

Jedraska tehnika in energetika

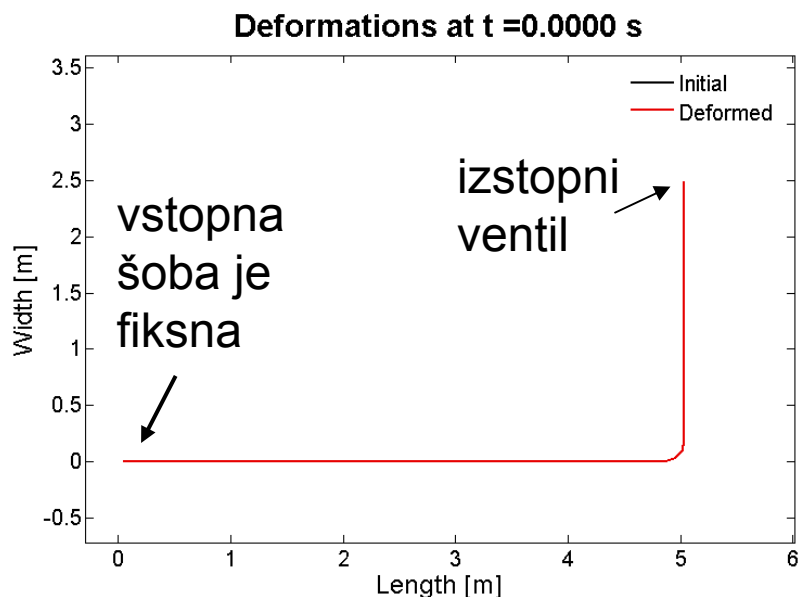
Predavatelj se predstavi

Iztok Tiselj

Izr. prof. s področja jedrske tehnike

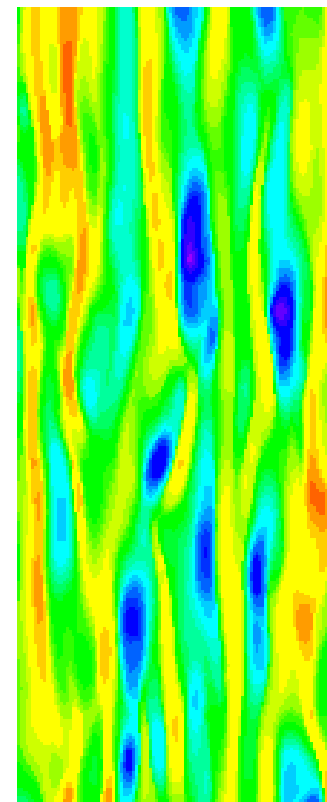
Raziskovalec na Odseku za Reaktorsko tehniko IJS
(Reaktorski center Podgorica)

Raziskovalno delo - simulacije na področju jedrske termohidravlike.



Turbuleni tok -
hitrostno polje polje
v ravnini nad ravno
steno.

Nihanje cevi po
zaprtju ventila na
izstopu.



Jedrska tehnika in energetika

načrt dela

UVOD-

ENERGIJA: PORABA, VIRI, "ZALOGE"

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

Ocena:

Seminarji + pisni in/ali ustni izpit

Seminarji:

Študentje pripravijo dva kratka seminarja (~15 minutna predstavitev) in ju predstavijo v okviru vaj. En seminar je s področja energetike, eden s področja jedrske tehnike.

JEDRSKA TEHNIKA

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

Teme seminarjev s področja energetike

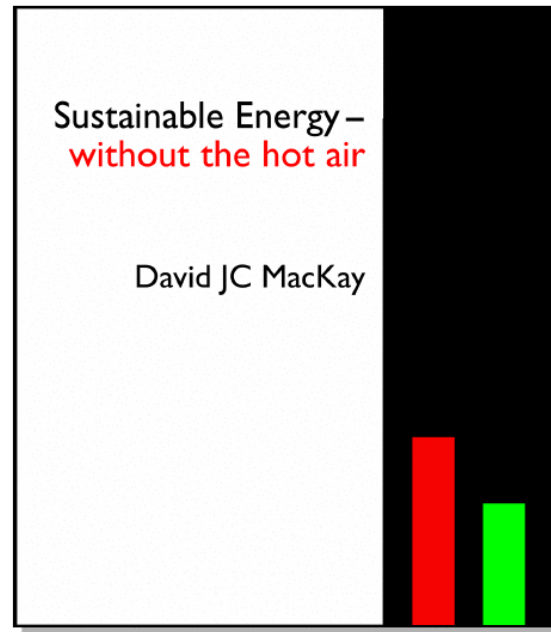
0-6 Poudarek na stanju v Sloveniji:

| | | |
|--|-----------------|--------|
| 0) proizvodnja in poraba energije | Iztok Tiselj | 14.10. |
| 1) premog (vrste, TE-TO, moči, energije) | Maruša Vitek | 28.10 |
| 2) plin, nafta | Nejc Rosenstein | 4.11. |
| 3) voda (vir energije, črpalne HE) | Klemen Ambrožič | 11.11. |
| 4) sonce (sevanje), toplotne črpalke in geotermalna energija | Bor Kos | 18.11. |
| 5) veter (potencial) | Klara Rupnik | 25.11. |
| 6) biomasa (potencial, poraba goriva) | Matej Gomboc | 2.12. |
| 7) parna turbina | Urška Tomšič | 9.12 |
| 8) Rankinov krožni proces | Rok Krpan | 16.12 |
| 9) generator | Žiga Štancar | 23.12 |
| 10) električno omrežje | Jan Šomen | 6.1 |
| 11) črpalke | | 13.1. |
| 12) fuzija | Lino Šalamon | 20.1 |

Jedrska tehnika in **energetika**

Literatura: David MacKay:
Sustainable Energy - without the hot air

This book is free online

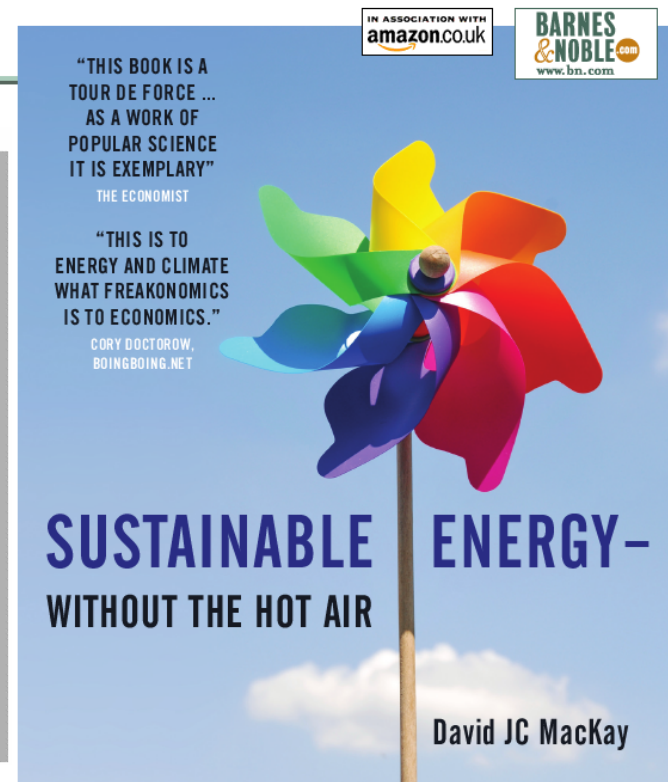


Boštjan Golob, FMF
(spletna stran),

Janez Stepišnik, FMF

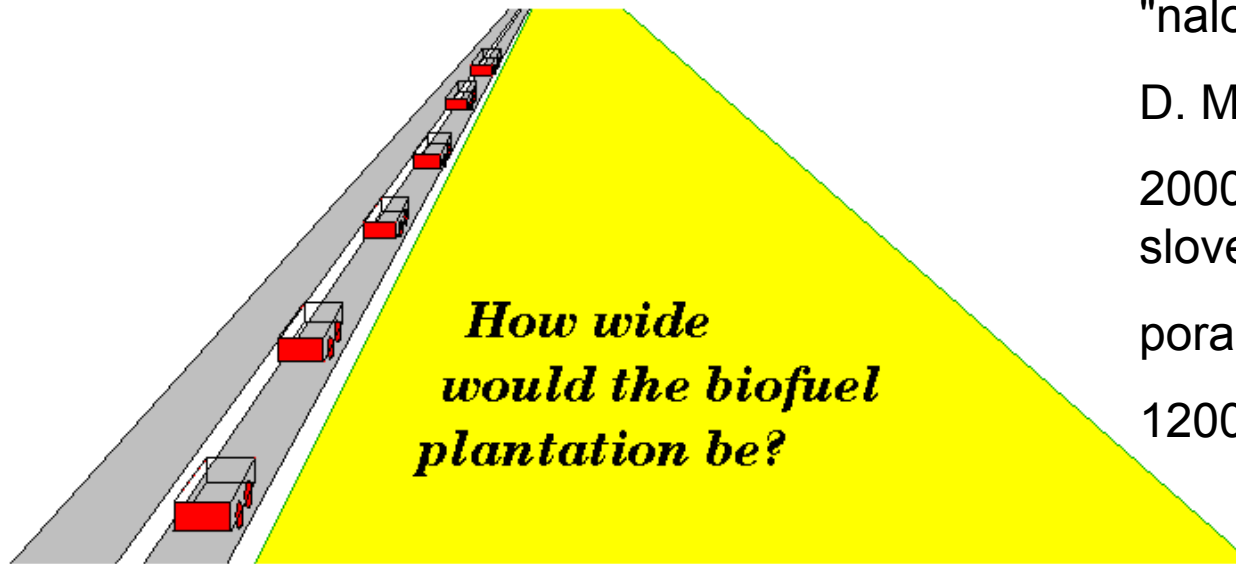
materiali predmeta:

"Fizika energijskih virov"



www.withouthotair.com

Branje in premetavanje števil



"naloga" 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?

CENZURA :-)

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 energetske 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?

Hans Rosling -

Professor of International Health at Karolinska Institute

www.gapminder.org



search "energy"

klik "who has oil and who uses it?"

klik "energy consumption and income"

y:

raba primarne energije v toe/osebo/leto - tonnes of oil
equivalent - 1 toe/osebo/leto=31.86 kWh/osebo/dan
(zaželjene enote)

x: GDP/osebo v \$ (upoštevana inflacija)

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 - piezoelektriki pod plastjo asfalta:

Polet: "...Poskusno vgrajujejo sisteme v ceste in v podjetju Innowattech obljublja, 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) obljubljal: 0.4 MWh energije na uro na "opremljen" kilometer ceste pri 600 vozilih na uro. (= 1 MWh/h/km pri prometu 1500 vozil/h.)

Naloga: Preveri številke.

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

Kako iz 0.3 MWh mehanske energije narediti 1 MWh elektrike?

Številke in enote

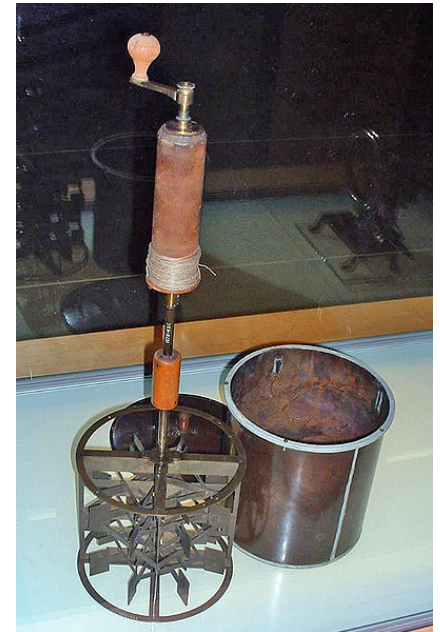
Osnovna enota za energijo [J]

"neprijetna" lastnost:

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

- izgoniti 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

Avto (I.T.)

80 kWh

~ 130 km/dan

~ 6.5 l/100 km

**(največkrat 2
potnika)**



Letalo - 1x letno, Ljubljana ↔ Los Angeles

10.000 kWh/potnika

26 kWh/dan



Hiša (I.T.)

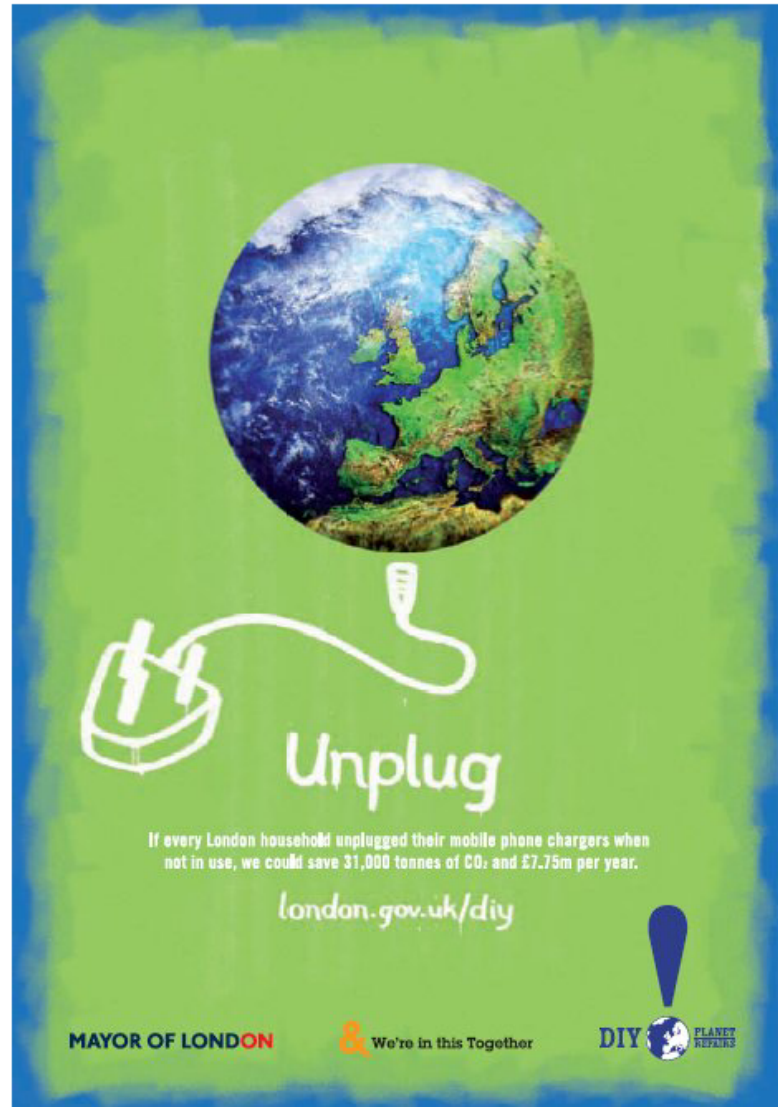
Kurilno olje: 25 kWh/dan/osebo

Elektrika: 5 kWh/dan/osebo



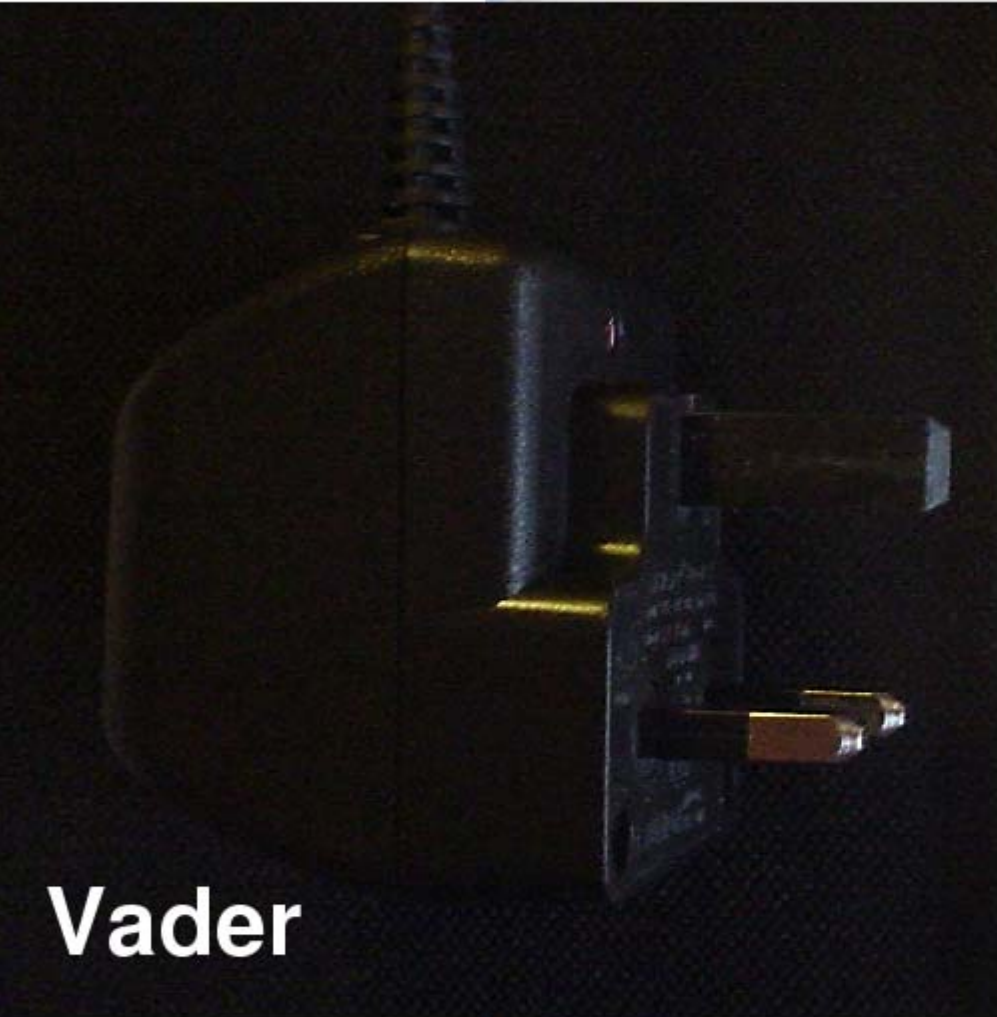
Polnilec mobitela (MacKay)

June 2007

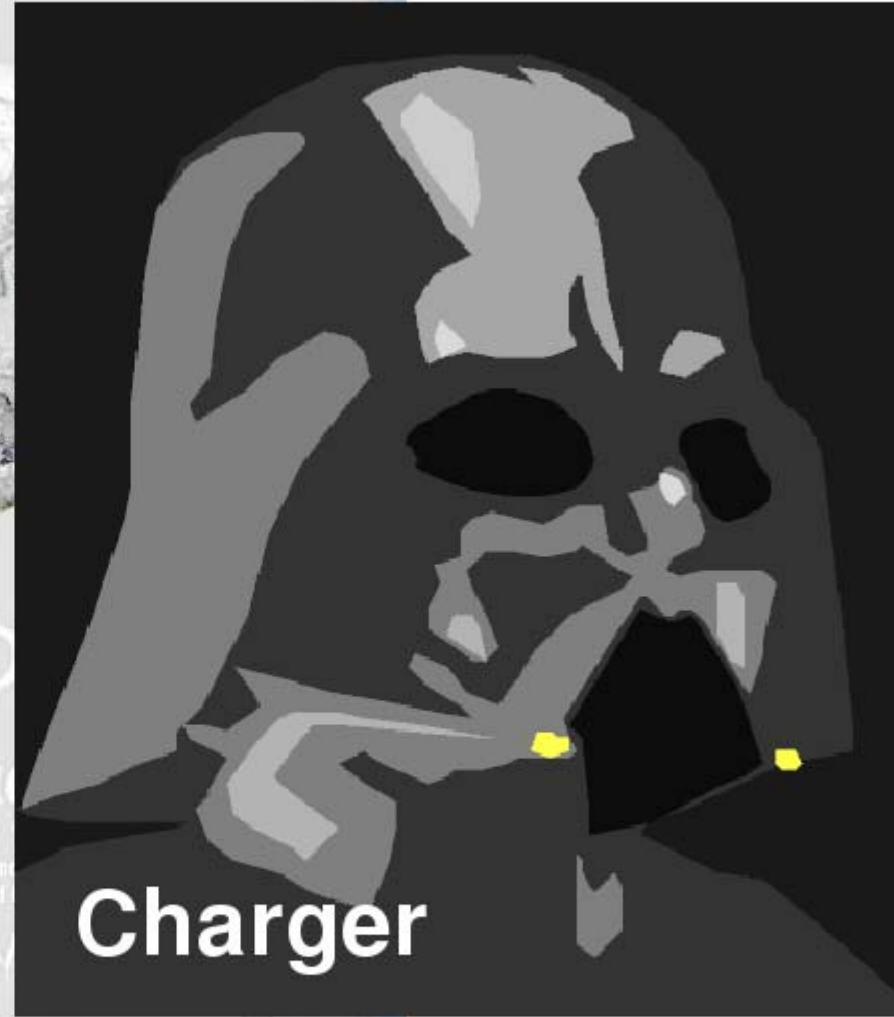


'If every London household unplugged their mobile phone chargers when not in use, we could save 31,000 tonnes of CO₂ and 7.75m per year.'

Are they related?



Vader



Charger

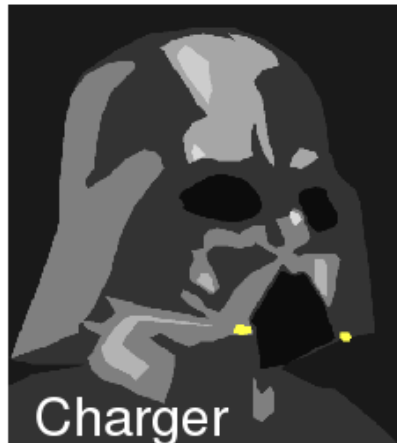
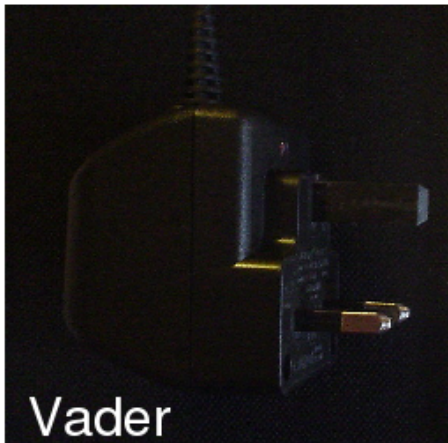
MAYOR OF LONDON

We're in this Together

DIY  CLIMATE RESILIENCE

'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 W x 86400 s =

40.000 W x 1 s

=0.01 kWh



80 kWh/dan

(130 km)

26 kWh/dan

1 x letno LJ-LA



150 kWh/dan

30 kWh/dan/osebo



0.01 kWh/dan

Enote

izgoniti 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

- gostota poselitve

število kvadratnih metrov na osebo

SLO: 10.000 m² na osebo

100 prebivalcev/km²

- moč na površino

W na m²



Slika: Wikipedia

Primeri:

žarnica 24 ur - 1kWh

hrana - 3 kWh/dan

kopel - 5 kWh

liter bencina - 10 kWh

aluminijasta pločevinka - 0.6 kWh

(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

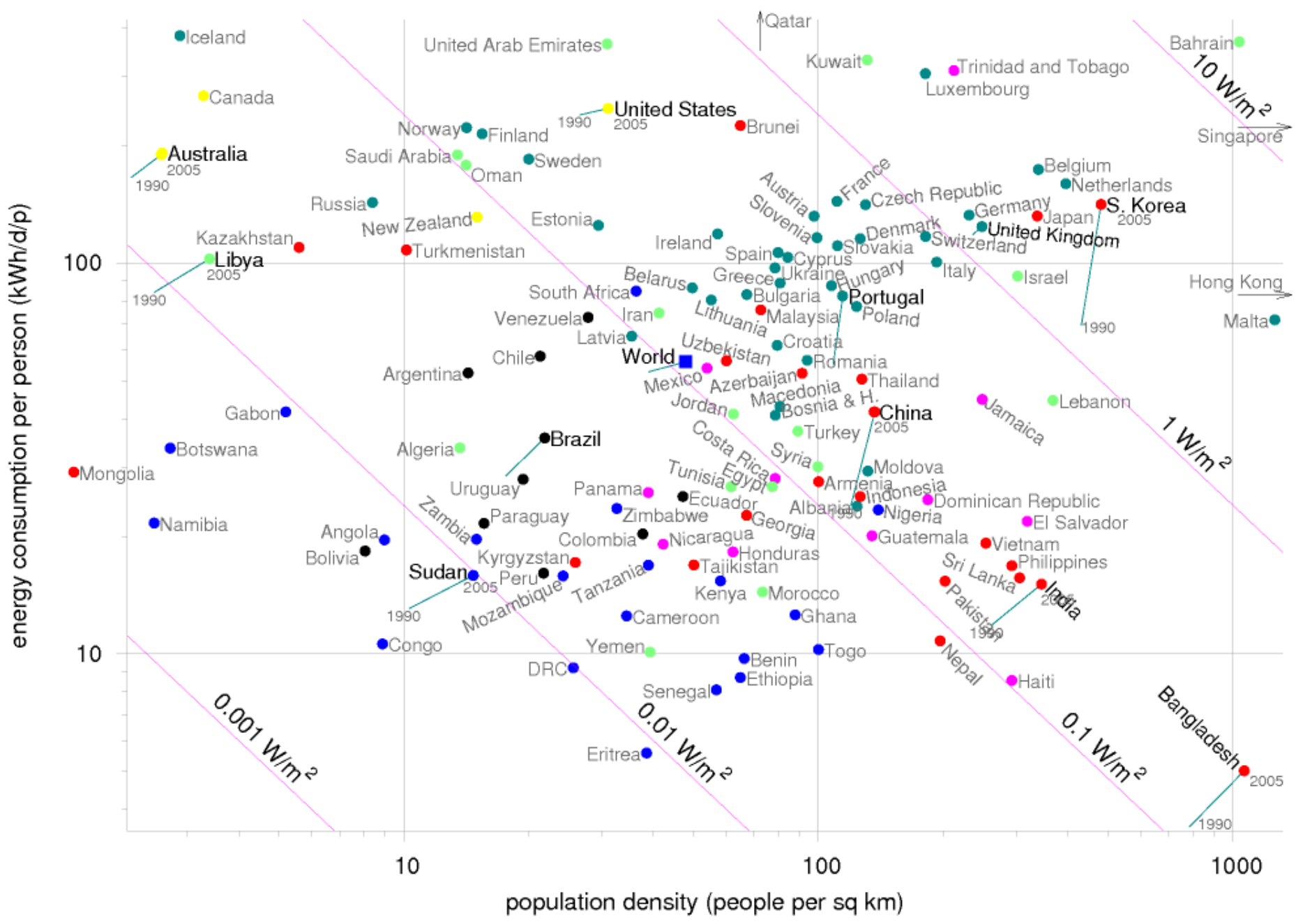
toe=11.630 kWh

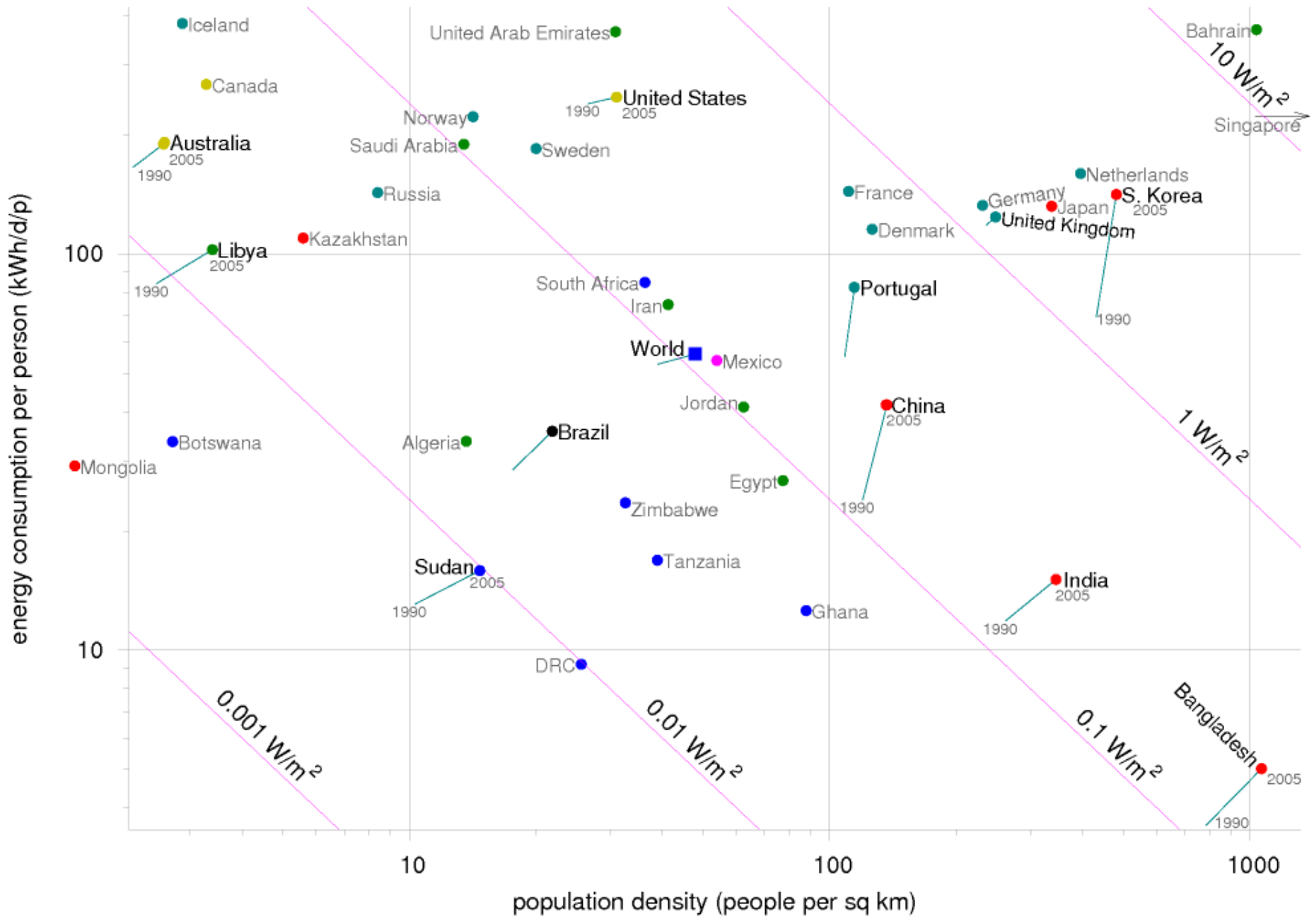
<http://www.stat.si/letopis/>

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

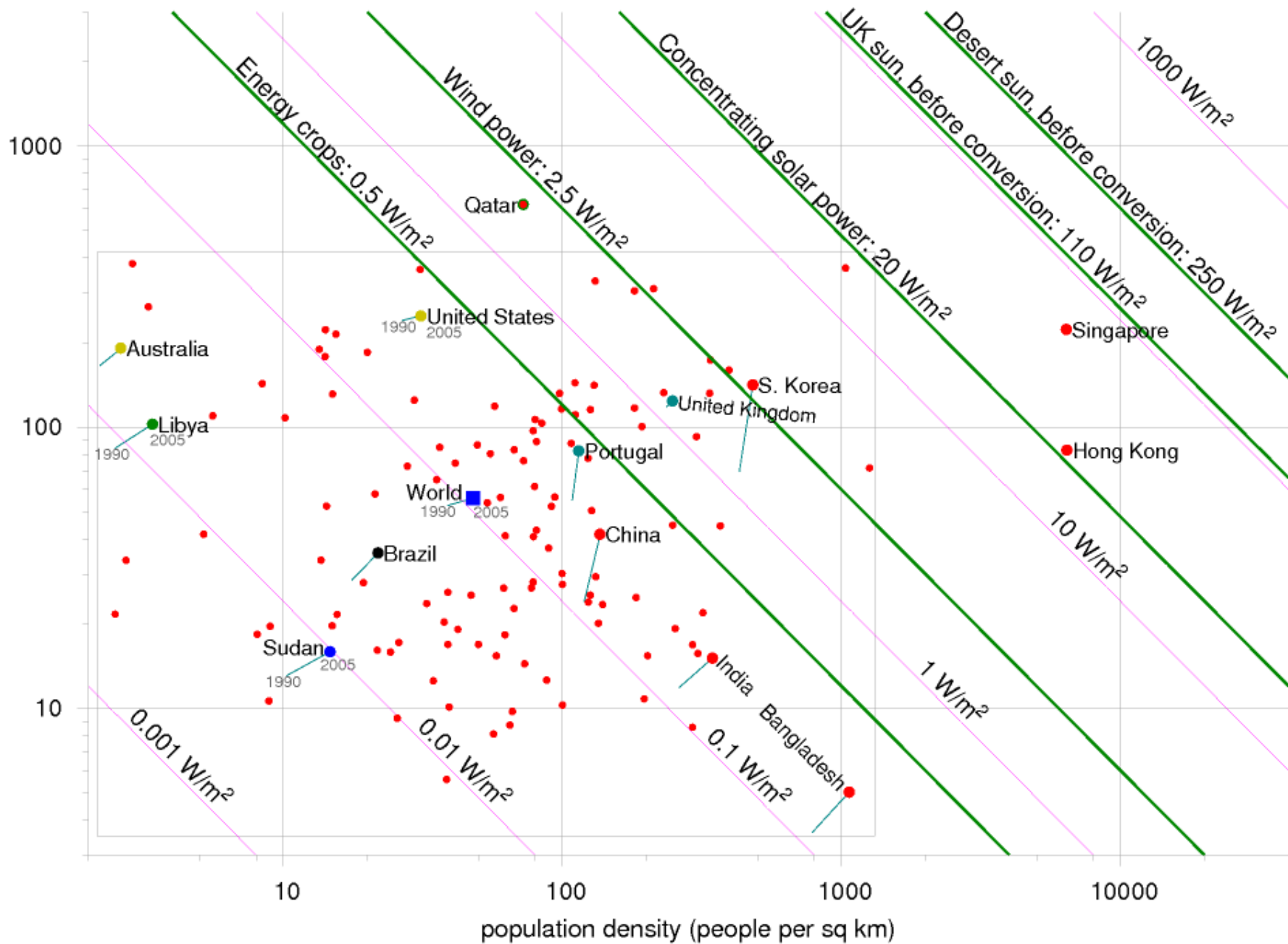
Masa

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



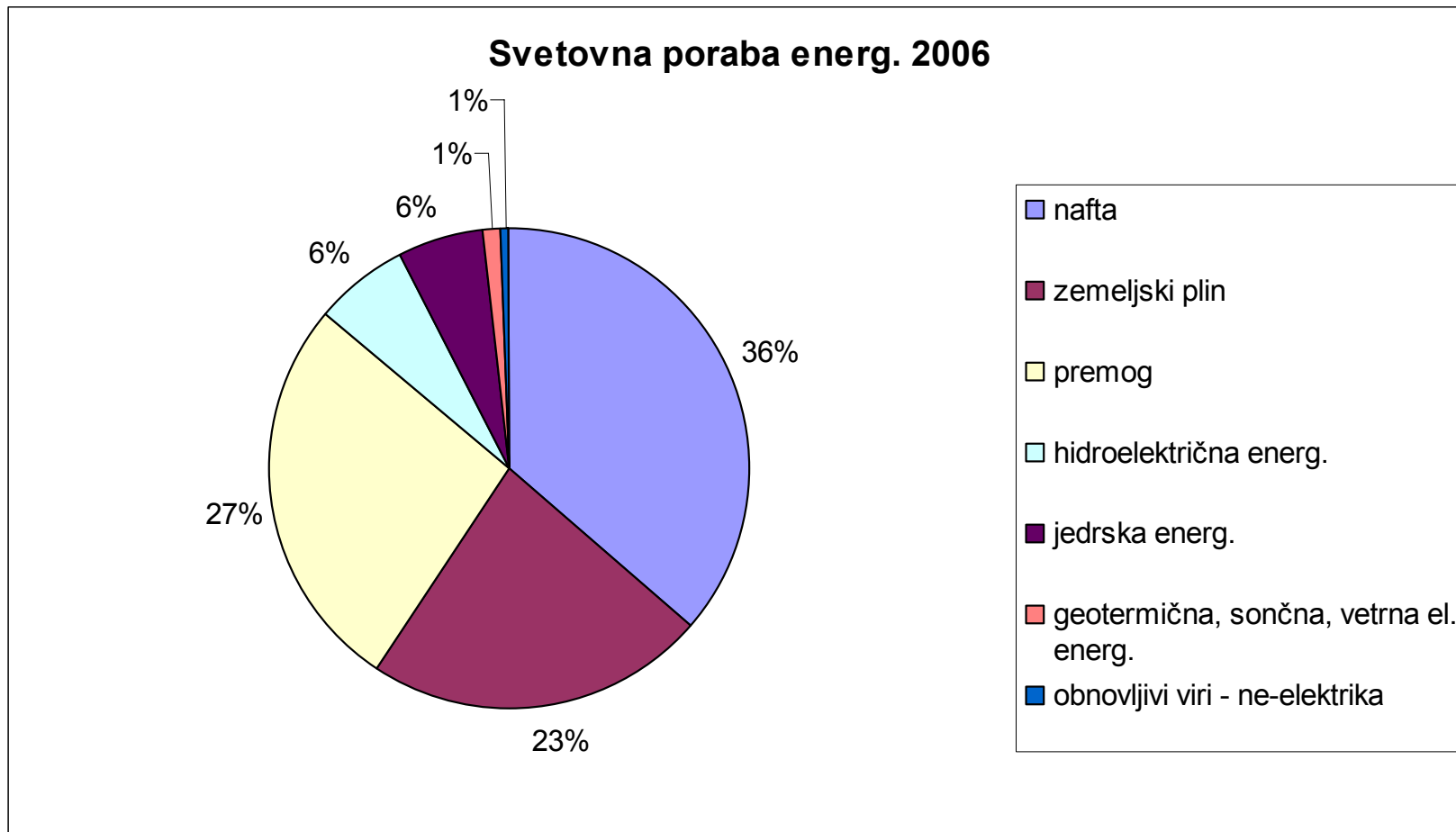


energy consumption per person (kWh/d/p)



