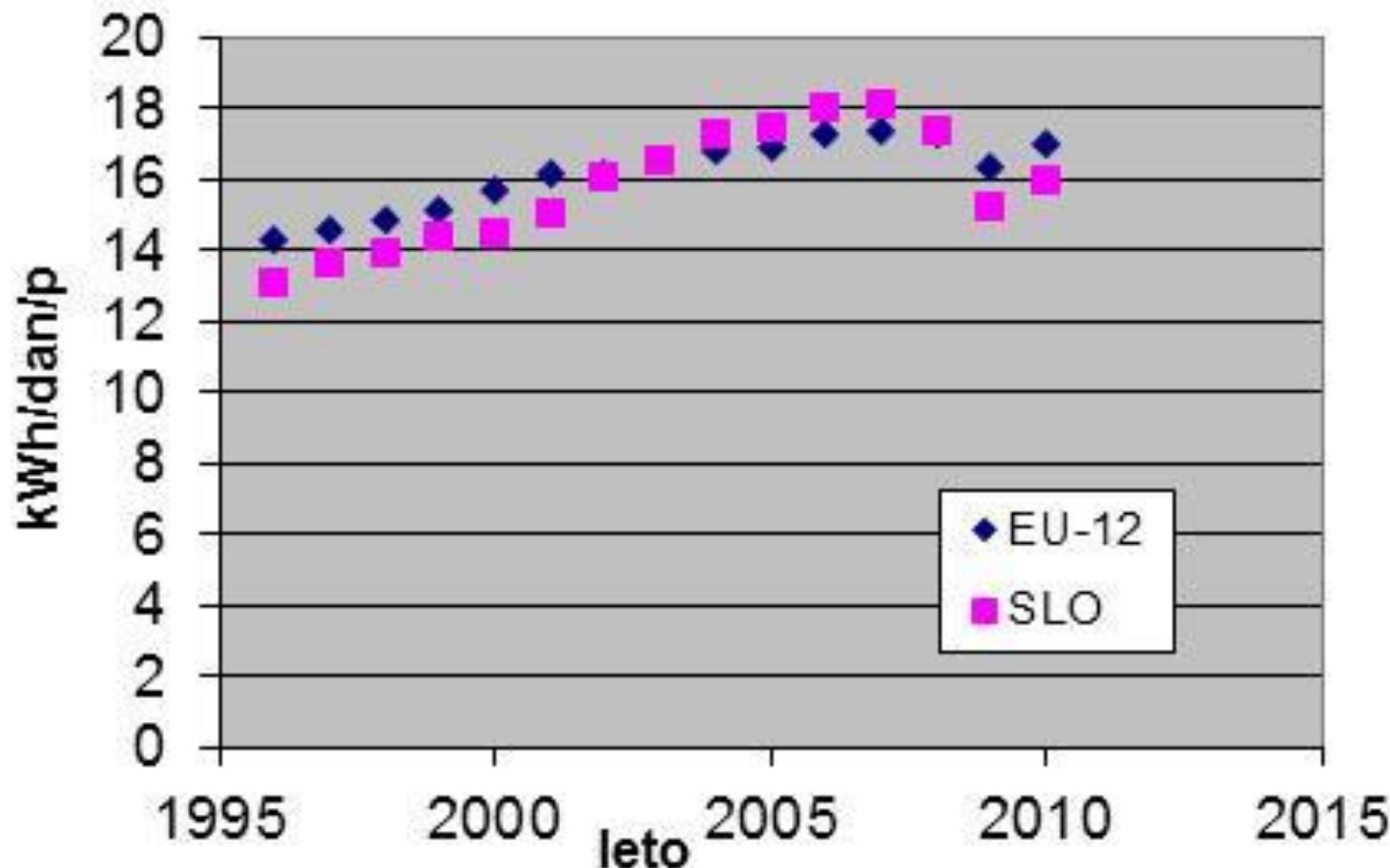
Slovenija in EU-12

Belgium, Denmark, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, the Netherlands, Portugal, Spain, United Kingdom



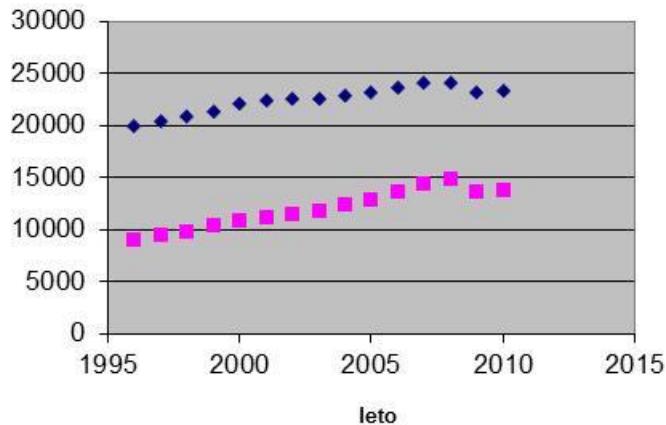
Slovenija in EU-12

Poraba električne energije/prebivalca/dan

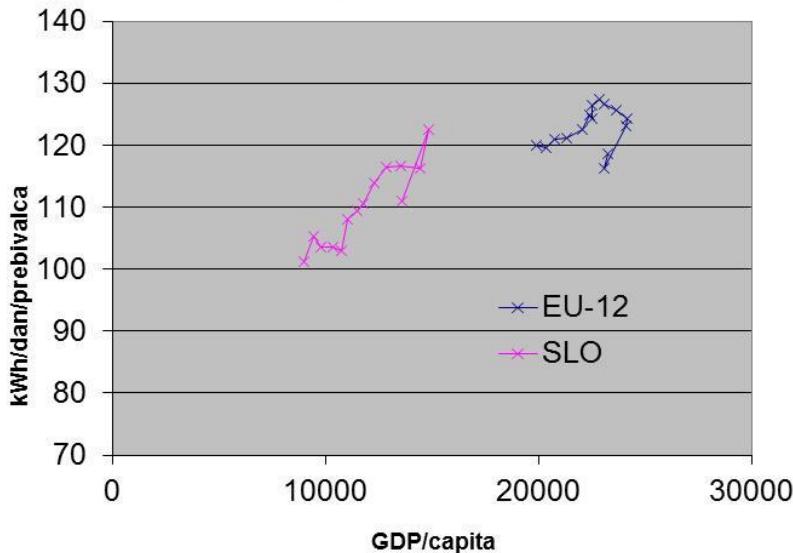


Slovenija in EU-12

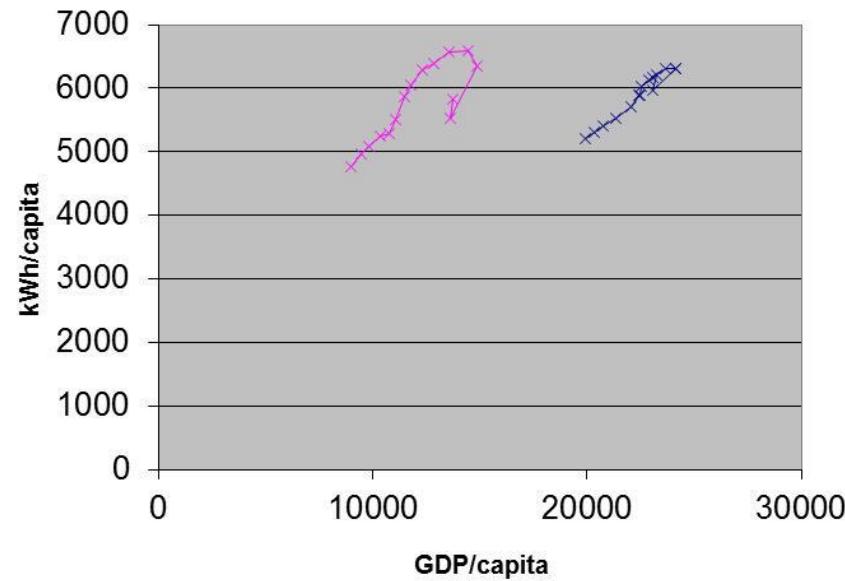
GDP/prebivalca (prices 2000)



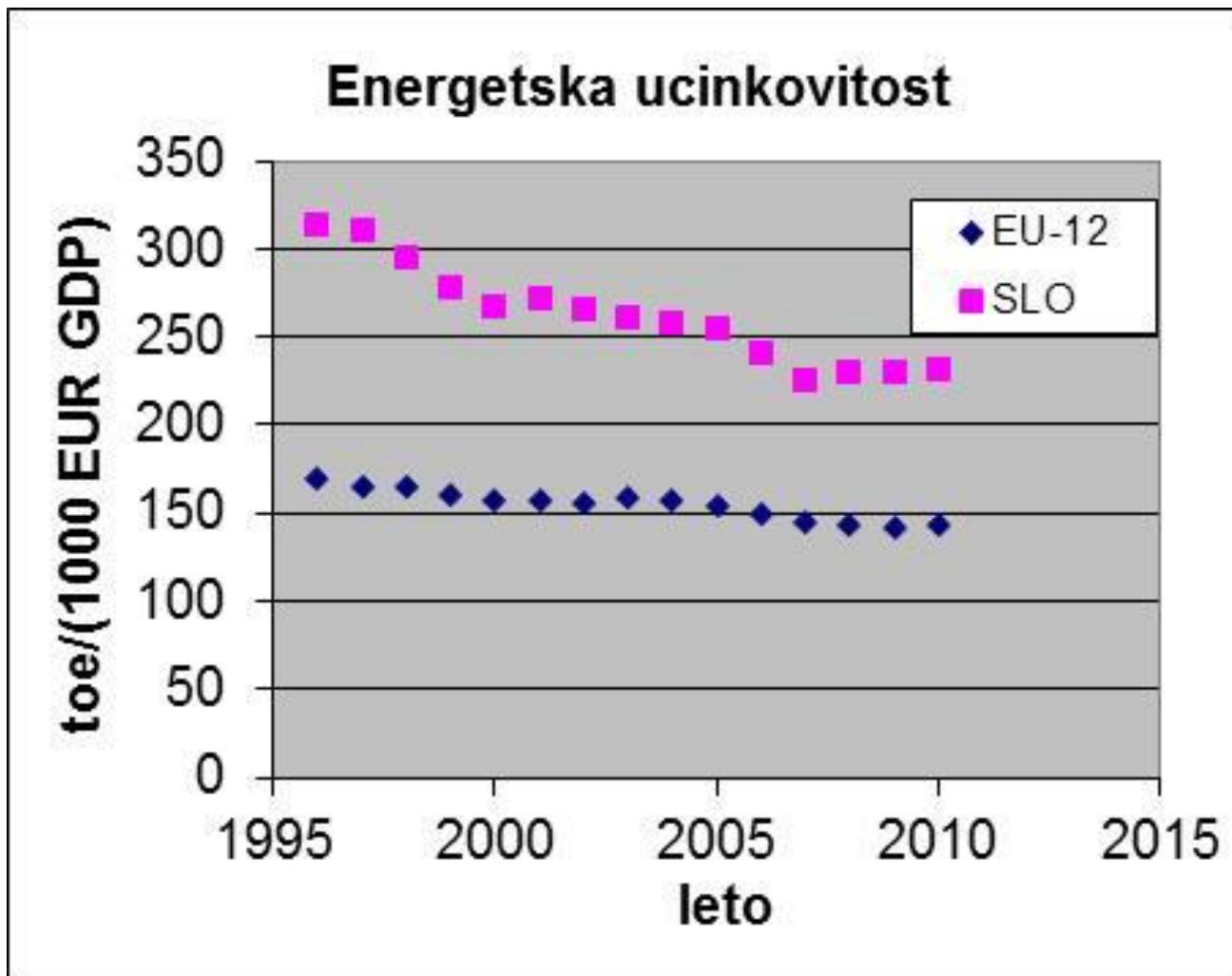
Poraba energije/prebivalca vs.
GDP/prebivalca



Poraba električne energije/prebivalca vs.
GDP/prebivalca



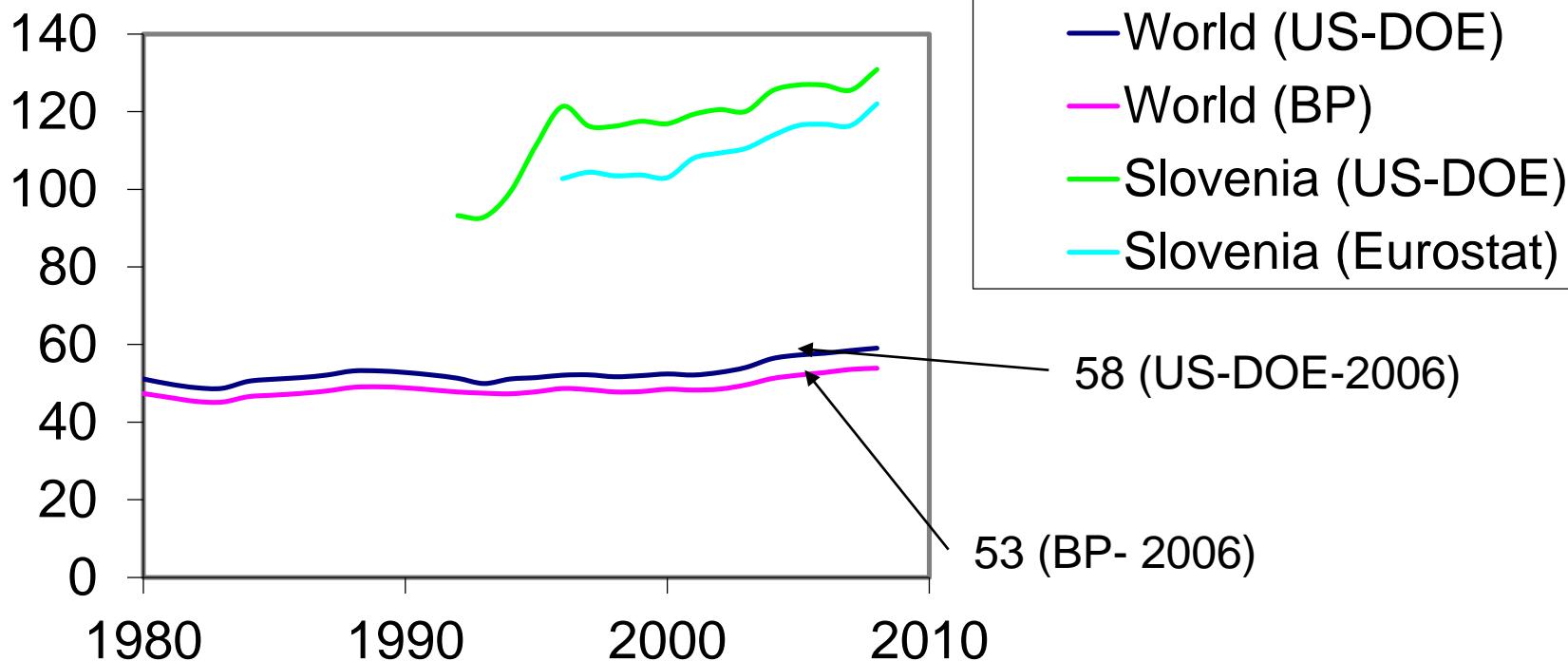
Slovenija in EU-12



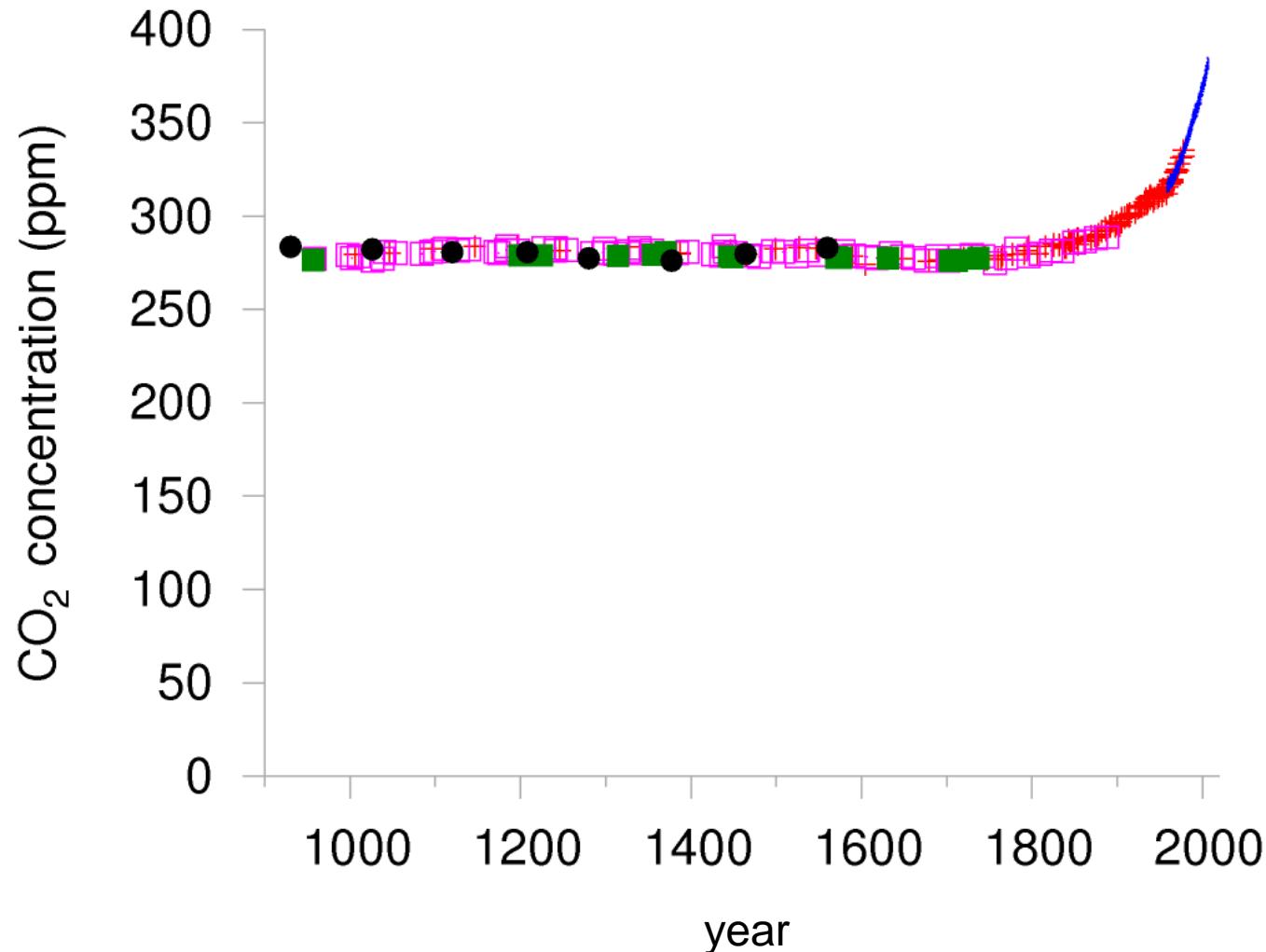
1 toe (tonne of oil equivalent)=11630 kWh - "standardna" enota za merjenje energetske intenzivnosti

Natančnost statistike...

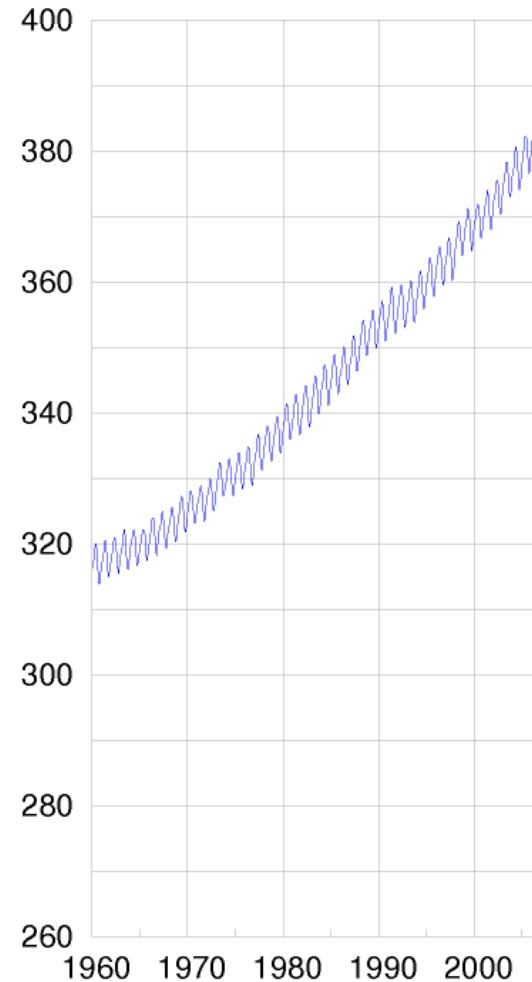
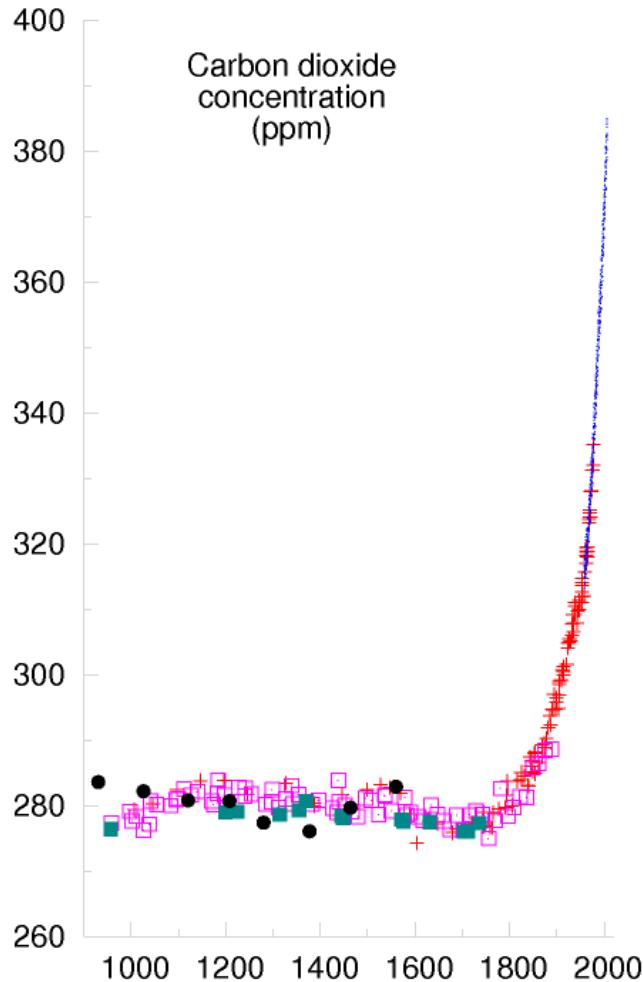
poraba energije v kWh/dan/prebivalca
v Sloveniji in svetu



CO_2 (Mackay)

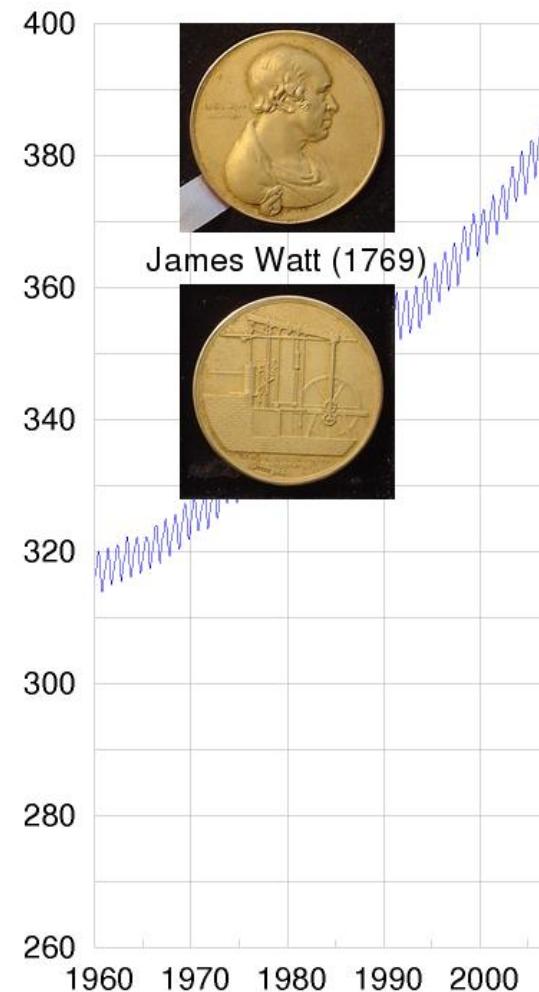
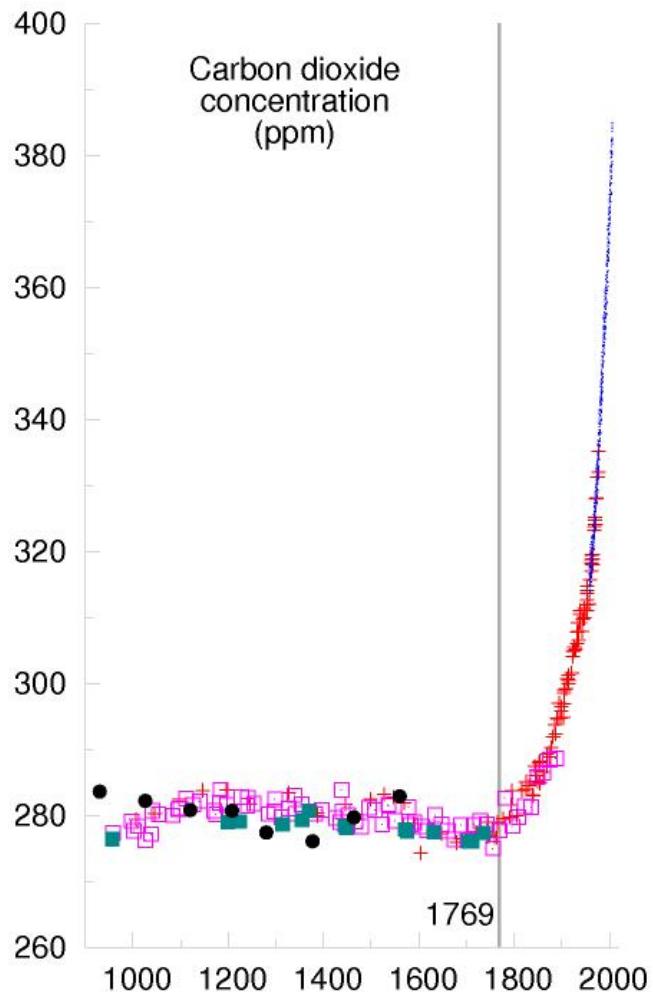


CO_2 (Mackay)



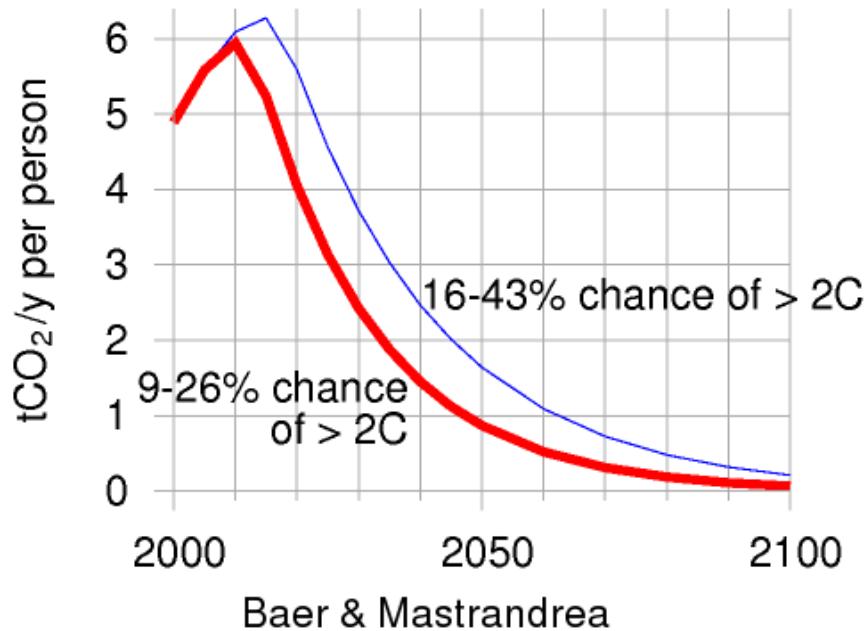
Sources: Keeling and Whorf (2005); Neftel et al (1994); Etheridge et al (1998); Siegenthaler et al (2005); Indermuhle et al (1999)

CO_2 (Mackay)



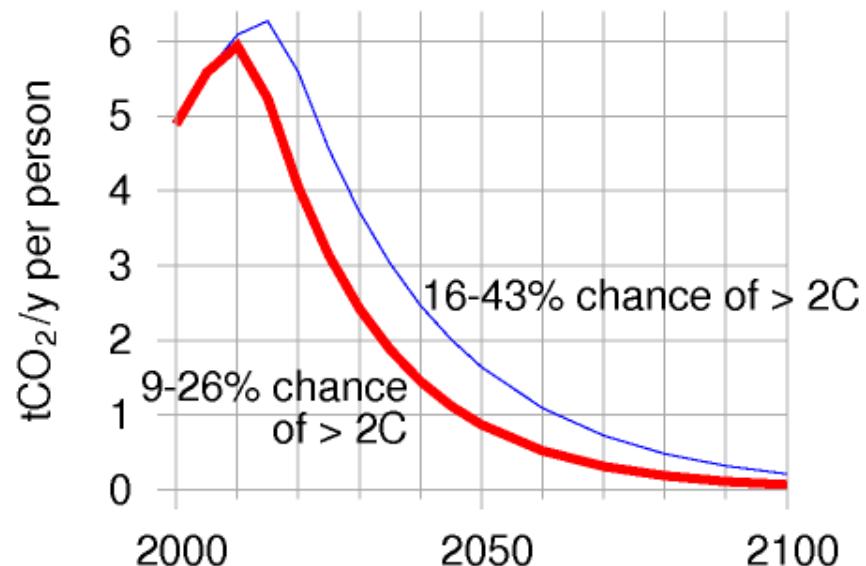
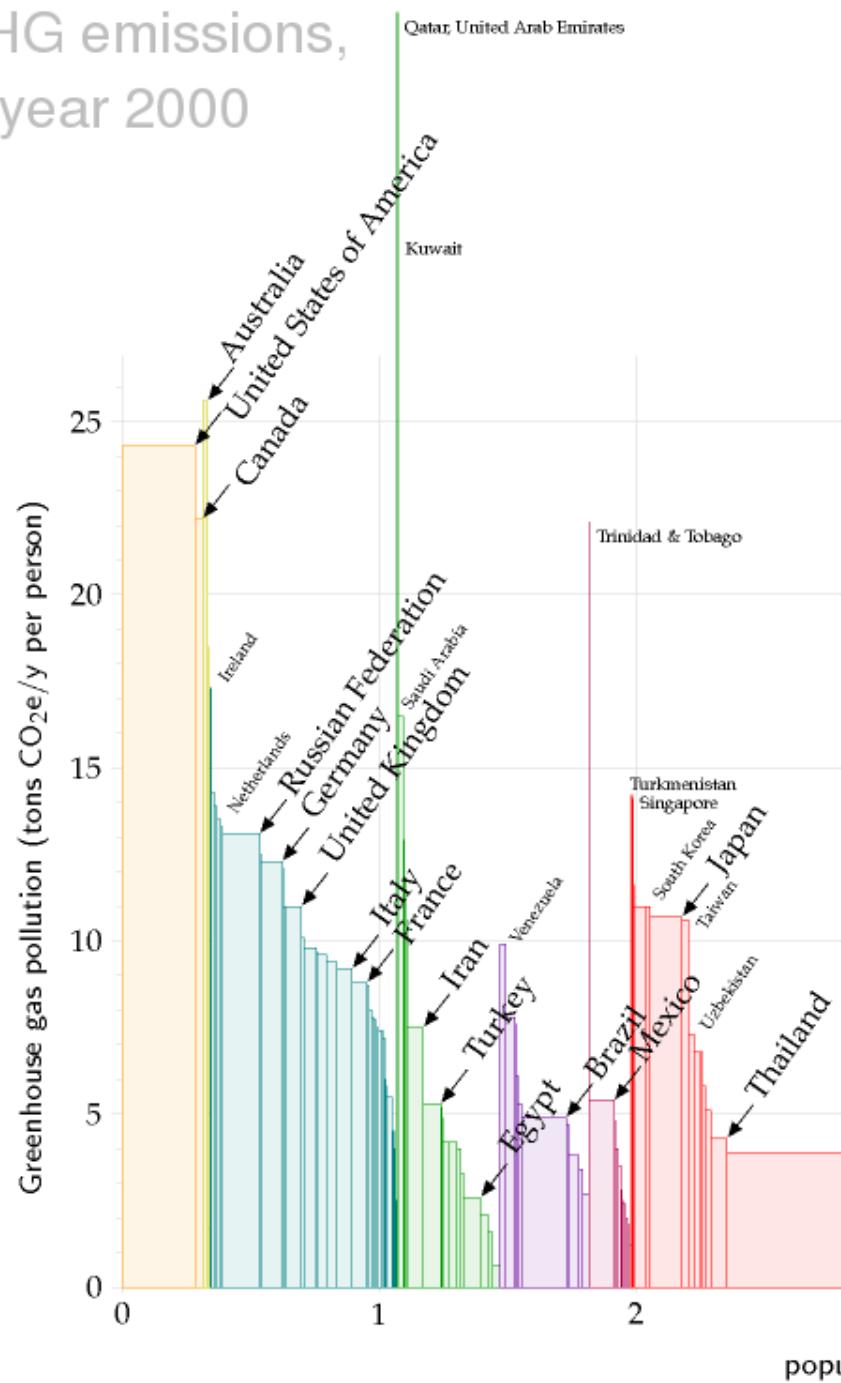
Sources: Keeling and Whorf (2005); Neftel et al (1994); Etheridge et al (1998); Siegenthaler et al (2005); Indermuhle et al (1999)

CO_2 (Mackay)



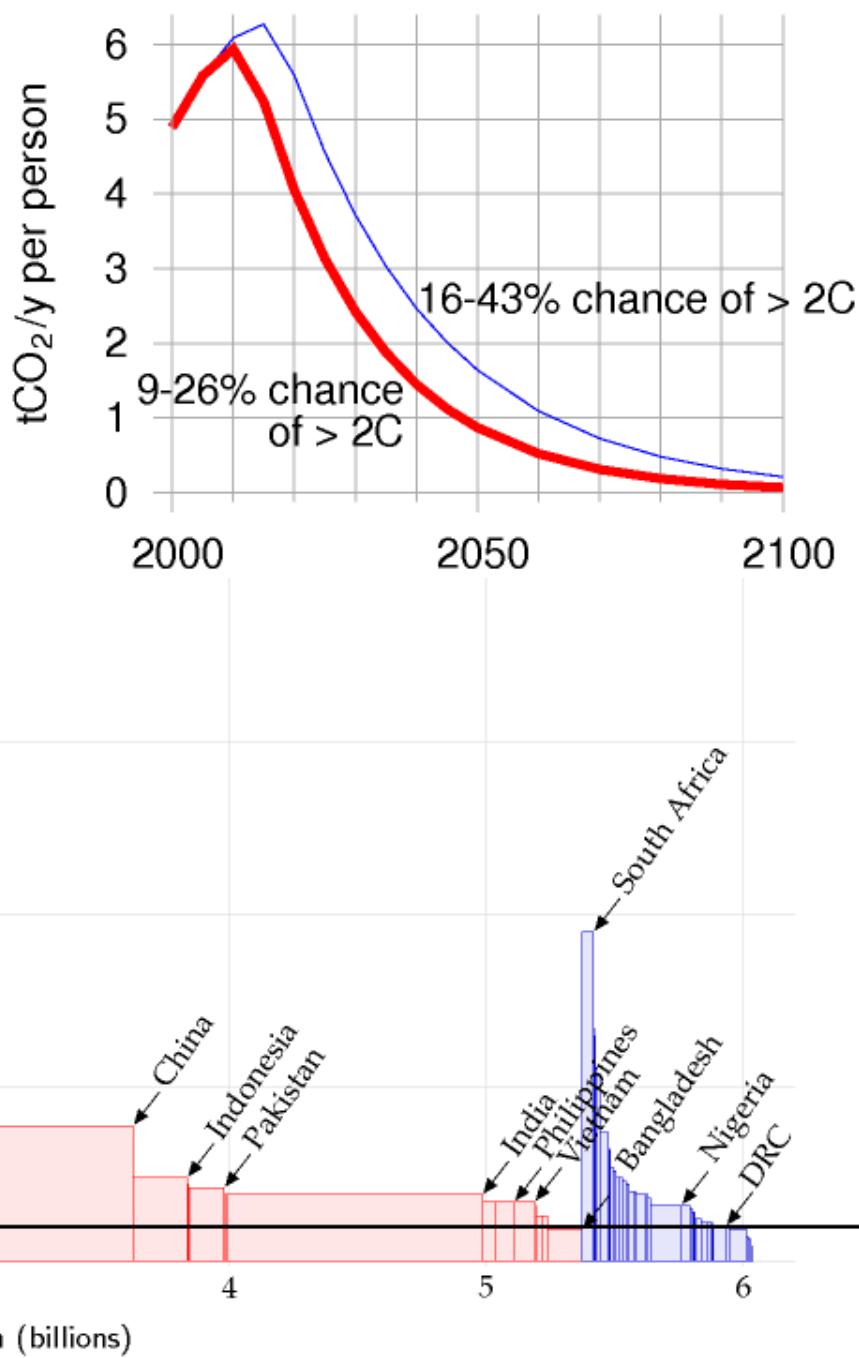
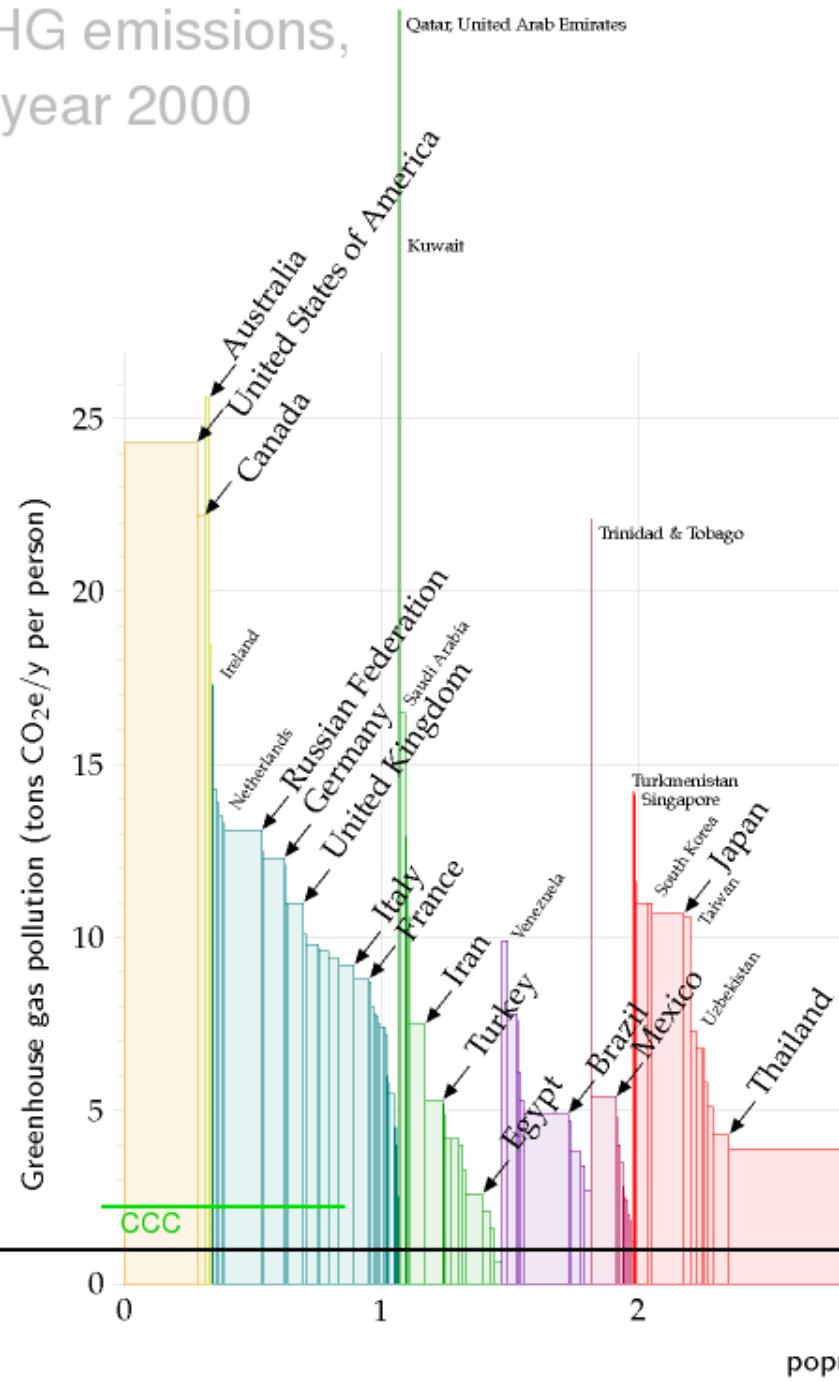
Climate scientists recommend reduction
from 5.5 t CO_2 per year per person (world average)
to $\sim 1 \text{t CO}_2$ per year per person by 2050

GHG emissions, year 2000



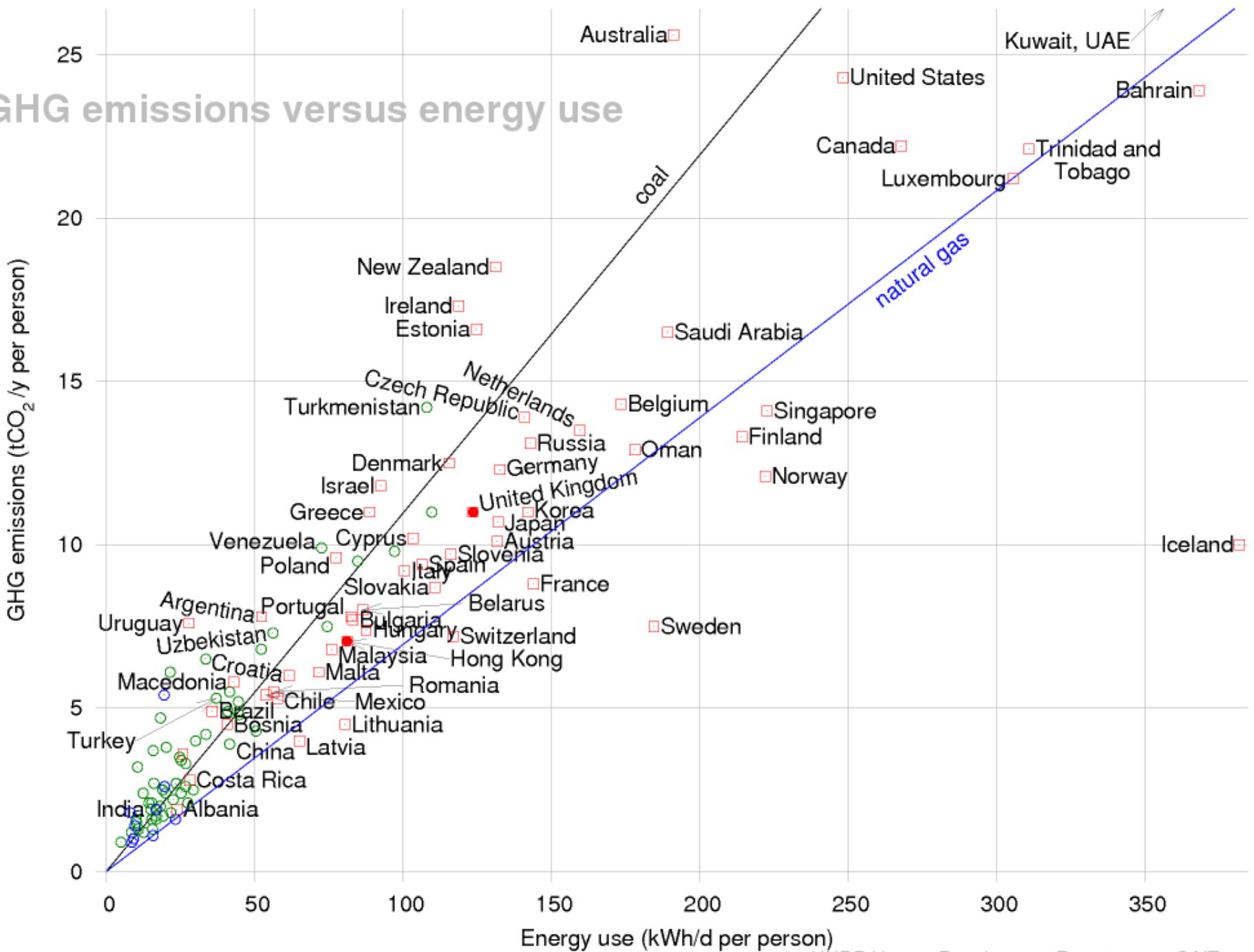
Slovenija - "pred" Italijo

GHG emissions, year 2000



Data source: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 4.0. (Washington, DC: World Resources Institute, 2007).

GHG emissions versus energy use

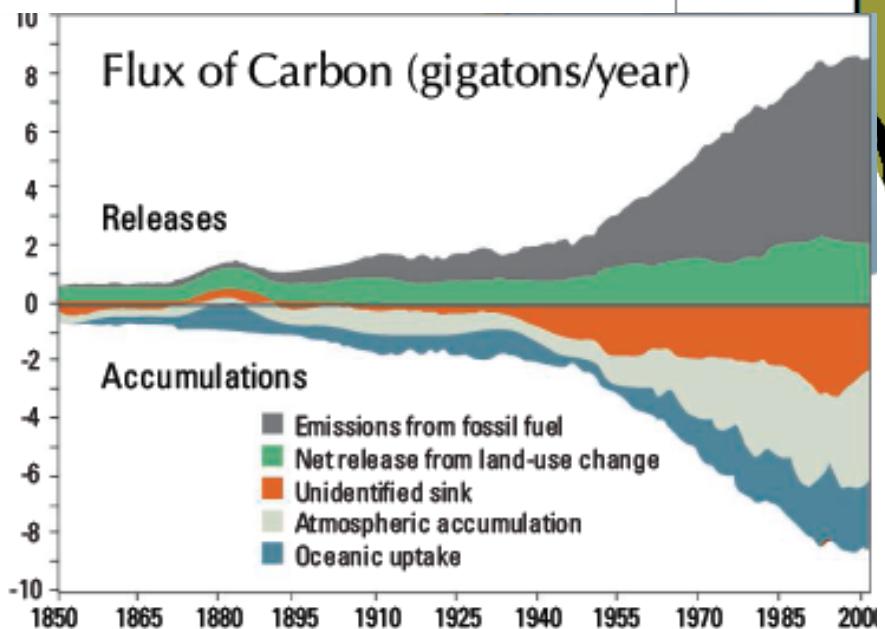
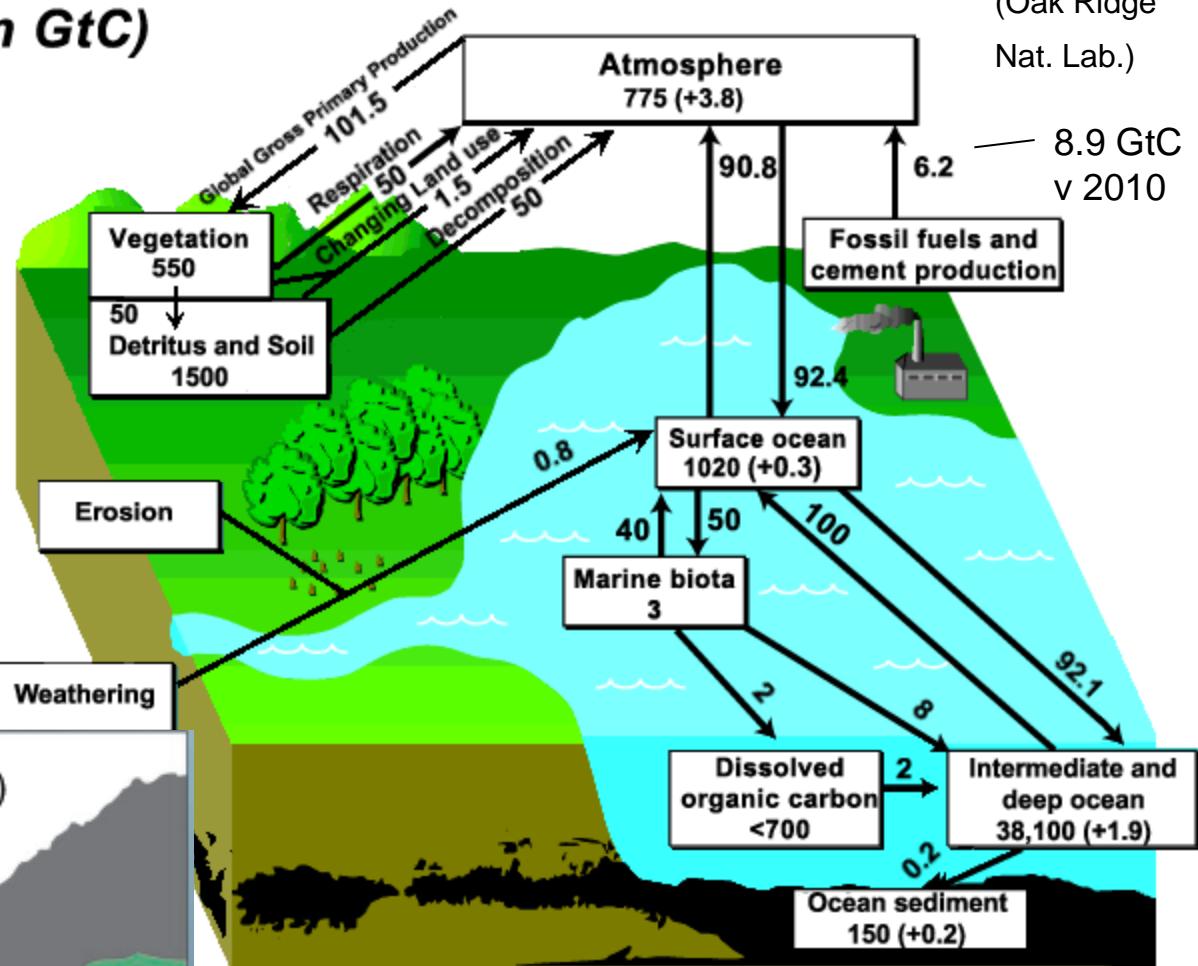


Global Carbon Cycle (1992-1997) (in GtC)

Kvadratki:
 rezervoarji, v
 oklepajih letna
 sprememba.

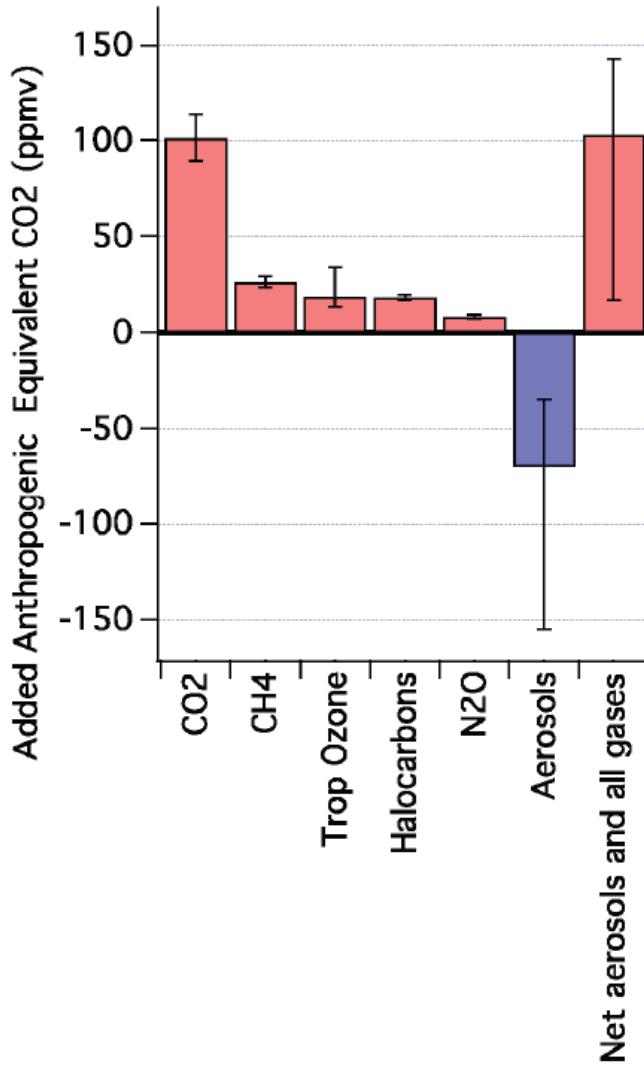
Tokovi (puščice) -
 GtC/leto

$$1 \text{ kg C} = 44/12 = 3.67 \text{ kg CO}_2$$



v atmosferi ostane
 polovica sproščenega
 ogljika.

Domnevni vpliv drugih toplogrednih plinov in aerosolov



Vir:

"Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations"
Committee on Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations;
National Research Council,
ISBN: 0-309-15177-5, (2010)

Koliko CO₂ sprostimo če sežgemo vsa fosilna goriva?

~1 milijarda ljudi je od 1880 do 2010 spuščala 10 ton CO₂/leto/osebo - skupaj =1300 Gton CO₂ (po "Climate Stabilization Targets", National Research Council of the National Academies je kumulativni izpust C-ja 0.5 Tton, kar bo povzročilo deltaT 1 °C. 500 Gton C = 1800 Gton CO₂.)
(po MacKay - Marland et.al. 2007 je kumulativni izpust do 2004: 1200 Gton)
Letni izpusti CO₂ danes 34 Gt CO₂e. (CO₂e upoštevani vsi toplogredni plini)

Skupni izpusti od začetka industr. rev. do danes: ~1500 Gton
To je dvignilo koncentracijo CO₂ iz 280 na 380 ppm

V atmosferi je danes ~3000 Gton CO₂
(Atmosfera 5000000 Gton, od tega CO₂ $0.00039 \cdot 5000000 \cdot 44/29 = 3000$ Gton)

Kapaciteta fosilnih goriv na osnovi znanih zalog:

Premog (0.3 kg CO ₂ /kWh): ~1000 Gton ->	~2000 Gton CO ₂
Nafta (0.25 kg CO ₂ /kWh): ~200 Gton (brez skrilavcev) ->	~600 Gton CO ₂
Plin (0.2 kg CO ₂ /kWh): ~ $2 \cdot 10^{15}$ kWh konvencionalnih zalog -> <u>~400 Gton CO₂</u>	
Skupni izpust	~3000 Gton

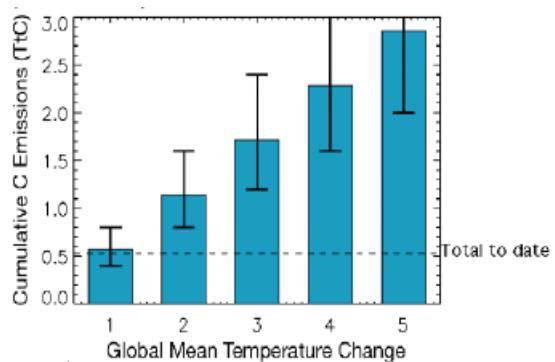
(Skupaj z naftnimi skrilavci in nekonvencionalnimi zalogami plina ~4000 Gton)

Koliko prispeva k klimatskim spremembam sproščena toplota in koliko CO₂?

Svetovna
proizvodnja
energije prispeva
 $\sim 0.03 \text{ W/m}^2$

CO₂ prek učinka
tople grede
prispeva $\sim 2 \text{ W/m}^2$

"Climate Stabilization Targets:
Emissions, Concentrations, and Impacts
over Decades to Millennia", National
Research Council of the National
Academies, 2010 - prepublication.



Premog

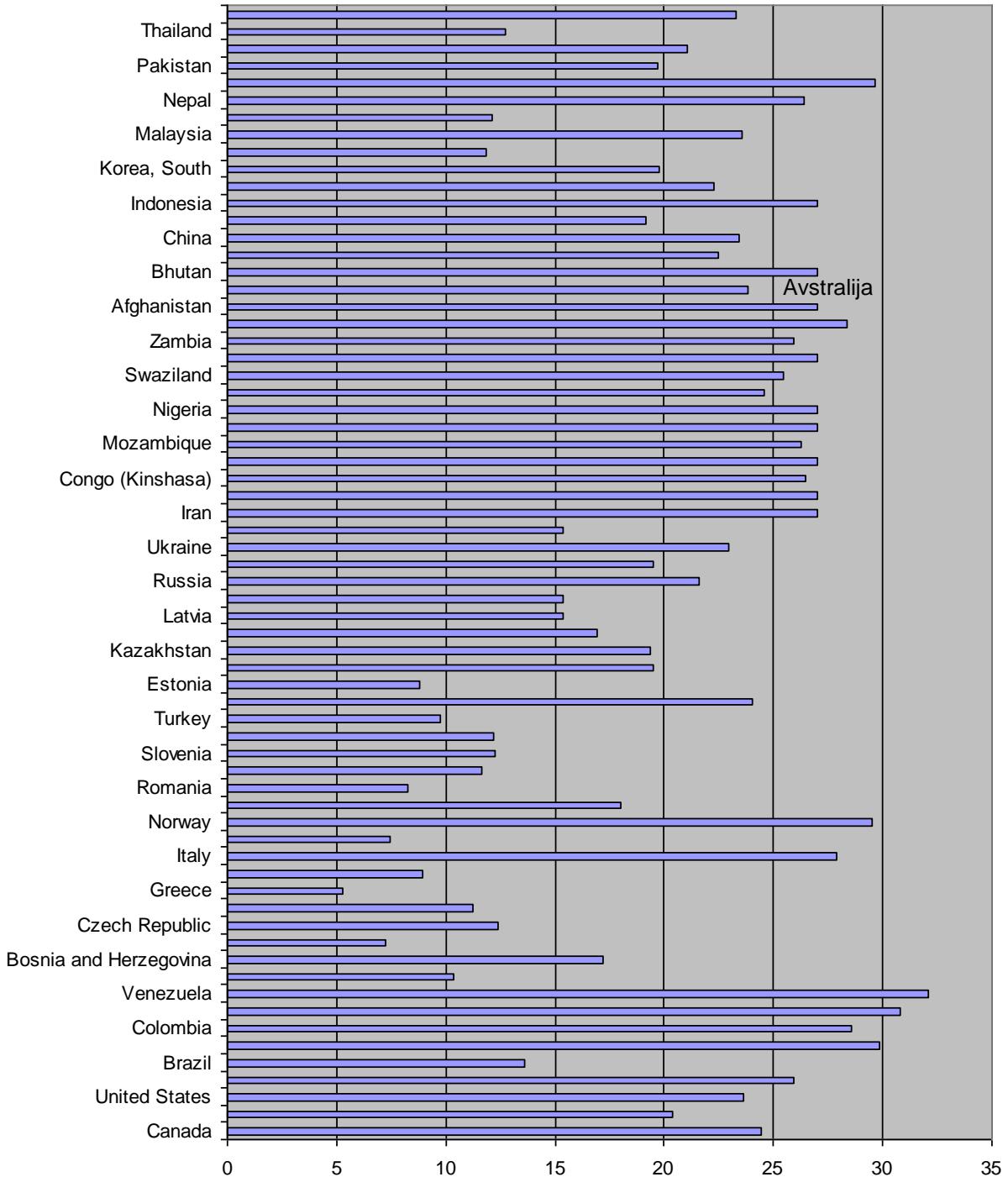
sežigna toplota
(MJ/kg)

<http://www.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEIndex3.cfm?tid=1&pid=1&aid=10>

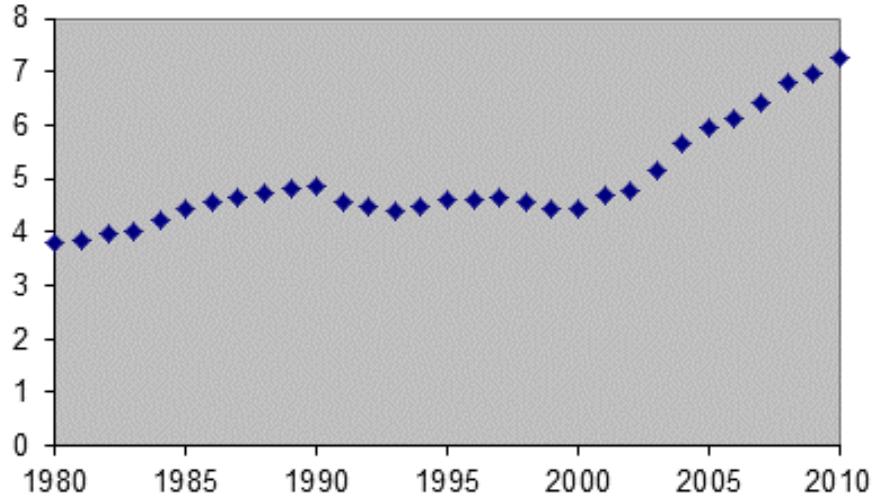
1 kg "standardnega"
premoga
(coal equivalent) =

29.3 MJ/kg =

8.14 kWh



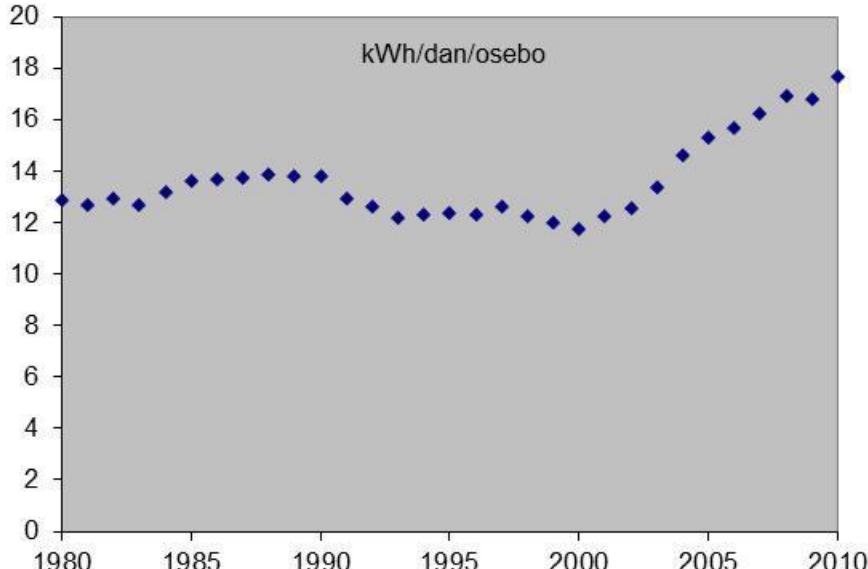
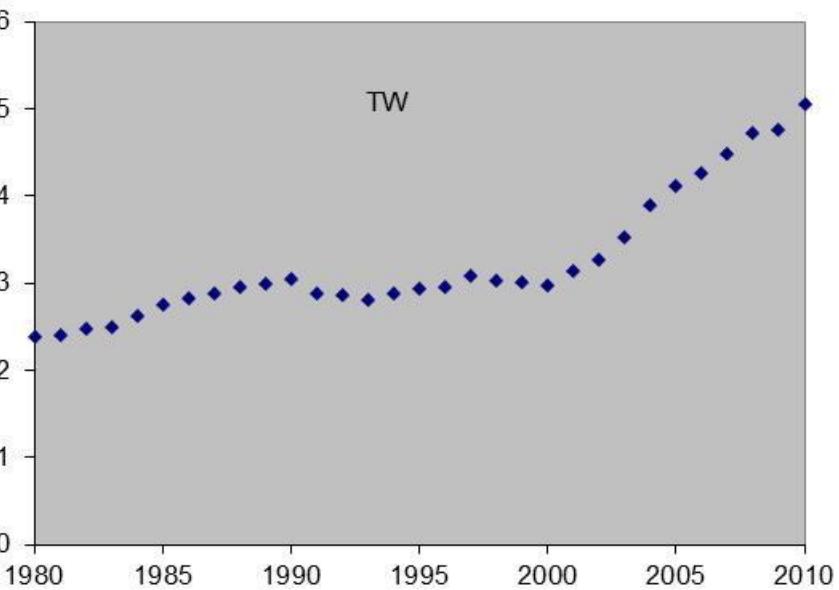
Total Primary Coal Production (Gton)



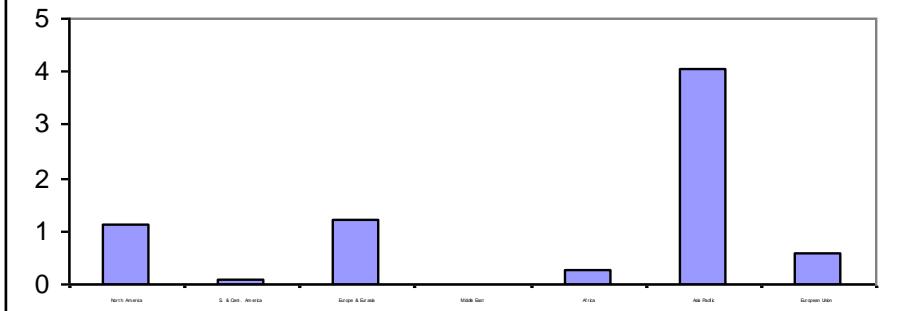
LETNA PORABA PREMOGA

DOE statistika računa z:
1 short ton=907 kg = 2000 1b

~6 Gton črni premog, ~1 Gtona lignit
povprečna sežigna toplota 24 MJ/kg



proizvodnja Gton

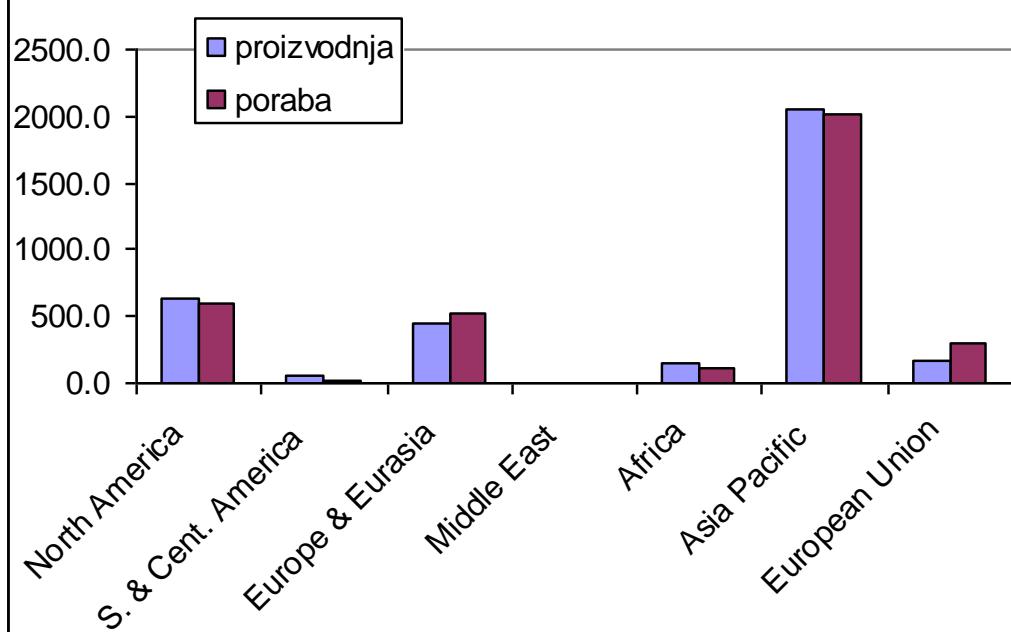


Premog

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/coal_section_2010.pdf

PODATKI ZA 2008

proizvodnja in poraba premoga po regijah
(kWh/dan/osebo)

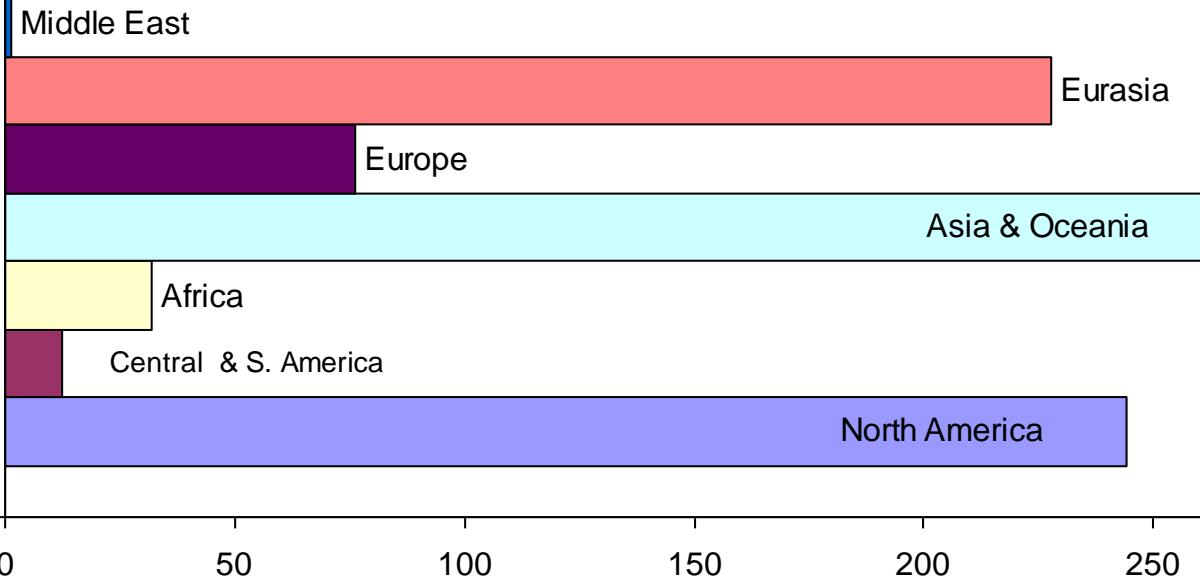


Evrazija = bivša
Sovjetska zveza

Komercialno dosegljive zaloge premoga 2008 (2005) (Gton)

Svet: 860 (840) Gton

<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=1&pid=7&aid=6&cid=ww,r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,&syid=2008&eyid=2008&unit=MST>



Drugi viri - rezerve:

MacKay: 1600 Gton

BP-2009: 850 Gton

Rutledge: ~400 Gton

IPCC: 5000 Gton

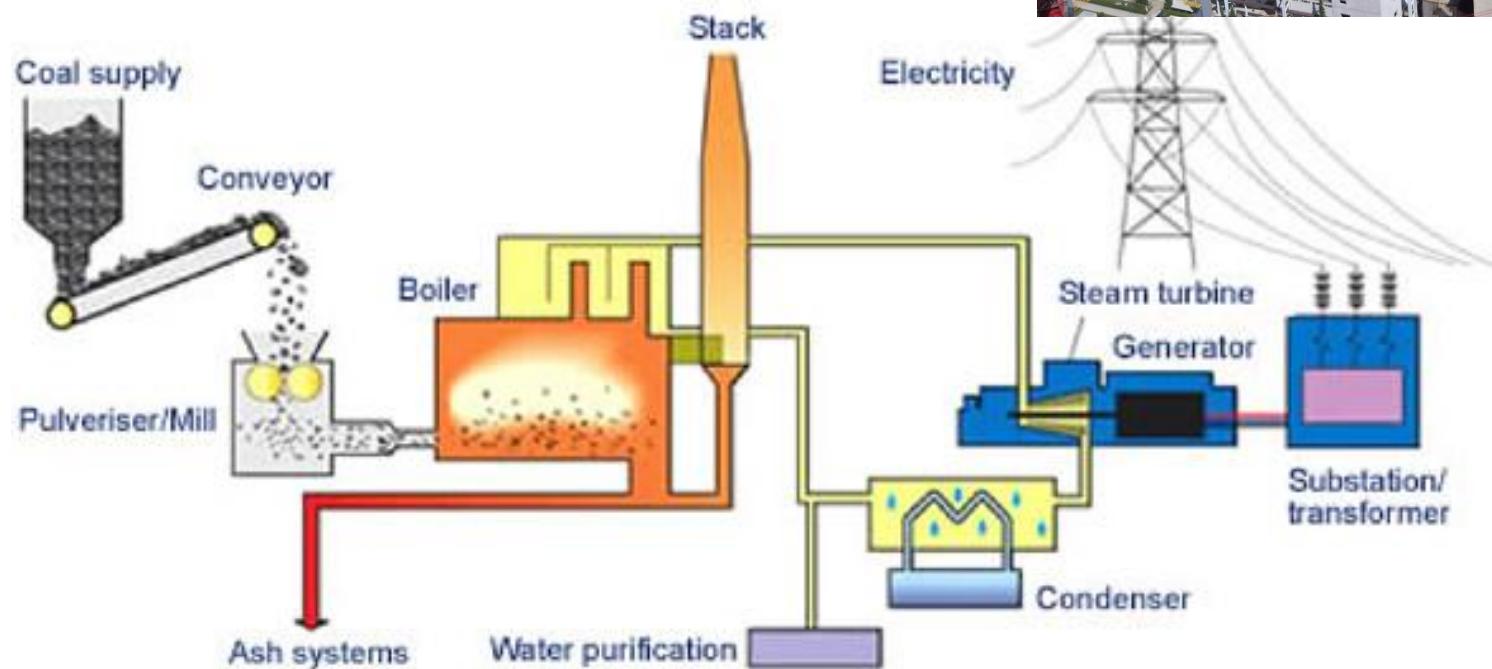
Pol rezerv črni premog, pol lignit

Pri **današnji** letni porabi ~7 Gton/leto je na planetu še za ~100 do 200 let premoga.
(Poraba premoga narašča!)

rezerve na prebivalca planeta danes:
približno 1 milijon kWh/človeka

Termoelektrarne na premog

Pulverized coal combustion



vir: World Coal Institute

<http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/coal-electricity/>

Napoved porabe premoga in izpustov CO₂

MIT poročilo, The Future of Coal, 2007

Premog bo ostal pomemben vir energije!