Energija - Svet porablja 15-16 TW

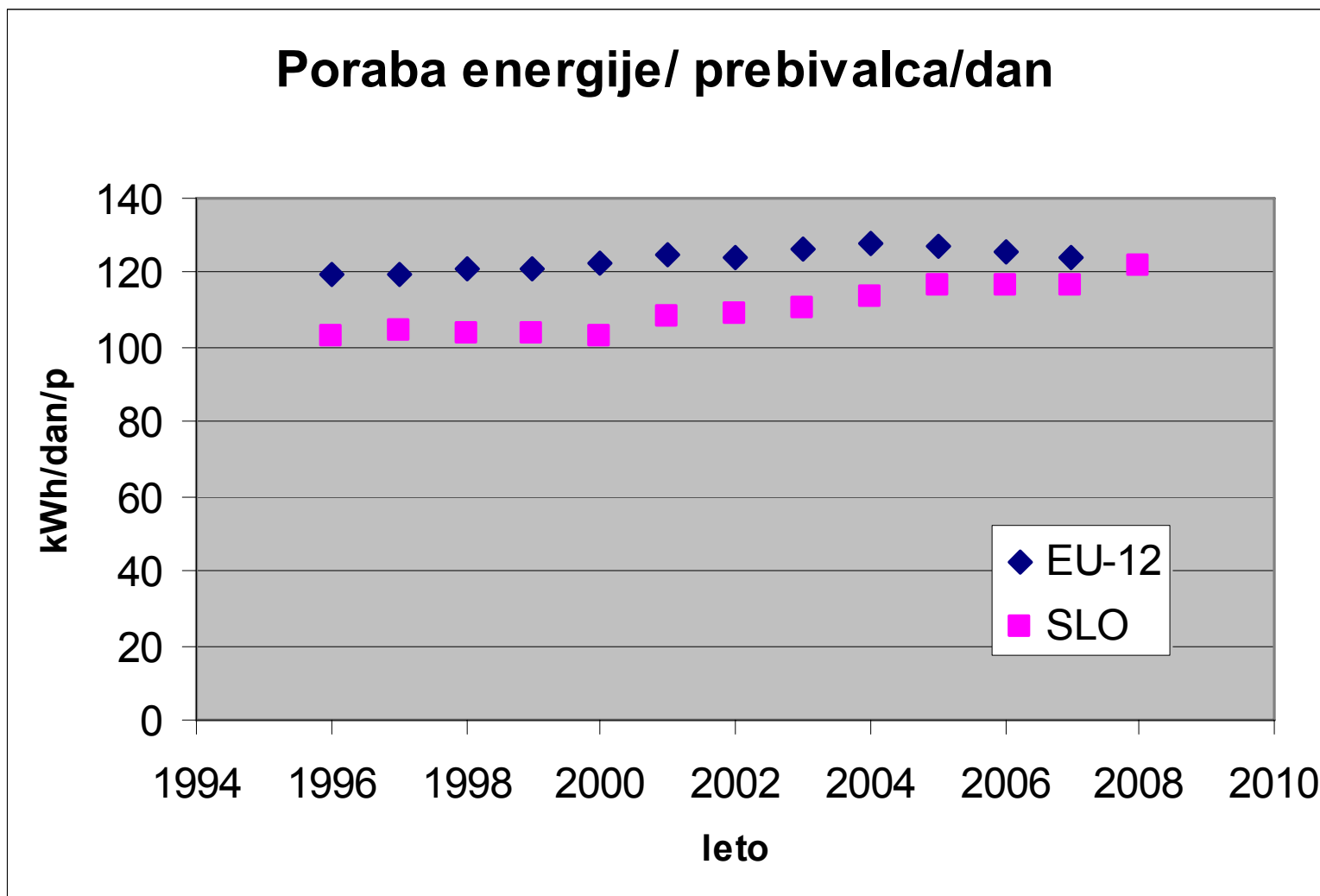
55 kWh/dan/osebo



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

Slovenija in EU-12

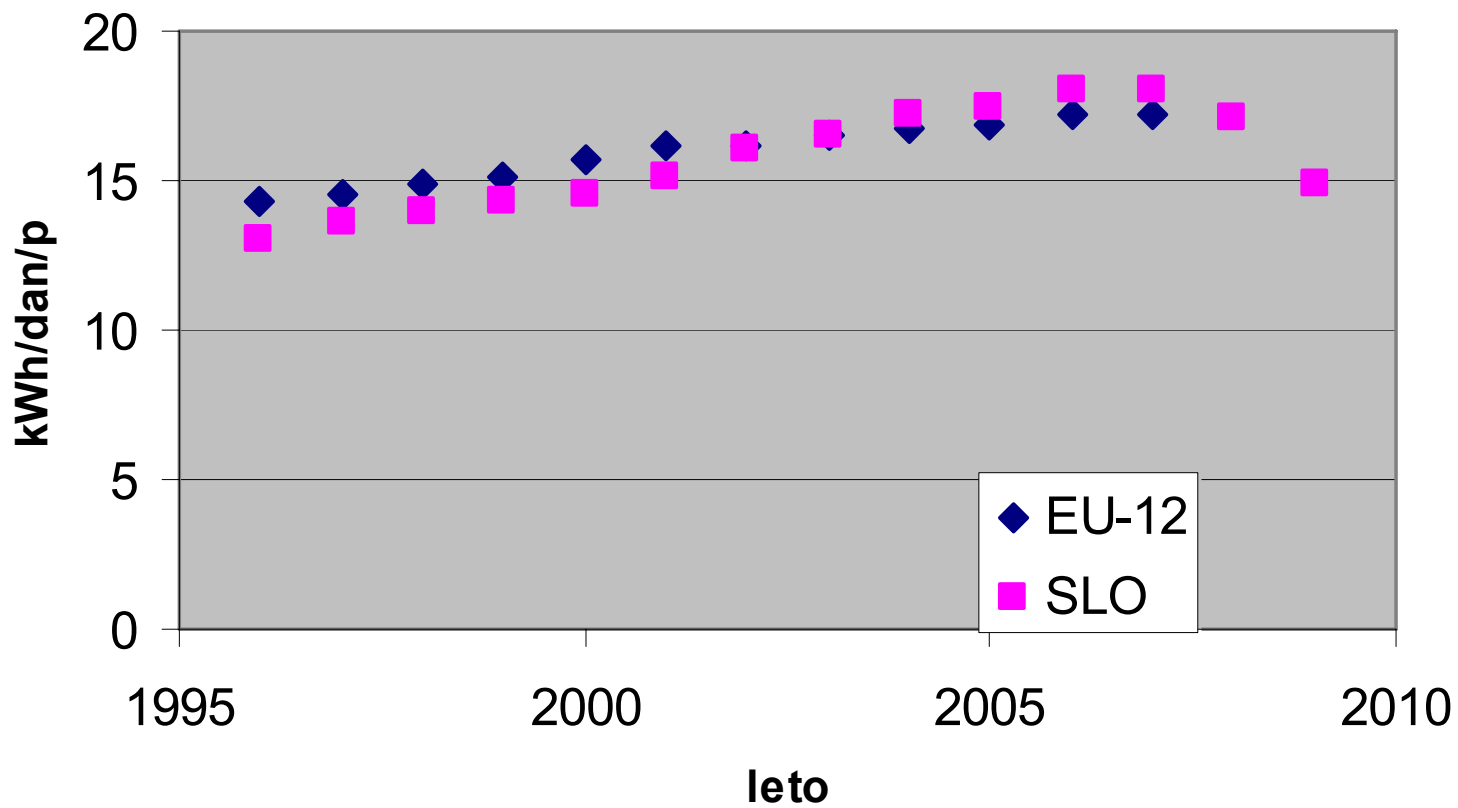
Belgium, Denmark, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, the Netherlands, Portugal, Spain, United Kingdom



Nova statistika podaja EU-15 : dodatno še Avstrija, Finska, Švedska

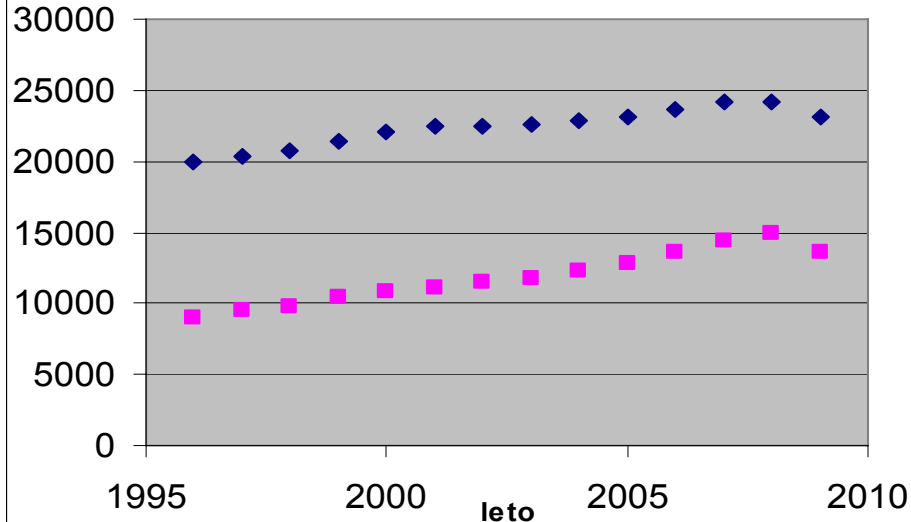
Slovenija in EU-12

Poraba elektrike/prebivalca/dan

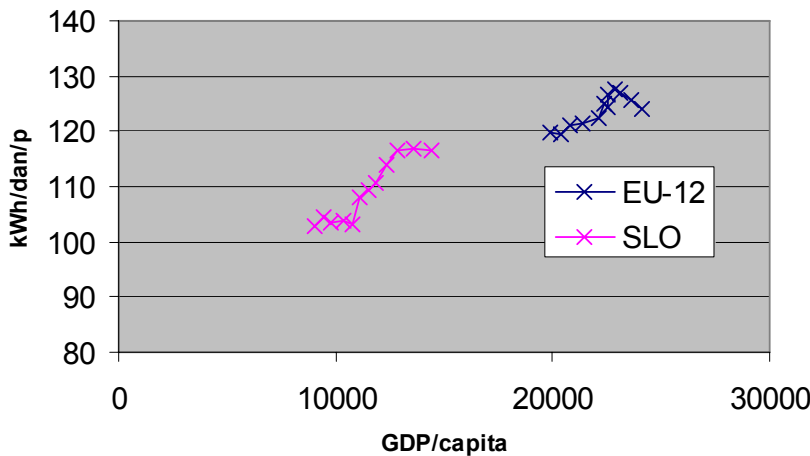


Slovenija in EU-12

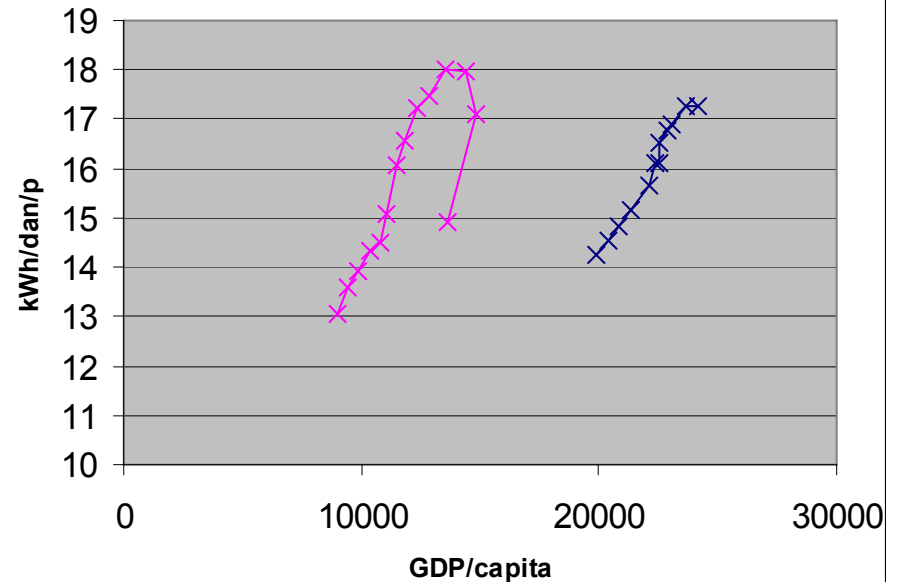
GDP/prebivalca (prices 2000)



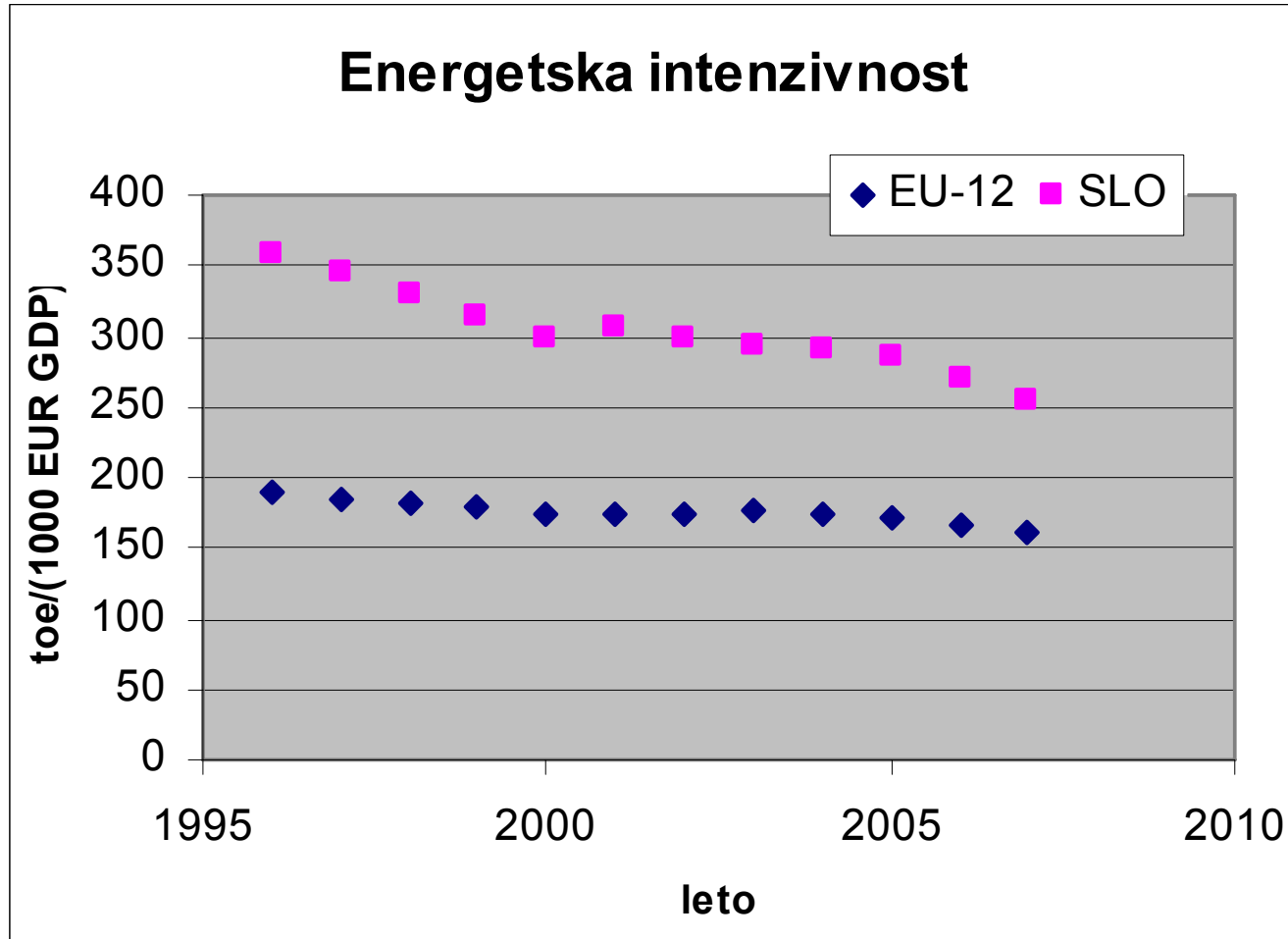
Poraba energije/prebivalca vs. GDP/prebivalca 1996-2007



Poraba elektrike/prebivalca vs. GDP/prebivalca 1996-2007 (SLO do 2009)



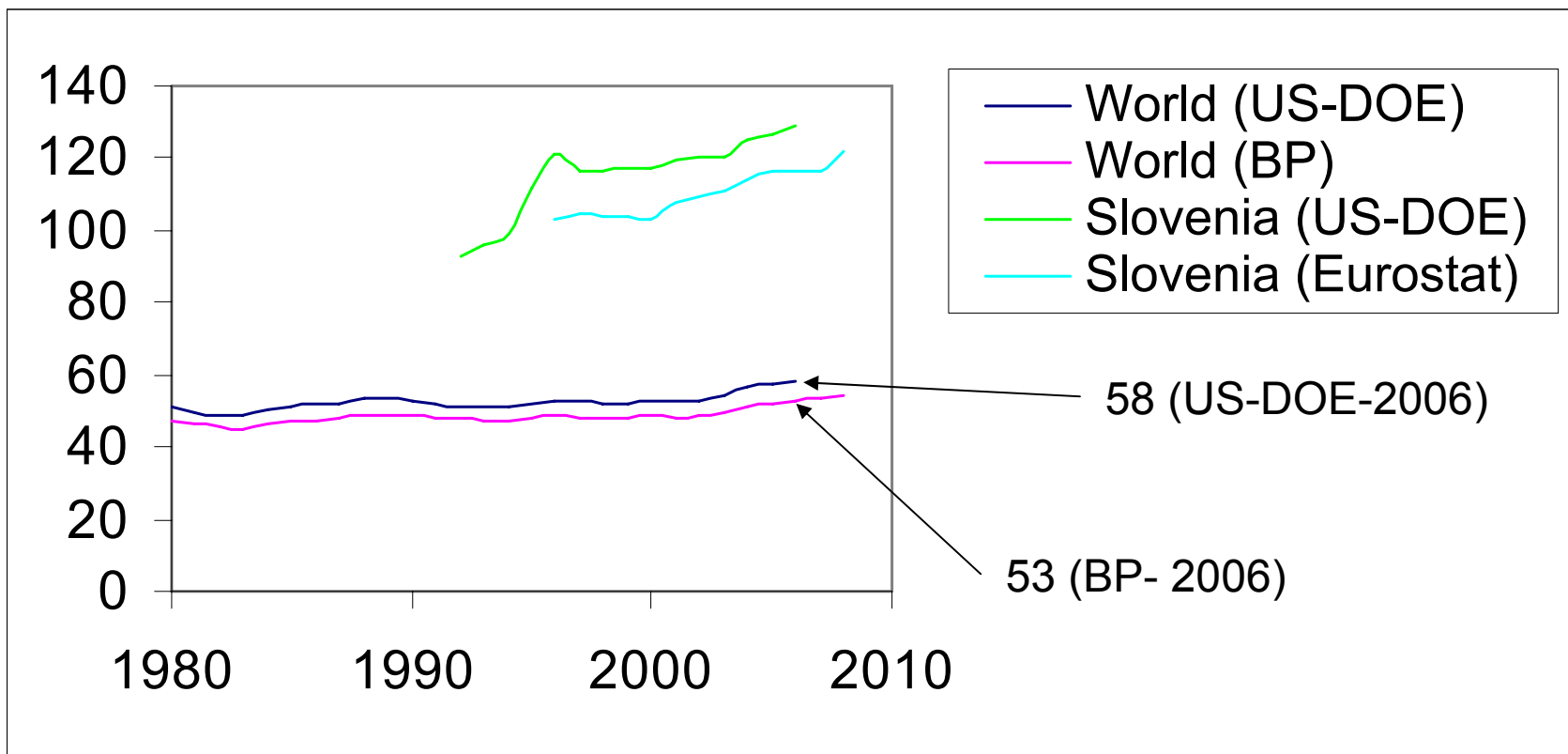
Slovenija in EU-12



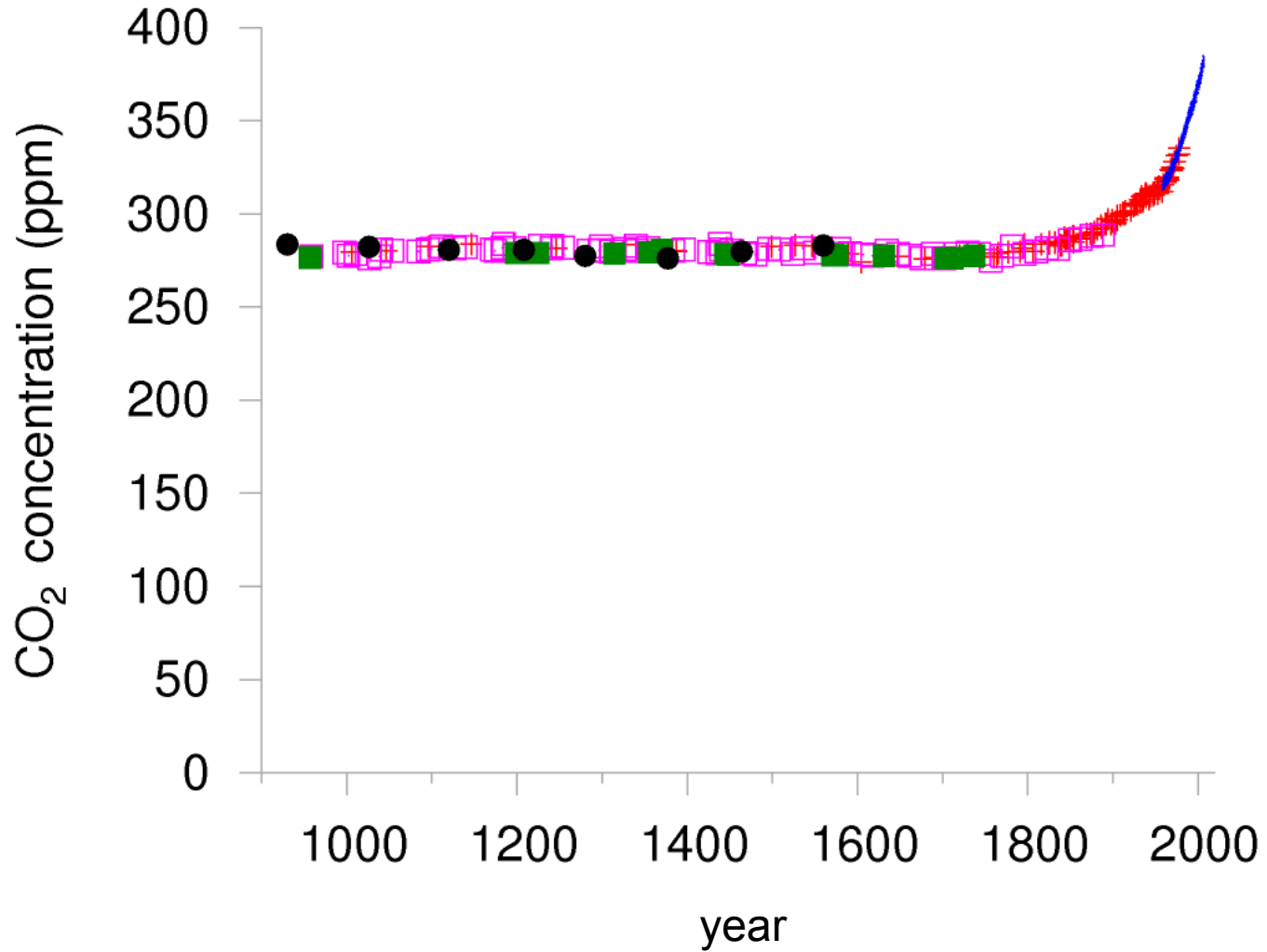
1 toe (tonne of oil equivalent)=11630 kWh - "standardna" enota za merjenje energetske intenzivnosti

Natančnost statistike...

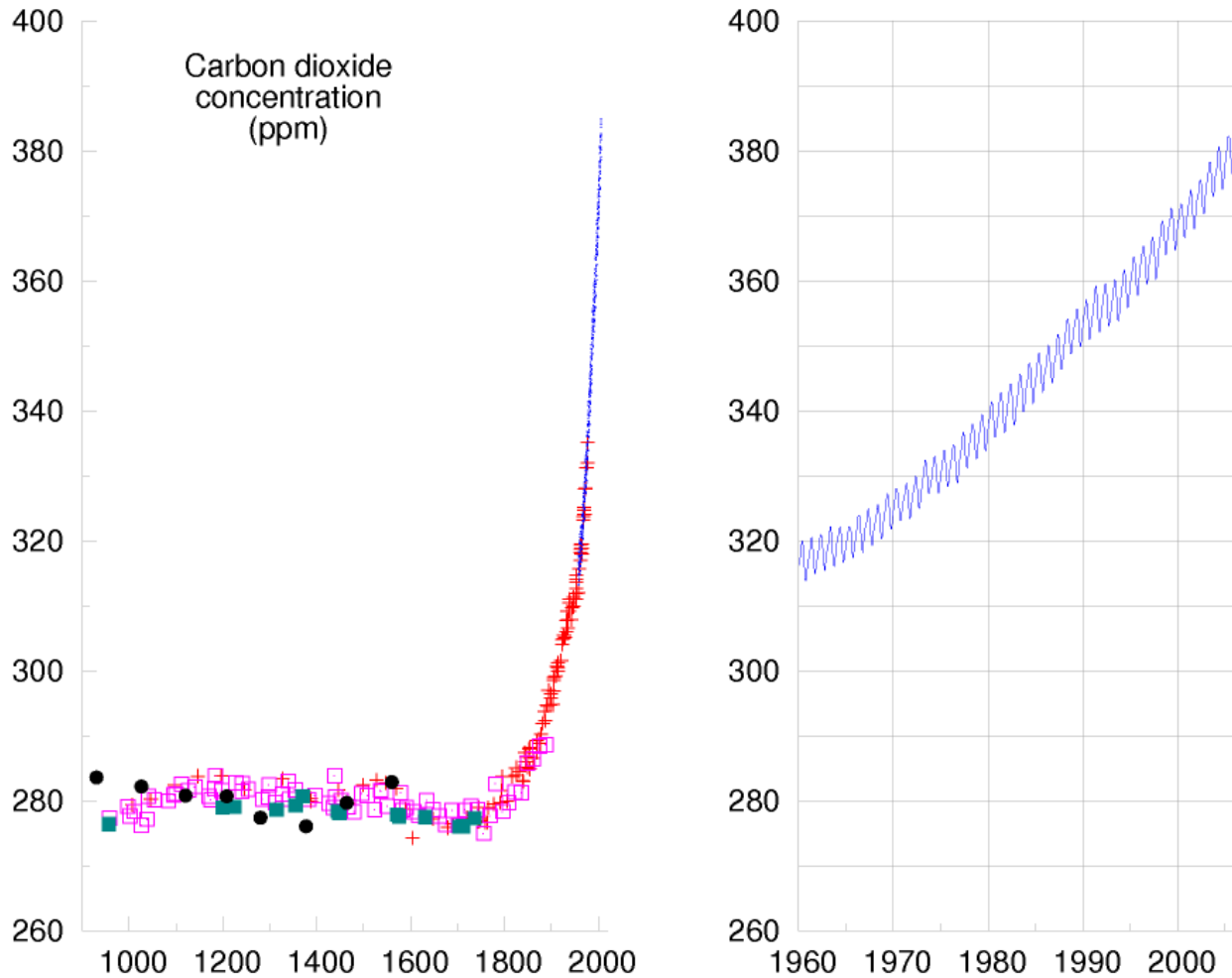
poraba energije v kWh/dan/prebivalca
v Sloveniji in svetu



CO₂ (MacKay)

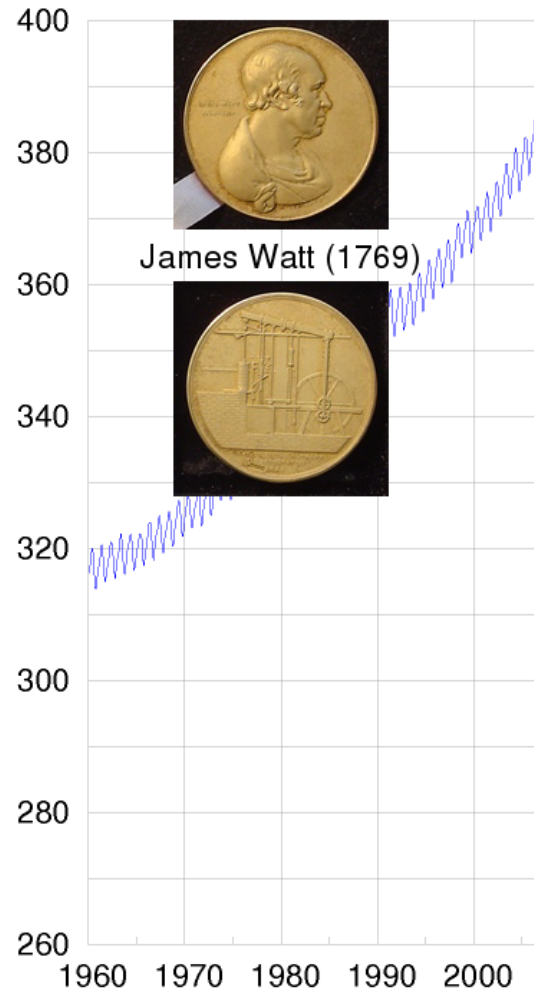
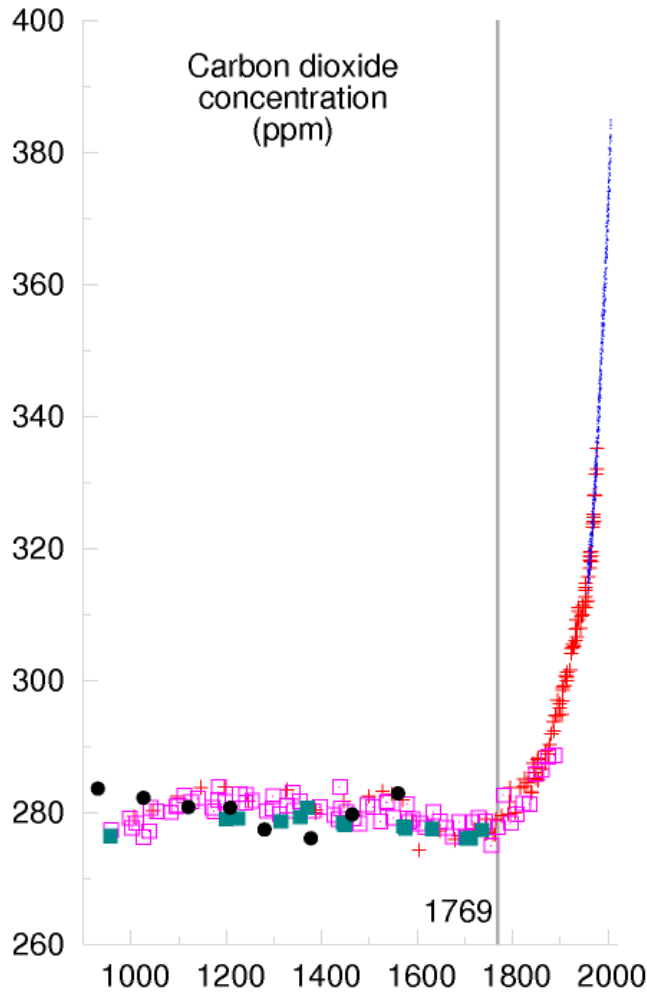


CO₂ (MacKay)



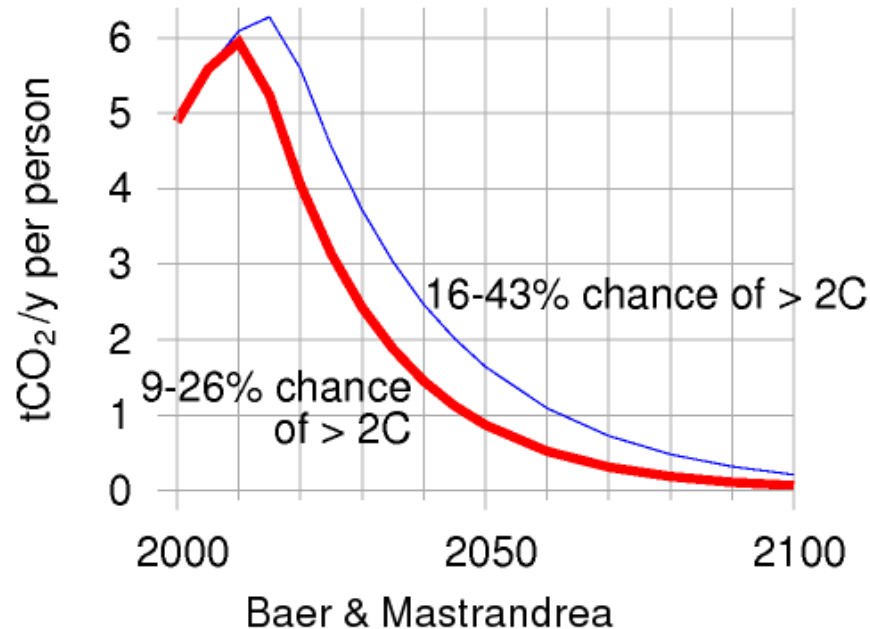
Sources: Keeling and Whorf (2005); Neftel et al (1994); Etheridge et al (1998); Siegenthaler et al (2005); Indermuhle et al (1999)

CO₂ (MacKay)



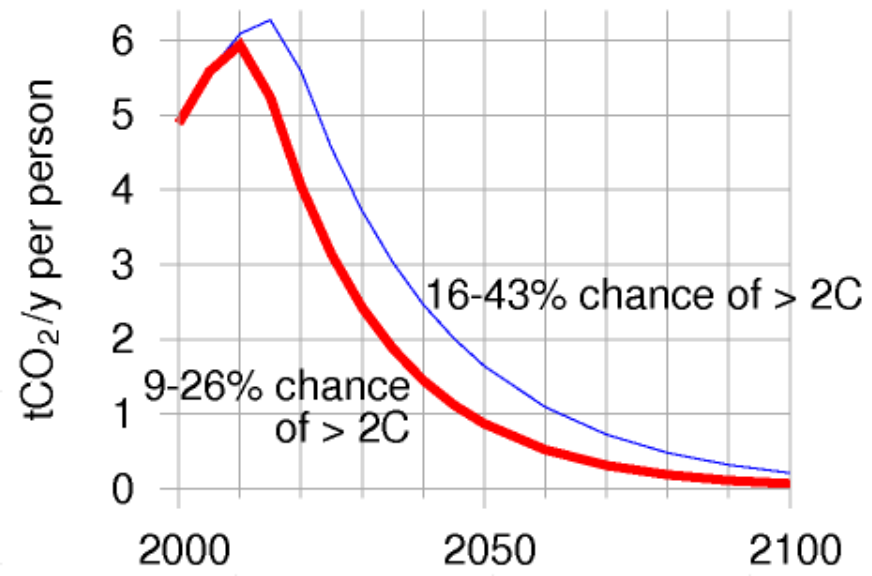
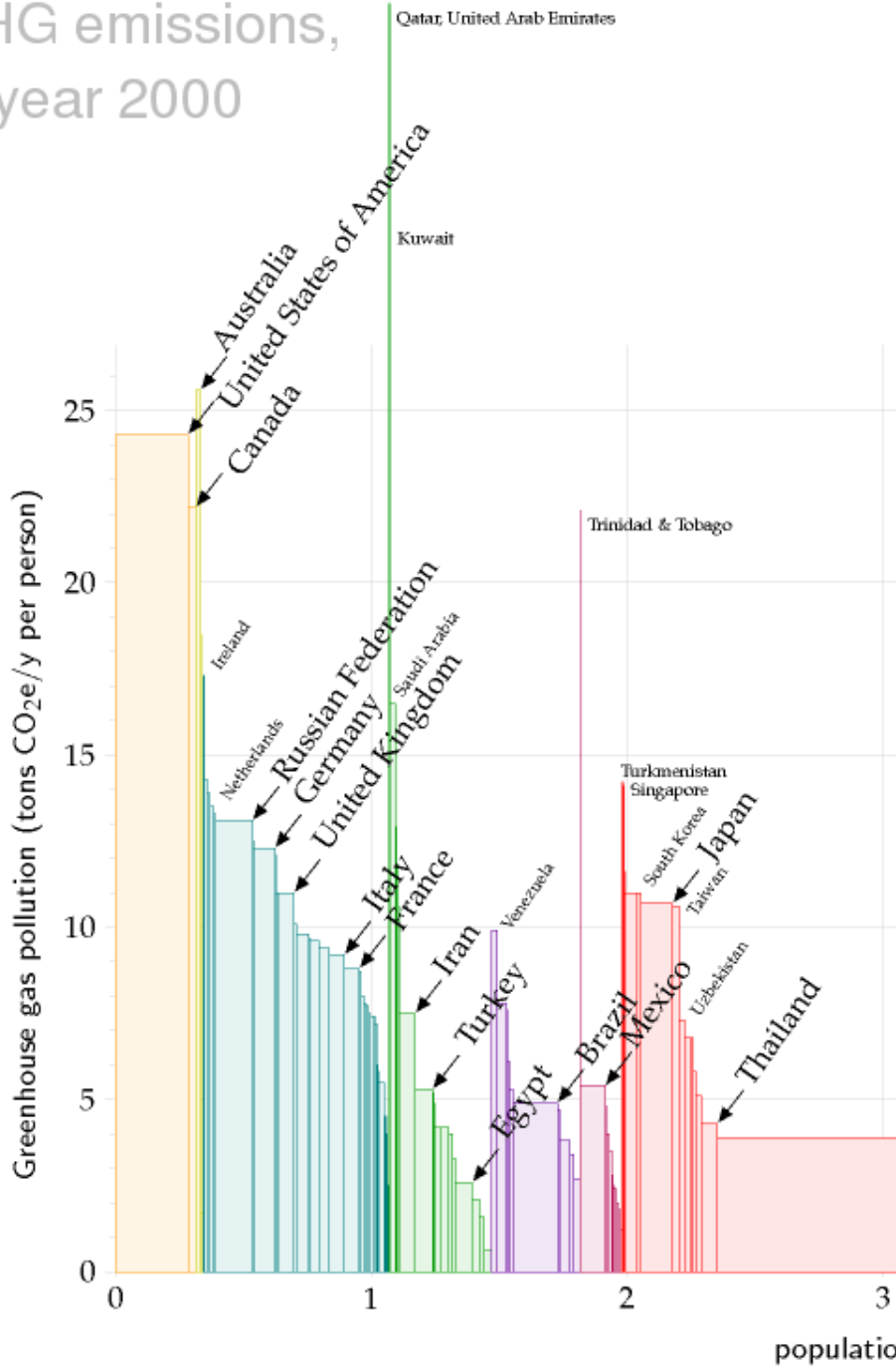
Sources: Keeling and Whorf (2005); Neftel et al (1994); Etheridge et al (1998); Siegenthaler et al (2005); Indermuhle et al (1999)

CO₂ (MacKay)



Climate scientists recommend reduction from 5.5 t CO₂ per year per person (world average) to ~ 1 t CO₂ per year per person by 2050

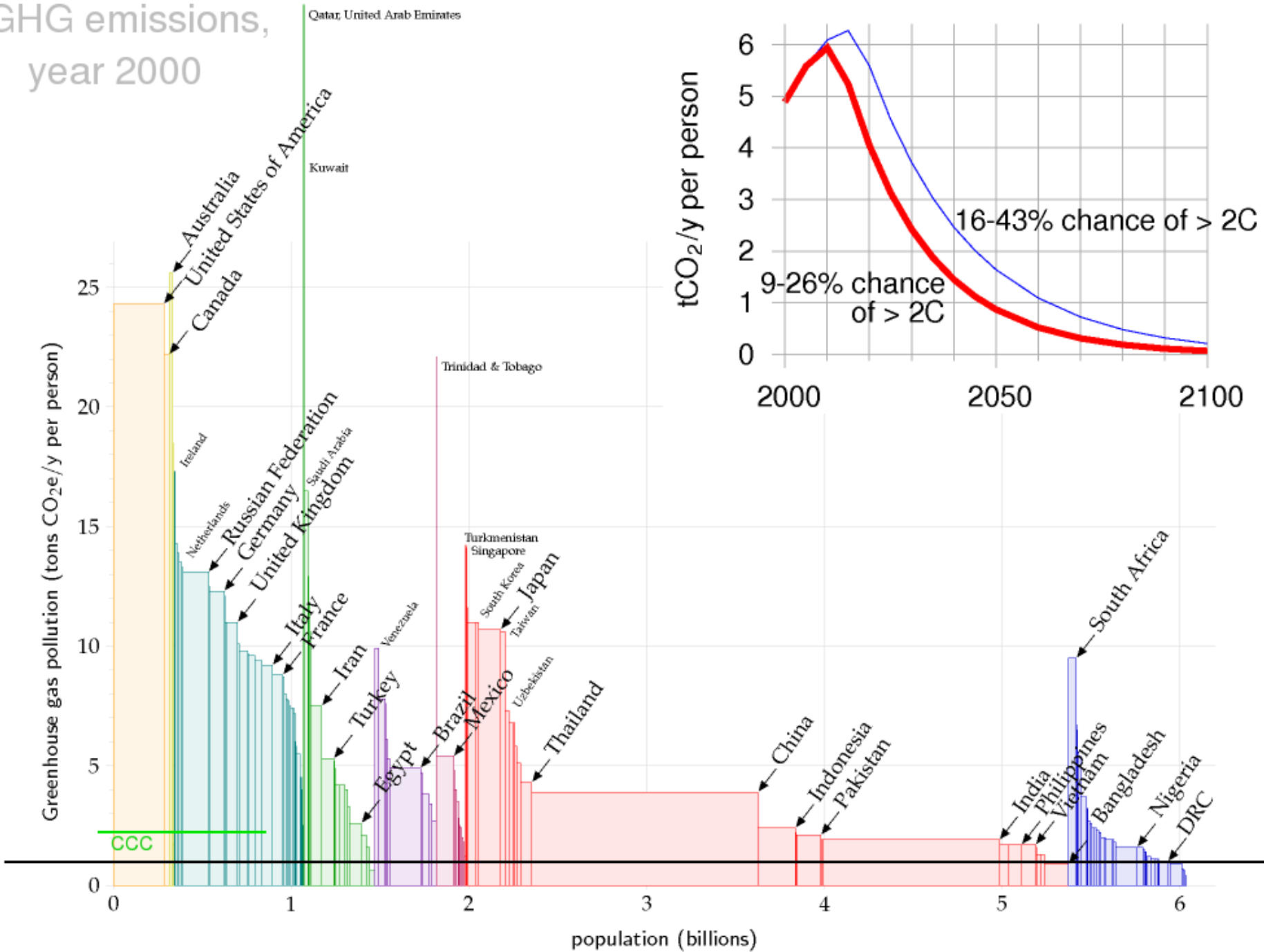
GHG emissions, year 2000



Slovenija - "pred" Italijo

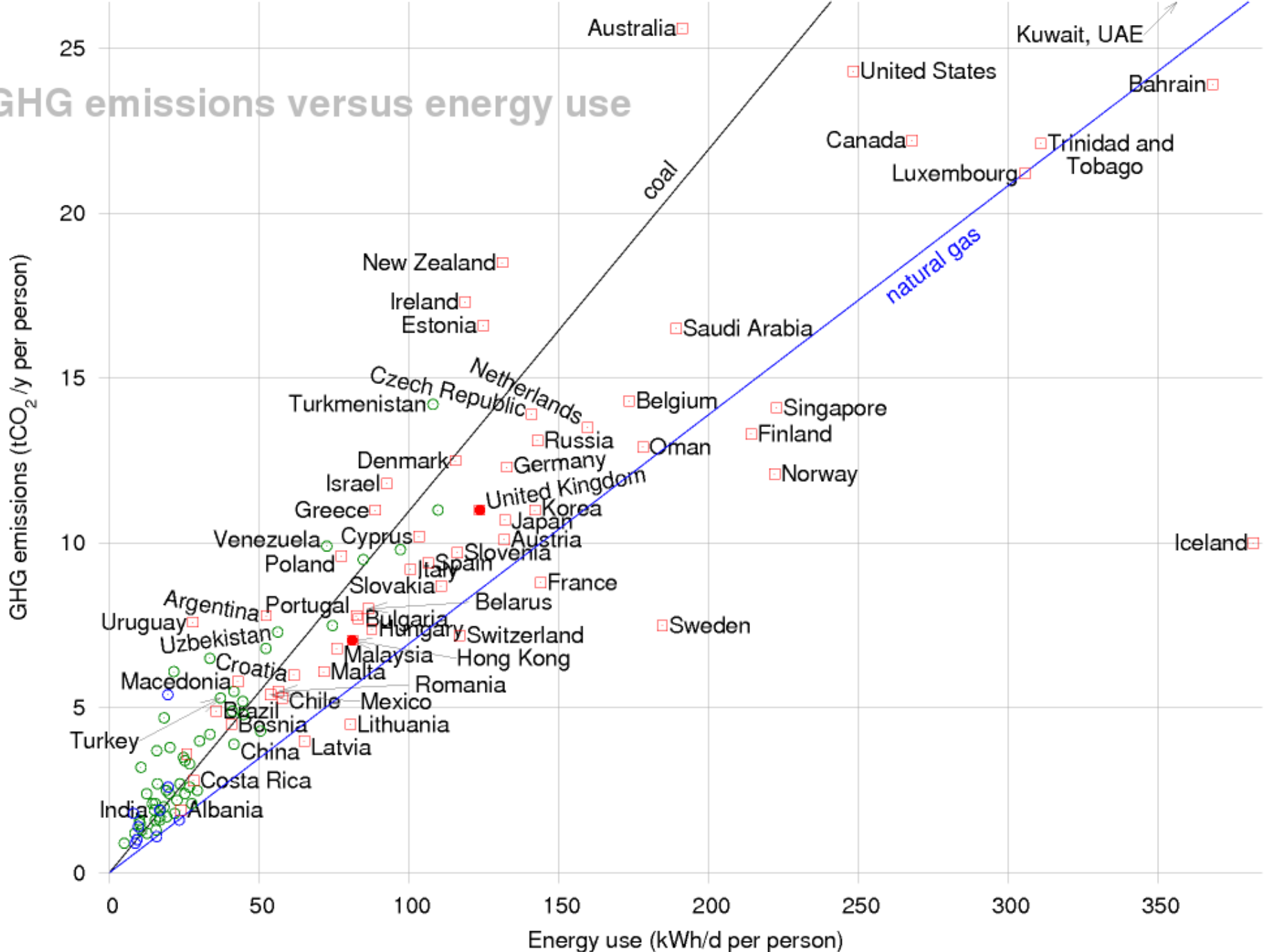
Data source: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 4.0. (Washington, DC: World Resources Institute, 2007).

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



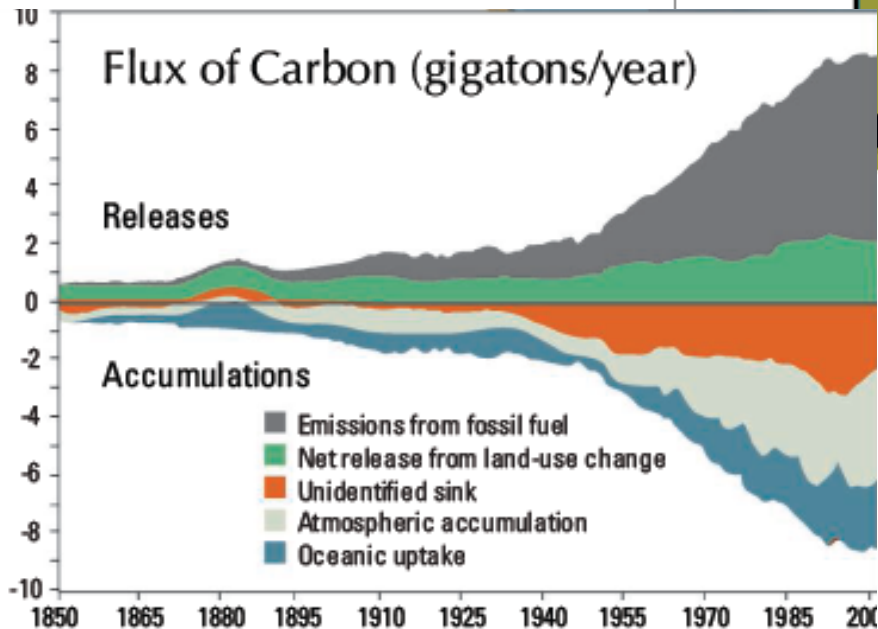
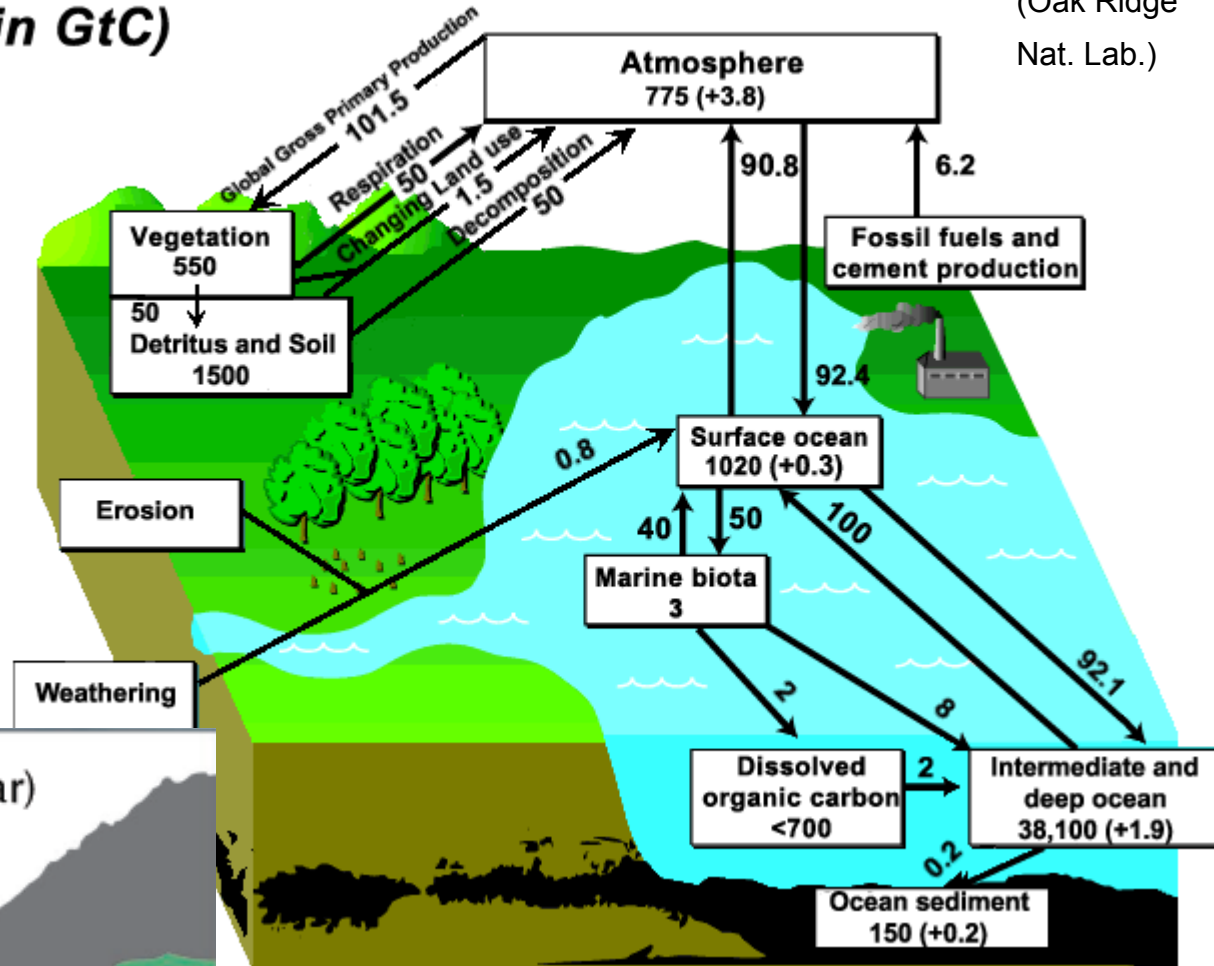
Global Carbon Cycle (1992-1997) (in GtC)

Vir: Mac Post
(Oak Ridge
Nat. Lab.)

Kvadrтки:
rezervoarji, v
oklepajih letna
sprememba.

Tokovi (puščice) -
GtC/leto

1 kg C = 44/12=3.67 kg CO₂



v atmosferi ostane
polovica sproščenega
ogljika.

Količina 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 1C. 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 CO₂/kWh): ~1000 Gton -> ~2000 Gton CO₂

Nafta (0.25 kg CO₂/kWh): ~200 Gton (brez skrilavcev) -> ~600 Gton CO₂

Plin (0.2 kg CO₂/kWh): ~2·10¹⁵ kWh konvencionalnih zalog -> ~400 Gton CO₂

Skupni izpust ~3000 Gton

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

Preveri podatke za jedrsko energijo na prosojnici 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

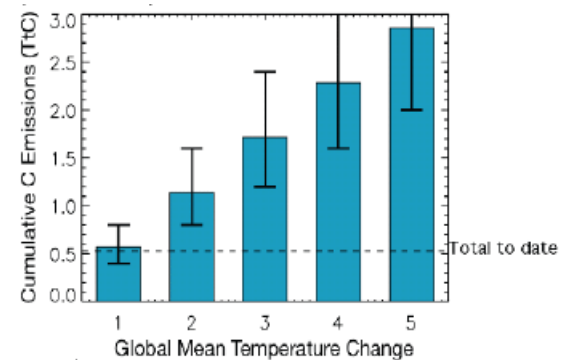
Hidro (2006): 3000 TWh elektrike, "toplotna energija": 29.7 quad BTU = 8700TWh ???

Koliko prispeva k klimatskim spremembam sproščena toplota in koliko CO₂?

Svetovna
proizvodnja
energije prispeva
~0.03 W/m²

CO₂ prek učinka
tople grede
prispeva ~2 W/m²

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

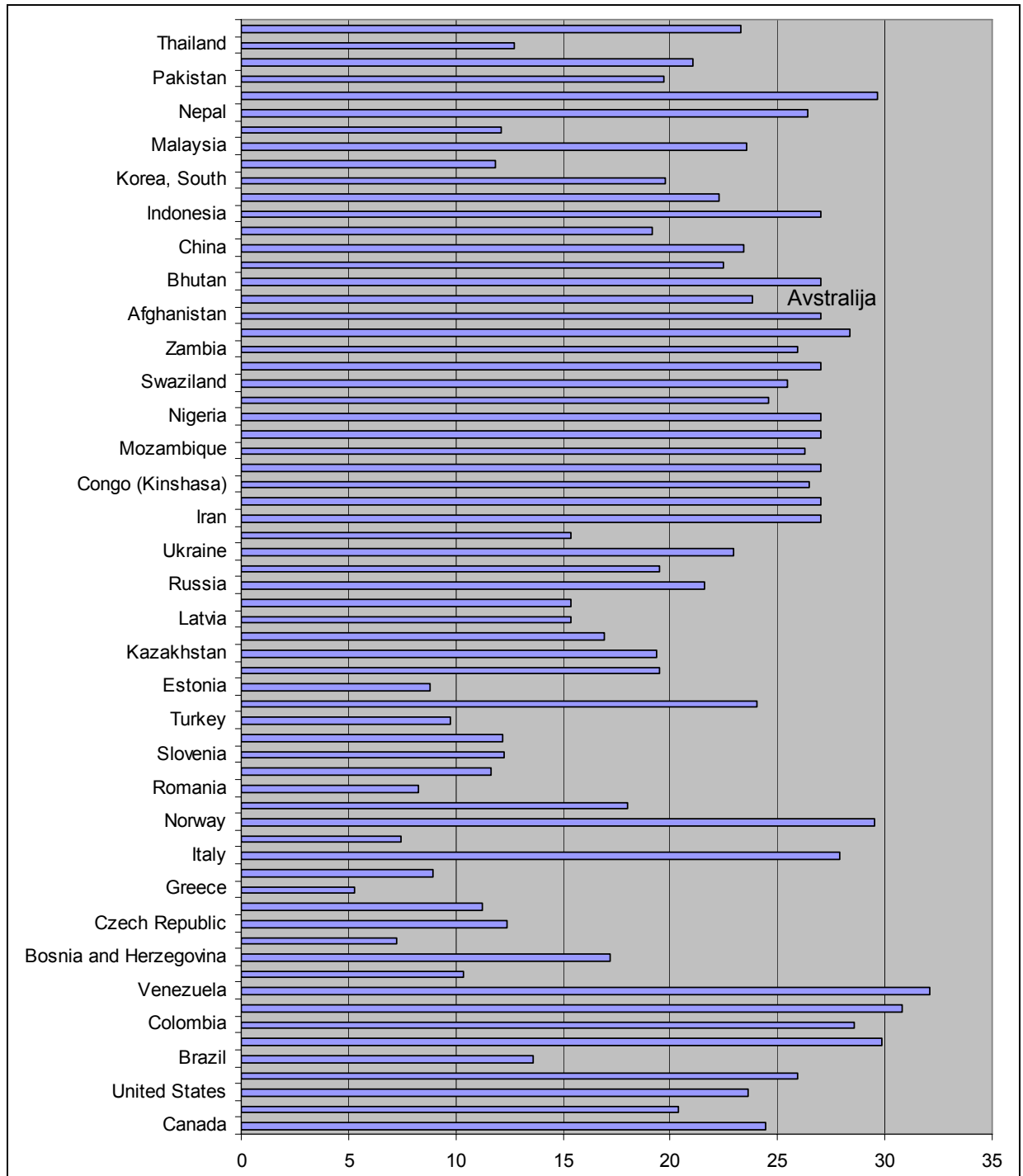


Premog

sežigna toplota
(MJ/kg)

<http://www.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=1&pid=1&aid=10>

1 kg "standardnega"
premoga
(coal equivalent) =
29.3 MJ/kg =
8140 kWh



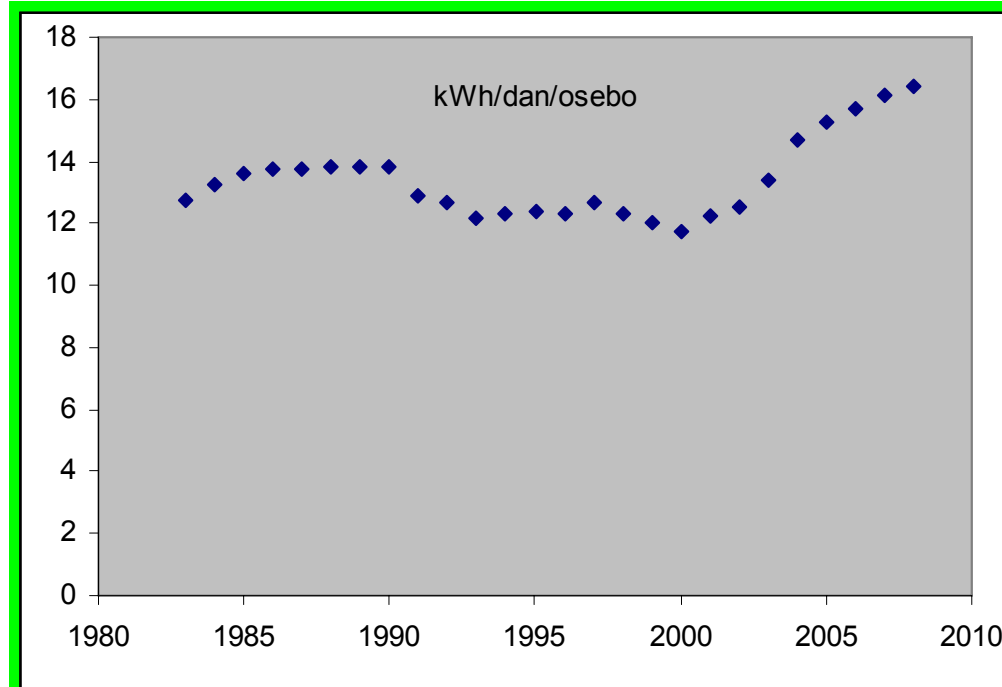
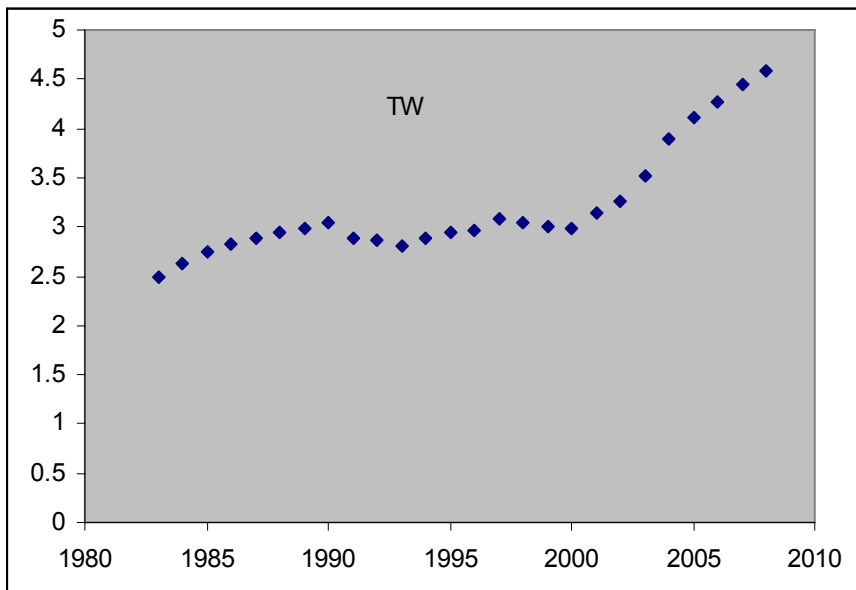
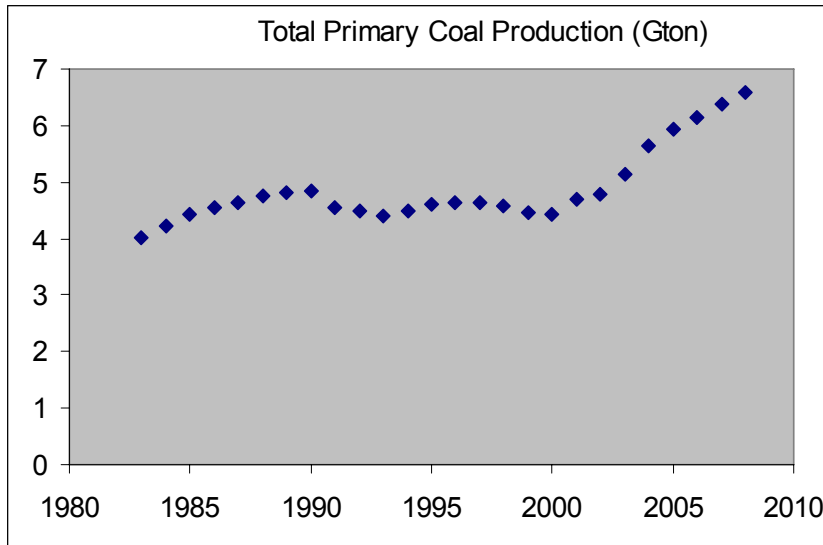
LETNA PORABA PREMOGA

DOE statistika računa

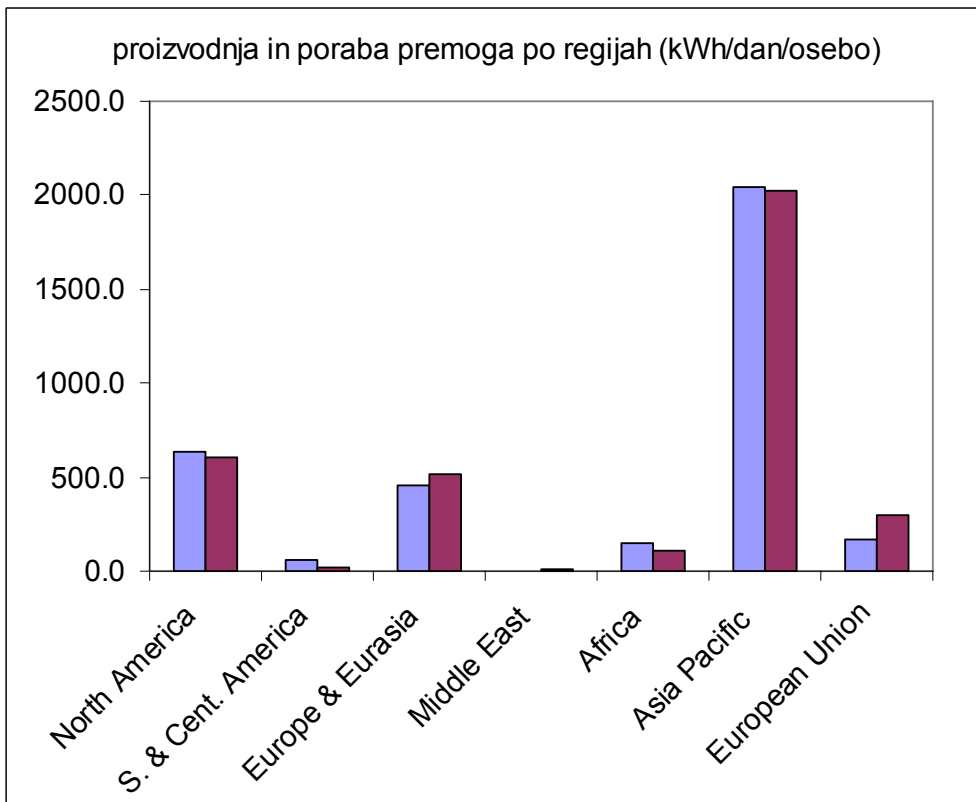
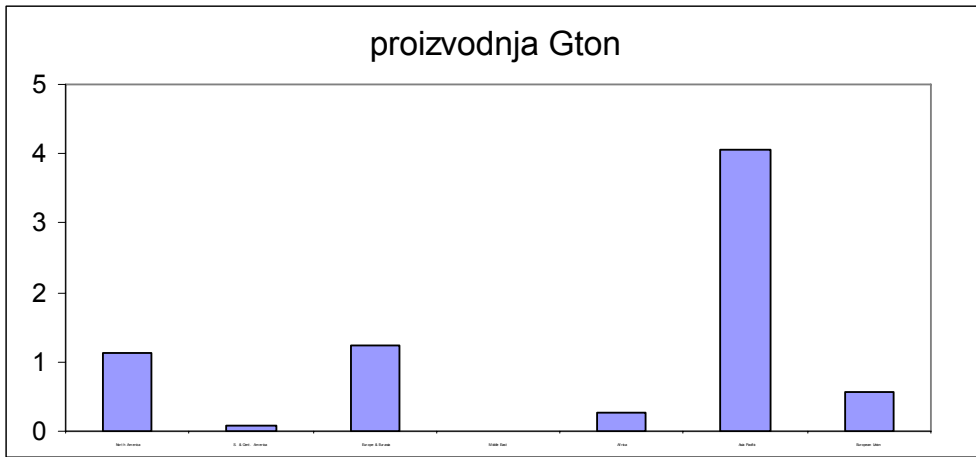
Z:

1 short ton=907 kg

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



Premog

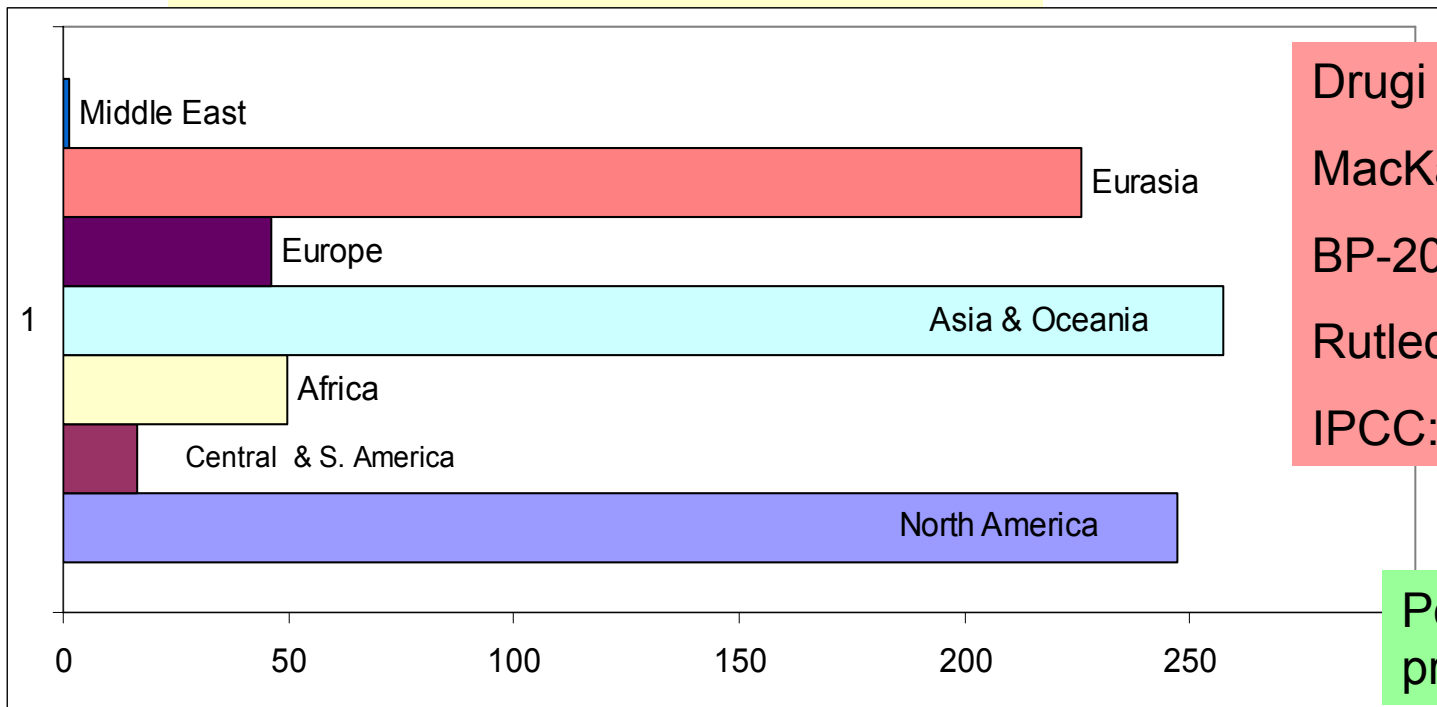


http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/coal_section_2010.pdf

Komercialno dosegljive zaloge premoga 2005 (Gton)

Svet: 840 Gton

<http://www.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=1&pid=7&aid=6&cid=regions,&syid=2005&eyid=2005&unit=MST>



Drugi viri - rezerve:
MacKay: 1600 Gton
BP-2009: 850 Gton
Rutledge: ~400 Gton
IPCC: 5000 Gton

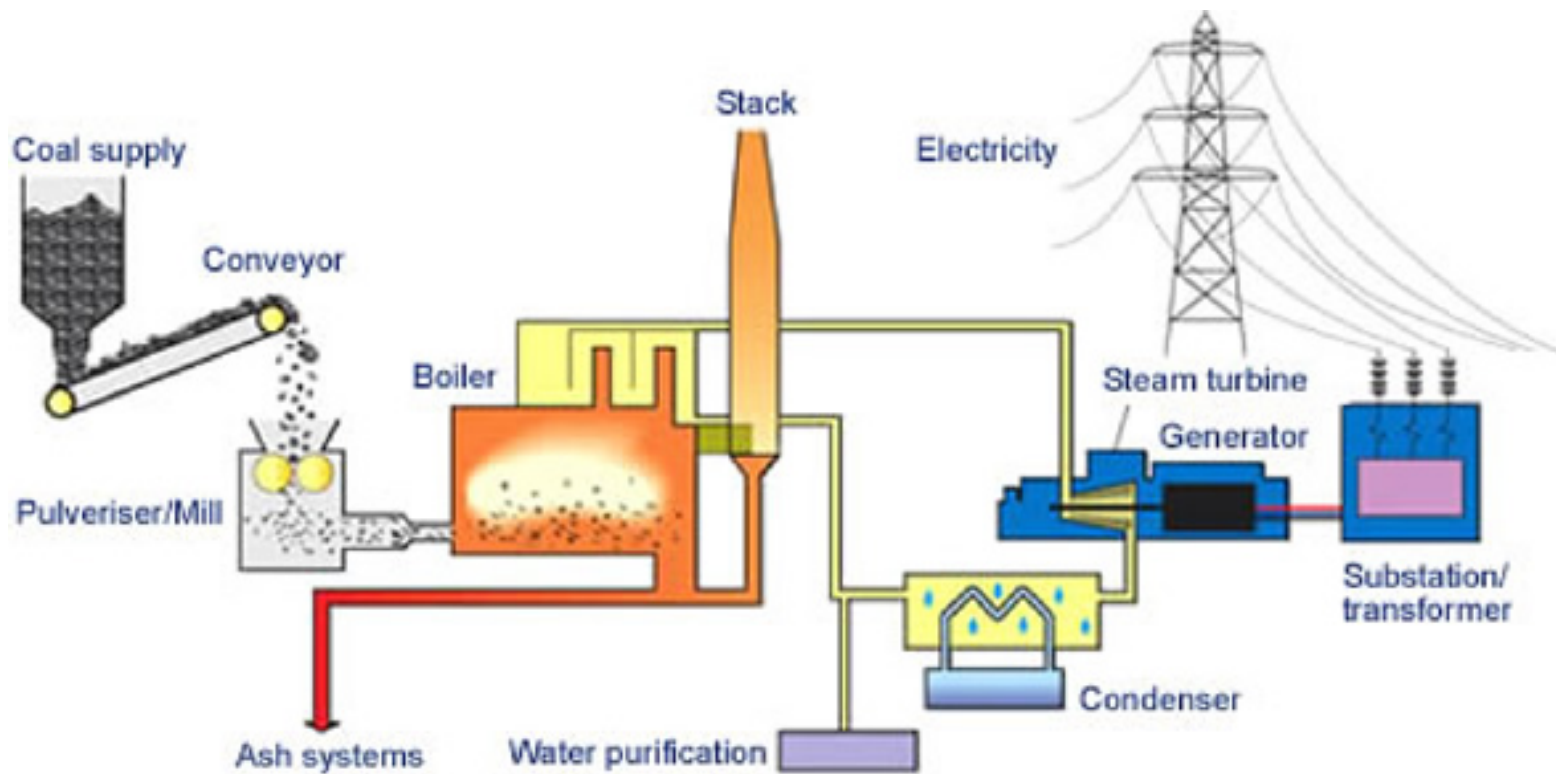
Pol rezerv črni premog, pol lignit

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 |
| <i>U.S.</i> | 24 | 58 | 40 | 28 | 25 | 13 |
| <i>China</i> | 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

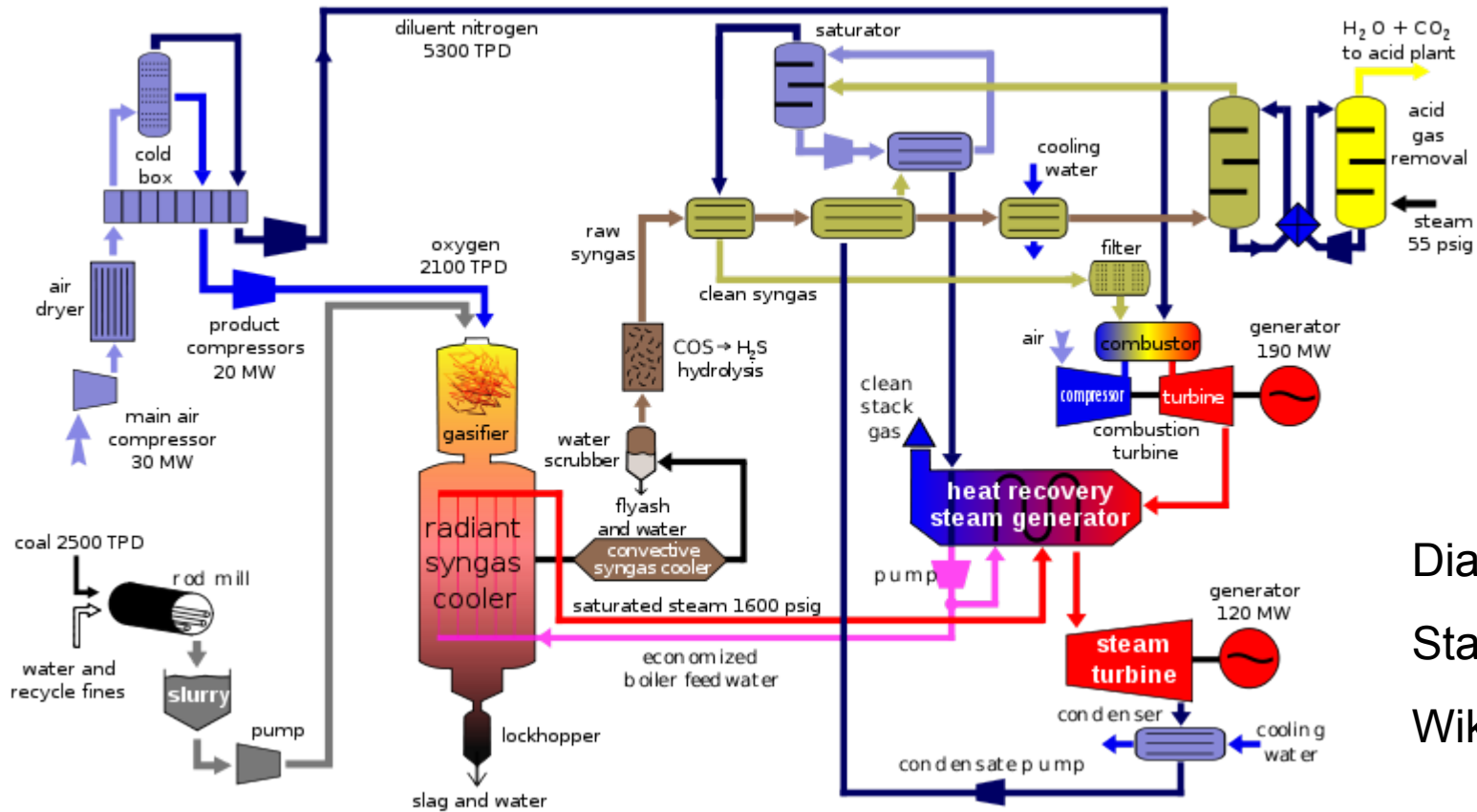


Diagram:
Stan Zurek,
Wikipedia

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

Izkoristek premogovnih elektrarn 40-55% ?