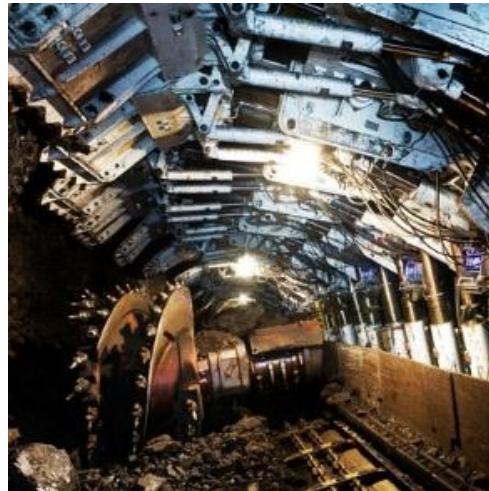


Table 1 Exajoules of Coal Use (EJ) and Global CO₂ Emissions (Gt/yr) in 2000 and 2050 with and without Carbon Capture and Storage*

	BUSINESS AS USUAL		LIMITED NUCLEAR 2050		EXPANDED NUCLEAR 2050	
	2000	2050	WITH CCS	WITHOUT CCS	WITH CCS	WITHOUT CCS
Coal Use: Global	100	448	161	116	121	78
U.S.	24	58	40	28	25	13
China	27	88	39	24	31	17
Global CO ₂ Emissions	24	62	28	32	26	29
CO ₂ Emissions from Coal	9	32	5	9	3	6

* Universal, simultaneous participation, High CO₂ prices and EPPA-Ref gas prices.

CCS - Carbon Capture and Storage

Nove tehnologije izrabe premoga:

IGCC Integrated Gasification Combined Cycle

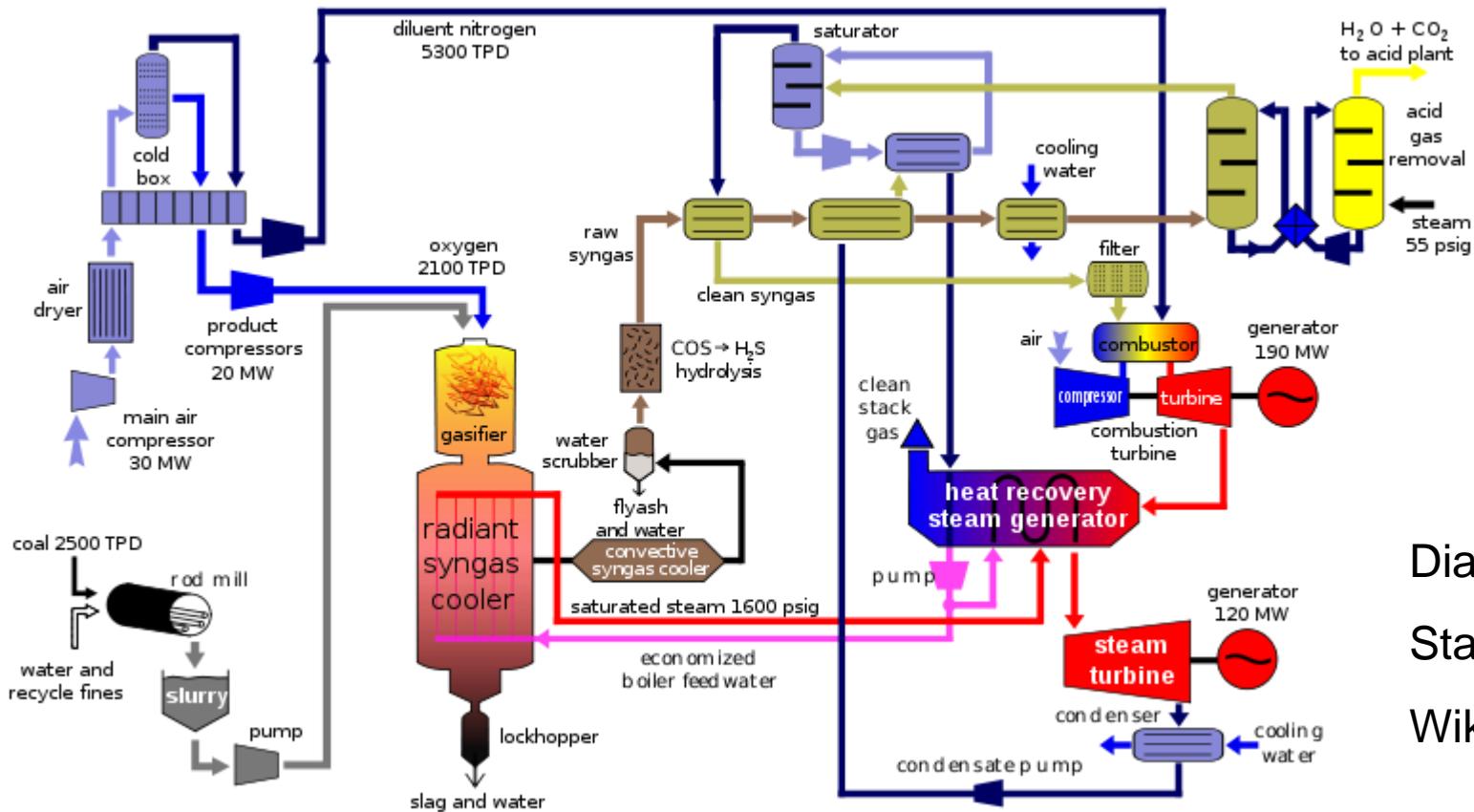


Diagram:
Stan Zurek,
Wikipedia

Sistem uporablja večina novih plinskih elektrarn. V elektrarnah na premog še ne.

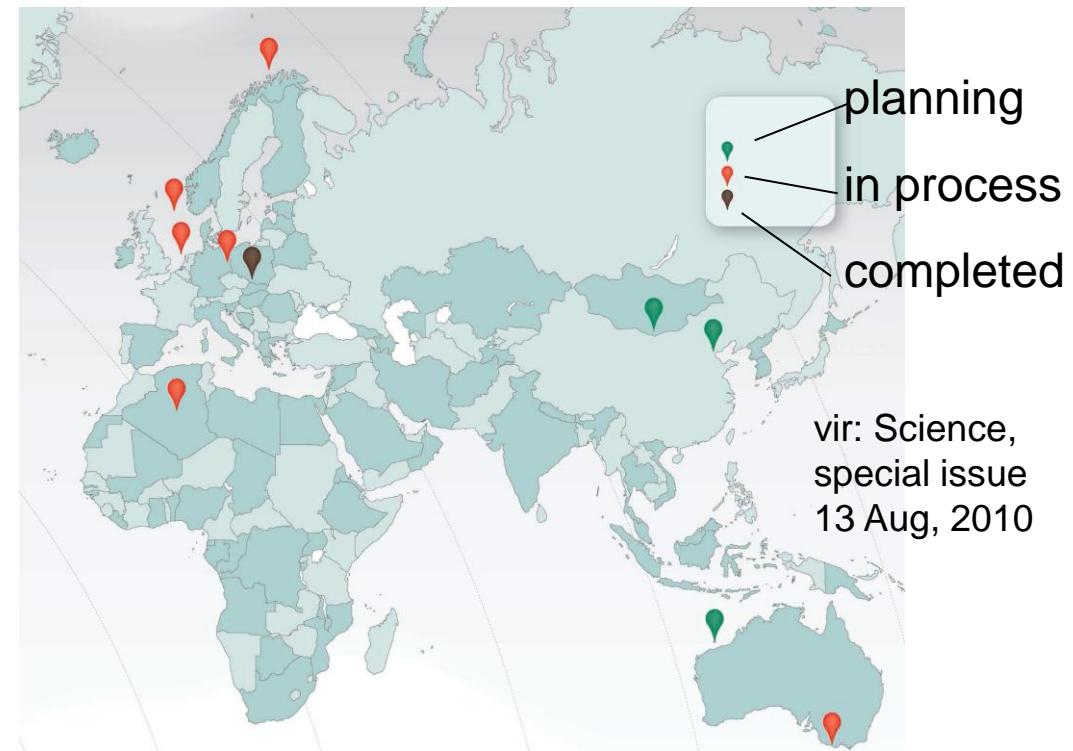
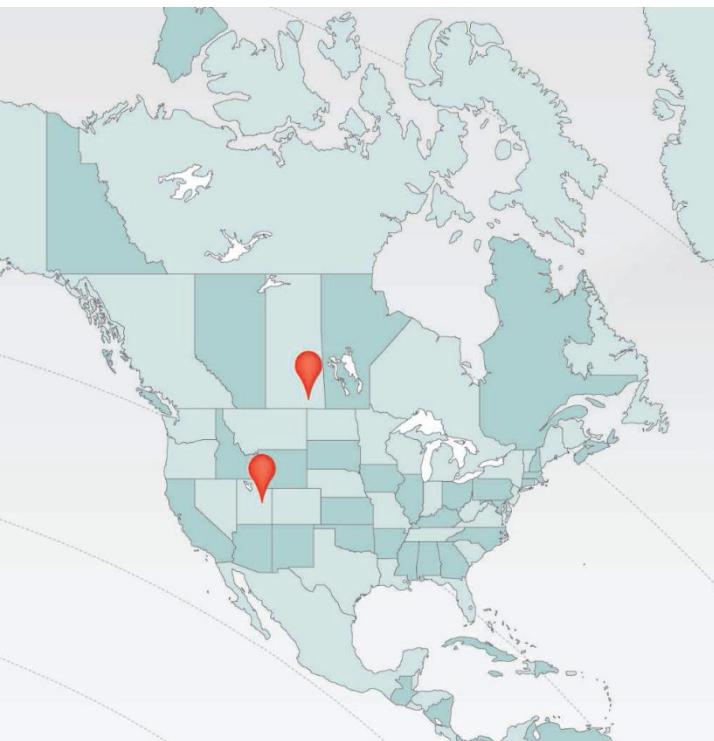
Izkoristek premogovnih elektrarn 40-55% ?

Christou et al. Third International Conference on Clean Coal Technologies for our Future, 15-17 May 2007, Sardinia, Italy

"Nove" tehnologije:

- CCS - Carbon Capturing and Storage

CCS bo porabil ~ četrtino proizvedene električne energije termoelektrarne
(MacKay)

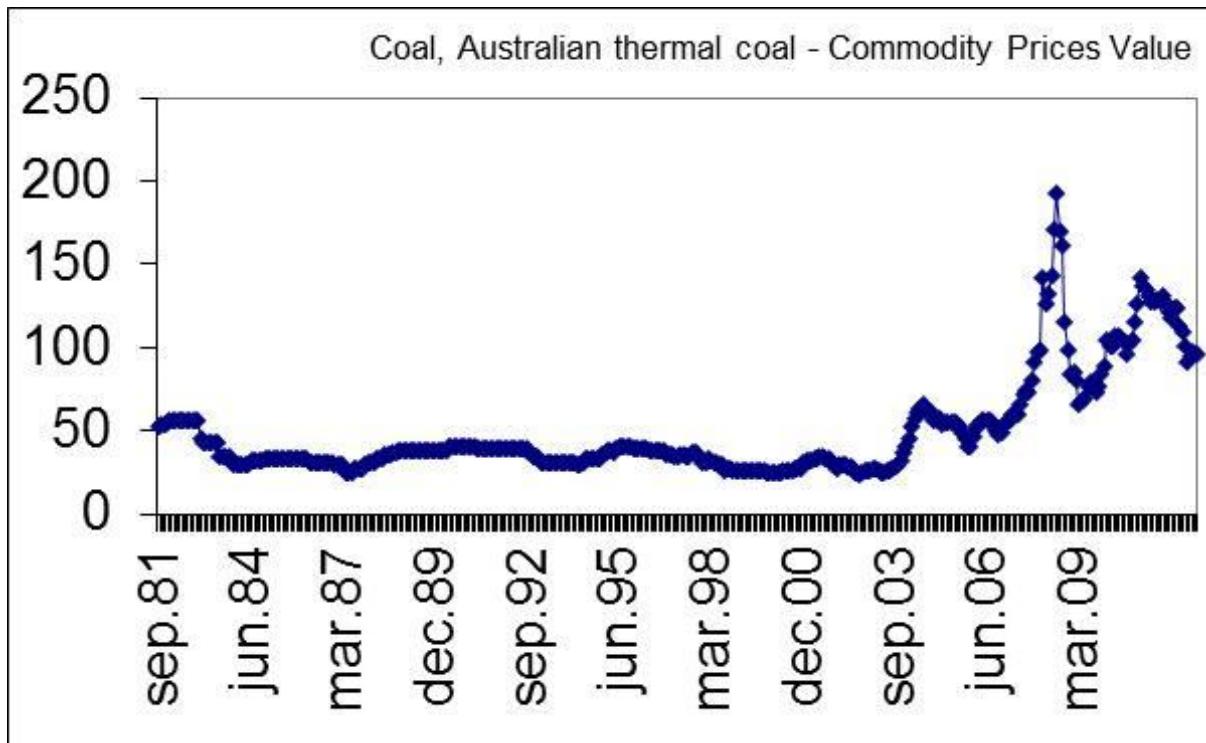


- premog -> tekoča goriva
- uplinjanje premoga pod zemljo

skupaj ~15 Mton/leto CCS
(emisije: ~10 Gton/leto)

- Okoli četrtina premoga gre za proizvodnjo jekla in cementa (~2 Gt od 7 Gt) vir: <http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/coal-cement/>
- manj kot 1 Gt premoga se prodaja na svetovnem trgu, večino se porabi v državi proizvodnje <http://www.worldcoal.org>
- transport predstavlja velik del cene

<http://www.indexmundi.com/>



Cena Avstralskega premoga v \$/tono.
(Avstralija - največji izvoznik - proda 0.25 Gton premoga)
sežigna toplota: 29 MJ/kg

~0.01 EUR (\$) za kWh

Premog v Sloveniji - 24 kWh/dan.o (6.4 elektrika, 2.5 toplota, 14 odpadna topl., 1.3 industr.)

Velenje - lignit 10-11 MJ/kg, 4 Mton/let = ~16 kWh/dan.osebo

TE Šoštanj (3. bloki, skupaj ~700 MW) iz velenjskega lignita proizvede ~1/3 SLO električne energije (~5 kWh/dan.osebo) in nekaj koristne toplotne energije (~1 kWh/dan.os) (premogu letno dodajo ~0.9 kWh/d.o plina)

TE Trbovlje ~0.9 kWh/dan.o - se ustavlja (zapiranje premogovnika)

TE-Toplarna Ljubljana ~9kWh/(dan-preb.Ljubljane)

gorivo - Indonezijski premog (17-19 MJ/kg) in lesna biomasa

Zaloge:	Količina [MWh/osebo]	
Velenje	181	~40 let
Šoštanj	87	
Trbovlje - Hrastnik	36	
Goričko	2017	



Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2008)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan

**trda
goriva 24**

tekoča goriva 45

zemeljski
plin 15

jedrska
26

obnovljivi
8
hidro 5

elekt- rika 6.4	toplota 2.5	~14 odpadna toplota	industrija 1.3
-----------------------	-------------	---------------------	----------------

VEČ na spletni strani
predmeta - seminar 2010:
M. Vitek: "Premog"

TEŠ, kot glavni proizvajalec (7.2 kWh/o/d), porabi za svoje potrebe 12 %
proizvedene električne energije, <http://www.te-sostanj.si/filelib/bilten/bilte08.pdf> str. 17

Nafta

sežigna toplota
(MJ/kg)

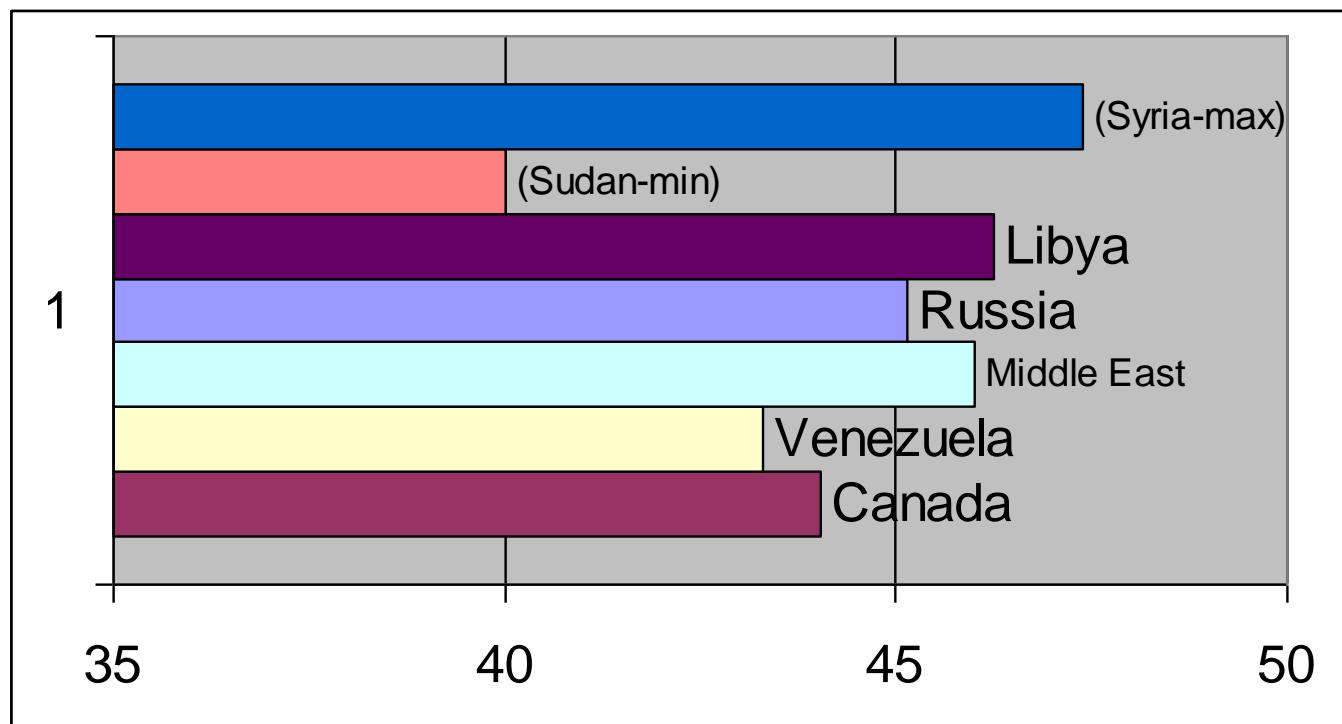
<http://www.eia.doe.gov>

1 kg nafte =

1/1000 toe =

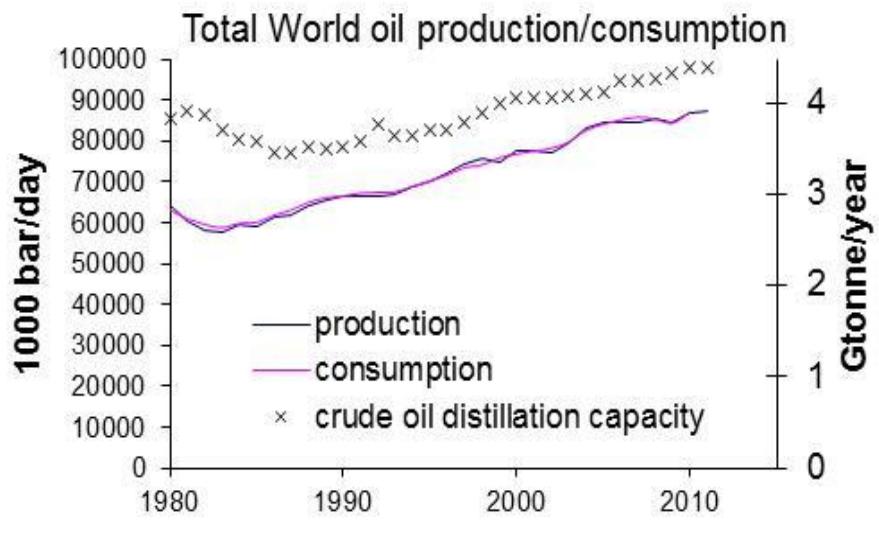
41.9 MJ/kg =

11.63 kWh



gostota 0.75 do 1 kg/l

PORABA NAFTE



proizvodnja se meri v sodčkih

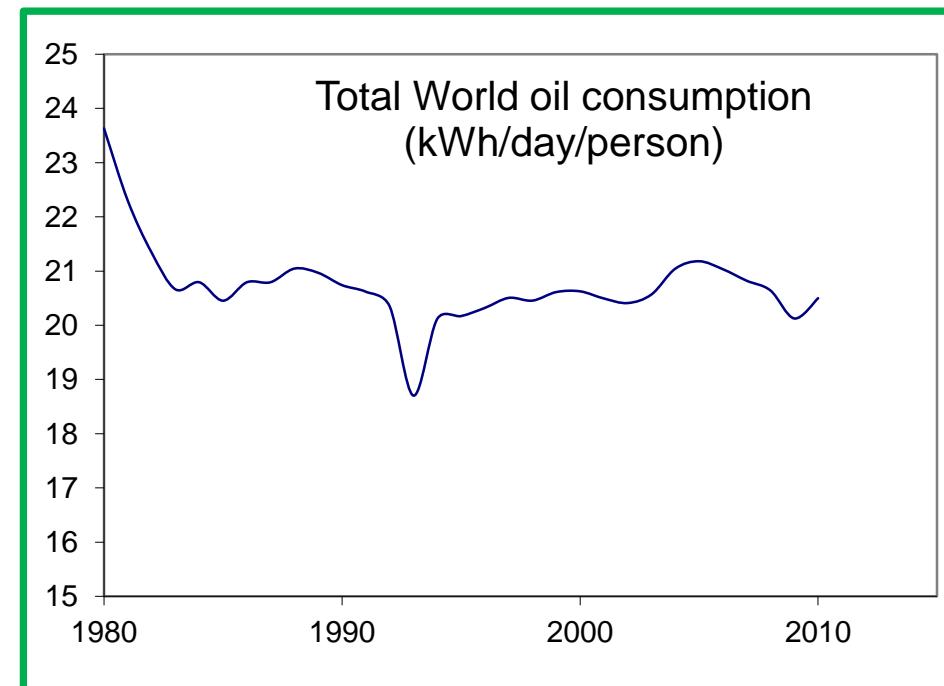
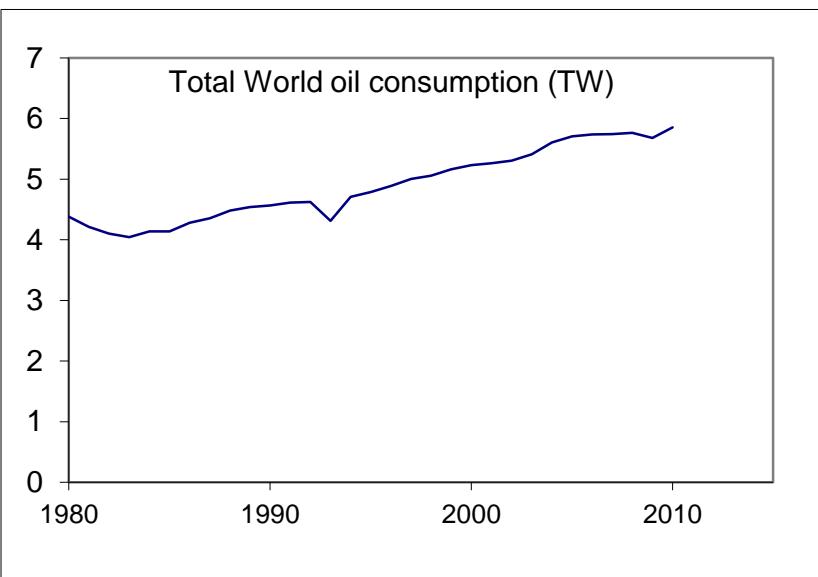
1 sodček surove nafte =

159 litrov ...

136.4 kg ...

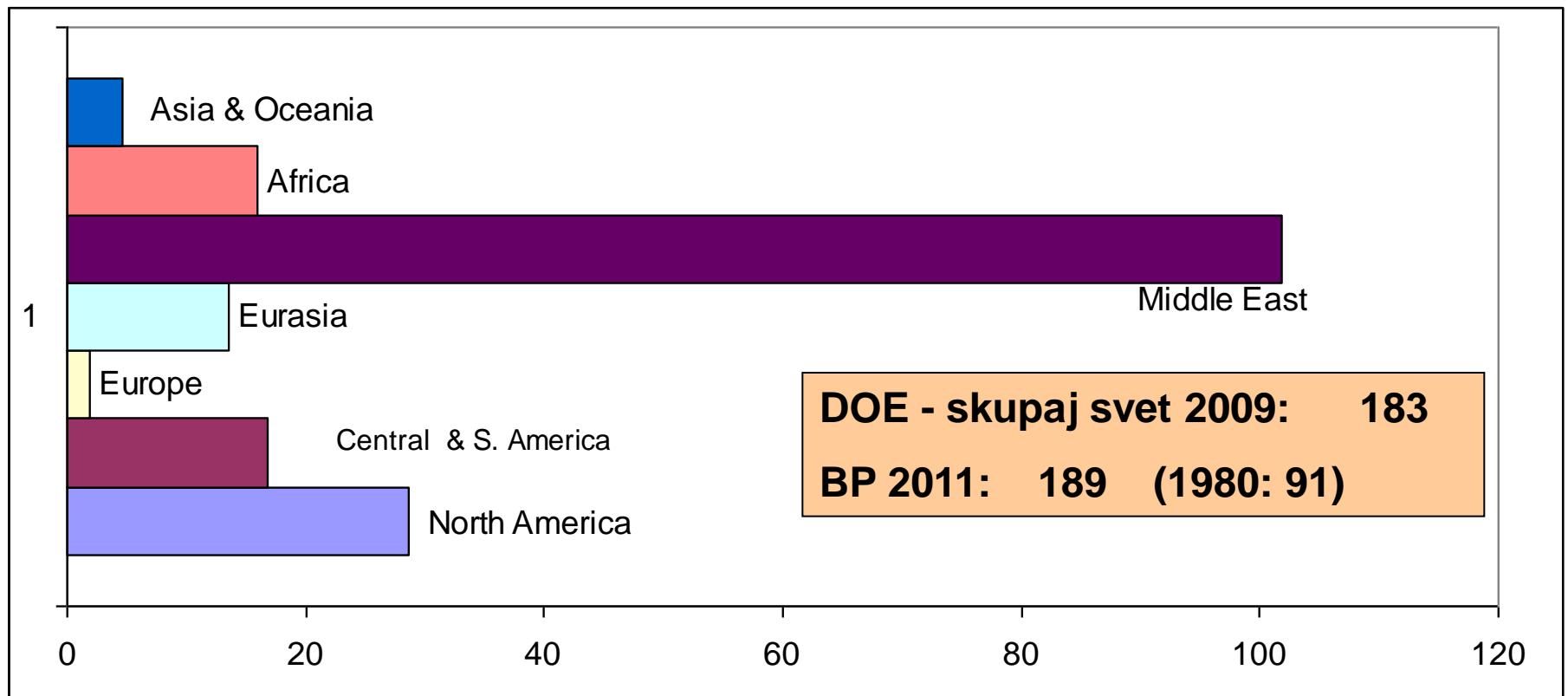
5.75 GJ ... 1600 kWh

400 kg CO₂



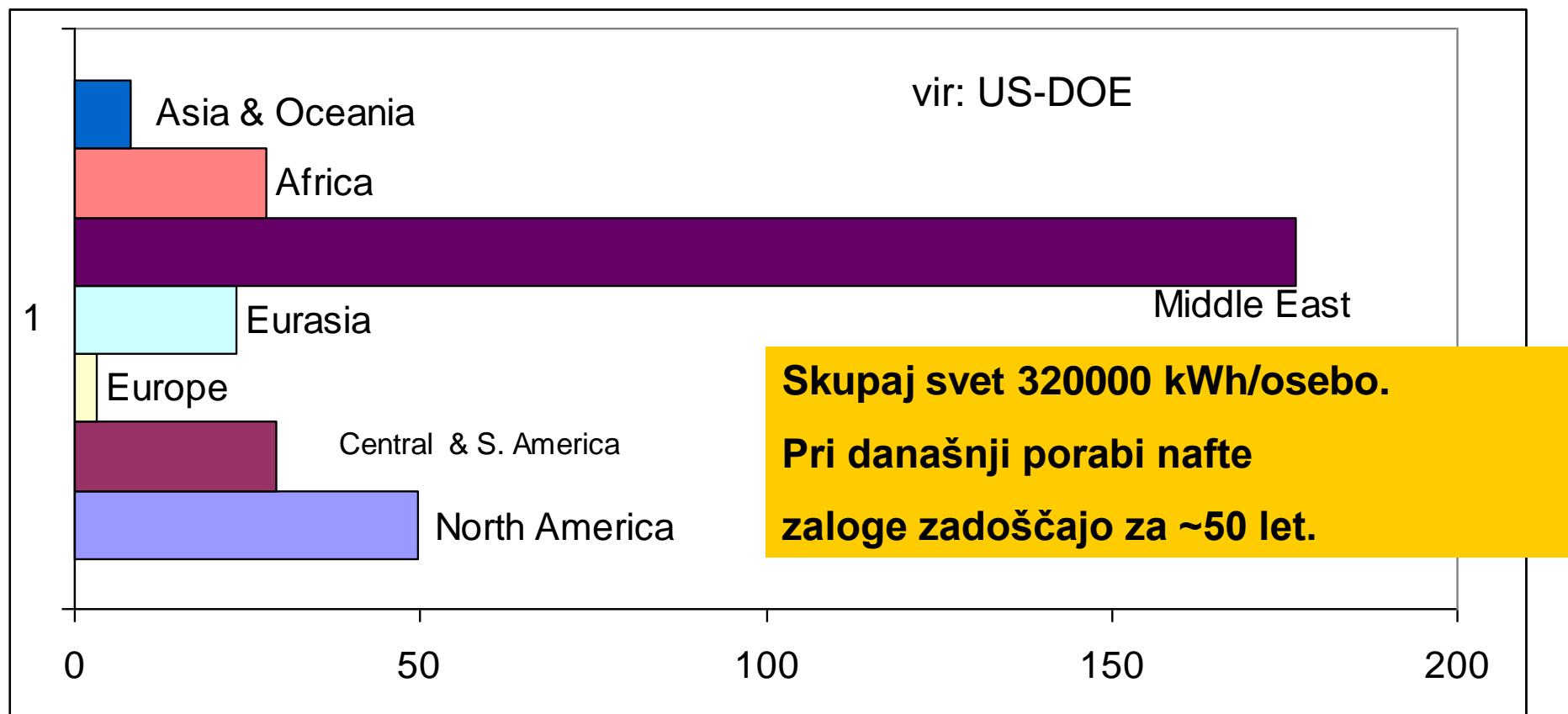
Zaloge nafte, februar 2009 (Gton nafte)

<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/oilreserves.html>



1 toe = 11630 kWh ... 2.9 ton CO₂

Zaloge nafte, februar 2009 (1000 kWh/osebo) (6.7 milijard ljudi)



Glavnina zalog:

Libija 10, Nigerija 9, Rusija 14, Venezuela 24

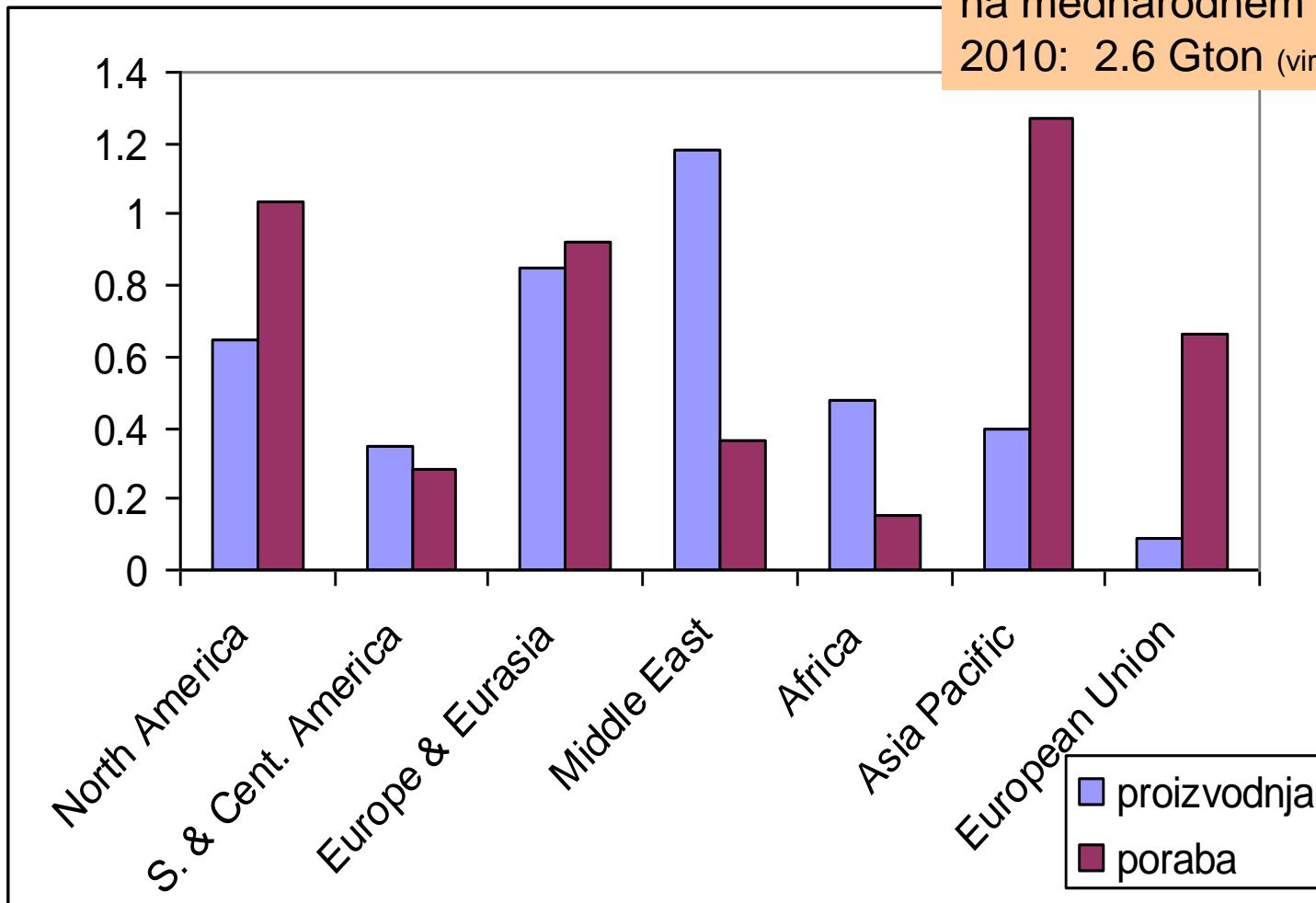
Saudska arabija 63, Iran 32, Irak 27, Kuvajt 25, UAE 23

Kanada 42 (naftni skrilavci - v "uradni rezervi" od 2003)

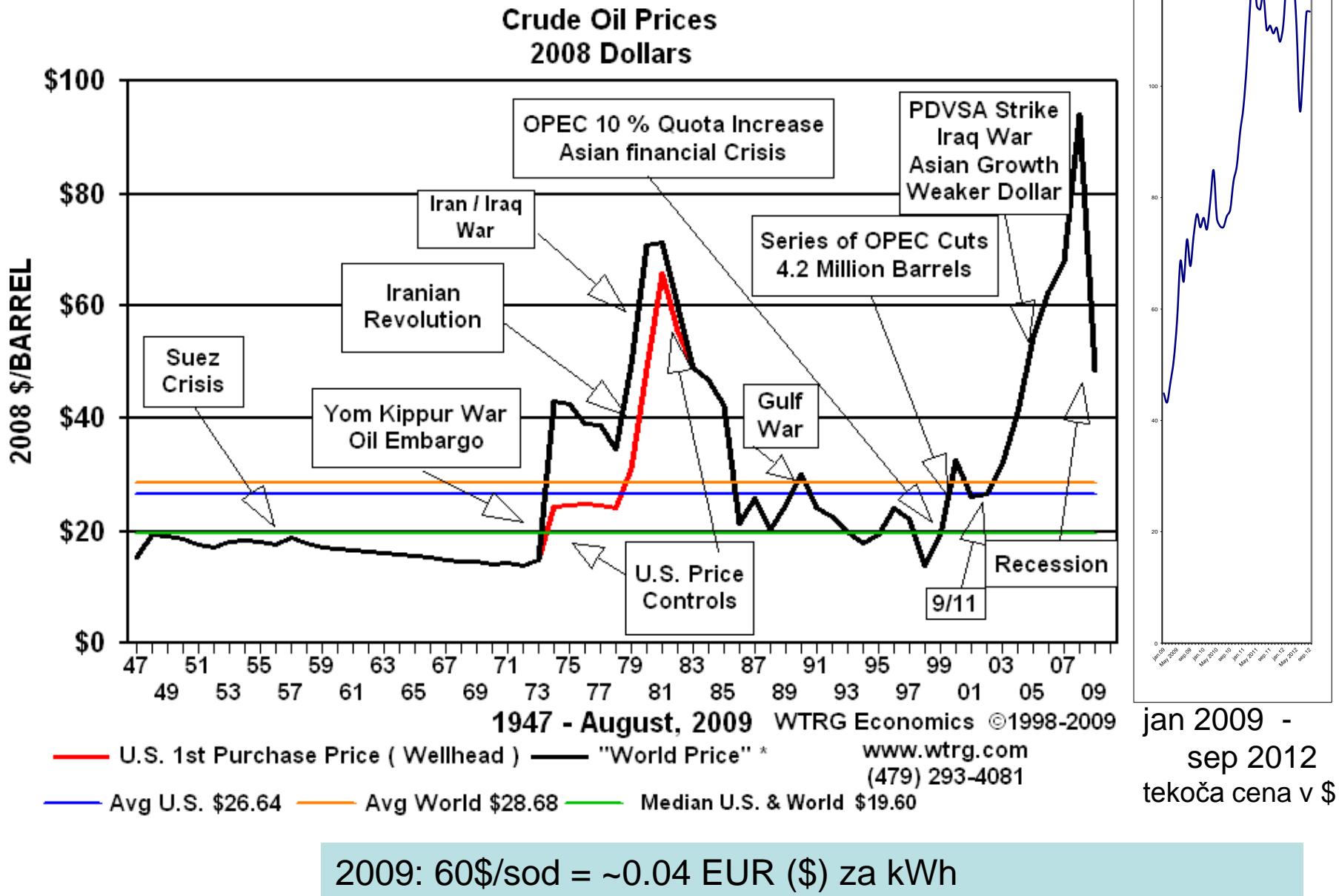
Samo v Kanadi (Alberta) so ocenjene zaloge v obliki naftnih skrilavcev približno enake svetovnim zalogam nafte (National Geographic, Marec 2009)

Proizvodnja in poraba po regijah v 2010 (Gton)

od skupno 4 Gton nafte jo je na mednarodnem trgu v letu 2010: 2.6 Gton (vir: BP)



cena za sodček



Products Made from a Barrel of Crude Oil (Gallons) (2010)

Other Distillates

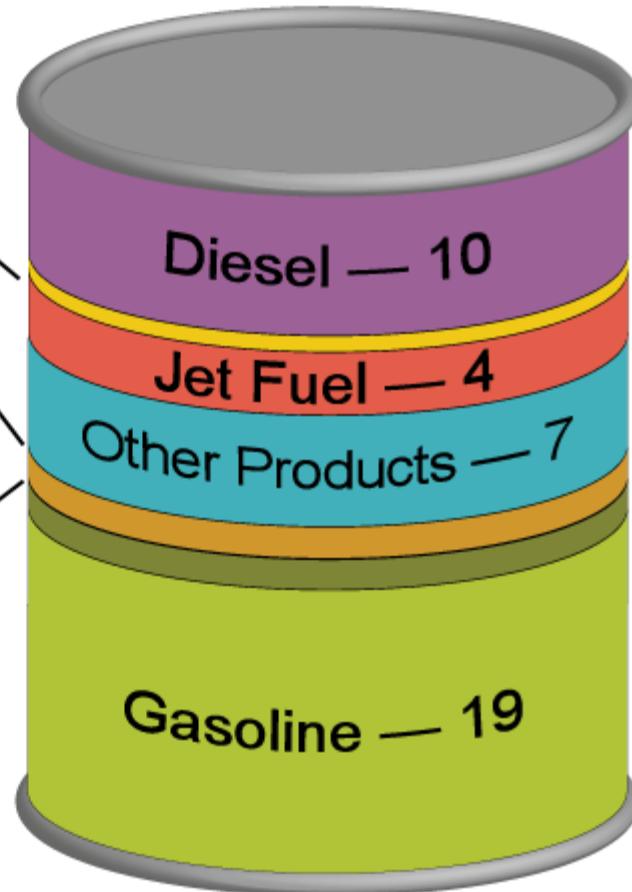
(heating oil) — 1

Heavy Fuel Oil

(Residual) — 2

Liquefied
Petroleum Gases

(LPG) — 2



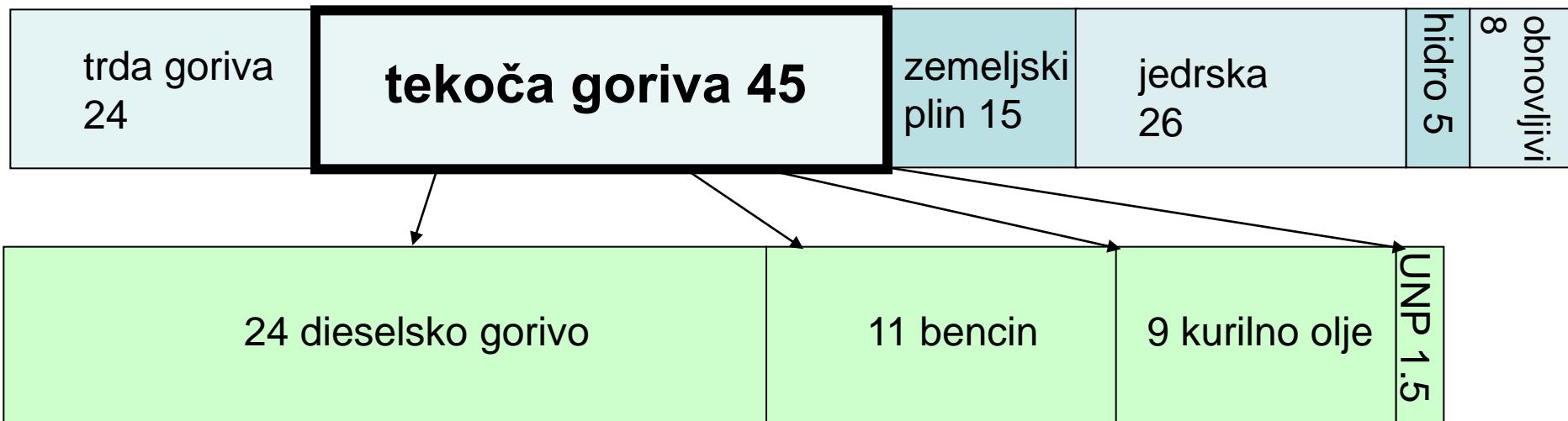
Note:

A 42-U.S. gallon barrel of crude oil yields between 44 and 45 gallons of petroleum products.

Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2008)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan



Približno (podatki po frakcijah v tabeli 19.6 Statističnega letopisa so podani v 1000 tonah in ne energiji)!

Proizvodnja električne energije je zanemarljiva
UNP - utekočinjeni naftni plin

Nafta - Slovenija

45 kWh/dan/osebo

Poraba 2008:

650.000 ton = 11 kWh/dan.o	bencina
1420.000 ton = 24 kWh/dan.o	dieselskega goriva
533.000 ton = 9 kWh/dan.o	kurilnega olja
85.000 ton = 1.5 kWh/dan.o	utekočinjen naftni plin

Distribucija:

430 bencinskih črpalk

Dnevno se pretovori ~7000 ton nafte in derivatov (~200 cistern)

vir: statistični letopis,
podatki za 2008.

Zemeljski plin

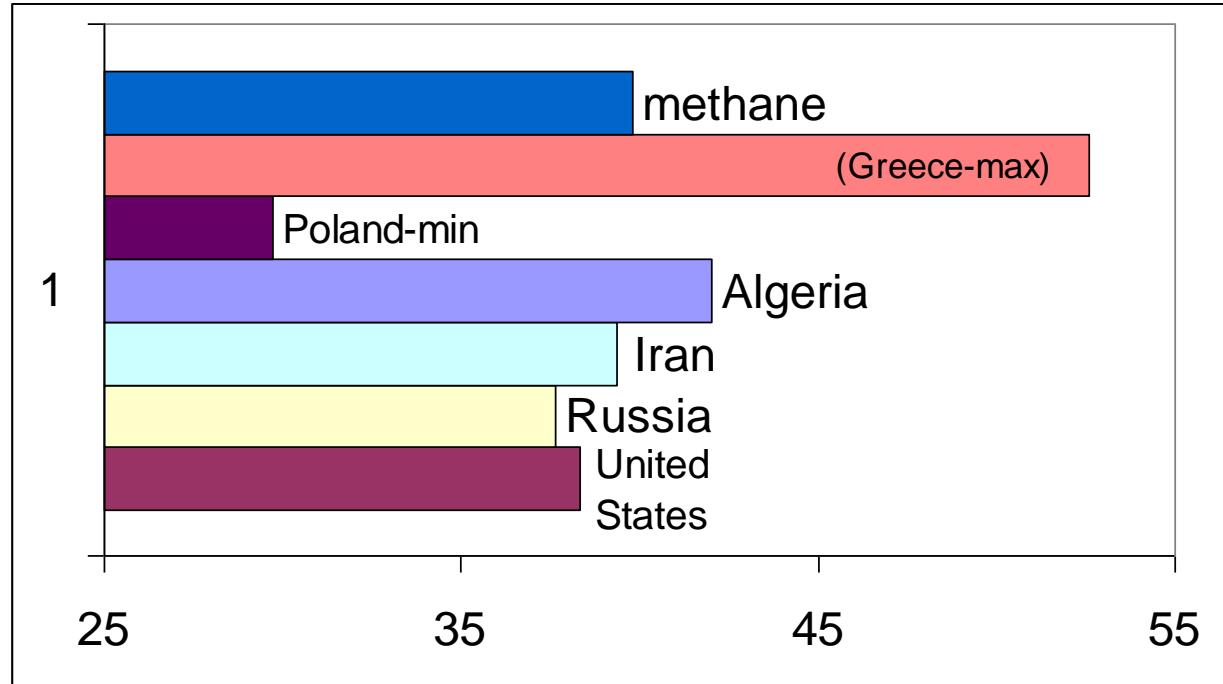
sežigna toplota
(MJ/ m³)

<http://www.eia.doe.gov>

1 Sm³ plina =

37.86 MJ/m³ =

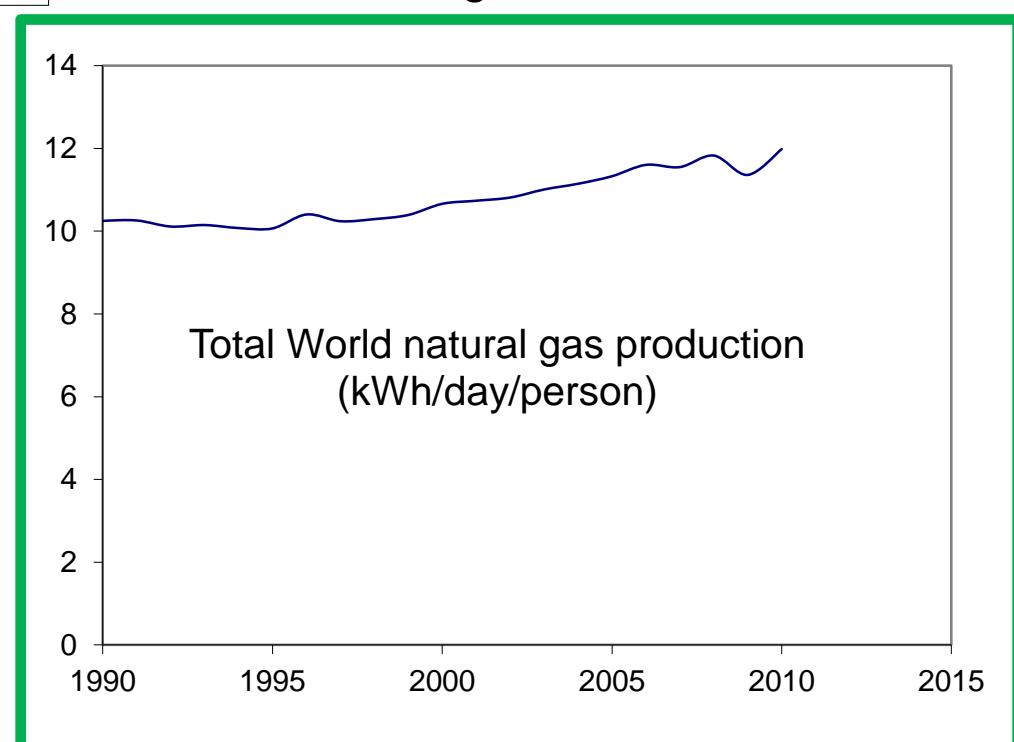
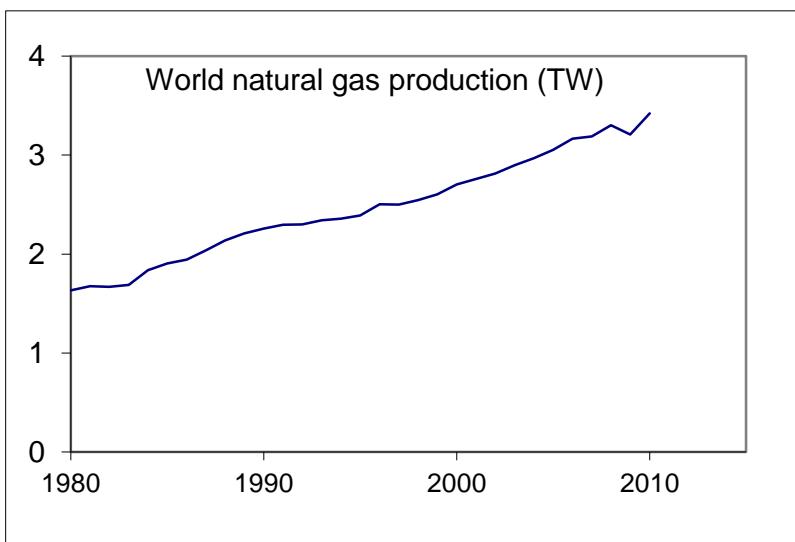
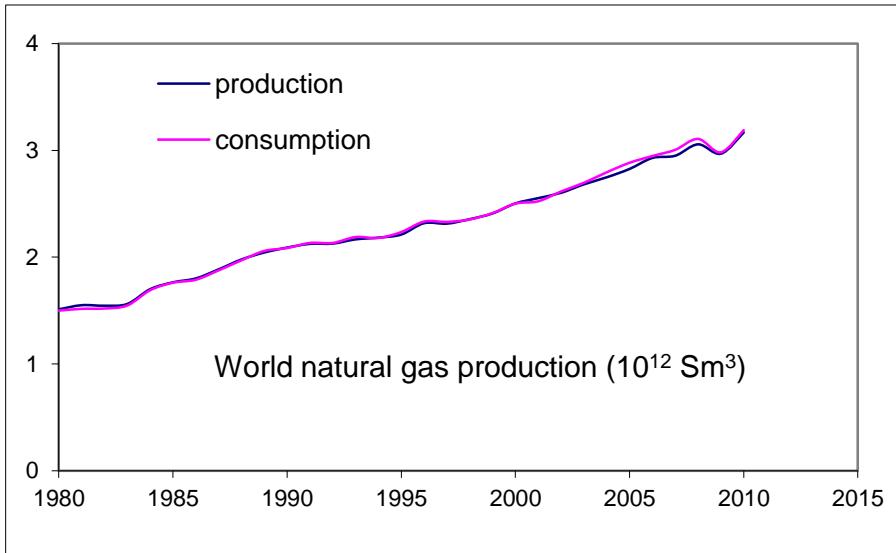
10.52 kWh



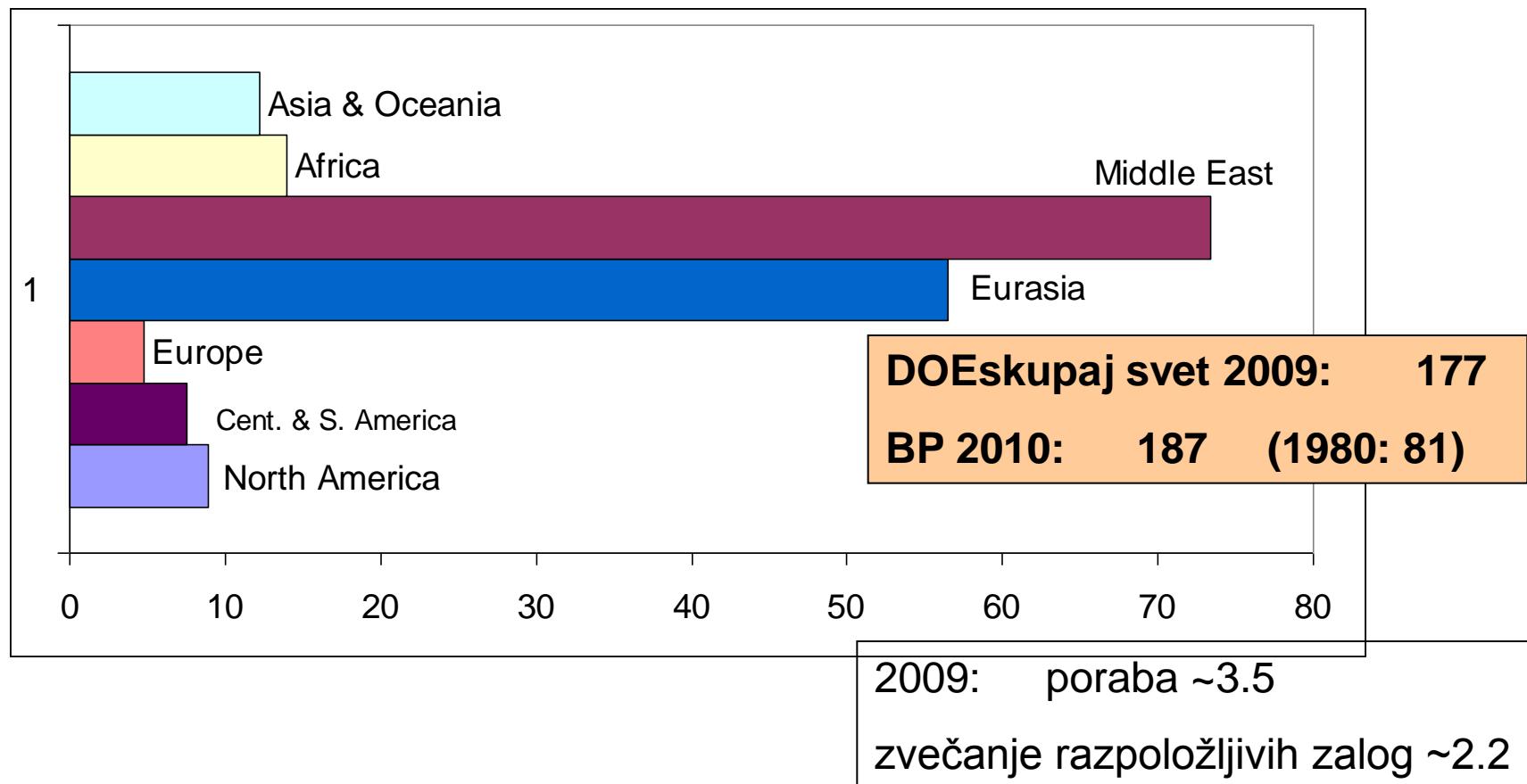
zemeljski plin - pretežno metan, do 20% etana ali ostalih primesi.

PORABA ZEMELJSKEGA PLINA

proizvodnja se meri v ft^3 oz. m^3



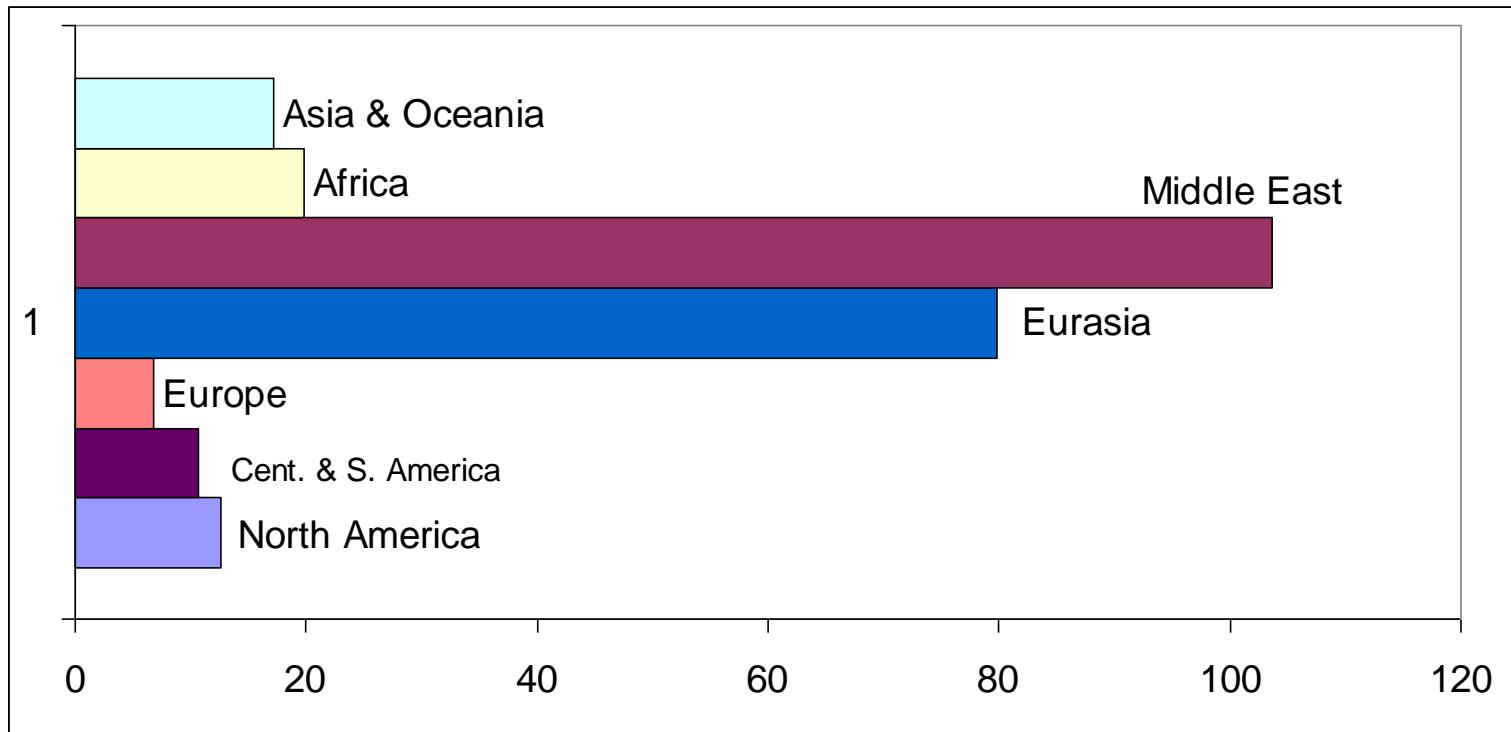
Zaloge zemeljskega plina, 2009 (10^{12} Sm^3) (vir: eia.doe)



Nekonvencionalne zaloge plina (v naftnih skrilavcih in premogu): $\sim 200 \text{ T Sm}^3$
ZDA v 2009 iz njih že pridobijo del svojega plina (vir: EUROPEAN ENERGY REVIEW, Unconventional gas, 21 June 2010)

Glej še: <http://web.mit.edu/mitei/research/studies/natural-gas-2011.shtml>

Zaloge zemeljskega plina, 2009 (1000 kWh/osebo), (6.7 milijard ljudi)

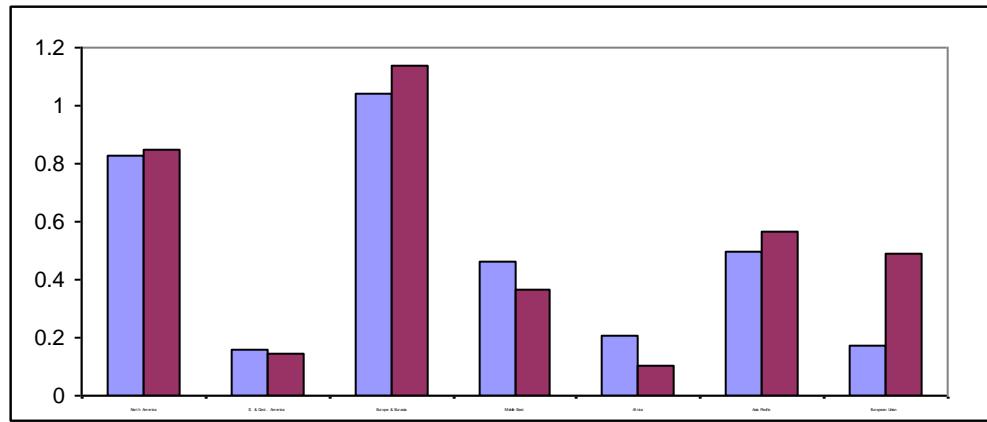


Glavnina zalog:

ZDA 10, Alžirija 6, Rusija 67,
Saudska Arabija 10, Iran 40,
Katar 34, UAE 9

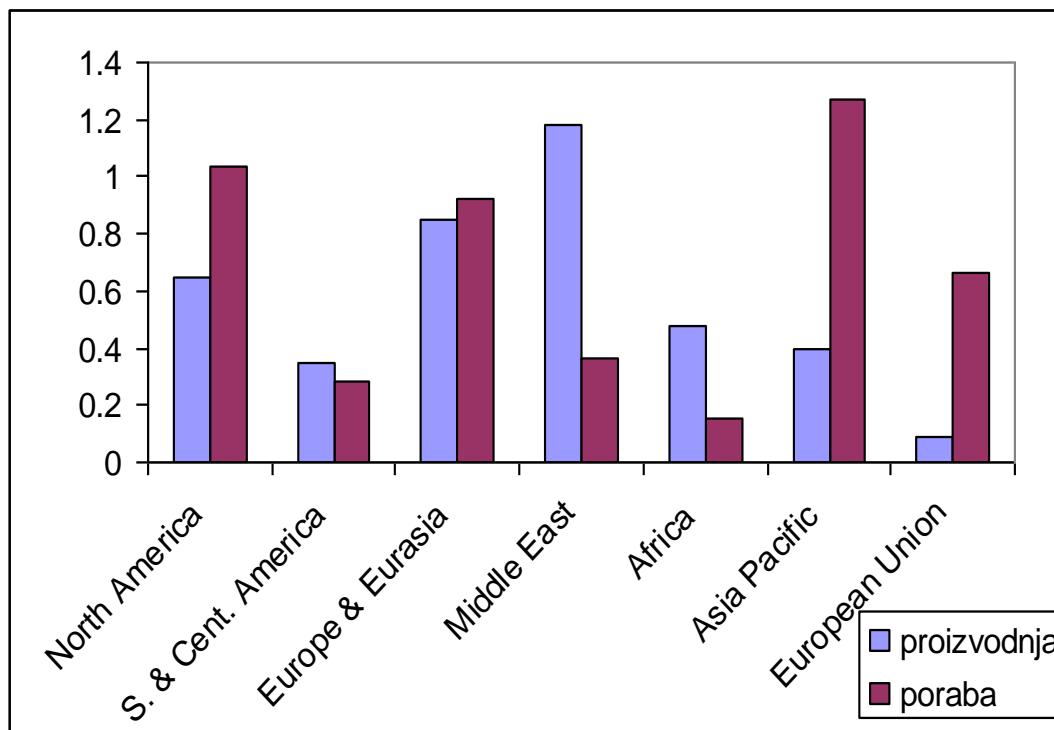
Skupaj svet 250000 kWh/osebo.
Pri današnji porabi plina
zaloge zadoščajo za ~50 let.

Proizvodnja in poraba nafte in plina po regijah v 2008



plin
 10^{12} m^3

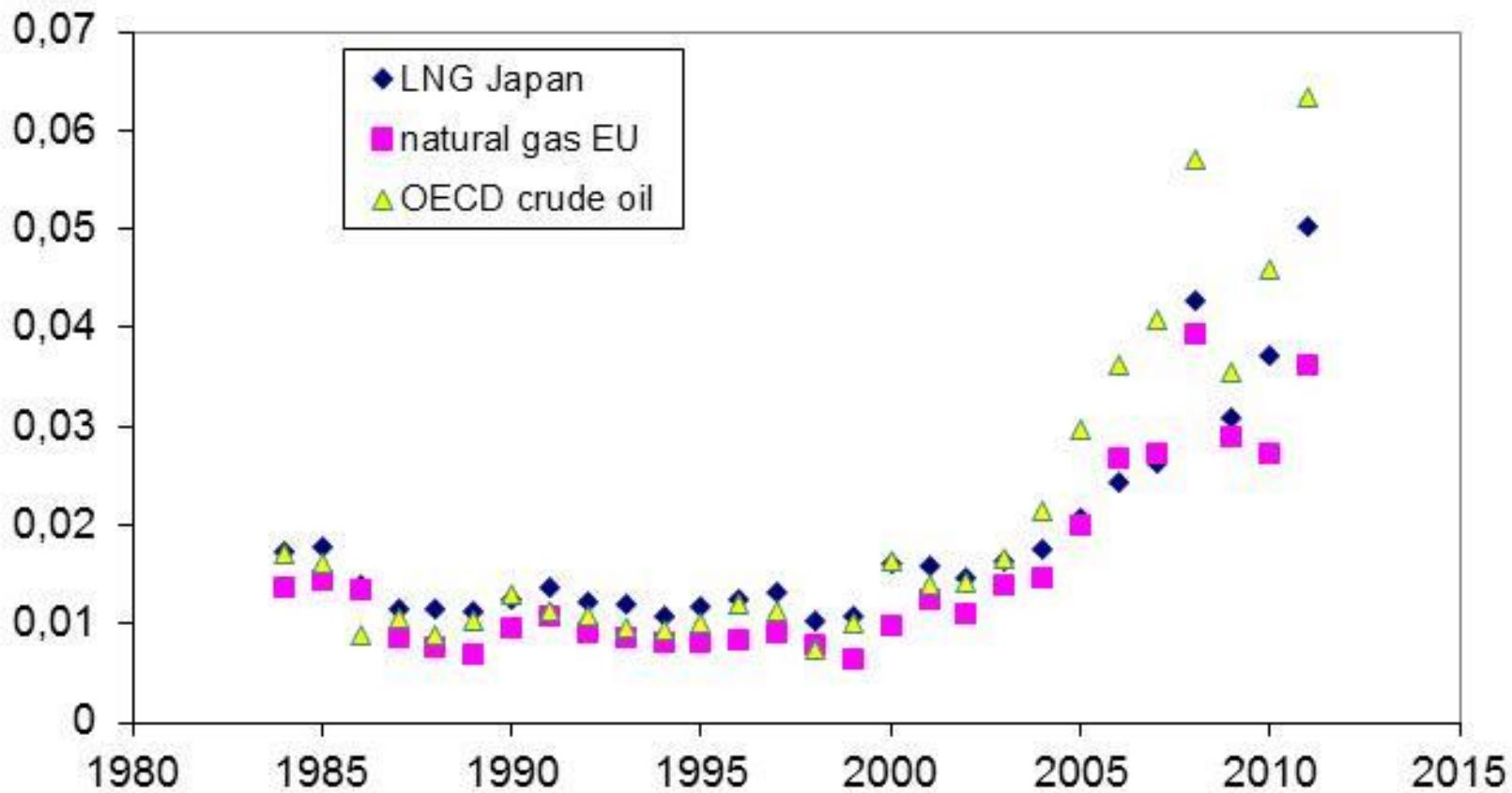
Približno tretjina svetovne proizvodnje plina je na mednarodnem trgu.
(nafte ~ 2/3)



nafta
Gton

cena plina

cif prices: cif=cost+insurance+freight (\$/kWh)



plin danes: ~0.03 EUR za kWh

Transport plina v 2009

plinovodi: $0.634 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$

LNG: $0.243 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$



LNG: Liquified Natural Gas
transport in skladiščenje pri -160°C
in tlaku $\sim 1 \text{ bar}$.
(Tlak nasičenja pri -160°C je 1.14 bar)



EU skladišča: $0.08 \cdot 10^{12} \text{ Sm}^3$
(~15% letne porabe)
(www.eurogas.org)

Plin v Sloveniji 15 kWh/dan.o ($\sim 10^9$ Sm3/leto)

9 kWh/dan.o industrija

2.4 Termoelektr.-toplарне (0.6 elektrika, 1 toplota, 0.8 odpadna topl.)

2 gospodinjstva

2 ostalo

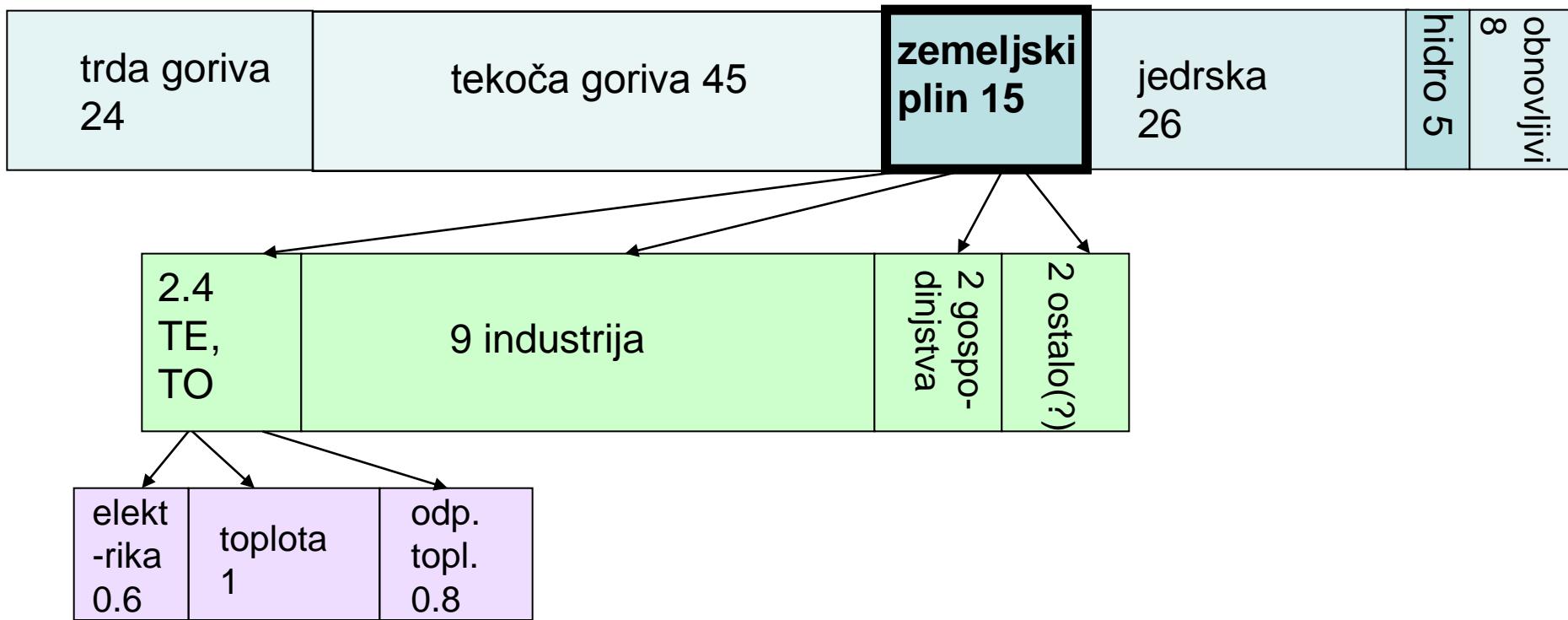


vir: statistični
letopis, podatki
za 2008.

Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2008)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan



Metan - toplogredni plin

Metan - za CO_2 najpomembnejši toplogredni plin.

Bistveno bolj učinkovito opravlja funkcijo tople grede kot CO_2 :

Od 1750 se je koncentracija CH_4 povečala s ~0.7 na 1.7 ppm. Zadnjih 10 let stabilna.



1 kg CH_4 je ekvivalent 21 kg CO_2 . za 100 let (definicija IPCC)

CH_4 prispeva približno 1/4 CO_2 ekvivalenta k učinku tople grede
(povečanje koncentracije CO_2 z 280 na 390 ppm).

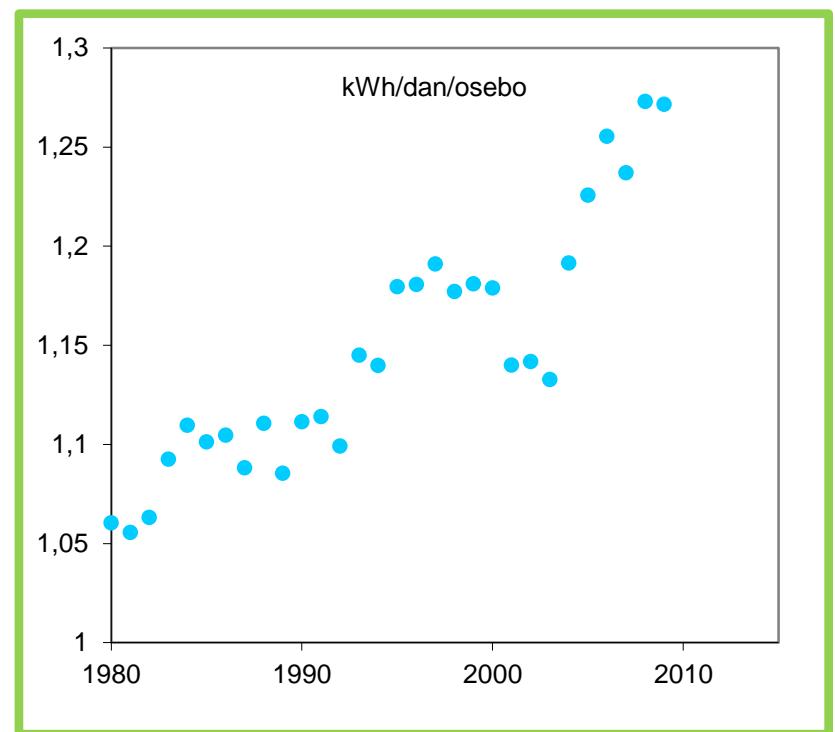
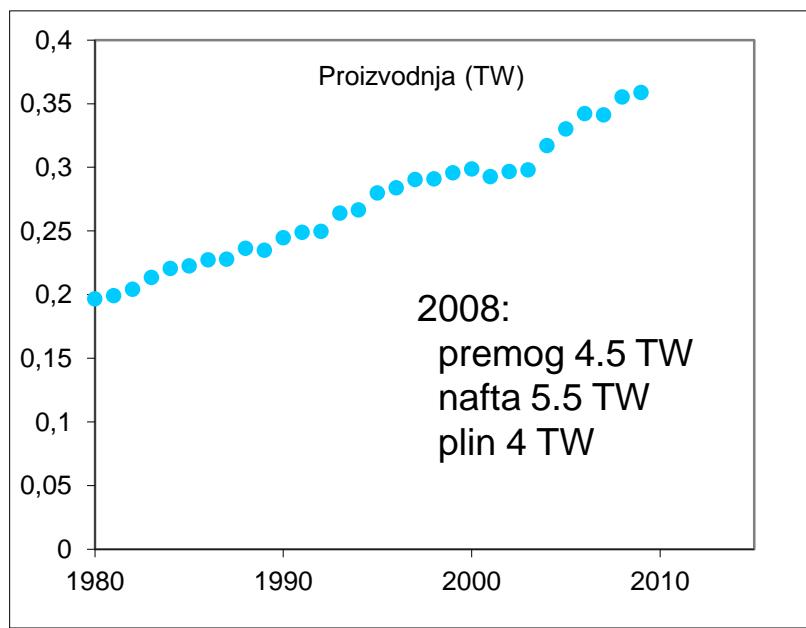
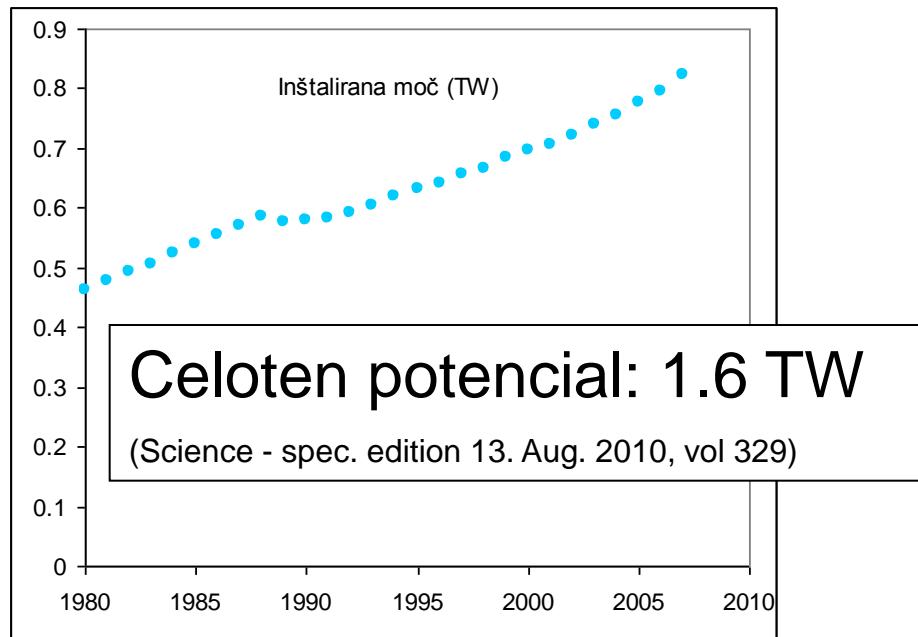
Po ~10 letih v ozračju razпадa v CO_2 .

Viri metana v ozračju (<http://www.epa.gov>) Še posebej ocene naravnih virov so zelo negotove:

- polovica - naravni viri (pretežno močvirja in taljenje permafrosta)
- polovica - človeški izvor:

- 3.1 Gt CO_2e - kmetijstvo, prebava domačih živali 1.8, riž 0.6, gnojenje 0.2
- 1.3 Gt CO_2e - smetišča 0.7, čistilne naprave kanalizacije 0.5
- 1.8 Gt CO_2e - energetika, zemeljski plin in nafta (1 Gt), premog (0.4 Gt)
(številko so nenatančne...)

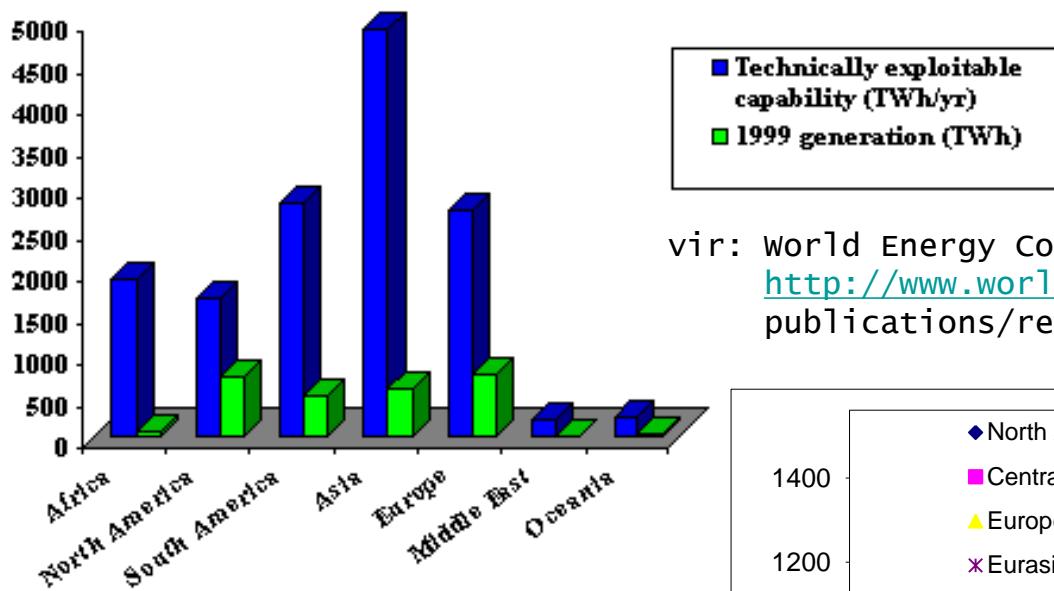
voda - reke



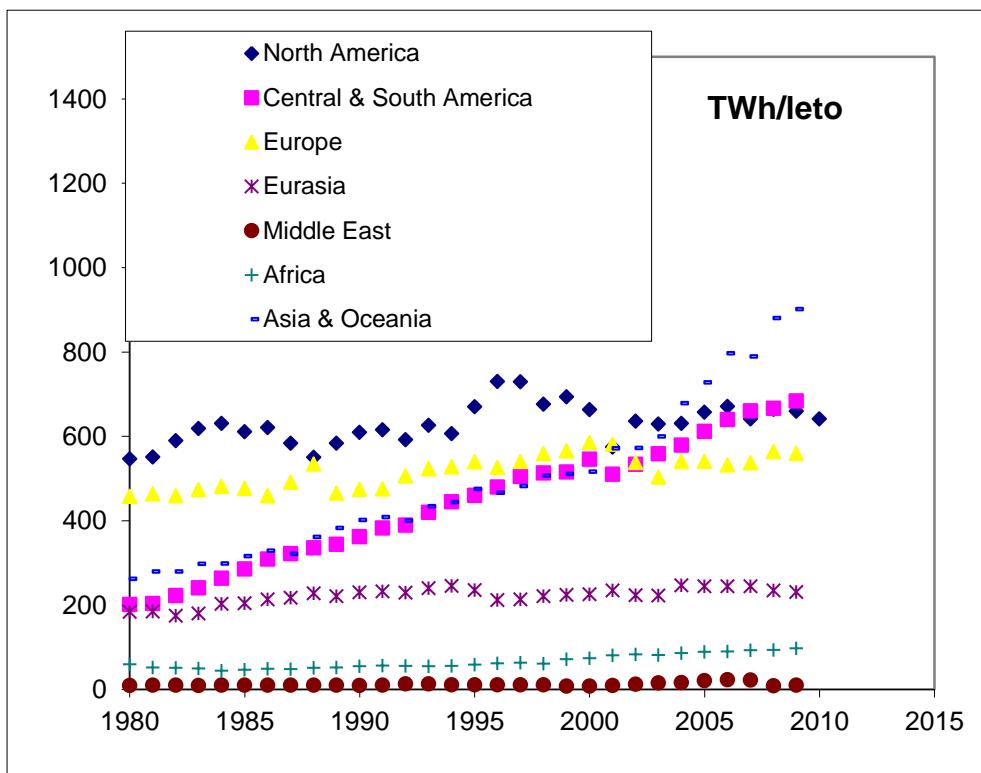
grafi: <http://www.eia.doe.gov/>

Figure 7.2: Hydropower - technically exploitable capability and 1999 generation (all schemes) - regional distribution

Proizvodnja po regijah



vir: World Energy Council,
[http://www.worldenergy.org/wec-geis/
publications/reports/ser/overview.asp](http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/overview.asp)



(Opravičujem se za
enote, namesto TWh raje
TW ali GW)

graf - proizvodnja po regijah:
<http://www.eia.doe.gov/>

Največje hidroelektrarne (wikipedia)

	Name	Country	Total Capacity (GW)	Electricity production (GW)	Area flooded (km ²)
1	Three Gorges Dam	People's Republic of China 	22.5	9.2	632
2	Itaipu	Brazil  Paraguay 	14.0	10.8	1,350
3	Guri (Simón Bolívar)	Venezuela 	10.2	5.3	4,250
4	Tucuruí	Brazil 	8.4	2.4	3,014
5	Grand Coulee	United States 	6.8	2.3	
6	Sayano Shushenskaya	Russia 	6.4	3.1	621
7	Krasnoyarska ya	Russia 	6.0	2.3	2,000
8	Robert-Bourassa	Canada 	5.6		
9	Churchill Falls	Canada 	5.4	4.0	6,988

Accident at Russia's Biggest Hydroelectric



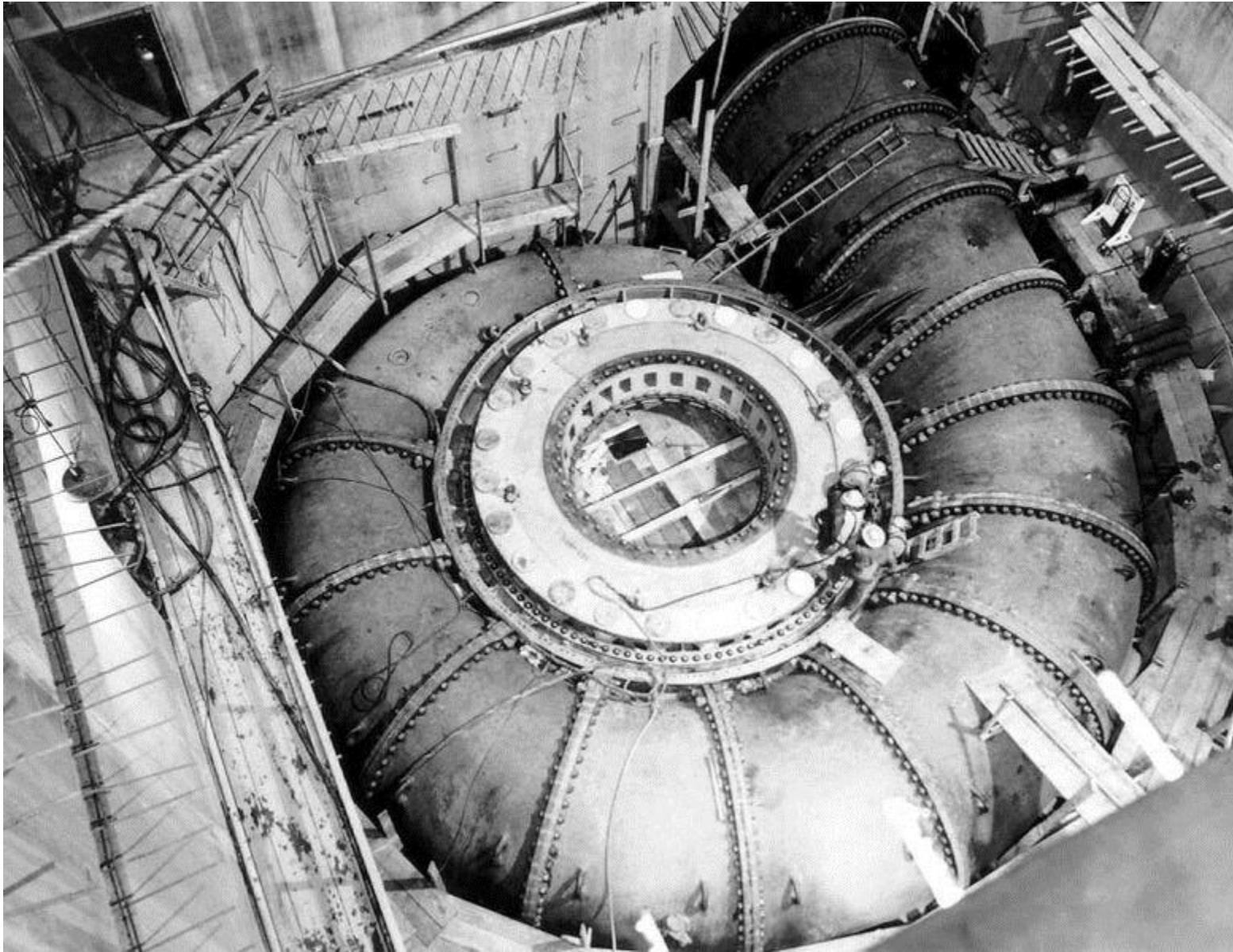
Sayano-Shushenskaya – 2009 August 17

1- Main Characteristics

- Number of Units: 10
- Turbine Type: Francis (16 blades)
- Rated Power: 650 MW each
- Rated Discharge per Unit: $358,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nominal Speed: 142,86 rpm
- Net Head: 194 m
- Operation Date: 1978
- Runner Weight: 156 ton
- Runner Diameter: 6,77 m



Francisova turbina v Grand Coulee dam



2 - Main Characteristics

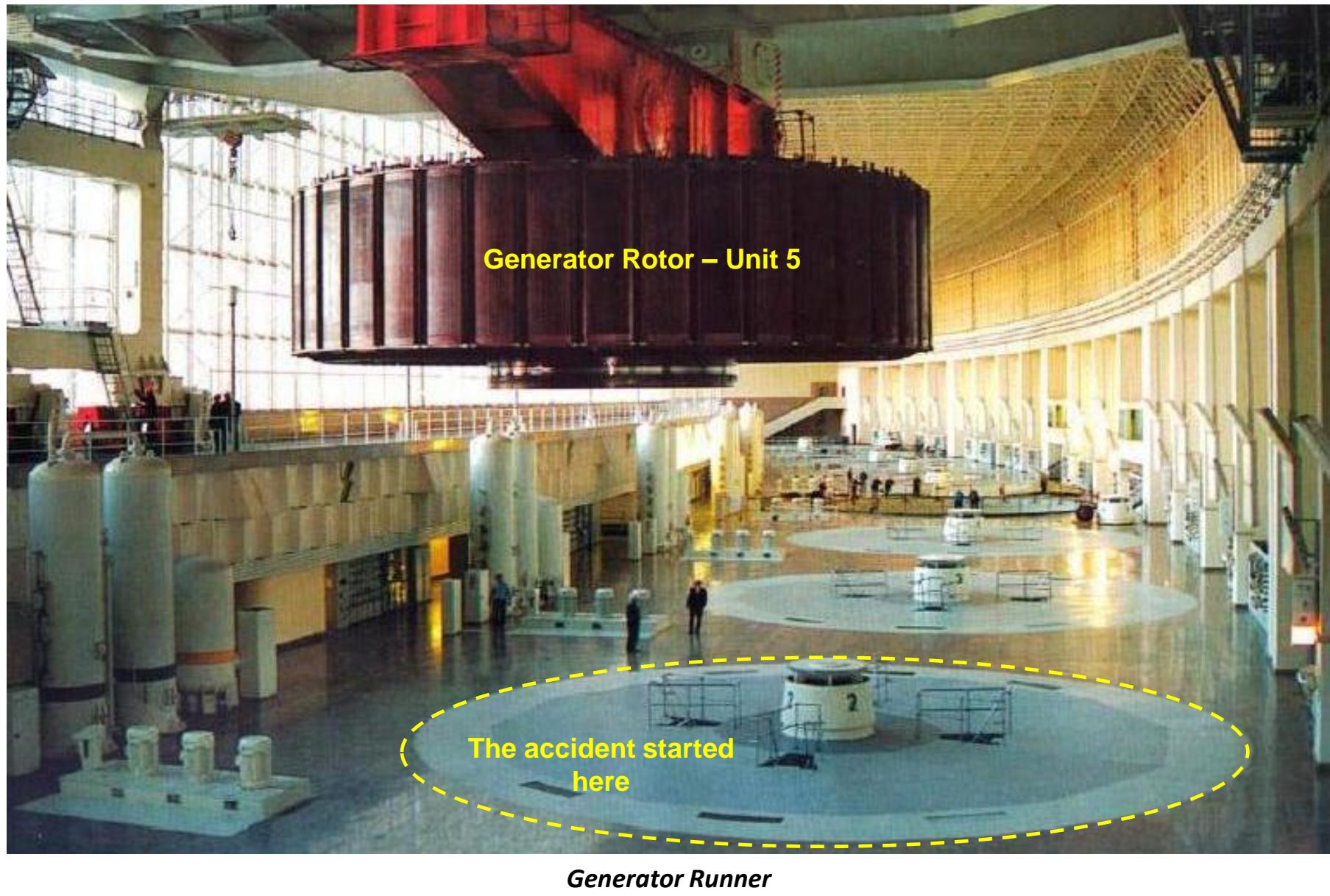
One of the world's largest hydro-electric plants, its dam is 245 m (800 ft) high and stretches 1 km (0.6 miles) across the Yenisei river.

Opened in 1978, the station provides a quarter of RusHydro output and is a major power supplier to at least two smelters owned by United Company RUSAL, the world's largest aluminium producer.

The hydroelectric power station is located on the Yenisei River, near Sayanogorsk in Khakassia, Russia. Before the accident, it was the largest power plant in Russia and the sixth-largest hydroelectric plant in the world.



Before the Accident



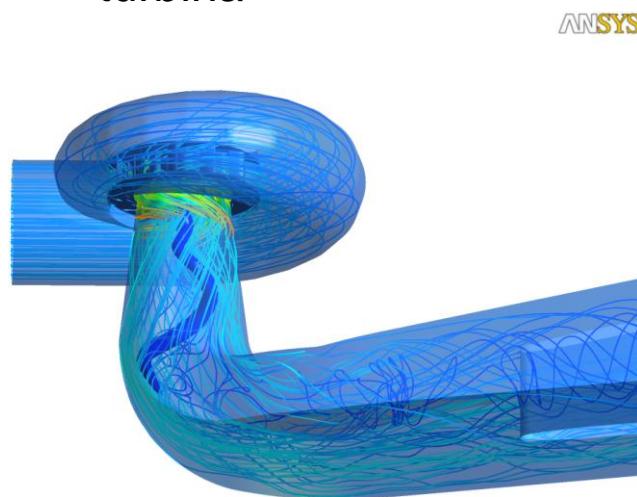


Nesreča, 75 mrtvih, najverjetneje posledica utrujanja materiala zaradi vibracij.
(elektrarna je začela z obratovanjem 1978)

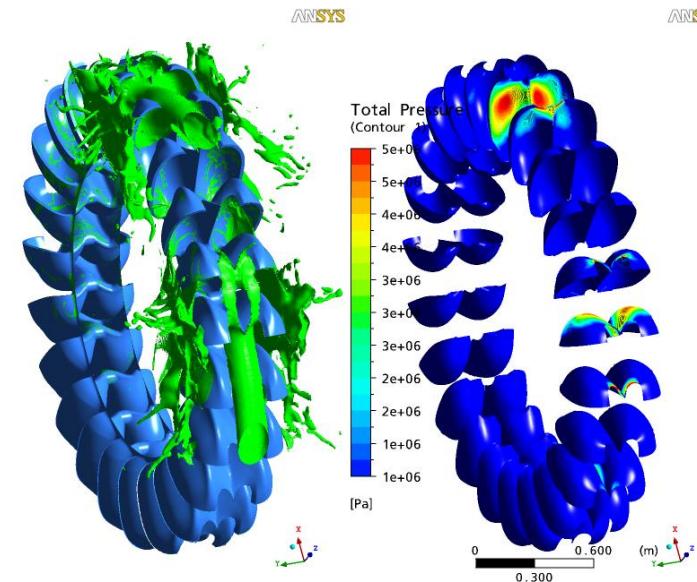
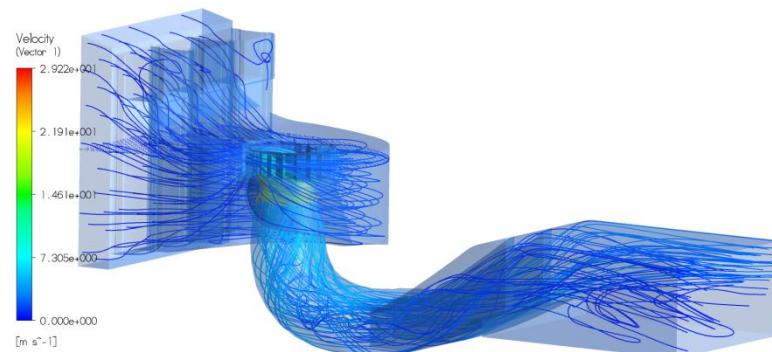
SLO:

- Litostroj - turbine
- Računalniške simulacije na Turboinštitutu

Francisova
turbina



Kaplanova
turbina



Peltonova
turbina

Jošt, Lipej, Mežnar: Numerical Prediction Of Efficiency, Cavitation And Unsteady Phenomena In Water Turbines, ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Israel.

Črpalne hidroelektrarne - največji zbiralniki energije

črpalne elektrarne:

črpanje vode na večjo višino ob presežku produkcije;

hidrolektrarna ob pomanjkanju;

črpalka/turbina

$$W_{\text{elek}} \rightarrow W_{\text{pot}} \rightarrow W'_{\text{elek}}$$

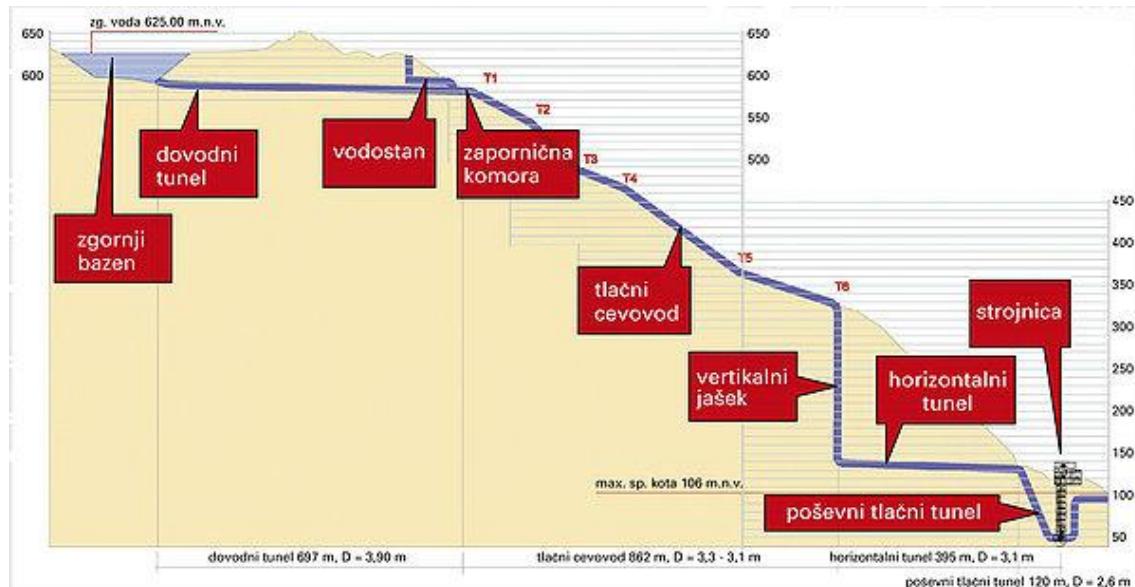
izkoristek:

- izgube zaradi izparevanja
- mehanske izgube

$$h = W'_{\text{elek}} / W_{\text{elek}}$$

~ 0.7-0.85

(ekonomski izk. boljši)



cena 120-130 MEUR

Črpalna HE Avče, http://www.seng.si/che_avce/

Maksimalni bruto padec: $H_b = 521,00 \text{ m}$

Koristni volumen vode: $V_k = 2.170.000 \text{ m}^3$

Spodnji bazen: aumul. jezero elektrarne Plave 416.000 m^3

Instalirani pretok (turbinski režim): $Q_i = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Instalirani pretok (črpalni režim): $Q_c = 34 \text{ m}^3/\text{s}$

Povprečni pretok Soče v Solkanu (20 km nizvodno): $\sim 80 \text{ m}^3/\text{s}$

Instalirana moč turbine: $P_i = 185 \text{ MW}$

Instalirana moč črpanja: $P_c = 180 \text{ MW}$

Letna proizvodnja električne energije: $E_i = 426 \text{ GWh}$

Letna poraba energije za črpanje: $E_c = 553 \text{ GWh}$

Črpalna HE Avče, http://www.seng.si/che_avce/

$$\eta = \frac{W_{\text{elek}}}{W_{\text{elek}}} \sim 0.77$$

Efektivna gostota shranjene energije

(dW/dm ali dW/dV in izkoristek pretvorb)

za vodo shranjeno v rezervoarju 520 m nad turbino:

$$dW/dV = h \quad dW/dV = h \cdot rgh \quad dV/dV = h \cdot rgh \sim 1 \text{ kWh/m}^3$$

skupaj Avče $\sim 2 \text{ GWh}$ rezervoar elektrike (SLO dnevna poraba $\sim 35 \text{ GWh}$)

2010-2011 - "proizvodnja vršne energije" $\sim 1.5 \text{ GWh/dan}$ (0.75 kWh/dan/o)

Valovi (po MacKay-u)



Ocean Power Delivery (oceanpd.com)



Pelamis



'500 kW' Limpet, Islay



Predicted average power: 200kW. Actual: 21kW.

Total incident power / population of UK

$$= \frac{40 \text{ kW/metre} \times 1000 \text{ km}}{60 \times 10^6} = 16 \text{ kWh/day}$$

teoretični
potencial na
prebivalca VB

MacKay
predpostavi
4 kWh/dan kot
bolj realno
številko

Plima (po MacKay-u)

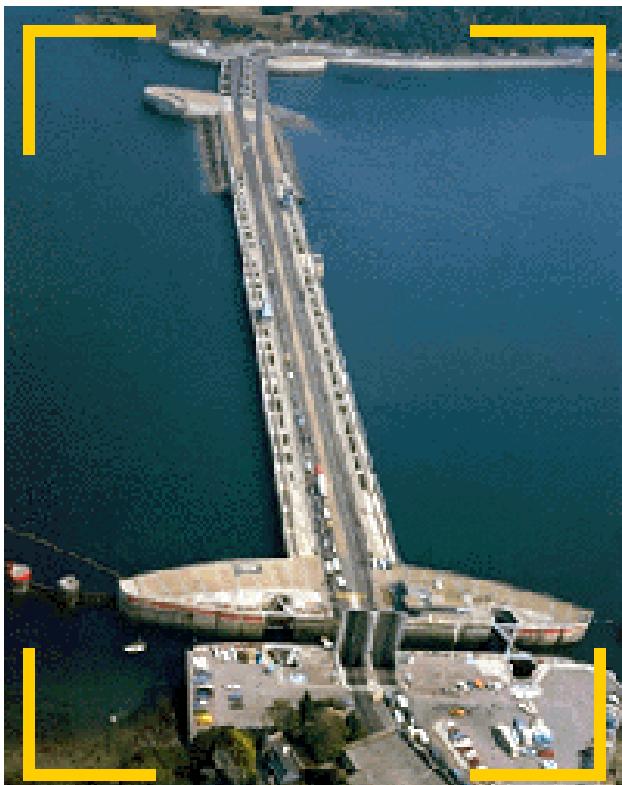
Zajezitev zalivov ob ustju rek.

Plima-oseka $\Delta h \sim 5\text{m}$

gostota moči 3 W/m^2

Jez elektrarne La Rance,
Francija (www.edf.com)

max 250 MW, avg. 70 MW



na prebivalca
UK:

~2 kWh/dan

~9 kWh/dan

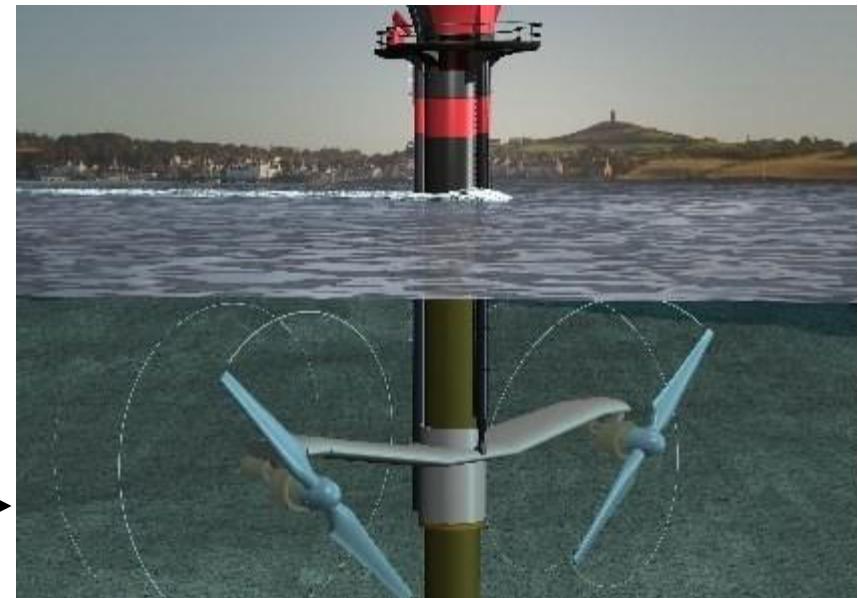
Tokovi - Podvodne turbine

gostota moči 8 W/m^2 (tok $\sim 1\text{ m/s}$)
(MacKay)

SLO - Teoretični potencial:

Tržaški zaliv, povprečen tok
 $0.5\text{ m/s} \sim 1\text{ W/m}^2$,
Slovenski del $100-200\text{ km}^2 \Rightarrow 100-200\text{ MW}$

www.marineturbines.com



HIDROENERGETSKI POTENCIAL V SLOVENIJI

Vodotok	Bruto potencial (GWh/leto)	Tehnično izkoristljiv potencial (GWh/leto)	Izrabljen potencial (GWh/leto)	Delež izrabe
Sava z Ljubljanico	4134	2794	512	18,5%
Drava	4301	2896	2833	97,8%
Soča z Idrijco	2417	1442	491	34,0%
Mura	928	690	0	0%
Kolpa	310	209	0	0%
Ostali vodotoki	7350	1114	284	25,5%
Skupaj	19440	9145	4125	45,1%

Celotna inštalirana moč v Sloveniji: 890MW (Vir : <http://www.hse.si>)
Producija slovenskih hidroelektrarn: 5,4 kWh/dan/prebivalca (2008)

ENERGETSKI POTENCIAL SLOVENSKIH REK



podrobnosti: seminar JTE 2010 - voda

Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2008)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan

trda goriva 24	tekoča goriva 45	zemeljski plin 15	jedrska 26	obnovljivi 8
-------------------	------------------	----------------------	---------------	-----------------

HIDRO

hidro 5

elektrika 5.4

Sonce

Svetovna
proizvodnja električne
energije
2010: 3 GW
(Hidro ~350 GW)

Vsi viri energije, razen
jedrskih, geotermalnih
in plimovanja izvirajo iz
Sonca



Koalicijski sporazum, 2008:

Koalicijski partnerji bomo posebej spodbujali proizvodnjo energije iz obnovljivih in okoljsko sprejemljivih virov energije in pri tem posebej spodbujali investicije v fotovoltaične elektrarne v obsegu do 500 megavatov.

Slovenija 8.10.2012: 164 MW (<http://pv.fe.uni-lj.si/Sesenznam.aspx>)

podrobnosti: seminar JTE 2010 Sonce-geotermalna energija

Sonce (sevanje) - obnovljiv vir z največjo gostoto!

(neposredna izraba sončnega sevanja)

UPORABEN POTENCIAL > 50 TW

(TEORETIČNI POTENCIAL ~ 100000 TW)

(Science, spec. edition, 13. Aug. 2010, Vol 329)

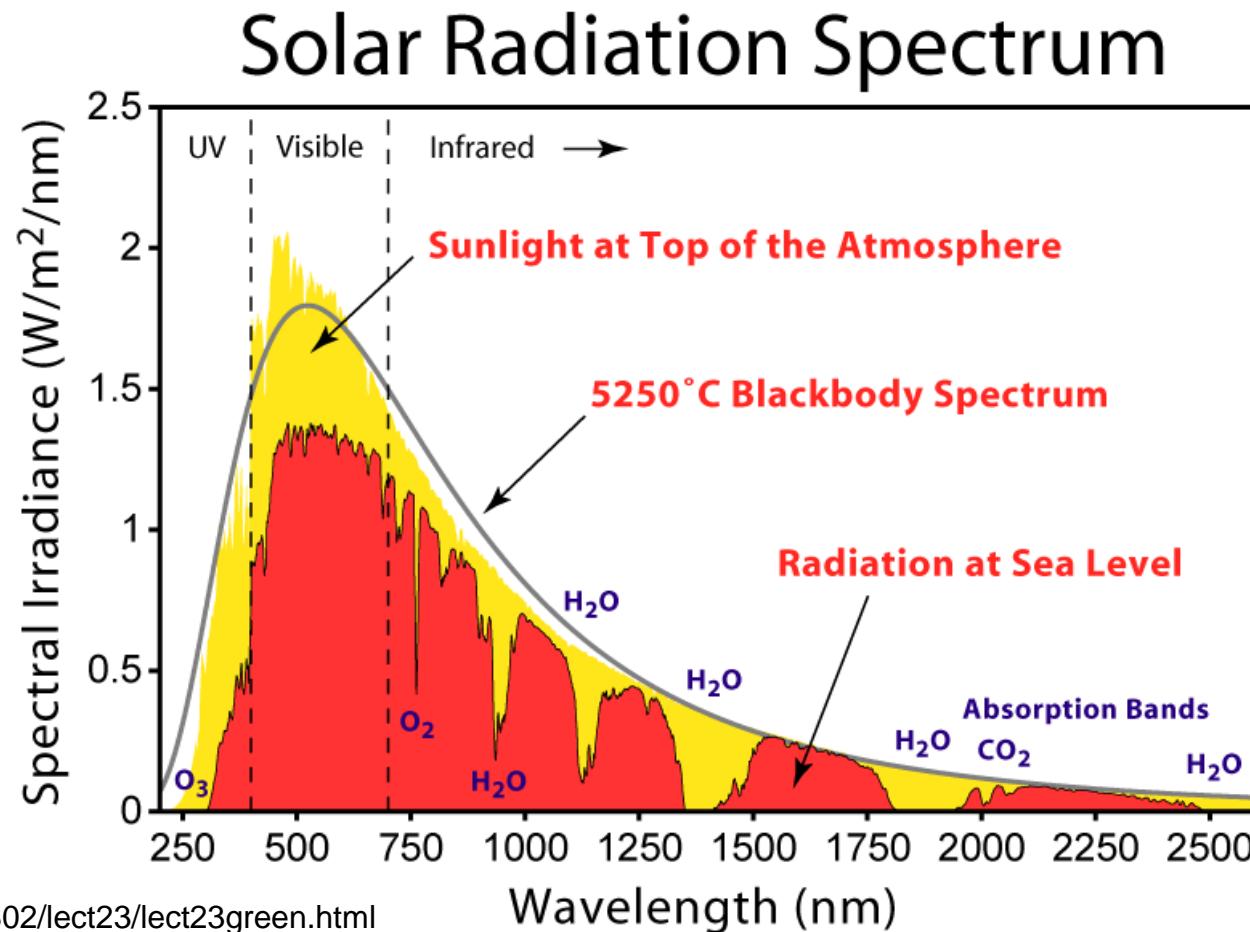
Sončno sevanje:

1367 W/m²

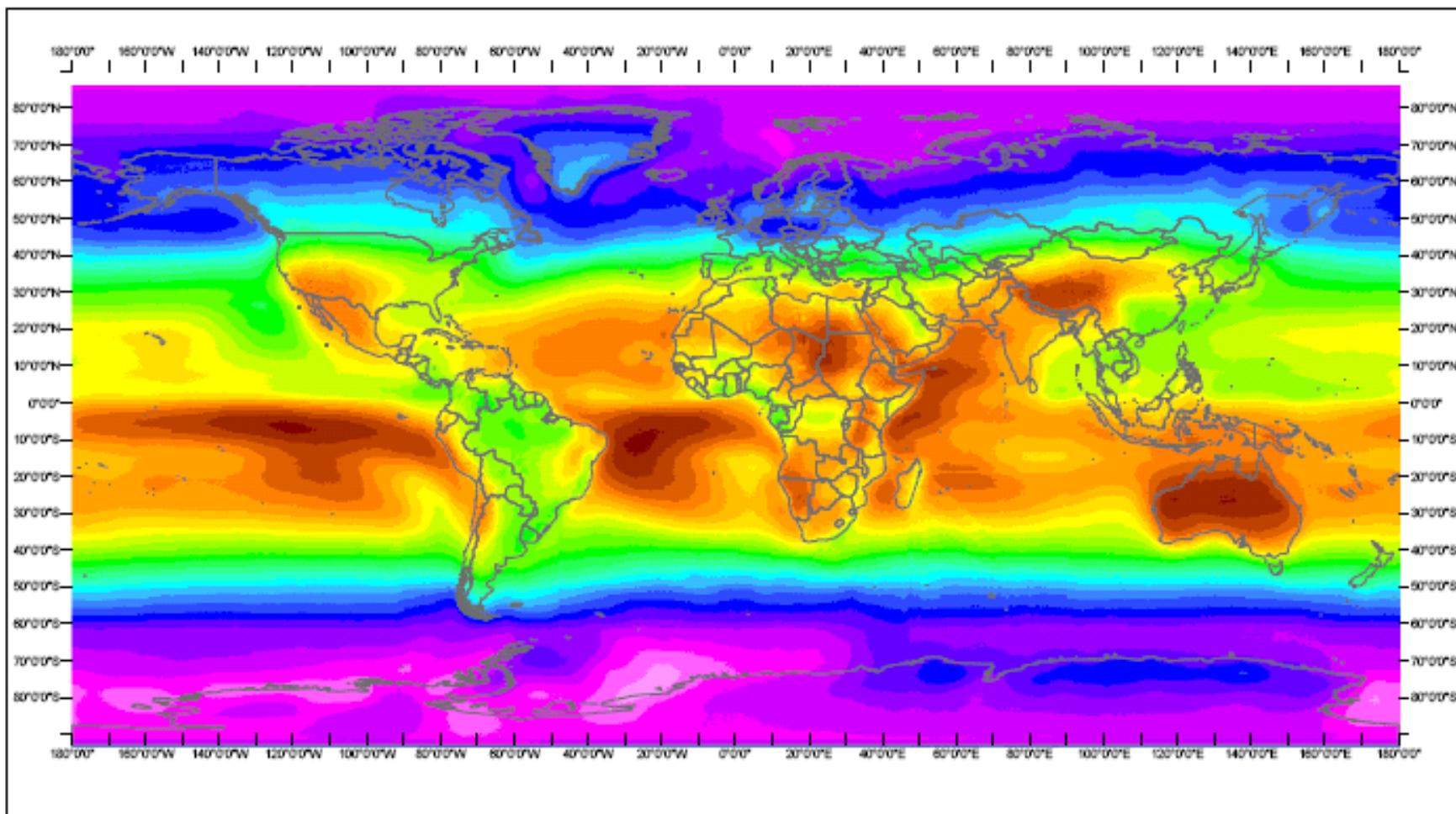
albedo 0.3

Ravnoesna temperatura površja -18 °C

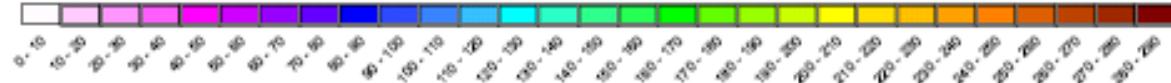
Dejanska povprečna temperatura površja 15 °C



Averaged Solar Radiation 1990-2004



Yearly Mean of Irradiance in W/m^2



W/m^2



Realized by Michel Albulssion, Mireille Lefèvre, Lucien Wald.

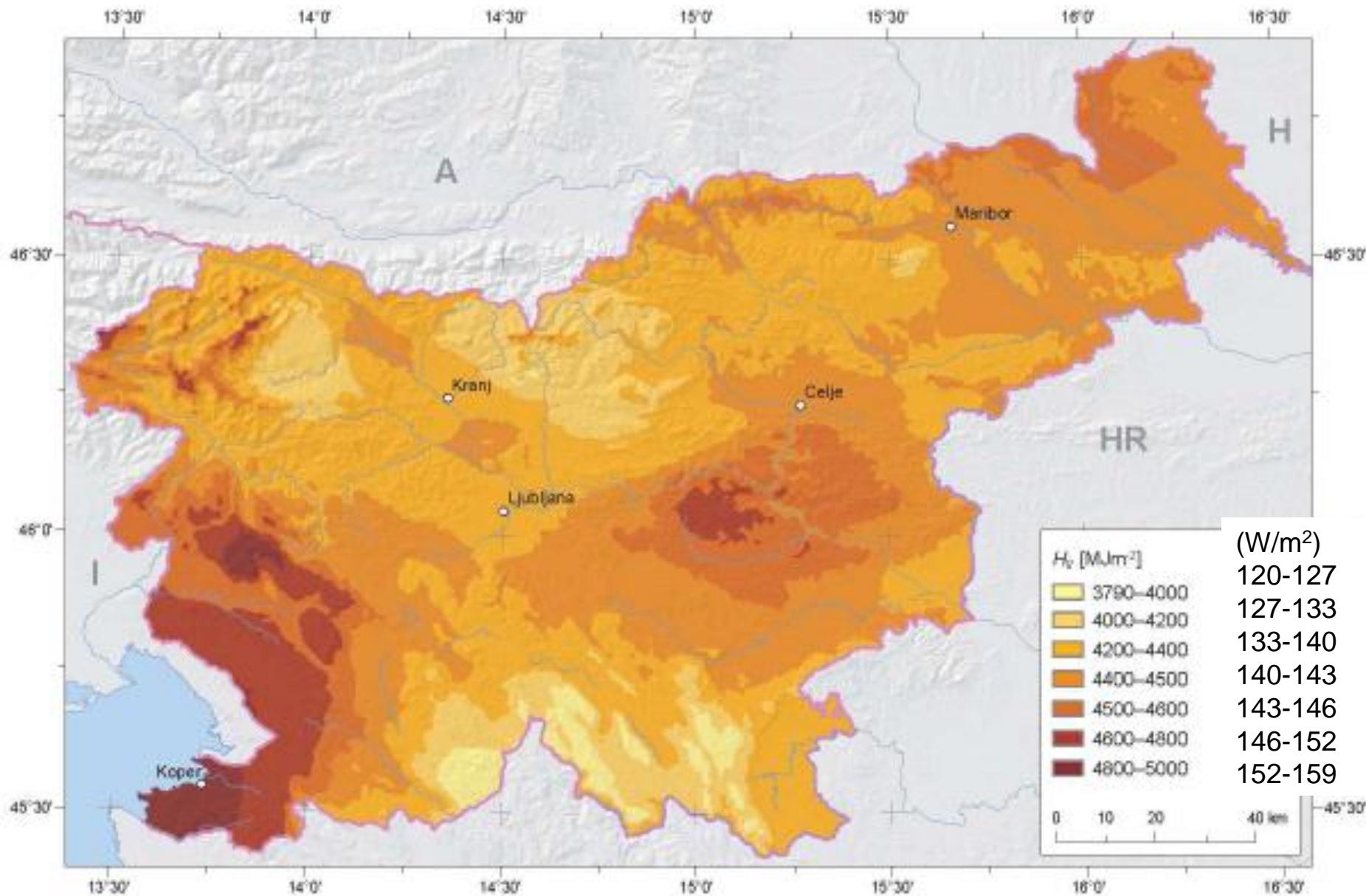
Edited and produced by Thierry Ranchin. Date of production: 23 November 2006.

Centre for Energy and Processes, Ecole des Mines de Paris / Armines / CNRS.

Copyright: Ecole des Mines de Paris / Armines 2006. All rights reserved.

Povprečna moč sončnega sevanja

(Sončna energija v Sloveniji, J. Rakovec, D.Kastelec, K. Zakšek)



Fotovoltaika - Moura, Portugalska,
Wikipedia

62 MW_p (moč)

(povprečna moč 6 do 9 krat manjša – dan,
noč, oblaki...)

376,000 solarnih panelov

190,000 fiksnih panelov

52,000 panelov “sun-trackers”

250 hektarov

90 GWh/leto

4 W/m²



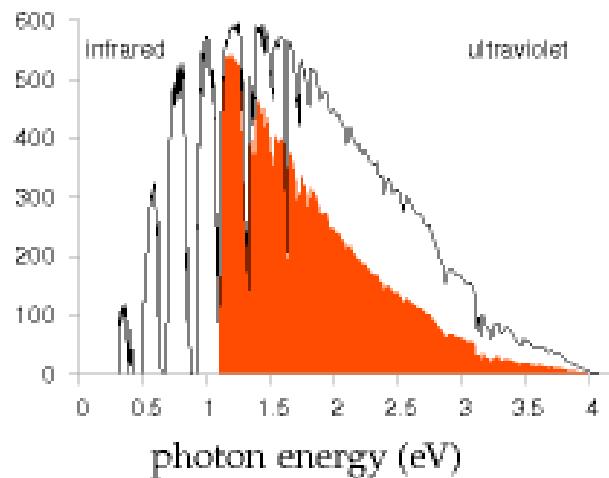
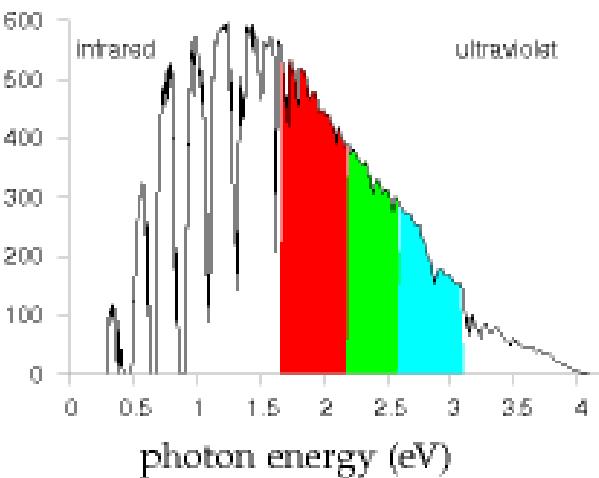
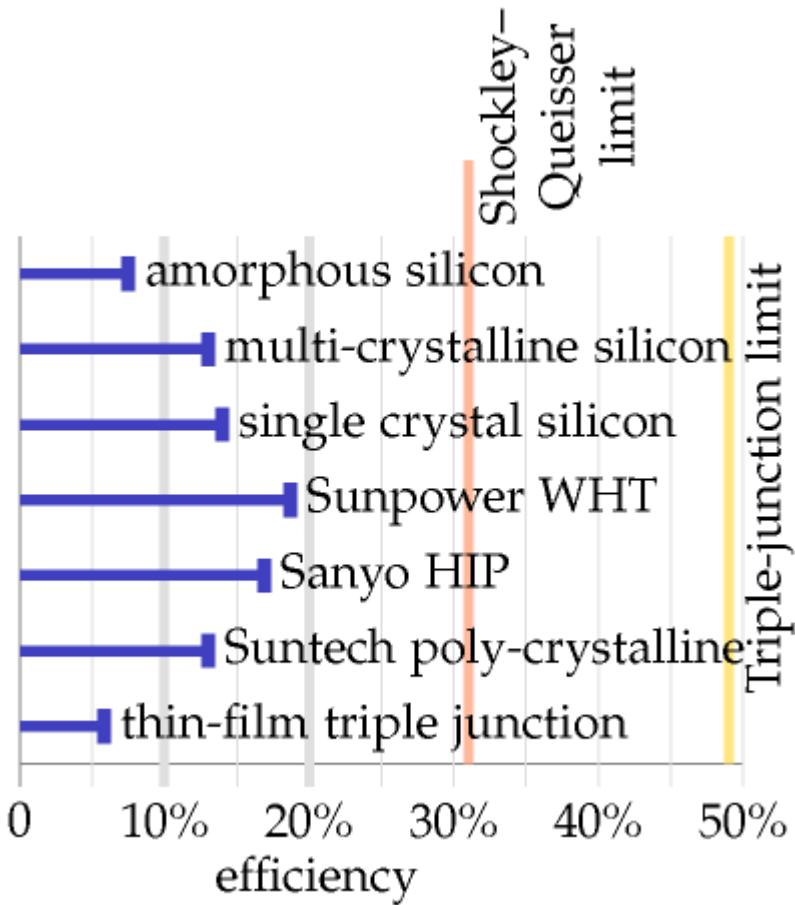
Fotovoltaične elektrarne
do max. ~20 W/m²

Manjši teoretični izkoristek
od **termosolarnih elektrarn**,
toda boljša izkoriščenost
prostora

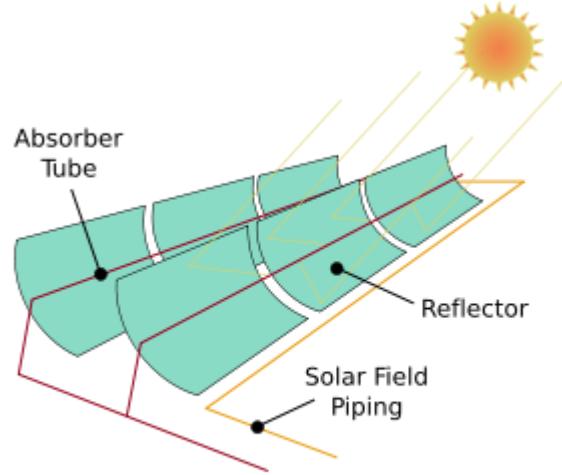
Izkoristek fotovoltaičnih panelov

po MacKay-u

Izkoristki nad 20% so izjema...



Kramer junction, Kalifornija, 10 W/m²



PS 10 Solucar, Španija, 5 W/m²



Sončne termoelektrarne
načrti do max ~20 W/m²
Boljši izkoristek sevanja
kot fotovoltaika na m²
zrcal. Slabši izkoristek
prostora.

gostota moči fotovoltaične elektrarne



Vrenska gorca, 2009:

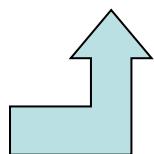
420 kW (2 MEUR)

550000 kWh/leto

1 ha **travnika**

za ~200 gospodinjstev :-)

gostota moči: 6 W/m²



Strahinj, 2007,
90 kW vršna moč, (~10 kW
povprečna moč)
proizvodnja ~90000 kWh/leto,
površina ~600 m² - 80% strehe
gostota moči: ~15 W/m²

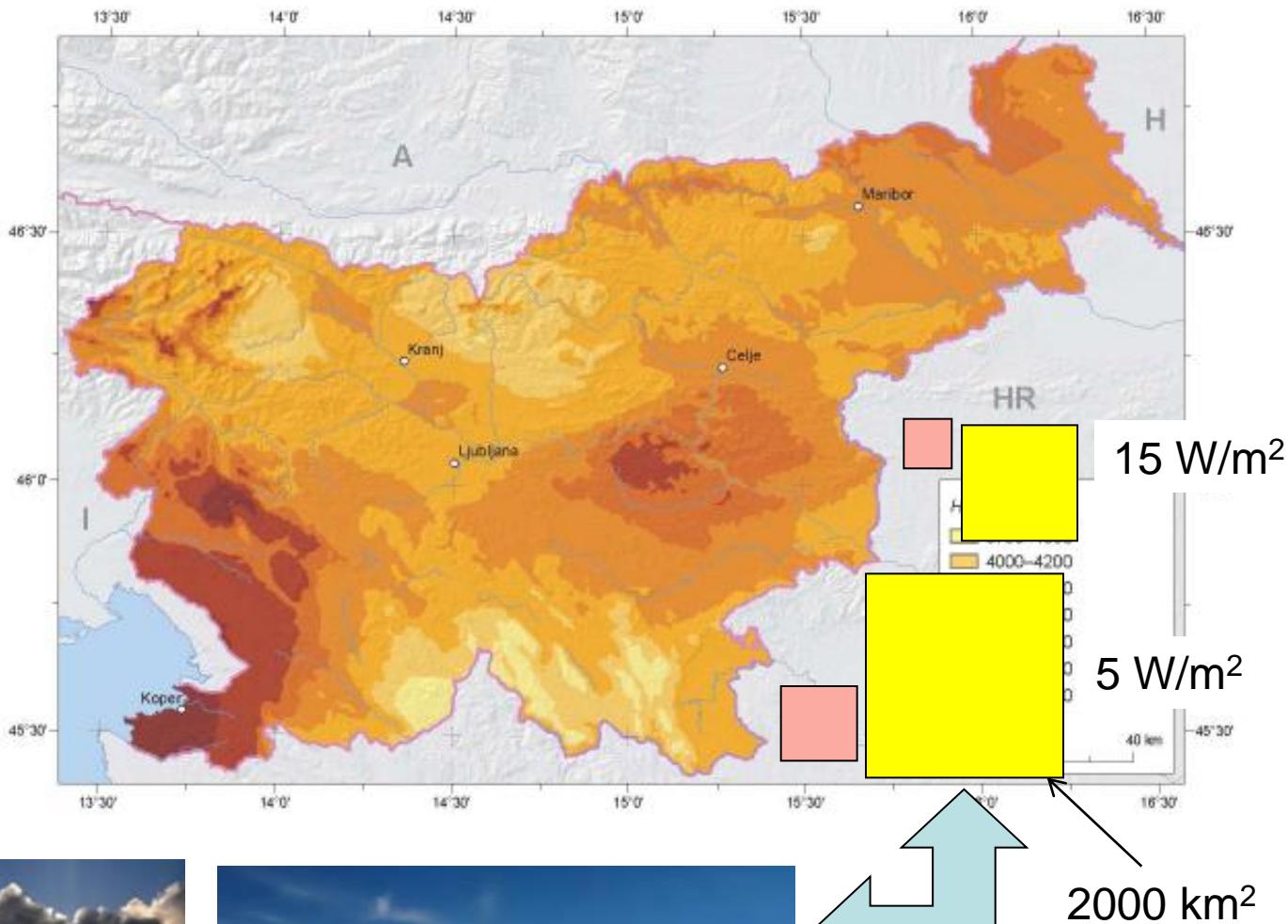
~246 kWh/dan = 2 Slovenca



<Slovenec>
potrebuje
 $\sim 0.5 \text{W/m}^2$.

Rumeno 
površina potrebna
za **100% oskrbo**
iz sončnih
elektrarn pomeni
1/30 do 1/10
Slovenije
(122 kWh/dan.o)

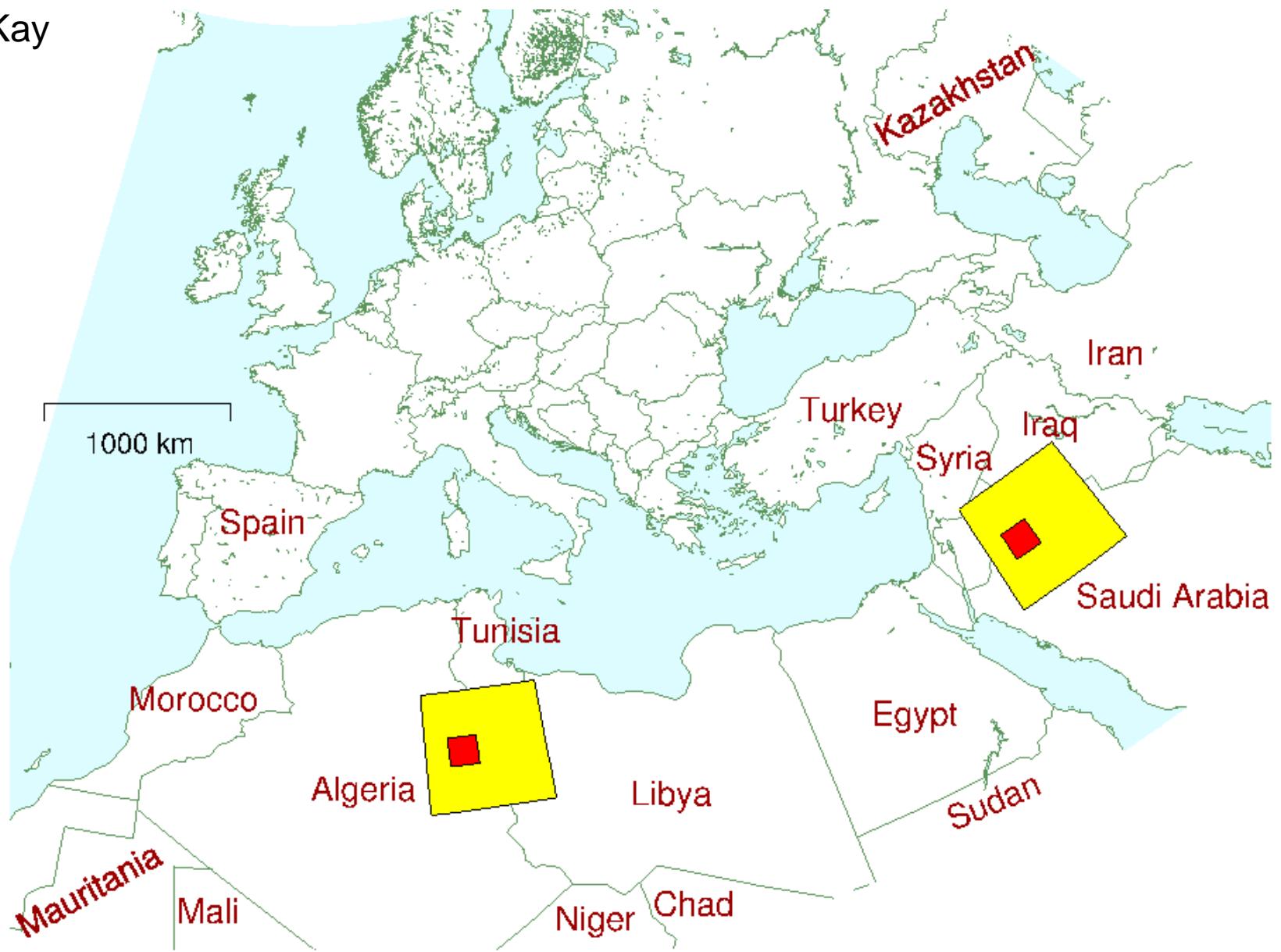
Rdeče 
samo elektrika
(21 kWh/dan.o)



7. Kakšno prihodnost si želite?

http://stres.a.gape.org/projekti/VILI_KOVACIC/soncna_en_vili_kovacic.htm

8. Temno ali sončno ?



Yellow: 125 kWh/d/p for 1 billion people; Red: 125 kWh/d/p for 60 million people
(assuming 15 W/m²)

Sončna energija

delajoče elektrarne ob koncu 2011 - instalirana moč:

68 GW fotovoltaičnih elektrarn (28 GW novih v 2011)

http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/EPIA_docs/publications/epia/Annual_Report_2011.pdf&t=1350151521&hash=8fb08d970a4850a95a35df7808b208f3

(proizvodnja ~1/9 do 1/6 instalirane moči)

~1 GW termosolarnih

Sončni kolektorji - ogrevanje (sanitarne) vode - manj vredna energija od električne, MacKay za VB ocenjuje njen prispevek na 13 kWh/dan/osebo pri "Londonskem" topotnem toku ~100 W/m².

Kljub temu znaten vir energije.