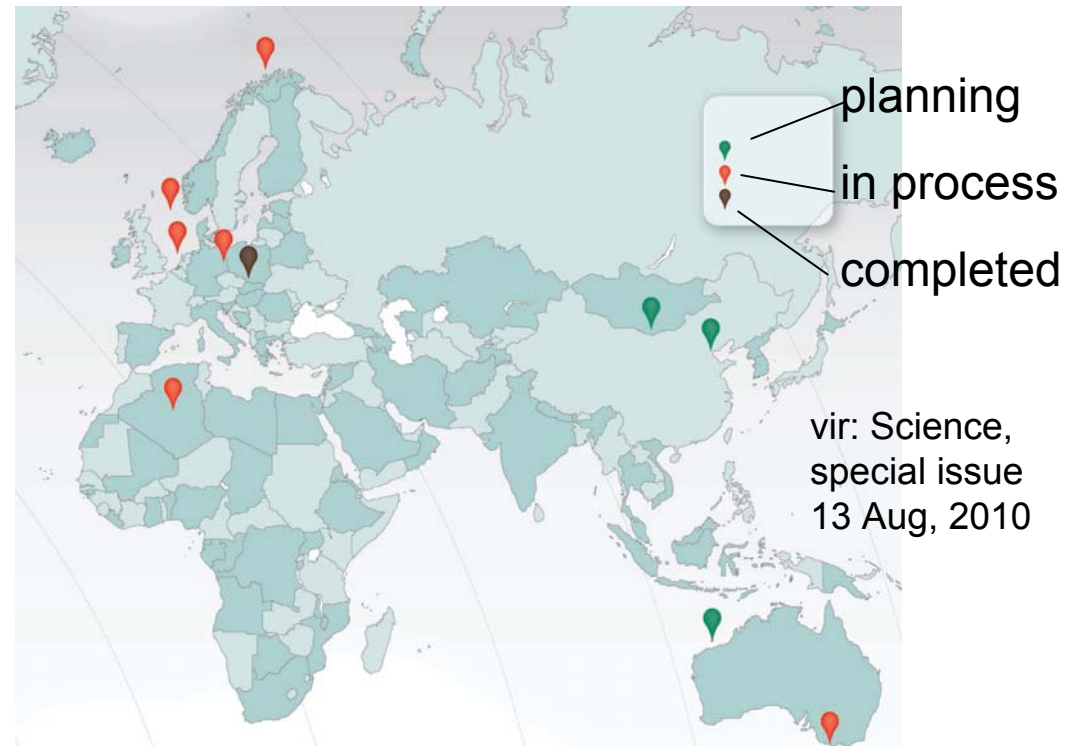
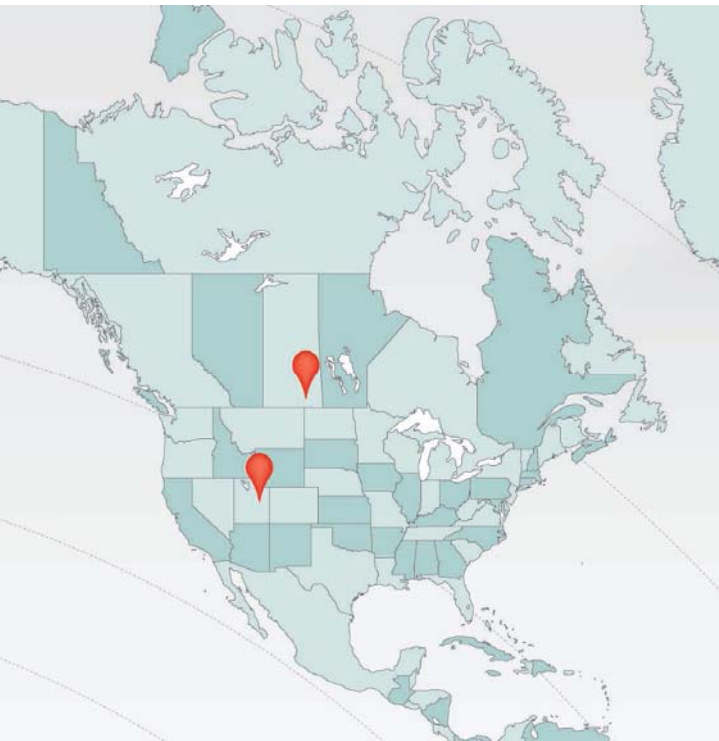
Christou et al. Third International Conference on Clean Coal Technologies for our Future, 15-17 May 2007, Sardinia, Italy

"Nove" tehnologije:

- CCS - Carbon Capturing and Storage

CCS bo porabil ~ četrtno proizvedene elektrike termoelektrarne

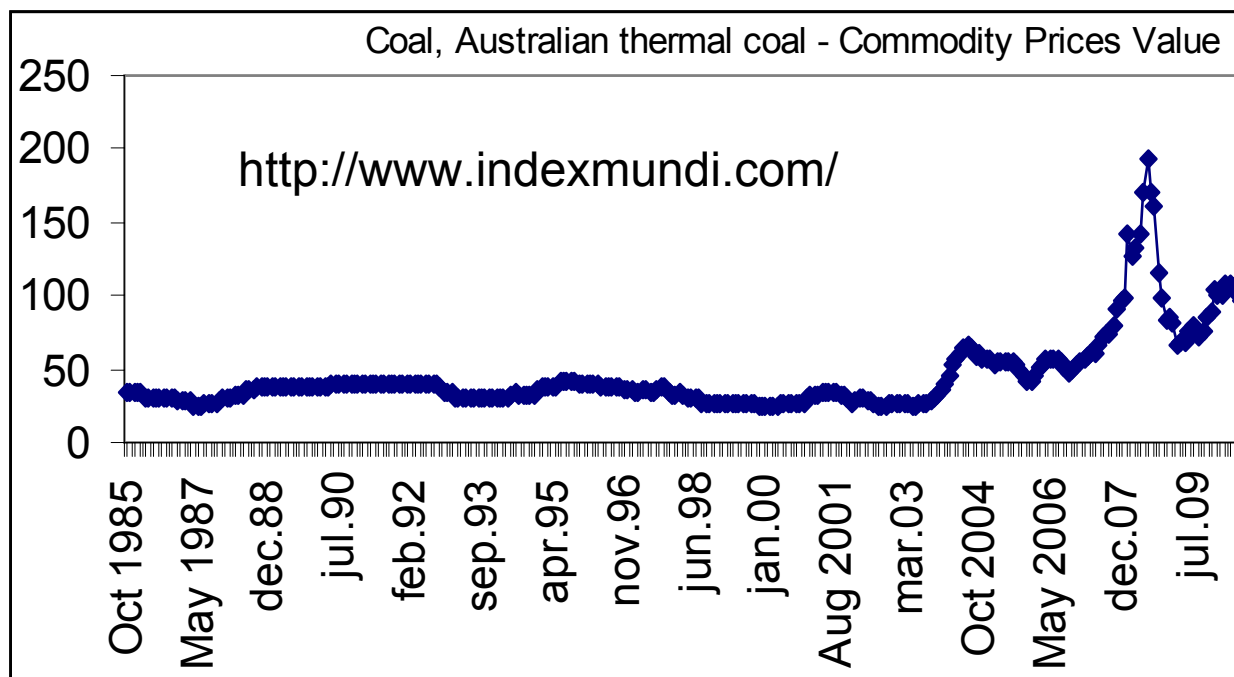
(MacKay)



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

- premog -> tekoča goriva
- uplinjanje premoga pod zemljo

- Okoli četrtnina 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



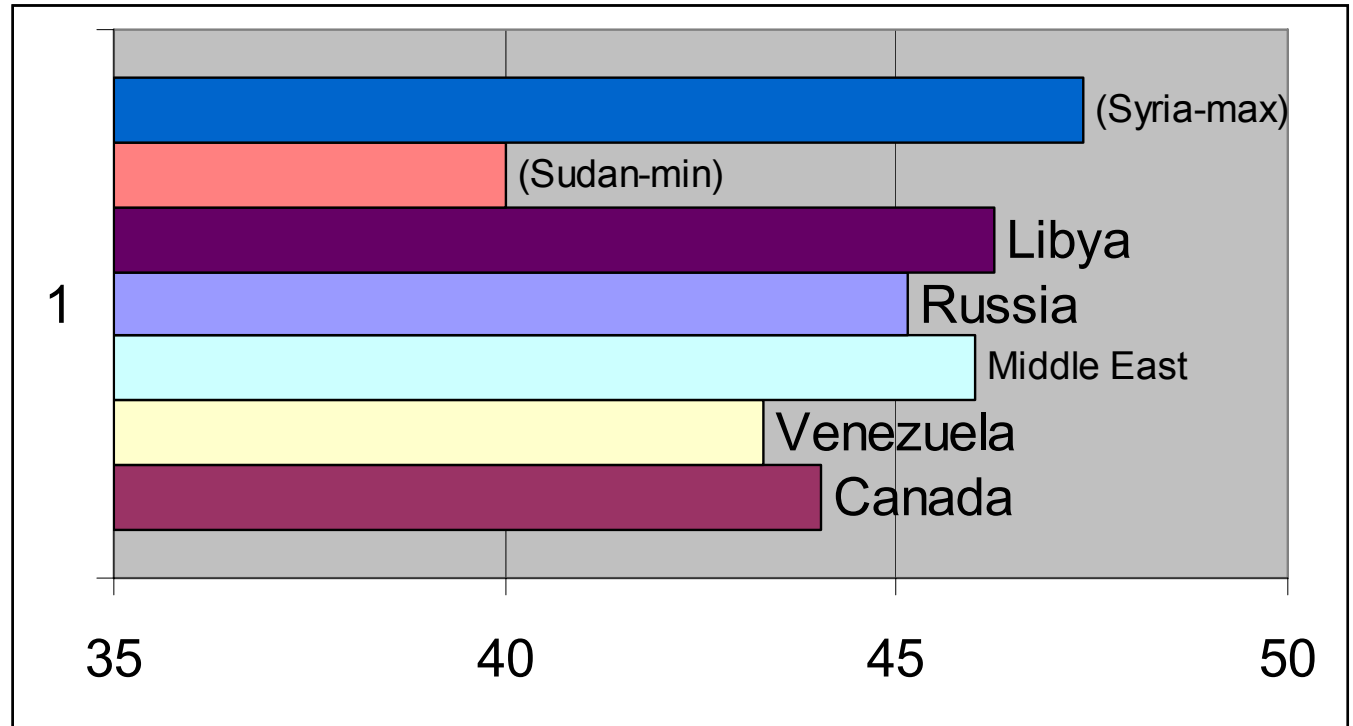
Cena Avstralskega premoga v \$/tono.

(Avstralija - največji izvoznik - proda 0.25 Gton premoga)

sežigna toplota: 29 MJ/kg

~0.01 EUR (\$) za kWh

Nafta



sežigna toplota
(MJ/kg)

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

1 kg nafte =

1/1000 toe =

41.9 MJ/kg =

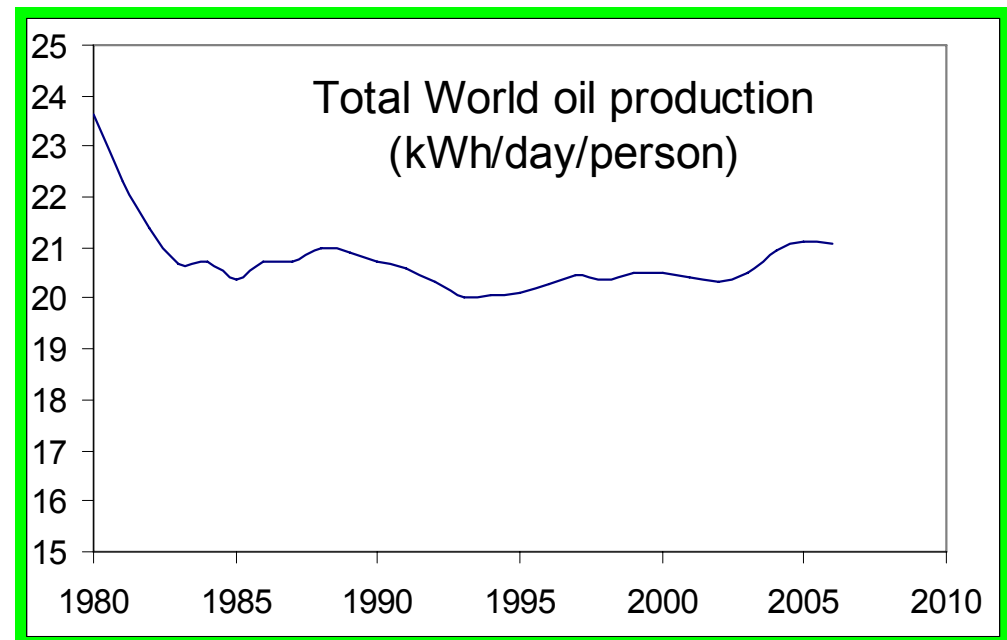
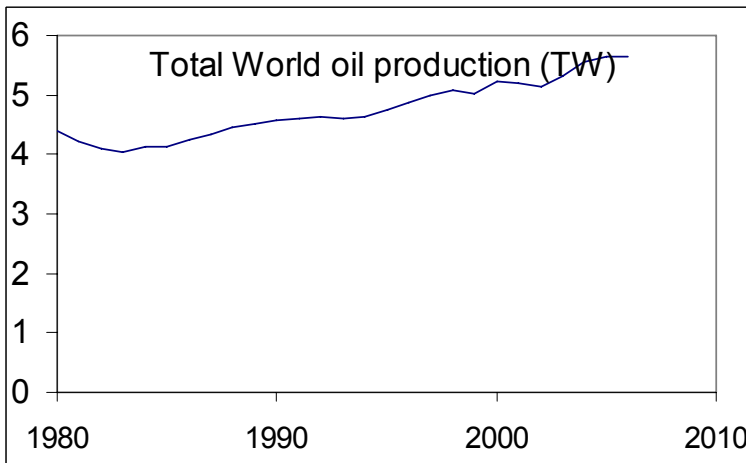
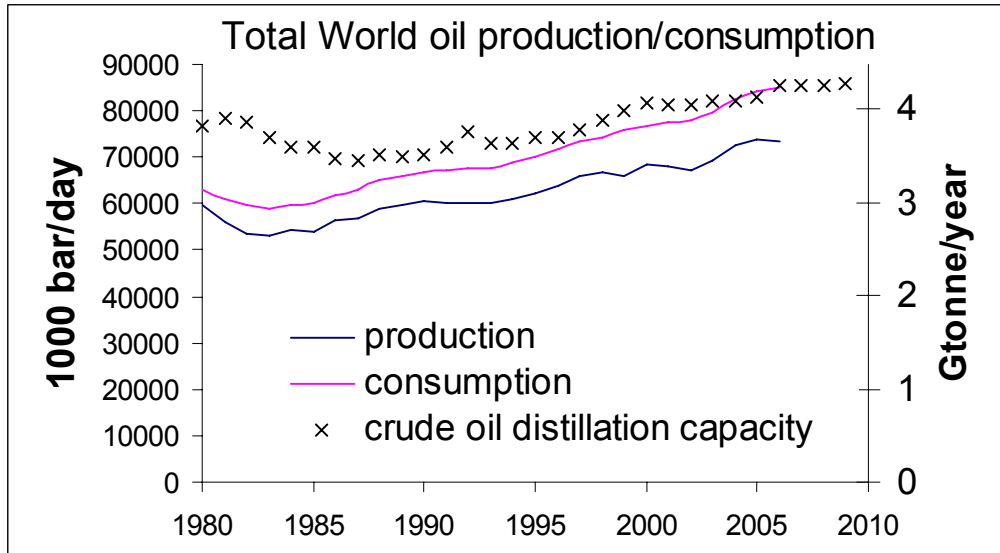
11630 kWh

gostota 0.75 do 1 kg/l

PORABA NAFTE

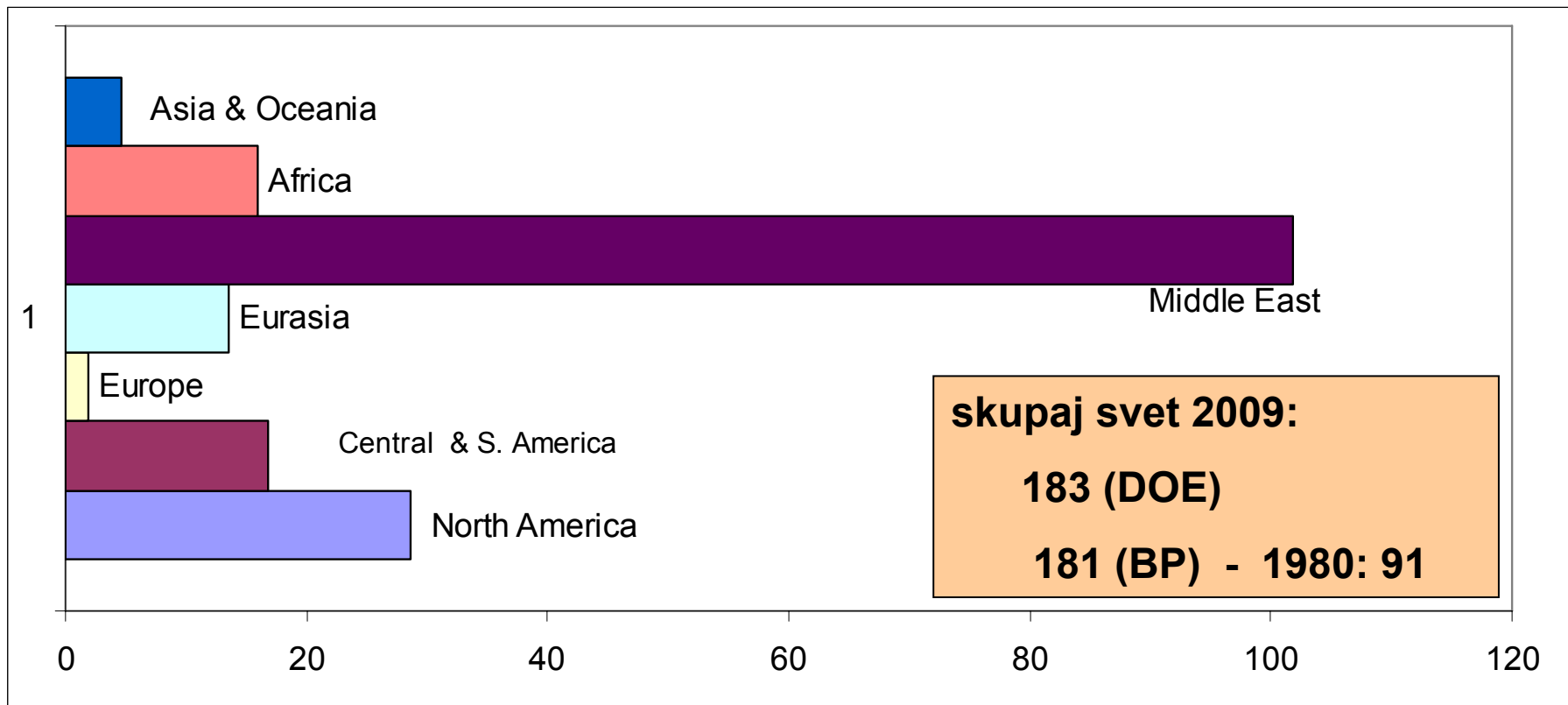
proizvodnja se meri v sodčkih

1 sodček surove nafte =
159 litrov ...
136.4 kg ...
5.75 GJ ... 1600 kWh
400 kg CO₂



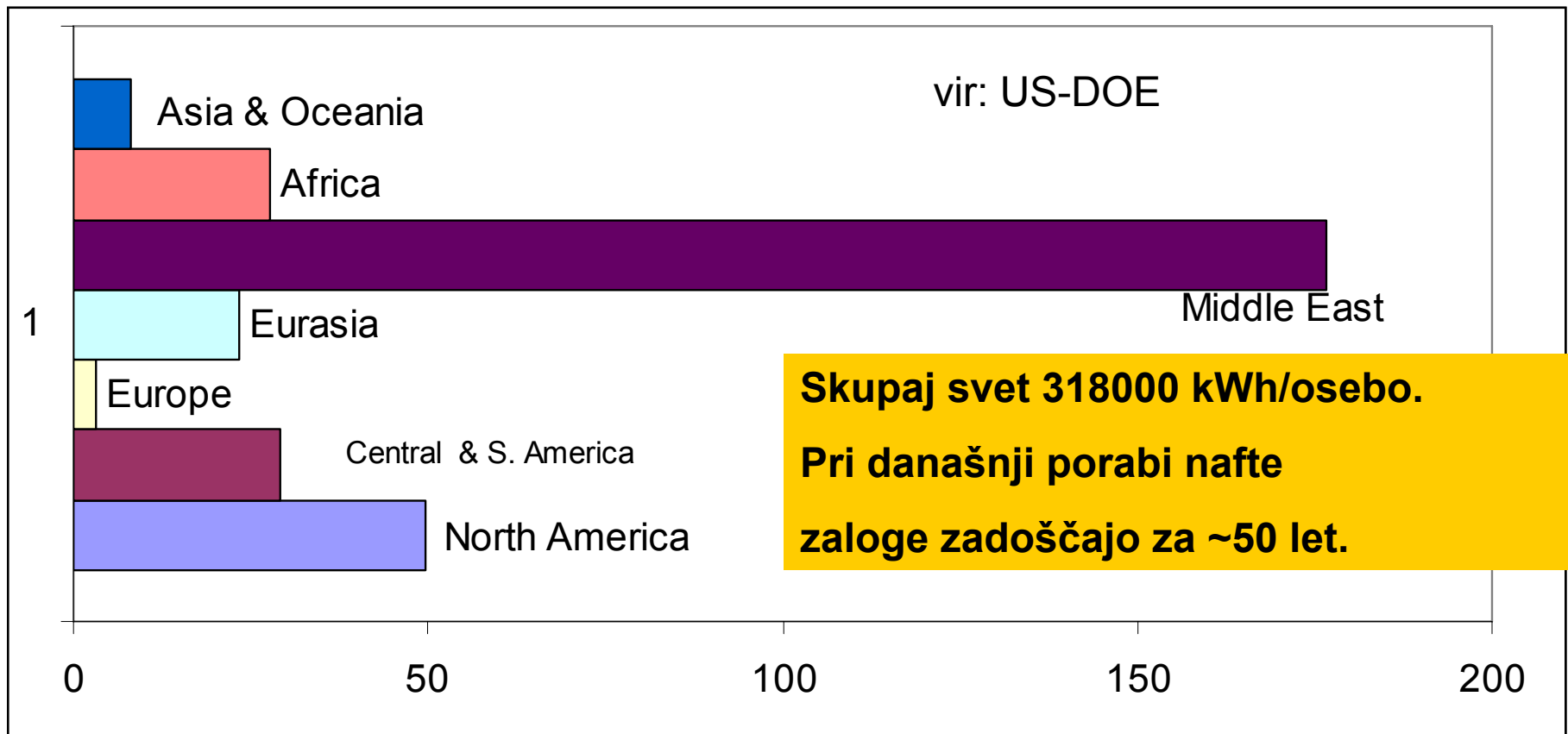
Zaloge nafte, februar 2009 (Gton nafte)

<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

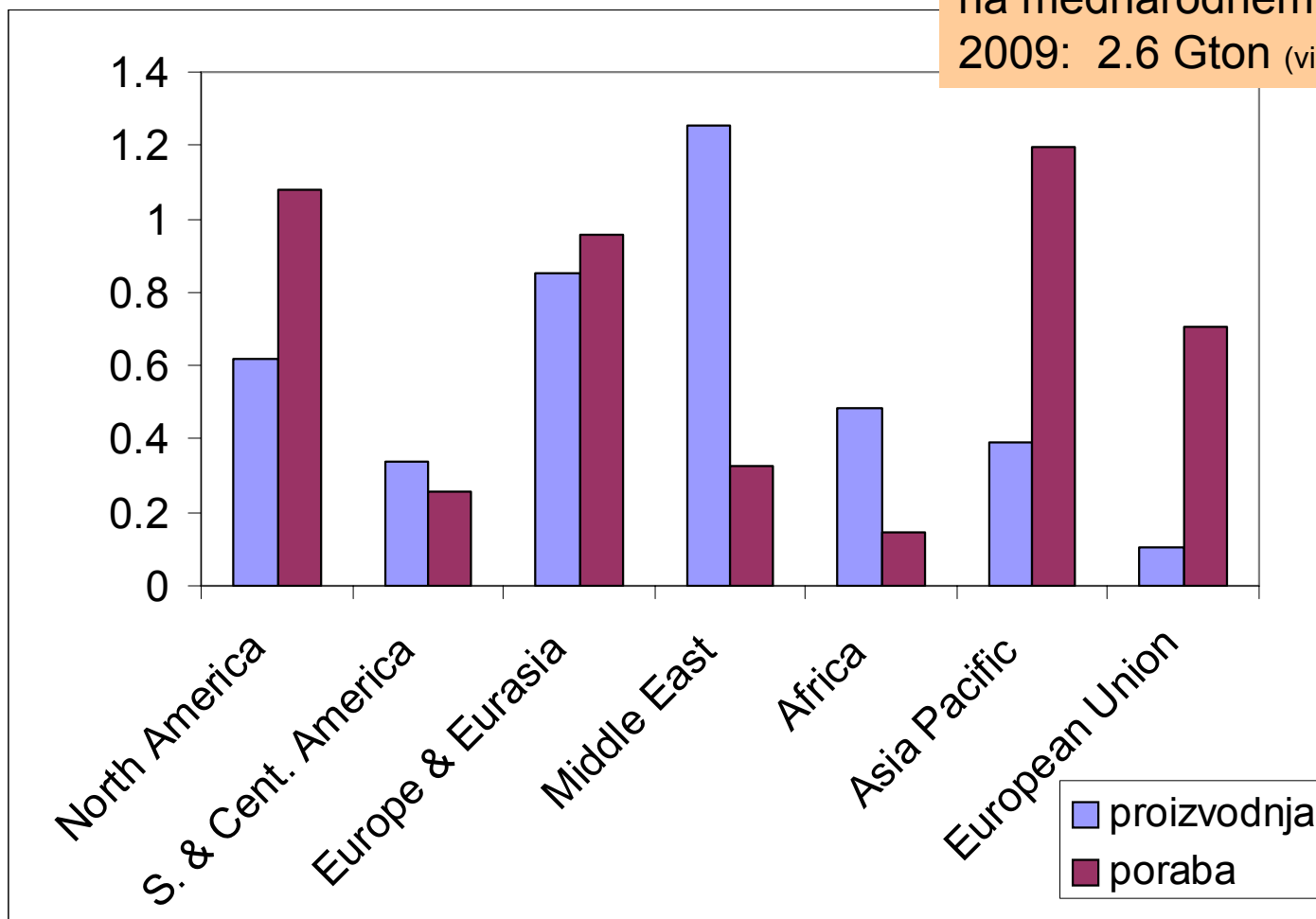
Saudska arabija 63, Iran 32, Irak 27, Kuvajt 25, UAE 23

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

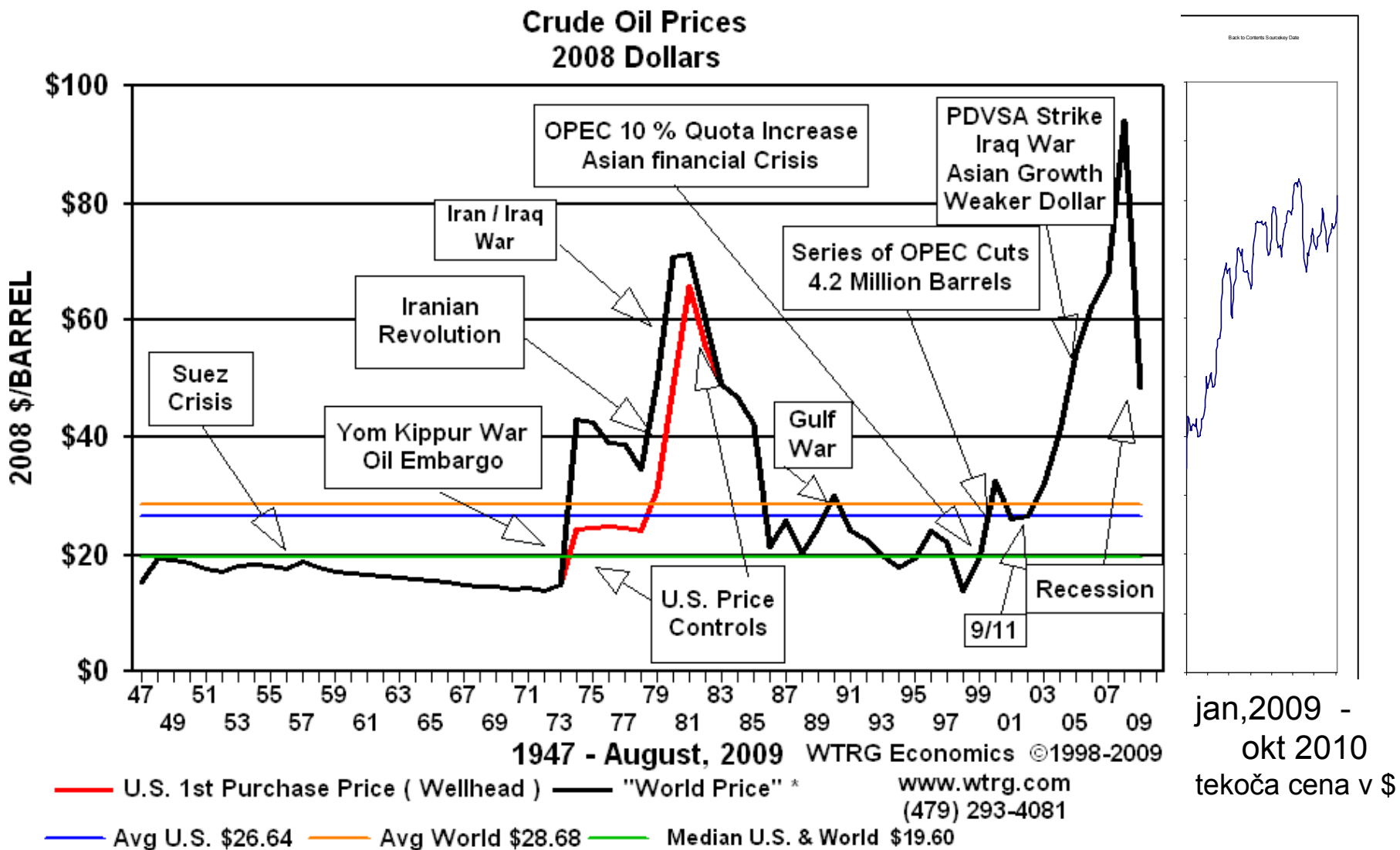
Samo v Kanadi (Alberta) so ocenjene zaloge v obliki naftnih skrilavcev približno enake svetovnim zalogam nafte (National Geographic, Marec 2009)

Proizvodnja in poraba po regijah v 2008 (Gton)

od skupno 4 Gton nafte jo je
na mednarodnem trgu v letu
2009: 2.6 Gton (vir: BP)



cena za sodček



2009: 60\$/sod = ~0.04 EUR (\$) za kWh

Products Made from a Barrel of Crude Oil (Gallons) (2009)

Other Distillates

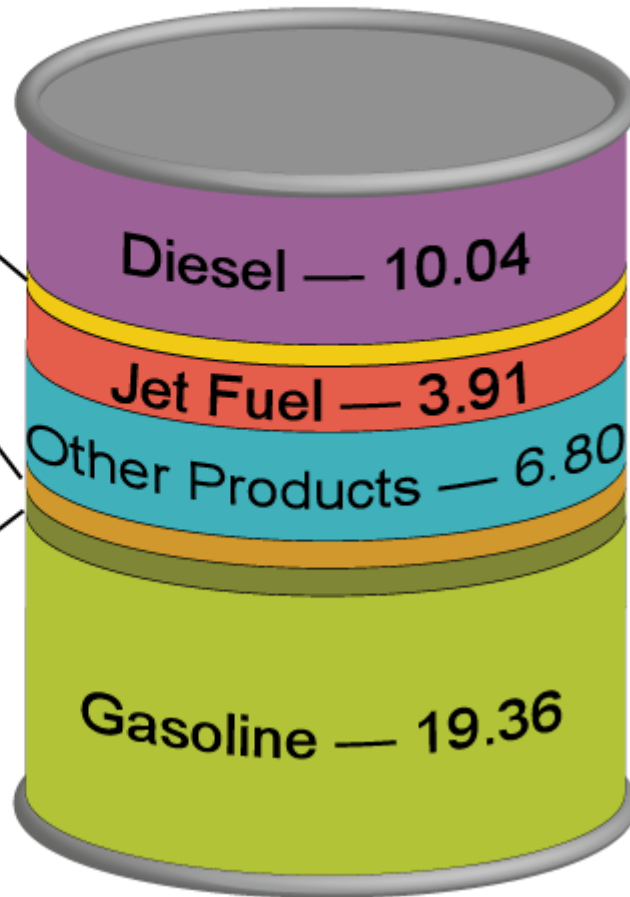
(heating oil) — 1.24

Heavy Fuel Oil

(Residual) — 1.68

Liquefied
Petroleum Gases

(LPG) — 1.72



Note:

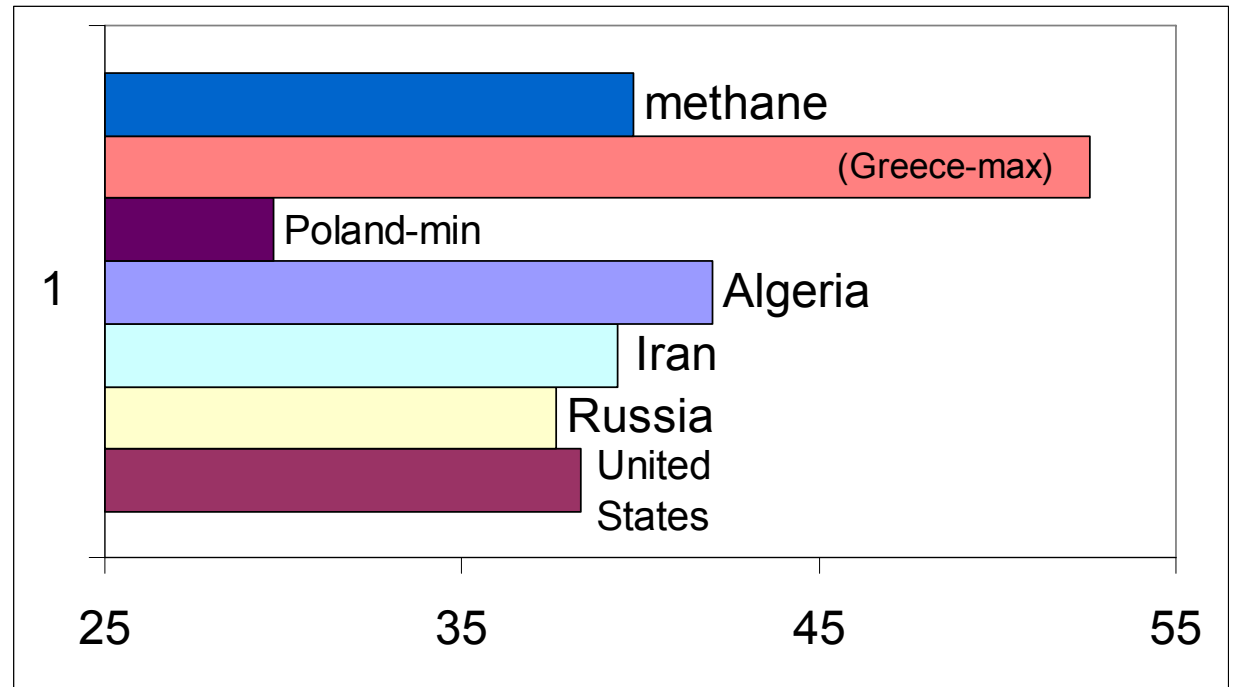
A 42-U.S. gallon barrel of crude oil yields between 44 and 45 gallons of petroleum products.

Zemeljski plin

sežigna toplota
(MJ/ m³)

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

1 Sm³ plina =
37.86 MJ/m³ =
10.52 kWh

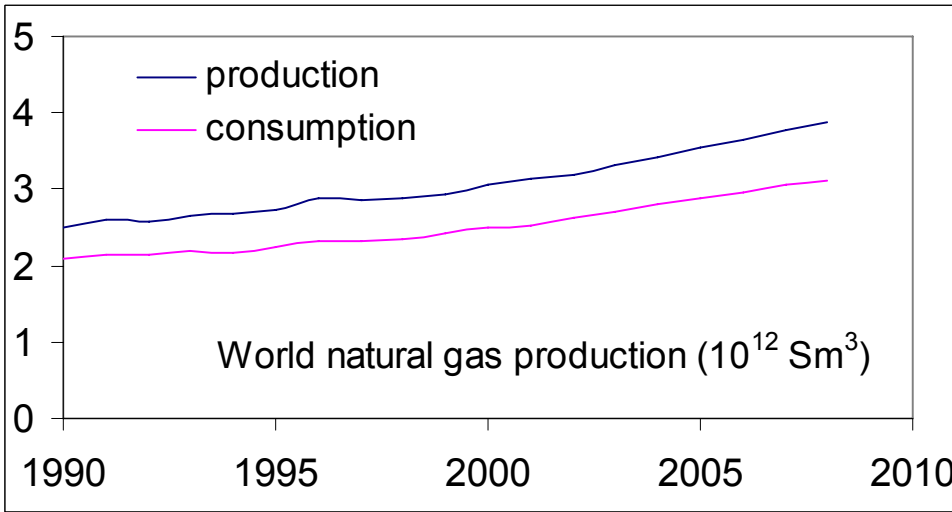


zemeljski plin - pretežno metan, do 20%
etana ali ostalih primesi.

PORABA ZEMELJSKEGA PLINA

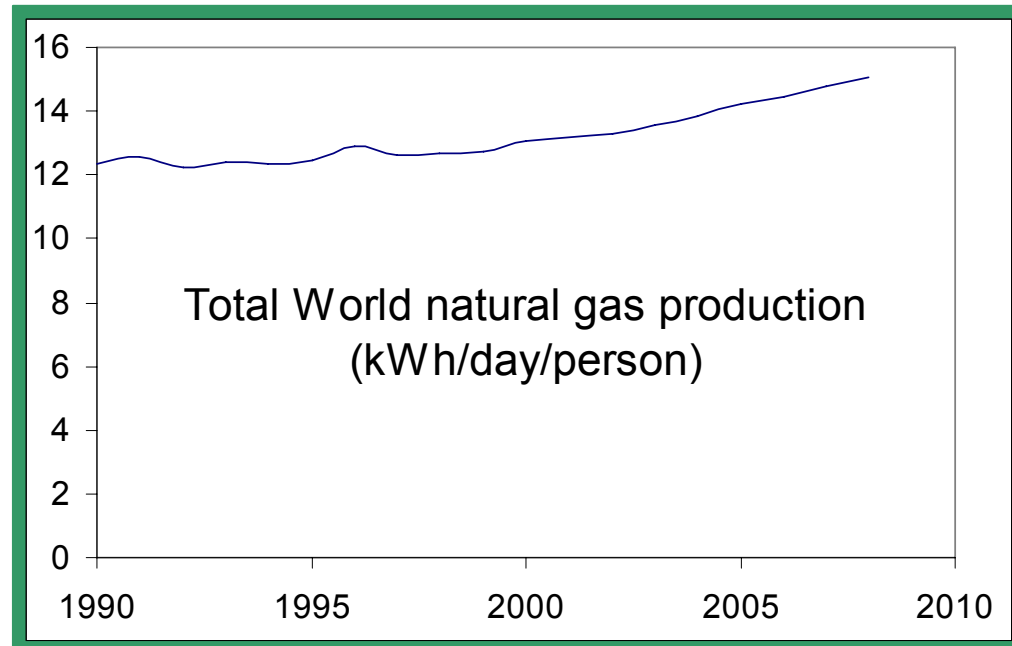
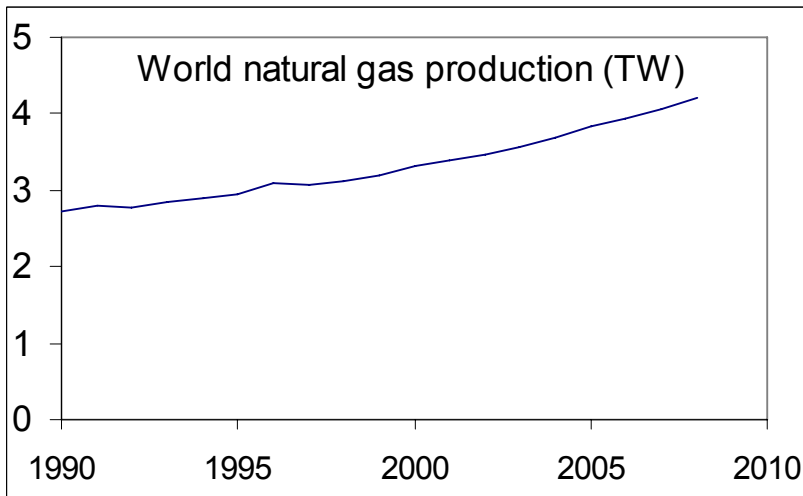
proizvodnja se meri v ft^3 oz. m^3

Standardni (S) m^3 - 1 m^3 plina
pri tlaku 1,01325 bar in
temperaturi 15 °C
= 37,862 MJ (GCV)
= 34.076 MJ (NCV)

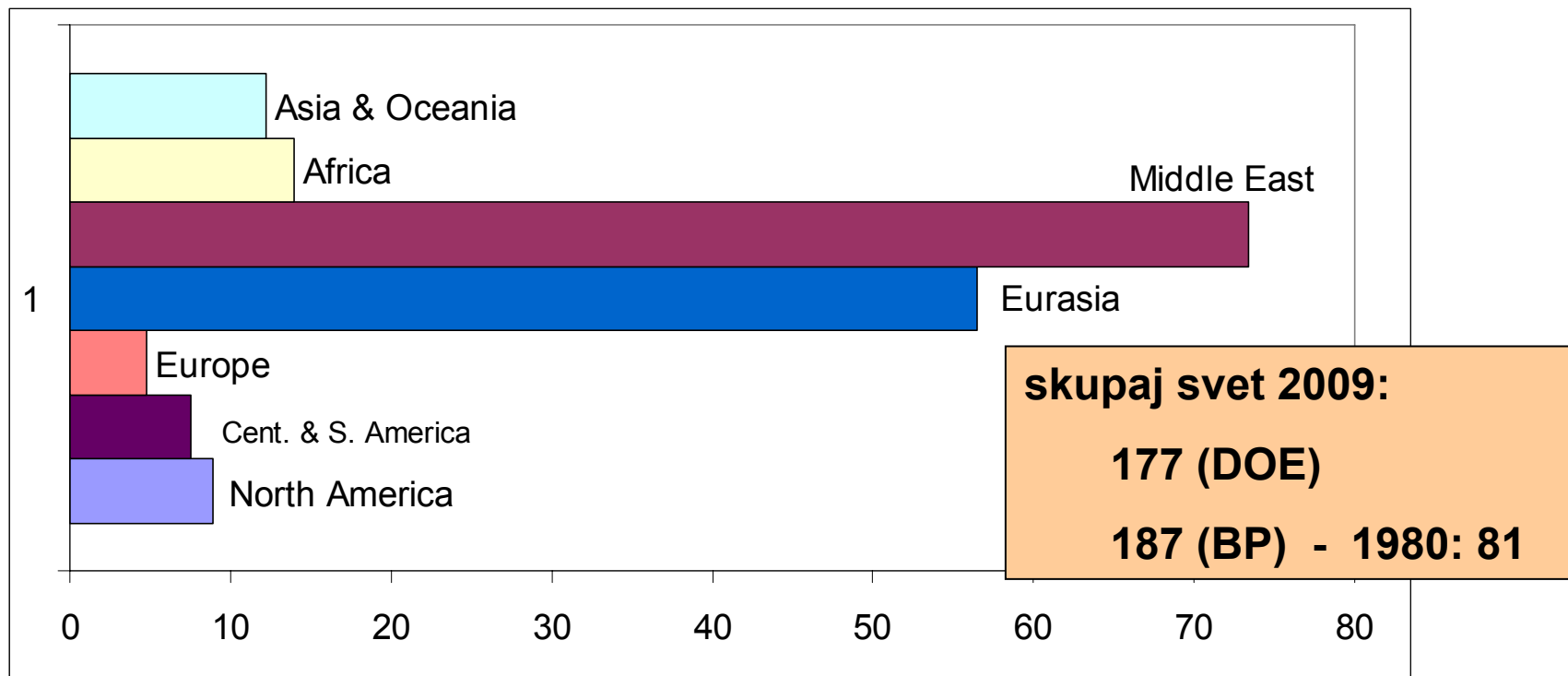


www.indexmundi.com (isto CIA world factbook):

Definition: The discrepancy between the amount of natural gas produced and/or imported and the amount consumed and/or exported is due to the omission of stock changes and other complicating factors. 😊



Zaloge zemeljskega plina, 2009 (10^{12} Sm³) (vir: eia.doe)

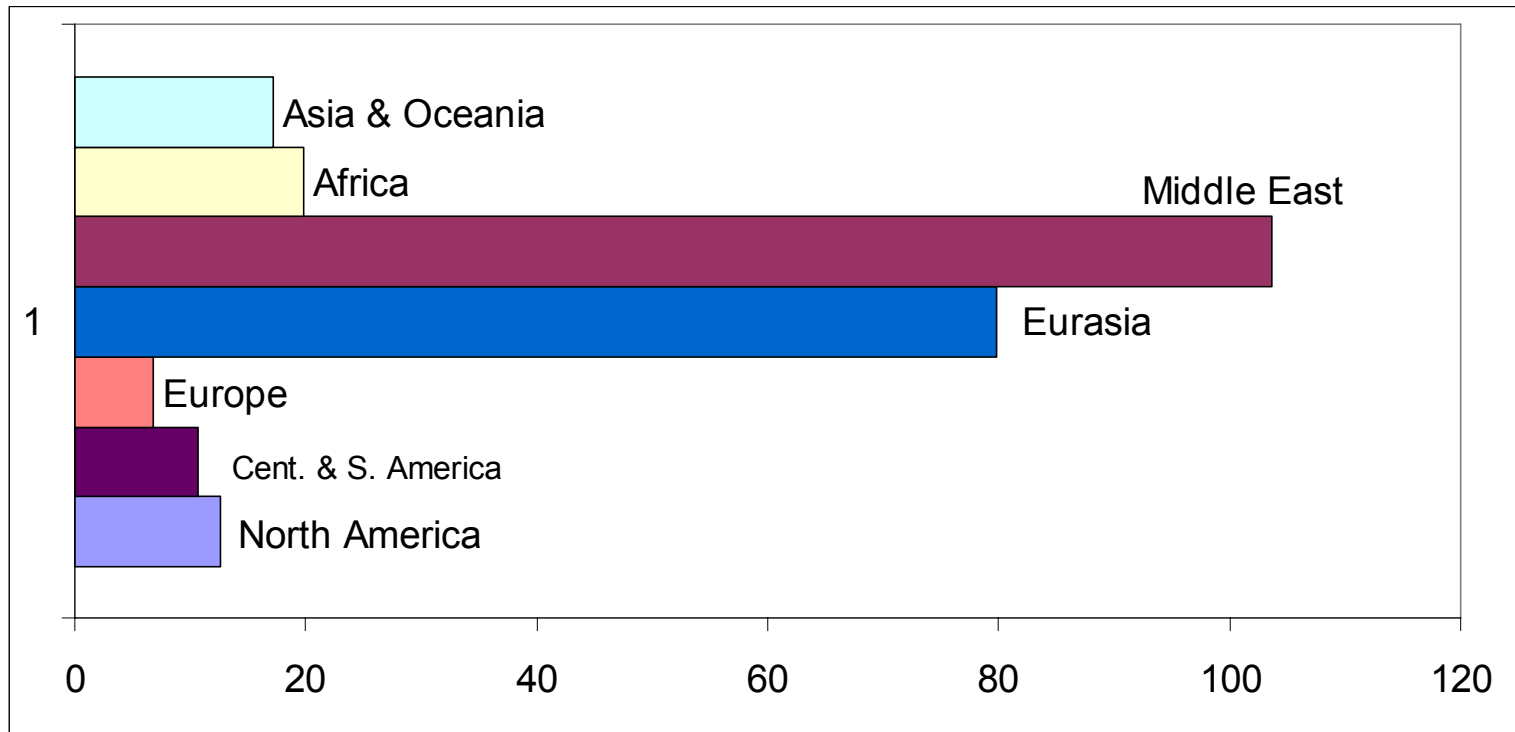


2009: poraba ~3.5

zvečanje razpoložljivih zalog ~2.2

Nekonvencionalne zaloge plina (v naftnih skrilavcih in premogu): ~200 T Sm³
ZDA v 2009 iz njih že pridobijo del svojega plina (vir: EUROPEAN ENERGY REVIEW, Unconventional gas, 21 June 2010)

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



Glavnina zalog:

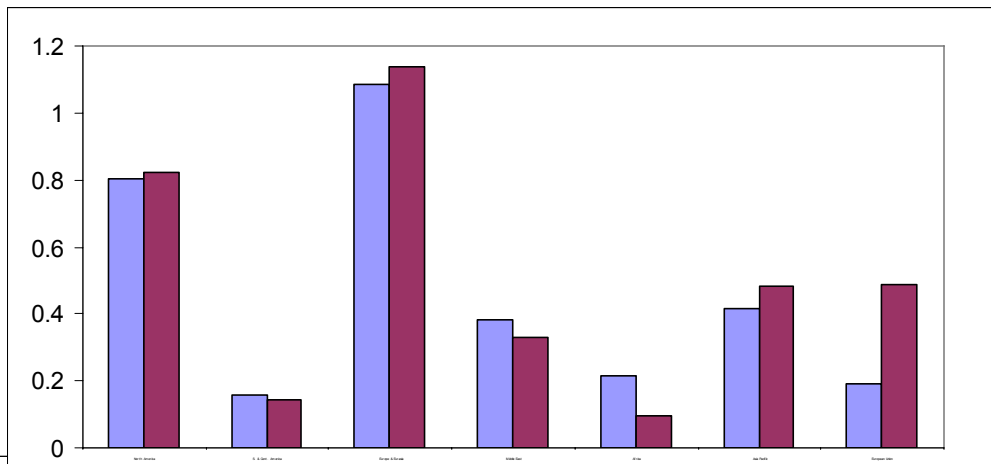
ZDA 10, Alžirija 6, Rusija 67,
Saudska Arabija 10, Iran 40,
Katar 34, UAE 9

Skupaj svet 250000 kWh/osebo.

Pri današnji porabi plina

zaloge zadoščajo za ~50 let.

Proizvodnja in poraba nafte in plina po regijah v 2008

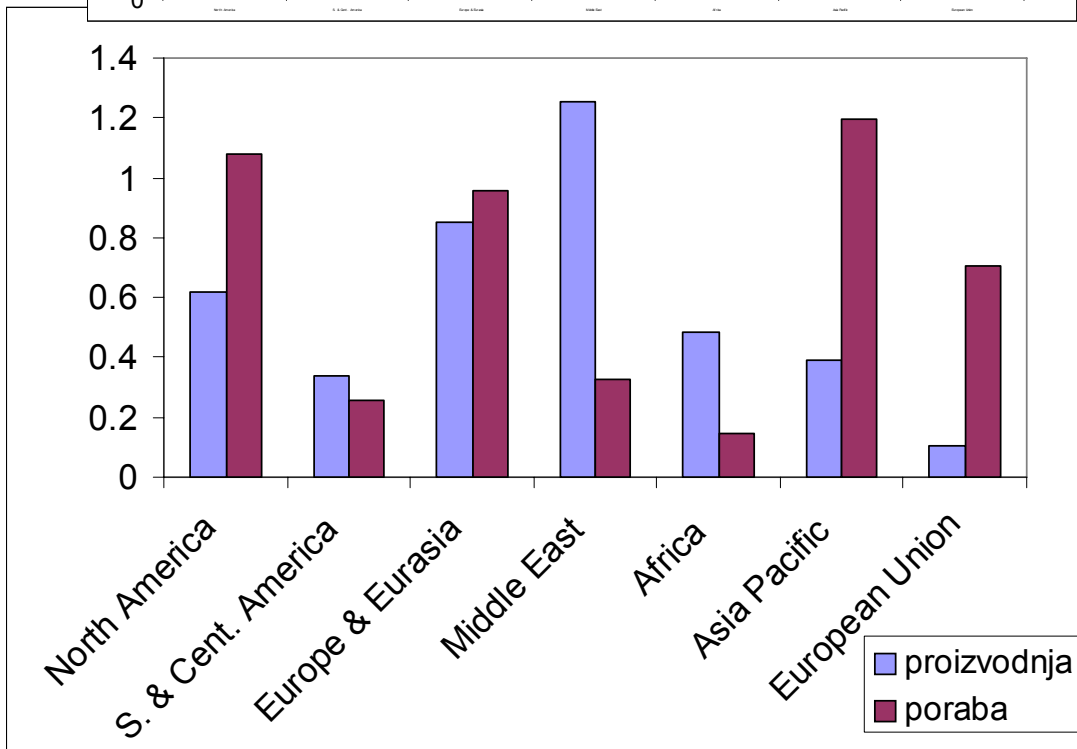


plin

10^{12} m^3

Približno tretjina svetovne proizvodnje plina je na mednarodnem trgu.

(nafte ~ 2/3)

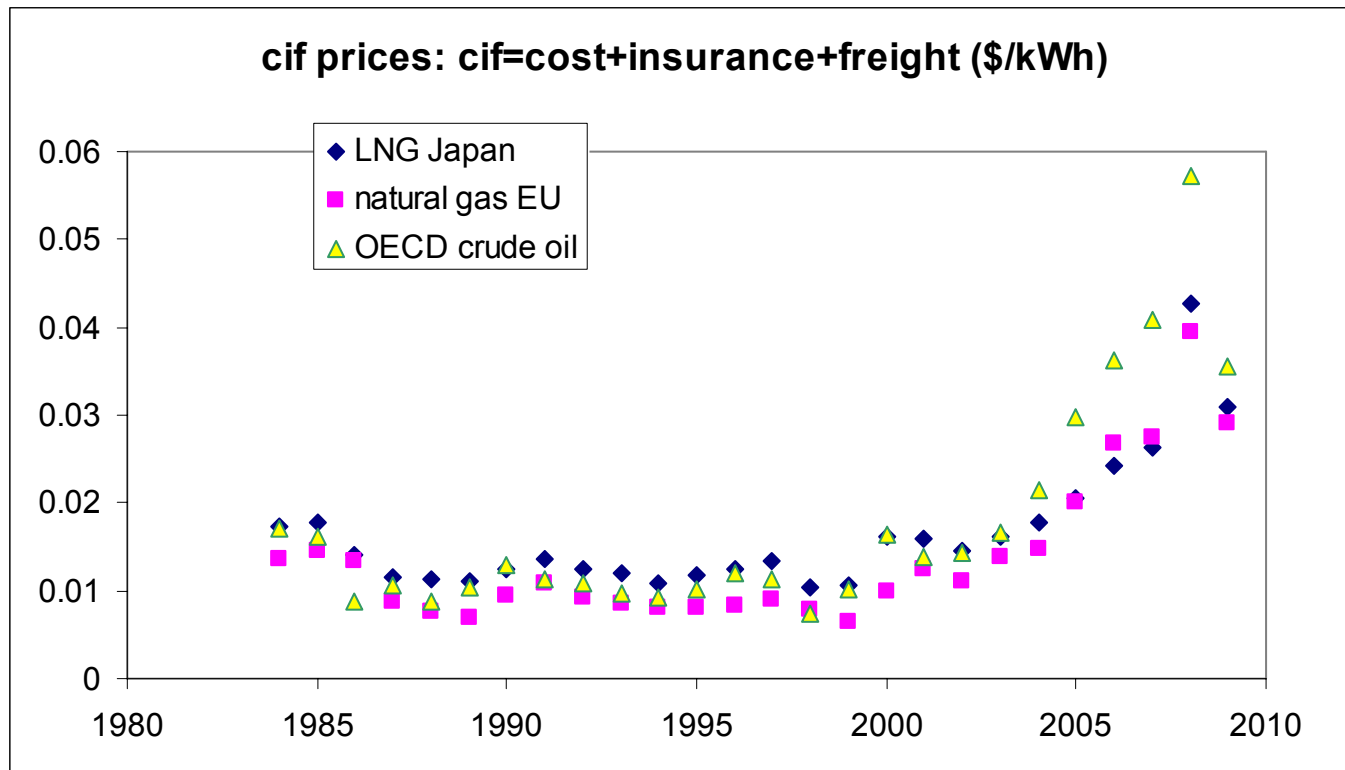


nafta

Gton

■ proizvodnja
■ poraba

cena plina



plin 2009: ~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 $-160 \text{ }^\circ\text{C}$

in tlaku $\sim 1 \text{ bar}$.

(Tlak nasičenja pri $-160 \text{ }^\circ\text{C}$ je 1.14 bar)



EU skladišča: $0.08 \cdot 10^{12} \text{ Sm}^3$
($\sim 15\%$ letne porabe)

(www.eurogas.org)

Metan - toplogredni plin



Metan - za CO₂ najpomembnejši toplogredni plin.

Bistveno bolj učinkovito opravlja funkcijo tople grede kot CO₂.

Prispeva ~ 25 ppvm CO₂ ekvivalenta k učinku tople grede

(povečanje koncentracije CO₂ z 280 na 380 ppm).

Po ~10 letih v ozračju razpade v CO₂.

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

Viri metana v ozračju (<http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/international.html>, podatki za leto 2000):

- polovica - naravni viri

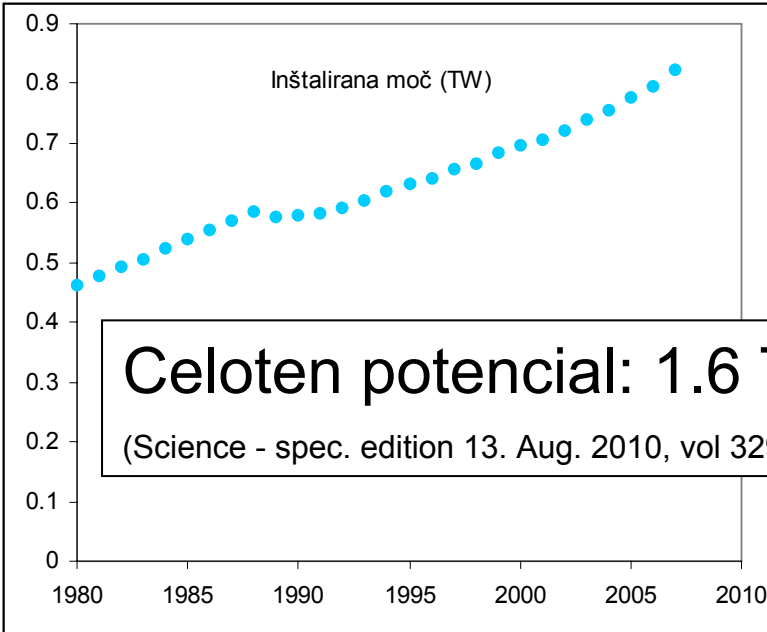
- polovica - človeški izvor:

- 3.1 Gt CO₂e - kmetijstvo, prebava domačih živali 1.8, riž 0.6, gnojenje 0.2

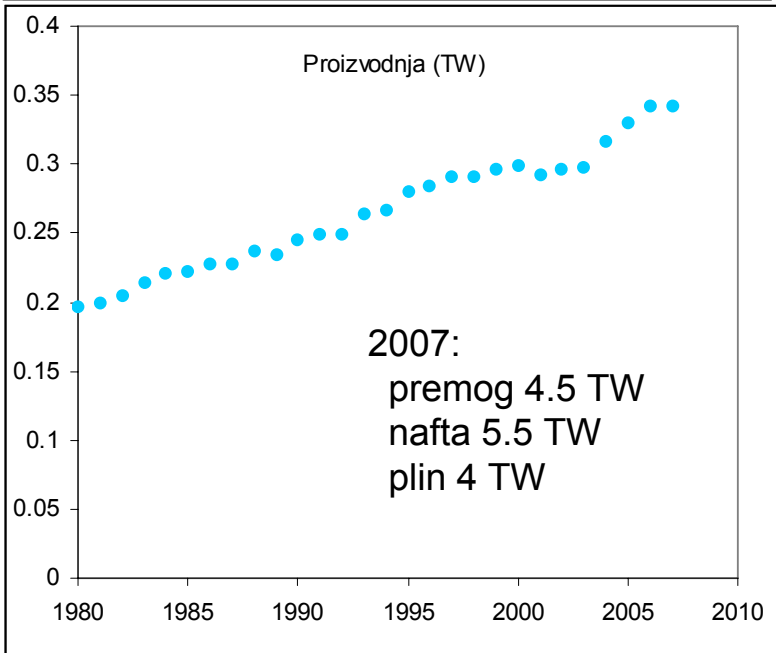
- 1.3 Gt CO₂e - smetišča 0.7, čistilne naprave kanalizacije 0.5

- 1.8 Gt CO₂e - energetika, zemeljski plin in nafta (1 Gt), premog (0.4 Gt)

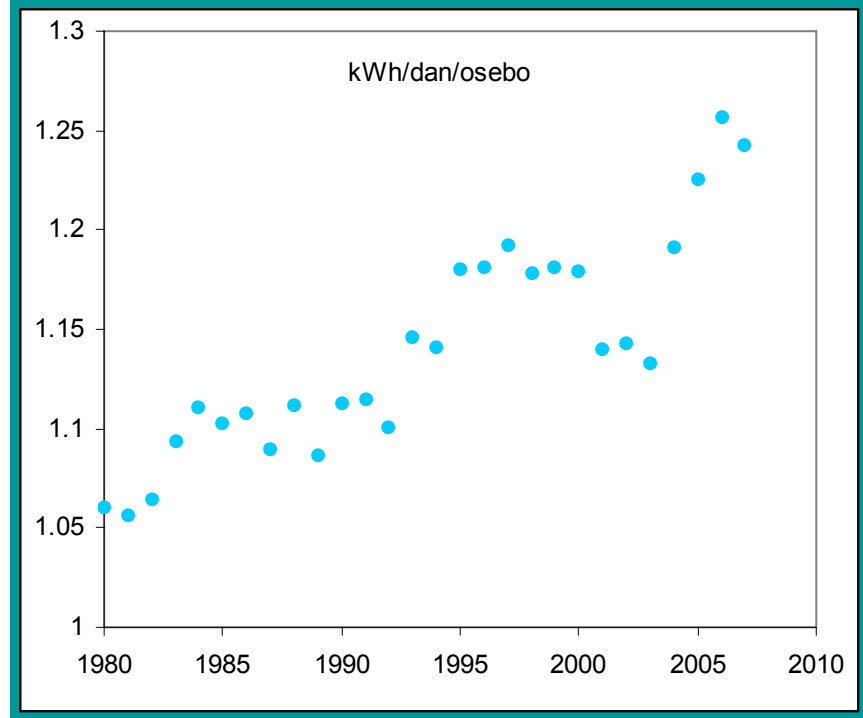
voda - reke



Celoten potencial: 1.6 TW
(Science - spec. edition 13. Aug. 2010, vol 329)



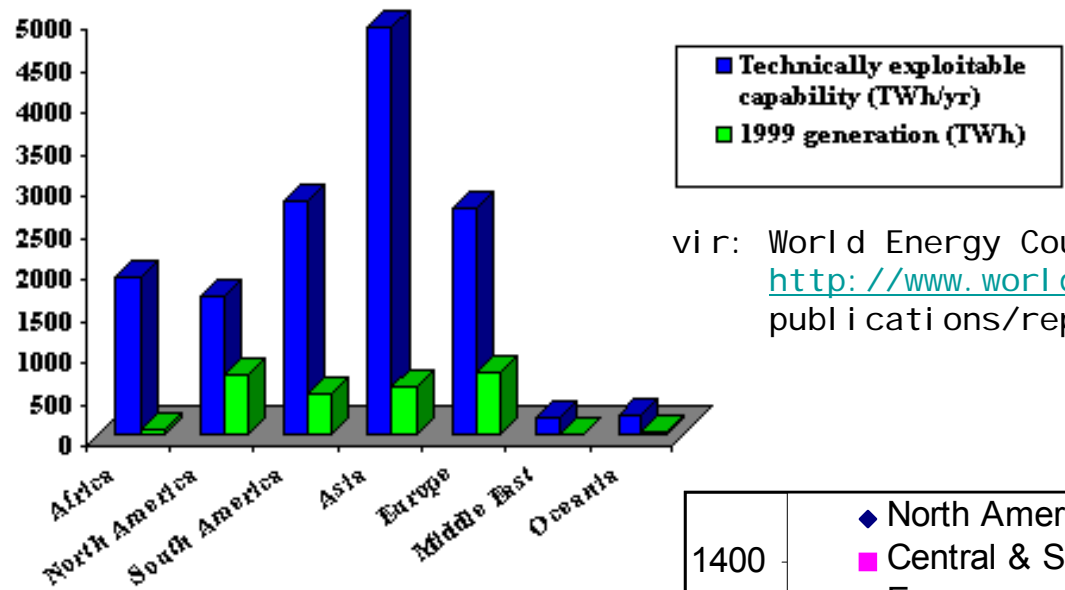
2007:
premog 4.5 TW
nafta 5.5 TW
plin 4 TW



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

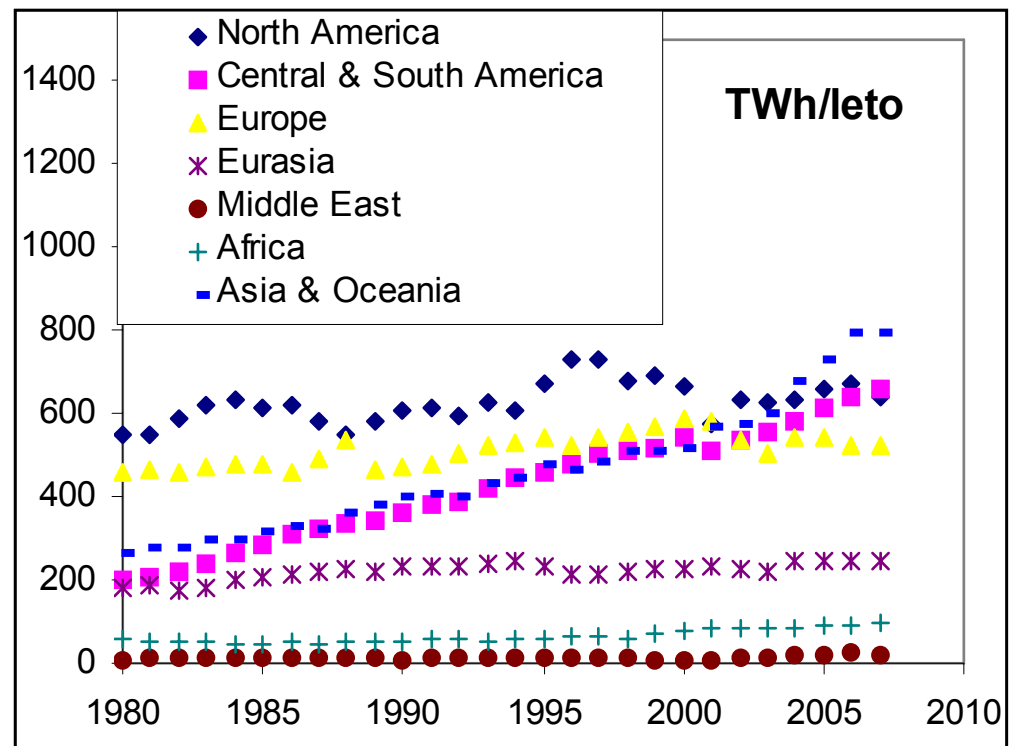
Figure 7.2: Hydropower - technically exploitable capability and 1999 generation (all schemes) - regional distribution

Proizvodnja po regijah













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

(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 (km²) |
|---|--------------------------------------|---|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 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 | Krasnoyarskaya | 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