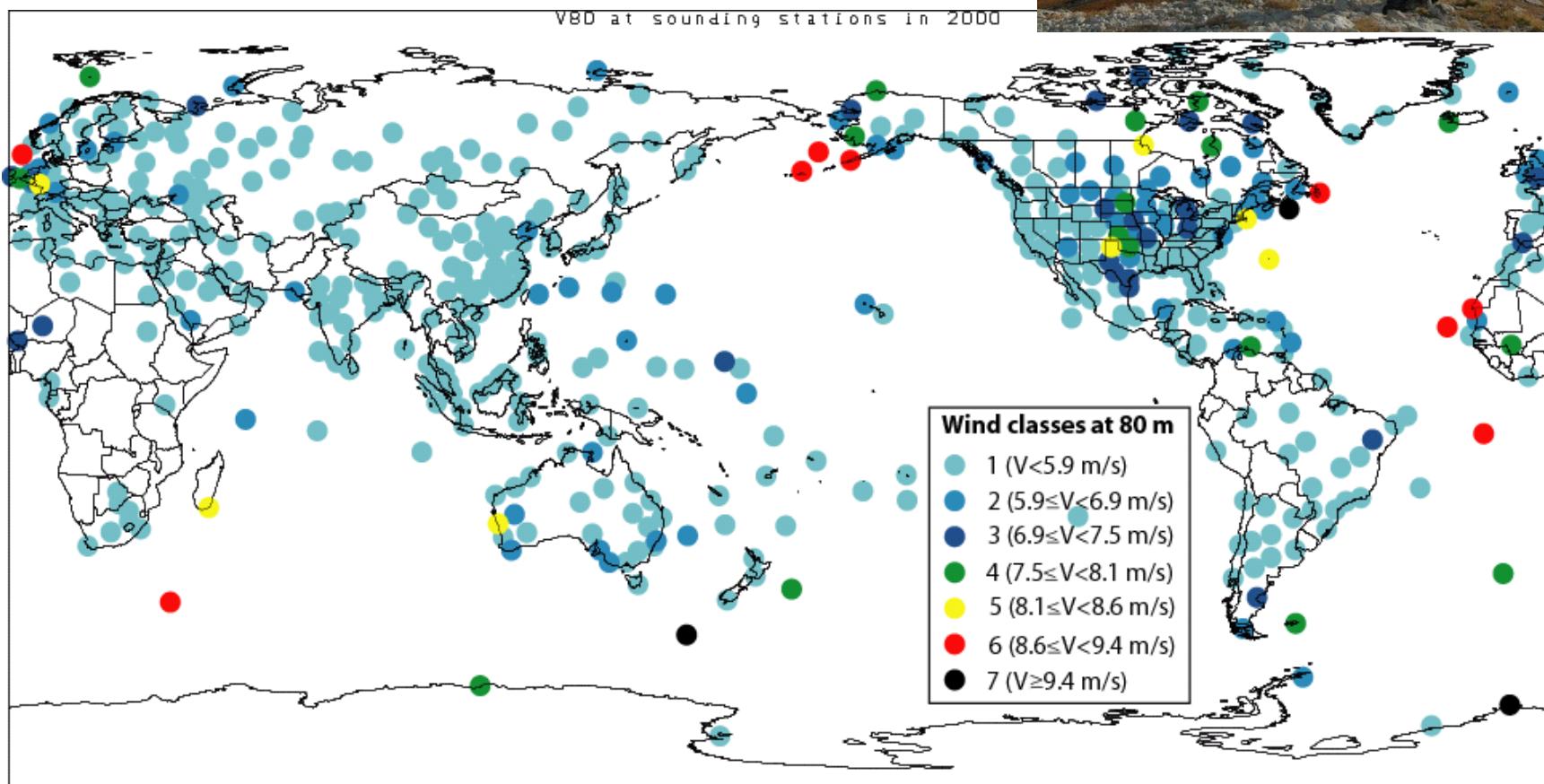
V SLO ~20 W/m²



Manzanares -sončni dimnik, Španija, 1982-1989:
poskusni obrat, proizvaja
 $P_{el} \sim 50 \text{ kW}$,
gostota moči 0.1 W/m^2

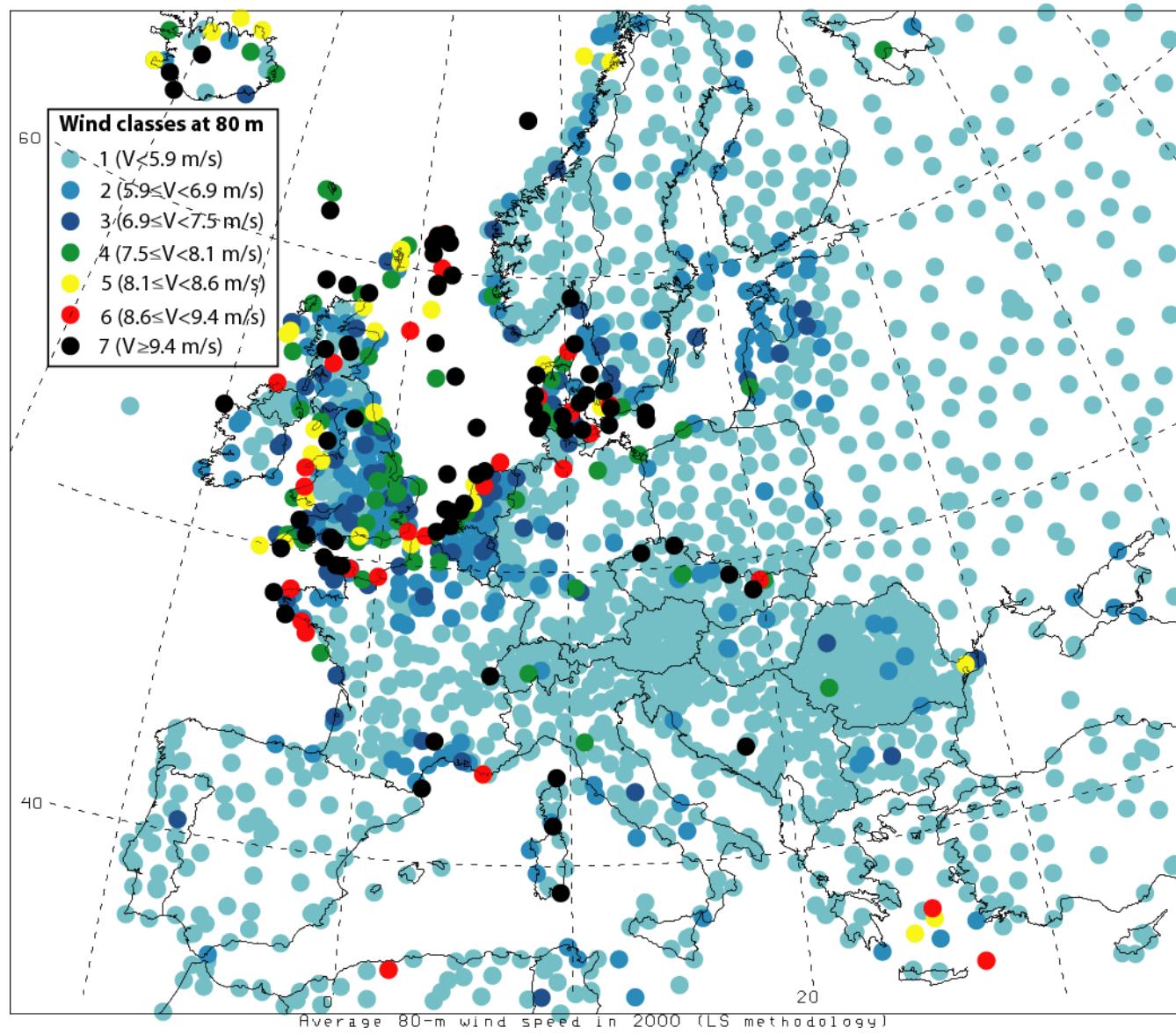
Veter

Izkoriščanje vetra za proizvodnjo električne energije začne pri povprečnih hitrostih vetra ~6m/s (wwea)



**Evaluation of global wind power C. Lozej Archer, M. Z. Jacobson
(Stanford Univ.) Journal of Geophysical Research - Atmospheres in 2005**

Evropa

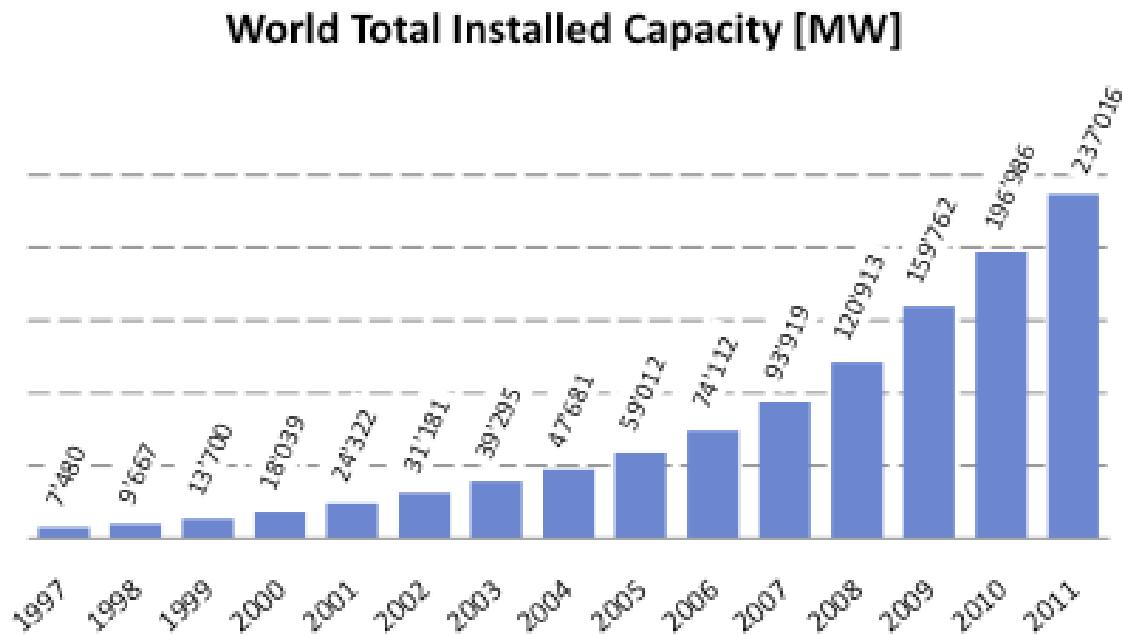


Praktično uporaben svetovni vetrni potencial je ocenjen na 20 TW

(Science. 13.Aug, 2010)

(celotna svetovna poraba vseh vrst energije 15 TW)

Pri gostoti moči 2.5 W/m² 15 TW pomeni površino 6 Tm² = 6 milijonov km² (Evropa: 10 milijonov km²)



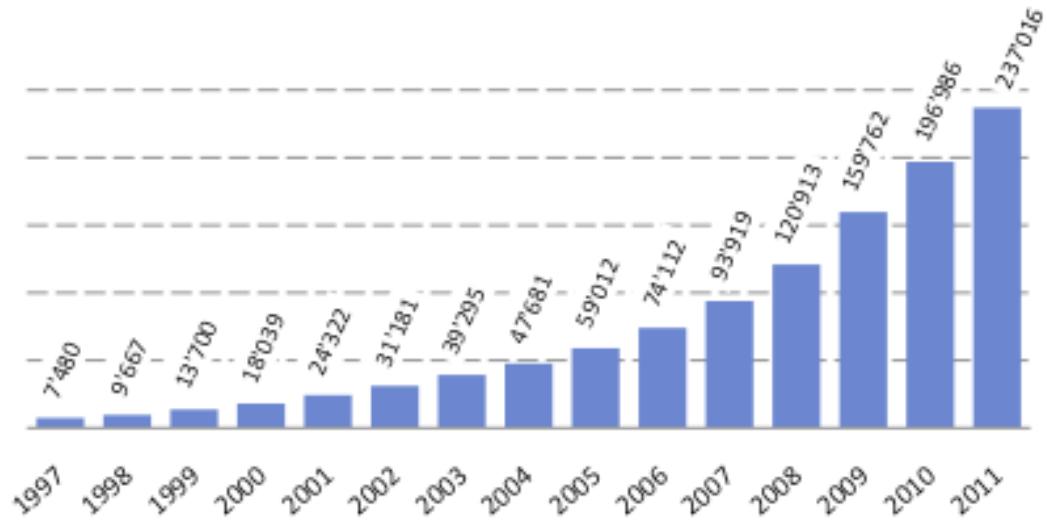
Country	Total Capacity end of 2011 [MW]	Added Capacity 2011 [MW]	Total Capacity end 2010 [MW]	Added Capacity 2010 [MW]	Total Capacity end 2009 [MW]
China *	62,733	18,000	44,733	18,928	25,810
USA	46,919	6,810	40,180	5,600	35,159
Germany	29,075	2,007	27,215	1,551	25,777
Spain	21,673	1,050	20,676	1,515	18,865
India *	15,800	2,700	13,065	1,258	11,807
Italy *	6,747	950	5,797	950	4,850
France	6,640	980	5,660	1,086	4,574
United Kingdom	6,018	730	5,203	962	4,245
Canada	5,265	1,267	4,008	690	3,319
Portugal *	4,290	588	3,702	345	3,357
Denmark	3,927	180	3,803	309	3,460
Sweden	2,816	746	2,052	603	1,450
Japan	2,501	167	2,334	251	2,083
Rest of the World*	24,200	6,000	18,201	3,191	15,010
Total*	238,604	42,175	196,629	37,642	159,766

© WVEA 2012

WVEA

World Wind Energy Assoc

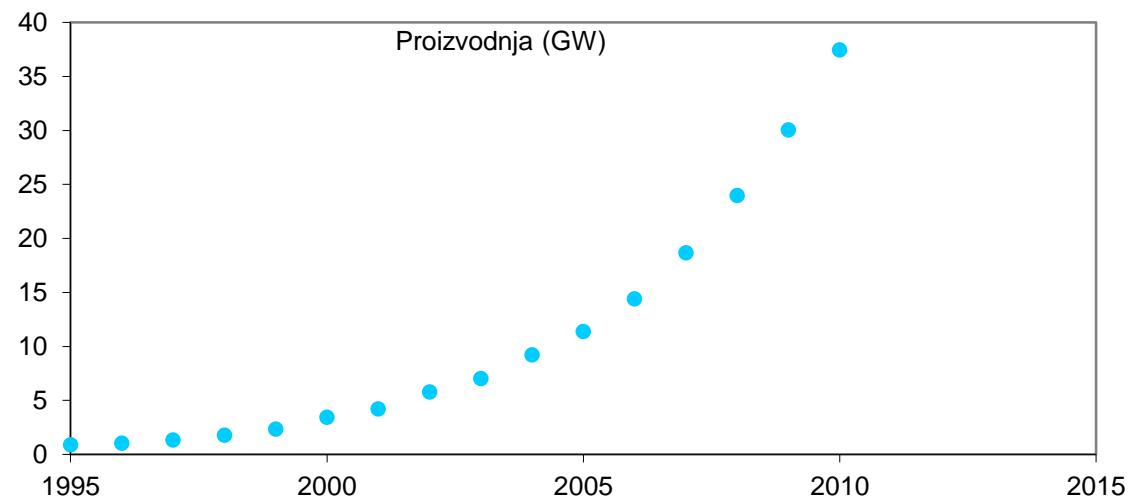
World Total Installed Capacity [MW]



World Wind Energy Assoc

2010 (World Wind Energy Report 2010, WWEA):
instalirana moč 197 GW
povprečna proizvodnja 37 GW:

20-25 %



graf: <http://www.eia.doe.gov/>

Izkoriščanje virov, venter:

$$dm = \rho S v dt$$

$$dW_k = \frac{1}{2} v^2 dm$$

$$P = \frac{dW_k}{dt} = \frac{v^2 \rho S v dt}{2dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

moč kin. energije vetra;

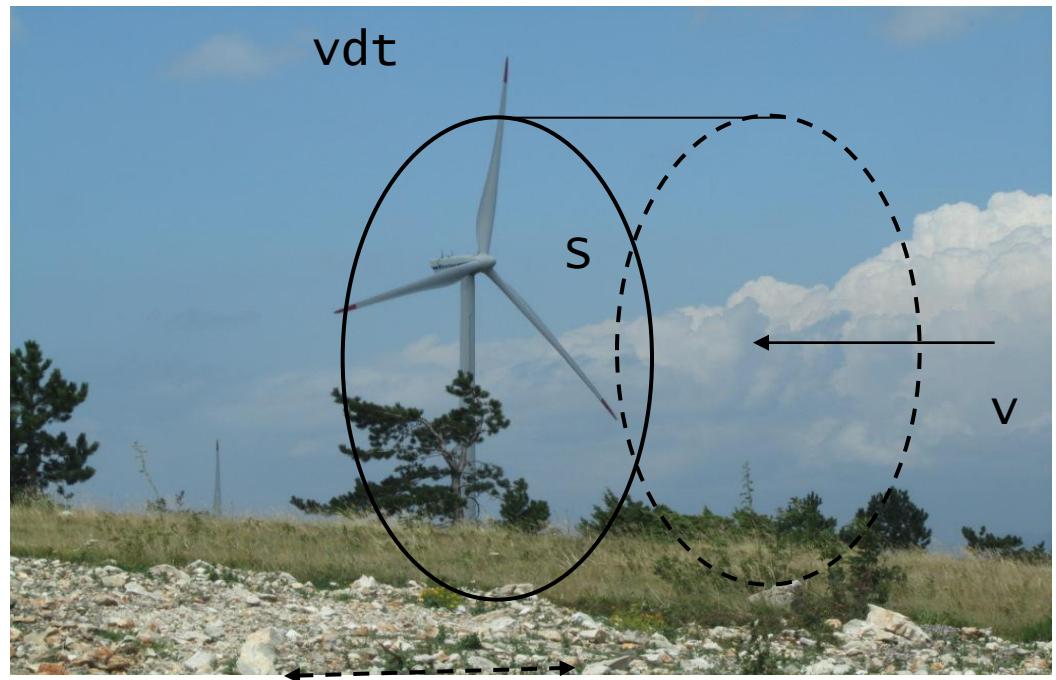
$$P \propto v^3!$$

celotne moči ni mogoče izrabiti:

Betzova meja:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho S v^3 \right)$$

...analiza ene same vetrnice pravzaprav ni problem...



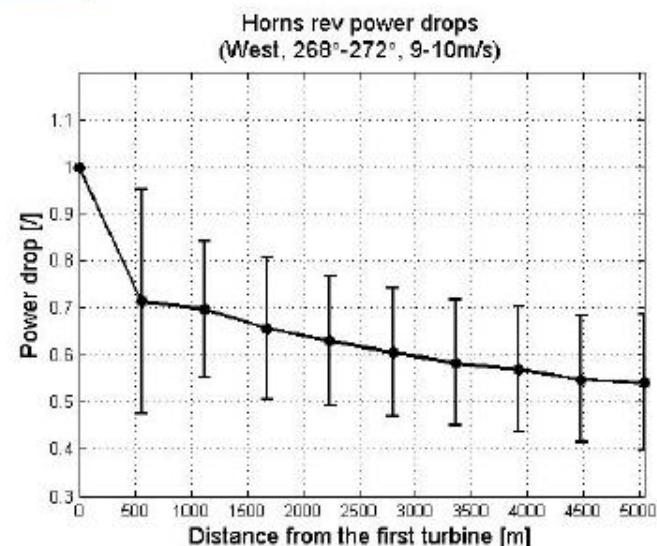
Slika: Vrataruša nad Senjem 14*3 MW, Vestas turbine. Povprečna moč 25% nazivne moči v letu 2010/2011

... interakcija vetrnic ...

Horns Rev - Danska

Wake effects at Horns Rev and their influence on energy production

Martin Méchali(1)(*), Rebecca Barthelmie(2), Sten Frandsen(2), Leo Jensen(1), Pierre-Elouan Réthoré

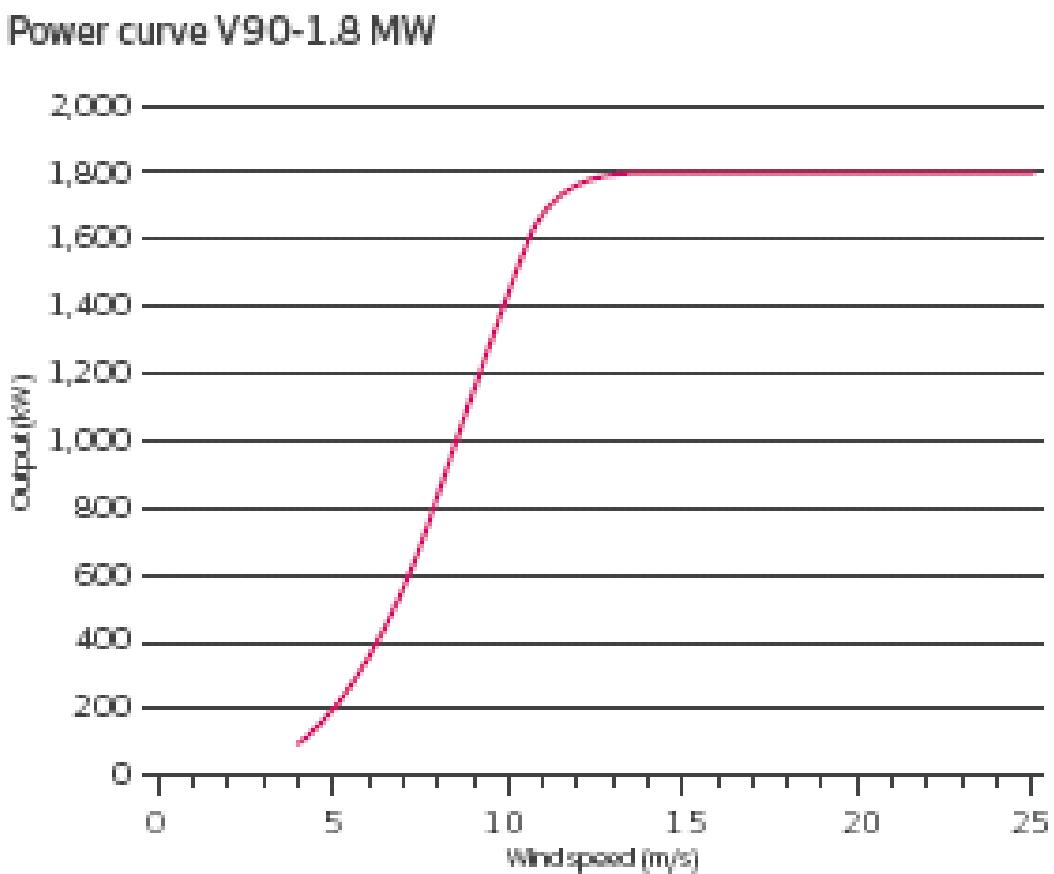


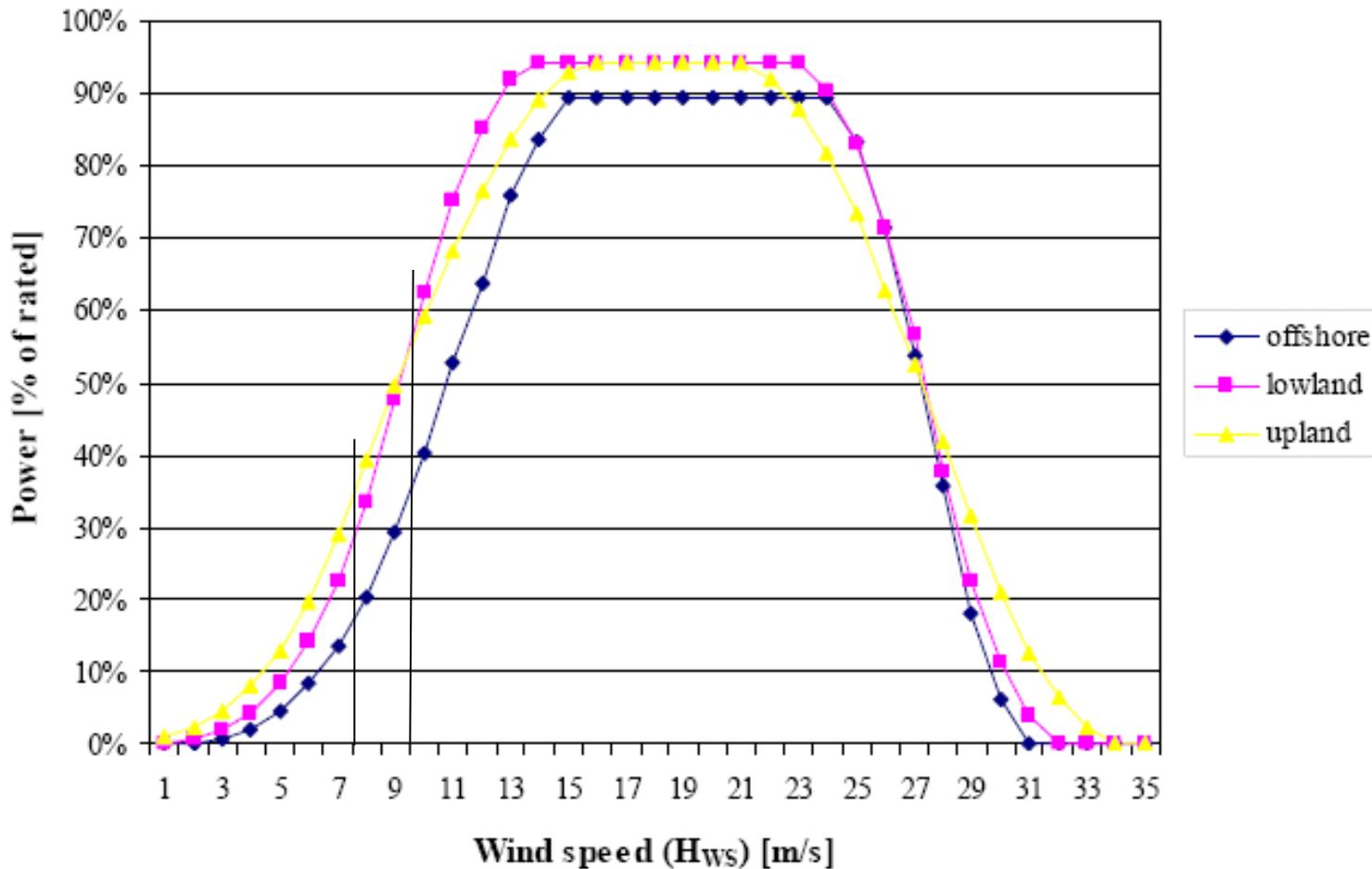
Razdalja med vetrnicami - vsaj petkratnik premera

Figure 5.6 Relative power drop 9-10m/s

Vestas V90 1.8 MW/3MW (Vestas - Danska)

- > 8 m/s 103.5 dB(A)
(za 1.8 MW)
- Rotor diameter 90 m
- Nominal revolutions
14.5 rpm (16.1 - 3 MW)
- Hub heights 80 m do
105 m
- 100 % moč pri vetu
~13 m/s



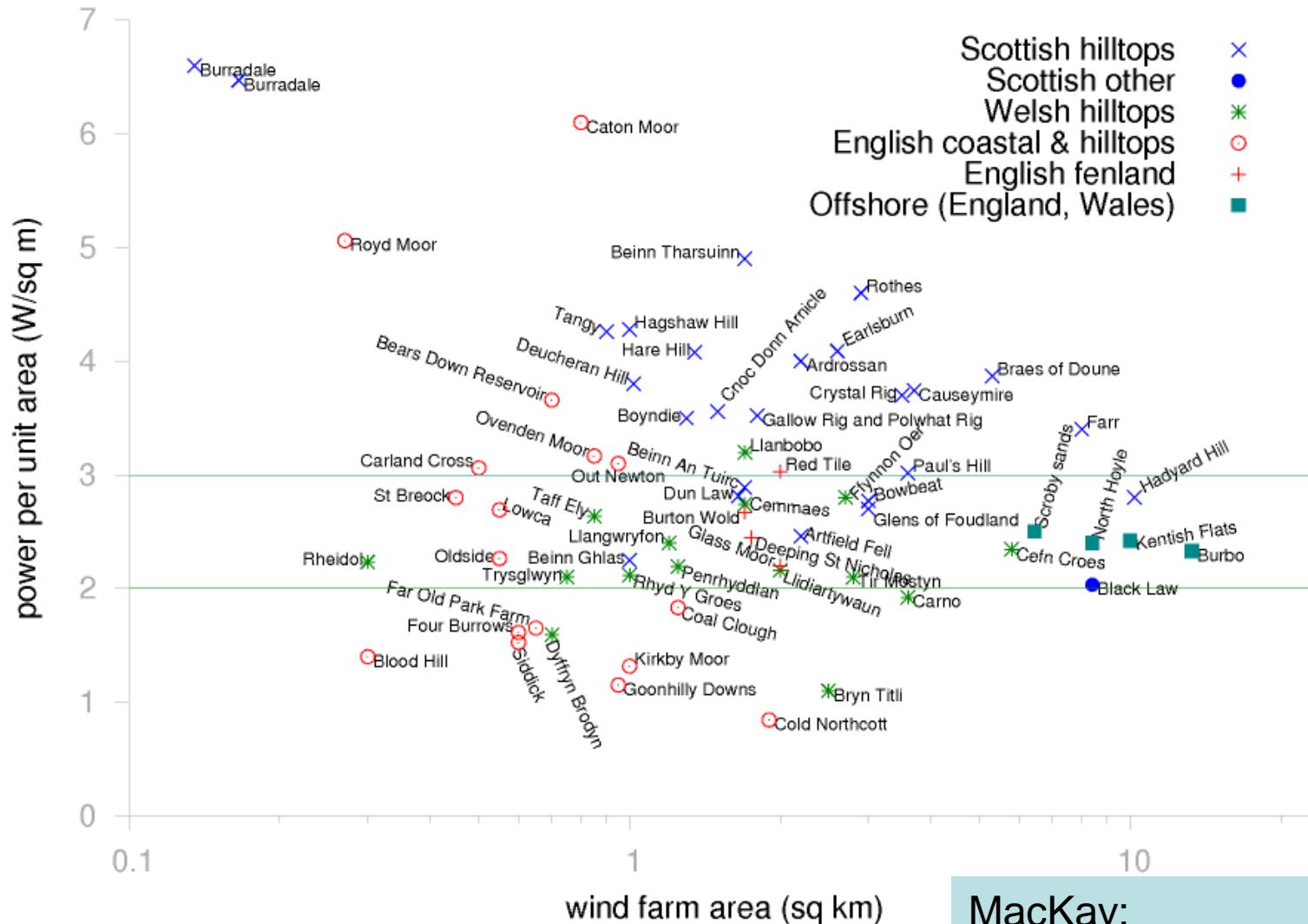


Projekcije obnašanja vetrnih turbin za 2030:

Equivalent Wind Power Curves

J R McLean, Garrad Hassan and Partners Ltd

Powers per unit area of British wind farms, v farm size



MacKay:

veter (če ga imamo): ~2.5 W/m²

Thanet offshore wind farm (Anglija)

največja vetrna farma na svetu,
odprta septembra 2010.

100 turbin, 35 km², 500 m med
turbinami, 800 m med vrstami turbin

300 MW moči, napovedani output
~25-35%

(gostota moči 2-3 W/m²)

Rated Power 3000 kW

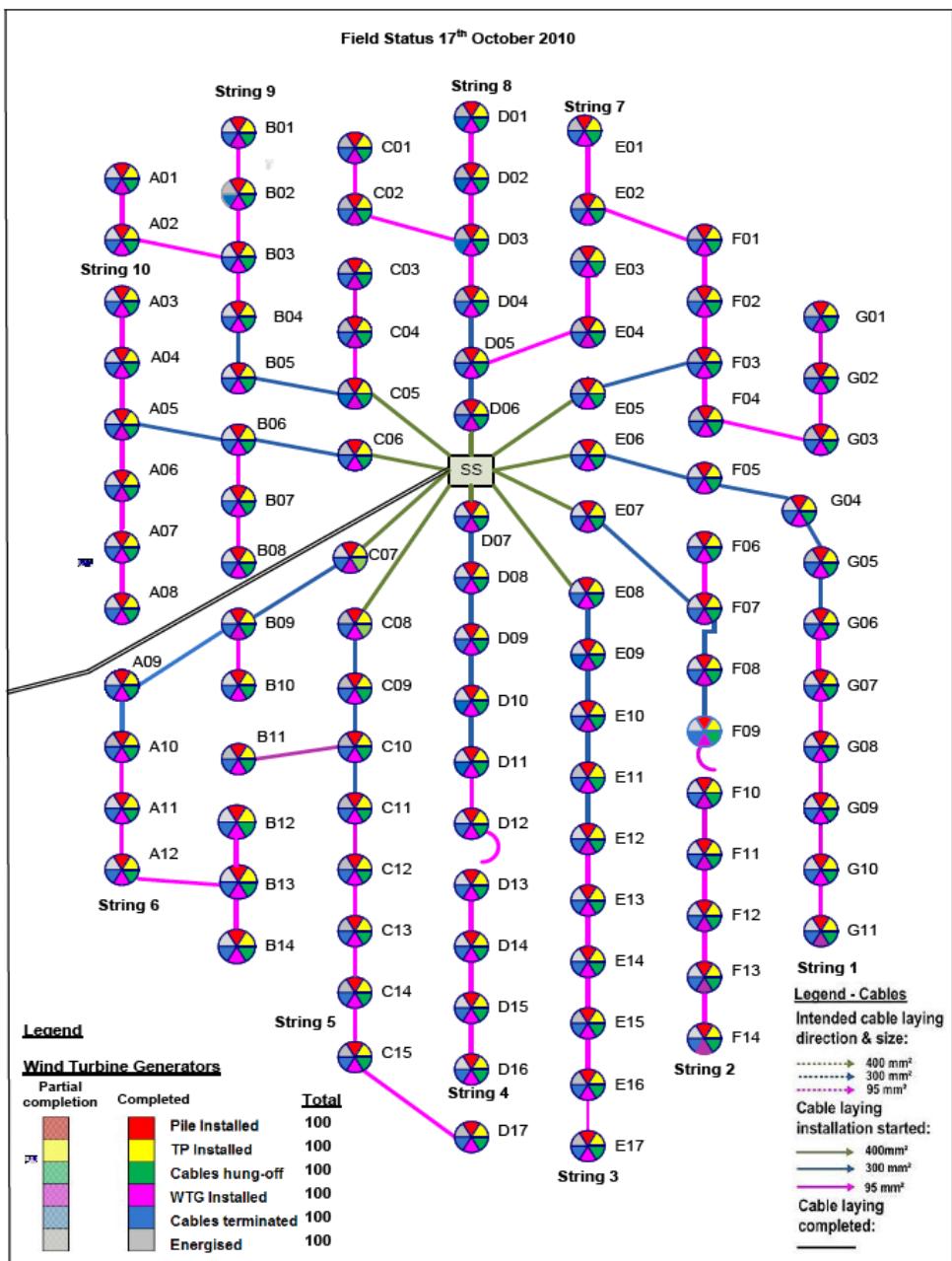
Rotor diam. 90 m

Cut In 4 m/s

Rated 15 m/s

Cut Out 25 m/s

vir: <http://www.vattenfall.co.uk/en/thanet-offshore-wind-farm.htm>



Vaje - veter:

- mejna plast - razlog za višje turbine
- Betzova meja - izpeljava

SLO vetrni potencial na prvi način:



Gorski grebeni:

- Tauernwind: $13 * 1.75 \text{ MW} = 23 \text{ MW peak}$
- proizvodnja: $\sim 40 \text{ GWh/leto} = 4.5 \text{ MW na 2 km grebena.}$
- Slovenija $\sim 100-200 \text{ km grebenov} = 250-500 \text{ MW povprečne proizvodnje (3-6 kWh/dan.o)}$
- Črtamo grebene v območju Natura 2000 ostane nekaj 10 MW do morda 100 MW - to pomeni 0.5-1 kWh/dan/osebo...

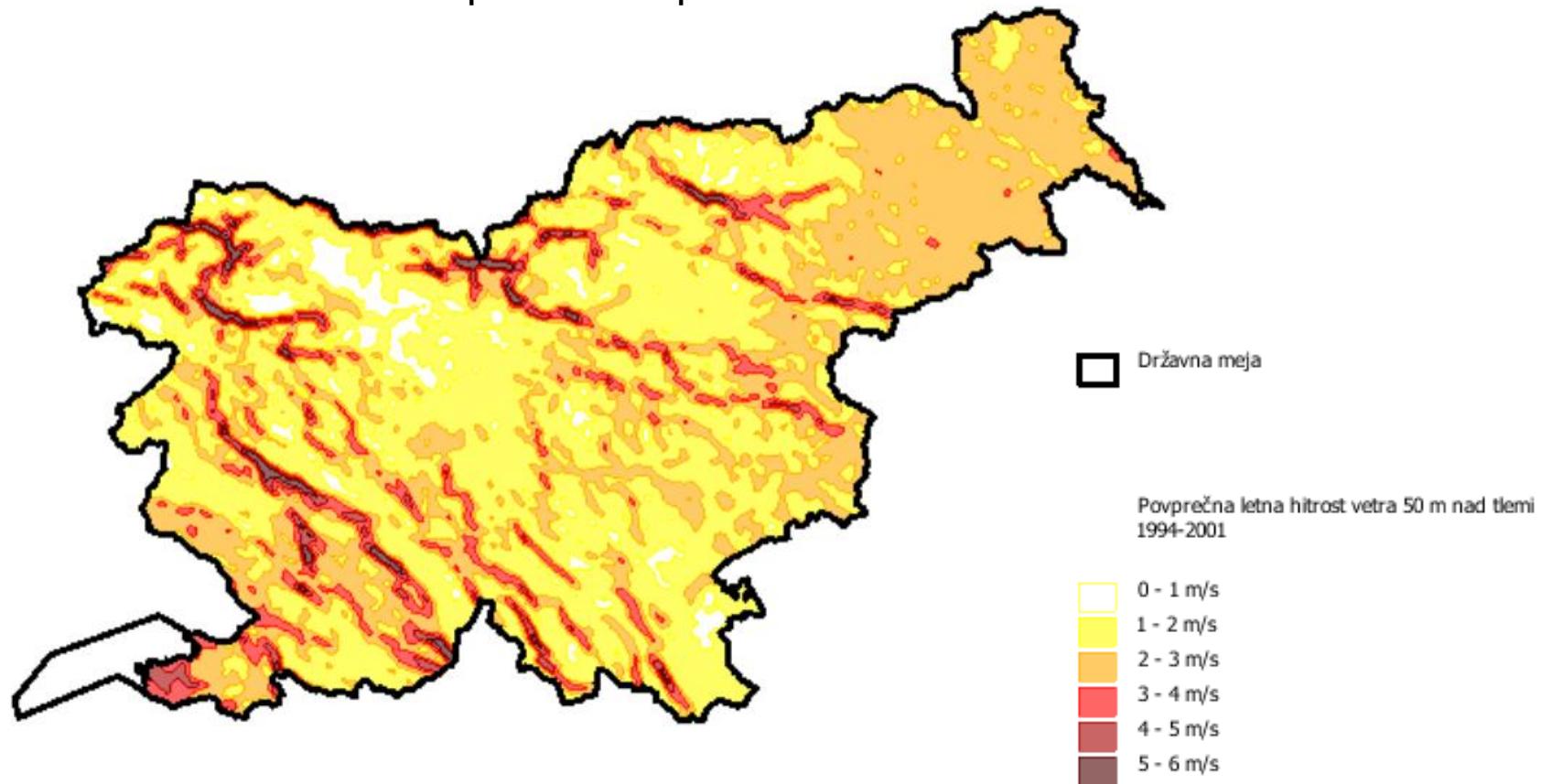
SLO vetrni potencial na drugi način:

Po MacKay-u: vetrne elektrarne proizvajajo $2-3 \text{ W/m}^2$ površine ($v_{\text{veter}} >= 6 \text{ m/s}$)

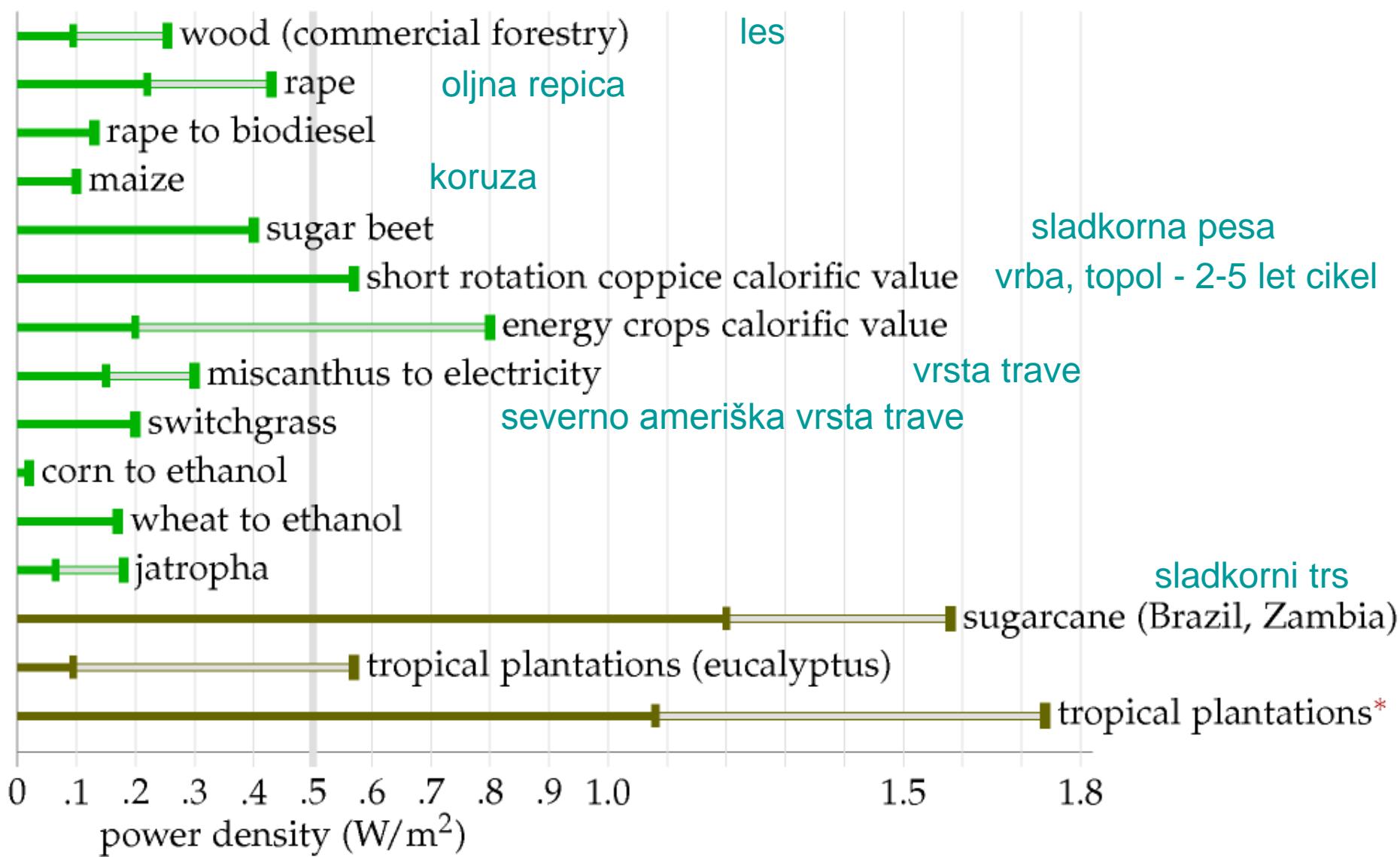
Površina "z rjavo barvo" ($v > 5 \text{ m/s}$) na zemljevidu je $100-200 \text{ km}^2$, torej je slovenski vetrni potencial $\sim 200-600 \text{ MW}$. To je $2.5-7 \text{ kWh/dan.o}$.

Približno enak rezultat kot pri prvi oceni.

Seminar o vetru iz 2010 - pretirano optimistična ocena : 15 kWh/dan.o



Plant power per unit area



<http://www.biofuelstp.eu/crops.html>

* assumes genetic modification, fertilizer application, and irrigation

For sources, see D J C MacKay (2008) Sustainable Energy - without the hot air

Biomasa

Glej podrobnosti v seminaru
JTE 2010- biomasa

Slovenski gozdovi:

0.2 W/m² ~2 GW primarne energije pri letnem prirastku 7 Mm³/letu in sežigni toploti 2500 kWh/m³ in 10000 km² površine.

Poraba goriva za sečnjo in spravilo 1.5 litrov/m³ = 15 kWh/m³ (brez odvoza iz gozda)

Ustni vir - skupaj ~6 litrov/m³ = 60 kWh/m³

je ~25 kWh/dan/osebo
(ce sežgemo ves les!!!)

Realno - posekamo le
pol prirastka, sežgemo
pol posekanega.

**Les danes ~5 kWh/d.o,
(toplote)**

**potencial:
10 kWh/dan/osebo**



biomasa

Bioplín:

iz komunalnih deponij odpadkov:

0.5 ton odpadkov/leto/predivalca Slovenije, ~100 (20-800) m³ plina iz tone odpadkov - 5 kWh/m³ (CO₂ + metan). = 1 kWh/dan/osebo

(v praksi: deluje LJ, MB, CE 0.1 kWh/dan/preb)

(http://www.electrigaz.com/faq_en.htm in

www.energap.si/uploads/dep_%20plin.pdf)

iz živalskih odpadkov: 1 krava (bik) ~0.4m³ plina/dan, 70% metan ~5kWh/m³

(po [World Cow Resource Center](#)) Slovenija 500000 govedi (stat. letopis).

Je 0.5 kWh/dan/osebo (če zberemo VSE odpadke!!) (prašiči 500000, perutnina...)

iz čistilnih naprav kanalizacije: podatek za govedo/10 (zaradi mase) * 4 (Zaradi števila) =0.2 kWh/dan/osebo (če zberemo VSE odpadke!!!)

iz ostankov poljščin:

žita, koruza 700000 ton/leto pridelanih na ~130 km² - suho brez zrnja ~10% 4000 kWh/tono = ~0.5 kWh/dan/osebo (statistični letopis)

(10% mase upoštevam, ker večino pojedo domače živali in ljudje)

biomasa

Biodizel

oljna ogrščica:

2008: 4442 ha in 10949 ton pridelka (statistični letopis 2009, pogl. 16.8)

$1000 \text{ litrov}/\text{ha}/\text{leto} = 0.1 \text{ l}/\text{m}^2/\text{leto} \sim 0.1 \text{ W}/\text{m}^2$
(http://www.energap.si/uploads/biodizel_ok.pdf)



Bioetanol

sladkorna pesa:

2006: Slovenija .. 6684 ha in 262031 ton pridelka (v 2008 ni pridelka, stat. letopis 2009, 16.8)

= 4 kg sladkorne pese/ m^2/leto = 0.33kg etanola/ m^2/leto
= 10 MJ/ m^2/leto = **0.3 W/m²**

Podatki:

Tovarna Wissington VB: 55,000 ton bioetanola/leto iz 650,000 ton sladkorne pese.

(<http://www.britishsugar.co.uk/RVE29c095ba629149d391ce49792e8ab37b,,.aspx>) Metanol 29.7 MJ/kg



Težava: Poraba energije pri proizvodnji ~30-50% končne energije goriva !

01/12/2011

WASHINGTON – The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) is announcing its plan to defer, for three years, greenhouse gas (GHG) permitting requirements for carbon dioxide (CO₂) emissions from biomass-fired and other biogenic sources. The agency intends to use this time to seek further independent scientific analysis of this complex issue and then to develop a rulemaking on how these emissions should be treated in determining whether a Clean Air Act permit is required.

.....

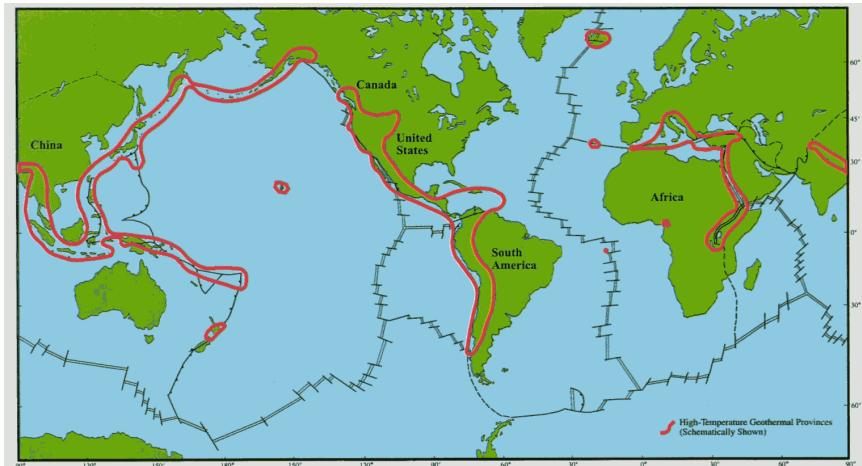
EPA will also further consider the more than 7,000 comments it received from its July 2010 Call for Information, including comments noting that burning certain types of biomass may emit the same amount of CO₂ emissions that would be emitted if they were not burned as fuel, while others may result in a net increase in CO₂ emissions. Before the end of the three-year period, the agency intends to issue a second rulemaking that determines how these emissions should be treated or counted under GHG permitting requirements.



Geotermalna energija: svetovna proizvodnja 0.01 TW električne in 0.03 TW toplotne

toplotna energija Zemlje, ki se sprošča ob razpadih radioaktivnih izotopov v zemeljski notranjosti

večina "nahajališč" na področjih močne tektonske aktivnosti



področja z ekonomsko smiselnim izkoriščanjem podzemne vode $T > 200^{\circ}\text{C}$

vir: World Energy Council,
<http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/overview.asp>

Potencial:

zemeljski konduktivni toplotni tok 0.1 W/m^2 v smeri površja.

Napovedi: 0.035 do 2 TW električne - odvisno od globine vrtin.

($0.035 \text{ TW} = 0.1 \text{ kWh/dan/prebivalca}$)

($2 \text{ TW} = 7 \text{ kWh/dan/prebivalca Zemlje}$)

~ 2 TW toplotne

<http://www.geothermal-energy.org>

Geotermalna energija

Svetovna proizvodnja:

11 GW inštalirana električna moč, 67 TWh/leto (70% inštalirane moči)

28 GW toplote

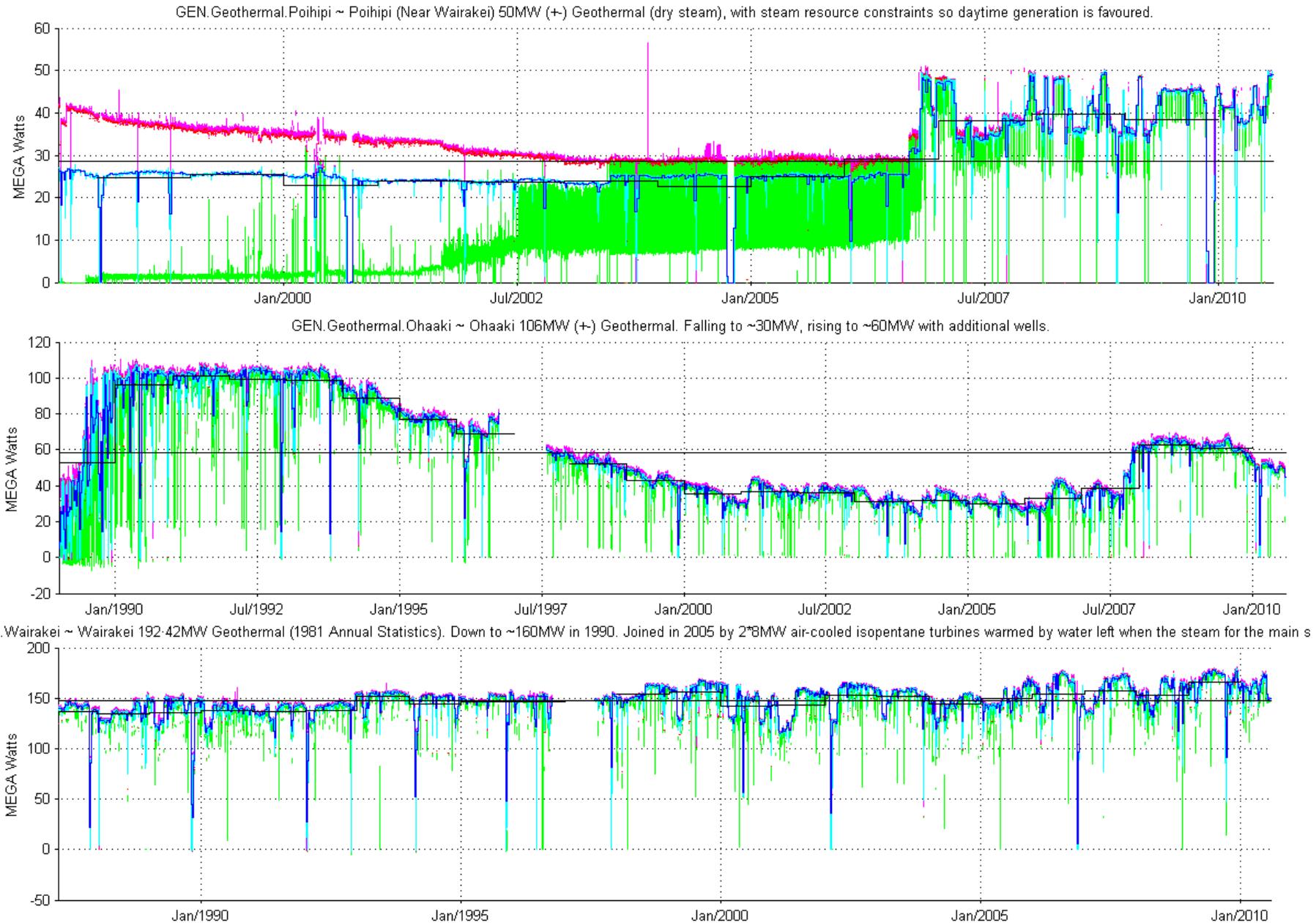


Pamukkale

Country	Electric Capacity (MW)
<u>USA</u>	2687
<u>Philippines</u>	1969.7
<u>Indonesia</u>	992
<u>Mexico</u>	953
<u>Italy</u>	810.5
<u>Japan</u>	535.2
<u>New Zealand</u>	471.6
<u>Iceland</u>	421.2

Geotermalna energija - obnovljiv vir? DA in NE - mogoča je lokalna "izraba".

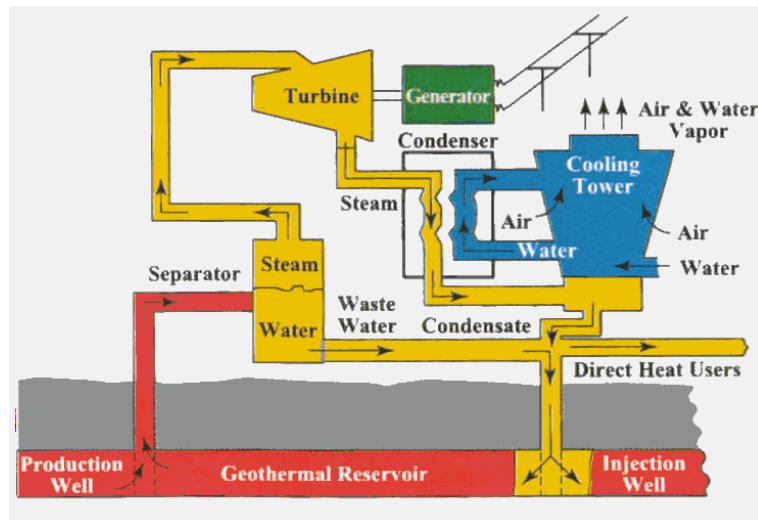
Proizvodnja treh geotermalnih elektrarn na Novi Zelandiji.



Geotermalna energija

načini izkoriščanja

- hidrotermalni sistemi; neposredna izraba tople vode, ki prejme toploto od kamnin
- geotermalne toplotne črpalke; neposredno izkoriščanje toplote
- HDR (hot dry rock) sistemi; drobljenje segretih kamnin in umetni tok vode preko le-teh



shema tipične
geotermalne elektrarne,
ki izkorišča podzemno
vodo temp. $>150^{\circ}\text{C}$;
0.1 – 150 MW

vir: World Energy Council,
[http://www.worldenergy.org/wec-geis/
publications/reports/ser/overview.asp](http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/overview.asp)

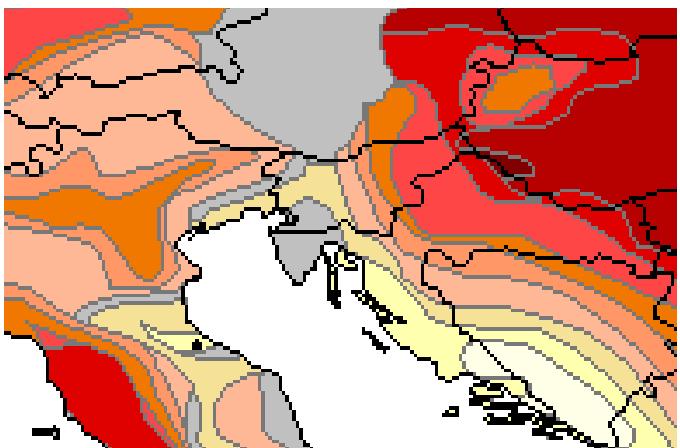
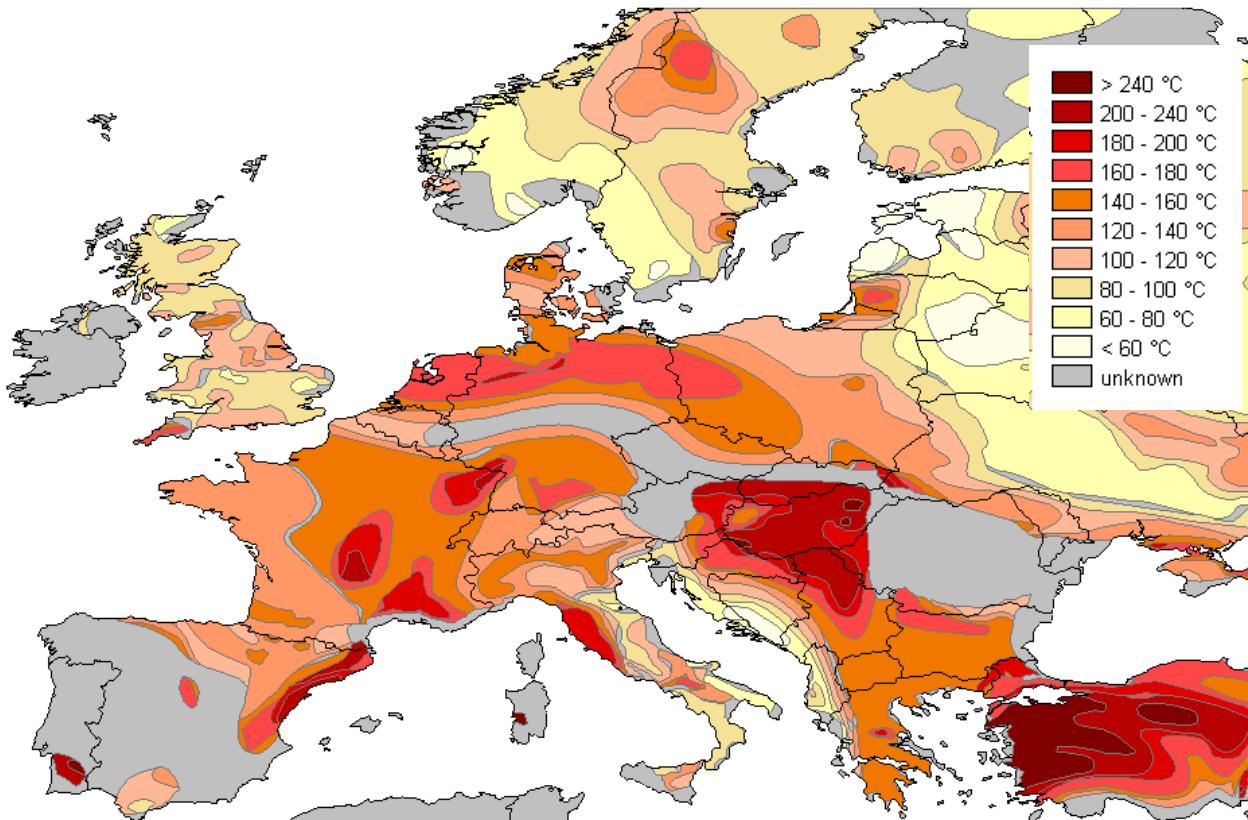
Slovenija



Terme Ptuj

EU-MENA report:

Figure 3-8: Temperature at 5000 m
Depth for Hot Dry Rock Geothermal
Power Technology /BESTEC 2004/



Slovenija

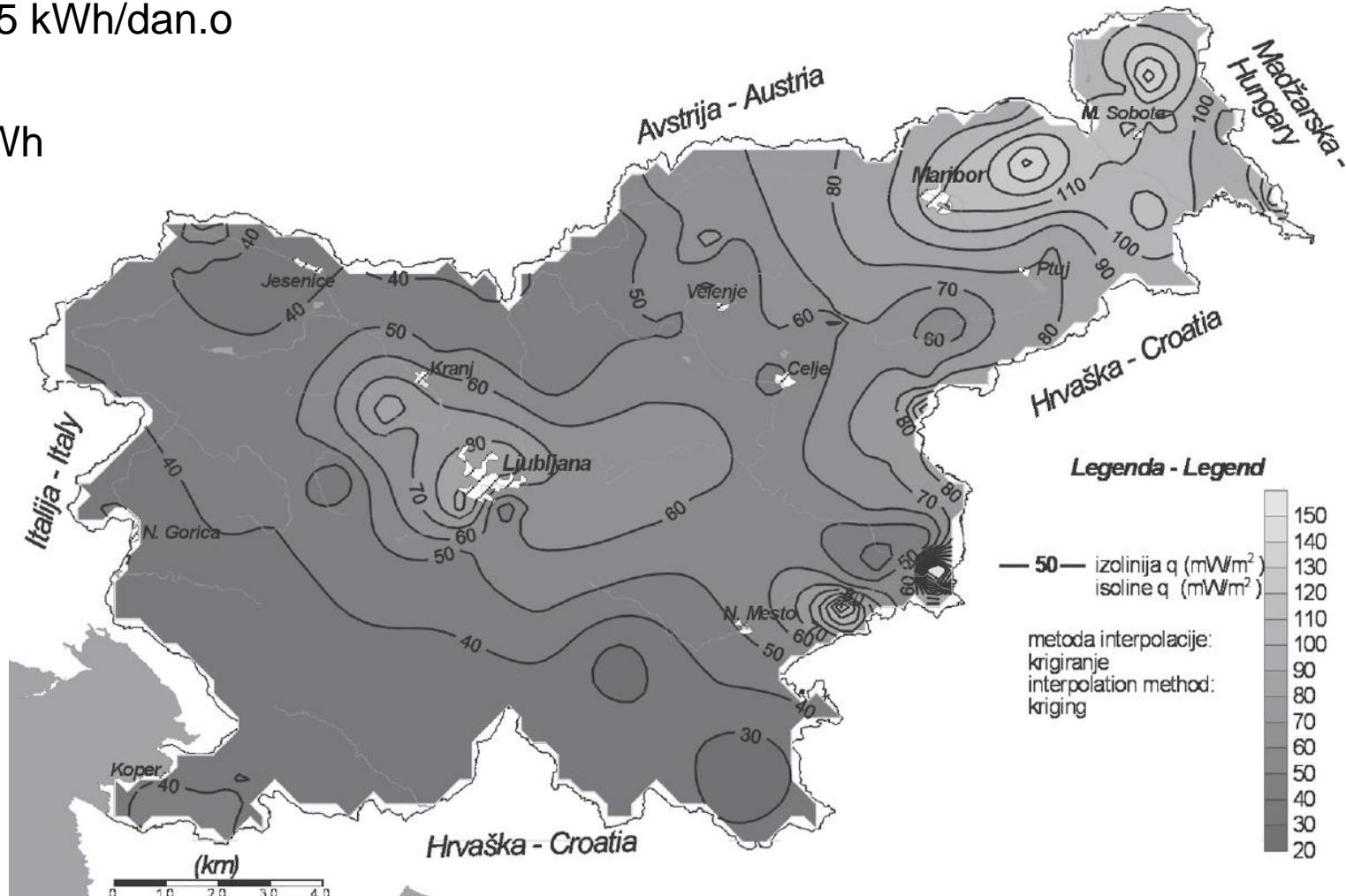
teoretično:

0.1 W/m² ~ 25 kWh/dan.o

realno

med 0 in 1 kWh

Rajver, Ravnik, **Geotermična slika Slovenije-.... GEOLOGIJA 45/2,**
519–524, Ljubljana 2002

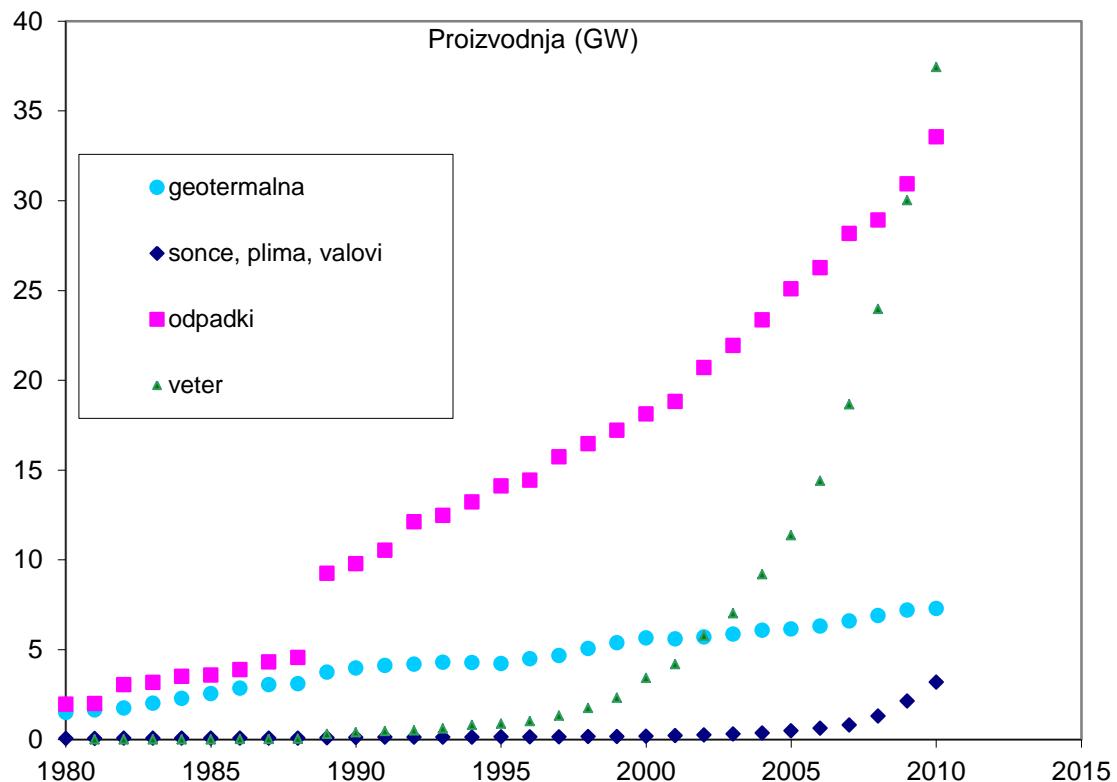


površinska gostota toplotnega toka mW/m²

Glej še
seminar JTE
2010: sonce-
geotermalna
energija

planet - elektrika iz obnovljivih virov

eia.doe.gov



2007:

Premog ~4 TW topl.

Nafta 5.5 TW topl.

Plin ~4 TW topl.

Fosilna elektrika ~1.5 TW

Hidro ~0.35 TW

Jedrska ~0.3 TW

sonce, plima,
valovi 2010

~3 GW

planet – Sprememba 2009-2010

eia.doe.gov

Premog	+300 topl.	
Nafta	+170 topl.	
Plin	+210 topl.	
Fosilna elektrika	+80	Spremembe
Hidro	~0	povprečne
Jedrska	~0	moči v GW
Veter	+7	
Sonce	+1	
Odpadki, biomasa	+2	

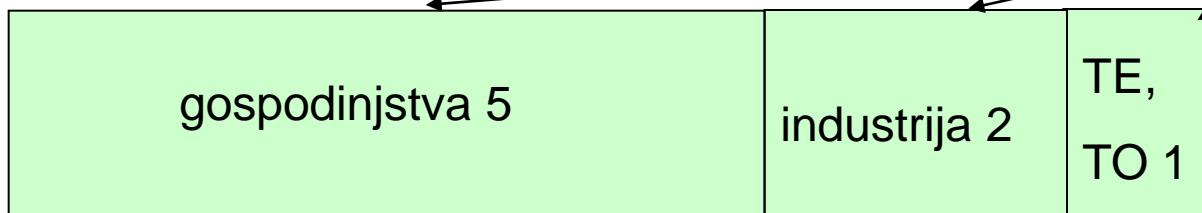
Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2008)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan



OBNOVLJIVI
VIRI (les...)

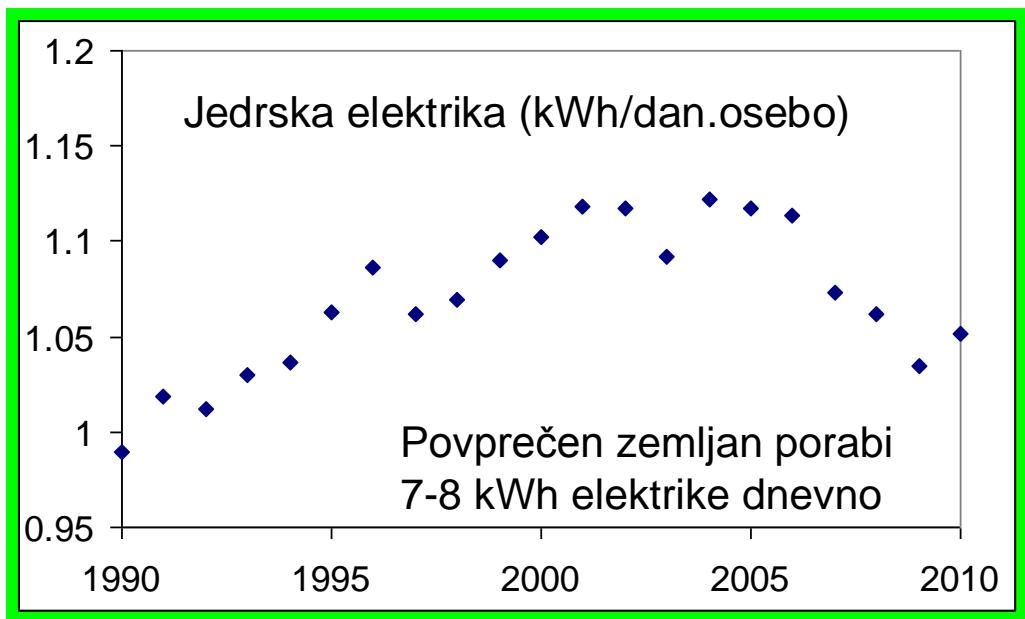


elekt -rika
0.4

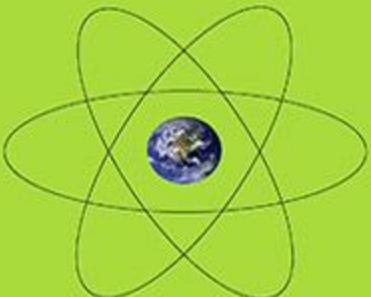
Jedrska energija

2012:

- ~430 delujočih reaktorjev
- ~ 60 v gradnji
- 2500 TWh/leto



POWER TO SAVE
THE WORLD THE TRUTH
ABOUT NUCLEAR ENERGY
GWYNETH CRAVENS



Nov, 2012:

Instalirana moč: 0.37 TW
proizvodnja: 0.29 TW
faktor izkoriščenosti 77 %
~13.5 % svetovne elektrike v 2011

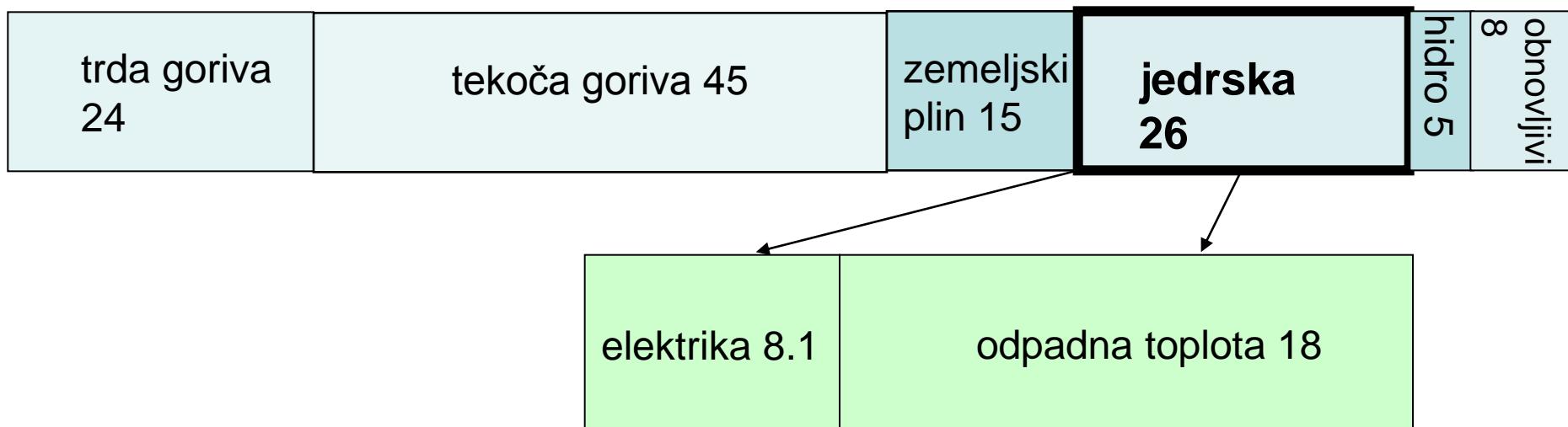
"Sežigna toplota" naravnega urana:
40000 kWh/kg

vir: world-nuclear.org

Energija v Sloveniji 2008 (statistični letopis 2009)

Oskrba z energijo

122 kWh/osebo/dan



(Natančneje 25.7 primarne energije in 8.07 električne)

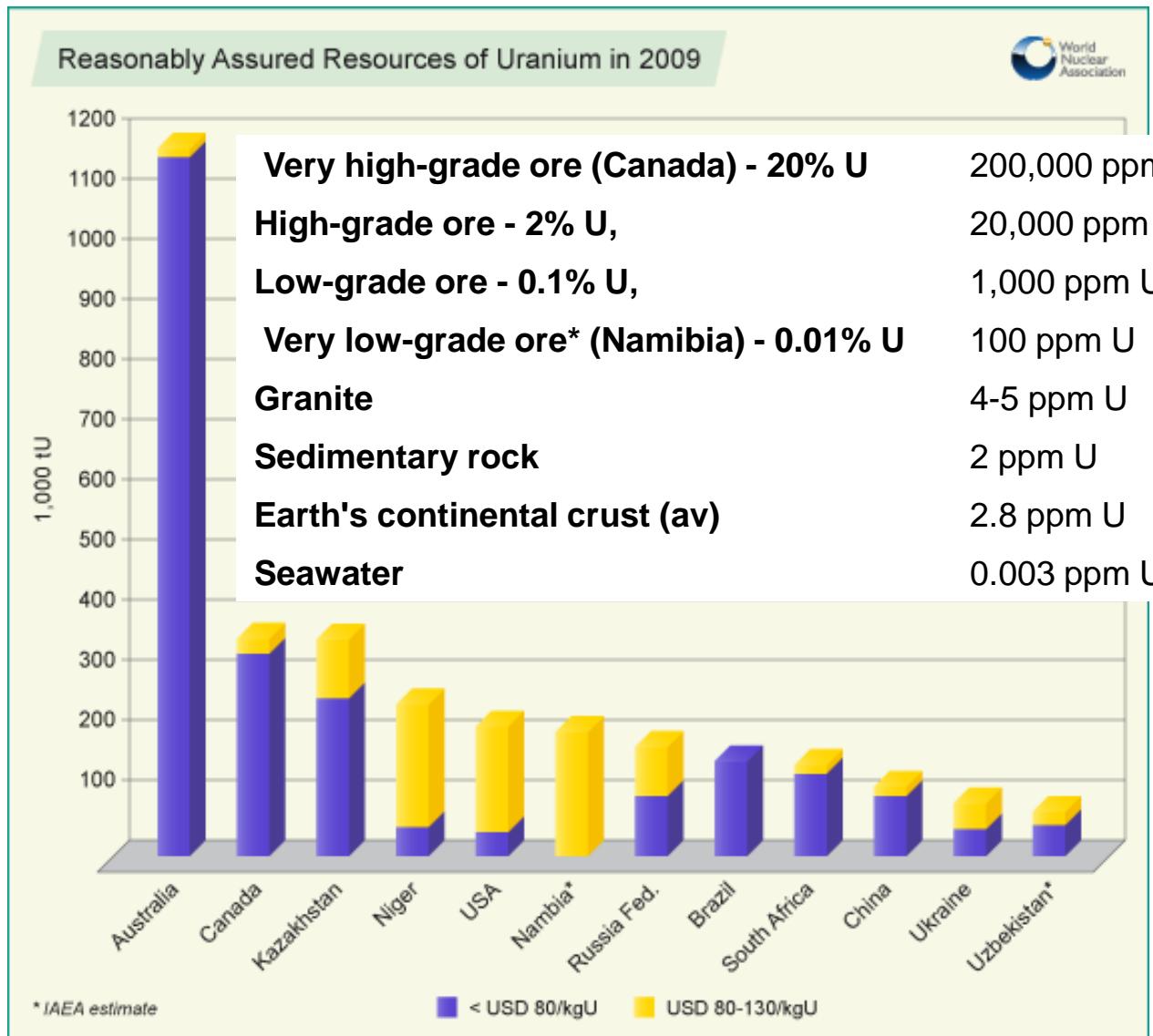
Dokazane in dosegljive zaloge urana (2009):

5.4 Mton

Zaloge "rastejo"

www.world-nuclear.org

Žirovski vrh:
~13.000 ton urana
ruda: 0.08%



MIT študija 2010: "Our analysis of uranium mining costs versus cumulative production in a world with ten times as many LWRs and each LWR operating for 60 years indicates a probable 50% increase in uranium costs."