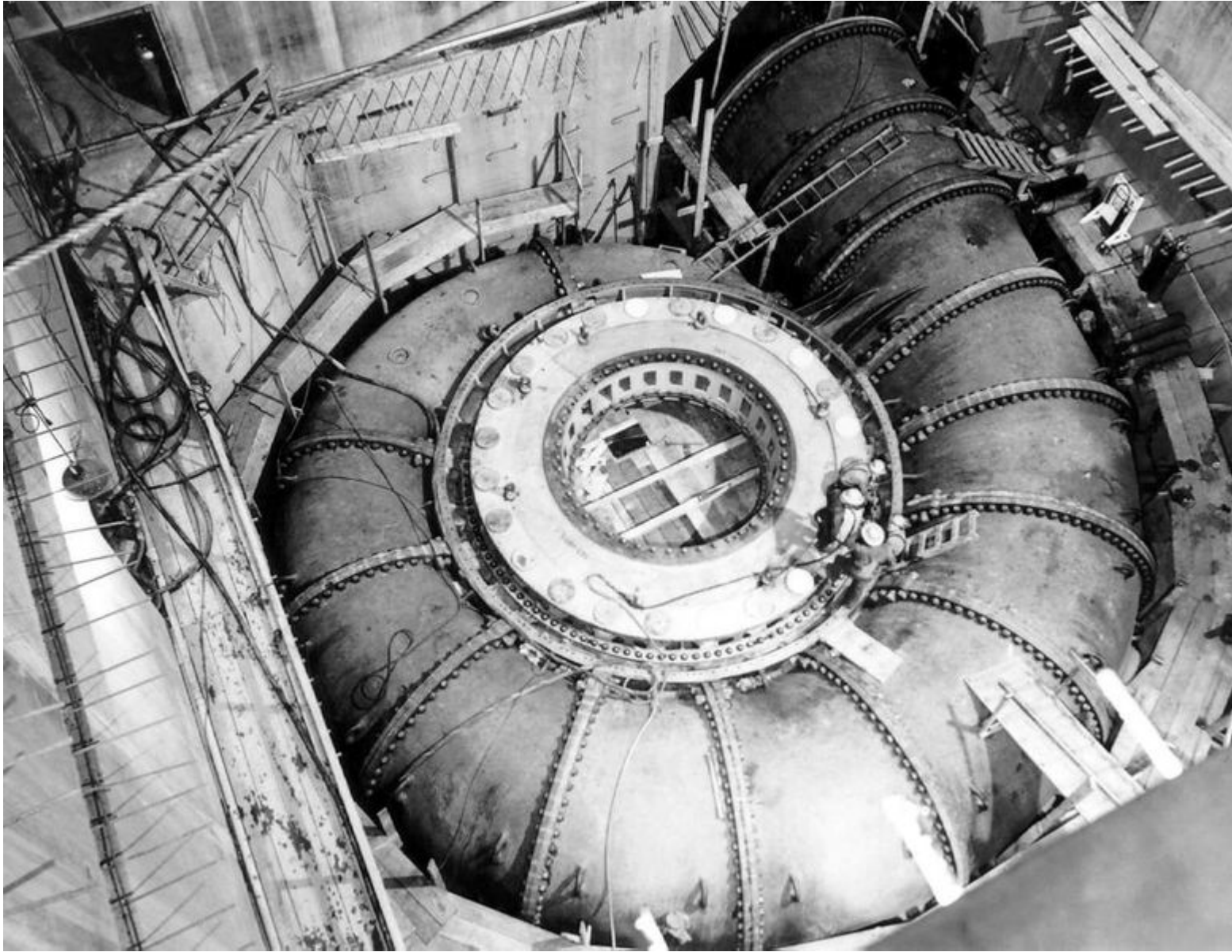
Sayano-Shushenskaya – 2009 August 17

1- Main Characteristics

- Number of Units: 10
- Turbine Type: Francis (16 blades)
- Rated Power: 650 MW each
- Rated Discharge per Unit: 358,5 m³/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

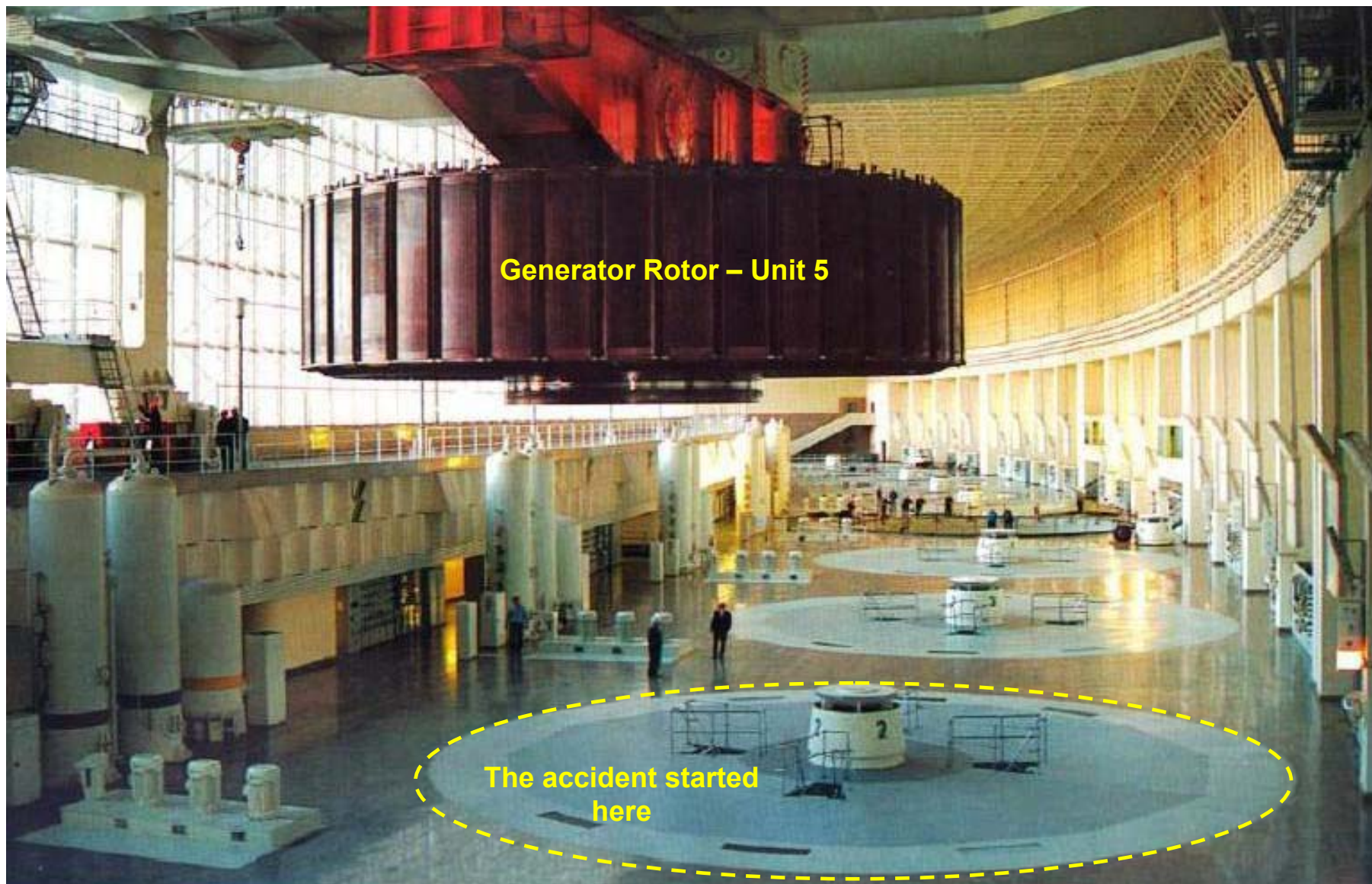
One of the world's largest hydroelectric plants, its dam is 245 m (800 ft) high and stretches 1 km (0.6 miles) across the Yenisei river.

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



Generator Rotor – Unit 5

The accident started here

Generator Runner

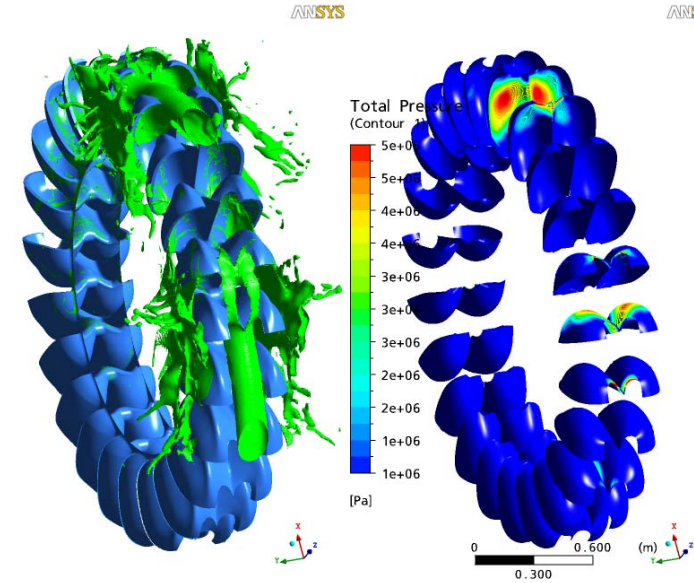
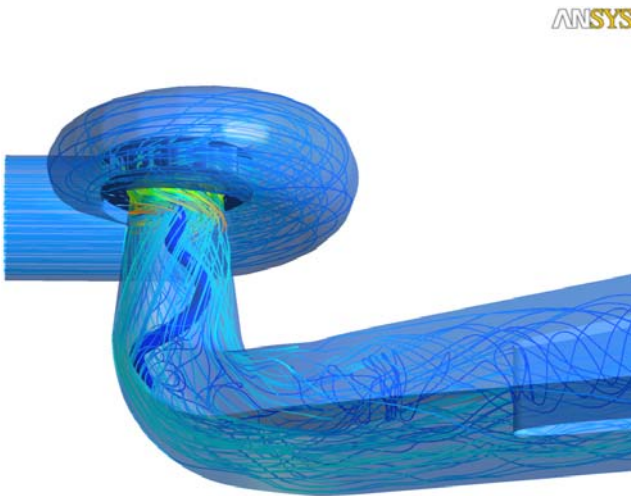


Nesreča, 75 mrtvih, najverjetneje posledica utrujanja materiala zaradi vibracij.
(elektrarna je začela z obratovanjem 1978)

SLO:

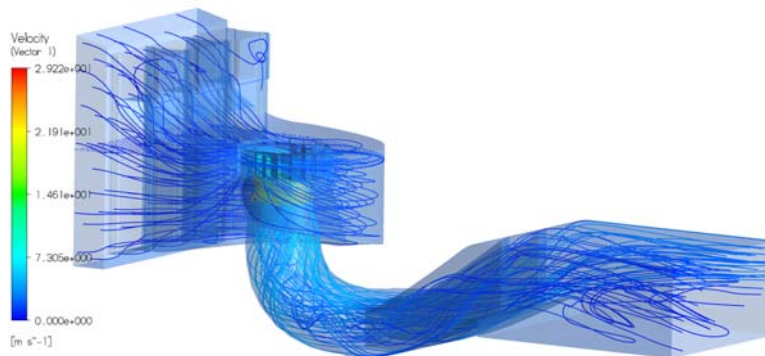
- Litostroj - turbine
- Računalniške simulacije na Turboinštitutu

Francisova
turbina



Peltonova
turbina

Kaplanova
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;
hidroelektrarna ob pomanjkanju;
črpalna/turbina

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

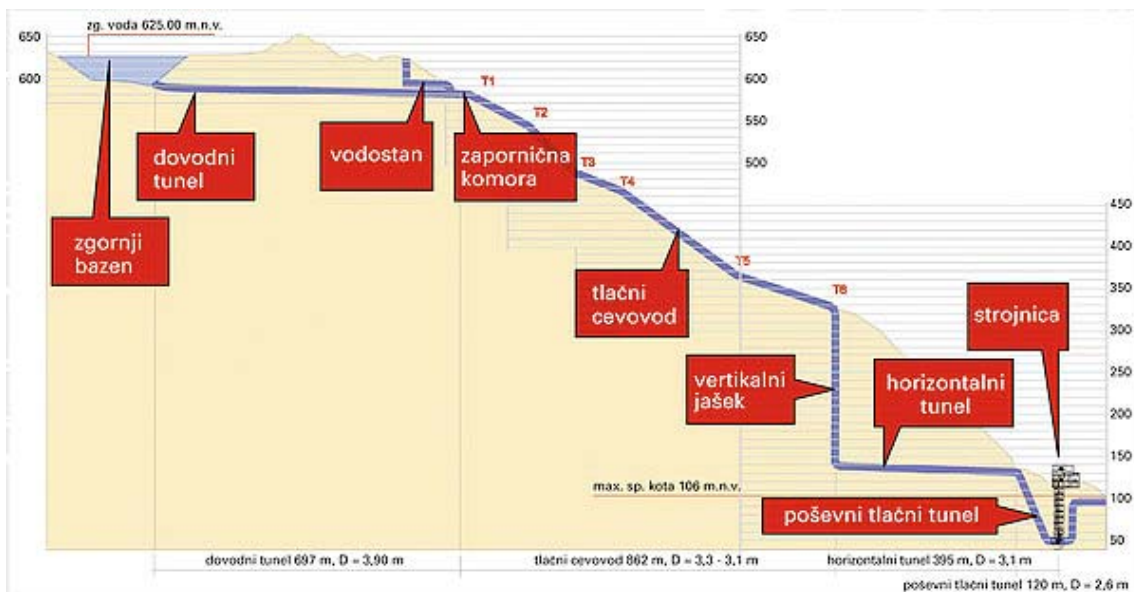
izkoristek:

- izgube zaradi izparevanja
- mehanske izgube

$$\eta = W_{\text{elek}}' / W_{\text{elek}} \\ \sim 0.7 - 0.85$$

(ekonomski izk. boljši)

pomembne pri izračunu stroškov proizvodnje zmožnosti, ki ne zagotavljajo energije konstantno



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: akumul. jezero elektrarne Plave 416.000 m^3

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

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

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: $P_{\check{c}} = 180 \text{ MW}$

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

Letna poraba energije za črpanje: $E_{\check{c}} = 553 \text{ GWh}$

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

$$\eta = W_{\text{elek}}' / W_{\text{elek}} \sim 0.77$$

Efektivna gostota shranjene energije

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

za vodo shranjeno v rezervoarju 520 m nad turbinou:

$$dW'/dV = \eta dW/dV = \eta \rho g h dV/dV = \eta \rho g h \sim 1 \text{ kWh/m}^3$$

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

Valovi (po MacKay-u)



'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

Ocean Power Delivery (oceanpd.com)



Pelamis



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



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 $100\text{-}200\text{ km}^2 \Rightarrow$

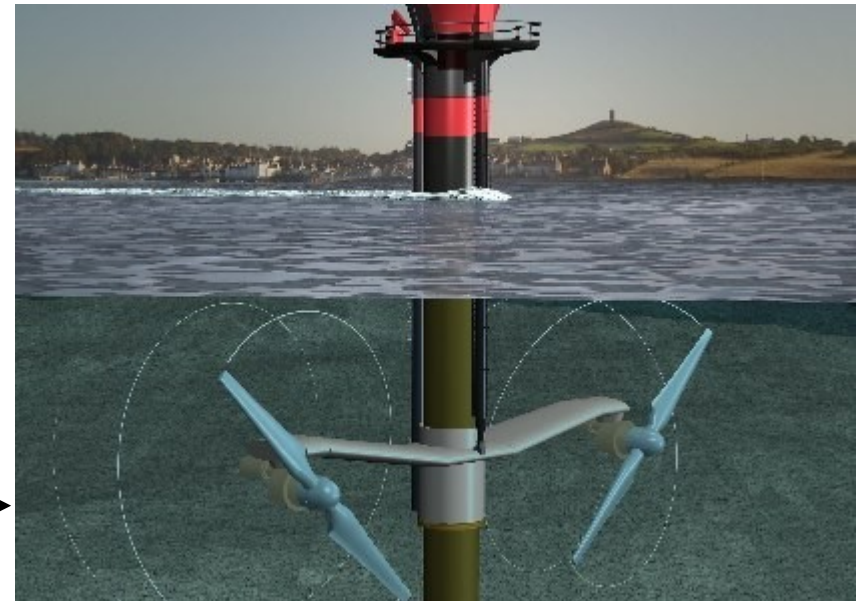
$100\text{-}200\text{ MW}$

www.marineturbines.com

na prebivalca
UK:

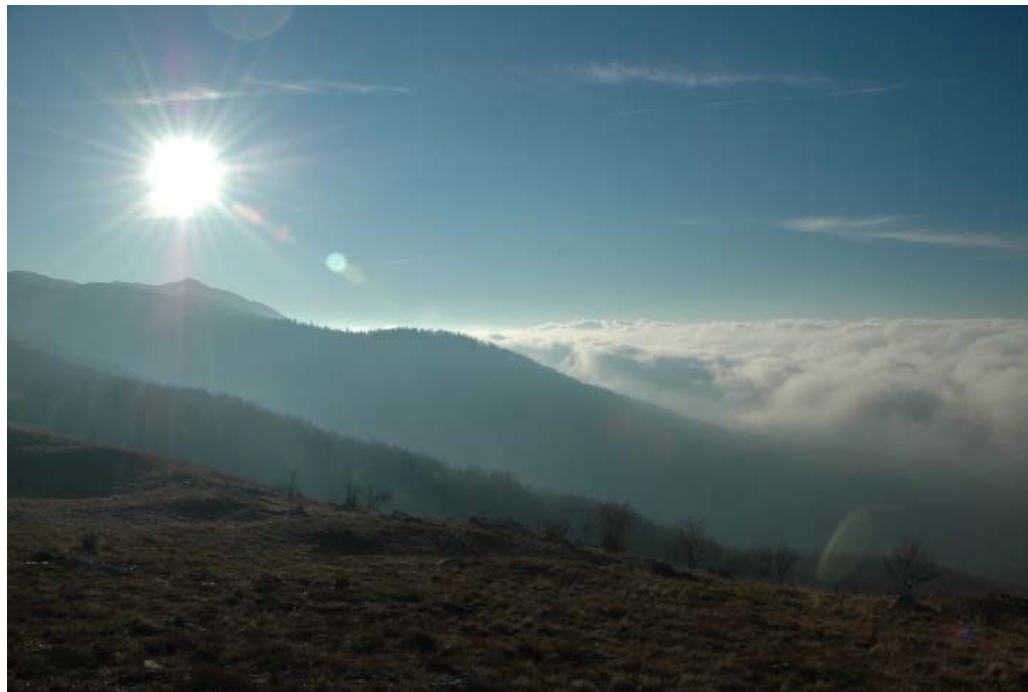
$\leftarrow \sim 2\text{ kWh/dan}$

$\sim 9\text{ kWh/dan}$



Sonce

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



Koalicijski sporazum, 2008:

Koalicijski partnerji bodo 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.

Sonce (sevanje) - obnovljiv vir z največjo gostoto!

(neposredna izraba sončnega sevanja)

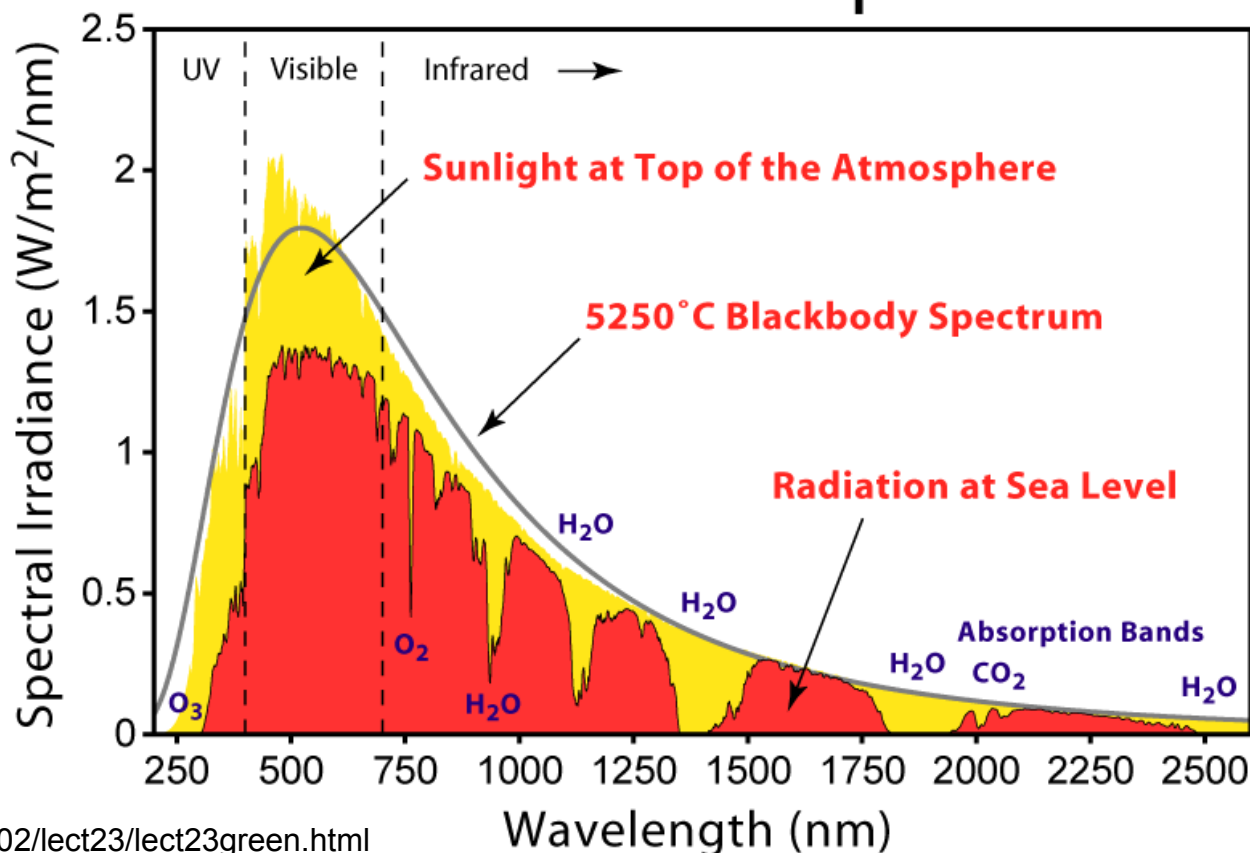
UPORABEN POTENCIAL > 50 TW

(TEORETIČNI POTENCIAL ~ 100000 TW)

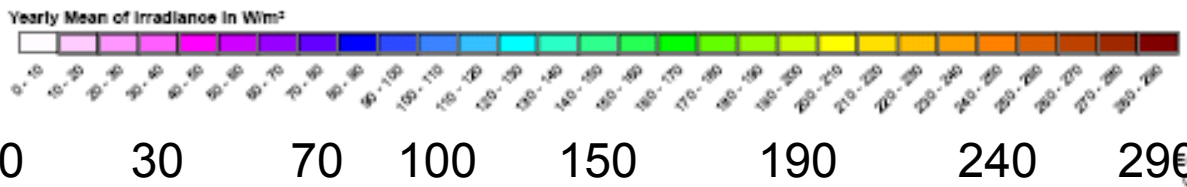
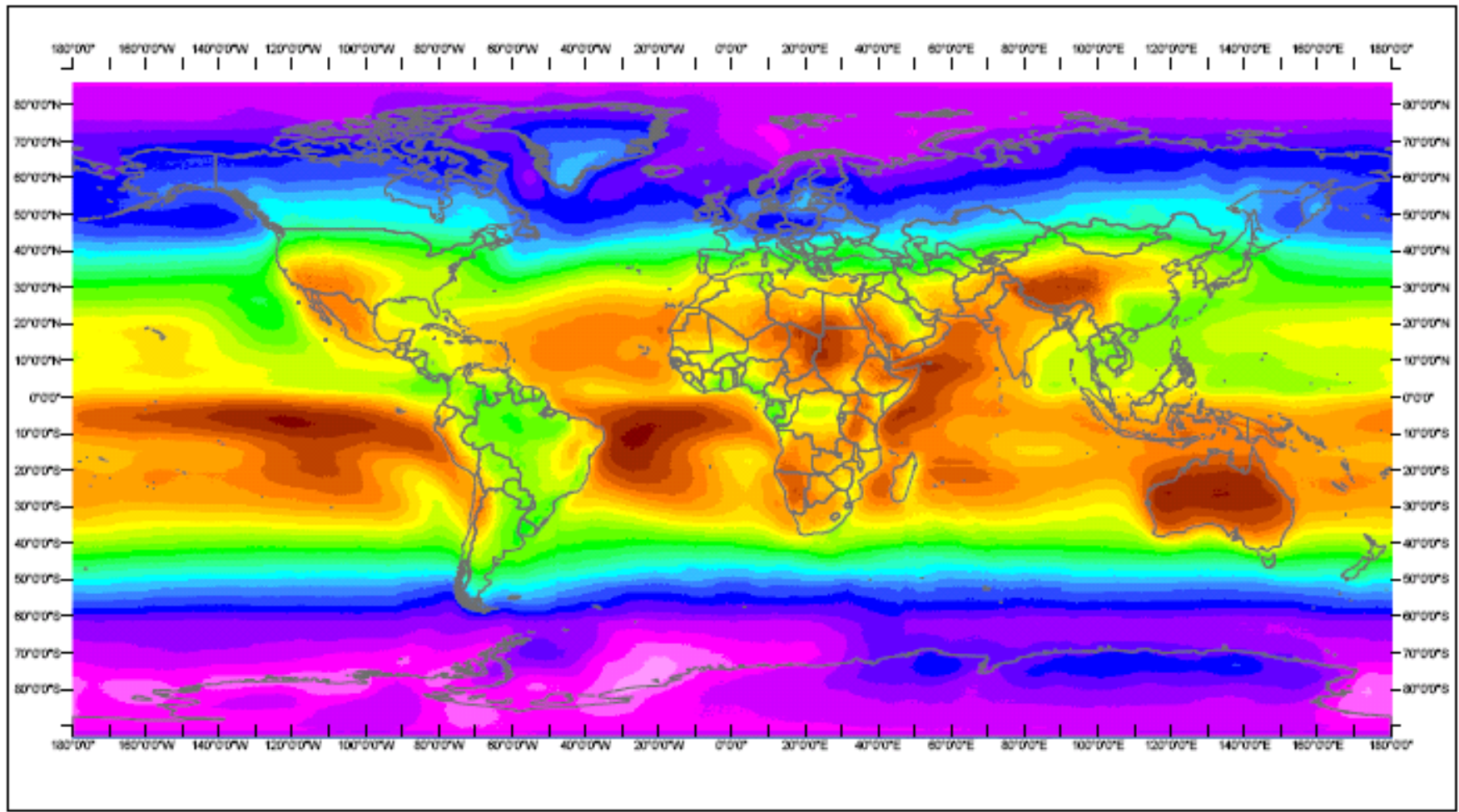
(Science, spec. edition, 13. Aug.2010, Vol 329)

Sončno sevanje:
1367 W/m²
albedo 0.3
Ravnovesna temperatura
površja -18 °C
Dejanska povprečna
temperatura površja 15 °C

Solar Radiation Spectrum



Averaged Solar Radiation 1990-2004



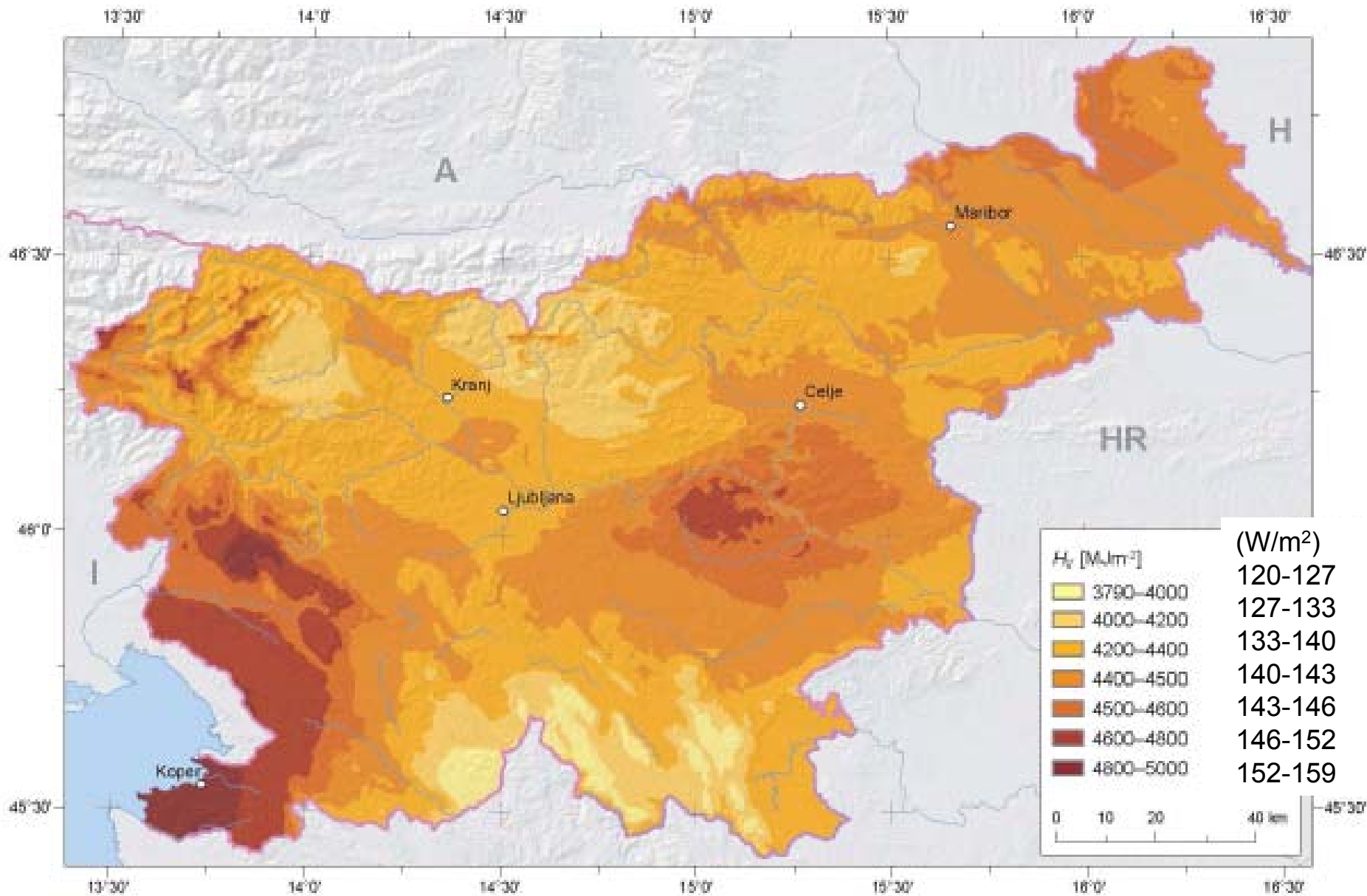
W/m^2



Realized by Michel Albuissou, 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

46 MWp (moč)

376,000 solar panels

190,000 panels on fixed structures,
52,000 on single-axis trackers,
which follow the sun

20 MW of power capacity will be
added

130 hectares area

88 GWh/year

8 W/m²

Fotovoltaične elektrarne

do max. $\sim 20 \text{ W/m}^2$

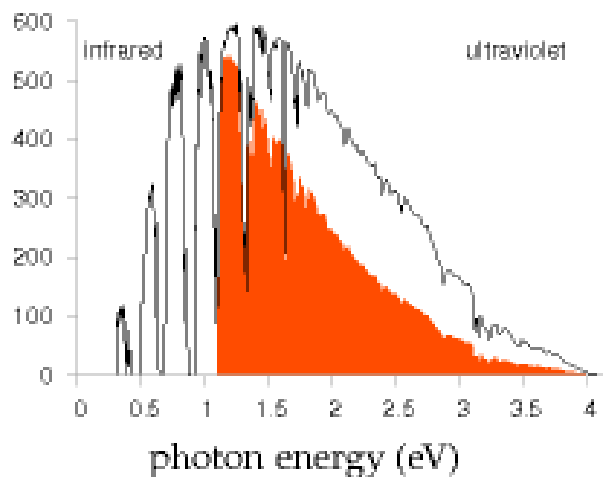
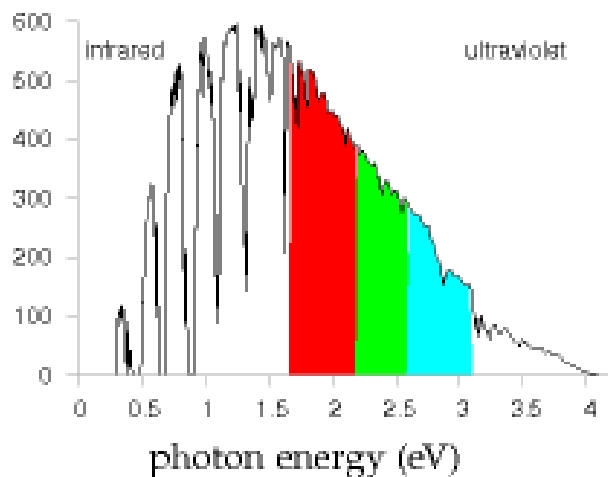
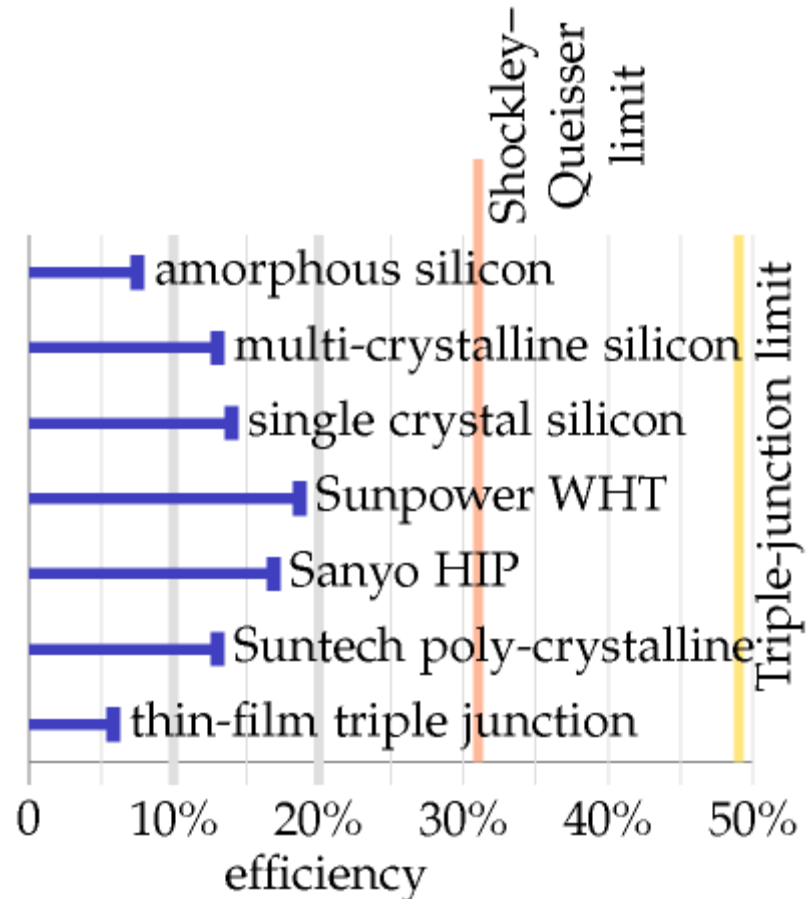
Manjši teoretični izkoristek
od termosolarnih elektrarn,
toda boljša izkoriščenost
prostora



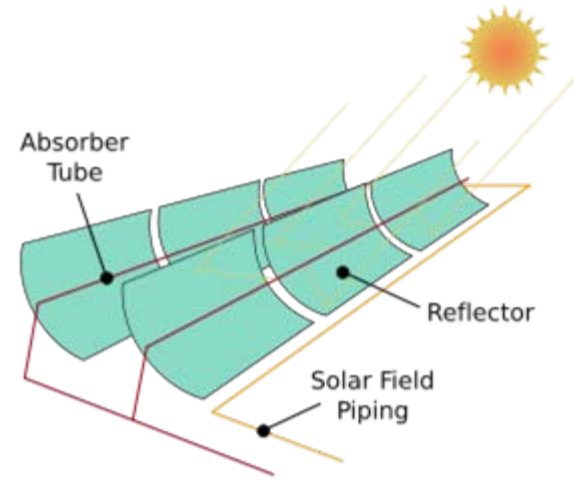
Izkoristek fotovoltaičnih panelov

po MacKay-u

Izkoristki nad 20% so izjema...