Zaloge urana v SLO -Žirovski vrh

www.rudnik-zv.si: 16.000 ton U₃O₈ = 13.500 ton U

V nekaj letih delovanja izkopanih 452 ton U (za 4-5 let delovanja NEK).

Rudarjenje opuščeno zaradi neekonomičnosti.

Samo 0.085% Urana v rudi, tipična ruda 0.2-0.25%...

Nacionalni energetski program (NEP):

Slovenija ima strateško pomembne zaloge urana v Rudniku urana Žirovski vrh v zapiranju.

Skupne dokazane in ocnjene zaloge urana po proizvodni ceni, nižji od 130 US\$/kgU, znašajo 12.200 ton in zadostujejo za najmanj 50 let proizvodnje Jедrske elektrarne Krško.

Cena urana iz Žirovskega vrha z 60 US\$/kgU ni bila konkurenčna na svetovnem trgu, kjer je bila cena dolga leta stabilno na 20 US\$/kgU, konec leta 2008 se je povečala na 140–150 US\$/kg.

Je jedrska energija obnovljiv vir?

Najprej definicija "obnovljivega vira":

Vir je obnovljiv, če ga je za 1000 let !

(tako pravi MacKay, pa pred njim še kdo...)



Današnja tehnologija (world-nuclear.org) :

68.000 ton urana letno za današnjih 0.37 TW el. moči in 0.3 TW proizvodnje pri zalogah 5.4 Mton pomeni 80 let. **NI OBNOVLJIV VIR ! (1000 let: 0.5 kWh/d/o)**
(=180 ton naravnega urana letno za 1 GW elektrarno, MacKay pravi 162 ton, =125 ton za NEK)

Nove tehnologije:

- Uran v morju 4000 Mton, izkoristimo 10% Urana:
 - današnja tehnika **6kWh/dan.o** za 1000 let
 - oplodni reaktorji $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ 60 krat bolj učinkoviti od današnjih **350kWh/dan.o**
- Torij kot gorivo - možen oplodni torijev reaktor $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$
1.6 Mton Th naj bi bilo mogoče spremeniti v **~25 kWh/dan.o** za 1000 let
- Fuzija litij... **10-100 kWh/dan.o** za 1000 let,
devterij **30000 kWh/dan.o** za **1000000 let** in **60 milijard ljudi**

Nuclear Fission ('sustainable' = 1000 years)

MacKay

Uranium

Assuming 27 Mt U
recoverable

Once-through

Mined
uranium

0.55 kWh/d

Fast breeder

33 kWh/d

Ocean
uranium

7 kWh/d

River
uranium

.1 kWh/d

5 kWh/d

Thorium

Conventional
reactor

Mined
Thorium

4 kWh/d

"Energy
amplifier"

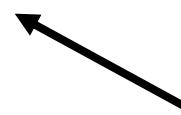
24 kWh/d

420 kWh/d

MIT študija, sep. 2010:

"what we found was that, at any reasonable expected growth of nuclear power over this century, the availability of uranium will not be a constraint."

Assuming 1.6 Mt Th
recoverable



www.world-nuclear.org ocenjuje
zaloge Th na vsaj 6 Mton

Odpadki - jedrski - nejedrski, odnos do prihajajočih generacij, etika...

Dragi sin,

v 60 letih sem vsak dan porabil 8 kWh elektriKE iz JE Krško.

Zato ti zapuščam:

- 10 litrov (~25 kg) nizko in srednje radioaktivnih odpadkov
- 0.5 kg visoko radioaktivnih odpadkov

Vsak dan sem porabil tudi 8 kWh elektriKE iz termoelektrarn v Šoštanju. Tebi ostane:

- 200 ton CO₂ (ujeti ga moraš sam)
- 50 ton pepela in sadre (pospravljeni v rudniku).

(Če bi 8 kWhe dobil iz plinske elektrarne bi ti v atmosferi zapustil 60 ton CO₂ in 0.5 ton CH₄ = skupaj 70 ton CO₂ ekv.)

Želim ti prijetno prihodnost,

I.

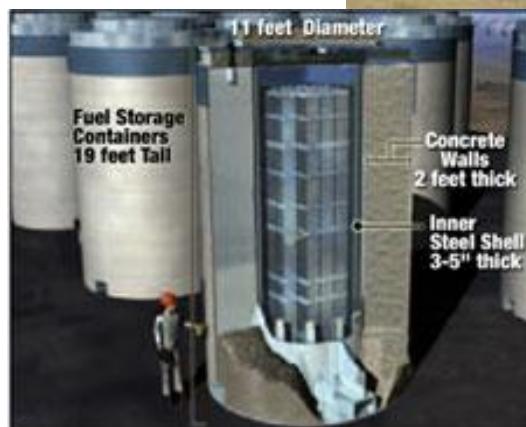
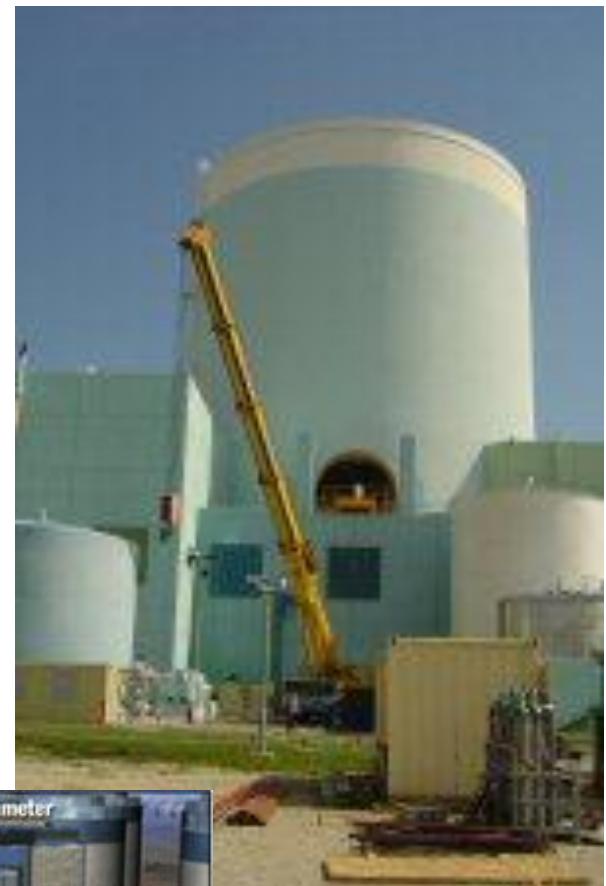


Jedrski odpadki - še malo drugače

18.000 m³ nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, ki bodo nastali v JE Krško (5000 m³ v času delovanja, 13000 m³ ob razgradnji) in 1000 ton visoko radioaktivnih odpadkov (~90% je izrabljeno gorivo) bi lahko uskladiščili v obstoječi zadrževalni hram ~7000 m³ v ustreznih zabojsnikih (to ni ravno praktična rešitev, zaradi nekaj MW toplote v izrabljenem gorivu).

In v njem bi ostalo dovolj prostora za vse radioaktivne odpadke morebitne nove elektrarne podobne velikosti !

suhi zabolnik za rabljeno gorivo:
premer 3.4 m, višina 6 m, teža 180 ton, za 24 gorivnih elementov
vir: Indian Point Energy Center



Brez
upoštevanja
možnosti
predelave!!!

Poraba prostora

- MacKay 1000 W/m² (elektrarna Sizewell)
- Krško 600 MW/ 10-20 ha,
Skladišče odpadkov 10-20 ha
Rudnik urana Žirovski vrh ~ 1km²
skupaj ~500 W/m²
(brez obrata za obogatitev)
- A. Lovins, Rocky Mountain Institute:
 - jedrska 24 W/m²
 - veter 70 - 70000 W/m² (70000 - upoštevan presek stebrov vetrnic)
 - sonce 23 W/m² (fotovoltaika na zgradbah - ne rabi prostora)

http://www.rmi.org/rmi/Library/2009-09_FourNuclearMyths

Poraba materiala

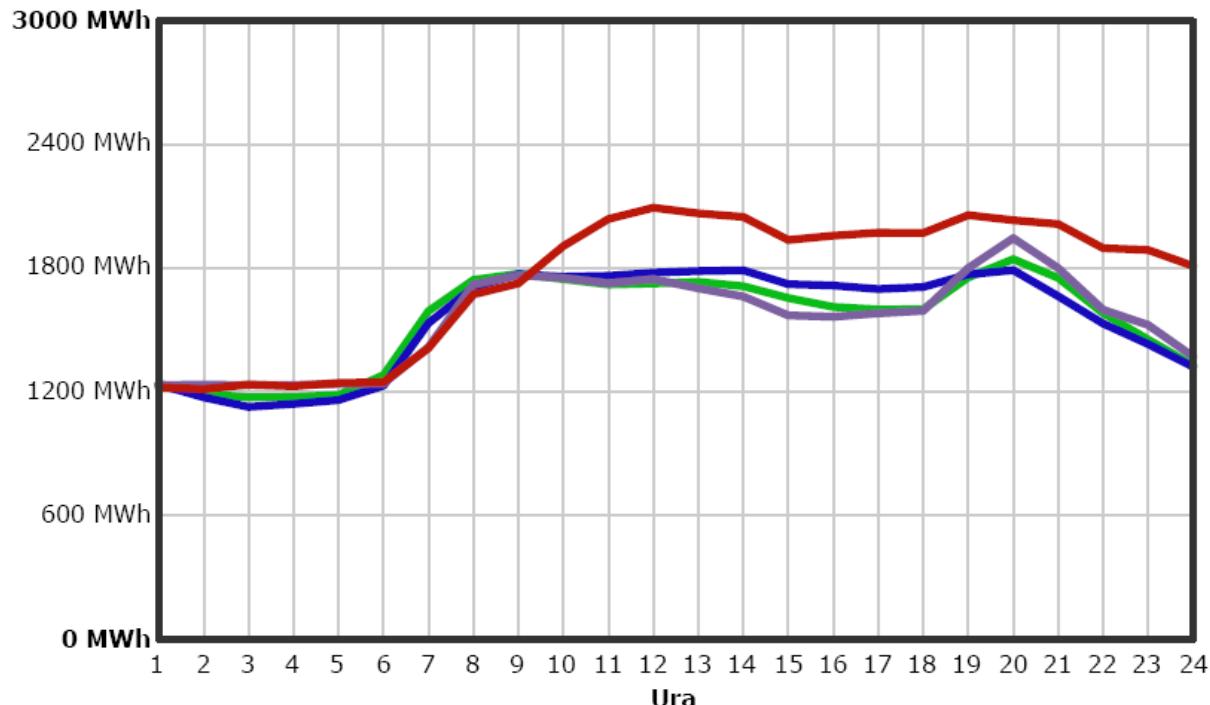
- Olkiluoto 3 (1600 MW PWR)
- 250000 m³ betona
- 52000 ton železa



Shranjevanje energije in energijske pretvorbe ter

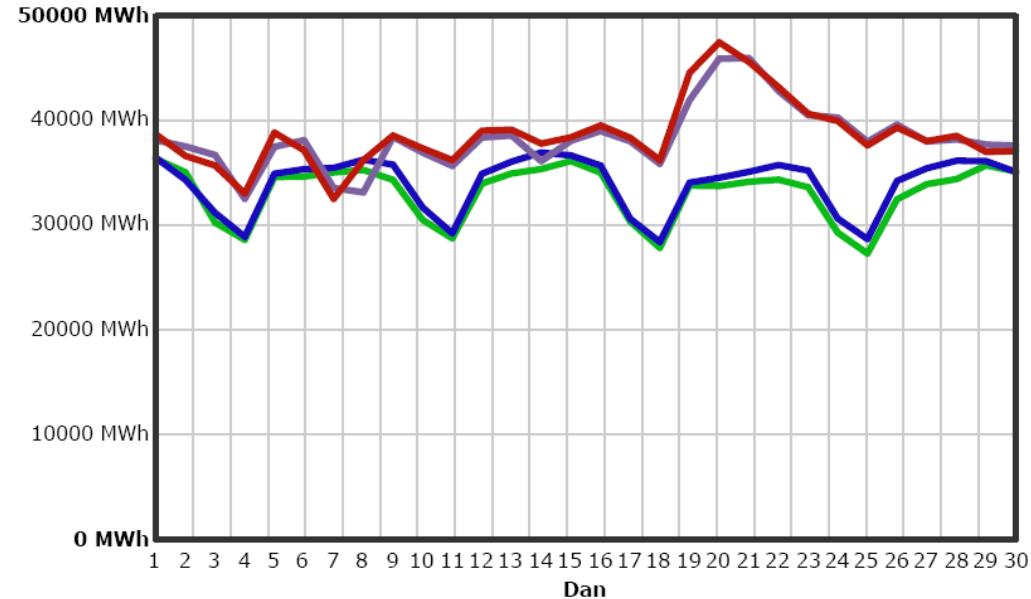
Nekaj energetskih scenarijev za Slovenijo

dnevna proizvodnja in poraba električne energije 20.10.2011 (MWh/h)

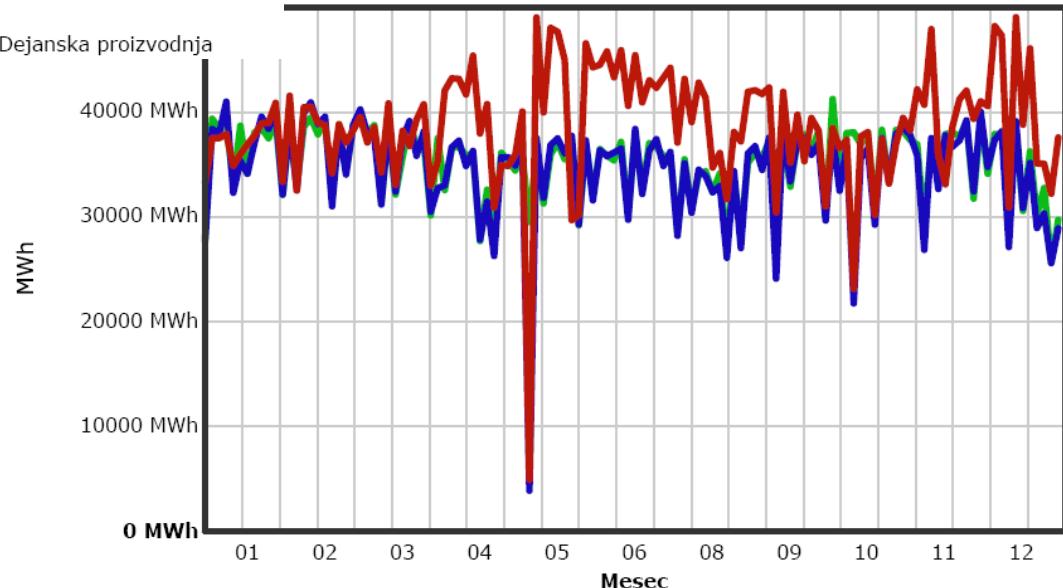


vir: www.eles.si

mesečna proizvodnja in poraba električne energije v septembru 2011 (MWh/dan)



● Predvideni prevzem ● Dejanski prevzem ● Predvidena proizvodnja ● Dejanska proizvodnja



letna proizvodnja in poraba električne energije 2008 (MWh/dan)

● Predvideni prevzem ● Dejanski prevzem ● Predvidena proizvodnja ● Dejanska proizvodnja

Zbiralniki energije

Kemični, elektrokemični

- vodik: pridobivanje z elektrolizo: izkoristek 0.5-0.8, gorivne celice izkoristek 0.5-0.7
- baterije praznenje/polnjenje 0.8-0.9 (Li-ionske)

Biološki

- hrana

Električni

- kondenzator

Mehanski

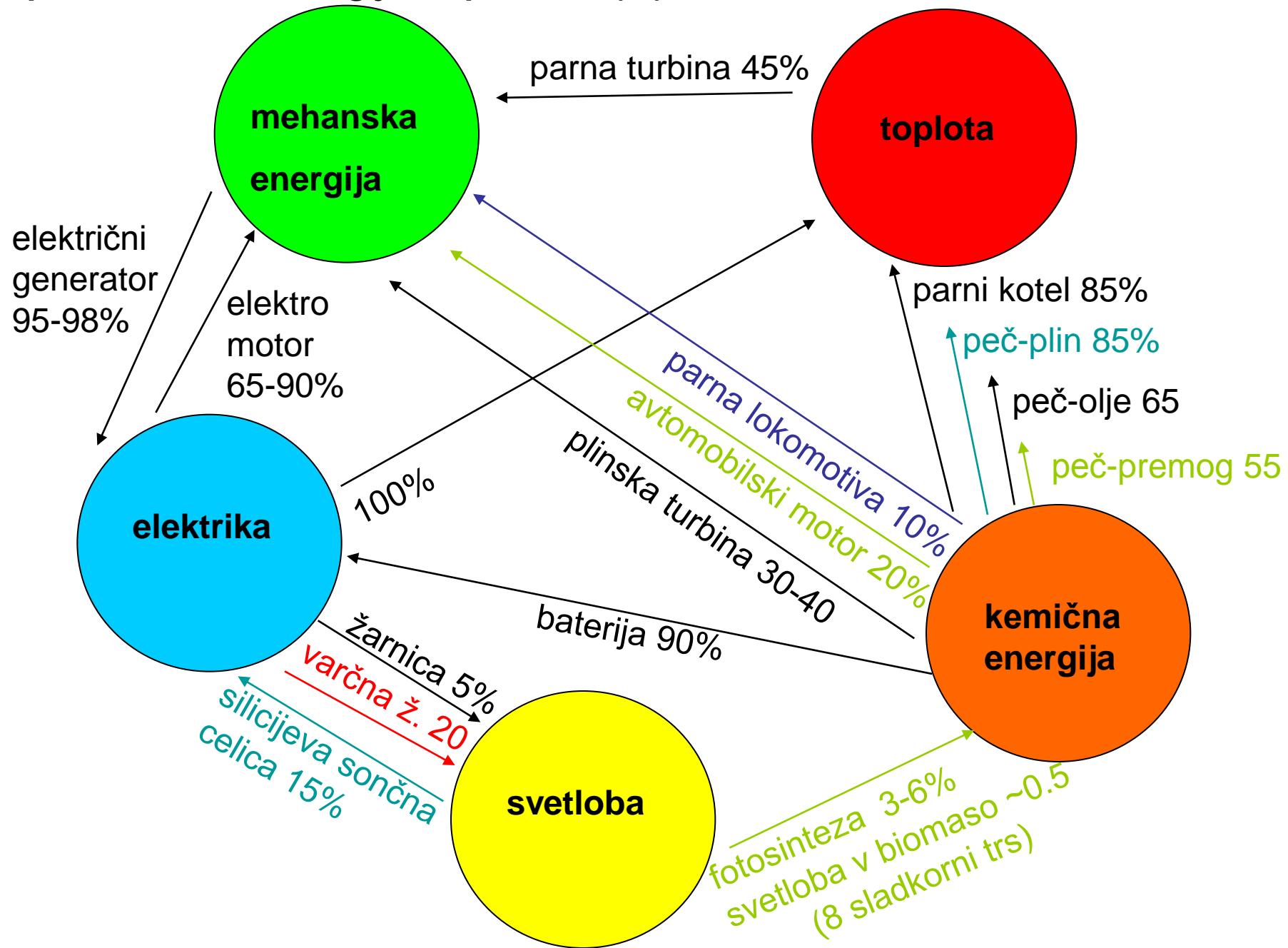
- vztrajnik, stisnjen zrak

Toplotni

- kamen, tla, voda



Tipični izkoristki energijskih pretvorb (%)



DENAR

2010

ocene so
narejene
za ZDA

Za ostale
dele sveta
so lahko
številke
tudi precej
drugačne.

Ovisno
od
razpoložljivosti virov.

Table 1. Estimated Levelized Cost of New Generation Resources, 2016.

Plant Type	Capacity Factor (%)	U.S. Average Levelized Costs (2009 \$/megawatthour) for Plants Entering Service in 2016					Total System Levelized Cost
		Levelized Capital Cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission Investment 2011		
Conventional Coal	85	65.3	3.9	24.3	97.7		94.8
Advanced Coal	85	74.6	7.9	25.7	110.9		109.4
Advanced Coal with CCS	85	92.7	9.2	33.1	138.8		136.2
Natural Gas-fired							
Conventional Combined Cycle	87	17.5	1.9	45.6	66.1		66.1
Advanced Combined Cycle	87	17.9	1.9	42.1	63.1		63.1
Advanced CC with CCS	87	34.6	3.9	49.6	90.1		89.3
Conventional Combustion Turbine	30	45.8	3.7	71.5	127.9		124.5
Advanced Combustion Turbine	30	31.6	5.5	62.9	101.8		103.5
Advanced Nuclear	90	90.1	11.1	11.7	111.4		113.9
Wind	34	83.9	9.6	0.0	96.0		97.0
Wind – Offshore	34	209.3	28.1	0.0			243.2
Solar PV ¹	25	194.6	12.1	0.0	152.7		210.7
Solar Thermal	18	259.4	46.6	0.0	242.0		311.8
Geothermal	92	79.3	11.9	9.5	98.2		101.7
Biomass	83	55.3	13.7	42.3	115.4		112.5
Hydro	52	74.5	3.8	6.3	88.9		86.4

¹ Costs are expressed in terms of net AC power available to the grid for the installed capacity.

Source: Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2011, December 2010, DOE/EIA-0383(2010)

2010
hour) for
2009

Total System Levelized Cost

100.4

110.5

129.3

83.1

79.3

113.3

139.5

123.5

119.0

113.9

149.3

191.1

210.7

396.1

256.6

111.0

115.7

101.7

86.4

119.9

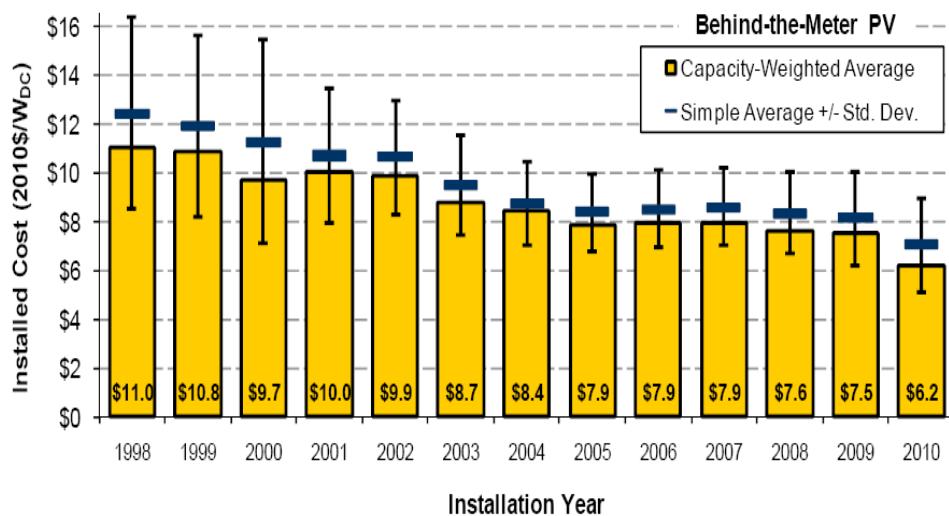
DENAR

Oktober 2011: študija za Veliko Britanijo:

"Of the three large scale low carbon technologies, the costs estimated by nuclear planning consultant Arup are GBP 130 per megawatt hour for offshore wind, GBP 95 per megawatt hour for gas with carbon capture , and GBP 66 per megawatt hour for nuclear."

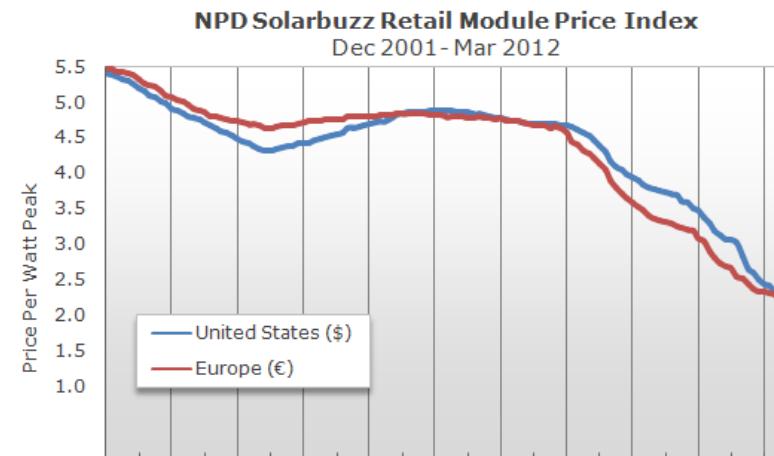
NucNet News in Brief / No. 213 / 14th October 2011

DENAR: ELEKTRIKA IZ SONCA



Notes: See Table 1 for behind-the-meter PV sample size by installation year.

Figure 6. Average Installed Cost over Time for Behind-the-Meter PV



v 2010/11 v ZDA polovico cene predstavlja sam FV panel, polovico pa instalacija!

Faktor energetskega donosa

Energetski amortizacijski faktor - čas delovanja elektrarne, v katerem proizvede energijo, ki se porabi v vseh fazah obratovalne dobe (od ekstrakcije gradbenega materiala in goriva, gradnje, do obratovanja in razgradnje).

Energetski amortizacijski faktor v mesecih:

premog	3-4	
zemeljski plin	1	(kombinirani cikel)
jedrska elektrarna	3	(PWR 1300 MW, brez recikliranja goriva)
hidroelektrarna	14	
vetrna elektrarna	7-16	(1 MW vetrnica)
fotovoltaika	70-100	

Faktor energetskega donosa (= energ. amort. faktor / življenska doba):

jedrska elektrarna	160 - 240
termoelektrarna - premog	90 - 120
plinska termoelektrarna	300 - 400
velika hidroelektrarna	100 - 200
mala hidroelektrarna	40 - 100
vetrna elektrarna	10 - 50
fotovoltaika	2 - 8

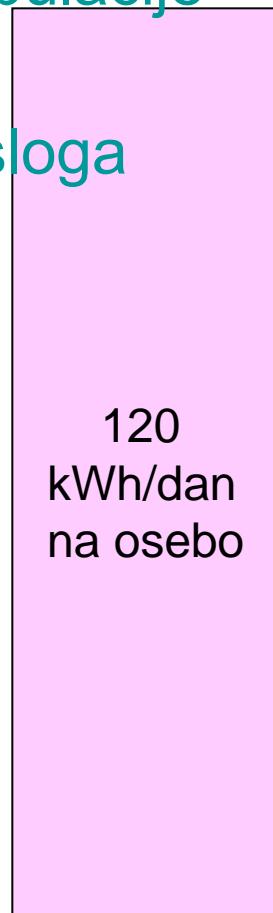
<http://www.sealnet.org/2006/02/energy-yield-factors-for-generation-of.html>

Kako pripraviti brezogljični NEP

NEP - Nacionalni Energetski Program

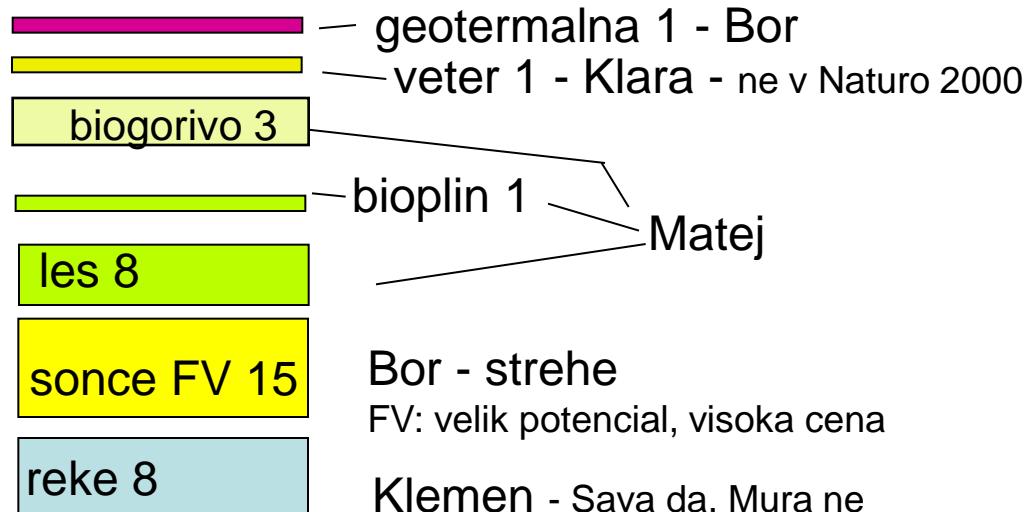
Poraba:

- zmanjšanje populacije
- sprememba življenskega sloga
- tehnologija, učinkovitost



Oskrba:

- jedrska energija
- plin
- "čist premog"
- uvoz obnovljive energije drugih držav



Sprememba življenskega sloga

(=genetsko spreminjanje organizmov)



homo sapiens

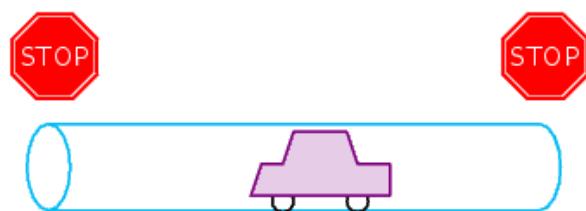
homo sapiens z vgrajenim
genom za zmanjšano porabo
energije (David MacKay)



Why transport uses energy



- Air resistance

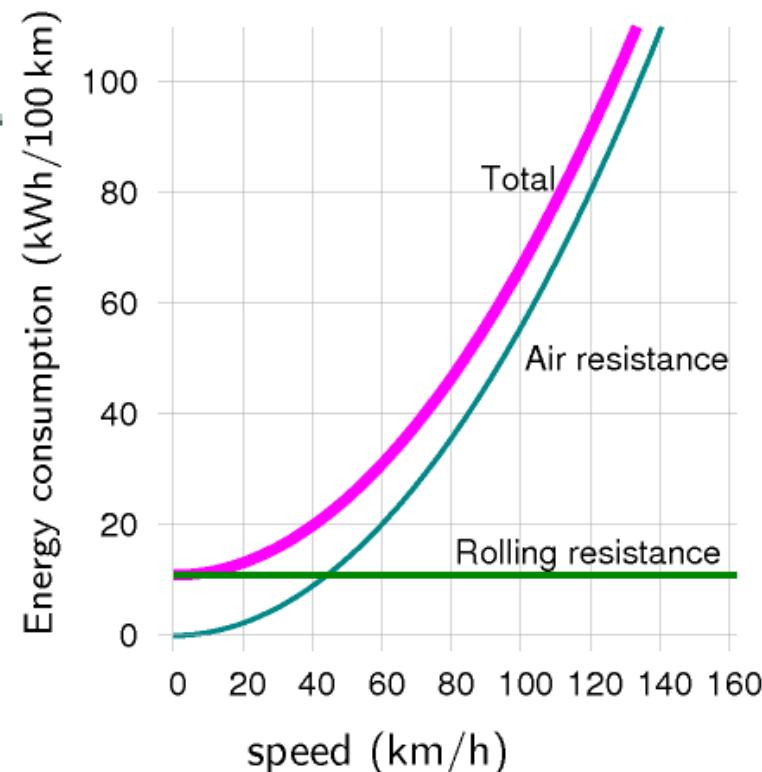


- Acceleration/deceleration

- Rolling resistance

- Engine inefficiency

- internal combustion is 25% efficient

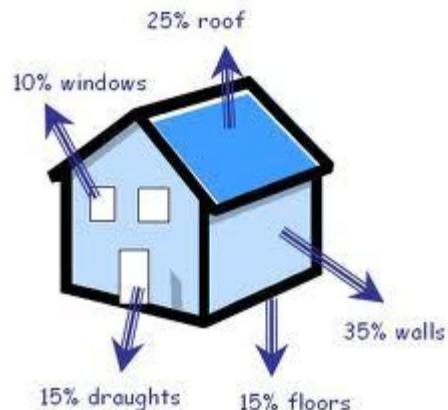


Povzeto po MacKay-u:

- povprečen avto 80 kWh na 100 km
 - električni avto - 15 kWh/100 km (Tesla)
- Predlog (MacKay) - elektrifikacija transporta

Tehnologija, učinkovitost - ogrevanie

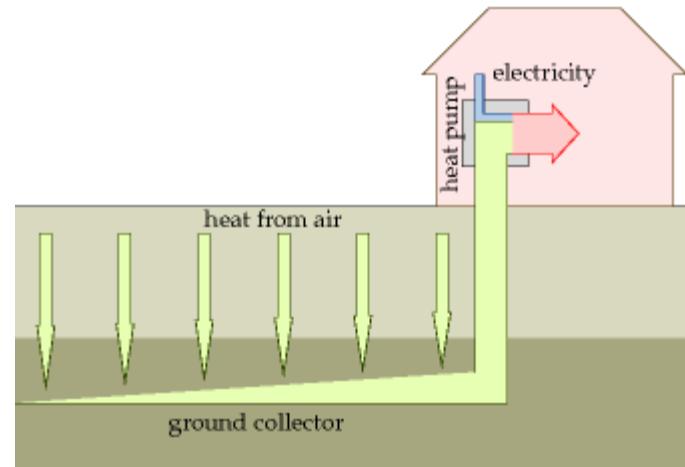
1) zmanjšanje temperature



2) izolacija stavb



3) ogrevanje z elektriko -
toplote črpalke (zrak-voda)
(zrak-zrak)

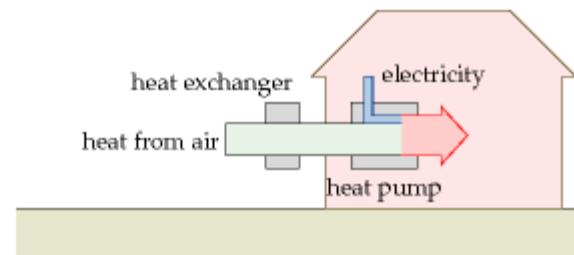


biomasa - les

Slike:

<http://tell.flill.purdue.edu/JapanProj/FLClipart/Medical.html>

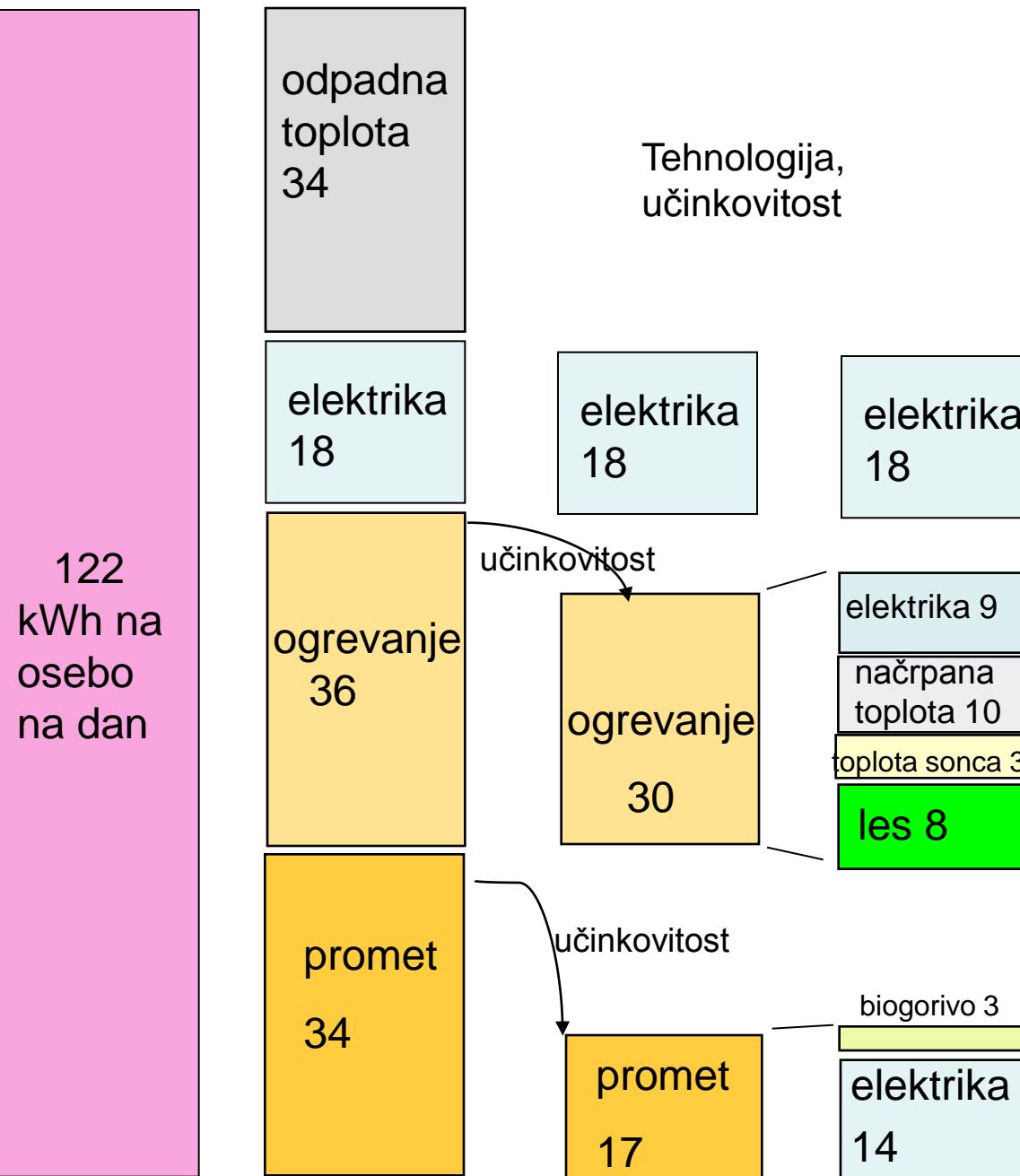
<http://epsom-ewellenergy.org.uk/2008/11/11/insulation-in-the-home/>
MacKay



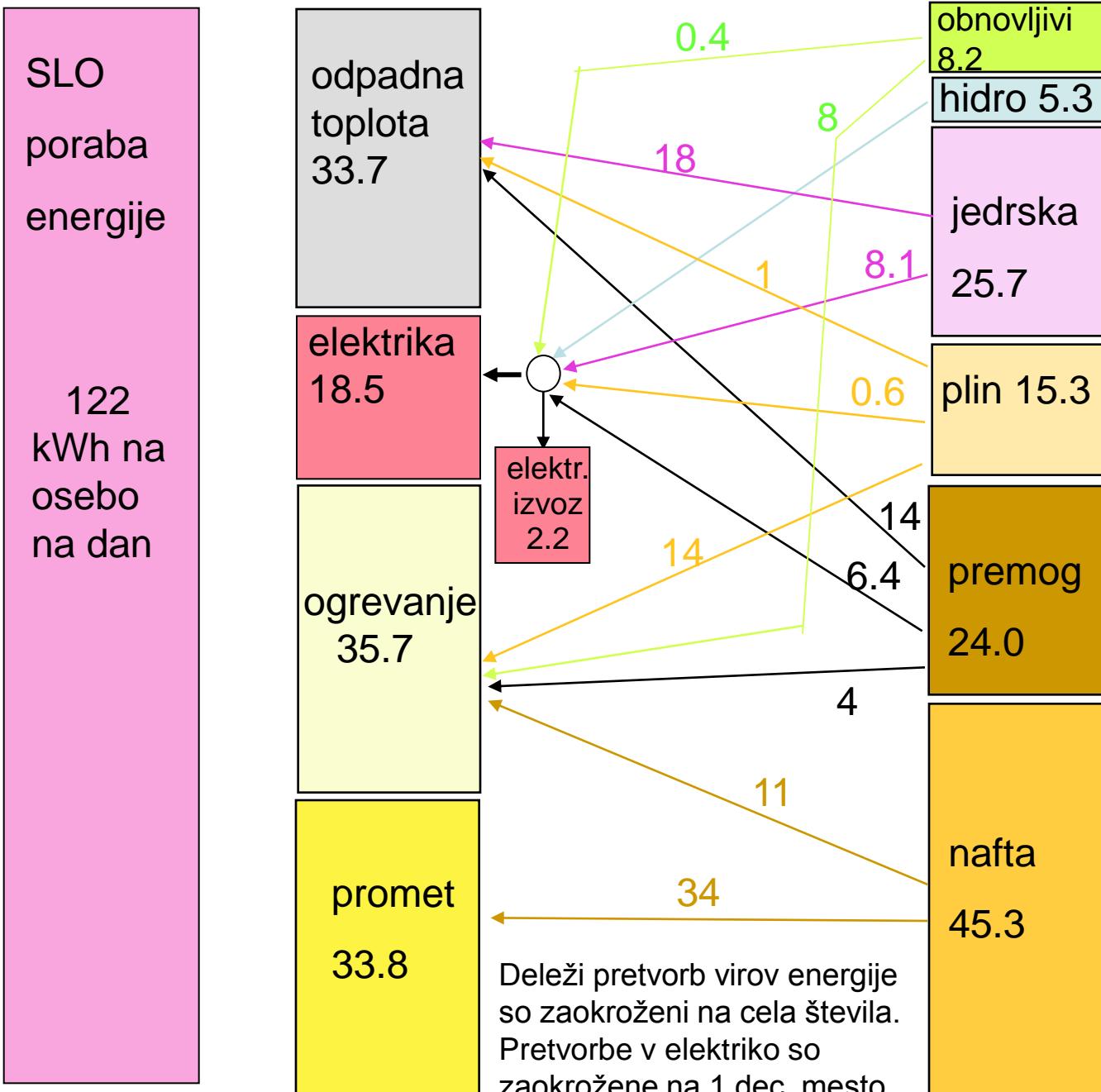
SLO
energija
brez
izpustov
 CO_2

NEP
Nacionalni
Energetski
Program

Poraba



SLO Poraba 2008



odpadna toplota:
vključena je lastna raba elektrarn (1.4) in izgube koristne toplote (0.6)

Poraba elektrike
vsebuje tudi 1.1 izgub v elektr. omrežju

ogrevanje =
ogrevanje+
kmetijstvo+
industrija
(neelektrična
poraba)

Izgube elektrike
in koristne
toplote pri
transformaciji niso
napisane

vir:
statistični
letopis
2009

Nekaj energetskih načrtov (kWh/dan/osebo)



sonce 3 250 MW, 2 GWp, 20 km²

biogorivo 3 1000 km²

les 5

načrpana
toplota 11

jedrska
elektrika
40

hidro 6

I.T.
jedrski inženir
želje 2030

sonce
FV
22

200 km² (10W/m²)
(strehe zagotovijo
~10 kWh - ostalo -
druge površine)

biogorivo 3 1000 km² površin
bioplín 2

geotermalna 5

vetrnice na VSEH
hribih, Triglav 3000m

sonce topl. 10 50 km² (20 W/m²)

les 10 izkoristiti gozd 100%

hidro 10 Sava, Mura, Soča,
Idrijca

100% obnovljivi,
lastni viri - zeleno
za vsako ceno

I.T. napoved 2020

Jedrska tehnika

in energetika

Reaktorska fizika

Reaktorska kinetika

Prenos toplote

Procesi in sistemi v jedrskih elektrarnah

Regulacije in instrumentacija

Jedrska in sevalna varnost

Gorivni krog

Odpadki in razgradnja

Nove tehnologije

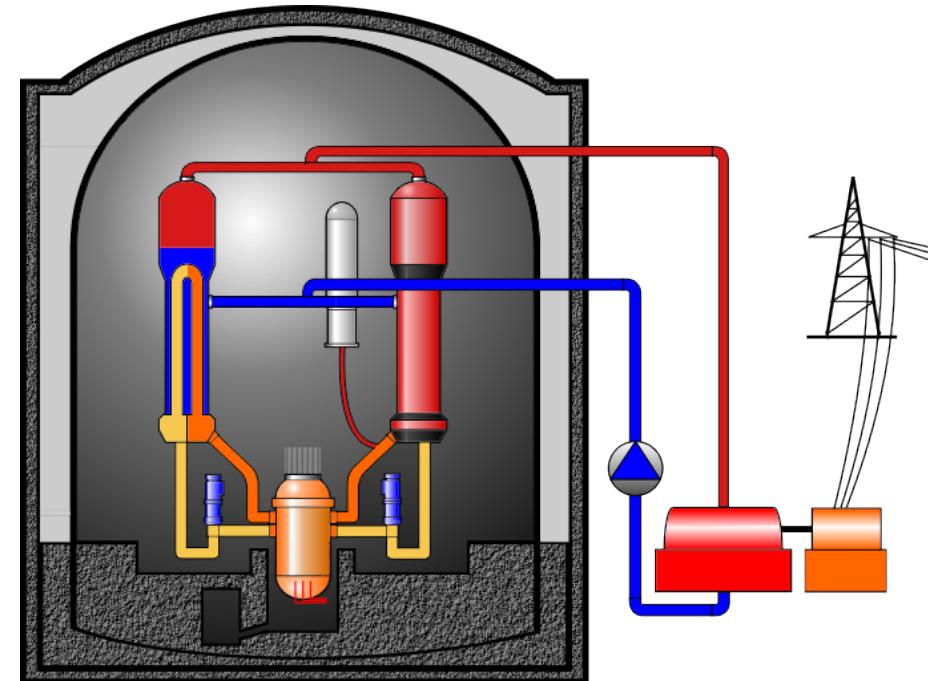
literatura:

Knief, Nuclear Engineering: : Theory and Practice of Commercial Nuclear Power, 1992 (2008 - 2nd Edition) – Poglavlja 1-8.

Lamarch, *Introduction to Nuclear Engineering*, 1975, 3rd edition - 2001

Poglavlja 1-3 - znana iz Moderne fizike (**Strnad, Fizika IV**)

Brez pogl. 5 in 6 - Reaktorska in radiacijska fizika - izbirni predmet letnega semestra
3. l. fizika



Kuščer, Žumer, Toplotna - Poglavlje Termodinamika

Znani pojmi

gostota nevronov	N
gostota jeder	n
hitrost nevronov	v
mikroskopski presek za sipanje, absorbcijo, fisijo...	σ
makroskopski presek	$\Sigma = \sigma n$ (m^{-1})
nevronski fluks	$\Phi = N v$ (nevronov/ m^2/s)
povprečna prosta pot nevtrona	$1/\Sigma$

$$\begin{aligned}
 \text{hitrost reakcije (št. reakcij na enoto časa)} &= (N v dS) (n \sigma dx) & dS \text{ presek tarče, } dx - \text{debelina tarče} \\
 &= (N v) (n \sigma) dV & \text{jedra se v tarči ne prekrivajo} \\
 &= \Phi \quad \Sigma \quad dV
 \end{aligned}$$

radioaktivni razpadi

razpadna konstanta $\lambda(s^{-1})$

aktivnost $A = \lambda n(t)$ (razpadi/s = Becquerel [Bq])

1 Curie [Ci] = 3.7×10^{10} Bq

$dn/dt = -\lambda n$; $n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)$

razpolovni čas $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

		$T_{1/2}$
U 232		70 let
233		160 000 let
234		250 000 let
235	700 000 000 let	
236		23 000 000 let
238	4 500 000 000 let	

PROBLEMATIČNI FISIJSKI
PRODUKTI

Stroncij-90	29 let
Cezijs-137	30 let

Jedrska fizika - osvežitev

Semi-empirična masna enačba opisuje maso jedra z masnim številom A in vrstnim številom Z:

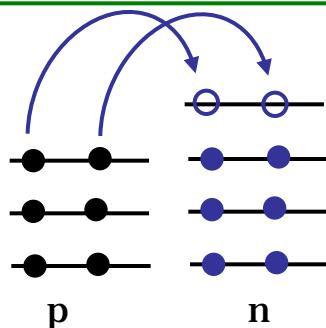
$$M(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - W_{vez}$$

$$W_{vez} = w_0 A - w_1 A^{2/3} - w_2 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - w_3 \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \frac{w_4}{A^{1/2}} \delta(A, Z)$$

povprečna vez.
energ. na nukleon
*
št. nukleonov

prispevek nukleonov
na površini; slabše
vezani;
 $V \propto r^3 \propto A$; $S \propto r^2 \propto A^{2/3}$

elektrostatski odboj
med protoni;
 $\propto Z^2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 r \propto Z^2 / A^{1/3}$



jedra z $Z \neq (A-Z)$ slabše
vezana;

energetsko ugodno,
če se tvorijo pari
enakih nukleonov z
nasprotnim spinom
 $p \uparrow p \downarrow n \uparrow n \downarrow$; $A^{-1/2}$ iz
meritev

W_{vez} - vezavna energija -
se sprosti pri nastanku
jedra

$$w_0 = 15,6 \text{ MeV}$$

$$w_1 = 17,2 \text{ MeV}$$

$$w_2 = 0,7 \text{ MeV}$$

$$w_3 = 23,2 \text{ MeV}$$

$$w_4 = 12 \text{ MeV}$$

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} -1 & \text{sodo - soda} \\ 0 & \text{sodo - liha} \\ +1 & \text{liho - liha} \end{cases}$$

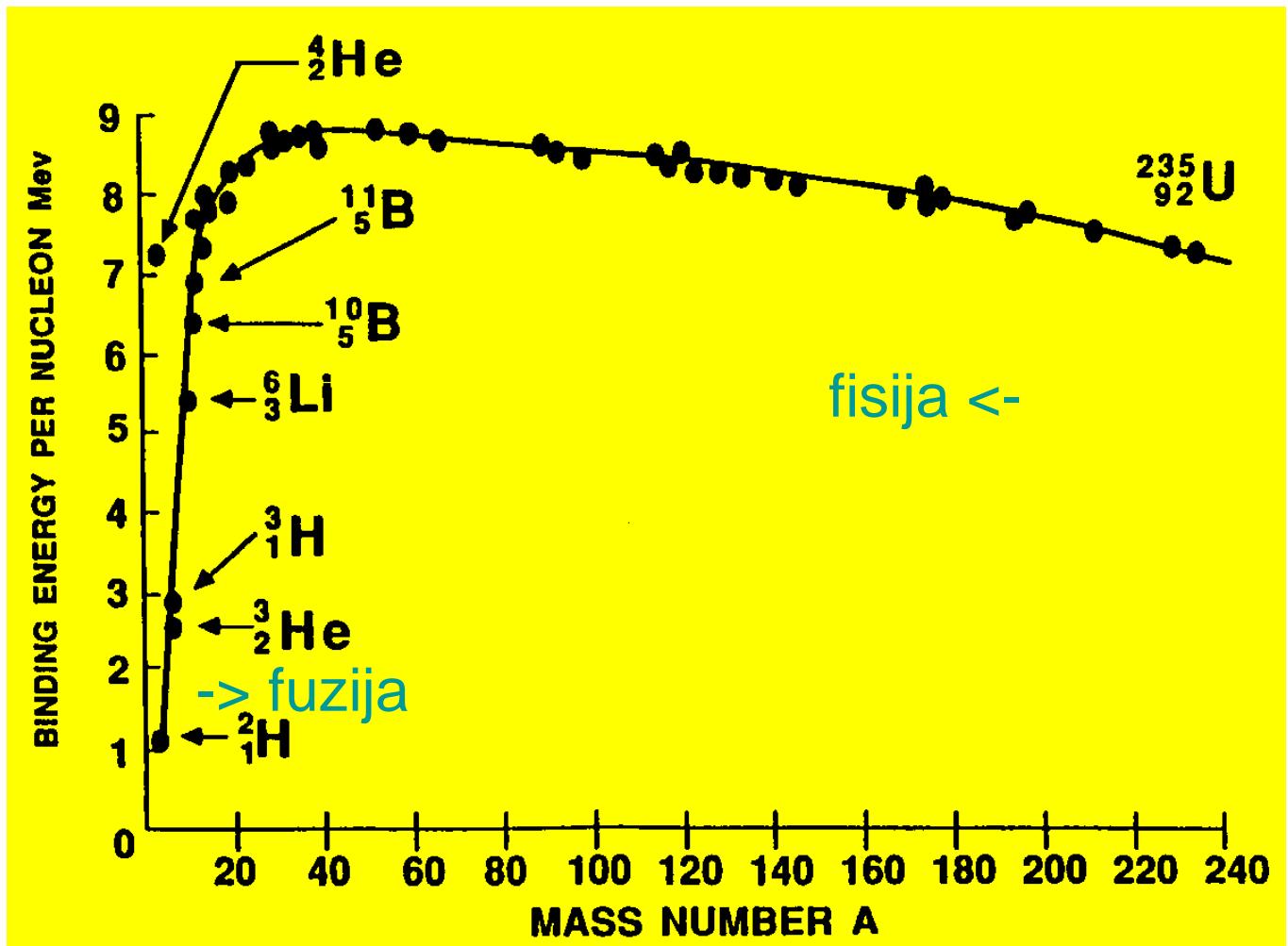
Vezavna energija/nukleon

Kandidati za
fisijo z nizko
energijskimi
neutroni:

$^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$,
 $^{241}_{95}\text{Pu}$, $^{233}_{90}\text{U}$ -
umetni

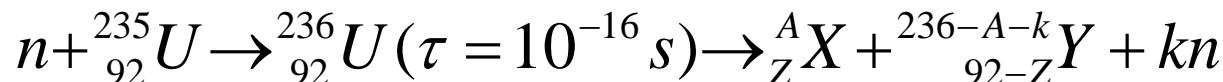
Pri zajetju
neutrona z
zanemarljivo
 W_k , se sprosti
energija
parjenja
($\sim w_4 \delta / A^{1/2}$)

Ostala težka
jedra zahtevajo
večjo energijo.



fisija - nevtroni - energija

nevtroni ne občutijo elektrostatskega odboja → lahko prodrejo v jedro



$\langle k \rangle = 2,47$
 $\langle E_n \rangle \sim 2 \text{ MeV}$
 hitri nevtroni

$\langle E_n \rangle \sim 0.025 \text{ eV}$

počasen (termični) nevtron $\sim 2.2 \text{ km/s}$

$$\begin{aligned} W_{\text{zač}} &= m_n c^2 + W_k n + M(235, 92) c^2 \\ W_{\text{kon}} &= M(X) c^2 + M(Y) c^2 + k m_n c^2 + W_k \end{aligned}$$

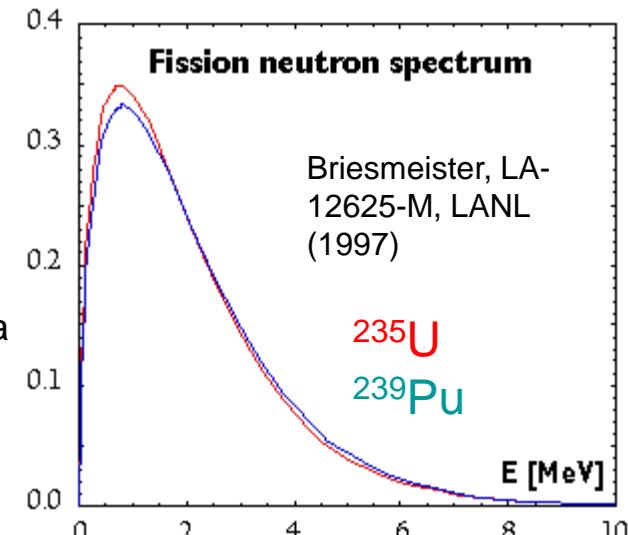
W_k : skupna kinetična energija končnih jader in n

št. nukleonov v začetnem in končnem stanju je enako

$$W_k = W_{\text{vez}}(235, 92) - W_{\text{vez}}(X) - W_{\text{vez}}(Y)$$

(primer A=120, Z=45)

$$-1794 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$$



Porazdelitev sproščene energije:

razcepki	165 MeV
nevtroni	5 MeV
γ (fisija+zajetje)	12 MeV
zaostali β , γ	15 MeV
antinevtrini	(10 MeV)

Razcepki fisije

$$n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U (\tau = 10^{-16} s) \rightarrow {}_Z^A X + {}_{92-Z}^{236-A-k} Y + kn$$

razcepk i v JT:

- sproščanje zaostale toplote zaradi nestabilnosti

razcepkov:

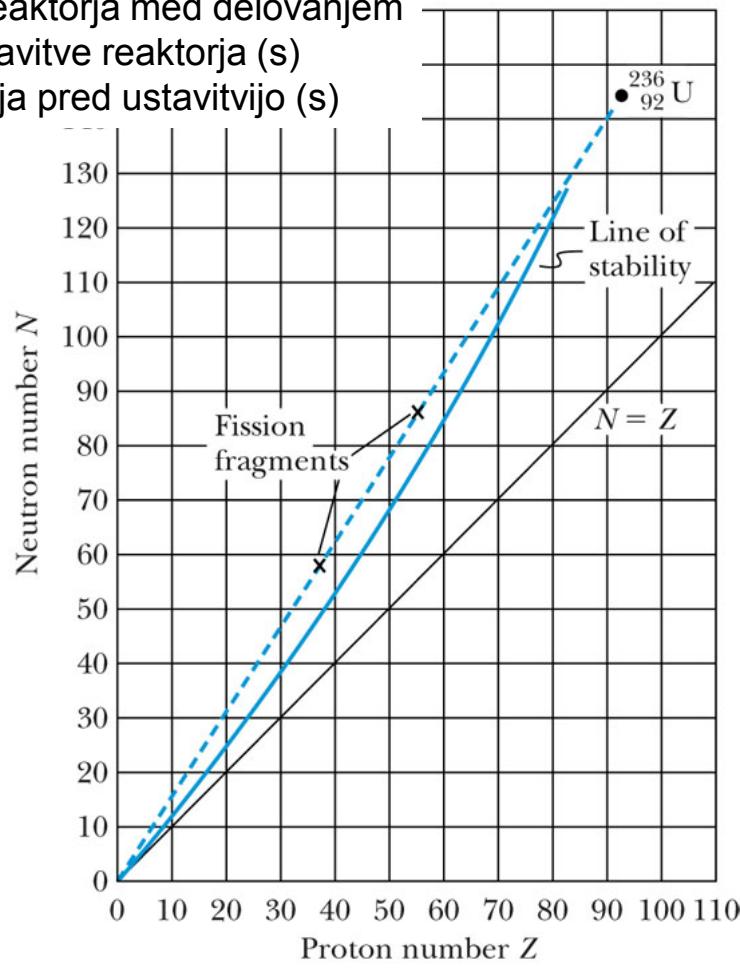
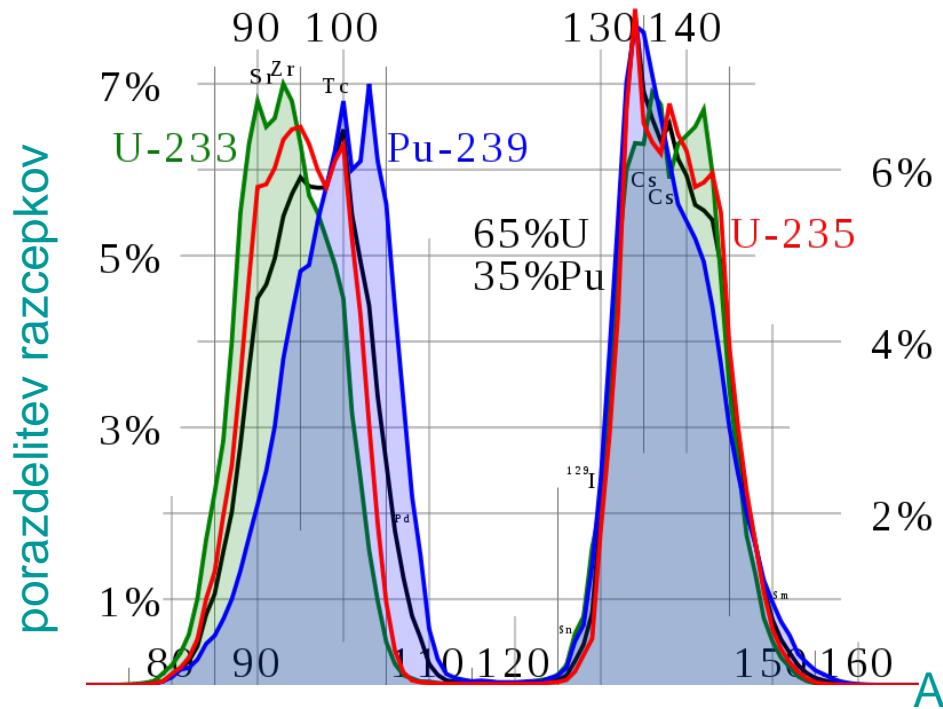
$$P(t) \approx P_0 \cdot 0.066 \cdot [t^{-0.2} - (t + t_0)^{-0.2}]$$

P_0 - topl. moč reaktorja med delovanjem

t - čas od zaustavite reaktoria (s)

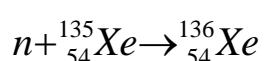
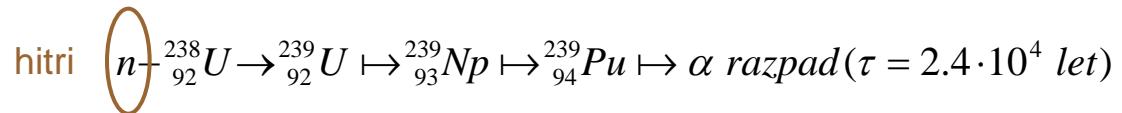
t_0 - čas delovanja pred ustavitevijo (s)

- radioaktivnost goriva t_0 - čas do začetka reakcije
 - zakasneli nevtroni
 - nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone (^{135}Xe , ^{145}Sm)

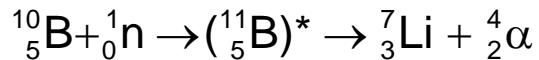


Ostale jedrske reakcije nevronov

zajetje:

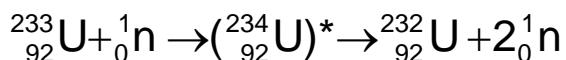


presek za zajetje term.
nevtrona $\sim 2-3 \cdot 10^6$ barn



presek za zajetje term.
nevtrona ~ 4000 barn

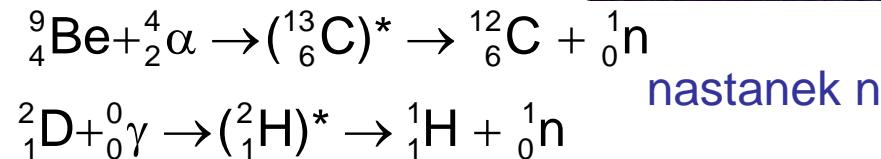
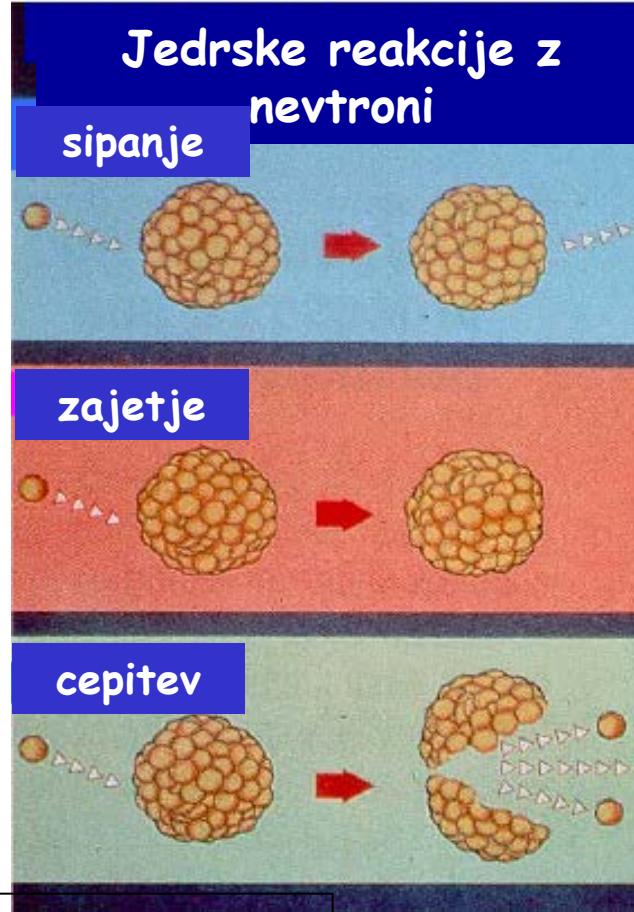
1n → 2n



sipanje:

moderatorji:

lažja jedra – n ne sprožijo cepitve
in se z elastičnimi trki najhitreje
upočasnijo
voda, grafit, težka voda....



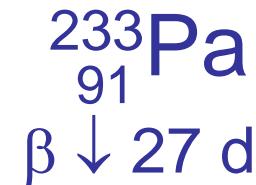
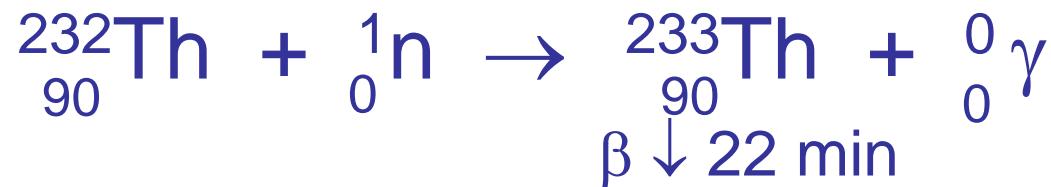
$$\frac{W_{k1}'}{W_{k1}} = \frac{|1 - m_1/m_2|^2}{(1 + m_1/m_2)^2}$$

m₁ → m₂
 W_{k1}

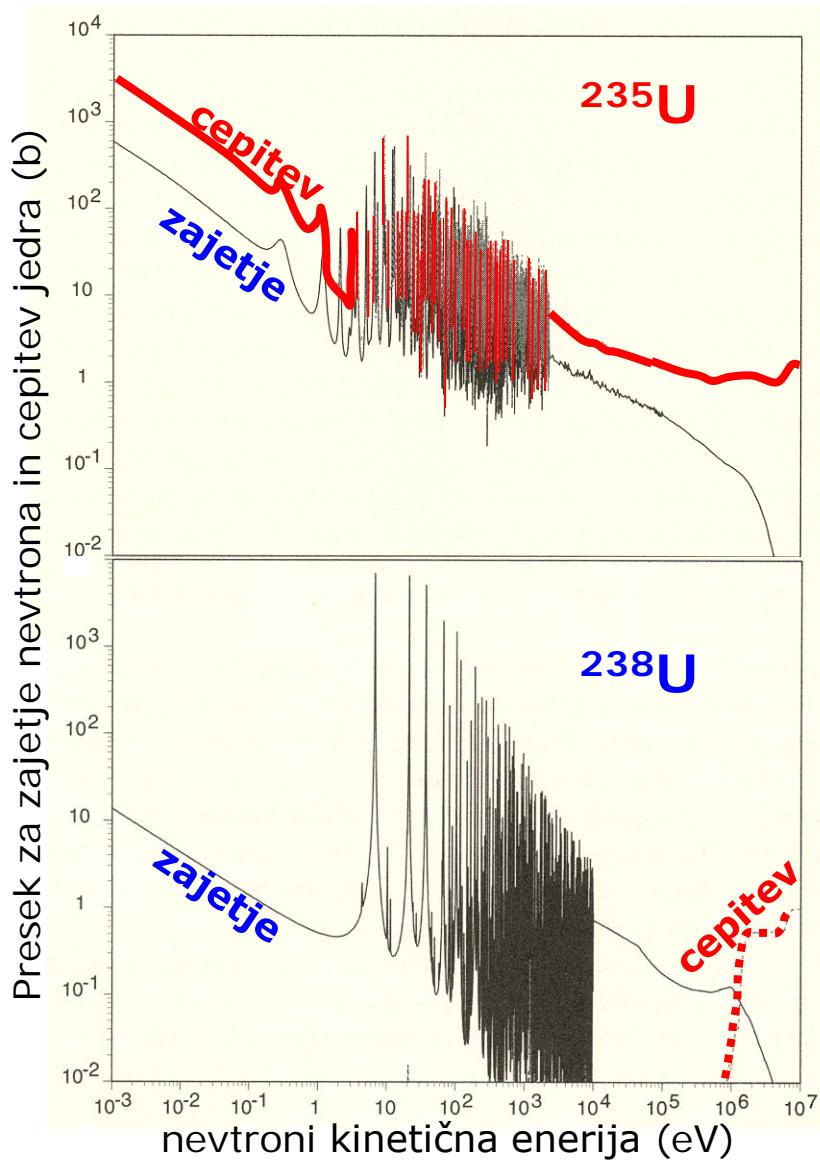
○ → W_{k1}
○ → W_{k2}

Zajetje => gorivo (oplodni reaktor)

^{232}Th ^{238}U ^{240}Pu



Presek za zajetje n in cepitev



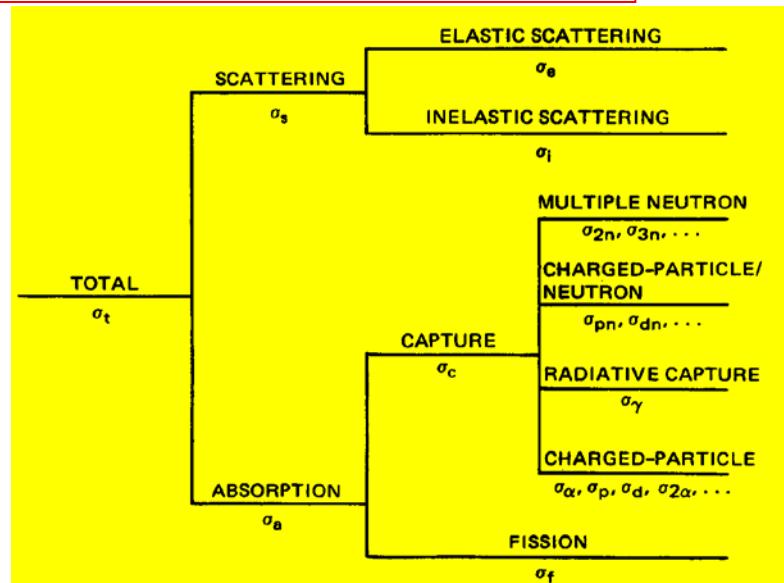
Naravni U: 99.3% ^{238}U , 0.7% ^{235}U

Presek za cepitev

^{238}U : $\sigma_f \sim 1 \text{ b}$ za $E_n > 1 \text{ MeV}$
 $\approx 0 \text{ b}$ za $E_n < 1 \text{ eV}$

pretežno: sipanje ($\sim 8\text{b}$) + zajetje

^{235}U : $\sigma_f \sim 1 \text{ b}$ za $E_n > 1 \text{ MeV}$
 $\sim 1000 \text{ b}$ za $E_n < 1 \text{ eV}$



Kontrolirana verižna reakcija

December 1942 - Fermi, Chicago Pile
CP-1

- 37 ton UO_2 , 6 ton kovinskega urana,
- 350 ton grafita,
- 8m premer, 6 m višina,
- 0.5 W moč,
- kadmijeve regulacijske palice,
- detektor sevanja,
- 2 "varnostna sistema"

<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/First%20Human%20Made%20Reactor%20and%20Birth%20of%20Nuclear%20Age.pdf>



kladivo

Kontrolirana verižna reakcija - pred Fermijem Oklo - Gabon (danes rudnik urana)

16 "reaktorjev"

Pred 2 miljardama let - delovali so več stotisoč let

Moč ~100 kW

1972 - Francozi ugotovijo "premajhen" delež ^{235}U v rudi.

(do min 0.44% namesto 0.72%, kot v drugih rudah na planetu)

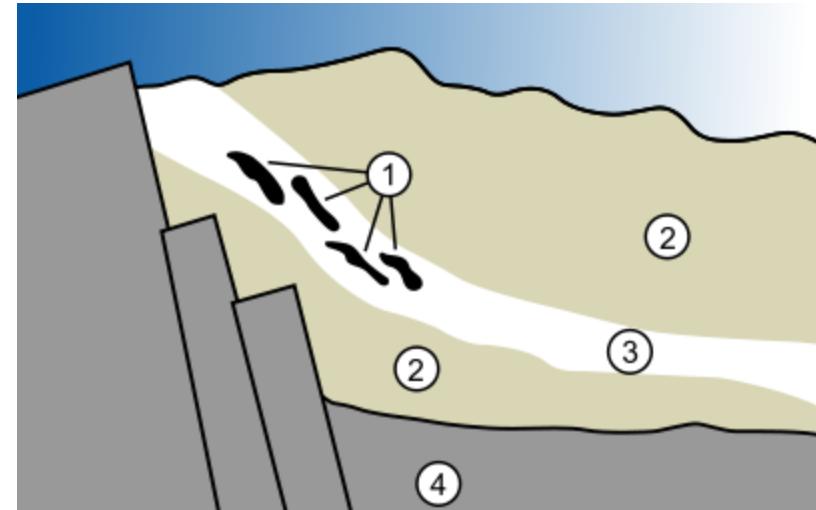
Razcepki - so ostali nekaj cm od "reaktorjev"

Delovanje:

Moderator - podtalnica - reaktor deluje ~30 minut - reaktor se segreje, voda izhlapi, moderator izgine in reaktor se ustavi. Po ~2 urah in pol se reaktor dovolj ohladi, da se cikel začne znova.

Kolikšen je bil delež ^{235}U v naravnem uranu pred 2 milijardama let? (razpolovni čas ^{235}U : $7 \cdot 10^8$ let,

^{238}U : $4.5 \cdot 10^9$ let)



1. reaktorji, 2. peščenjak, 3. uranova ruda
4. Granite

vir: Wikipedia



Gorivo za fisijo - težka sodo-liha jedra:

^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U , ^{241}Pu

za fisijo zadošča nevron z zelo majhno energijo.

Prednost nizko energijskih nevronov ($\sim\text{eV}$) v primerjavi z nevtroni, ki nastanejo pri fisiji (energija $\sim\text{MeV}$):

~ 1000 krat večji presek za fisijo.

Fisija z nevtroni z energijo MeV: potrebna visoka obogatitev goriva ($\sim 15\text{-}35\%$):

potreben velik delež ^{235}U in ^{239}Pu v primerjavi z ^{238}U

Fisija s termični nevtroni - možna uporaba naravnega ali nizko obogatenega urana:

Kako upočasniti 2 MeV nevtrone, ki nastanejo pri fisiji na ~ 0.025 ev?

Moderatorji - upočasnjevanje nevronov

velik sipalni, majhen absorpcijski presek: H₂O, D₂O, C, BeO

Moderator	agreg. stanje	α	št. trkov od E=2 MeV do 0.025 eV	Σ_a (m ⁻¹)	Σ_s (m ⁻¹)	fisija naravnega U
H ₂ O	tekoče	0 (H)	20	2.2	344.	NE
D ₂ O	tekoče	0.111 (D)	35	0.0044	45,2	DA
C (grafit)	trdno	0.716	114	0.027	38.1	DA
BeO	trdno	0.64 (Be)	86 (Be)	0.11	75.9	DA

$$\alpha = \frac{W_{kn-PO}}{W_{kn-PRED}} = \frac{|1 - m_n / m_{jedro}|^2}{(1 + m_n / m_{jedro})^2}$$

vir: Lamarsh, Baratta

Naravni uran:	Prospevek k aktivnosti
1g naravnega U	
238U	99.275%
235U	0.72%
234U	0.0054%
	12000 Bq
	600 Bq
	12000 Bq

Nevtroni v reaktorju - enostavna slika:

Pomnoževalni faktor- razmerje med številom nevtronov v n-ti in n+1 generaciji. $k = 1$

V neskončnem reaktorju:

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

V realnem reaktorju:

$$k = k_{\infty} P_f P_t$$

(št. hitrih n, nastalih pri cepitvi z nevtronimi vseh energij)

$\epsilon = \frac{N_0 \epsilon}{N_0}$ (št. hitrih n, nastalih pri cepitvah s termičnimi n)

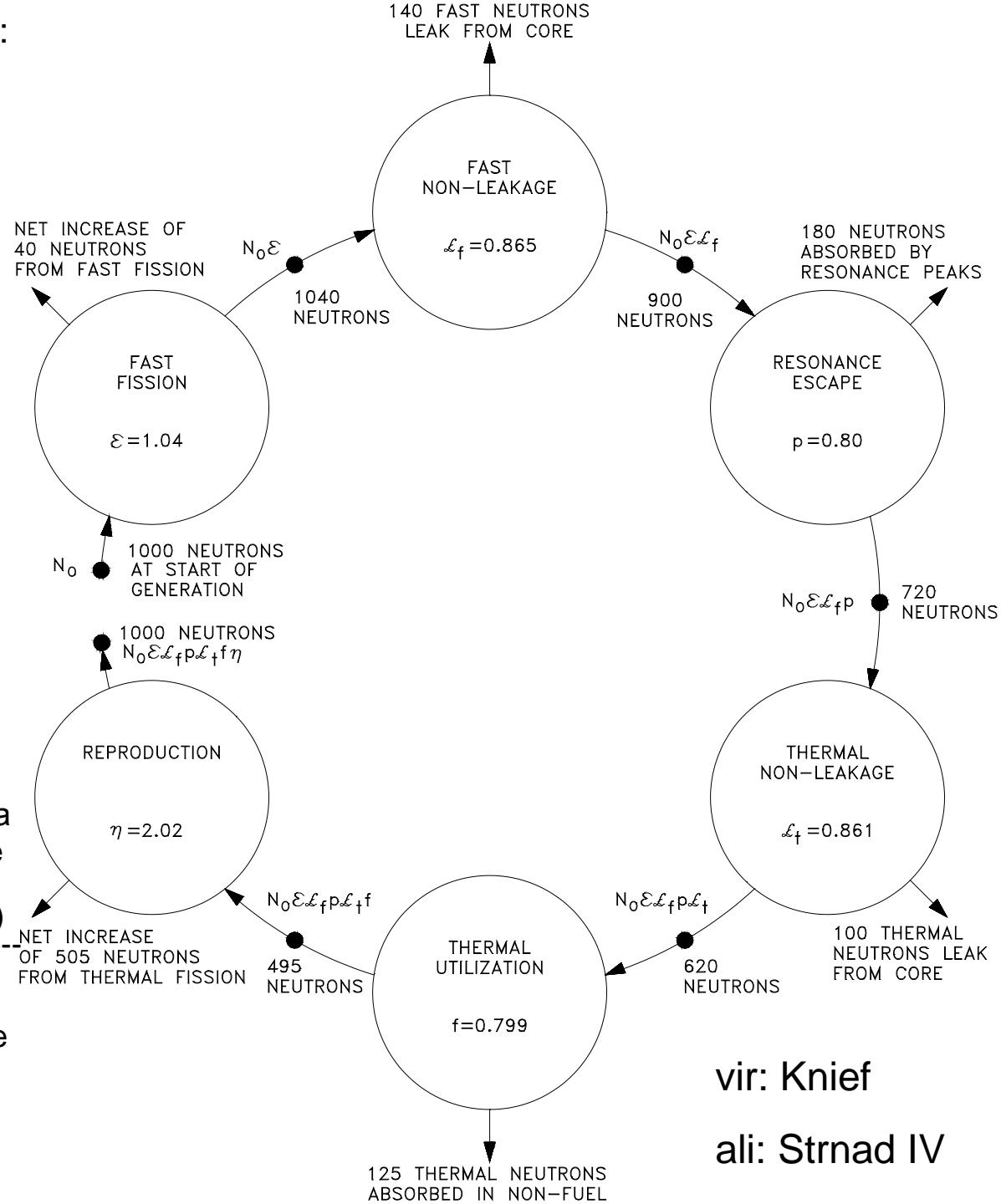
p - verjetnost za pobeg resonančni absorbcijski pri zaviranju nevtronov

f - verjetnost, da se termični n NE absorbira v jedrih, moderatorju, strukturah sredice

$\eta = \frac{N_0 \epsilon \mathcal{L}_f p \mathcal{L}_t f}{N_0}$ (št. hitrih n, nastalih pri cepitvi s term. n)
(št. term. n, ki se absorbirajo v gorivu)

P_f - verjetnost, da hiter nevron ne pobegne iz reaktorja

P_t - verjetnost, da termičen nevron ne pobegne iz reaktorja



vir: Knief

ali: Strnad IV

Časovne spremembe v reaktorju (reaktorska kinetika)

življenski čas nevtronov:

termični nevtroni: $l_p \sim 10^{-5} - 10^{-3}$ s

hitri: $\sim 10^{-7}$ s ("fast reactor" - oplodni reaktor na hitre nevtrone)

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho}{l_p} N(t)$$

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

reaktivnost: relativni prirastek št.
nevtronov v eni generaciji

Pri majhni spremembi pomnoževalnega faktorja $k=1 \rightarrow k=1.001$, ter povprečnem življenskem času nevtronov $l_p=10^{-4}$ s, se število nevtronov in moč reaktorja v 1 sekundi poveča za

$$N(t=1s) = N_0 e^{\frac{\rho}{l_p} t} = N_0 e^{10} \approx 22000 \text{ krat... Takšnega reaktorja ni mogoče nadzorovati...}$$

Reaktivnost - brezdimenzijska količina - "enote"

$$\frac{\Delta k}{k}$$

$$\% \frac{\Delta k}{k}$$

$$1 \text{pcm} = 10^{-5} \frac{\Delta k}{k}$$

$$\rho[\$] = \frac{\Delta k}{k} / \beta_{eff}$$

β_{eff} definiran 2 prosojnici naprej

tipične spremembe reaktivnosti med delovanjem reaktorja: 10^{-3}

Regulacijske palice padejo v reaktor -0.08 ($\Delta k/k$), boriranje primarne vode od 0 na 2000 ppm Bora ~ -0.2 , gorljivi strupi v novem gorivu -0.06 . Sveže gorivo $+0.24$...

Zakasneli nevroni pri cepitvi ^{235}U

6 glavnih skupin:

$T_{1/2}$ - razpolovni čas prednika

λ_i - razpadna konstanta prednika

β_i - delež zakasnelyh nevronov

skupine i v celotnem št. nastalih
nevronov na cepitev

$T_{1/2}$ (s)	λ_i (s-1)	β_i	E(keV)
55.72	0.0124	0.000215	250
22.72	0.0305	0.001424	560
6.22	0.111	0.001274	405
2.30	0.301	0.002568	450
0.61	1.14	0.000748	-
0.23	3.01	0.000273	

Časovne spremembe v reaktorju z zakasneliimi nevtroni

življenski čas nevtronov:

termični $l_p \sim 10^{-5} - 10^{-3}$ s

zakasneli

$$l_d = \frac{1}{\lambda_{eff}} = \frac{\sum_{i=1,6} \beta / \lambda_i}{\sum_{i=1,6} \beta} \approx 13 \text{ s}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l_p} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta_i}{l_p} N(t)$$

enačba za število nevtronov z
upoštevanjem zakasnelyh nevtronov

$C_i(t)$ - koncentracija razcepakov, ki ob
razpadu oddajo zakasneli nevron

Kako se pri spremembi pomnoževalnega faktorja $k=1 \rightarrow k=1.001$, ter
povprečnem življenskem času takojšnjih nevtronov tlačnovodnega reaktorja
 $l_p=2.5 \cdot 10^{-5}$ s spreminja število nevtronov in moč reaktorja, če vseh 6 skupin
zakasnelyh nevtronov aproksimiramo kot eno samo skupino z $\beta_{eff}=0.0068$ in
 $\lambda_{eff}=0.088/\text{s}$?

Kakšna je sprememba pri $k=1 \rightarrow k=1.01$?

Boltzmannova - transportna enačba

splošna enačba za opis transporta nevronov

$$\frac{1}{v} \frac{d\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \Sigma_T(\vec{r}, E) \phi = S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \int dE' \int \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) d\vec{\Omega}'$$

$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ kotni fluks nevronov z energijo med E in $E+dE$ in smerjo med $\vec{\Omega}$ in $\vec{\Omega}+d\vec{\Omega}$

$\Sigma_t(\vec{r}, E)$ makroskopski totalni presek

$\Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$

makroskopski diferencialni sipalni presek, ki popisuje sisanje nevronov od energije E' k E in od kota $\vec{\Omega}'$ v kot $\vec{\Omega}$.

V praksi se rešuje poenostavljene oblike te enačbe, npr.:

- stacionaren reaktor (porazdelitev nevronov v sredici reaktorja)
- časovne spremembe v neskončnem izotropnem in homogenem reaktorju...
- zanemaritev porazdelitve fluksa po energijah ali delitev nevronov po energijah v nekaj energijskih grup

Kaj še vpliva na nevtronski fluks v reaktorju?

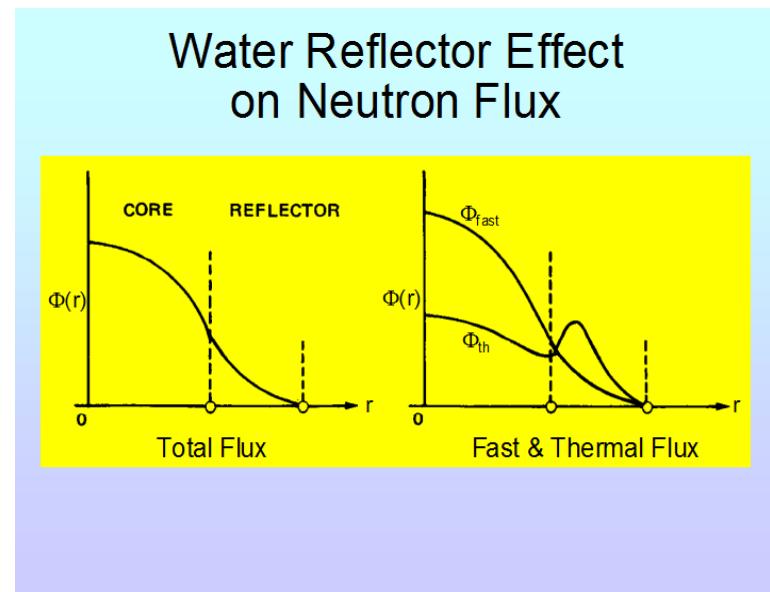
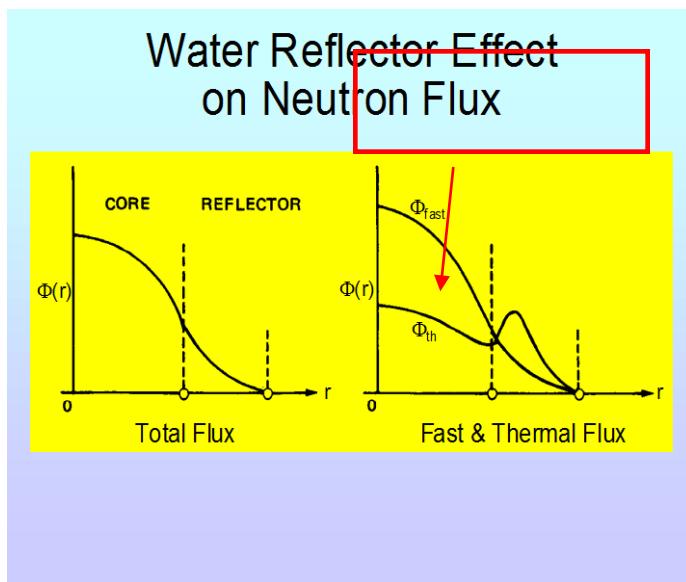
Oblika reaktorja - pobeg nevronov

predpostavimo, da imajo vsi nevtroni enako energijo:

$$\frac{1}{\nu} \frac{d\Phi}{dt} = \nu \sum_f \Phi - \sum_a \Phi - D \nabla^2 \Phi$$

↑ produkcija
↑ absorbcija

difuzija nevronov -pobeg



Kaj še vpliva na nevtronski fluks?

Spremembe temperature ter gostote goriva in moderatorja

$$\alpha(T_i) = \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \quad (\rho = \Delta k/k - \text{reaktivnost})$$

$T_i \rightarrow T_f$ koeficient temperature goriva (Dopplerjev koef.- širjenje resonančnih vrhov z višanjem T) - negativen, če je v gorivu do ~20% ^{235}U , drugače lahko pozitiven (NEK $\sim 10^{-4}/\text{moči reaktorja}$)

T_m koef. temperature moderatorja - največkrat negativen - večja T_m pomeni slabšo moderacijo (omejuje količino bora v hladilu tlačnovodnih reaktorjev - preveč bora, ki absorbira nevtrone, ob povečanju T vode pomeni manj bora in manj absorbcije) ($\sim 1-7 \cdot 10^{-4}/\text{K}$)

f_v koef. volumskega deleža pare - negativen (BWR)

koef. moči reaktorja - upošteva vsoto vseh zgornjih prispevkov:

Naj bo VEDNO negativen!

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P} = \sum \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \frac{dT_i}{dP} = \sum \alpha_i \frac{dT_i}{dP}$$

(Černobil - v določenih pogojih je koef. moči RBMK reaktorja pozitiven - pred nezgodo je reaktor deloval v takšnem "prepovedanem" območju)

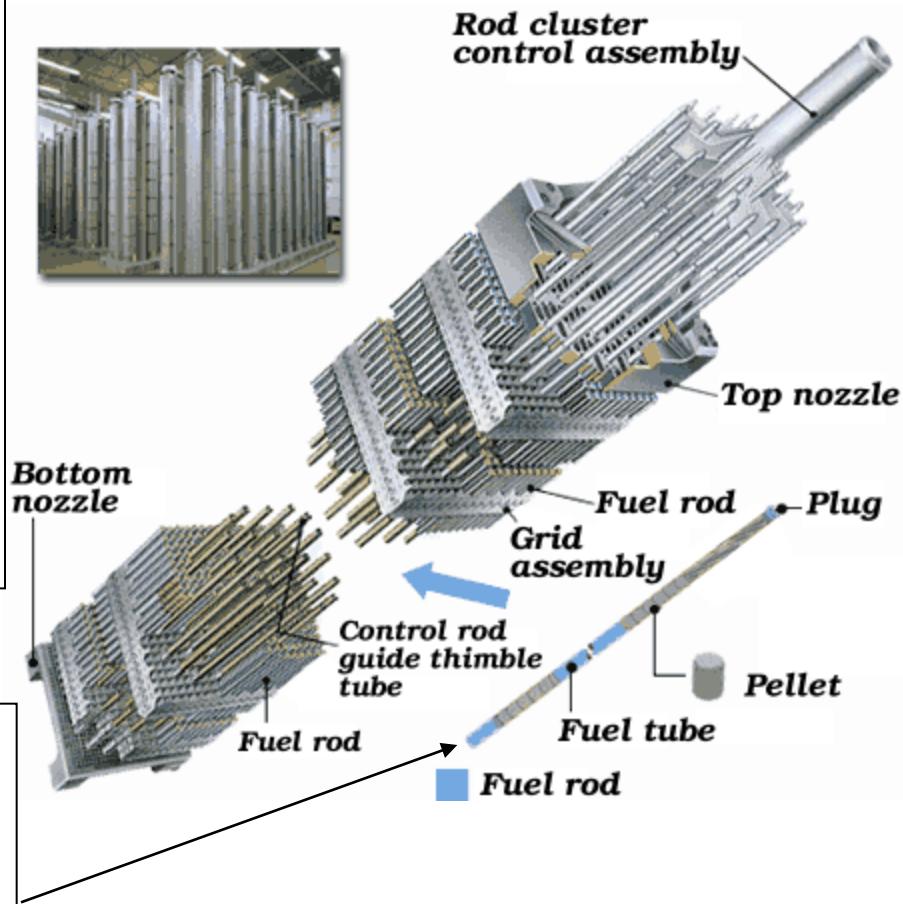
Kaj še vpliva na nevtronski fluks? regulacijski sistemi

- spremenjanje količine goriva (CANDU)
- absorbcija (večina reaktorjev):
 - regulacijske palice (Ag, indij, kadmij),
 - nevtronski strupi v hladilu,
 - borova kislina v hladilu
tlačnovodnega reaktorja
- gorljivi strupi
 - maks. koncentracija bora v hladilu ni dovolj, če je gorivo novo. V gorivo se doda "strupe" (borove spojine)
- sprememba geometrije (načrtovanje sredice)

Gorivna palica PWR:

~ 4 m dolga cev premera ~1 cm,
običajno iz Cirkonija (Zr - podobna
trdnost kot Fe, bistveno manjši σ_a).
Napolnjena s tabletkami keramičnega
 UO_2 in zaprtá.

tlačnovodni reaktor (PWR)
gorivni element in regulacijska
palica: 4 m x 21 cm x 21 cm



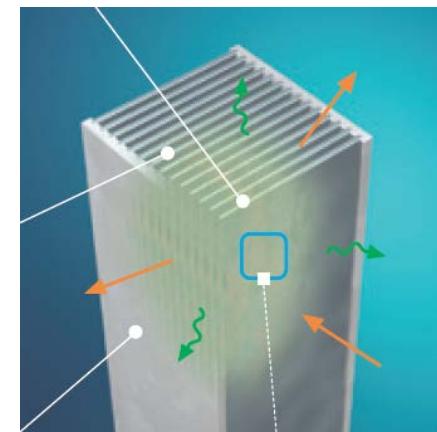
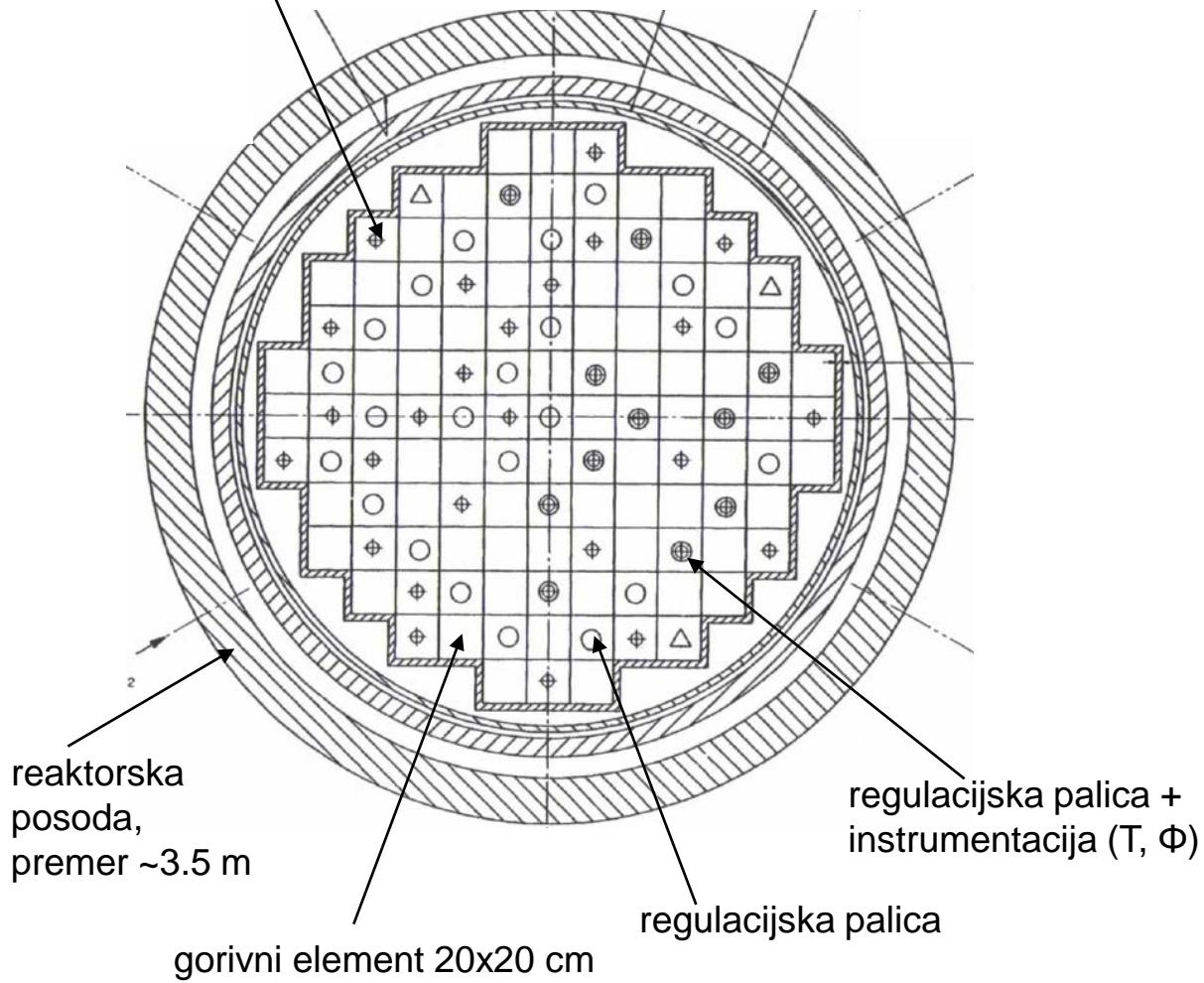
vir: Mitsubishi

Število nevronov in izgorevanje goriva

toloris sredice JE Krško

$$\Phi \sim 10^{19} \text{ n/m}^2/\text{s}$$

instrumentacija (T, Φ)



Gorivni element
raziskovalnega
reaktorja OYSTER
(TU Delft)

$8 \times 8 \times 60 \text{ cm}$

9 elementov v sredici

3 MW

NEK:

28435 gorivnih palic

121 gorivnih elementov

235 gorivnih palic/element

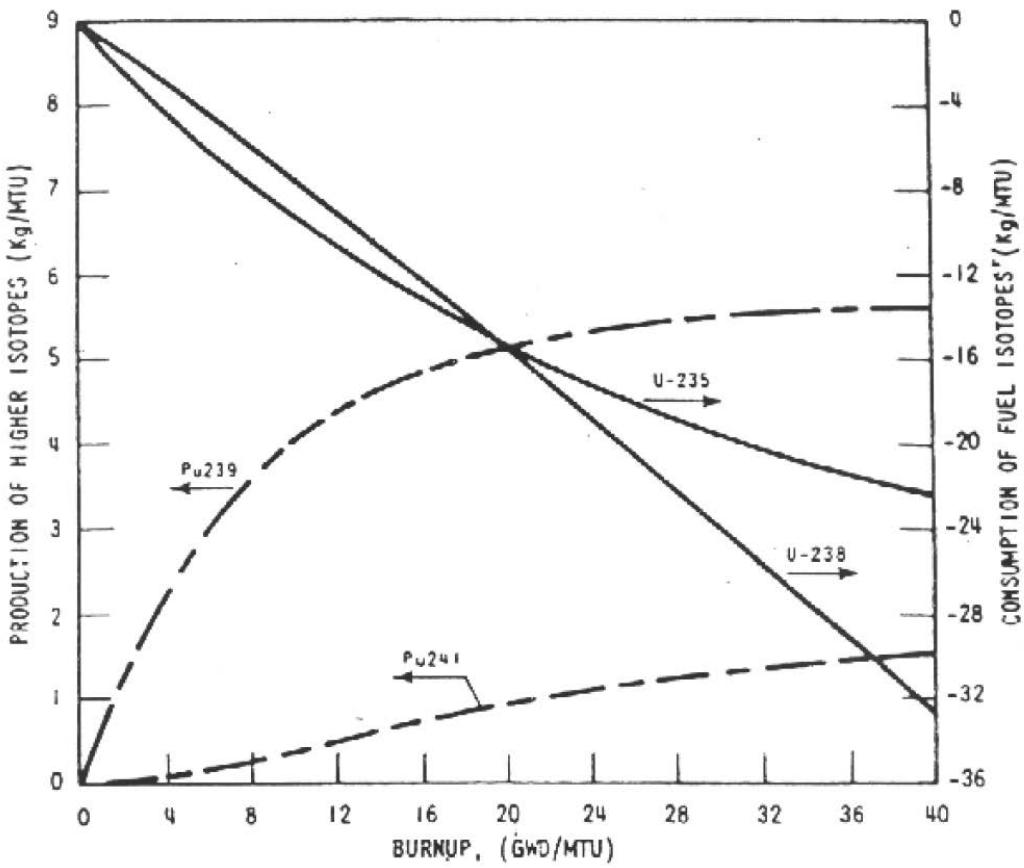
20 vodil regulacijskih palice/element

1 vodilo instrumentacije/element

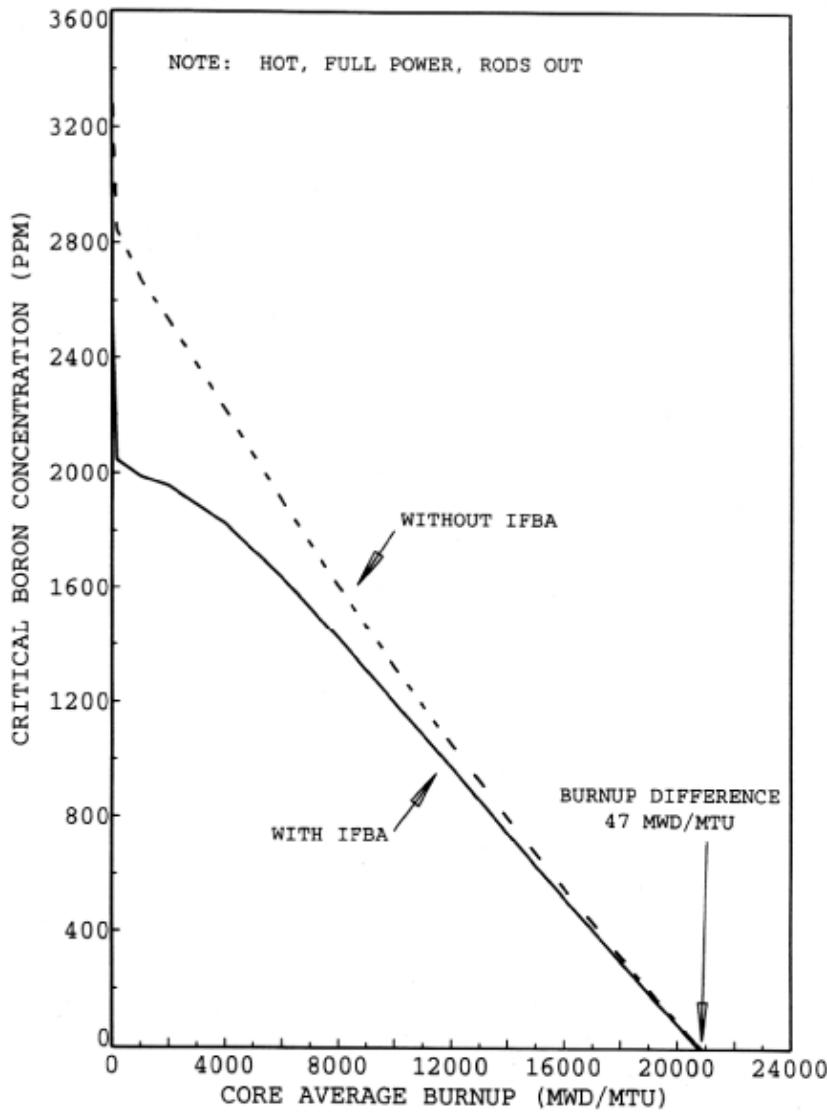
Izgorevanje goriva

^{235}U - od 4% -> 1.5% , ^{239}Pu od 0% -> 1%,

bor v hladilu - od 2000 ppm -> 0 ppm



vir: Končno varnostno poročilo NEK



- MWD/MTU = MW dni/metric-ton-U
- ppm - parts per million
- NEK 50 ton goriva, cikel 18 mesecev, 2000 MW => cikel ~ 20000 MWd/MTU
- gorivni element je v reaktorju 2-3 cikle

Izgorevanje goriva

nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone

- SAMARIJ-149
 - Absorcijski presek za termične nevtrone $\sigma_a = 41,000 \text{ b}$
 - Nastanek: $^{149}\text{Nd} \rightarrow ^{149}\text{Pm} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$

(Zanemarjen Nd $T_{1/2} < 2 \text{ h}$)

$$\frac{dP}{dt} = \gamma^{\text{Nd}} \sum_f \Phi - \lambda^{\text{Pm}} P$$

$$P = n_{\text{Pm}}$$

$$\frac{dS}{dt} = \lambda^{\text{Pm}} P - S \sigma_a \Phi$$

$$S = n_{\text{Sm}}$$

$$\lambda^{\text{Pm}} = \ln 2 / (53 \text{ ur})$$

- KSENON-135

- Absorcijski presek za termične nevtrone $\sigma_a = 2,600,000 \text{ b}$
- Nastanek: $^{135}\text{Te} \rightarrow ^{135}\text{I} \rightarrow ^{135}\text{Xe} \rightarrow ^{135}\text{Cs} \rightarrow ^{135}\text{Ba}$

(Zanemarjen Te $T_{1/2} < 22 \text{ s}$)

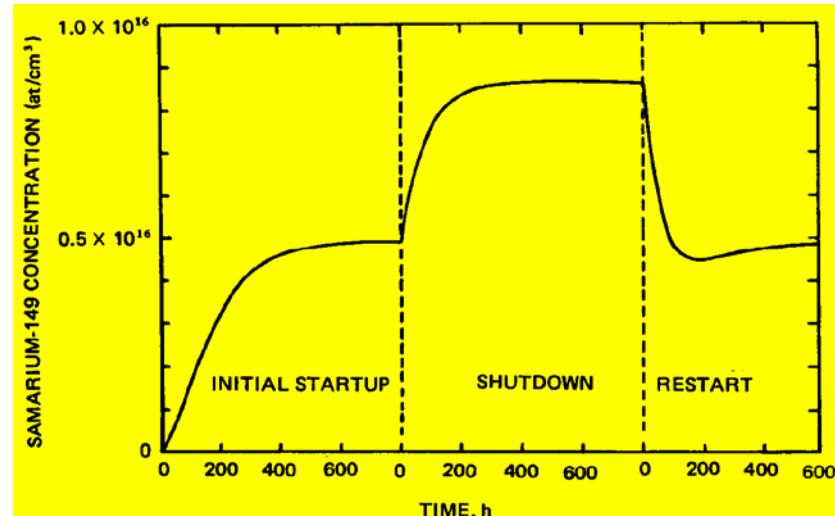
$$\lambda^{\text{I}} = \ln 2 / (6.7 \text{ ur})$$

$$\frac{dI}{dt} = \gamma^{\text{Te}} \sum_f \Phi - \lambda^{\text{I}} I$$

$$I = n_{\text{I}}$$

$$\lambda^{\text{X}} = \ln 2 / (9.2 \text{ ur})$$

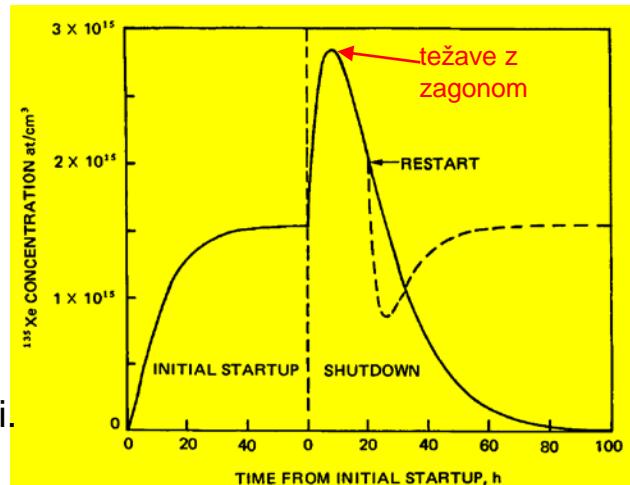
$$\frac{dX}{dt} = \gamma^{\text{X}} \sum_f \Phi + \lambda^{\text{I}} I - X \sigma_a \Phi - \lambda^{\text{X}} X$$



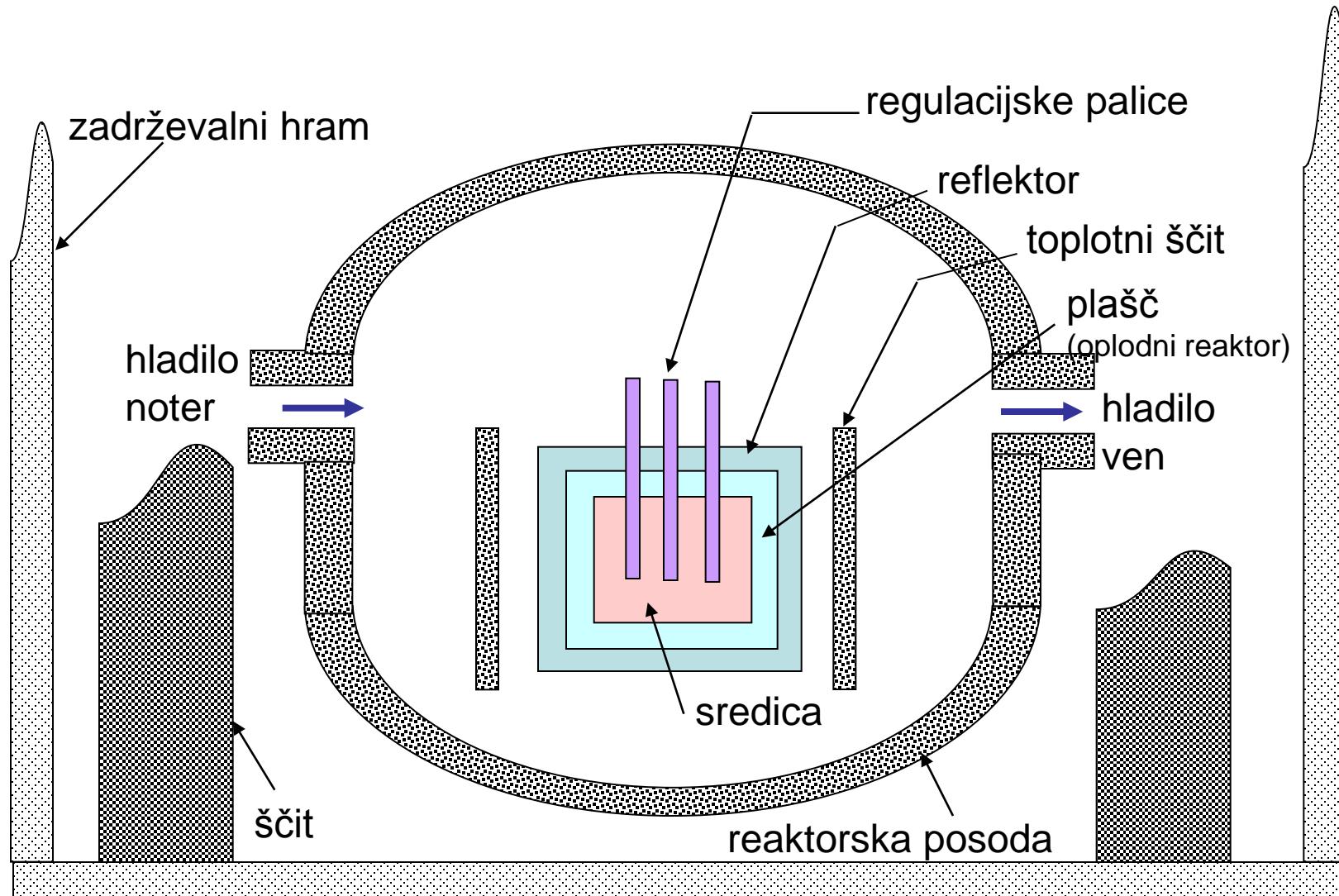
~10 ur po zaustavitvi je reaktor zaradi Ksenona zelo težko ponovno zagnati.
Ksenon omejuje max. nevronski fluks lahko-vodnih reaktorjev

Nd - Neodim

Pm - Prometij



Osnovne komponente skupne večini jedrskih reaktorjev



Hlajenje reaktorja - različni načini...

energetski reaktorji

termični reaktorji

PWR - pressurized water reactor - tlačnovodni reaktor

BWR - boiling water reactor - vrelovodni reaktor



lahkovodni reaktorji -
več kot 3/4 energetskih
reaktorjev

PHWR - pressurized heavy water reactor - težkovodni reaktor

GCR - Gas cooled reactor - plinsko hlajeni reaktor (CO_2)

RBMK - Ruski reaktor (Černobil, moderator grafit, hladilo voda)

...

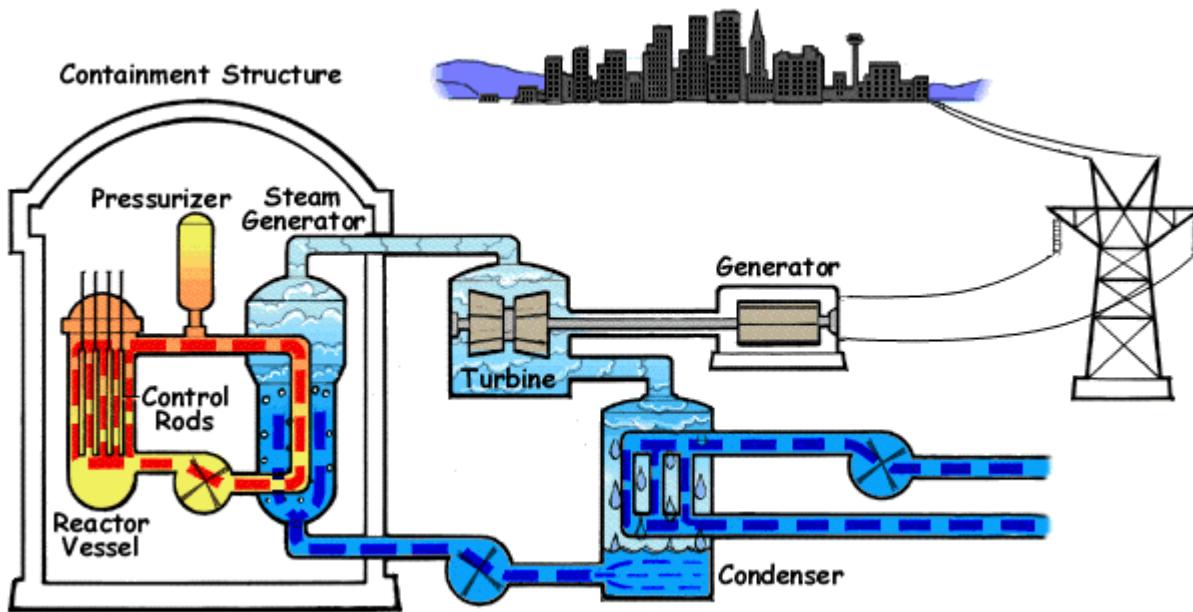
hitri reaktorji (hitri nevroni - oplodni)

LMFBR - Liquid metal fast breeder reactor - hitri oplodni reaktor s tekočo kovino
(Na, Pb, Pb-Bi)

GCFR - plinsko hlajeni hitri reaktor (He)

...

PWR - Tlačnovodni reaktor



slika:
Wikipedia

uparjalniki: 2
ali več

Primarni sistem: $p \sim 150\text{-}160$ bar, $T \sim 310$ °C

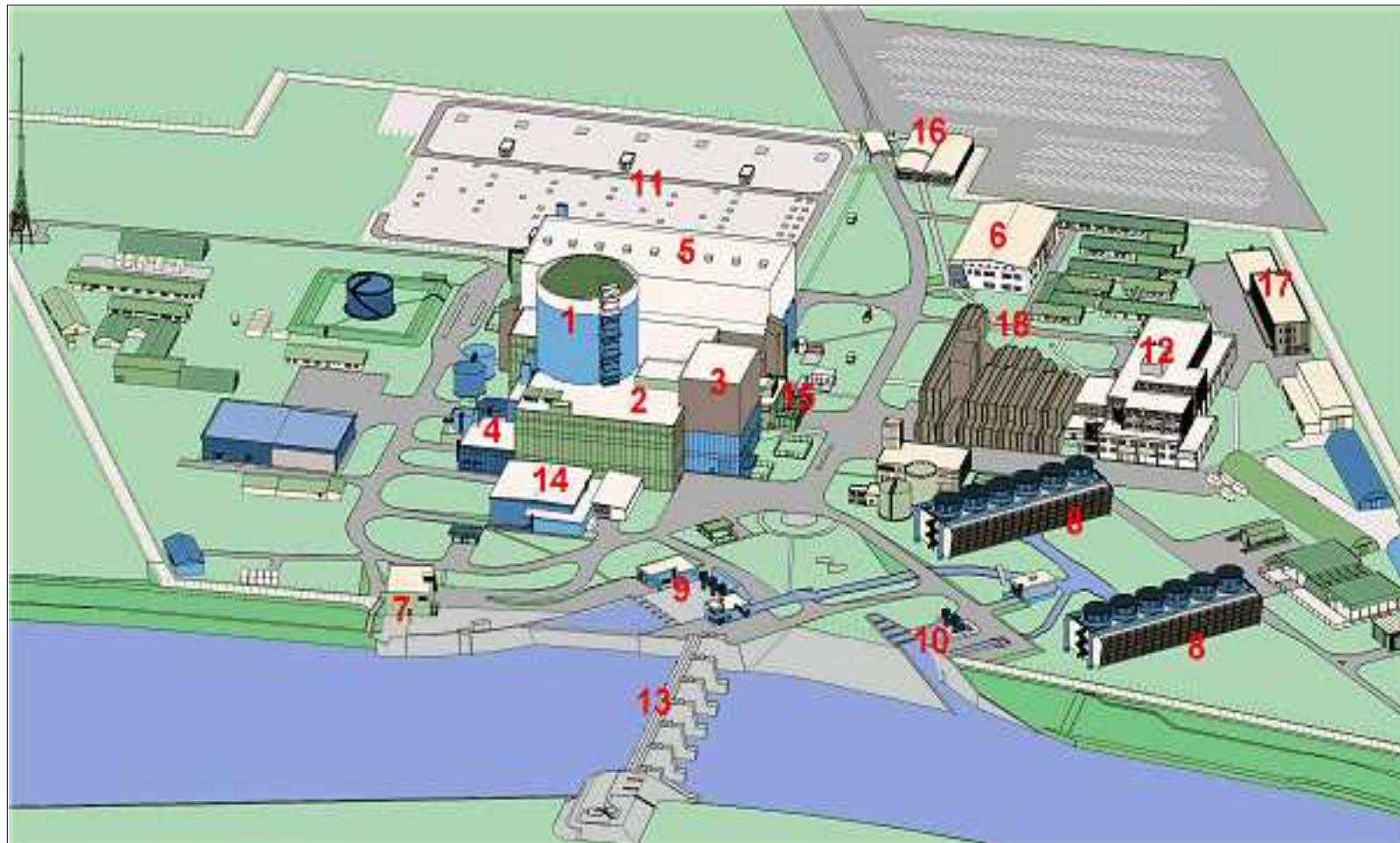
Sekundarni sistem: $p \sim 70$ bar, $T \sim 280$ °C

~60% vseh energetskih reaktorjev (JE Krško) - izboljšane verzije tudi v načrtovanih novih reaktorjih

Ladijski in podmorniški reaktorji

(Še ena kratica: VVER - Ruski PWR - horizontalni uparjalniki)

PWR - Krško - tlačnovodni reaktor



[1-Zadrževalni hram](#)

2-Pomožna stavba

3-Stavba za sveže gorivo

4-Stavba hladilnih sistemov

[5-Turbinska zgradba](#)

6-Center za usposabljanje

7-Pomožno črpališče

[8-Hladilni stolpi](#)

9-Črpališče vode

10-Iztok hladilne vode

[11-Stikališče](#)

12-Upravna stavba

[13-Jez na Savi](#)

14-Skladišče RAO

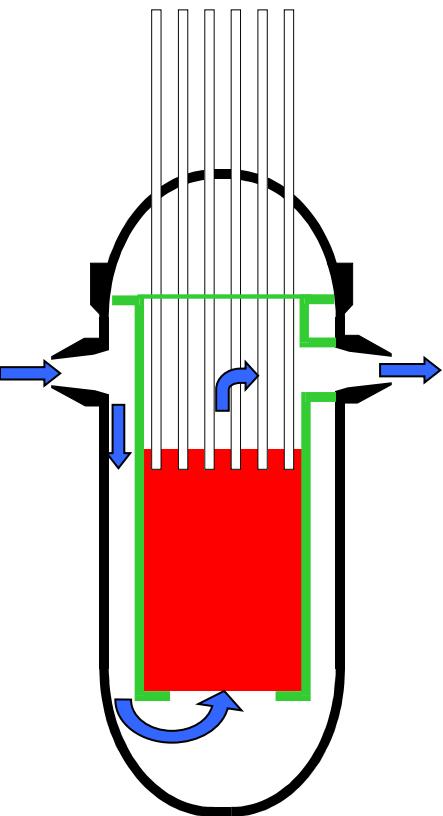
15-Dizel generatorja

16-Vratarnica

17-Garaže

18-Upravna stavba

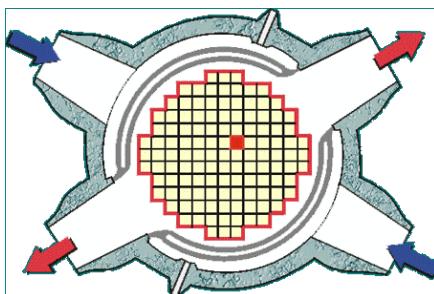
Krško - reaktorska posoda



Toplotna moč reaktorja: 1994 MW
Električna moč na sponkah generatorja: 727 MW
Moč na pragu elektrarne: 696 MW
Toplotni izkoristek: 35 %

Gorivo

Število gorivnih elementov: 121
Število gorivnih palic v gorivnem elementu: 235
Razporeditev gorivnih palic: 16 x 16
Dolžina gorivnih palic: 3,658 m
Debelina srajčke: 0,572 mm
Gradivo srajčke: Zircaloy-4
Kemična sestava goriva: UO_2
Premer tablete goriva: 8,192 mm
Zunanji premer gor. palice: 9.5 mm
Dolžina tablete goriva: 13,46 mm
Skupna količina urana: 48,7 t



Reaktorsko hladilo

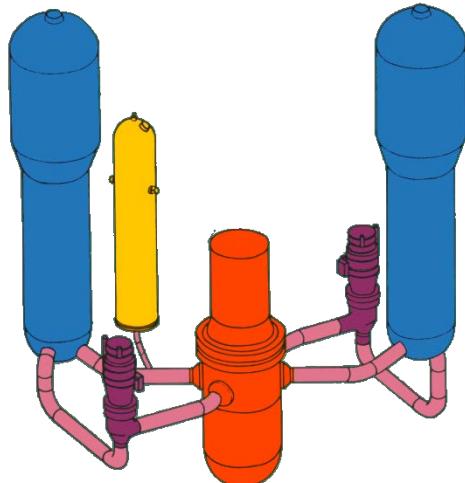
vir: www.nek.si

Snov: H_2O
Dodatki: H_3BO_3

Regulacijske palice

Število regulacijskih svežnjev: 33
Število absorpcijskih palic v svežnju: 20
Celotna teža regulacijskega svežnja: 53,07 kg
Nevtronski absorber: Ag-In-Cd (80-15-5) %

Krško - primarni sistem, uparjalnik



Primarni sistem

Število hladilnih zank: 2

Skupni masni pretok: 9400 kg/s

Tlak: 15,41 MPa

Celotna prostornina: 197 m³

Temperatura na vstopu v reaktor: 287 °C

Temperatura pri izstopu iz reaktorja: 324 °C

Število črpalk: 2

Zmogljivost črpalke: 6,3 m³/s

Moč motorja črpalke: 5,22 MW

Uparjalnik:

Material: INCONEL 690 TT

Tlak pare pri izstopu: 6,5 MPa

Temperatura pare pri izstopu: 280,1 °C

Temperatura napajalne vode: 219,4 °C

Masni pretok pare iz obeh uparjalnikov: 1090 kg/s

Višina uparjalnika: 20,6 m

Število U-cevi: 5428

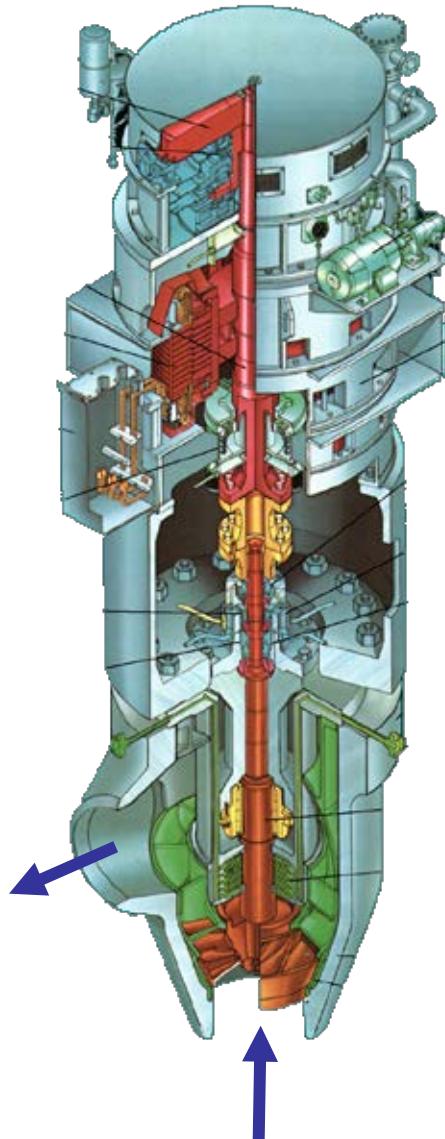
Zun. premer U-cevi: 19,05 mm

Teža uparjalnika: 345 t

Površina prenosa toplote: 7177 m²

Debelina stene U-cevi: 1,09 mm

Krško - primarni sistem, črpalka, tlačnik



Črpalka:

Število črpalk: 2

Zmogljivost črpalke: 6,3 m³/s

Moč motorja črpalke: 5,22 MW



prhe

grelci

Tlačnik ~28 m³:

T~ 345 °C

nivo kapljevine ~ 50%

Grelci - višanje primarnega tlaka

Prhe - nižanje primarnega tlaka

Varnostni ventili na vrhu tlačnika

povezava s
primarnim
sistemom

Krško - turbina, generator

Turbina:

maksimalna moč: 727 MW

Pretok pare: 1090 kg/s

Vstopni tlak sveže pare: 6,2 MPa

Temperatura sveže pare: 275,5 °C

Vrtilna hitrost turbine: 1500 vrt./min

Vlažnost pare ob vstopu: 0,46 %

Kondenzacijski tlak (vakuum): 5,1 kPa

Povprečna temperatura kondenzata: 33 °C

Število glavnih napajalnih črpalk: 3

Zmogljivost napajalne črpalke: 50 %

Generator:

Nazivna moč generatorja: 813 MVA

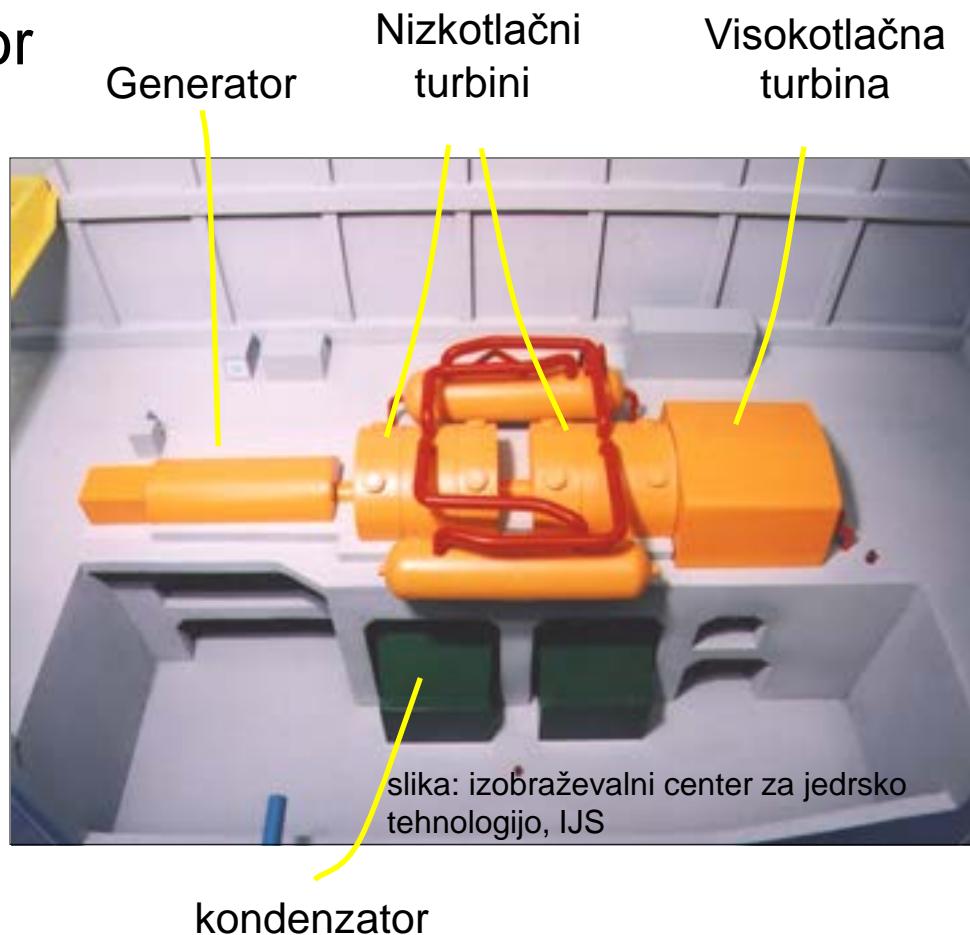
Nazivna napetost: 21 kV

Nazivna frekvenca generatorja: 50 Hz

Nazivni $\cos \phi$: 0,85

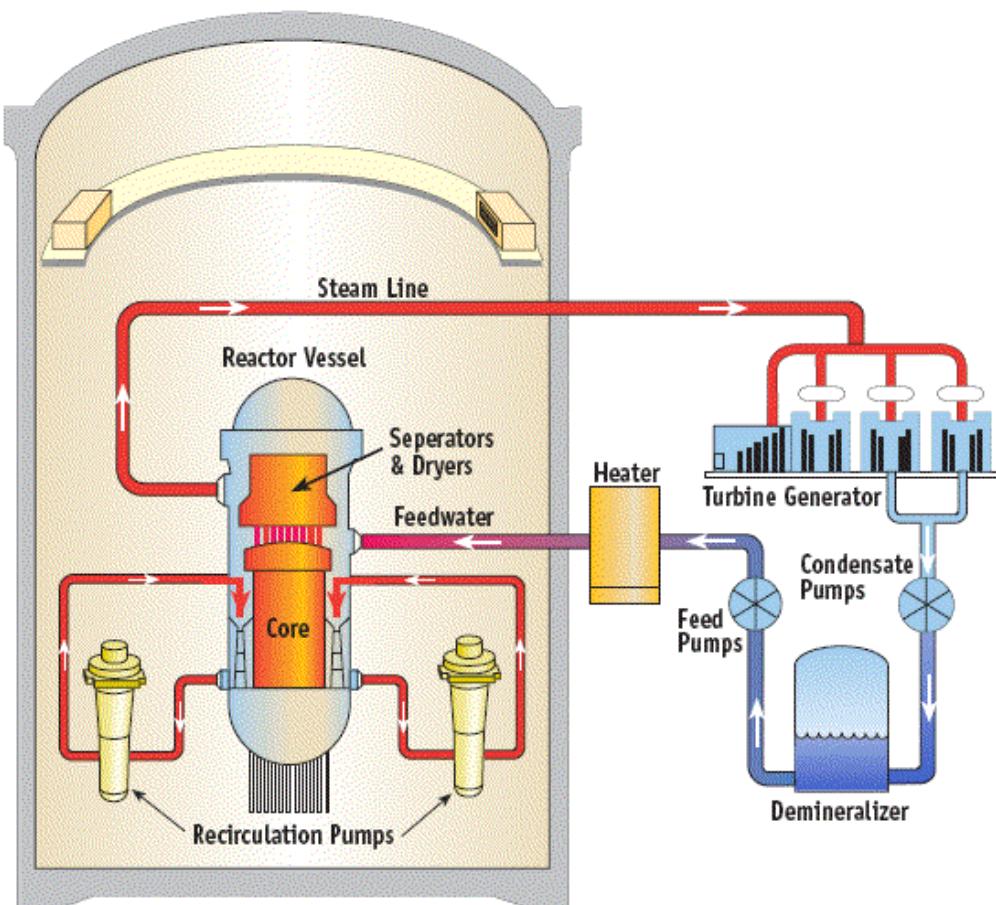
Blokovna transformatorja - Nazivna moč: 1 x 500 MVA, 1 x 400 MVA, Prestavno razmerje: 21/400 kV

Transformatorja lastne rabe Maksimalna dovoljena trajna moč: 2 X 30 MVA



BWR - Vrelovodni reaktor

slika: www.eia.doe.gov



~20% vseh energetskih reaktorjev.

Hladilni sistem: $p \sim 75$ bar, $T \sim 285$ °C,

Razlike BWR - PWR:

- Stabilnost vrenja - vprašljiva pri nizkem tlaku, stabilno pri tlaku BWR hladila.
- Radioaktivna para na turbini - potrebno ščitenje.
- Tanjše stene reaktorske posode a večja posoda kot v PWR.
- Regulacijske palice skozi dno posode.
- Brez bora v hladilu.

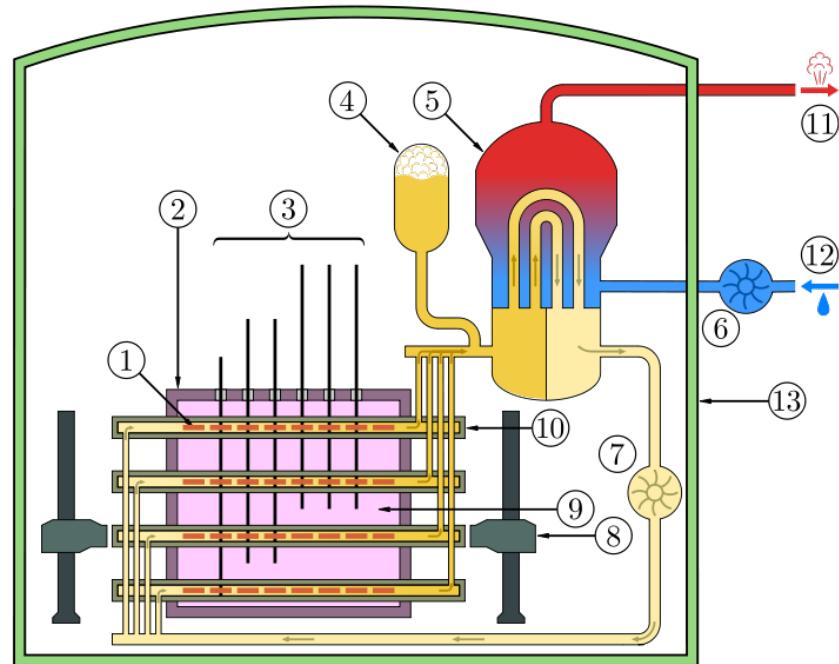
Recirkulacijske črpalke: pretok skozi sredico 7x večji od toka pare. Z recirkulacijskimi črpalkami je mogoče nadzorovati moč reaktorja.

PHWR - Težkovodni reaktor Kanada - CANDU (slika)

Nekaj 10 reaktorjev - predvsem v Kanadi in Indiji

- uporablja naravni uran
- CANDU - ni reaktorske posode ampak "Kalandrija" - gorivo v ločenih kanalih - možna menjava goriva med delovanjem.

1 - gorivo, 2 - Kalandrija, 3 - regulacijske palice, 4 - težka voda - primarno hladilo, 5 - uparjalnik, 6 - napajalna črpalka sekundarne (navadne) vode, 7 - črpalka primarne (težke) vode, 8 - naprava za menjavo goriva, 9 - težka voda pri nizkem tlaku (ločena od primarnega sistema - potrebno hlajenje), 10 - tlačna "cev" , 11 - para, 12 - kapljevina iz kondenzatorja, 13 - zadrževalni hram.

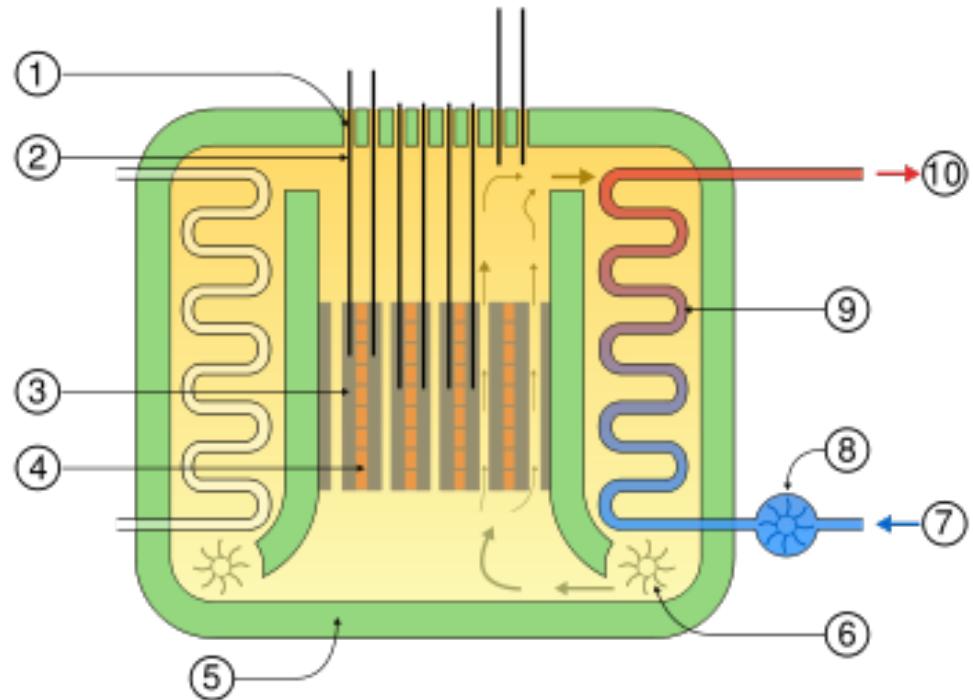


GCR - plinsko hlajeni reaktorji

Nekaj 10 reaktorjev - predvsem v VB

slika: AGR (Advanced GR) - VB

- moderator grafit
- hladilo CO_2



"Uparjalnik" v posodi, 1. cevi za menjavo goriva, 2 - regulacijske palice, 3 - grafit, 4 - gorivo, 5 - betonska tlačna posoda in ščit, 6 - črpalka CO_2 , 7 - voda, 8 - vodna črpalka, 9 - izmenjevalec toplote - " uparjalnik", 10 - para

Projektirana za menjavo goriva med delovanjem.

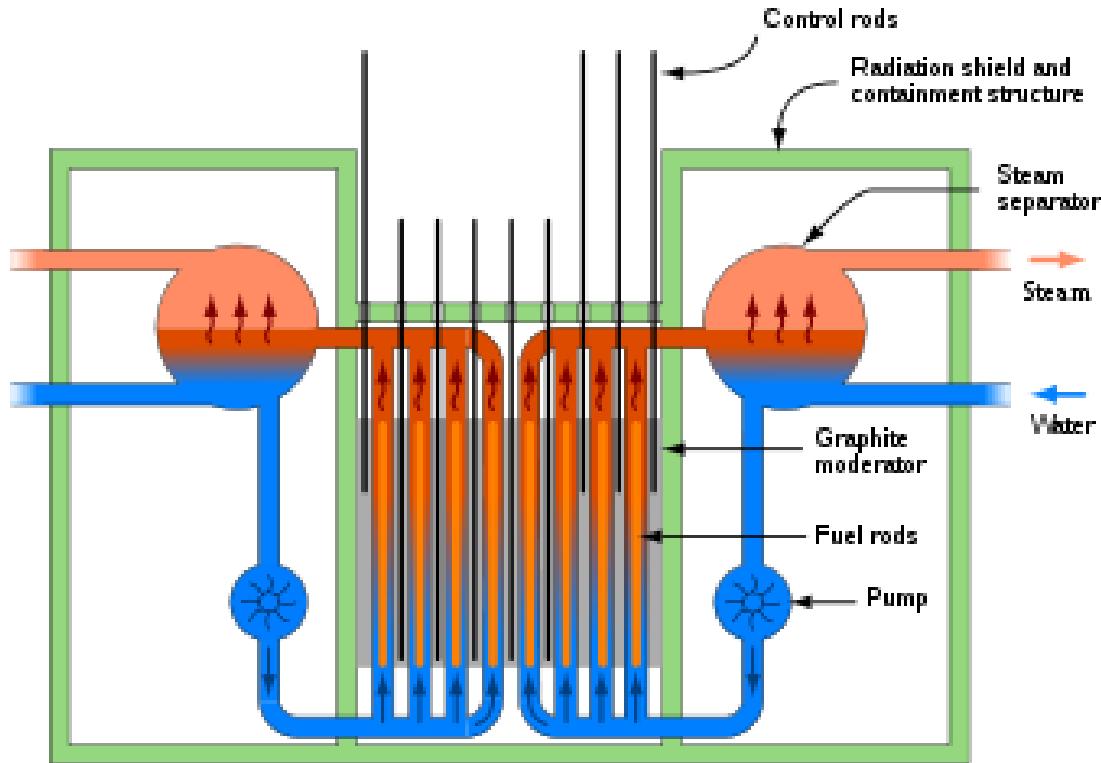
RBMK - reaktor

~25 reaktorjev - v državah bivše SZ, deluje jih še 10 v Rusiji.

Ignalina 2 - Litva - zaprta 2009.

Reaktorska jama:

- ni reaktorske posode - hladilo
- voda - teče po ločenih ceveh. Med cevmi je moderator - grafit.

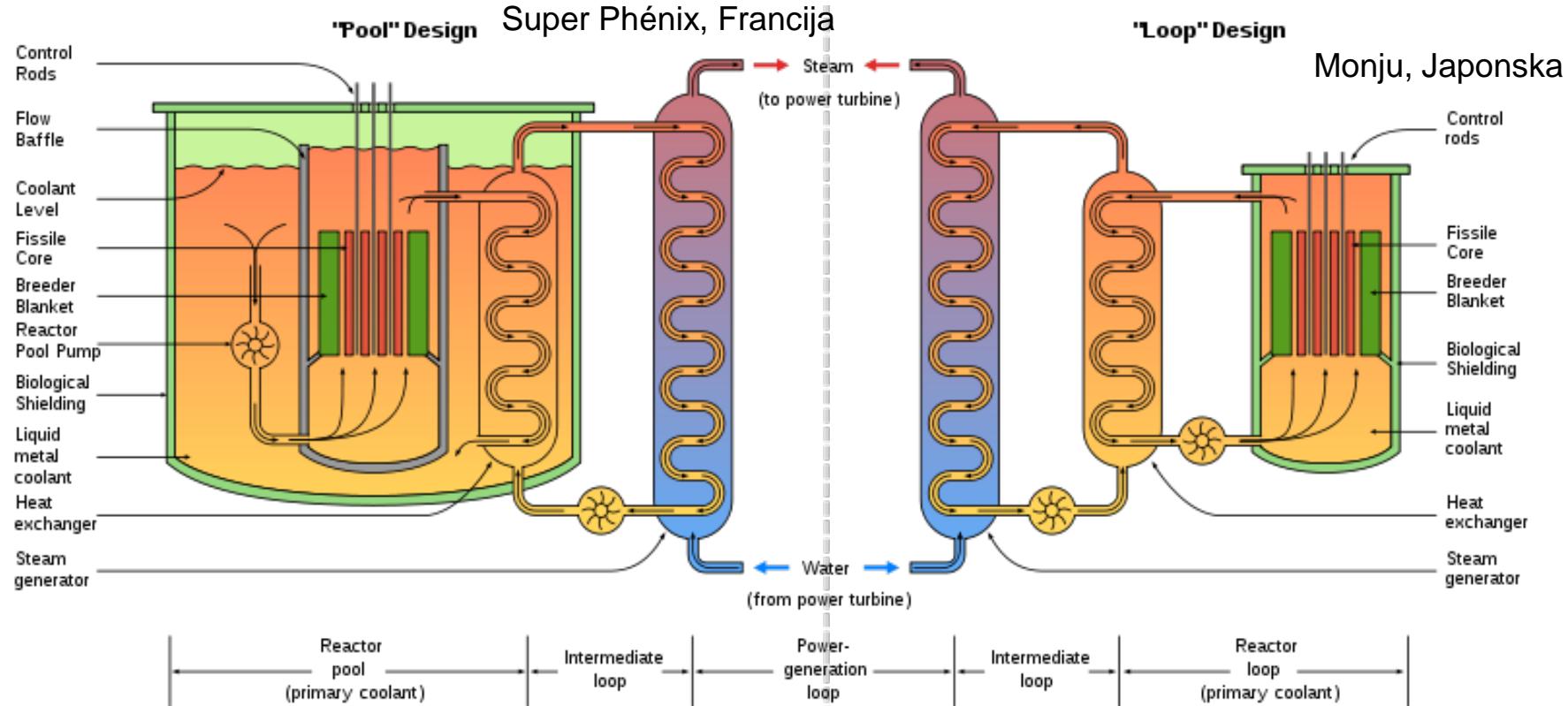


gorivo - 2% obogateni uran - omogoča menjavo goriva med delovanjem.