Kramer junction, Kalifornija, 10 W/m^2



PS 10 Solucar, Španija, 5 W/m^2



Sončne termoelektrarne
načrti do max $\sim 20 \text{ W/m}^2$
Boljši izkoristek sevanja
kot fotovoltaika na m^2
zrcal. Slabši izkoristek
prostora.

gostota moči fotovoltaične elektrarne



Strahinj, 2007,
90 kW moči,
proizvodnja ~90000 kWh/leto,
površina ~600 m² - 80% strehe
gostota moči: ~15 W/m²

~246 kWh/dan = 2 Slovenca



Vrenska gorca, 2009:

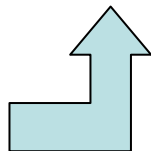
420 kW (2 MEUR)

550000 kWh/leto


1 ha **travnika**


za ~200 gospodinjstev :-)

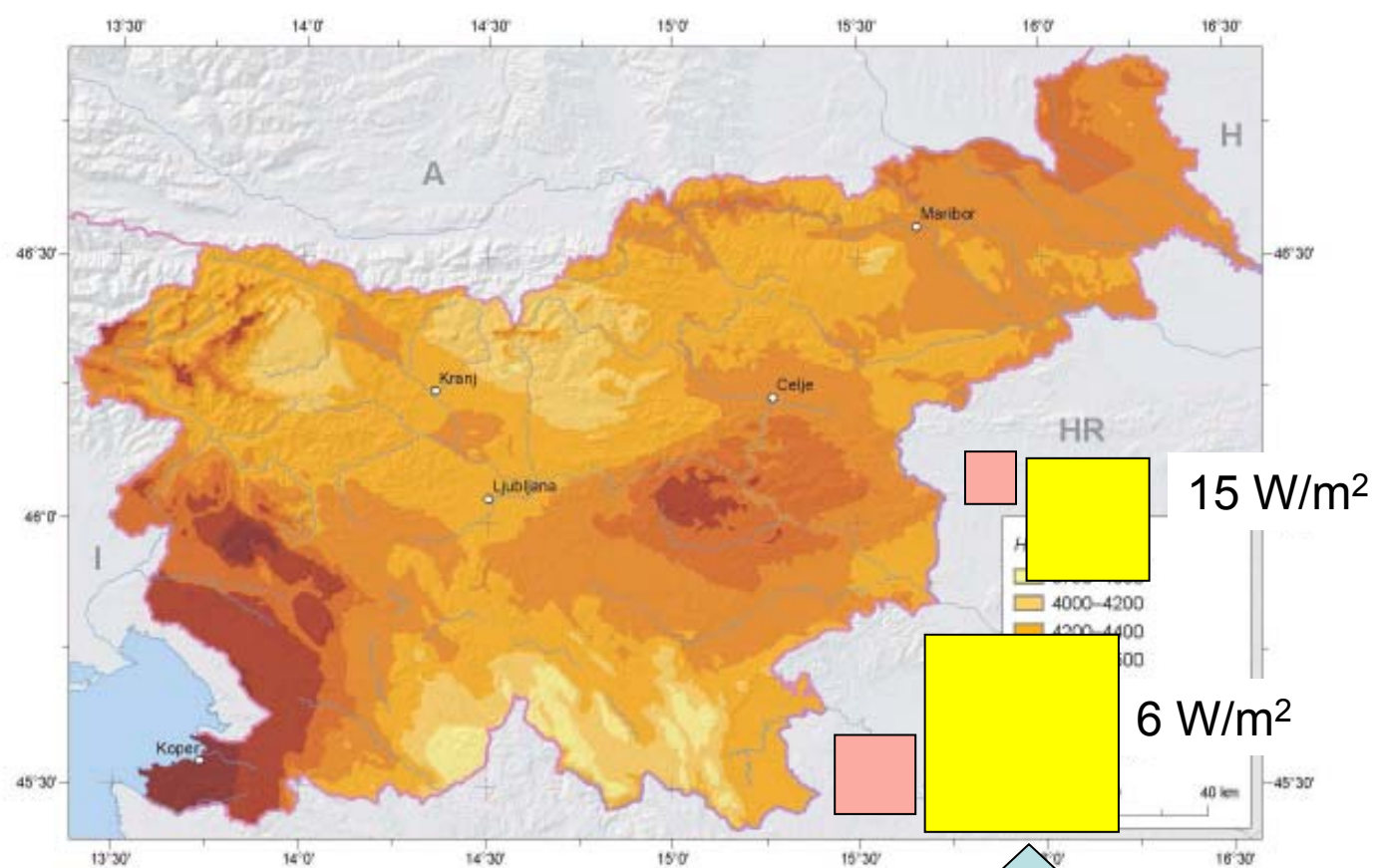
gostota moči: 6 W/m²



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

Rumeno 
površina potrebna
za **100% oskrbo**
iz sončnih
elektrarn pomeni
1/30 do 1/12
Slovenije
(122 kWh/dan.o)

Rdeče 
samo elektrika
(21 kWh/dan.o)



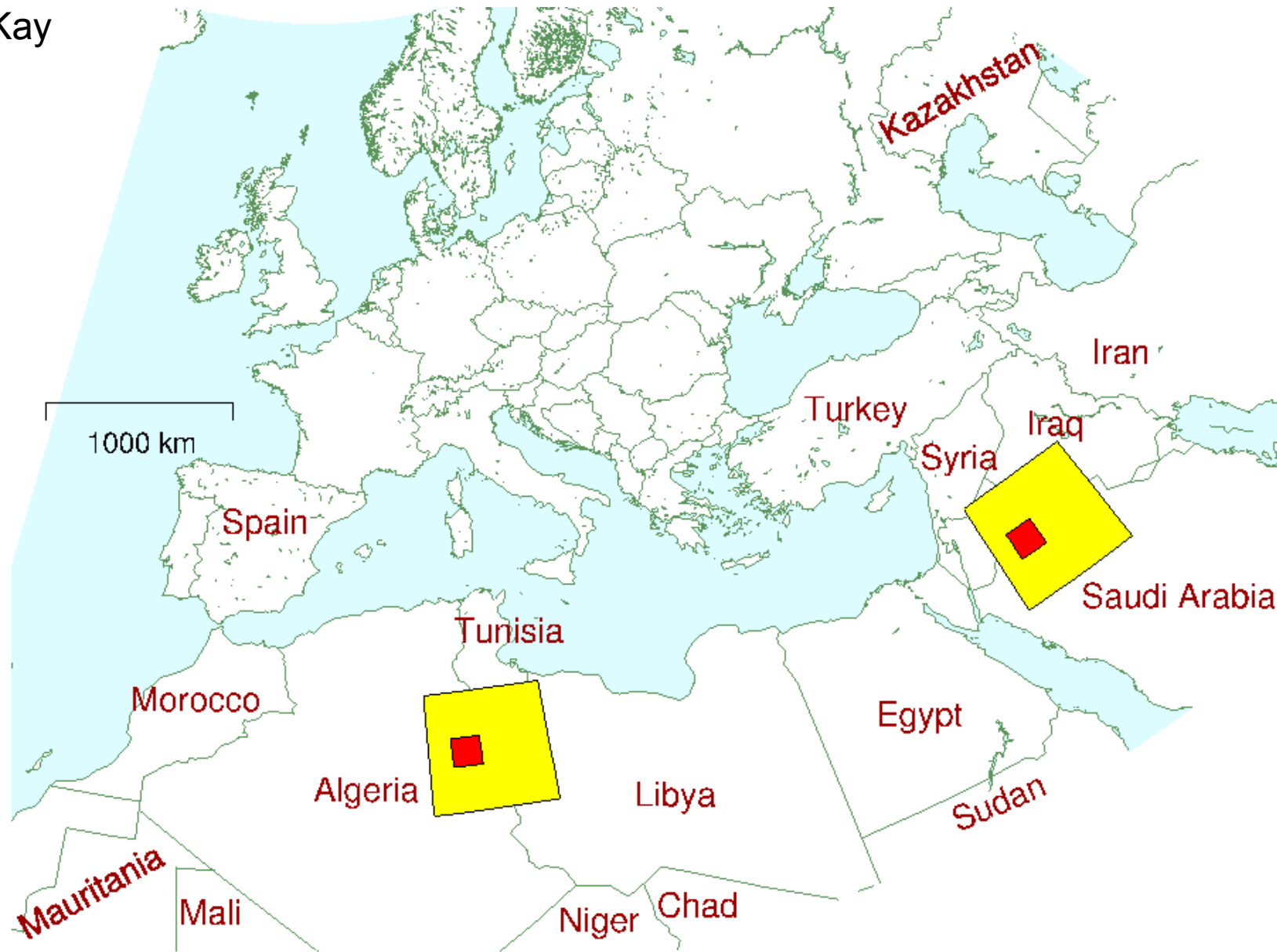
7. Kakšno prihodnost si želite?



8. Temno ali sončno ?

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

MacKay



Yellow: 125 kWh/d/p for 1 billion people; Red: 125 kWh/d/p for 60 million people
(assuming 15 W/m^2)

Sončna energija

delujoče elektrarne v 2009 - instalirana moč:

21 GW fotovoltaičnih elektrarn (20% več kot 2008)

0.6 GW termosolarnih

(proizvodnja ~1/9 instalirane moči)

<http://vitalsigns.worldwatch.org/vs-trend/record-growth-photovoltaic-capacity-and-momentum-builds-concentrating-solar-power>

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

Kljub temu znaten vir energije.

V SLO ~20 W/m²



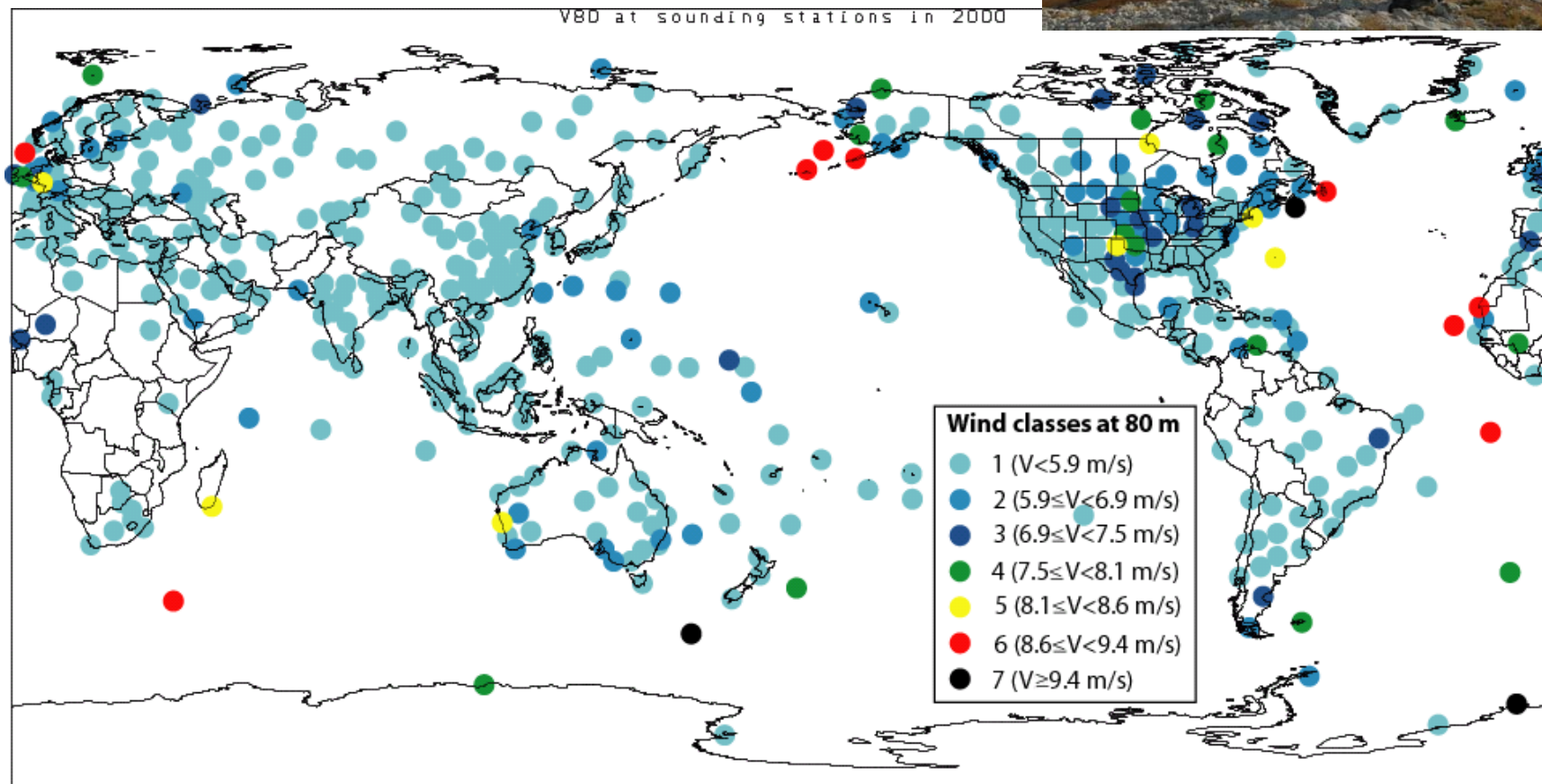
Manzanares -sončni dimnik, Španija, 1982-1989: poskusni obrat, proizvajal $P_{el} \sim 50 \text{ kW}$, gostota moči 0.1 W/m²

Veter

Izkoriščanje vetra za proizvodnjo elektrike se začne pri povprečnih hitrostih vetra $\sim 6\text{m/s}$ (wwea)

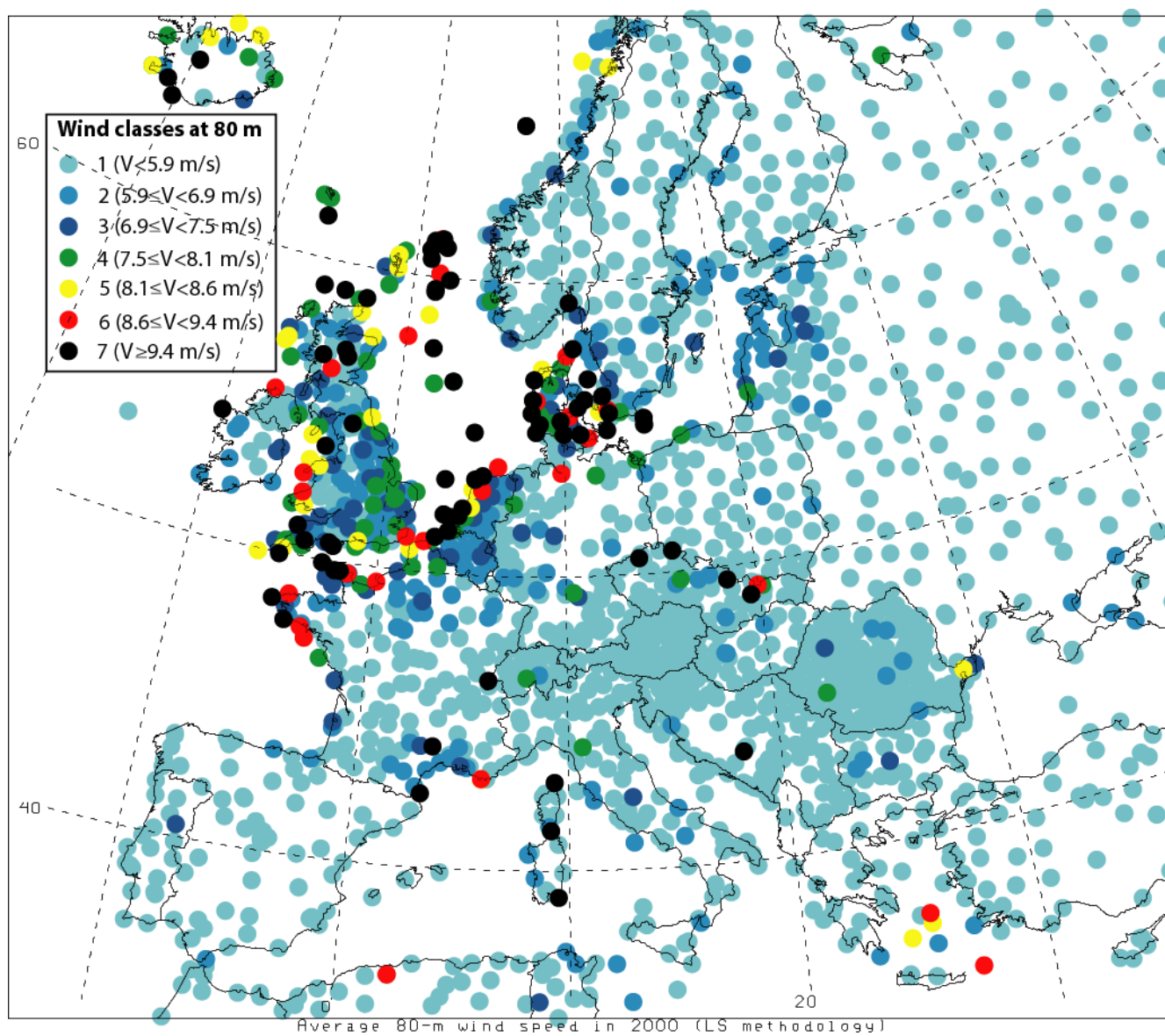


V80 at sounding stations in 2000



**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/m^2 15 TW pomeni površino $6 \text{ Tm}^2 = 6 \text{ milijonov km}^2$ (Evropa: 10 milijonov km^2)

Wind Power Worldwide June 2010

| Position | Country | Total capacity June 2010 [MW] | Added capacity June 2010 [MW] | Total capacity end 2009 [MW] |
|-------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | USA | 36.300 | 1.200 | 35.159 |
| 2 | China | 33.800 | 7.800 | 26.010 |
| 3 | Germany | 26.400 | 660 | 25.777 |
| 4 | Spain | 19.500 | 400 | 19.149 |
| 5 | India | 12.100 | 1.200 | 10.925 |
| 6 | Italy | 5.300 | 450 | 4.850 |
| 7 | France | 5.000 | 500 | 4.521 |
| 8 | United Kingdom | 4.600 | 500 | 4.092 |
| 9 | Portugal | 3.800 | 230 | 3.535 |
| 10 | Denmark | 3.700 | 190 | 3.497 |
| Rest of the World | | 24.500 | 2.870 | 21.698 |
| Total | | 175.000 | 16.000 | 159.213 |

© WWEA 2010





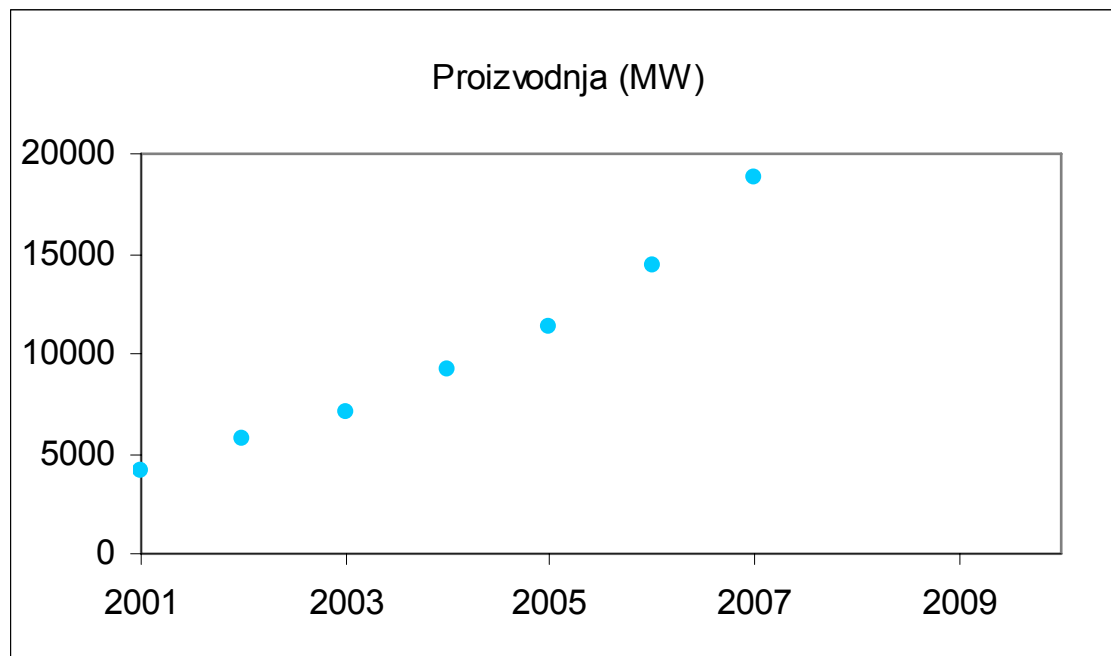
World Wind Energy Assoc

konec 2009 (World Wind Energy Report 2009, WWEA):

instalirana moč 159 GW

povprečna proizvodnja 39 GW:

25 %



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

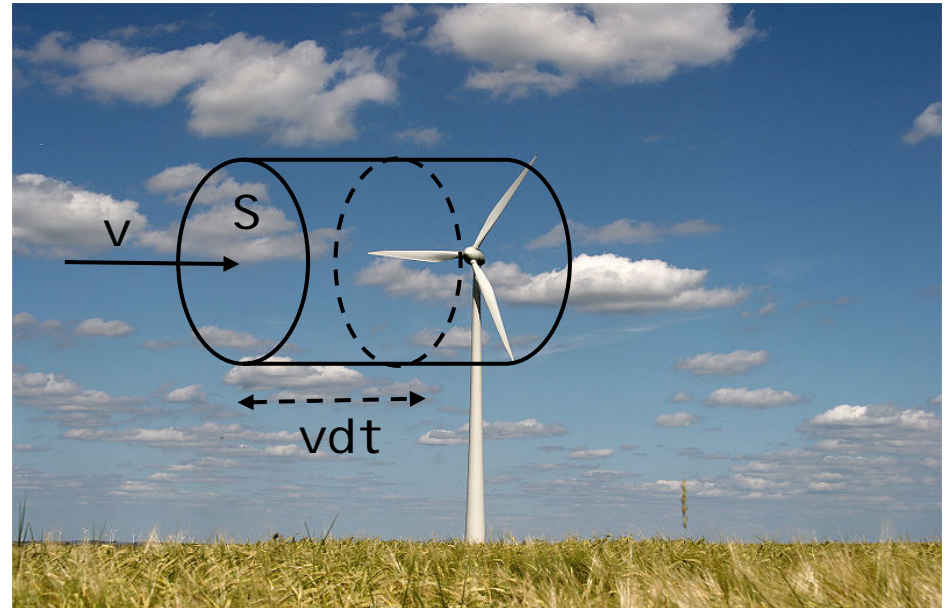
Izkoriščanje virov, veter:

$$dm = \rho S v dt$$

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

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

moč kin. energije vetra;
 $P \propto v^3!$



celotne moči ni mogoče izrabi ti:

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

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

... 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

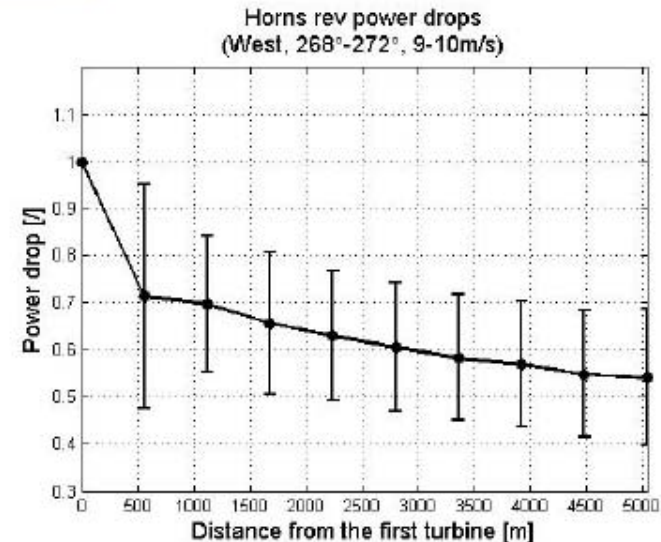


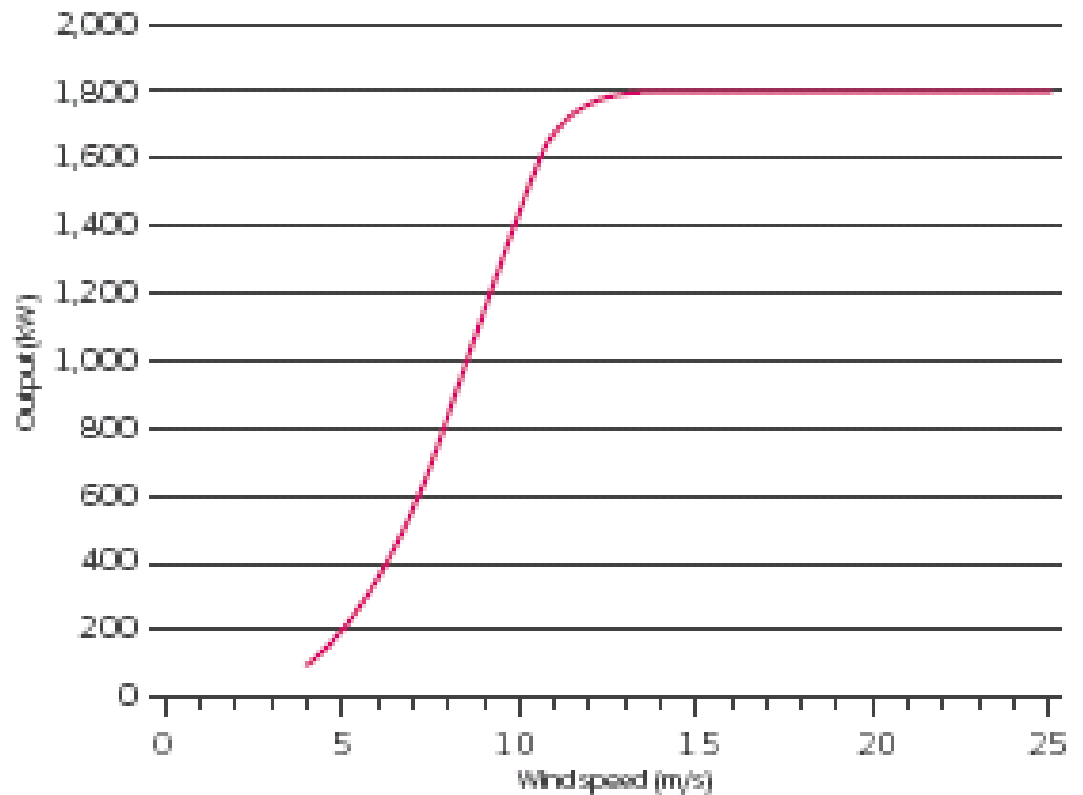
Figure 5.6 Relative power drop 9-10m/s

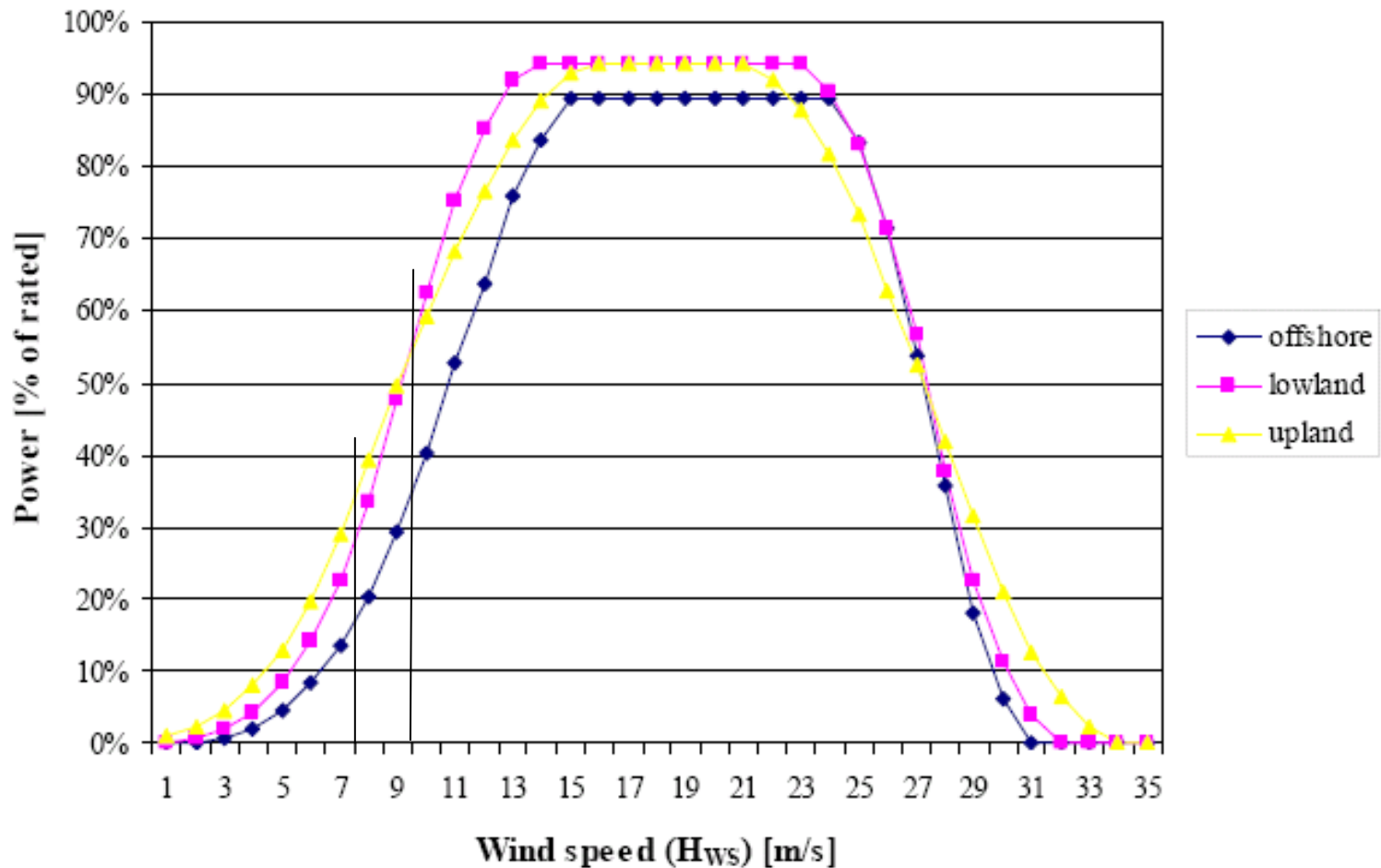
Vestas V90 1.8 MW/3MW (Vestas - Danska)

- > 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 vetru
~13 m/s

Power curve V90-1.8 MW



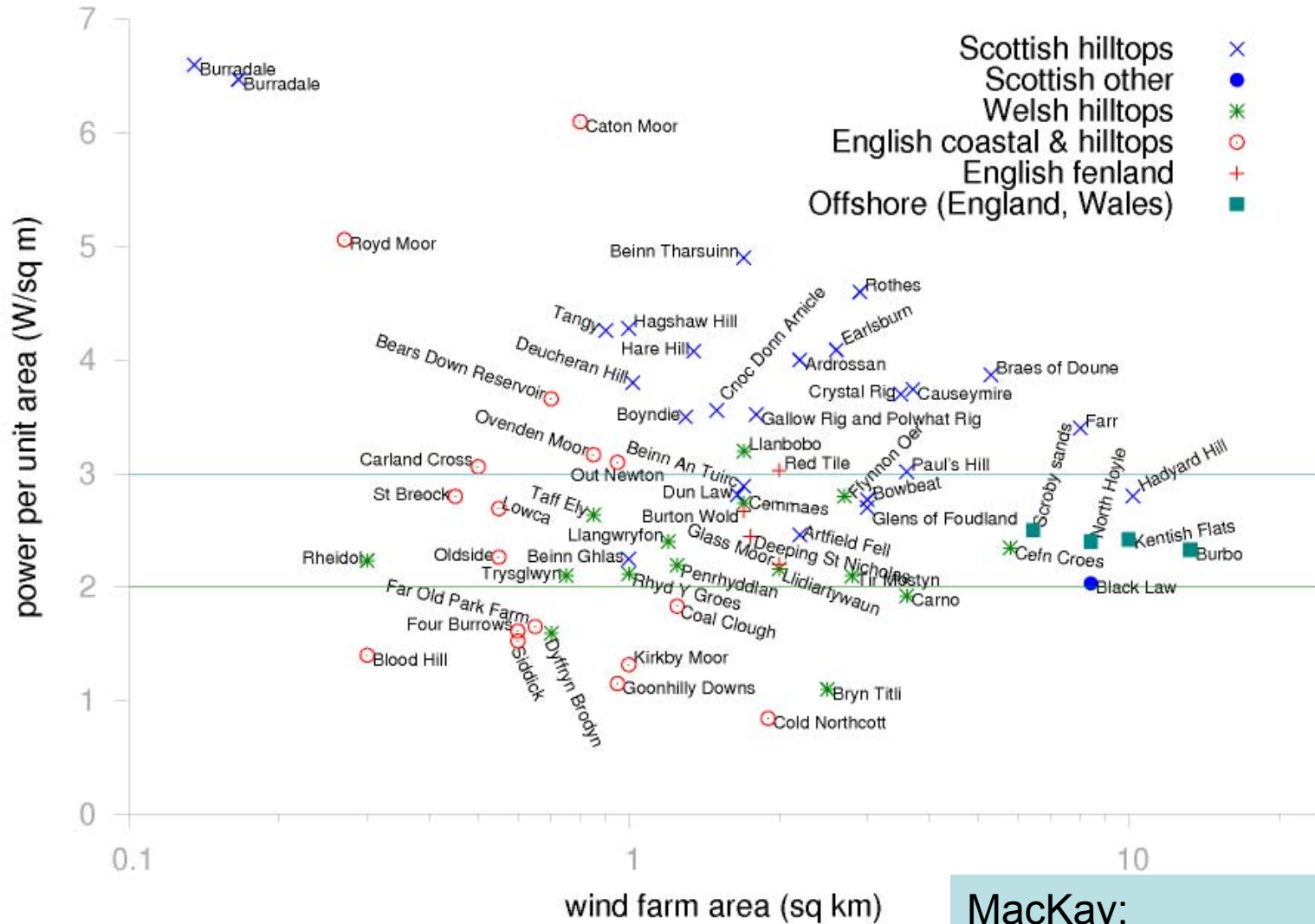


Projekcije obnašanja vetrnih turbin za 2030:

Equivalent Wind Power Curves

J R McLean, Garrad Hassan and Partners Ltd

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



MackKay:

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

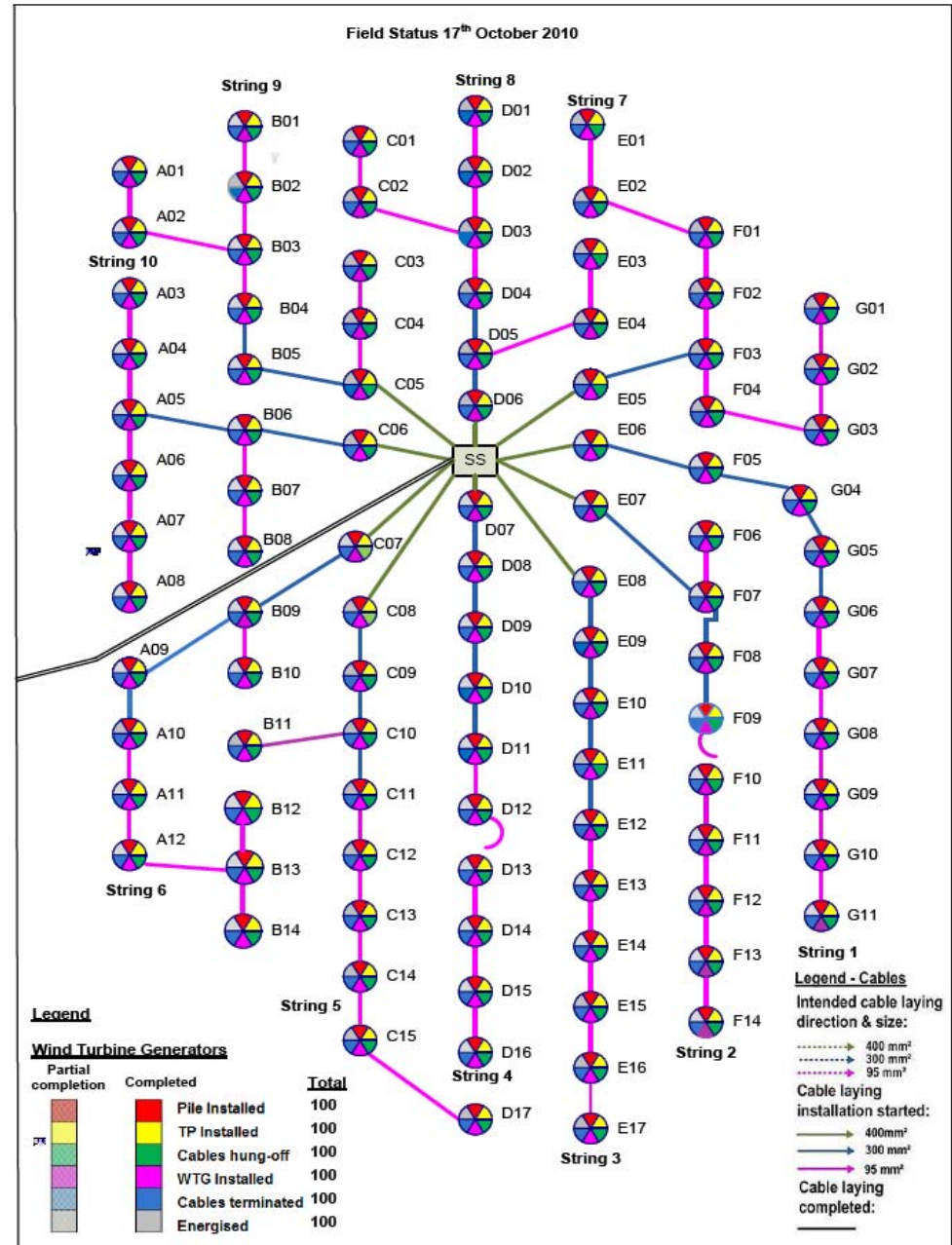
Rotor diam. 90 m

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



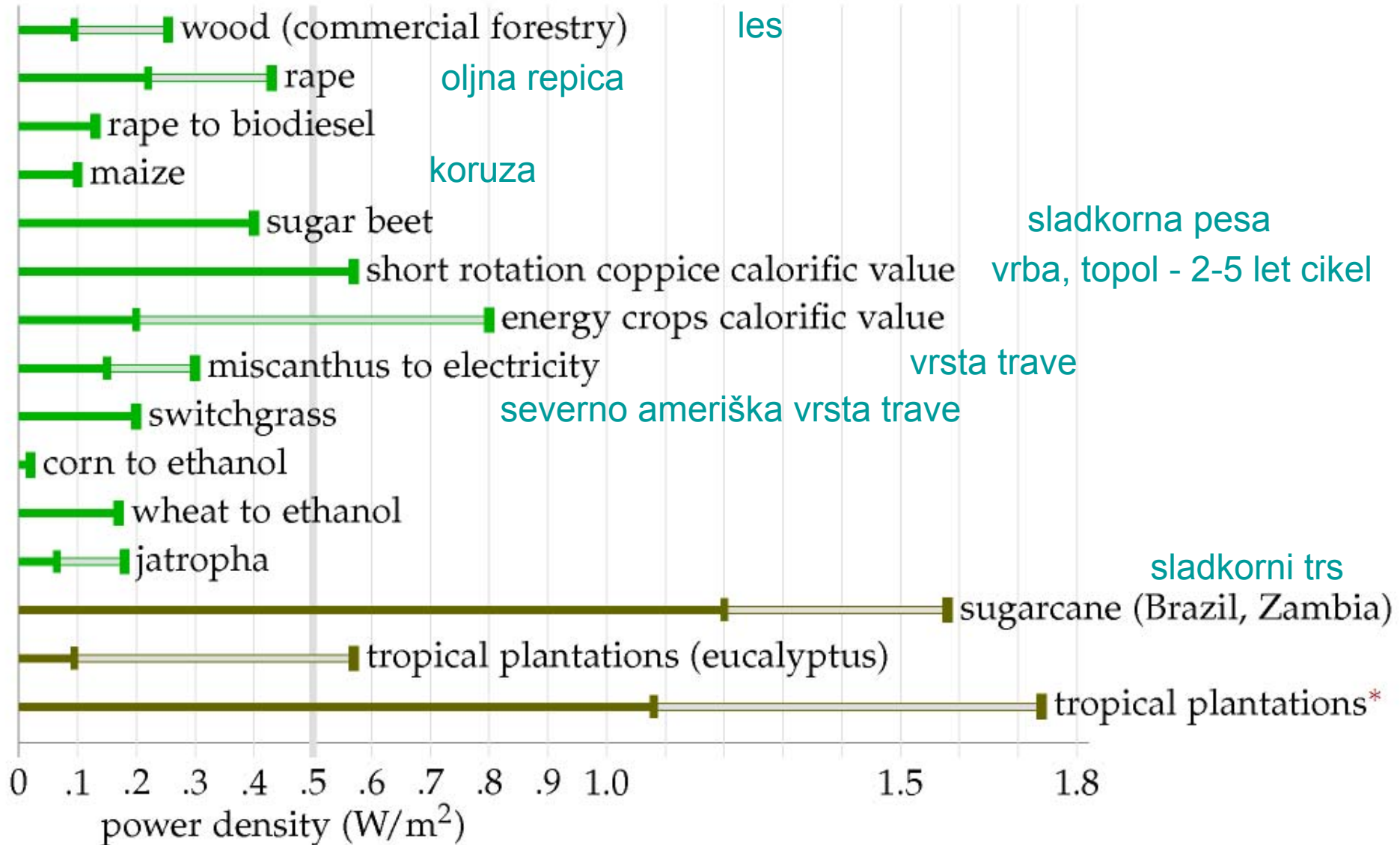
Gorski grebeni:

- Tauernwind: $13 * 1.75 \text{ MW} = 23 \text{ MW peak}$
- proizvodnja: $\sim 40 \text{ GWh/leto} = 4.5 \text{ MW na } 2 \text{ km grebena.}$
- Slovenija $\sim 100\text{-}200 \text{ km grebenov} = 250\text{-}500 \text{ MW povprečne proizvodnje?}$

Črtamo grebene v območju Natura 2000 ostane nekaj 10 MW - npr. 40 MW ali 0.5 kWh/dan/osebo...