1000 in 1500 MWe reaktorji.

Hitri reaktorji - LMFBR

slika: wikipedia



Nekaj delajočih prototipov - tipično ~10-300 MWe (Rusija, Francija - Super Phénix 1200 MWe, Japonska). Večino hladi natrij.

Oplodno razmerje: št. nevtronov nastalih ob fisiji narašča z energijo začetnega nevtrona => ČIM MANJ zaviranja nevtronov.

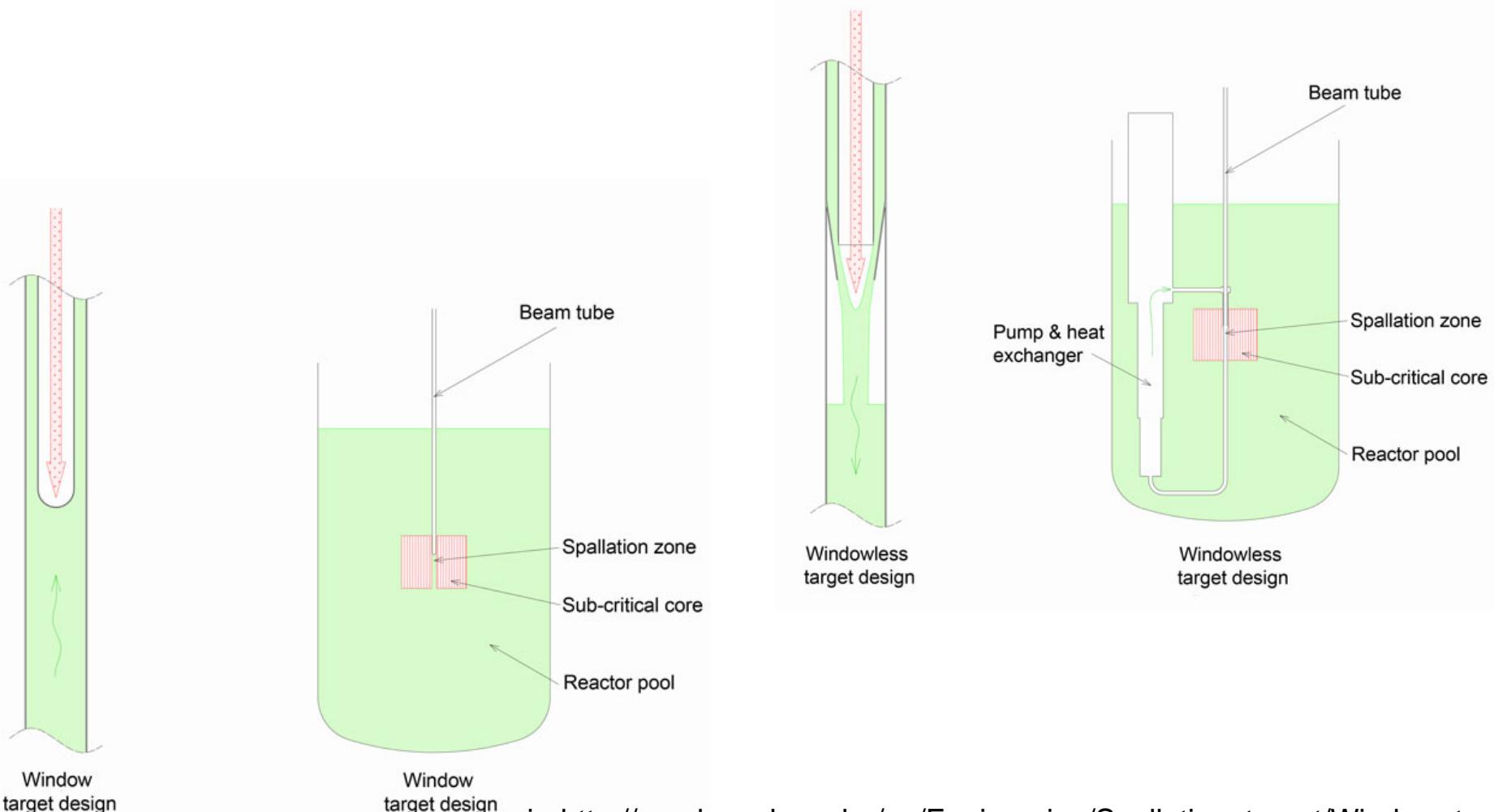
Na: visoka T vrelišča, ni korozije kovinskih struktur, pri sobni temperaturi se strdi, se močno aktivira, puščanje se opazi - Na v zraku reagira.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

- **Very High Temperature Reactor (VHTR)** - za procese, ki zahtevajo toploto pri visokih energija - termo-kemična proizvodnja vodika. Hladilo helij, na izhodu iz sredice temperatura 1000° C. Jedrsko gorivo - TRISO kroglice - gorivo prevlečeno s tremi sloji izotropnih materialov - odporno na visoke temperature. Ovoji vsebujejo grafit. Krogle so lahko samostojne (pebble bed reactor) ali v blokih grafita. Odvajanje toplotne gorivu hladi na maks. 1600° C med normalnim obratovanjem in izrednimi dogodki.
- **Gas-cooled Fast Reactor (GFR)** uporablja helij kot hladilo, fisijo vzdržujejo hitri nevroni. Gorivni cikel je zaprt: oplodni reaktor uporablja in proizvaja gorivo, učinkovita transmutacija aktinidov (atomska števila od 90 navzgor). Gorivo v obliki palic, plošč, ali prizmatičnih blokov. Hladilni sistem podoben VHTR.
- **Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)** hitri nevroni, zaprt gorivni cikel. Glavni cilji: oplodni reaktor, transmutacija aktinidov. Temperatura natrija (hladila) na izhodu iz sredice $\sim 550^{\circ}$ C. Primarni hladilni sistem: "pool" ali "loop" izvedba. Vmesni hladilni sistem prenaša toploto s primarnega kroga na sistem, ki notranjo energijo pretvarja v elektriko. Novi projekti: vmesni hladilni sistem uporablja težko tekočo kovino (svinec), kar prepreči stik natrija in vode.
- **Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)**. Hitri reaktor hlajen s svincem - zelo majhna absorbcija hitrih nevronov in kemično inertno hladilo. Temperatura hladila na izstopu iz reaktorja višja od 550° C (do 800° C, odvisno od vzdržljivosti materiala ). V primerjavi s SFR ima LFR širšo rešetko goriva, ki omejuje hitrost hladila na ~ 2.5 m/s in s tem omeji erozijo materialov ter tlačne izgube v sredici. Načrtuje se "pool" izvedba primarnega hladilnega sistema. Zaradi velike gostote svinca, je načrtovan pasivni odvod toplotne vmed normalnim obratovanjem in med izrednimi dogodki.
- **Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)** - nadgradnja današnjih lahkvodnih reaktorjev. Tlak hladila ~ 25 MPa, temperatura $> 500^{\circ}$ C. Primarno hladilo gre neposredno na turbino. Osnovni cilj - poceni elektrika (visok termični izkoristek). Zaradi nižje gostote vode pri nadkritičnih p in T bo spekter nevronov trši, višje bo razmerje med proizvedenim in porabljenim gorivom, ter manj radioaktivnih aktinidov.
- **Molten Salt Reactor (MSR)** - spekter nevronov nekoliko trši od termičnega, zaprt gorivni cikel z učinkovito izrabo plutonija in transmutacijo aktinidov. Osnovni cilji - proizvodnja elektrike, sežiganje plutonija in aktinidov. Hladilo je tekoča zmes natrija, cirkonija in uranovih fluoridov. Sistem deluje pri nizkih tlakih in ima na izhodu iz sredice temperatuve nad 700° C, kar pomeni visok izkoristek.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

- **Accelerator-driven subcritical nuclear system (ADS)** - hiter nevronskega spektra za sežiganje jedrskih odpadkov (minor actinides - vsi aktinidi razen goriva). Sistem sestavlja trije glavni deli: pospeševalnik protonov, tarča, v kateri iz protonov nastanejo nevroni (spallation target) in podkritična sredica, v kateri poteka transmutacija radioaktivnih odpadkov. Zlitine svinca so lahko hladilo in instočasno "spallation target", sje pri obstrelovovanju Pb s protoni nastaja precej nevronov. Sredica podobna kot v LFR. ADS sistem vsebuje tarčo, ki je vir nevronov, pospeševalnik in podkritičen reaktor. Obravnava se dva različna tipa tekoče kovinskih tarč: tarčo "z oknom" in tarčo "brez okna".



vir: http://myrrha.sckcen.be/en/Engineering/Spallation_target/Window_target

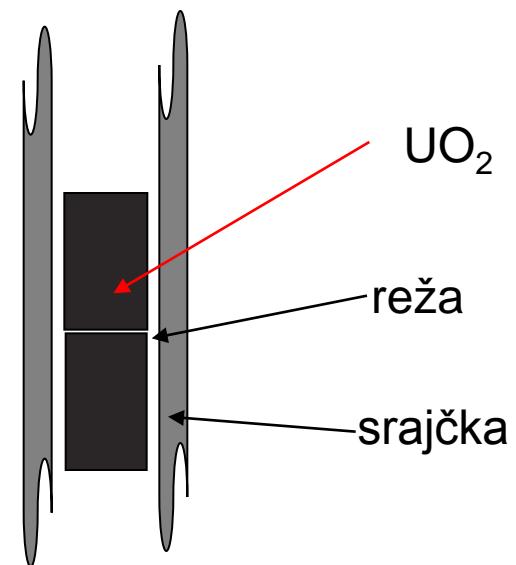
Hlajenje reaktorja - gorivna palica

Gorivna palica - prenos toplote je v radialni smeri veliko večji kot v aksialni (ne velja za tekočo kovino).

- 1) prevajanje toplote v tabletki UO_2 in v srajčki
Poissonova enačba:

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -q \quad q = \begin{cases} q & \text{v tabletki} \\ 0 & \text{v srajčki} \end{cases}$$

(predpostavimo, da se vsa toplota q sprosti v gorivu)



- 2) Reža - prenos toplote s konvekcijo, prevodnostjo in sevanjem.

Primer: Izračunaj temperaturo zunanje stene srajčke v gorivni palici JE Krško s premerom gorivne palice 9.5 mm, debelino srajčke 0.572 mm, če je temperatura v osi tabletke 2000 K. Toplotna prevodnost tabletke je 2 W/m/K, topotna prevodnost cirkonijeve srajčke je 20 W/m/K. Gostota moči v UO_2 je 580 MW/m³. Predpostavi, da je reža med UO_2 in Zr zaprta.

Hlajenje reaktorja - prenos toplote na hladilo

Prenos toplote v hladilo - konvekcija

$$j = h(T_{srajcka} - T_{hladilo})$$

$$j [\text{W/m}^2] = q * \pi D^2 dz / (\pi D dz) = qD/4 \quad \text{- toplotni tok}$$

$T_{srajcka}$ - temperatura srajčke na robu gorivne palice

$T_{hladilo}$ - T_{bulk} ~ povprečna temperatura hladila v "kanalu" ob palici

h - toplotna prestopnost (heat transfer coefficient) -

empirične korelacije (eksperimenti):

$$h = \frac{\lambda}{D_e} \text{Nu}$$

λ topl. prevodnost tekočine
 D_e efektivni premer kanala
 Nu Nusseltovo število - brezdim. topl. prestopnost

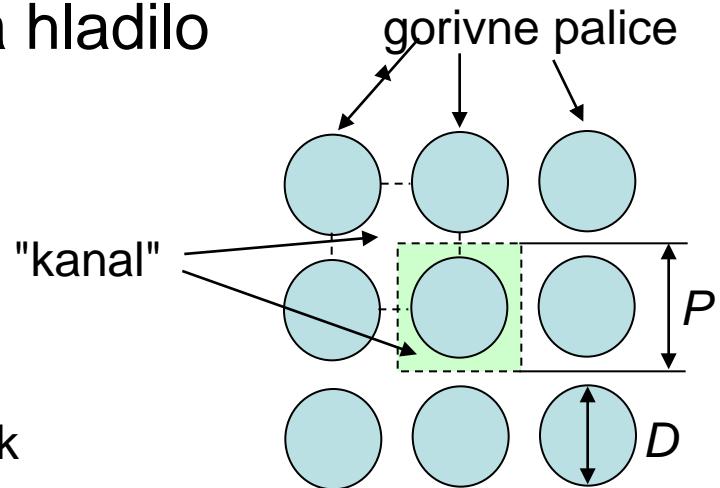
Inženirski zapis:

$$D_e = 4 \cdot (\text{presek kanala}) / (\text{omoceni obod kanala})$$

Če je hladilo voda (ni vrenja) ali plin, je za primer na sliki:

$$\text{Nu} = (0.042 \frac{P}{D} - 0.024) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{(1/3)}$$

JE Krško: P=1.232 cm, D=0.95 cm



$$T_{bulk} = \frac{\int \rho c_p v T dS_{kanal}}{\int \rho c_p v dS_{kanal}}$$

Voda ali plin V cevi:

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$$

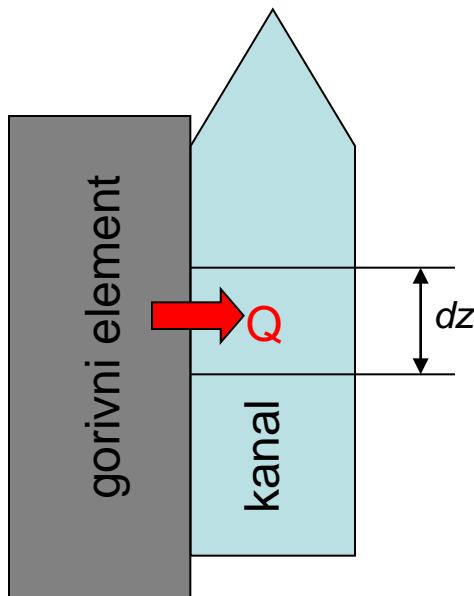
$$\text{Re} = \frac{D_e v \rho}{\mu}$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{Prandtlovo število}$$

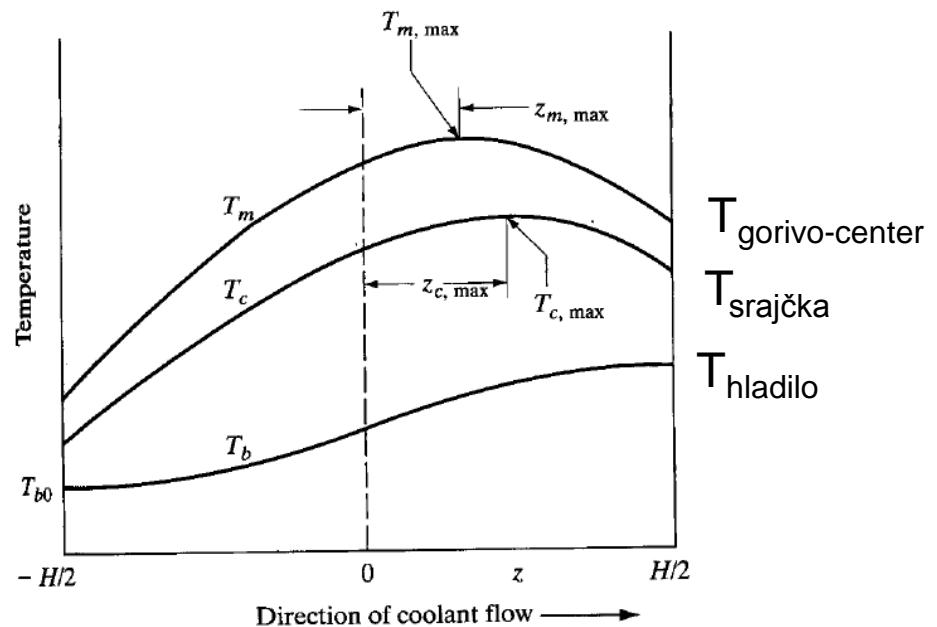
Hlajenje reaktorja - temperatura vzdolž kanala

Moč vzdolž kanala sredice ni konstantna: $q = q(z)$

Uporaben približek: hladilo se premika po kanalu ob gorivnem elementu s povprečno hitrostjo v (1D Eulerjeve enačbe - glej naložo 9 – vaje: $\dot{m}\Delta h = P_Q$)



$$\left. \begin{aligned} P_Q &= q S_{\text{gorivo}} dz \\ \dot{m}\Delta h &= \rho_{\text{hladilo}} S_{\text{kanal}} v c_p dT \end{aligned} \right\} \frac{dT}{dz} = \frac{q(z)}{\rho v c_p} \frac{S_{\text{gorivo}}}{S_{\text{kanal}}}$$



slika desno
(Lamarsh, Baratta):
 $q(z) = q_{\max} \cos(\pi z / H)$

Hlajenje reaktorja

Moč reaktorja je sorazmerna fluksu termičnih nevronov (številu fisij na enoto volumna)

Večina sproščene energije (~97%) ostane v gorivu, le γ sevanje del energije sprosti v moderatorju in ostalih materialih sredice.

Predpostavimo, da imajo vsi nevtroni enako energijo in da reaktor deluje stacionarno:

$$(\nu \Sigma_f - \Sigma_a) \Phi = -D \nabla^2 \Phi$$

Difuzijsko enačbo lahko rešimo, če predpostavimo, da so $\nu, \Sigma_f, \Sigma_a, D$ konstante.

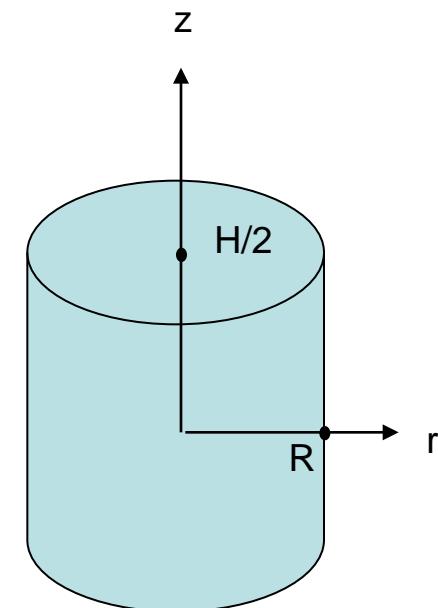
V homogenem reaktorju cilindrične oblike brez reflektorja sta nevtronski fluks in porazdelitev moči sorazmerna:

$$\Phi(r, z) \propto q(r, z) \propto J_0(2,405r/R) \cos(\pi z/H)$$

Razmerje med maks. močjo pri $r=0$ in $z=0$ in povprečno močjo tega reaktorja:

"konični faktor moči" = 2.4

Dejanski reaktor: razmerje naj bo čim manjše in porazdelitev moči čim bolj enakomerna! Reflektor, razporeditev goriva - večja obogatitev na obod, manjša v sredino.



Porazdelitev moči v JE Krško

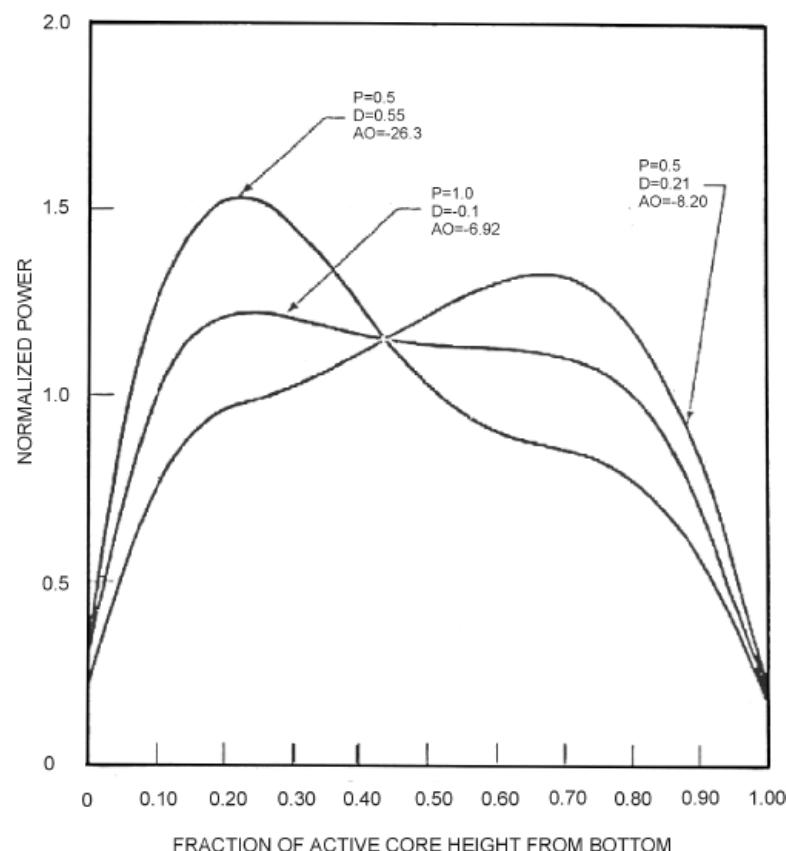
	1	2	3	4	5	6	7
1	1.003	1.271	1.043	0.969	1.281	1.157	0.530
2	1.271	1.058	1.066	1.272	1.075	1.098	0.492
3	1.043	1.067	1.064	1.139	1.236	0.934	
4	0.969	1.273	1.140	1.259	1.073	0.514	
5	1.281	1.075	1.236	1.075	0.561		
6	1.157	1.099	0.934	0.515			
7	0.530	0.494					

Calculated $F_{\Delta H} = 1.373$

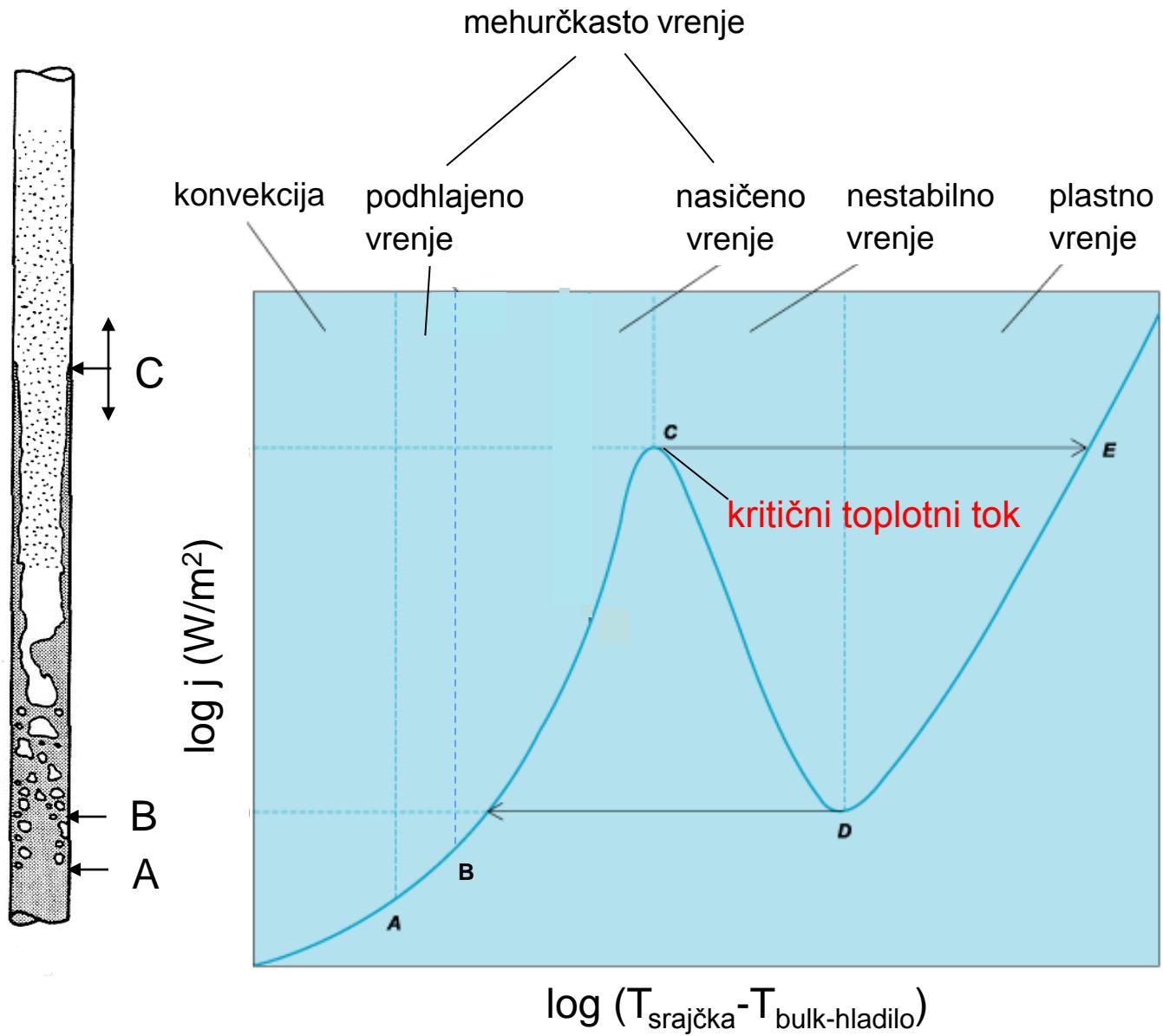
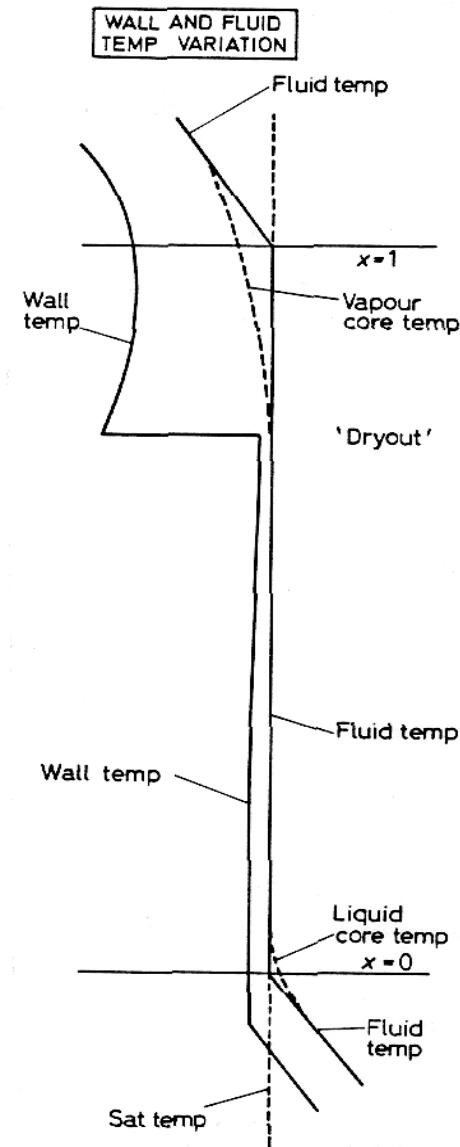
Relativna moč sredice JE Krško

vir:

NE Krško USAR,
Rev. 7, Fig. 4.3-11B,
4.3-15A



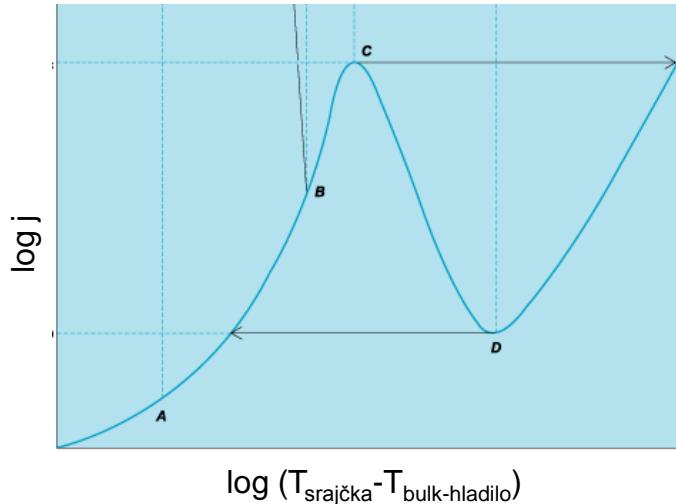
Prenos toplote z vrenjem



Hlajenje reaktorja - omejitve

Hlajenje reaktorja:

- velika gostota moči
- gorivo se ne sme staliti !
- sevanje spreminja lastnosti materialov
- zaostala toplota fizijskih produktov



Preprečiti poškodbe goriva - preprečiti kritični toplotni tok oz. "krizo vrenja" (DNB - Departure from Nucleate Boiling)

Razmerje krize vrenja - (DNB ratio - **DNBR**):
$$DNBR = \frac{j_{\text{kriticni}}}{j_{\text{dejanski}}}$$

Projektiranje reaktorja: DNBR mora biti vedno, v vsaki točki sredice večji od 1.

Težava: natančna vrednost j_{kriticni} ni znana. Določajo ga korelacije.

Varnostni faktor pri projektiranju tlačnovodnih reaktorjev: med delovanjem ali prehodnimi pojavi mora veljati: $DNBR > 1.3$.

DNB razmerje - najpomembnejša omejitev pri načrtovanju reaktorja

Hlajenje reaktorja - omejitve vroči kanal, vroča točka

$$DNBR = \frac{j_{kriticni}}{j_{dejanski}}$$

Projektiranje reaktorja:

a) $DNBR > 1.3 \Rightarrow$ faktor vročih mest $F_{Q\text{-max}} = 2.34$ (JE Krško)

$$F_Q(r, z)_{\max} = \frac{q(r, z)_{\max}}{\langle q(r, z) \rangle}$$

b) faktor vročega kanala $F_{\Delta H\text{-max}} = 1.59$ (JE Krško)

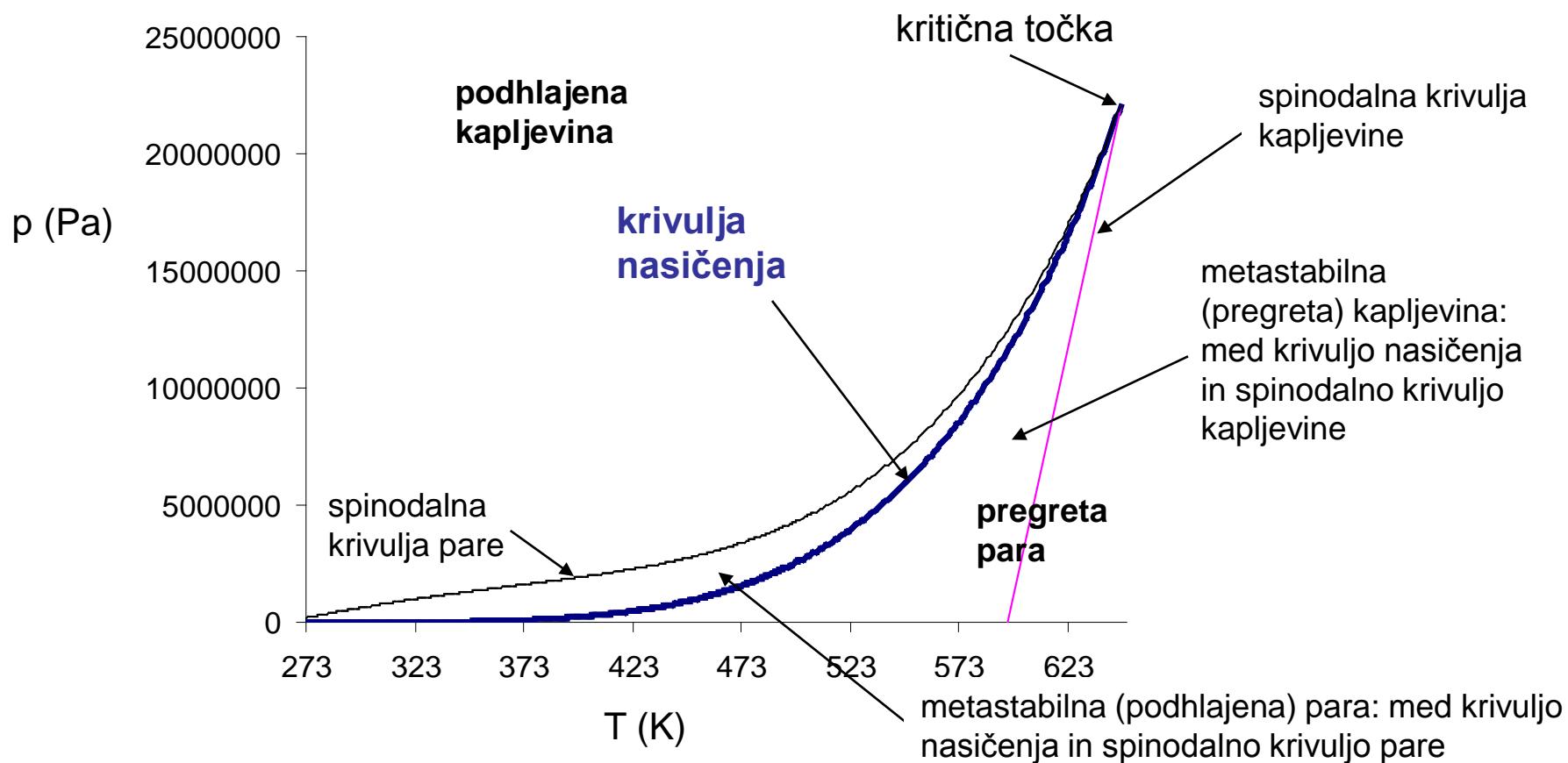
$$F_{\Delta H}(r)_{\max} = \frac{\text{prirastek entalpije v najbolj vročem kanalu}}{\text{povprecen prirastek entalpije v sredici}}$$

Izračunaj maksimalni dovoljen topotni tok v sredici JE Krško in maksimalno temperaturno razliko med vstopno in izstopno točko vročega kanala JE Krško.

Izračunaj temperaturni profil zunanje površine gorivne palice, notranje površine gor. palice in v središču goriva v vročem kanalu. Predpostavi porazdelitev moči v vročem kanalu $P = P_{\max}(0.3 + 0.7 \cdot \cos(\pi \cdot z / H))$, $H = 3.66 \text{ m}$ $z \in [-H/2, H/2]$

Parne tabele - Domača naloga - pripravi si novo verzijo tabele z lastnostmi vode v stanju nasičenja - podobno tisti iz 1962 v "Toplotu", Kuščer, Žumer.

vir: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (enačbe stanja za številne snovi)



1D Eulerjeve enačbe v "cevi" spremenljivega preseka

$$\frac{\partial S\rho}{\partial t} + \frac{\partial S\rho v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial S\rho v}{\partial t} + \frac{\partial S\rho v^2}{\partial x} + S \frac{\partial p}{\partial x} = S(\rho g_x - F - F_{tr})$$

$$\frac{\partial S\rho e}{\partial t} + \frac{\partial S v (\rho e + p)}{\partial x} = S(q + F_{tr} v - F v)$$

$$e = u + v^2 / 2$$

$$u = u(p, \rho) \quad \text{enačba stanja}$$

Podroben komentar enačb - vaje iz TD in mehanike tekočin...



Sevanje

(Več o sevanju: **Pucelj/Golob - predavanja - Fizikalna merjenja II**)

Vrste sevanja: α , β , γ , n

Gama sevanje nekateri delijo na (pri JTE ne delamo razlik):

- Roentgensko sevanje (x-rays) - elektronski prehodi
- γ sevanje - izsevani iz jeder

Interakcije sevanja s snovjo:

α - EM interakcija povzroči vzbujanje atomov in ionizacijo...

α sevanje ustavi nekaj cm zraka

β - EM interakcija - povzroči ionizacijo, vzbujanje atomov, zavorno sevanje... β - ustavi tanka kovinska plošča

γ - fotoefekt, Comptonsko sisanje, tvorba parov

γ - zelo prodorno sevanje $e^{-\mu x}$

n – nenabiti delci - zelo prodorno sevanje – atenuacija e^{-kx}

Radioaktivni razpad:

gostota jeder n

razpadna konstanta $\lambda(s^{-1})$

aktivnost $A = \lambda n(t)$ (razpadi/s= Becquerel [Bq])

$$1 \text{ Curie [Ci]} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n; \quad n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)$$

razpolovni čas $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

Atenuacija EM valovanja v snovi:

- če se fotoni absorbirajo v snovi z gostoto atomov n in s skupnim mikroskopskim presekom σ je

$$\mu = n \sigma \quad \text{- linearni koeficient atenuacije}$$

(μ / ρ) - masni koeficient atenuacije ~ 0.2 za večino snovi

pri prehodu skozi steno debeline x velja:

$$\Phi_{FOTONOV} = \Phi_{0-FOTONOV} e^{-\mu x}$$



Tipične aktivnosti

www.world-nuclear.org/education/rad.htm in ...

1 odrasel človek (100 Bq/kg)	7 kBq
hišni detektor dima (z Americijem)	30 kBq
Radioizotopi za medicinsko diagnostiko	70 MBq
Izpusti Černobil, Fukušima (ekvivalent I-131)	5000 PBq, 1000 PBq
Radioizotopi za onkološko terapijo	100 TBq
1 kg 50 let starih visokoradioaktivnih jedrskeh odpadkov	10 TBq
Svetleči znak za "zasilni izhod" (1970)	1 TBq
Terapija scitnice - hiperaktivna scitnica ali rak scitnice: I-131	~0.4 GBq - 5 GBq
1 kg urana	25 MBq
1 kg uranove rude (Kanada, 15%)	25 MBq
1 kg uranove rude (Avstralija, 0.3%)	0.5 MBq
1 kg nizko radioaktivnih odpadkov	1 MBq
1 kg premogovega pepela	2 kBq
1 kg granita	1 kBq
Izpusti iz NEK v 2010:	0.17 TBq v zrak, 21 TBq tritija v Savo, 37 MBq razcepnih produktov
RADON:	
Stanovanje v Evropi	~100 Bq/m ³ (Radon)
Stanovanje v Avstraliji	~10 Bq/m ³ (Radon)
Radon na prostem v EU	~10-20 Bq/m ³
Postojnska jama	1000-2000 Bq/m ³
Taborska - Županova jama	1000-6000 Bq/m ³
Vrtec Tomaj 2010/2011: pozimi nihanja od nekaj (poročila na TV 60000 - merjeno v špranji),	100 do 4500 Bq/m ³ , povprečje 2000
Watrasova klet	100000 Bq/m ³



Absorbirana in ekvivalentna doza

Absorbirana doza D [Gy=J/kg] = (energija sevanja)/(masa snovi) (Gy- Gray)

Za merjenje AKUTNIH učinkov sevanja

v energiji sevanja se upošteva tudi energija eksotermnih oz. endotermnih jedrskeih reakcij, ki jih povzroči sevanje Hitrost absorbirane doze [Gy/s] (Stara enota: rad=0.01 Gy)

Ekvivalentna doza [Sv - Sievert] - meri biološke posledice sevanja potrebne za oceno STOHASTIČNIH učinkov sevanja.

Natančno merjenje bioloških posledic (preveč natančno za potrebe varstva pred sevanji): 1) obsevanje kulture celic s standardnim sevanjem (250 keV gamma)
 2) obsevanje z drugim tipom sevanja z enako energijo in primerjava posledic

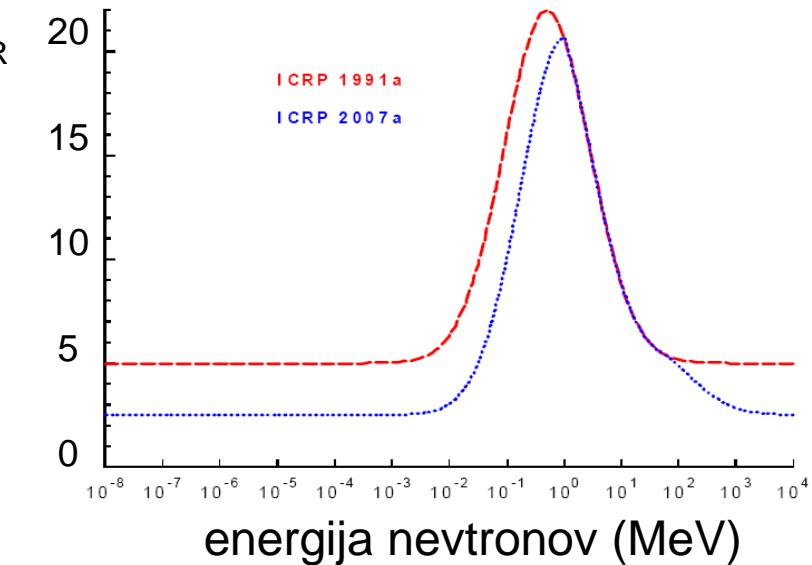
Za doze manjše od nekaj 10 mSv:

Utežni faktor w_R :

Ekvivalentna doza: $H [\text{Sv}] = D [\text{Gy}] \cdot W_R$

Z večje doze je potreben natančnejši račun!

Sevanje	W_R
γ, β (vseh energij)	1
nevtroni	$W_R = W_R(E)$
protoni	2
α , cepitveni produkti	20



Efektivna doza (Sv)

Delno obsevanje telesa nadomestimo z **efektivno dozo** na celotno telo:

$$\varepsilon = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ - absorbirana doza sevanja R v organu (tkivu) T

w_T - utežni faktor za tkivo T

w_R - radiacijski utežni faktor

$w_T:$	0.01	0.04	0.12	0.08
površina kosti	mehur	kostni mozeg	spolne žleze	
možgani	jetra	prsi		
žleze slinavke	požiralnik	danka		
koža	ščitnica	pljuča		
		želodec		
		OSTALO		

Vsota $w_T = 1$

ICRP

Int. Commission on Rad. Prot. 2007 recommendations



Letne efektivne doze **µSv**

Naravni viri - skupaj 2400 (SLO in svet)

Radon (dihanje) - 1300

Hrana - 300 (⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U)

Kozmično sevanje - 300 (primarno - p, sekundarno - n, mioni, ³H, ¹⁴C)

Sevanje tal - 500 (Kerala - na JZ obali Indije - gosto poseljeno - zelo visoko naravno ozadje - mineral monazit - netopen v vodi - Th veriga - 4000-30000 µGy/leto - ni povečanega obolenja za rakom in levkemijo, opazen večji delež poškodb kromosomov)

Življenje na 2000 m n.v. - dodatnih 300

Obisk Postojnske (Županove) jame 10-20 (30-40) (1 mesečno delo v jami ~2000-4000)

Černobil skupaj 720, danes ~1-10
(maksimum: 30.4.1986 4:00 - 1.6 µSv/h, ¹³¹I, ¹³⁷Cs)

Jedrske eksplozije - skupaj - 7200 - danes ~1-10

Polet iz Evrope v ZDA in nazaj ~50 (2-5/uro)

Astro/kozmonavt ISS ~10/**uro**
Televizija (katodna) ~10

Obisk zadrževalnega hrama JEK (I.T.):
3 (okt. 2010), 25 in 38

Prebivati ob ograji JEK ~1/

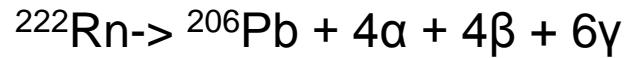
Rentgensko slikanje	Efektivna doza
Glava	10-30
Prsni koš	20-60
Hrbtenica	300-700
Trebuh	500-700
Medenica	700-800
"ortopan"	10
Udi in sklepi	60

Onkološka terapija - zdravljenje - 100-1000 krat večje doze

www.hps.org (Health Physics Society)



Vaje: Radon – doze



Radon – prispeva več kot pol doze iz naravnega ozadja. Zanj ne velja standardna dozimetrija:

Primer – Postojnska jama – obisk 80 minut (1.6 m^3 "podihanega zraka), povprečna koncentracija Rn-222 $\sim 1500 \text{ Bq}$ (razpadi α , $\sim 5 \text{ MeV}$). Kolikšna je ekvivalentna doza enega obiska?

"Standardna" dozimetrija:

Absorbična doza v pljuča:



$$D = 1.2 \text{ m}^3/\text{h} * 1500 \text{ razp./s/m}^3 * 15 \text{ MeV/razpad} * 80 \text{ minut} = \sim 20 \mu\text{Gy}$$

(15 MeV ni energija α iz Rn-222 ampak energija iz α razpada potomcev, ki ostanejo v pljučih:Po, Pb, Bi)

Ekvivalentna doza v pljuča:

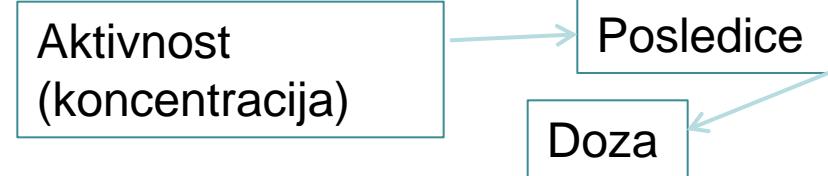
$$H = 20 * D = 400 \mu\text{Sv} \quad (w_R = 20 \text{ za } \alpha)$$

Ekvivalentna doza v telo:

$$H_{ekv} = 0.12 * H = \sim 50 \mu\text{Sv} ??? \quad (w_T = 0.12 \text{ za pljuča})$$

Za Radon se računa neposredno povezavo med izpostavljenostjo in tveganjem za pljučnega raka:

Rn-222



Ekvivalentna doza radona (UNSCEAR 2000):

$$1 \text{ Bq/m}^3 \rightarrow \sim 9 \text{ nanoSv/h}$$

Postojnska jama: $18 \mu\text{Sv}/\text{obisk}$



Vaje...

Aleksandra Litvinenka so zastrupili z 10 mikrogrami Polonija 210 z razpolovnim časom 139 dni. Ob alfa razpadu atoma ^{210}Po se sprosti 5,3 MeV. Biološki razpolovni čas polonija v človekovem telesu je 50 dni. Litvinenko je umrl 22 dni po zastrupitvi. Kakšno dozo sevanja je prejel v času od zastrupitve?

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda_F n - \lambda_B n \quad n(t) = n_0 e^{-(\lambda_F + \lambda_B)t} \quad \lambda_{F,B} = \ln 2 / T_{1/2,F,B}$$

$$n_0 = N_A m_{0-\text{Po}} / M_{\text{Po}} = 3 \cdot 10^{16} \text{ atomov}$$

Aktivnost: $A(t) = \lambda_F n_0 e^{-(\lambda_F + \lambda_B)t}$ $A(t=0) \sim 1.7 \text{ GBq}$

Razpad v telesu: $n = \int_0^{22\text{ dni}} A(t) dt = 0.09 n_0$

Energija = $0.09 \cdot 3 \cdot 10^{16}$ razpadov * $5,3 \text{ MeV/razpad} = 2300 \text{ J}$

Absorbirana doza $2300 \text{ J} / 75 \text{ kg} = 30 \text{ Gy}$

Efektivna doza za alfa delce = $20 \cdot 30 \text{ Gy} = 600 \text{ Sv}$ (Smrtna doza = $\sim 5 \text{ Sv}$)

Pri takšni absorbirani dozi računanje efektivne doze s faktorjem W_R ni ustrezeno, prav tako ni ustrezena uporaba Sievertov!!!

Wikipedia: "It is estimated that he suffered doses of 18 Gy to his bone mass, 520 Gy to the bone surface, 8 Gy to the liver and 1.6 Gy to the lungs"

Učinki sevanja

"ionizirajoče sevanje" - nastanek ionov.

Največ "ionov": $H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-$ ali $H^+ + OH^-$ ob tem še številni drugi ...

Učinki na človeško telo:

- deterministični

- velike akutne (kratkotrajne) doze nad 0.1-0.2 Gy (posledice znane - predvsem iz Hirošime ~ 86000 preživelih in Nagasakija):

do 0.75 Gy	Kromosomske spremembe, lahko začasno zmanjšanje števila levkocitov. Ni drugih opaznih učinkov.
0.75-2 Gy	5-50% izpostavljenih v nekaj urah: bruhanje, slabost, manjše spremembe krvi. Okrevanje v nekaj tednih.
2 - 6 Gy	Vsi izpostavljeni bruhajo v dveh urah. Velike spremembe krvi, krvavitve, povečna občutljivost na infekcije. Nad 3 Sv - izguba las v ~2 tednih, Okrevanje v nekaj mesecih ali letu pri spodnji meji, samo 20% preživelih pri zgornji meji.
6 - 10 Gy	80-100% izpostavljenih umre v 2 mesecih. Redki preživelci zelo dolgo okrevajo.

Zdravljenje delno pomaga (brez zdravljenja ljudje umirajo pri dozah ~2 Gy, z zdravljenjem pri ~5 Gy).

LD₅₀/60 - Lethal dose - doza, ki ubije 50% populacije v 60 dneh. Človek ~3-4 Gy
bakterije in odrasle žuželke LD₅₀/60 ~ 100 Gy

Učinki sevanja

Učinki na človeško telo:

- **stohastični - zakasneli učinki**

(za preživele obsevane z visokimi akutnimi dozami, za manjše akutne doze in za dolgotrajno izpostavljenost nizkim dozam):

- povečano tveganje za raka in levkemijo
- mutacije

Tveganje pri obsevanju z majhnimi dozami

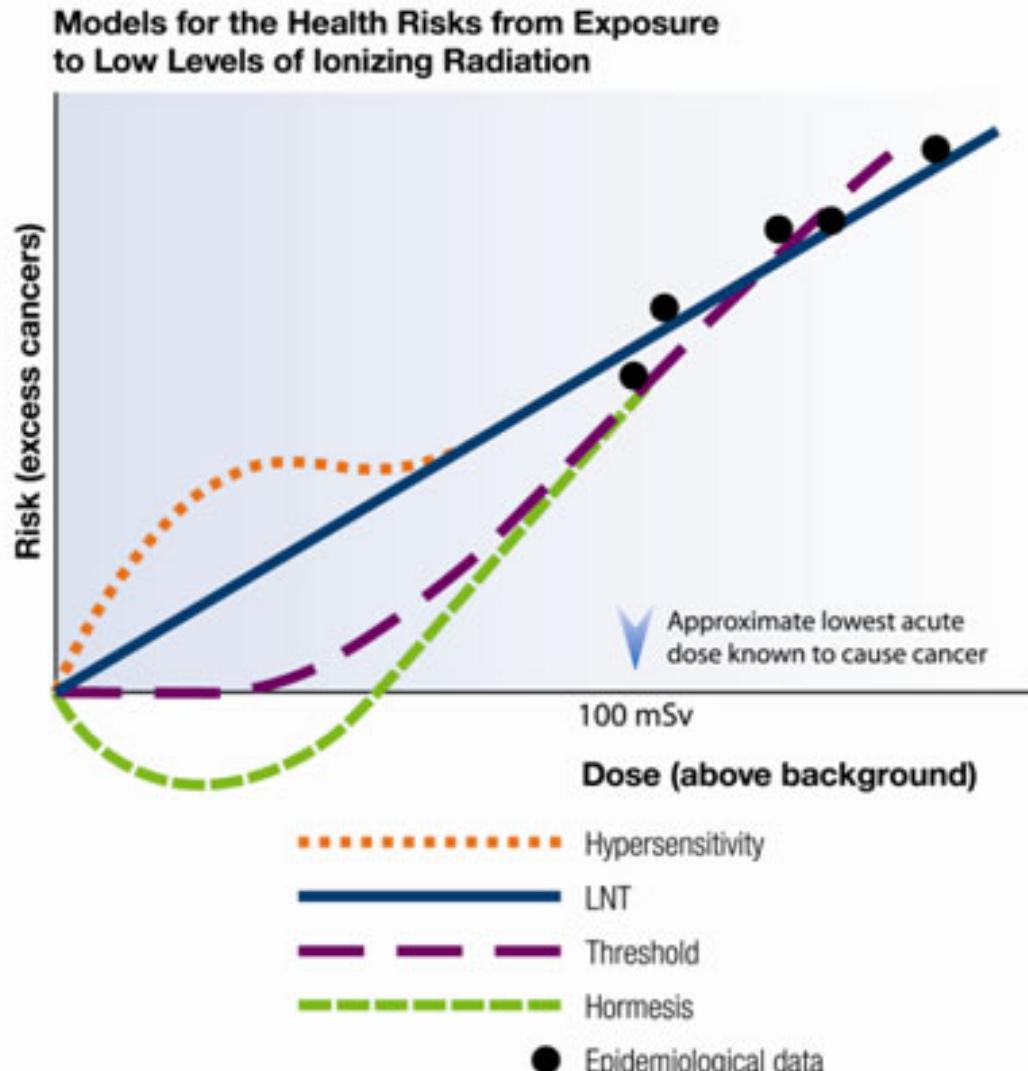
Nominal Probability Coefficients (% Sv⁻¹)

Exposed population	Cancer		Hereditary effects		Total	
	1990	2007	1990	2007	1990	2007
Whole	6.0	5.5	1.3	0.2	7.3	5.7
Adult	4.8	4.1	0.8	0.1	5.6	4.2

For practical protection purposes, the approximated overall fatal risk coefficient of 5% per Sv is still appropriate

ICRP recommendations
2007

Učinki nizkih doz



vir: Canadian Nuclear Safety Commission

Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

UNSCEAR 59th session
(21-25 May 2012):

Str. 10 (25f):

...the Scientific Committee does not recommend multiplying very low doses by large numbers of individuals to estimate numbers of radiation-induced health effects within a population exposed to incremental doses at levels equivalent to or lower than natural background levels;...

http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/67/46

Zaščita pred sevanjem

Preprečiti deterministične učinke

Zmanjšati stohastične učinke

optimizacija ALARA - As Low As Reasonably Achievable

Omejitve umetnih virov sevanja (brez naravnih virov
in obsevanja v medicini)

efektivna doza:

prebivalci	1 mSv/leto
poklicni delavci	20 mSv/leto

poklicni delavci - ekvivalentna doza:

očesna leča	150 mSv/leto
koža, roke, noge	500 mSv/leto

zaščita pred sevanjem:
- čas
- razdalja
- ščit

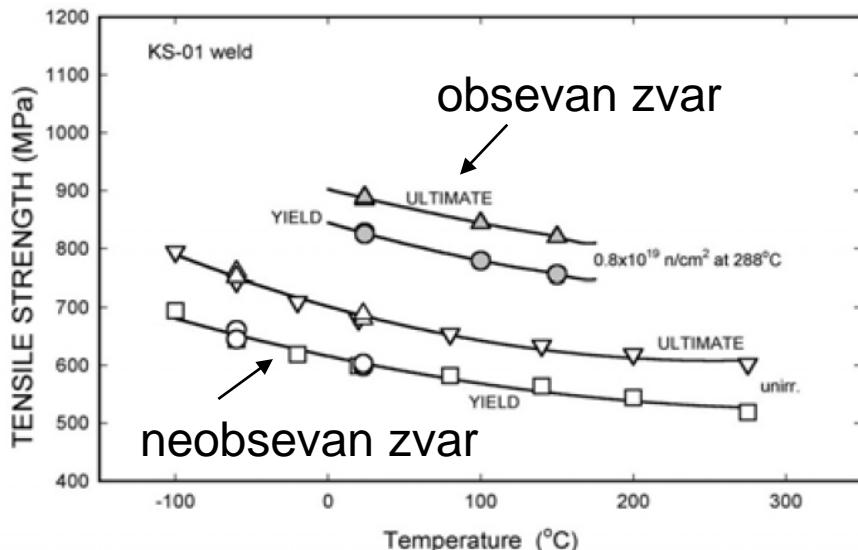
Uprava RS za varstvo pred sevanji:

Nadzira uporabo virov ionizirajočih sevanj v zdravstvu in veterinarstvu, izpostavljenost naravnim virom ionizirajočih sevanj, radioaktivno kontaminacijo živil in pitne vode,

Uprava RS za jedrsko varnost.

Zagotavlja, da je preprečen ali omejen škodljiv vpliv ionizirajočega sevanja na ljudi in okolje ter da se viri ionizirajočega sevanja uporabljam z golj v miroljubne namene.

Učinki sevanja na materiale jedrskih elektrarn



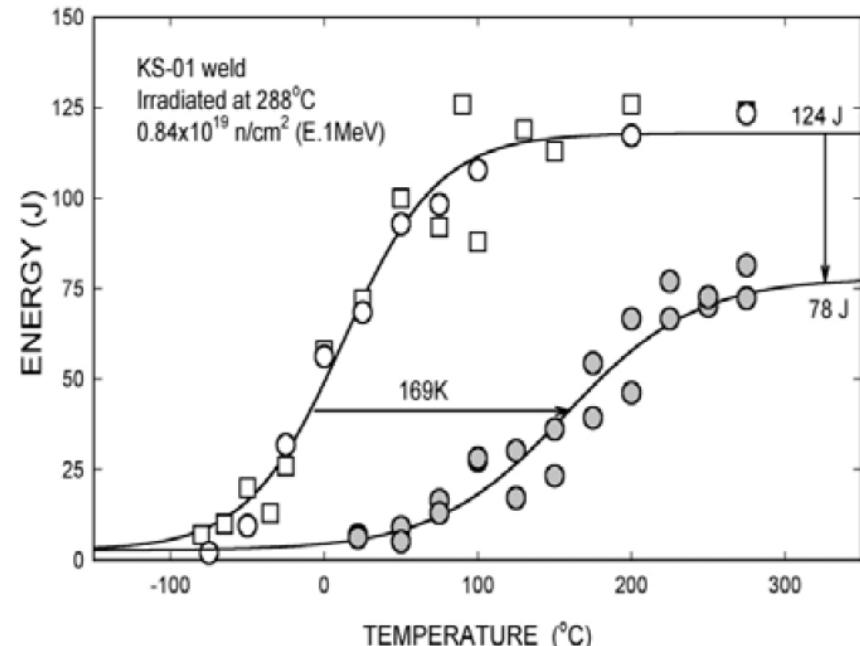
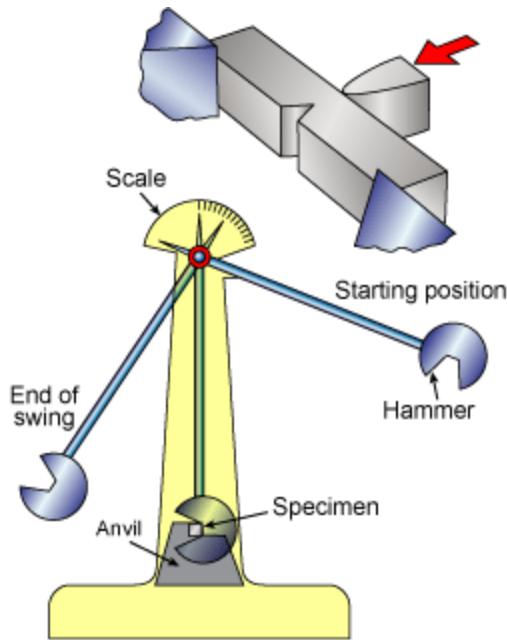
yield strength - meja prožnosti
ultimate strength - meja natezne trdnosti

vir:

R. K. NANSTAD, M.A. SOKOLOV, and D.E. McCABE, *Oak Ridge National Laboratory, 2001*

Desno:

Charpy-jev test in rezultati Charpyjevega testa za obsevan in neobsevan vzorec



material je bolj trden in bolj krhek

Jedrska varnost

Jedrska varnost pomeni varovanje ljudi in okolja pred ionizirajočim sevanjem.

Zagotavljanje jedrske varnosti poteka na več nivojih (obramba v globino):

- 1) Preventiva: preprečevanje nezgod z ustrezeno zasnovou reaktorja, z zagotavljanjem kakovosti med projektiranjem, gradnjo in vzdrževanjem, ter z usposabljanjem osebja.
 - 1a) V primeru odstopanja od normalnega obratovanja se elektrarna avtomatsko ustavi (ustavitev na osnovi meritev nevtronskih detektorjev, tlakov, temperatur in pretokov v primarnem ter sekundarnem sistemu in tlaka v zadrževalnem hramu).
- 2) Zaščita: jedrske elektrarne so opremljene z varnostnimi sistemi, ki tudi v primeru malo verjetne odpovedi vitalnih delov opreme preprečijo prekomerne izpuste radioaktivnih snovi.
- 3) Blaženje: v hipotetičnem primeru - ko bi odpovedali tako preventivni kot zaščitni ukrepi in bi prišlo do taljenja sredice, so elektrarne (še posebej nove) opremljene z varnostnimi sistemi za blaženje posledic in omejevanje radioaktivnih izpustov.
 - 3a) Blaženje posledic izpustov radioaktivnih snovi.

O jedrski varnosti

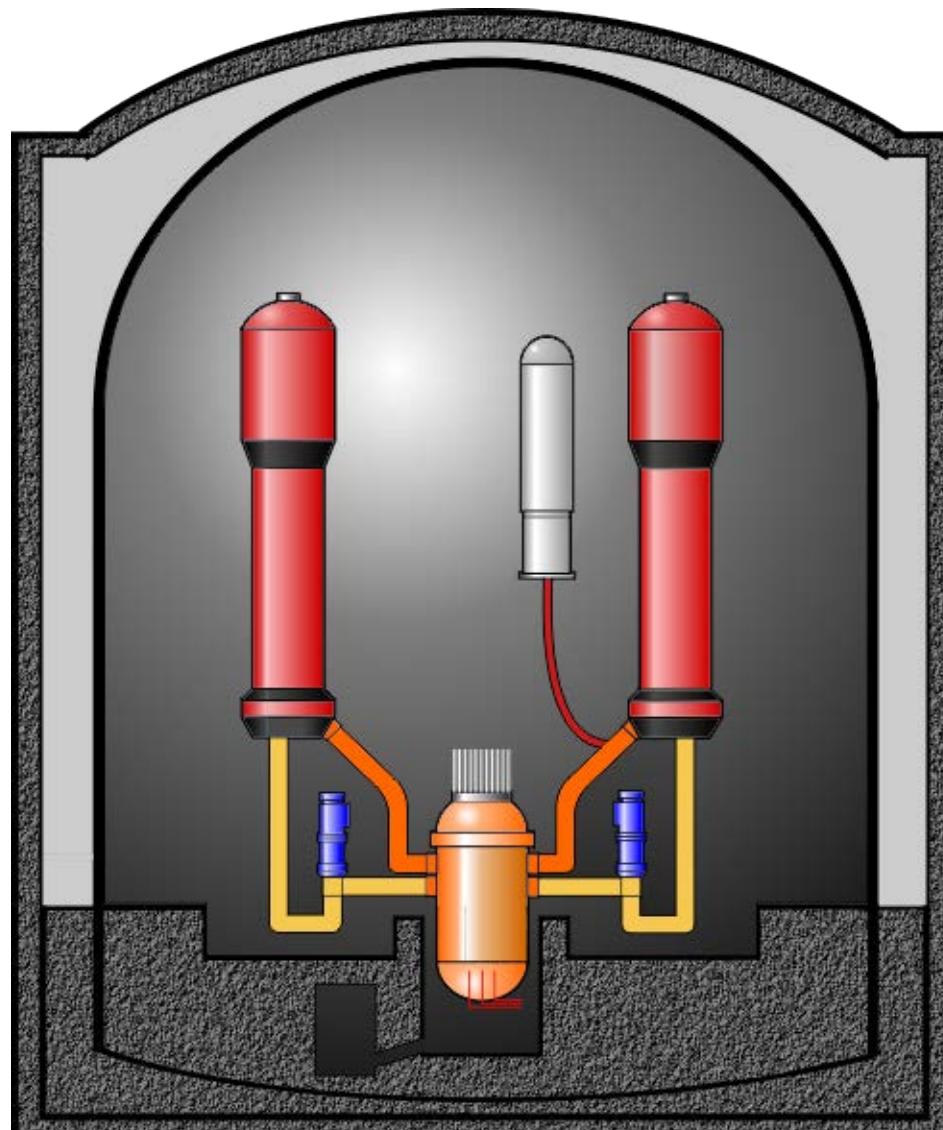
Jedrska varnost:

Izpušte radioaktivnih snovi preprečimo, če
ohranimo celovitost glavnih pregrad:

- jedrskega goriva (zadrži 98% radioakt. prod.),
- primarnega sistema,
- zadrževalnega hrama.

Nobena od pregrad ni popolna:

- puščanje gorivnih palic (~1/leto)
- puščanje primarnega sistema (puščanje
ventilov, puščanje U-cevi uparjalnika,
~litri/min)
- puščanje zadrževalnega hrama (~0.1%
volumna 40.000 m³ na dan pri nadtlaku ~3
bar)



Varnostni sistemi

Varnostni sistemi elektrarne tudi v primeru okvar poskrbijo za:

- nadzorovanje verižne reakcije v gorivu,
- hlajenje goriva in
- zadrževanje radioaktivnih materialov

in tako ohranjajo celovitost pregrad ter preprečujejo izpuste radioaktivnosti.

Lastnosti varnostnih sistemov:

- redundanca
- fizična ločenost redundantnih sistemov
- različne fizikalni načini za opravljanje določene naloge (primer: reaktor je mogoče ustaviti z regulacijskimi palicami ali z boriranjem hladila)
- visoka kakovost, preizkušanje...
- varna odpoved (sistem po okvari ostane v varnem stanju)

Projektne nesreče

predpostavljene odpovedi nekaterih ključnih sistemov

Analize projektnih nezgod so osnova za oceno sprejemljivosti reaktorja.

Analize morajo pokazati, da v okolini reaktorja ni večjih radioloških posledic.

Osnovni tipi projektnih nesreč v tlačnovodnih elektrarnah:

- izguba hladila sredice (zlom cevi primarnega sistema - **izlivna nezgoda**)
- izguba pretoka hladila skozi sredico (odpoved primarne črpalke)
- preveč hladila v primarnem sistemu
- premajhen prenos toplote na sekundarno stran (zlom cevi napajalne vode)
- prevelik prenos toplote na sekundarno stran (zlom parovoda)
- reaktivnost sredice (izmet svežnja regulacijskih palic)
- regulacijske palice ob signalu ne padejo v sredico
- nezgode pri ravnanju z gorivom izven reaktorske posode
- zunanji dogodki (potres, padec letala)

Mejne nesreče - projektne nesreče z najtežjimi posledicami (zaprtje JE).

(maks. ekvivalentna doza "250 mSv once in a life time" pri verjetnosti za takšno nesrečo $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$ /leto).

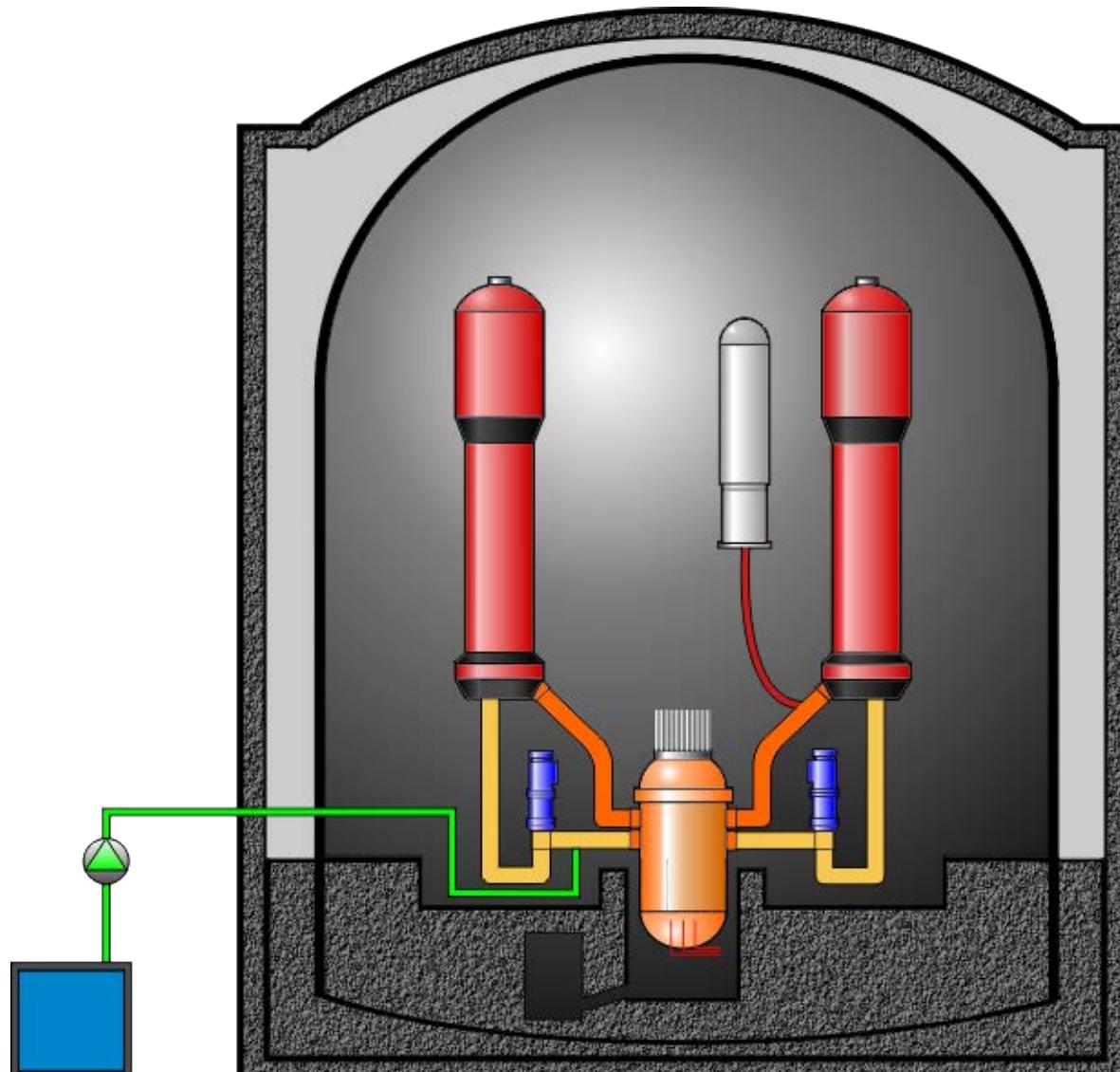
Analize nesreč obravnava 15. poglavje **varnostnega poročila JE** (zahteve, ki so jih formalizirali v ZDA NRC - Nuclear Regulatory Commission - se danes upoštevajo pri načrtovanju v vseh "zahodnih" tipih elektrarn)

Varnostni sistemi JEK

Sistema za visokotlačno
in nizkotlačno varnostno
vbrizgavanje hladila

Zasilno hlajenje sredice
ob izgubi hladila v
primarnem sistemu
(mejna nesreča: velika izlivna
nezgoda - LOCA - Loss Of
Coolant Accident):

- Voda z raztopljenim
borom ustavlja verižno
reakcijo v sredici
reaktorja.
- Odvajanje toplote, ki v
gorivu nastane zaradi
zaostalih radioaktivnih
razpadov.

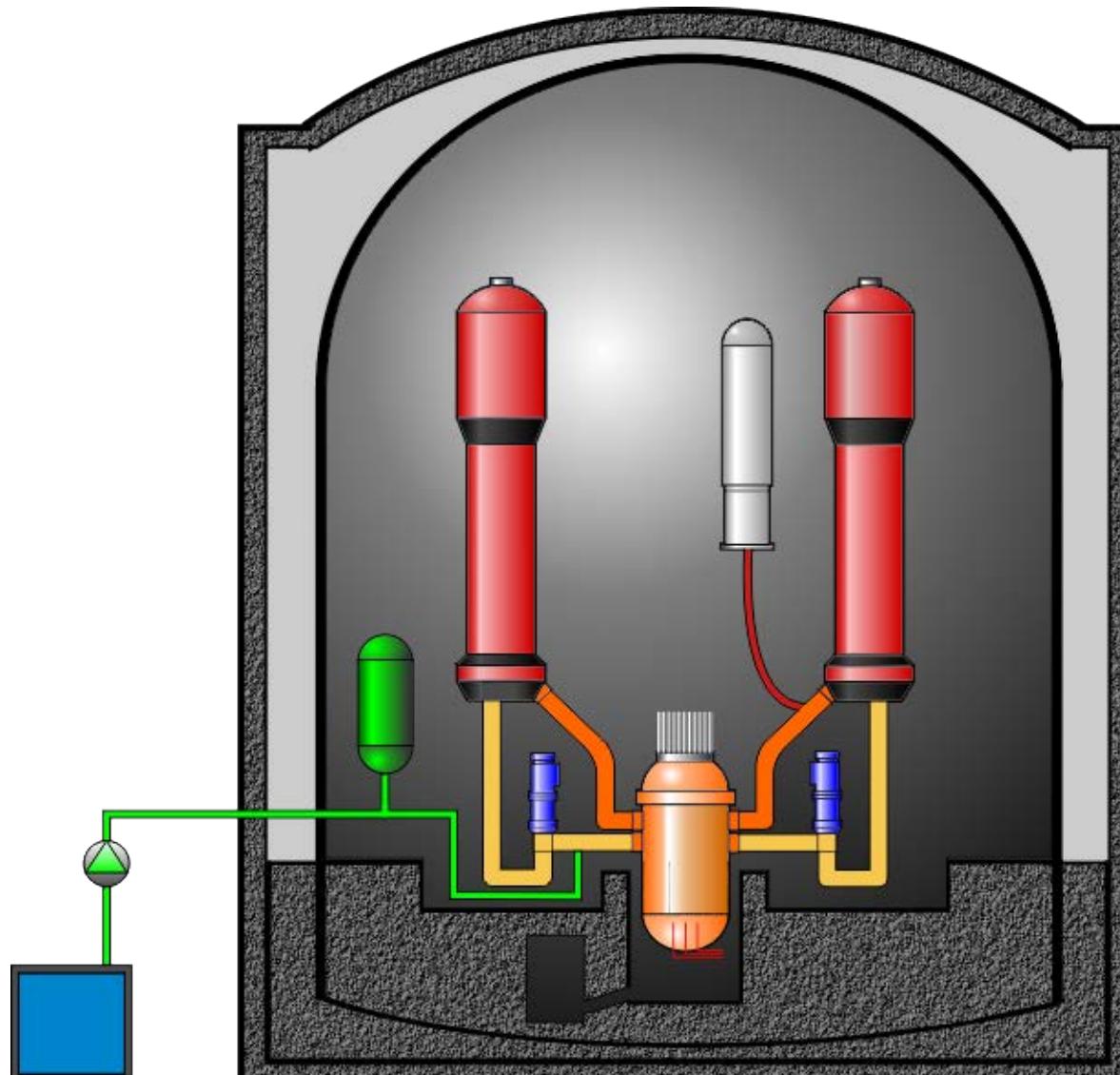


Varnostni sistemi JEK

Pasivna vodna akumulatorja

Opravljata podobne naloge kot oba sistema varnostnega vbrizgavanja - potrebna med veliko izlivno nezgodo.

Za svoje delovanje ne potrebujeta zunanjega vira napajanja.
Poganja ju stisnjen dušik.

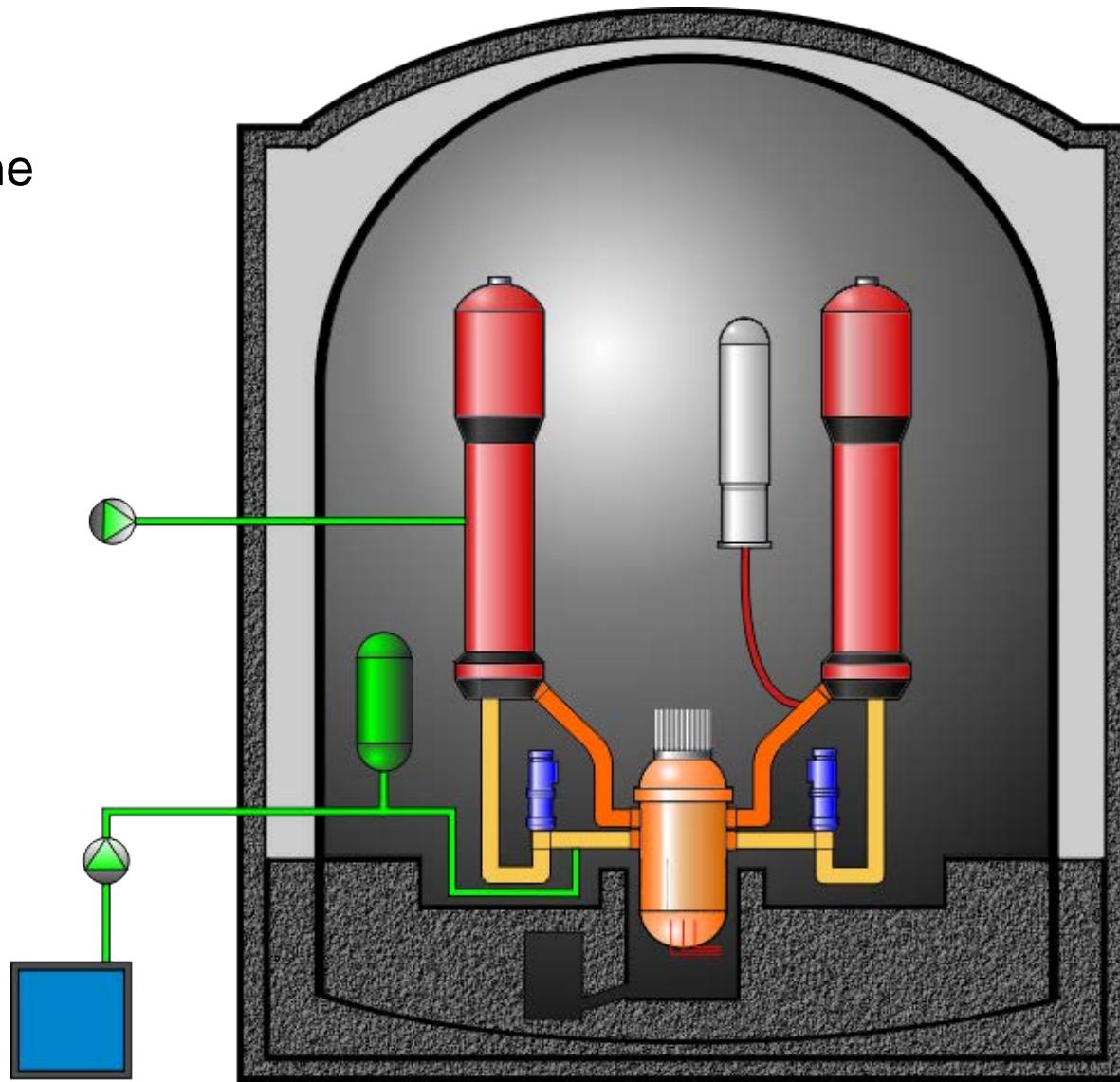


Varnostni sistemi JEK

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

Deluje ob manjših puščanjih primarnega sistema in nekaterih okvarah v sekundarnem sistemu.

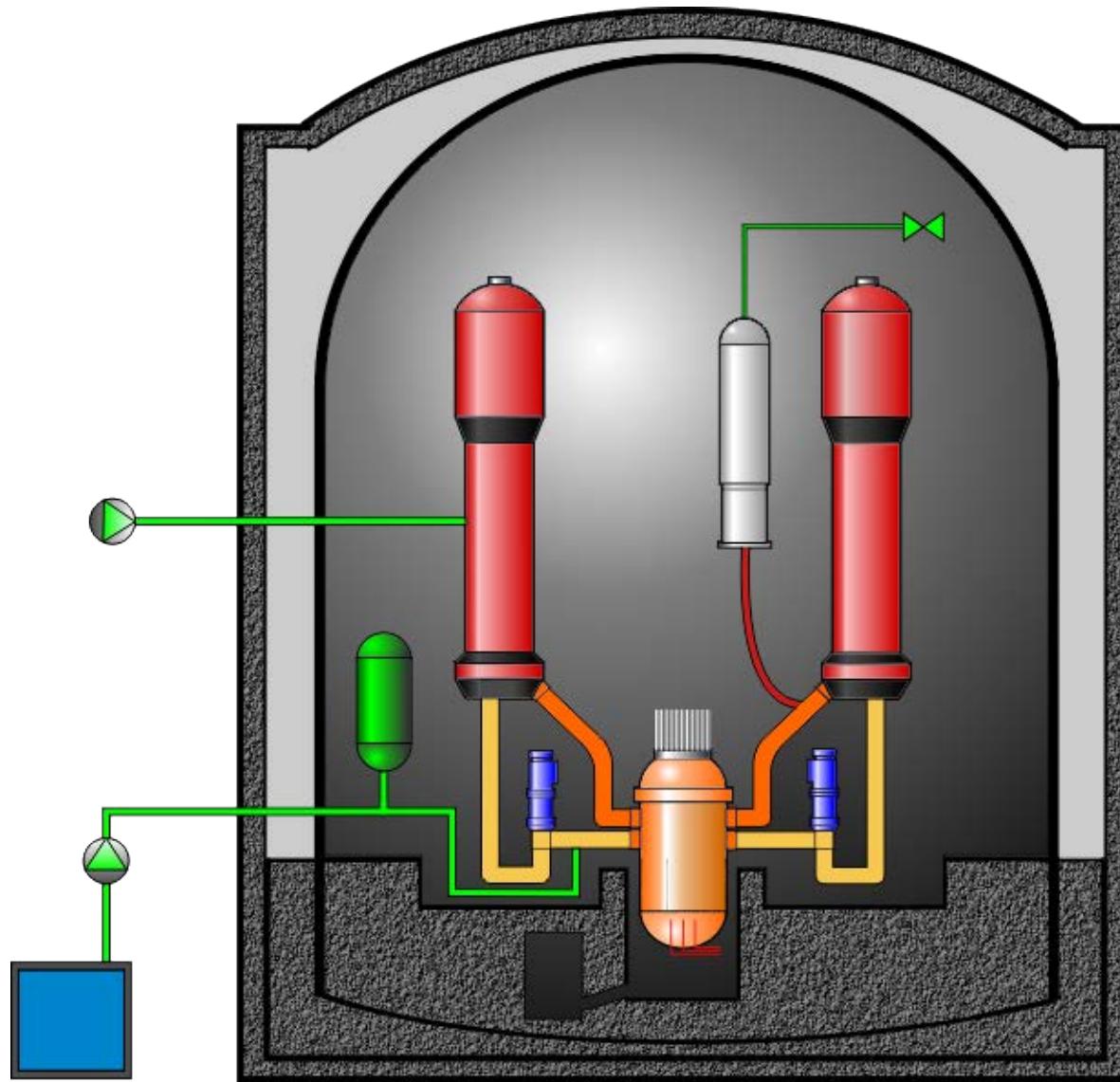
Preko sekundarne strani uparjalnika odvaja zaostalo toploto iz goriva.



Varnostni sistemi JEK

Varnostni ventili na tlačniku

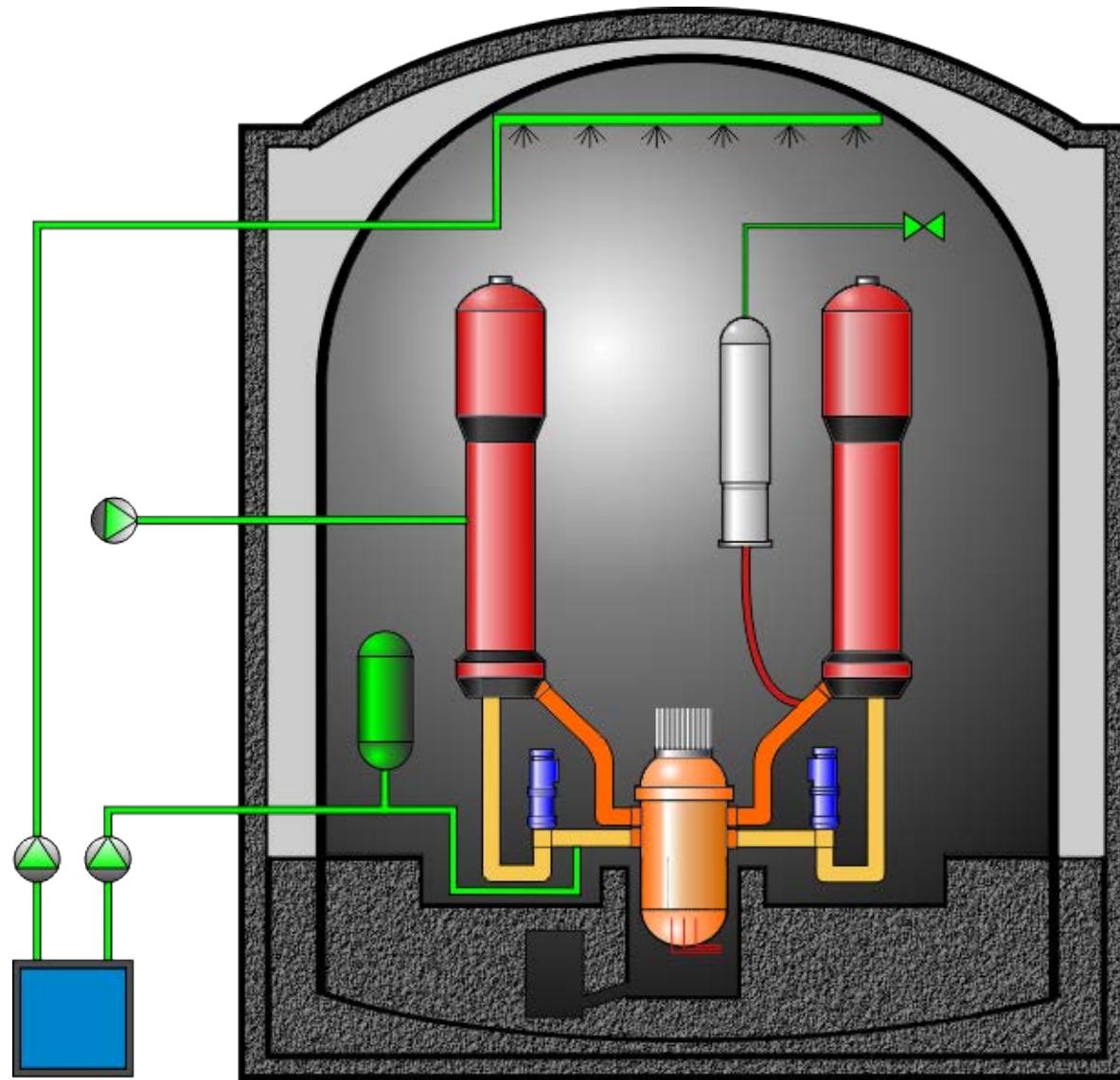
Varnostni ventili se odprejo pri previsokem tlaku in varujejo celovitost primarnega sistema.



Varnostni sistemi JEK

Prve zadrževalne
hrama

Ob nezgodah
varujejo zadrževalni
hram pred
previsokim tlakom in
odstranjujejo
radioaktivne produkte
iz atmosfere ZH.



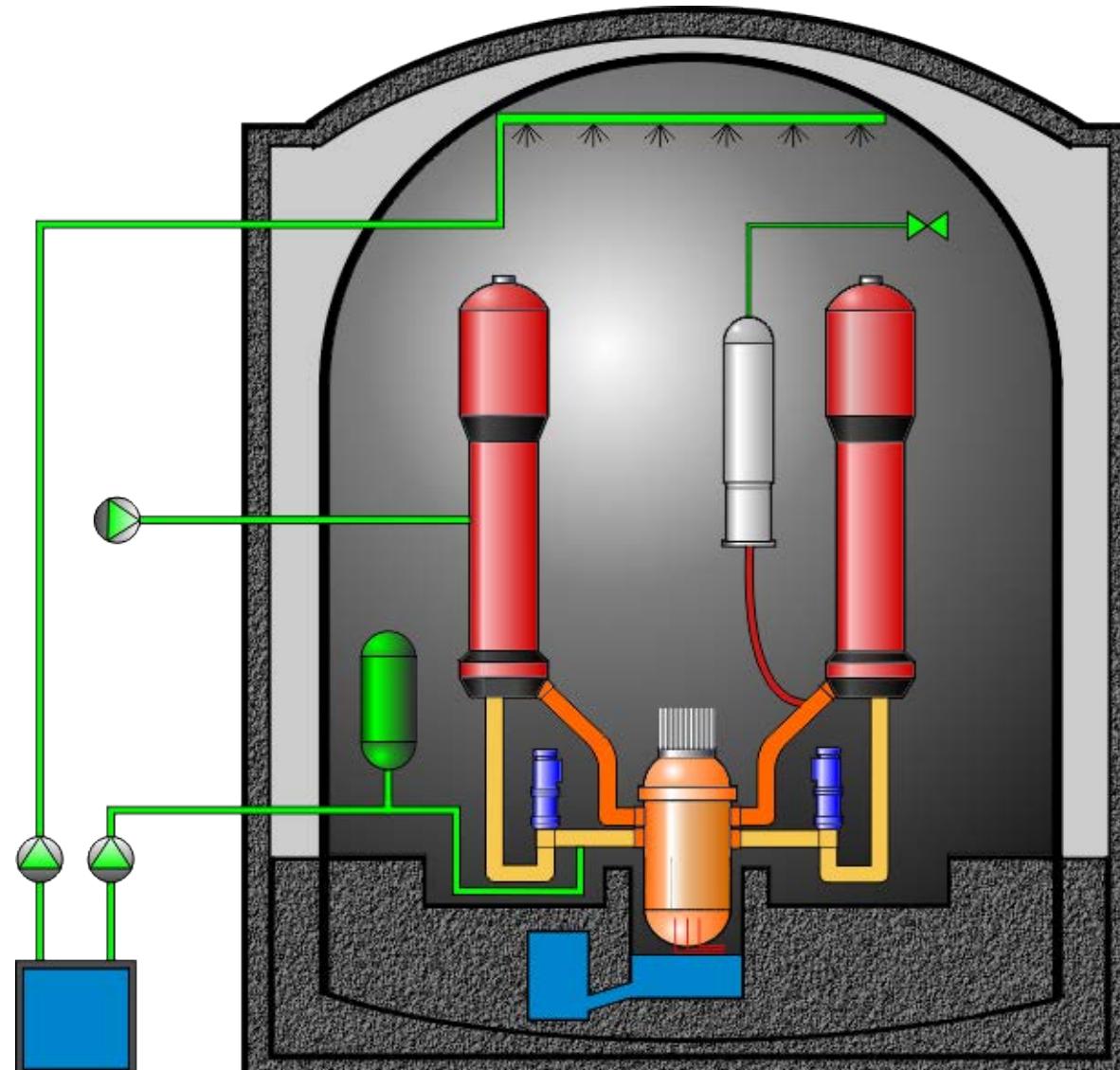
Nesreča s taljenjem sredice

(Severe accidents)

Poplavljjanje
reaktorske votline
med nezgodo s
taljenjem sredice

Če bi odpovedali prej
našteti varnostni
sistemi, bi lahko prišlo
do taljenja sredice in
morda tudi reaktorske
posode.

NEK bi posledice
taljenja sredice blažila
s poplavljanjem votline
pod reaktorsko posodo.



Širjenje izpustov v okolici JE

Pri težkih nesrečah s taljenjem sredice in velikih izpustih (Černobil, Fukušima), so poleg elementov v tabeli z radiološkega vidika pomembni še Cezij in Stroncij.

Končni rezultat analize projektnih nezgod je ocena izpustov!

Širjenje fizijskih produktov v elektrarni (filtriranje, puščanje...) ter okolici je pomembno področje jedrske tehnike. Za oceno so dovolj poenostavljeni meteorološki modeli. Kljub temu - [več le v knjigah](#) (npr: Lamarsh & Baratta).

Običajno nas ob izpustih zanima še stanje elektrarne po nezgodi.

Vsebina najpomembnejših hlapljivih fizijskih produktov v sredici JE Krško

vir: varnostno poročilo NEK, tabela 15.6.5-13

Isotope	Core Inventory Ci(Bq)	Containment Atmosphere, Ci(Bq)	Containment Sump, Ci(Bq)
I-131	5.37E+07 (1.98E+18)	1.34E+07 (4.96E+17)	2.69E+07 (9.95E+17)
I-132	7.78E+07 (2.88E+18)	1.95E+07 (7.21E+17)	3.89E+07 (1.44E+18)
I-133	1.12E+08 (4.14E+18)	2.79E+07 (1.03E+18)	5.57E+07 (2.06E+18)
I-134	1.23E+08 (4.55E+18)	3.07E+07 (1.14E+18)	6.15E+07 (2.28E+18)
I-135	1.04E+08 (3.85E+18)	2.60E+07 (9.62E+17)	5.21E+07 (1.93E+18)
Kr-83M	7.16E+06 (2.65E+17)	7.16E+06 (2.65E+17)	-
Kr-85	5.21E+05 (1.93E+16)	5.21E+05 (1.93E+16)	-
Kr-85M	1.55E+07 (5.735E+17)	1.55E+07 (5.735E+17)	-
Kr-87	3.00E+07 (1.11E+18)	3.00E+07 (1.11E+18)	-
Kr-88	4.23E+07 (1.57E+18)	4.23E+07 (1.57E+18)	-
Kr-89	5.21E+07 (1.93E+18)	5.21E+07 (1.93E+18)	-
Xe-131M	5.76E+05 (2.13E+16)	5.76E+05 (2.13E+16)	-
Xe-133M	3.45E+06 (1.28E+17)	3.45E+06 (1.28E+17)	-
Xe-133	1.10E+08 (4.07E+18)	1.10E+08 (4.07E+18)	-
Xe-135M	2.14E+07 (7.92E+17)	2.14E+07 (7.92E+17)	-
Xe-135	2.70E+07 (9.99E+17)	2.70E+07 (9.99E+17)	-
Xe-137	1.04E+08 (3.85E+18)	1.04E+08 (3.85E+18)	-
Xe-138	9.37E+07 (3.47E+18)	9.37E+07 (3.47E+18)	-

Še drugi pomembni fisijski in aktivacijski produkti v sredici...

Table C-7. Fission and activation product inventory (FPI) in LWR core about 30 min after shutdown (continued)

Fission product	Inventory [Ci/MW(e)]	Inventory [Ci/1000 MW(e)]
¹³⁵ Xe ^b	3.4E+04	3.4E+07
¹³⁸ Xe ^b	1.7E+05	1.7E+08
¹³⁴ Cs ^b	7.5E+03	7.5E+06
¹³⁶ Cs ^b	3.0E+03	3.0E+06
¹³⁷ Cs ^b	4.7E+03	4.7E+06
¹⁴⁰ Ba ^b	1.6E+05	1.6E+08
¹⁴⁰ La ^b	1.6E+05	1.6E+08
¹⁴¹ Ce	1.5E+05	1.5E+08
¹⁴³ Ce	1.3E+05	1.3E+08
¹⁴⁴ Ce ^b	8.5E+04	8.5E+07
¹⁴³ Pr	1.3E+05	1.3E+08
¹³⁷ Nd	6.0E+04	6.0E+07
²³⁹ Np ^b	1.6E+06	1.6E+09
²³⁸ Pu	5.7E+01	5.7E+04
²³⁹ Pu	2.1E+01	2.1E+04
²⁴⁰ Pu	2.1E+01	2.1E+04
²⁴¹ Pu	3.4E+03	3.4E+06
²⁴¹ Am	1.7E+00	1.7E+03
²⁴² Cm	5.0E+02	5.0E+05
²⁴⁴ Cm	2.3E+01	2.3E+04

^aIt is assumed that the core is at equilibrium [i.e., has been operating for at least one fueling cycle (18 months)]. This assumption could overestimate the inventory of long-lived fission products for a new core. Only the fission products with half-lives greater than 30 min are considered..

^bFission products that should be considered in assessments because they are either a major contributor to early phase dose or they are likely to be released (noble gases).

Source: WASH-1400, Table VI-3-1.

Analiza tveganja - Slovenija (statistični letopis 2010, podatki 2009)

Smrti v letu 2009 (Tabela 4.14)

SKUPAJ	18750
Bolezni obtočil	7475
Neoplazme	5805
Bolezni dihal	1271
Bolezni prebavil	1160
Poškodbe, zastrupitve, zun. vzroki	1450

(Tabela 4.16)

Nezgode	1140	(677 Moški, 463 Ženske)
transportne nezgode	209	
zastrupitve	74	
padci	556	
ogenj in eksplozije	11	
zadušitve in utopitve	61	
drugi vzroki	229	

Usmrtitve in uboji	12
---------------------------	-----------

Samomori	448	(351 Moški , 97 Ženske)
-----------------	------------	--------------------------------

Analiza tveganja

Some U.S. Accident-Fatality Statistics (vir: Vital Statistics of USA 2009)

Accident	Total deaths	Probability of death per person per year
Motor vehicles	36,284	1.18×10^{-4}
Poisoning	30,504	9.9×10^{-5}
Falls	24,834	8.1×10^{-5}
Other - nontransport	15,902	5.2×10^{-5}
Drowning	3,539	1.2×10^{-5}
Fires, burns	2,751	$9. \times 10^{-6}$
Water, Air and space transport	1,782	$6. \times 10^{-6}$
Electricity	888	$3. \times 10^{-6}$
Firearms and handguns	588	$2. \times 10^{-6}$
Lightning	162	$5. \times 10^{-7}$
Suicide	36,547	1.19×10^{-4}
Homicide	16,591	5.4×10^{-5}

(podatek 1985)

(podatek 1985)

(podatek 1985)

TABLE 14-6
Average Loss in Life Expectancy due to Various Causes[†]

Cause	Time (days)
Being unmarried—male	3500
Cigarette smoking—male	2250
Heart disease	2100
Being unmarried—female	1600
Being 30% overweight	1300
Being a coal miner	1100
Cancer	980
Cigarette smoking—female	800
Less than eighth-grade education	850
Living in unfavorable state	500
Serving in the U.S. Army in Vietnam	400
Motor vehicle accidents	207
Using alcohol (U.S. average)	130
Being murdered (homicide)	90
Accidents for average job	74
Job with radiation exposure	40
Accidents for “safest” job	30
Natural background radiation (BEIR, 1972)	8
Drinking coffee	6
Oral contraceptives	5
Drinking diet soft drinks	2
Reactor accidents (Kendall, 1975)	2 [‡]
Reactor accidents (WASH-1400, 1975)	0.02 [‡]
Radiation from nuclear industry	0.02 [‡]
PAP test	-4
Smoke alarm in home	-10
Air bags in car	-50

[†] Reprinted with permission from B. L. Cohen and I. S. Lee, "A Catalog of Risks," *Health Phys.*, Vol. 36, June 1979, pp. 707-722, copyright © 1979, Pergamon Press, Ltd.

[‡] Assumes that all U.S. power is nuclear.

Odnos do tveganja (verjetnost za smrt posameznika v 1 letu)

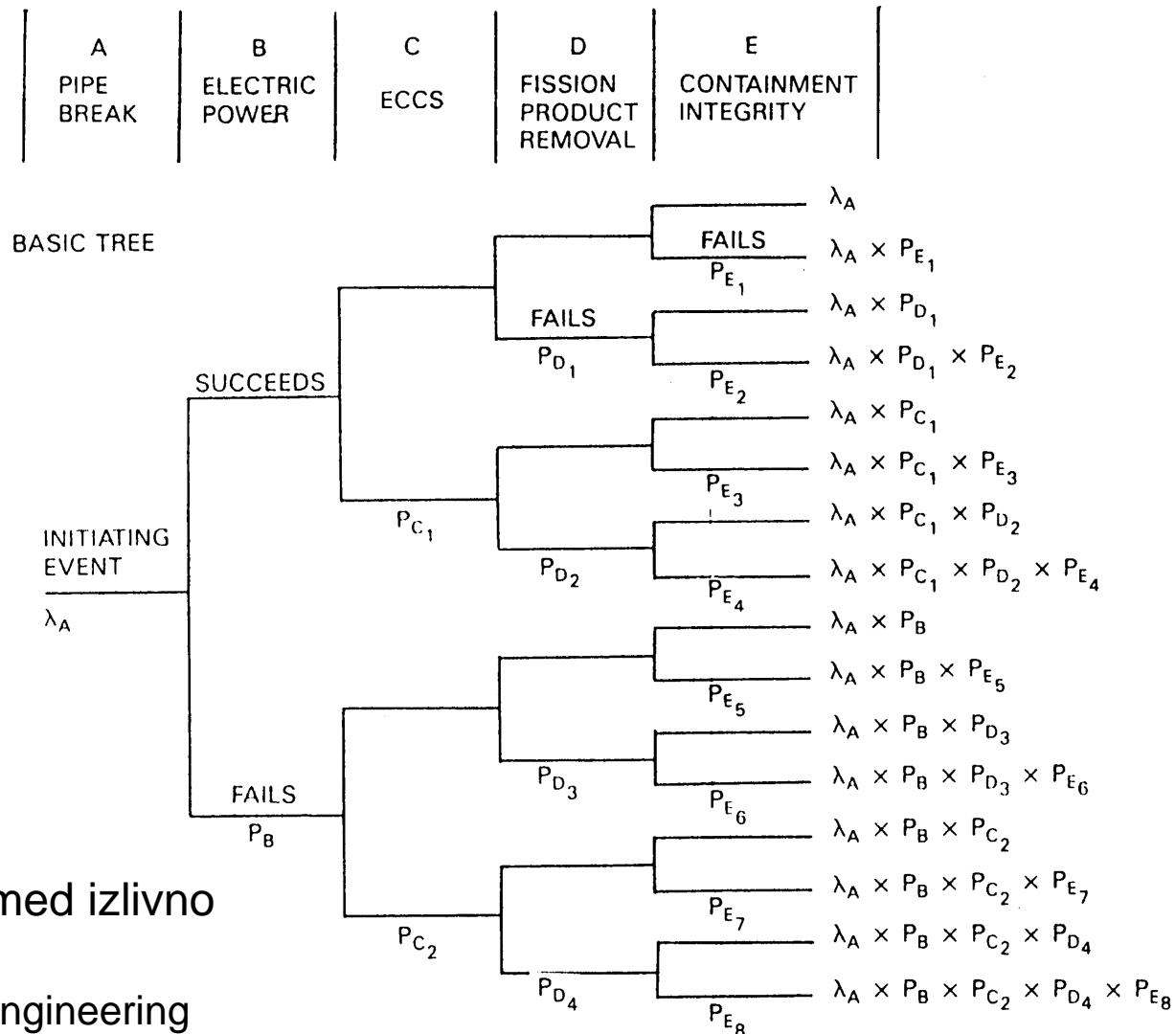
Starr's General Correlation of Involuntary Risk (Death/Person/Year) with Perceived Attitude

- ----- vir: Knief
- Risk General Attitude
- -----
- 10^{-2} Natural Death Reference
- 10^{-3} Unacceptable, Difficult to find
- 10^{-4} Effort and Money Spent to Reduce (SLO ceste)
- 10^{-5} Mild Inconvenience to Avoid (SLO umori)
- 10^{-6} "Act of God"
- -----

Osebno sprejemanje tveganja - ljudje se ne odločamo po številkah:

- Sprejemamo **prostovoljno** tveganje, ki je za faktor $\sim 10^2$ večje kot **neprostovoljno**
 - velika nesreča majhne verjetnosti se nam pri istem matematičnem tveganju zdi manj tvegana kot majhna nesreča velike verjetnosti (padec letala : avtomobilske nesreče)
-

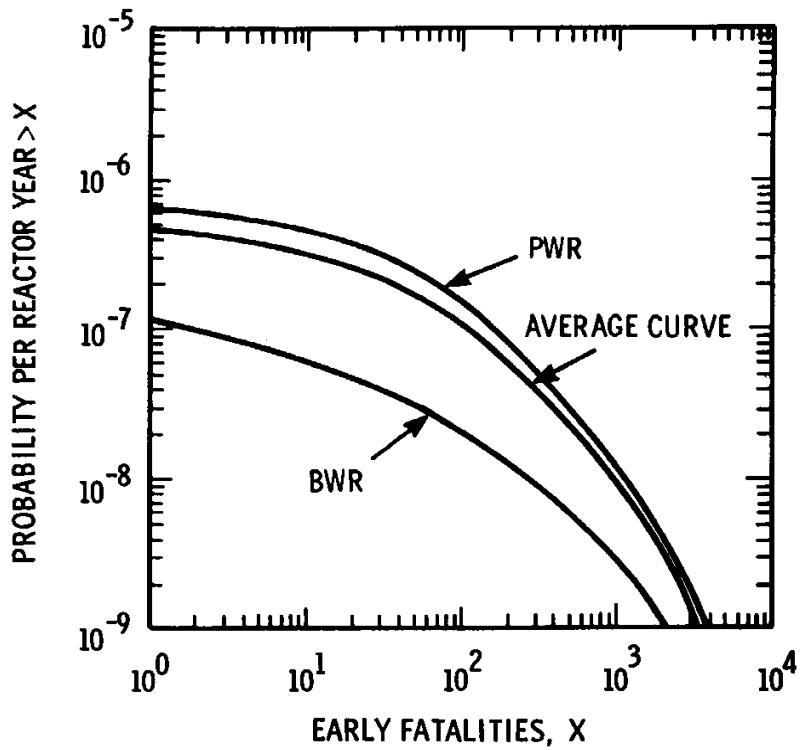
Verjetnostne varnostne analize JE



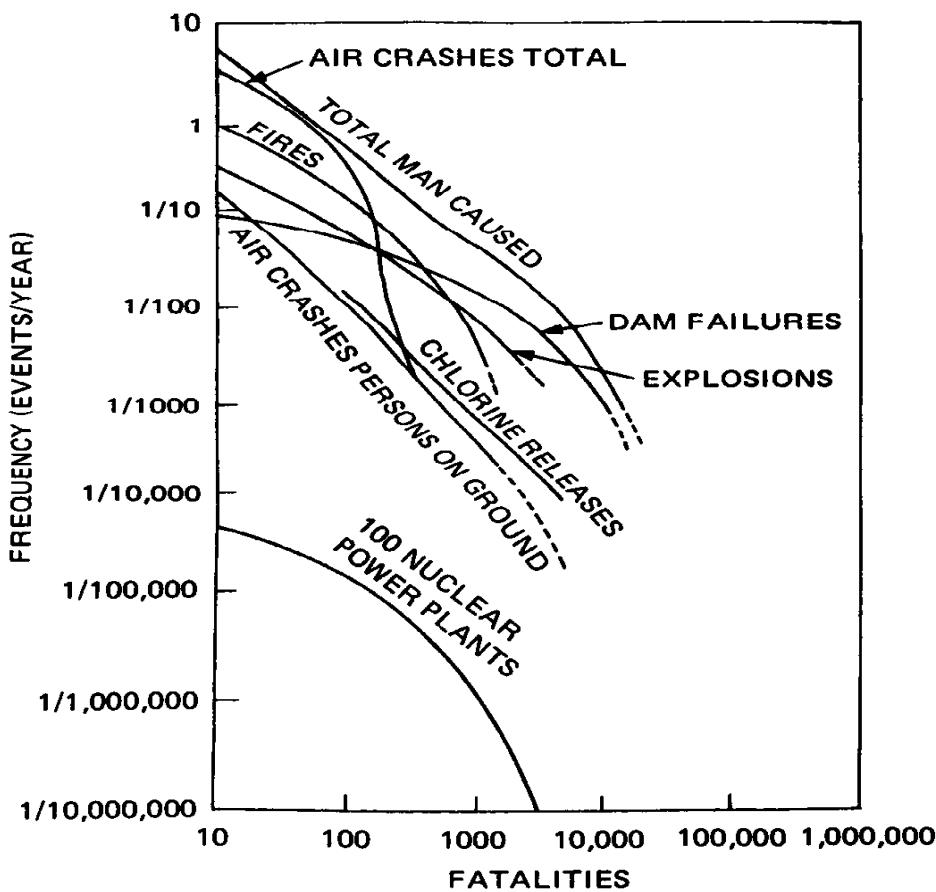
Drevo dogodkov med izlivno nezgodo

vir: Knief, Nuclear Engineering

Reactor Safety Study - WASH 1400 (1975)



negotovost zgornjih krivulj:
posledice - faktor 4
verjetnosti - faktor 5



Analiza tveganja

	JEK	nove elektrarne		
		APWR Mitsubishi	EPR AREVA- Francija	AP1000 Westinghouse
Frekvenca poškodbe sredice na reaktorsko leto	$\sim 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Frekvenca velikih zgodnjih izpustov na reaktorsko leto	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$

Z analizami tveganja je mogoče kvantitativno ovrednotiti verjetnosti, s katerimi posamezni začetni dogodki ali okvare pripeljejo do taljenja sredice ali izpusta radioaktivnih snovi.

Vrednosti v tabeli: brez upoštevanja zunanjih dogodkov (potresi, letala, vojne...)

Nesreča na Otoku treh milj (TMI-2) 1979

Dva tlačnovodna reaktorja.

Reaktor št. 2: PWR 880 MWe

Začetni dogodek: ustavitev napajalne črpalke uparjalnika - zmanjšani odvod toplote poveča tlak v primarnem sistemu, kar sproži ustavitev reaktorja.

Zaradi visokega tlaka se je odprl eden razbremenilnih ventilov tlačnika IN OSTAL ODPRT tudi po padcu tlaka. V komandni sobi so instrumenti kazali, da je ventil ZAPRT.

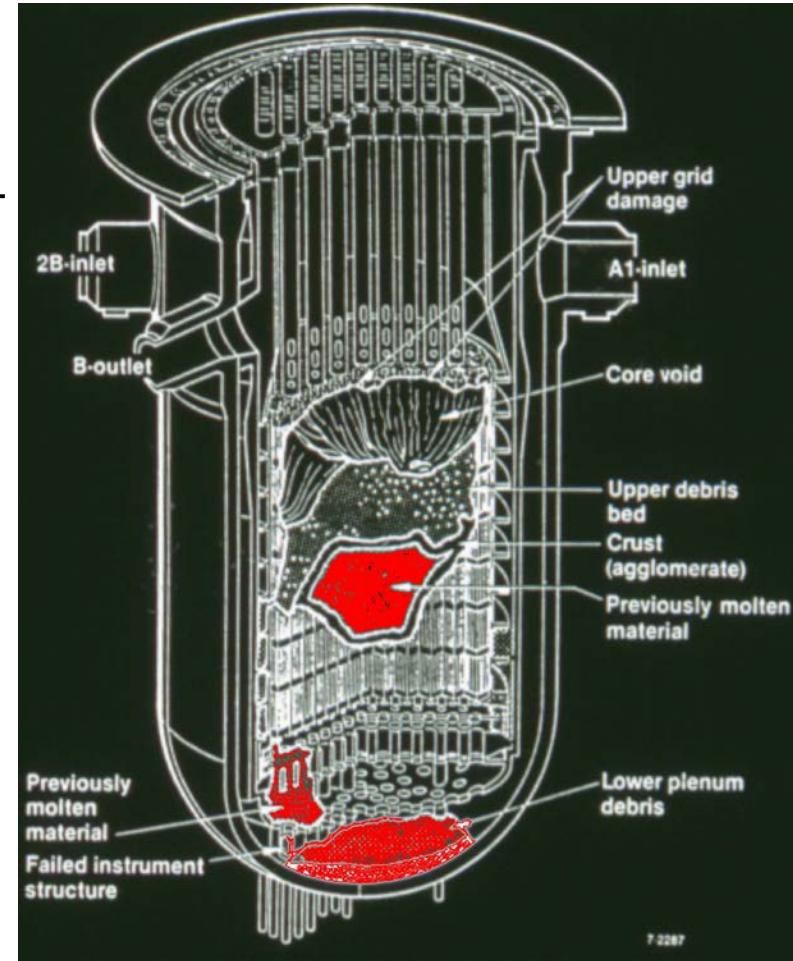
Dogaja se "**mala izlivna nezgoda**", ki pa je operaterji niso identificirali!

Zmanjšajo pretok sistema za zasilno hlajenje sredice, da bi preprečili napolnitev tlačnika s kapljevinou.

Zaradi vibracij ustavijo primarni črpalki.

Sredica se odkrije in delno stali (~2-4 ure po začetnem dogodku)

Po več urah zaprejo ventil tlačnika in vzpostavijo hlajenje sredice...



Majhne radiološke posledice:

2,000,000 ljudi po 15 µSv

maks. ~ 370 µSv

...velike posledice za jedrsko industrijo.

Černobil 1986

RBMK reaktor - projektne pomanjkljivosti:

- pozitivni skupni reaktivnosti koeficient pri nizkih močeh
- počasen sistem za ustavitev reaktorja z regulacijskimi palicami
- brez zadrževalnega hrama
- možnost blokade varnostnih sistemov

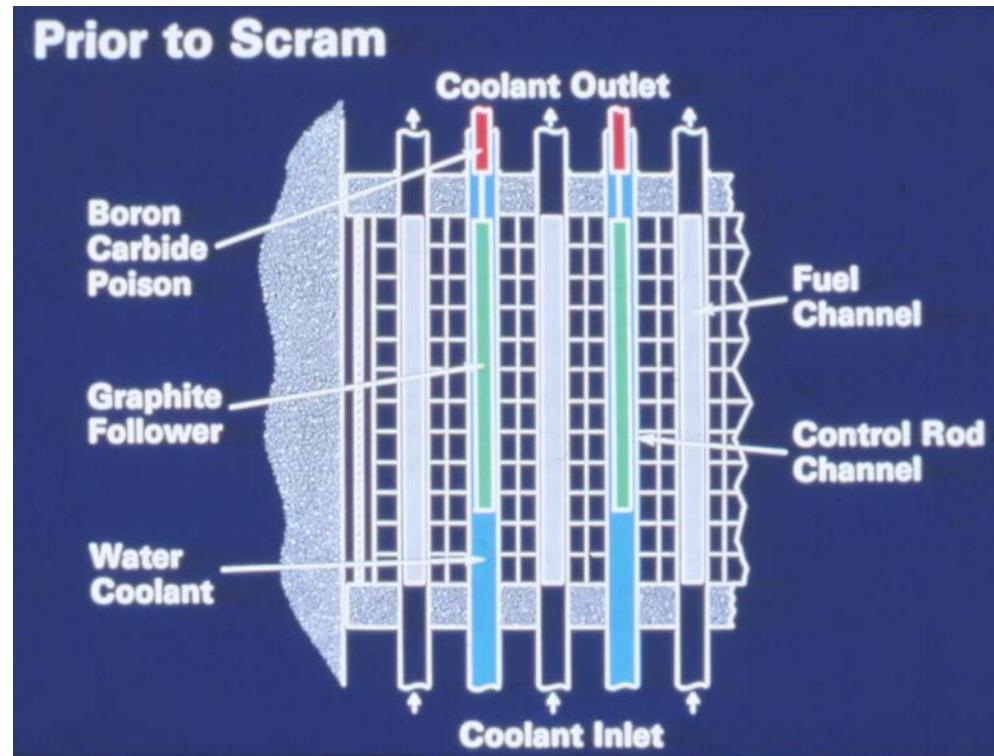
Človeške napake:

Organizacijske:

- neustrezni postopki,
- neusposobljeno osebje...

Konkretnie

- neupoštevanje varnostnih postopkov
- blokada signalov za ustavitev reaktorja
- delovanje reaktorja izven predpisanih meja



Rezultat: delovanje reaktorja v prepovedanem območju z izključenimi signali za ustavitev, nesreča.

VARNOST NOVIH ELEKTRARN

Nove tlačnovodne elektrarne so zelo podobne obstoječim.

Za jedrsko varnost pomembne izboljšave v novih elektrarnah:

- Naprednejša izdelava ključnih komponent primarnega sistema in obratovalne izkušnje obstoječih elektrarn že v času gradnje omogočajo projektiranje za 60 letno obratovalno dobo. NEK je projektirana za 40 let.
- Zelo skrbna identifikacija možnih dogodkov v elektrarni. Ovrednotenje verjetnosti za takšne dogodke in za scenarije, ki lahko vodijo v nezgodo. Načrtovanje sistemov, ki preprečijo razvoj začetnih dogodkov v nezgodo.
- Digitalni sistemi zmanjšujejo možnost napak pri upravljanju elektrarne.
- Varnostni sistemi so predvideni tudi za nezgode s taljenjem sredice.
- Za varnost pomembne zgradbe so v novih elektrarnah dodatno zaščitene pred zunanjimi vplivi (padec letala).

EPR (AREVA, EU)

Enoten sistem za srednjetlačno in nizkotlačno varnostno vbrizgavanje

Napredni vodni akumulatorji (iz US-APWR)

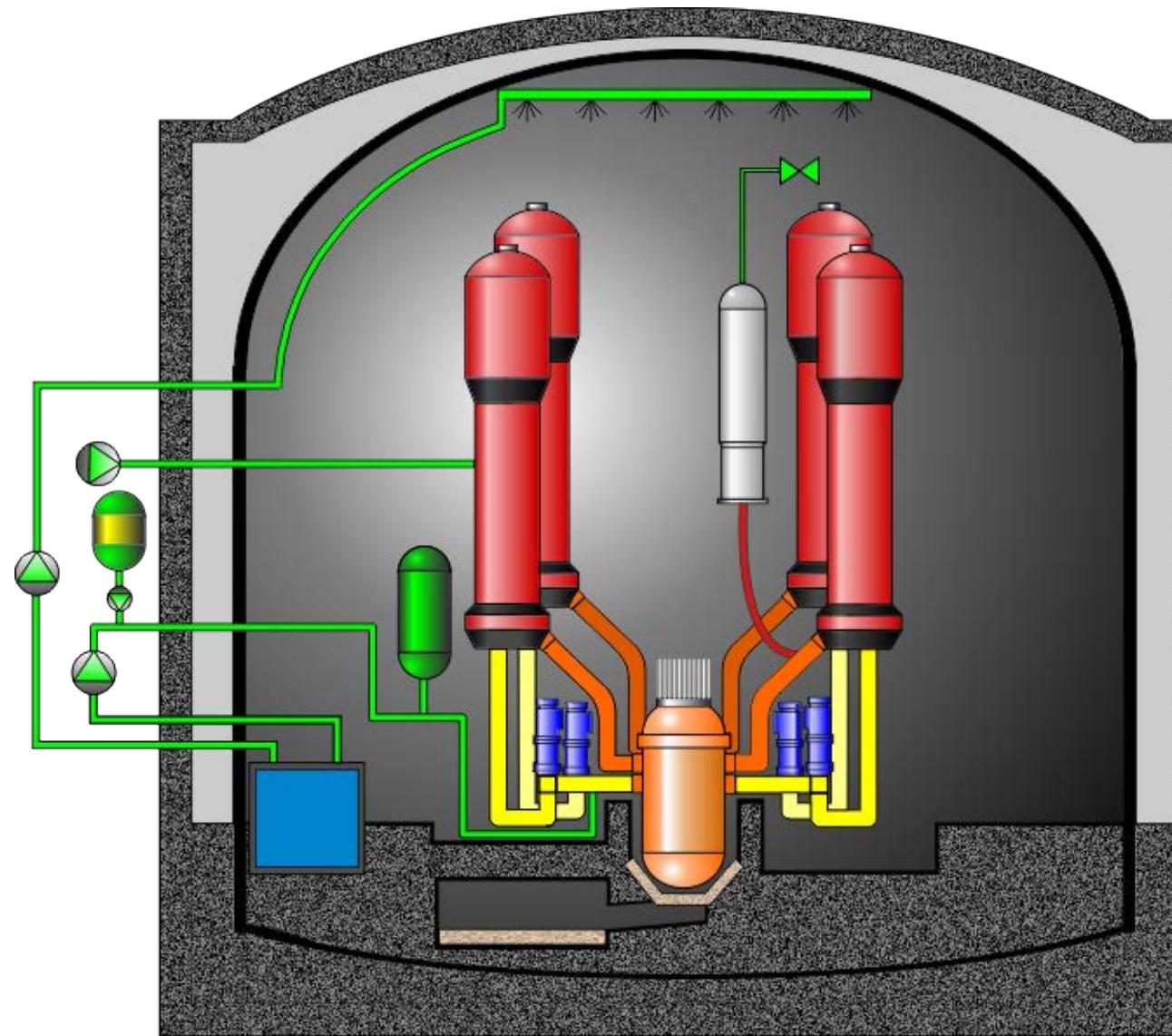
Sistem za dodatno boriranje

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

Prve zadrževalnega hrama

Varnostni ventili na tlačniku

Lovilec staljene sredice

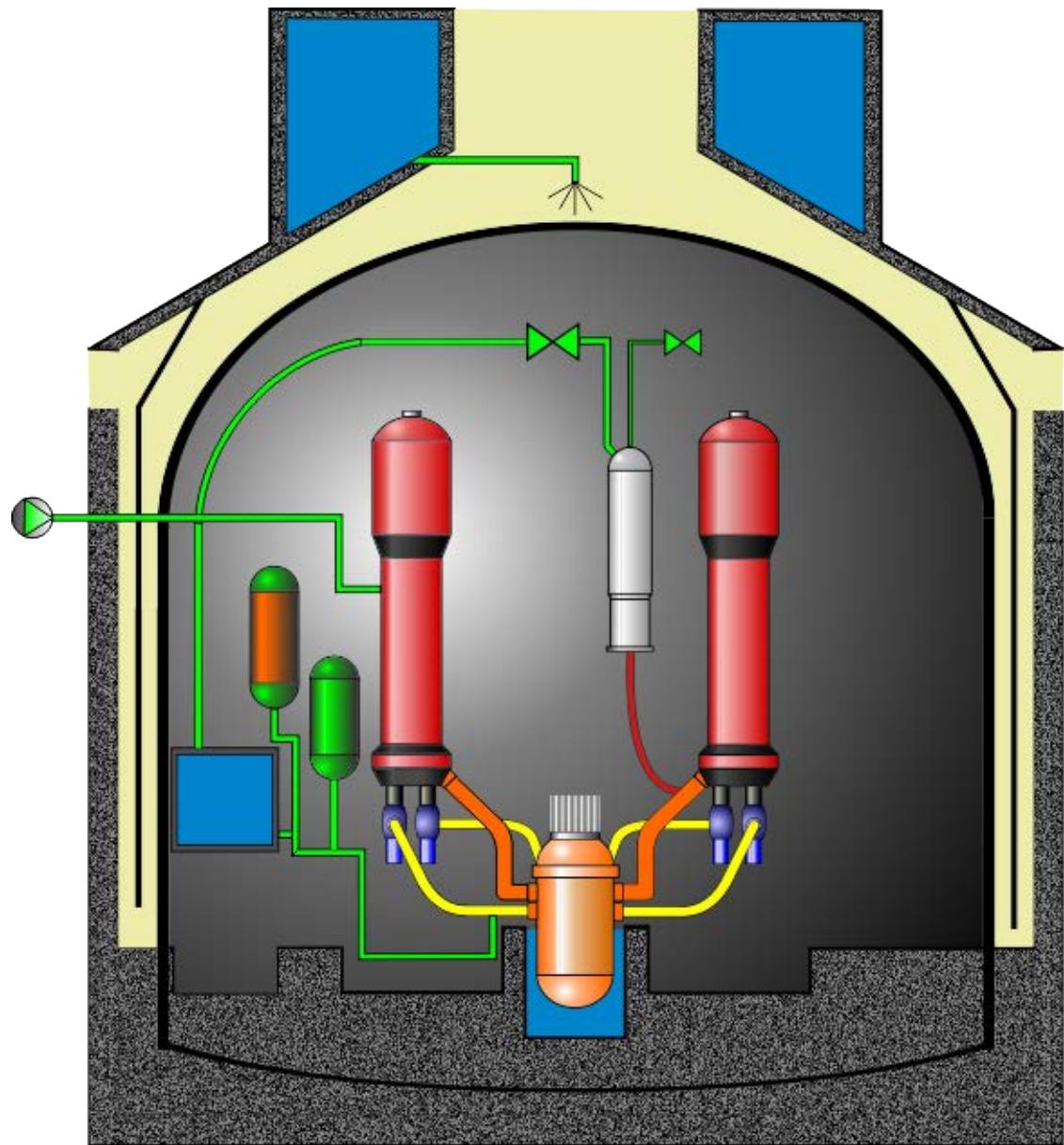


AP1000 (Westinghouse, ZDA)

Inovativen sistem za blaženje nezgod s taljenjem sredice.

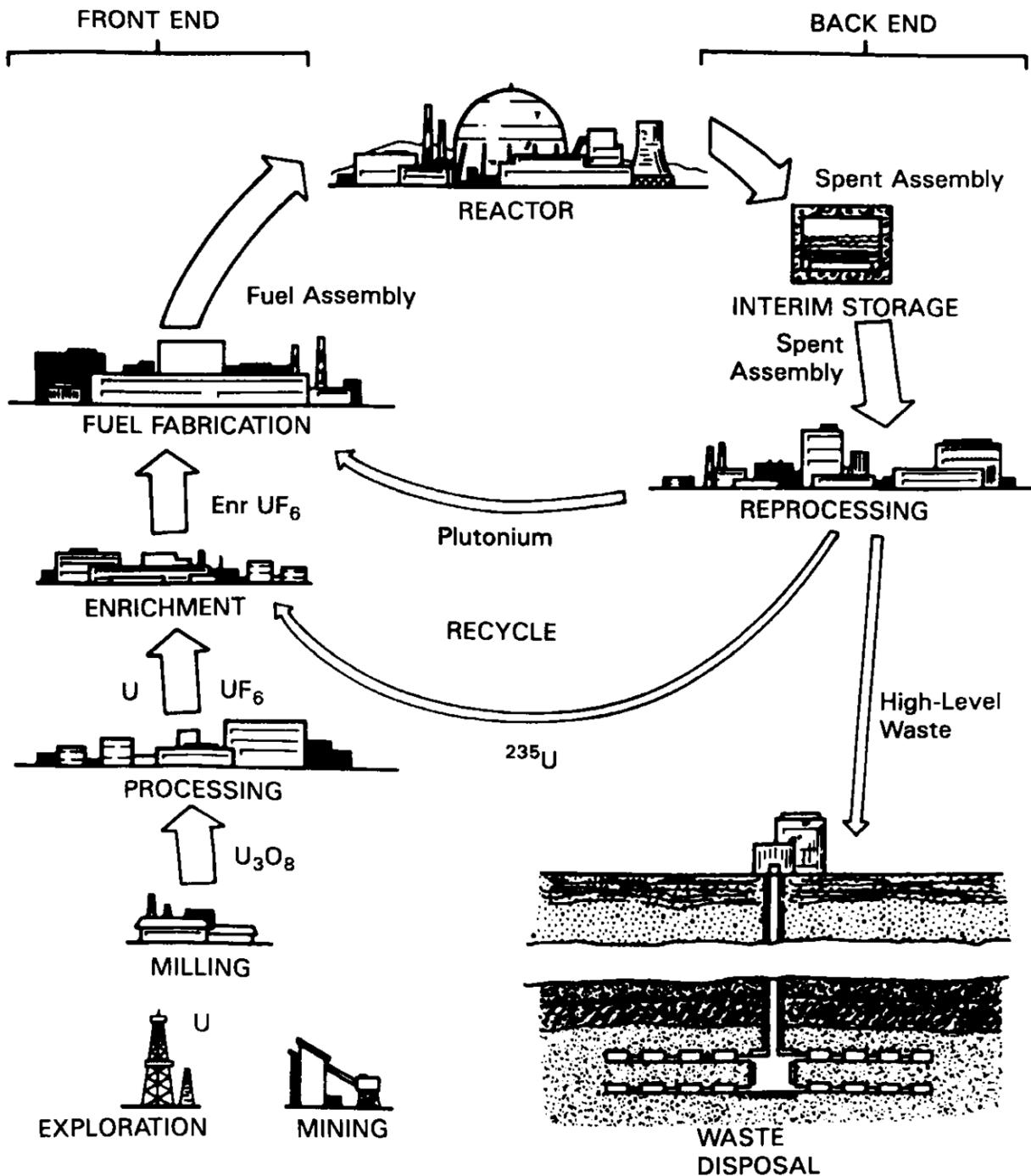
Ustrezna zasnova za učinkovito zunanje hlajenje reaktorske posode.

Z zunanjo strani je poplavljen večji del reaktorske posode, kar omogoča zadrževanje staljene sredice v reaktorski posodi.



Lahkovodni reaktor - gorivni cikel

vir: Knief:
Nuclear Engineering



Januar 2010, približna cena 1 kg urana v obliki UO₂ reaktorskega goriva (www.world-nuclear.org):

Uran:	8.9 kg U ₃ O ₈ x \$115.50	US\$ 1028
Konverzija UF ₆ :	7.5 kg U x \$12	US\$ 90
Obogatitev:	7.3 SWU x \$164	US\$ 1197
Izdelava goriva:	na kg	US\$ 240
Skupaj približno:		US\$ 2555

Strošek goriva: \$7.1/MWh (JEK proizvaja elektriko po ceni ~\$40/MWh)

SWU - Separative Work Unit (enota ločevalnega dela):

$$\text{SWU} = V(p) + V(t)(F-1) - V(f) F$$

$$F = (p-t)/(f-t)$$

$$V(x) = (2x-1) \ln [x/(1-x)]$$

"vrednostna funkcija"

p - obogatitev obogatenega urana (masni delež U²³⁵)

t - obogatitev osiromašenega urana

f - obogatitev vloženega urana (naravni uran f=0.0071)

1 kg naravnega U (f=0.711%) \rightarrow 0.135 kg U (4%) + 0.865 kg U (0.2%)

V(0.0071)=4.869, V(0.002)=6.188, V(0.04)=2.924

F = 7.436

SWU = 6.5

Rudarjenje in predelava v U_3O_8

- Najnevarnejši del gorivnega kroga - za rudarje in okolje.
- Obrat za predelavo rude v rumeno pogačo - Žirovski vrh - ob rudniku
- Zaloge urana v Žirovskem vrhu - ~10 do 15,000 ton - za ~50-100 let obratovanja JEK.
- Rudnik ŽV deloval obratoval od 1982 (kopanje rude), do 1990.
- Obrat za predelavo urana od 1984 do 1990.

Predelava:

- v rudi je urana malo - potrebna kompleksna kemična separacija (mletje, izločanje kovin z raztopljanjem v kislinah, ločevanje urana iz kislih raztopin z organskimi topili, ponovno ločevanje z vodno raztopino)
- Produkt - rumena pogača - uranov oksid

RUŽV:

3.307.000 t izkopanega materiala, od tega:
633.000 t uranove rude, proizvedeno
452 t uranovega koncentrata



Rudnik urana Žirovski vrh leta 1988. (Vir: A. P. Florjančič s sodelavci: Rudnik urana Žirovski vrh, ISBN 961-6363-00-X, 2000)

Konverzija v UF_6 in obogatitev urana

Konverzija

- prečiščevanje rumene pogače (eliminacija primesi z znatnim absorpcijskim presekom za nevtrone)
- konverzija v UF_6 (sublimira pri 56 °C)



<http://www.world-nuclear.org/info/inf28.html>

Obogatitev

Metode	Separacijski faktor	Poraba energije (kWh/SWU)	Tržni delež (%)
- plinska difuzija	1.004	2500	25
- plinske centrifuge	1.10	50	65
- plinske šobe	1.01-1.02	3000	
- kemijska izmenjava	1.02	~800	
- lasersko vzbujanje	do 70	10-40	

10 iz jedrskeih bomb

Tehnologija "problematična" s stališča neširjenja jedrskega orožja !

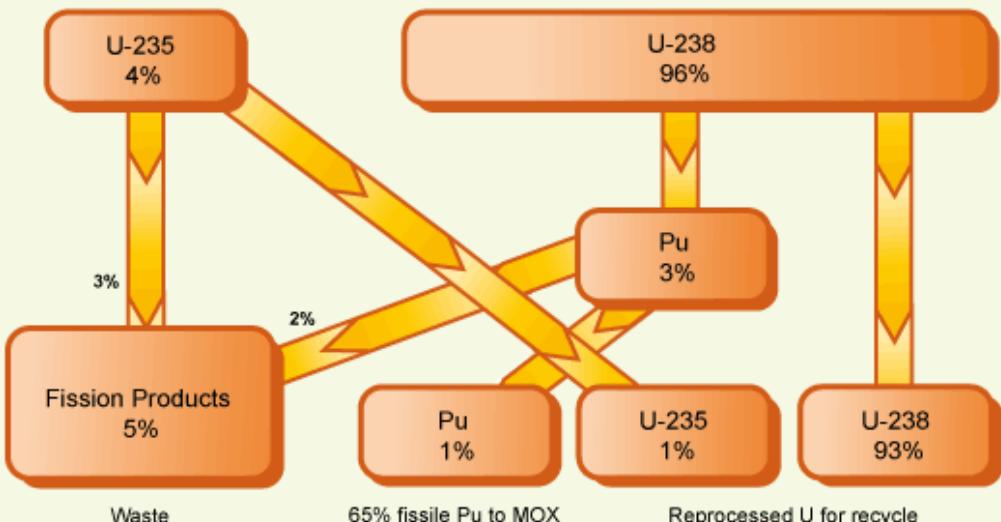
Laser – sep 2012, dovoljenje za gradnjo komercialnega obrata v ZDA

Izdelava goriva

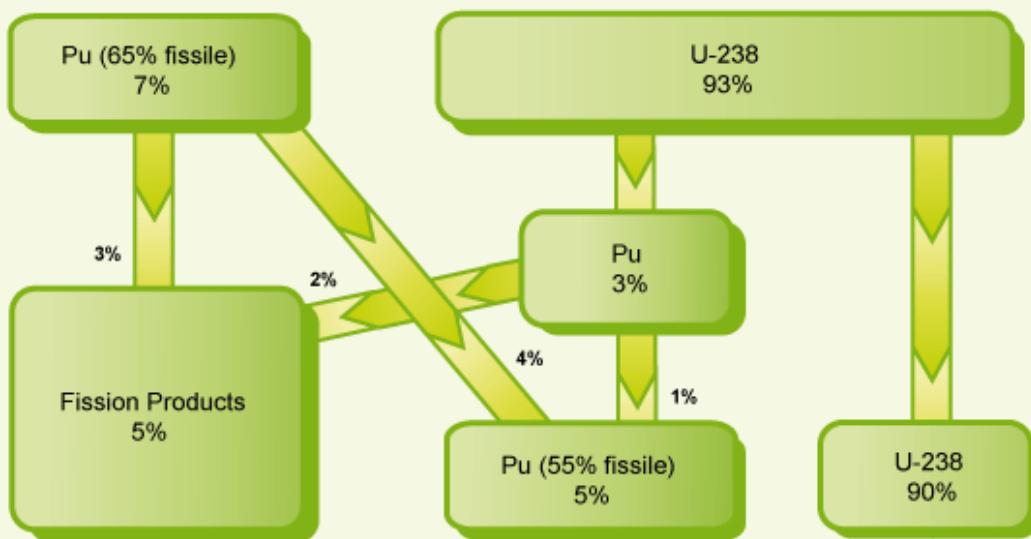
- UF_6 v UO_2
- proizvodnja gorivnih tablet
- polnitev gorivnih palic
- izdelava gorivnih elementov

Recikliranje goriva

- recikliranje Pu v izrabljenem gorivu
- 7 UO_2 izrabljenih gorivnih elementov da 1 MOX element (Mixed Oxide Fuel) + trdni visoko radioaktivni odpadki s 35% volumna in mase izrabljenega goriva
- zahtevna tehnologija predelave - deluje v Evropi in na Japonskem - ne v ZDA
- recikliranje U^{235} - precej bolj zahtevno...

Reaction in standard UO_2 fuel

Reaction in MOX fuel



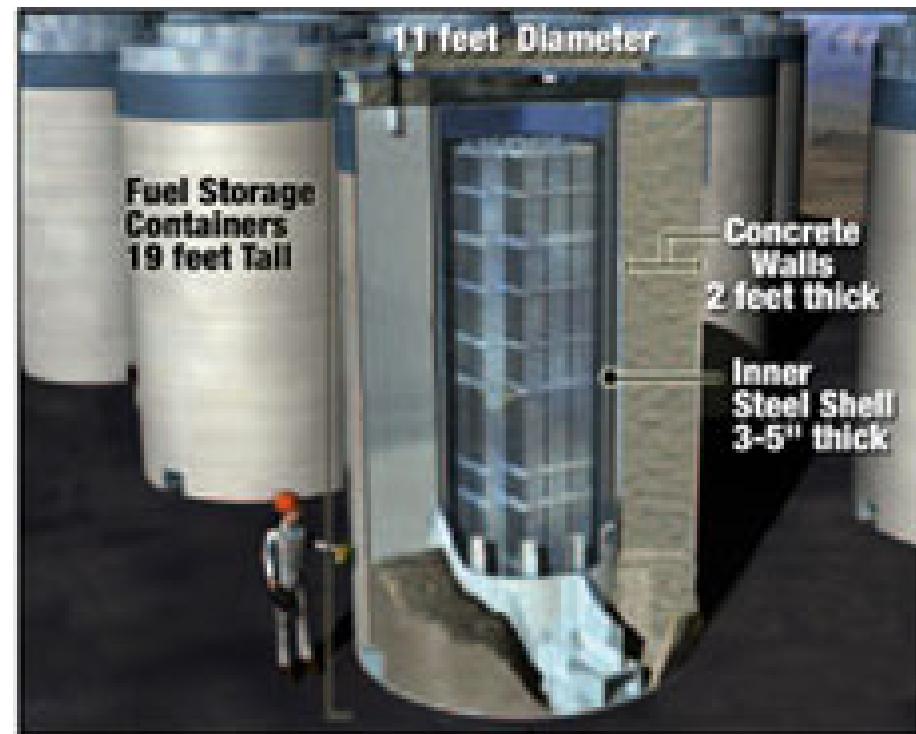
Visoko radioaktivni odpadki

JEK - 7000 m³ volumen goriva
(60 gorivnih elementov/18 mesecev,
60 let) ~ 2400 gorivnih elementov ob
zaprtju.
(Konec 2009 je v JEK 928 izrabljenih
gorivnih elementov, po 60 letih ~2300)

V zabojih na sliki: 24 gor. elementov
*100 zabojev.

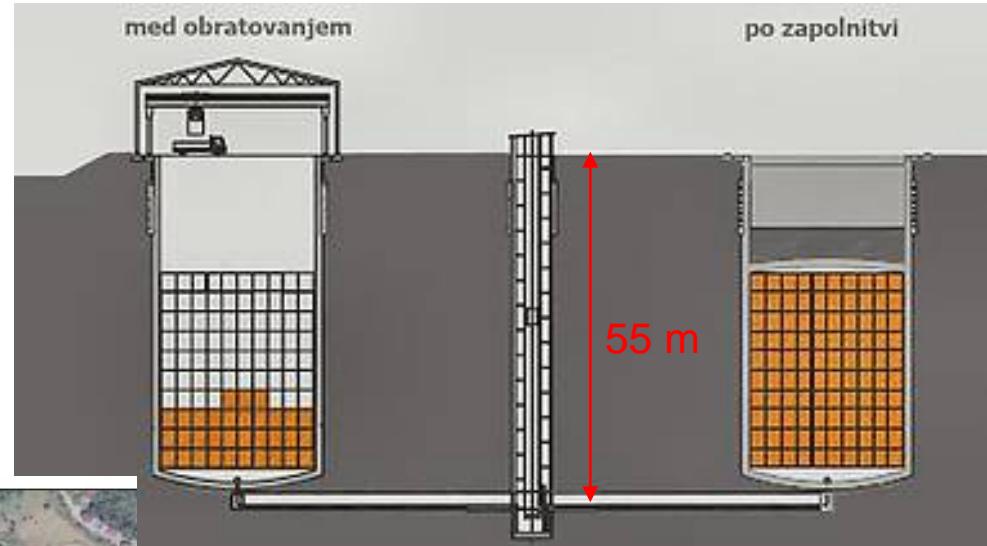
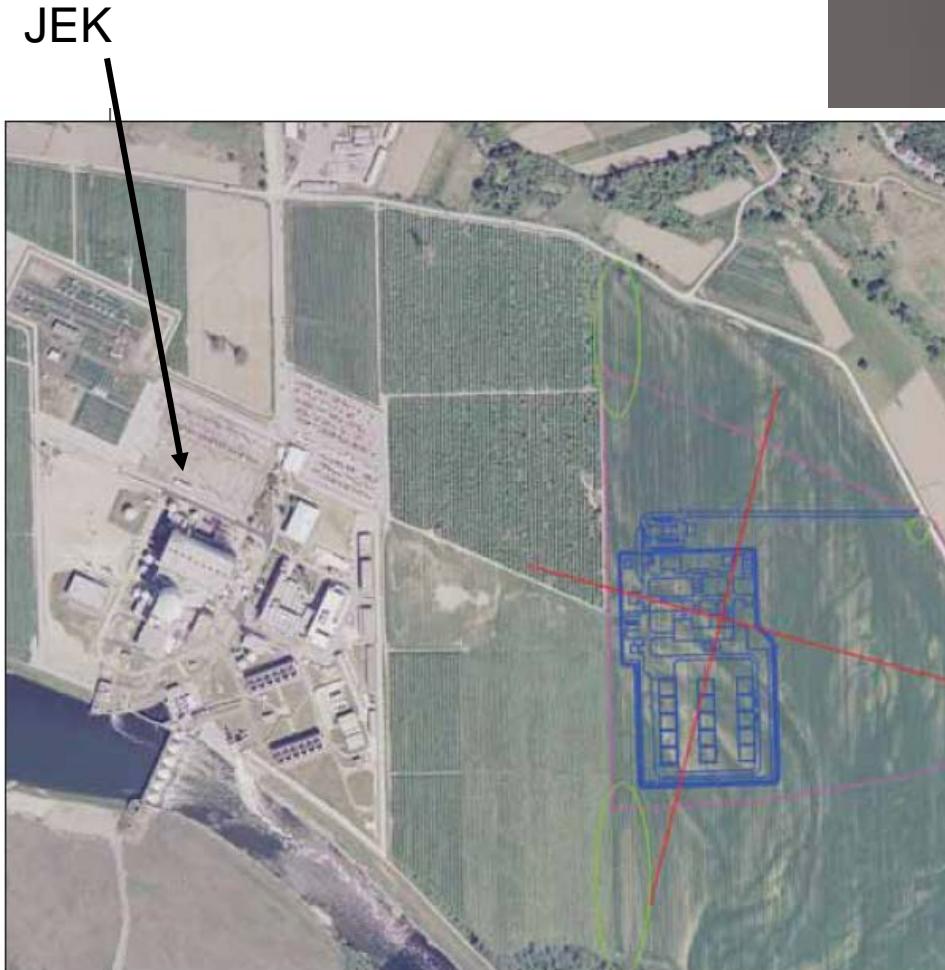
Zaboj: 3.4 m premer x 6 m višina
Toplota - enaka hišnemu sistemu
ogrevanja. 10 let po koncu uporabe =
~20 kW.

Teža zaboja: 10 ton odpadkov in 170
ton embalaže.



Odlaganje ?
Morda raje skladiščenje?
Kakorkoli že: Volumen teh odpadkov je majhen.

Nizko in srednje radioaktivni odpadki



za predvidenih 18,000 m³
odpadkov

vir: RAOPIS, Februar 2007

Finska rešitev,

ONKALO (Olkiluoto) odlagališče, 400 m globoko v granitu,

Kanister premer 1 m za 4 PWR elemente, haldi se zunaj 40 let nato se zapakira še v bakren kanister in zakoplje v glino. Po 40 letih 59 mSv/h

Zanj so se dogovorili v 23 letih.... (začetek 1978, 2001 potrditev parlamenta)
V 2018 bodo začeli obratovati.

Predvidena "retrievability".

2012: 10 km predorov. Skupaj bo skopanih 50 km predorov....