Natančnejše ocene in podatki - seminar o vetru...

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

Slovenski gozdovi:

0.2 W/m² ~2 GW primarne energije pri letnem prirastku 7 Mm³/leto 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

Bioplin:

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 glav 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 pojedjo domače živali in ljudje)

biomasa

Biodizel

oljna ogrščica:

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

1000 litrov/ha/leto = $0.1 \text{ l/m}^2/\text{leto} \sim 0.1 \text{ W/m}^2$
(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 = $0.33 \text{ kg etanola/m}^2/\text{leto}$
= $10 \text{ MJ/m}^2/\text{leto}$ = **0.3 W/m^2**

Podatki:

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

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

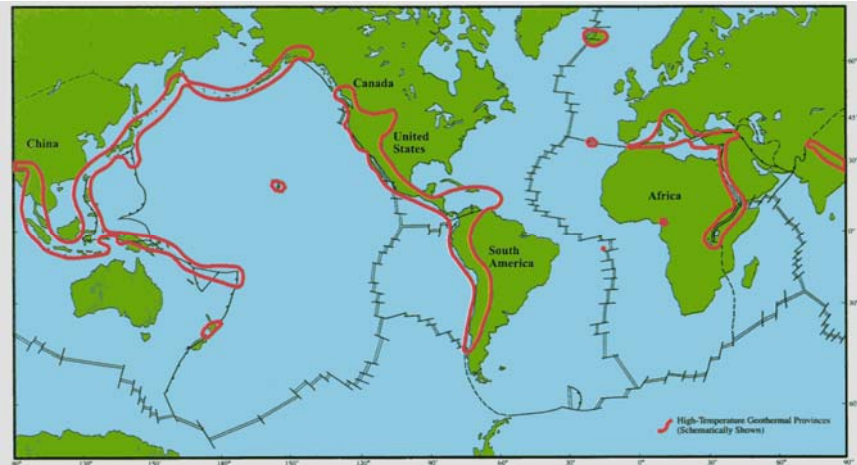
Težava: Poraba energije pri proizvodnji ~30-50% končne energije goriva !



Geotermalna energija: svetovna proizvodnja 0.01 TW elektrike in 0.03 TW toplote

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-gei/s/publications/reports/ser/overview.asp>

Potencial:

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

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

(0.035 TW = 0.1 kWh/dan/prebivalca)

(2 TW = 7 kWh/dan/prebivalca Zemlje)

~ 2 TW toplote

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

Geotermalna energija

Svetovna proizvodnja:

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

28 GW toplote

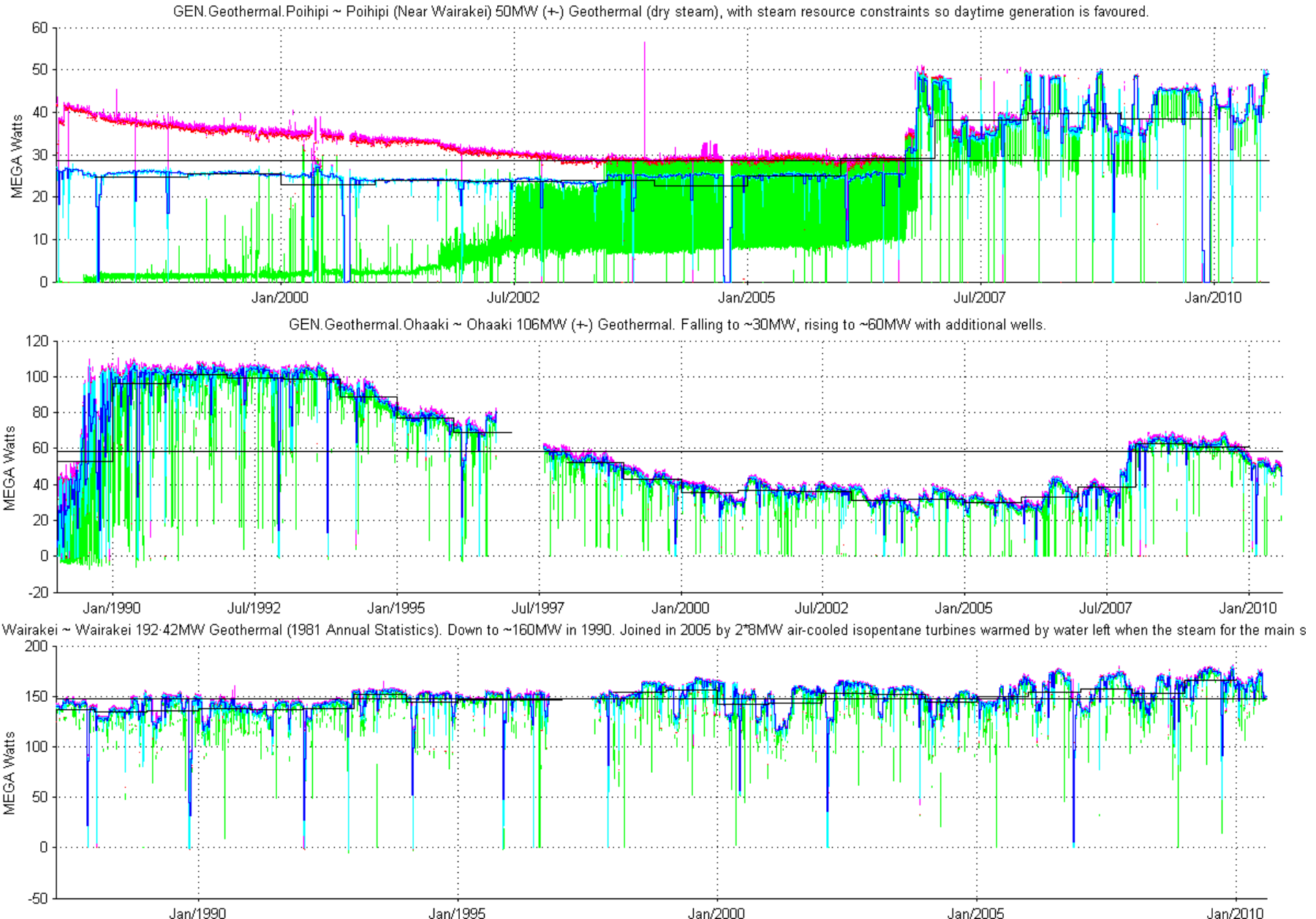


Pamukkale

| 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".

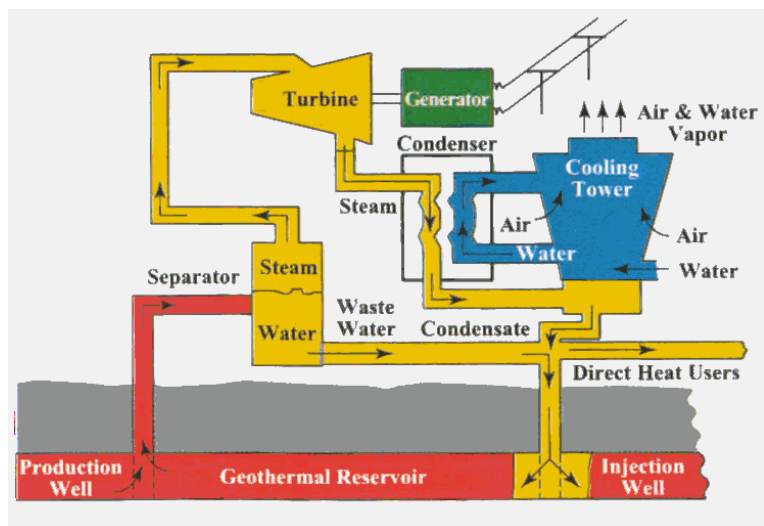
Proizvodnja treh geotermalnih elektrarn na Novi Zelandiji.



Geotermalna energija

načini izkoriščanja

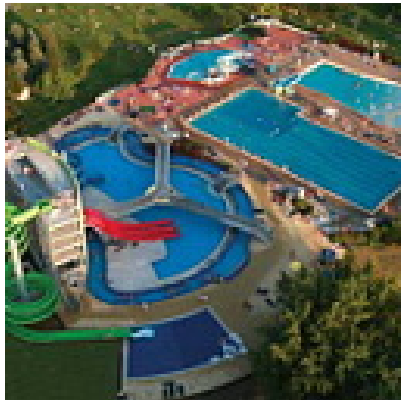
- hidrotermalni sistemi; neposredna izraba tople vode, ki prejme toploto od kamnin
- geotermalne toplotne črpalke; neposredno izkoriščanje toplote
- HDR (hot dry rock) sistemi; drobljenje segrelih kamnin in umetni tok vode preko le-teh



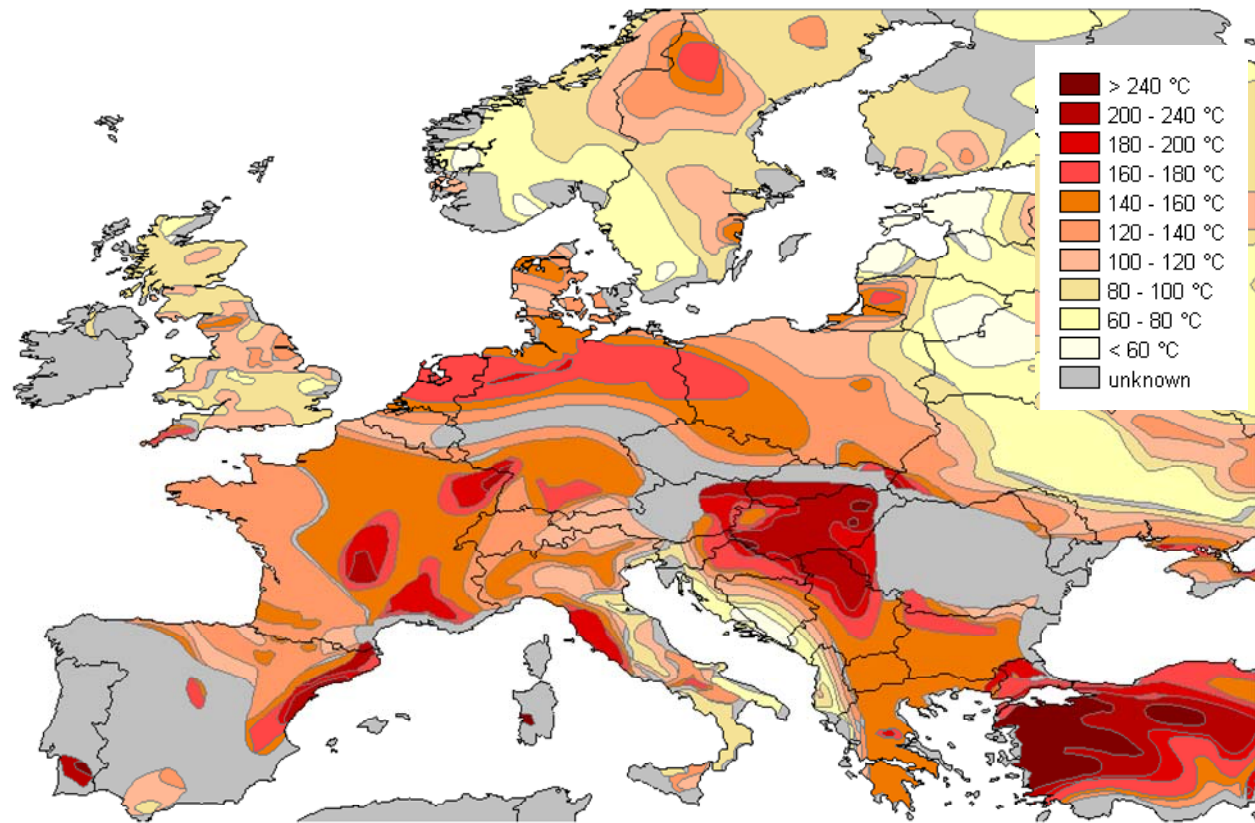
shema tipične
geotermalne elektrarne,
ki izkorišča podzemno
vodo temp. $>150^{\circ}\text{C}$;
0.1 – 150 MW

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

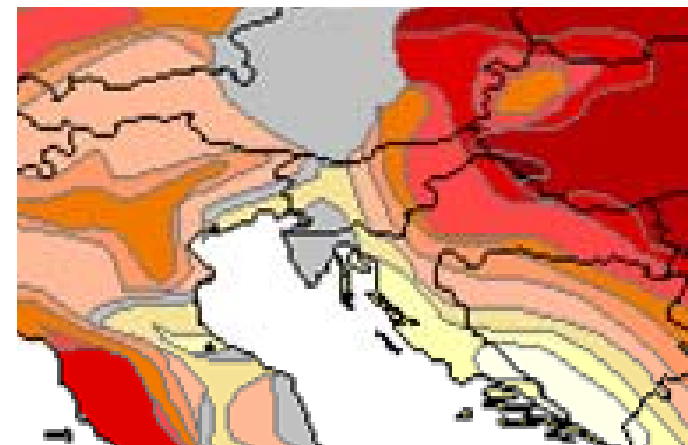


Terme Ptuj



EU-MENA report:

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



Slovenija

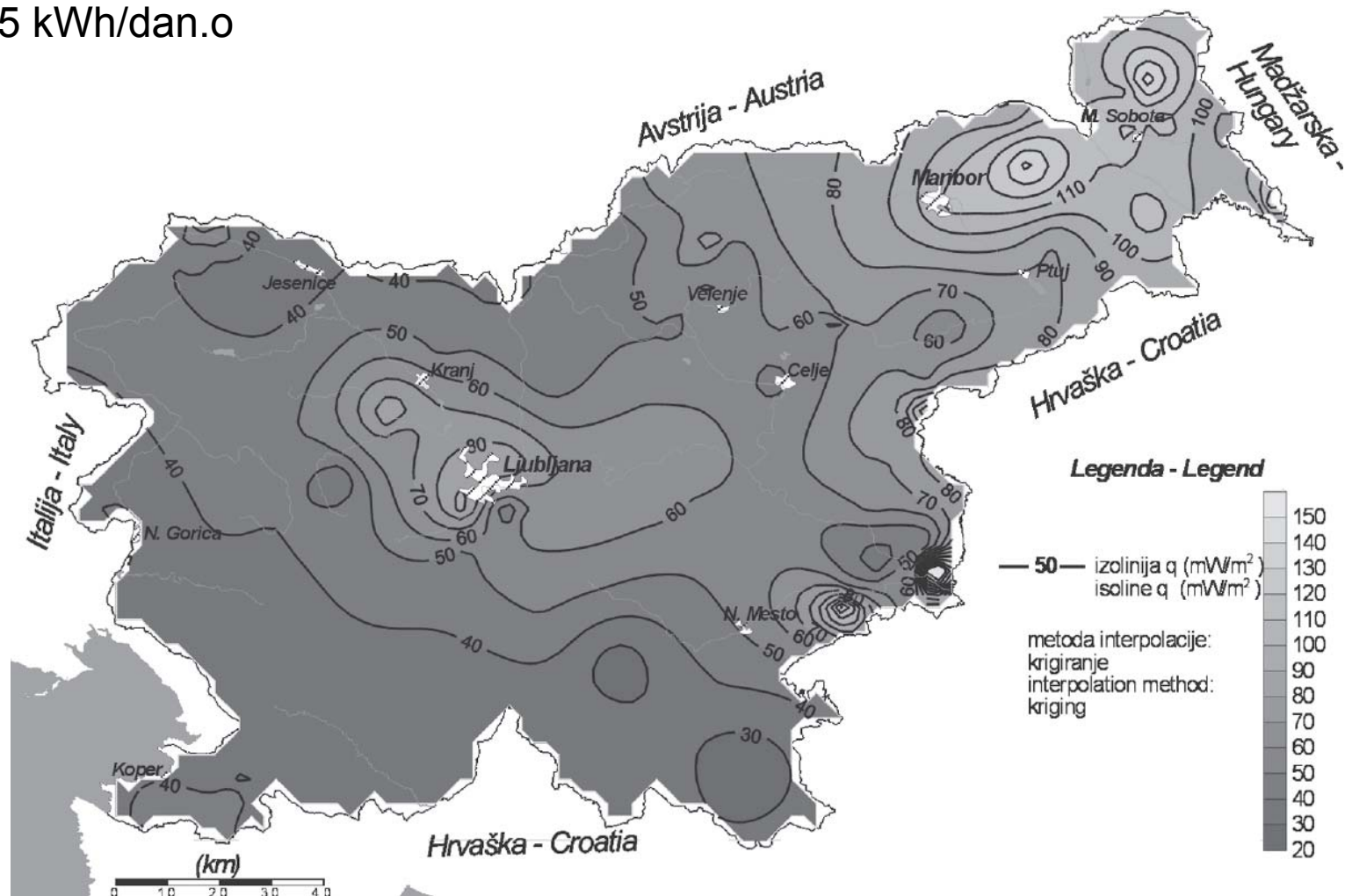
teoretično:

$0.1 \text{ W/m}^2 \sim 25 \text{ kWh/dan.o}$

realno

kWh ??

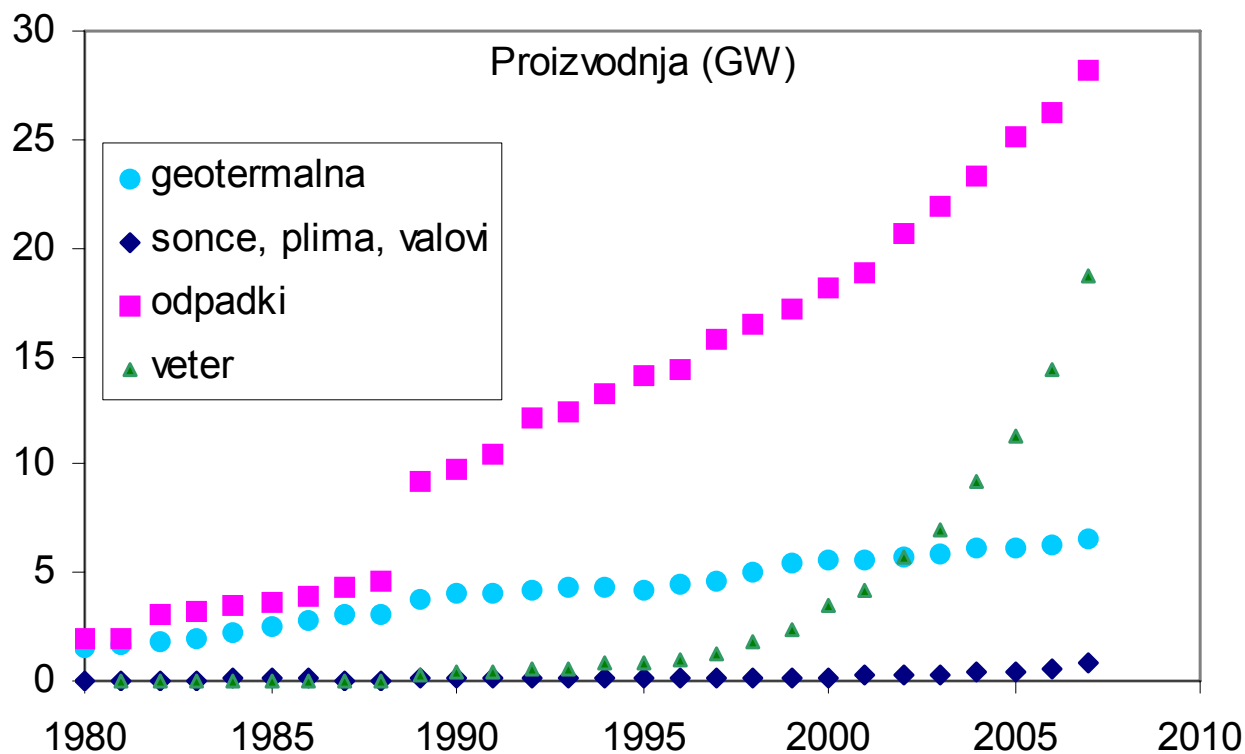
Rajver, Ravnik, **Geotermična slika Slovenije**.... GEOLOGIJA 45/2, 519–524, Ljubljana 2002



površinska gostota toplotnega toka mW/m^2

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

Jedraska ~0.3 TW

sonce, plima,
valovi 2008

~1.3 GW

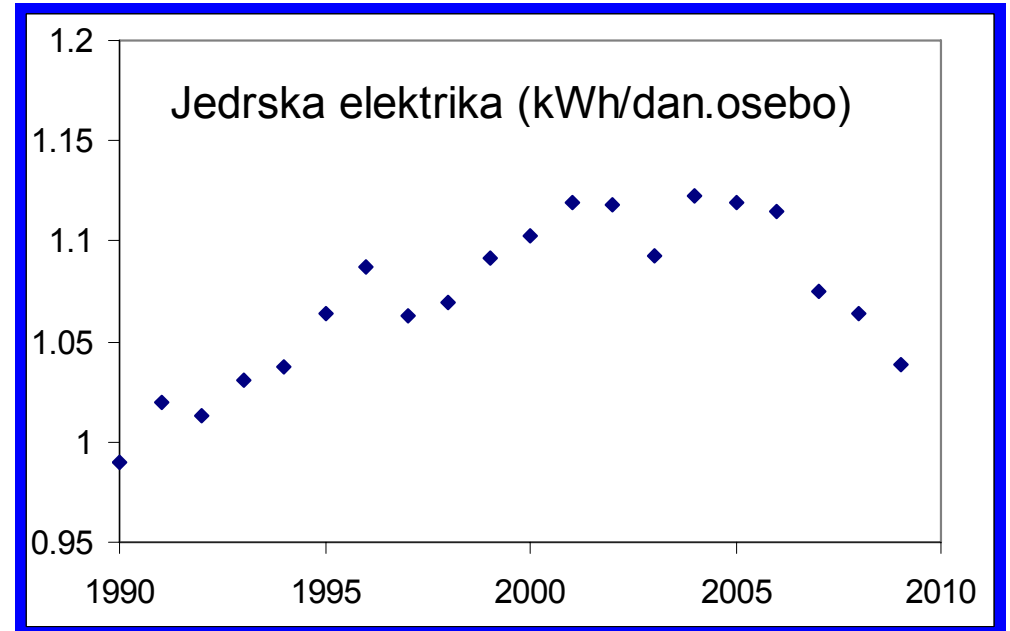
Jedraska energija

2009:

~440 delujočih reaktorjev

~ 50 v gradnji

2600 TWh/leto



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



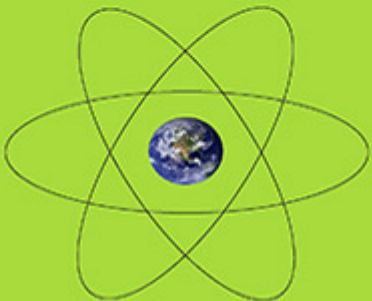
Instalirana moč: 0.376 TW

proizvodnja: 0.292 TW

faktor izkoriščenosti 78 %

"Sežigna toplota" naravnega urana: 40000 kWh/kg

vir: world-nuclear.org



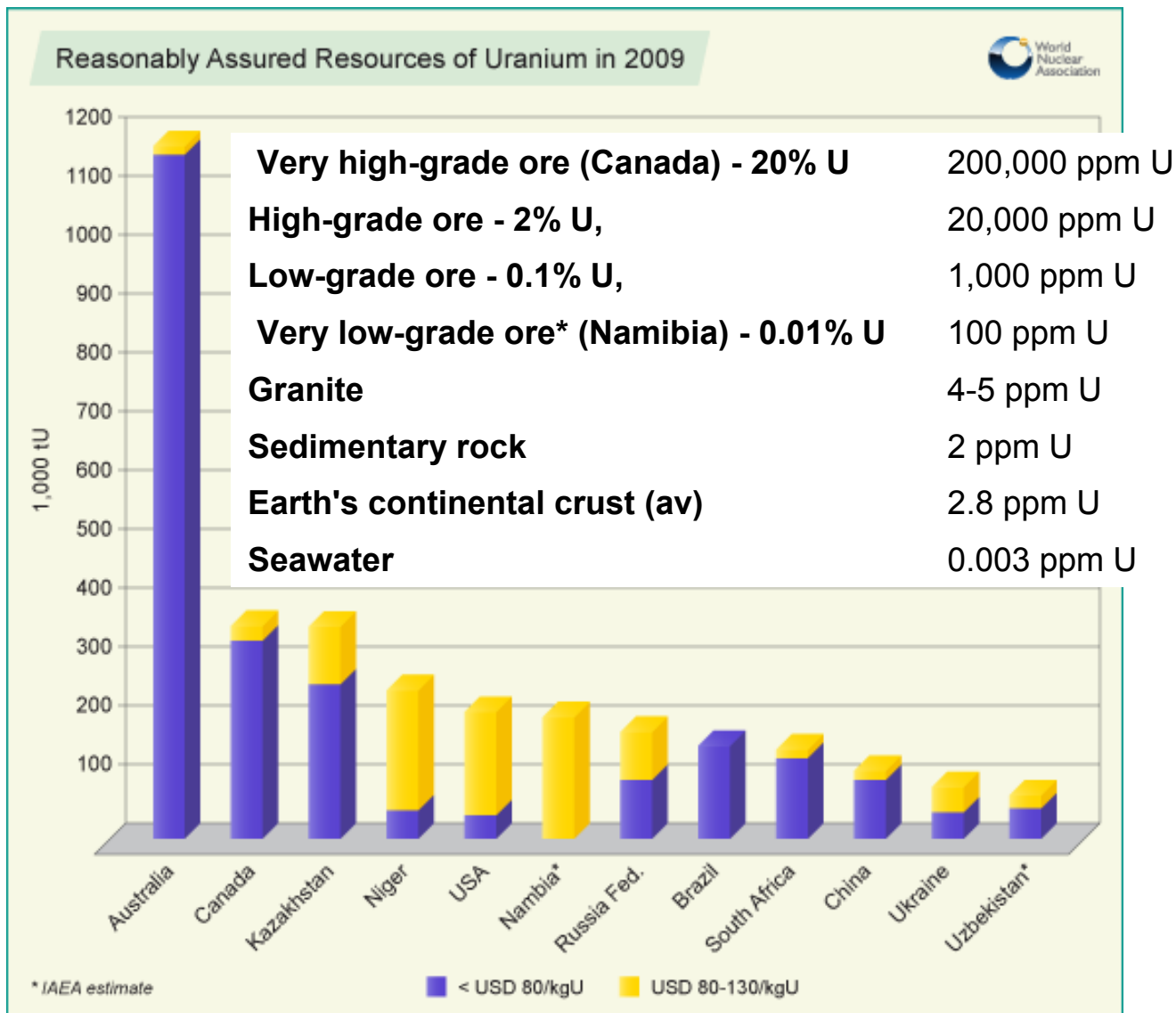
Dokazane in dosegljive zaloge urana

5.4 Mton

Zaloge "rastejo"

www.world-nuclear.org

Žirovski vrh:
13.000 ton urana ruda: 0.2-0.35%



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 U_3O_8 = 13.500 ton U

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

Rudarjenje opuščeno zaradi neekonomičnosti.

Nacionalni energetske plan (NEP) 2009: (vir ?)

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

Skupne dokazane in ocenjene zaloge urana po proizvodni ceni, nižji od 130 US\$/kgU, znašajo 12.200 ton in zadostujejo za najmanj 50 let proizvodnje Jedske 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 0.376 TW moči in 0.292 TW proizvodnje pri zalogah 5.4 Mton pomeni 80 let. **NI OBNOVLJIV VIR !**

(=180 ton urana letno za 1 GW elektrarno, MacKay pravi 162 ton)

(=125 ton za NEK)

Nove tehnologije:

- Uran v morju 4000 Mton, 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 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$

6 Mton Th naj bi bilo mogoče spremeniti v **~25 kWh/dan.o** za 1000 let

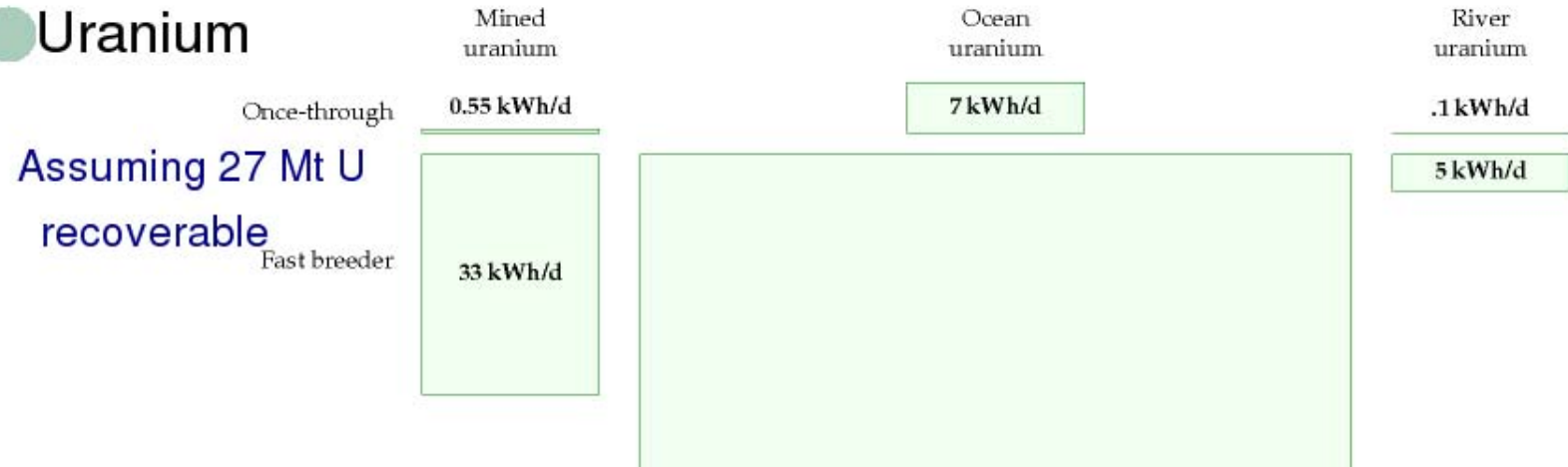
- Fuzija litij... **10-100 kWh/dan.o** za 1000 let,

devterij **30000 kWh/dan.o** za **1000000 let** in **60 milijard ljudi**

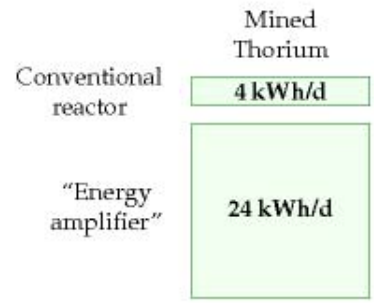
Nuclear Fission ('sustainable' = 1000 years)

MacKay

Uranium



Thorium



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:

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

(Če bi 8 kWh 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,

...

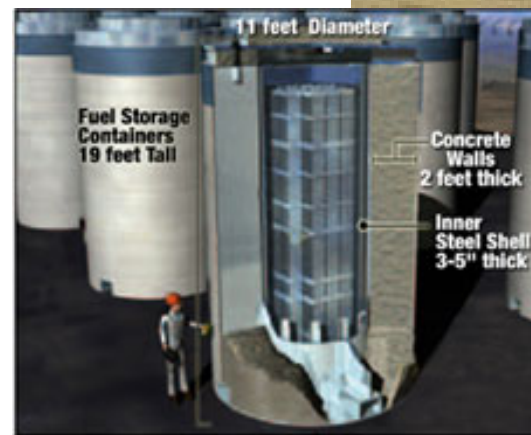
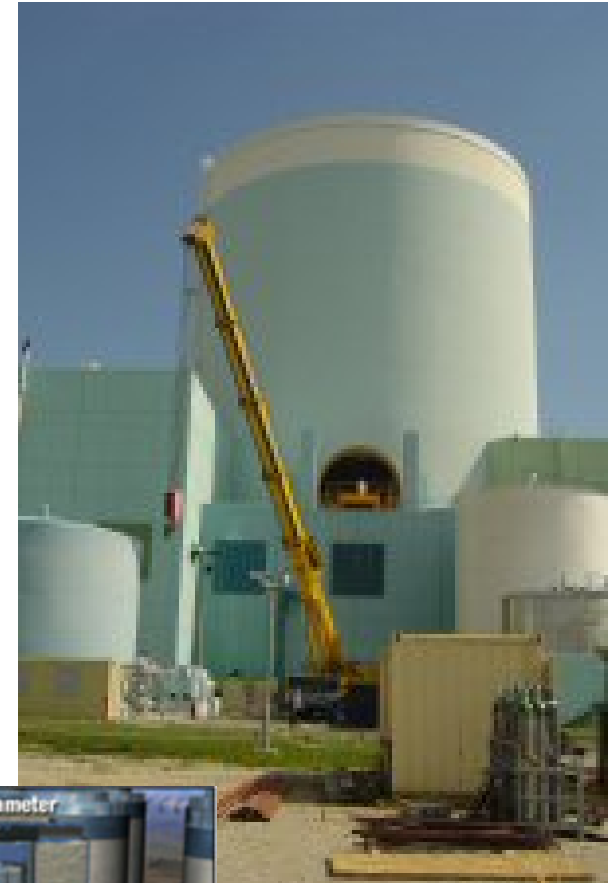


Jedrski odpadki - še malo drugače

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 zabojnikih (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 zabojnik 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!!!**

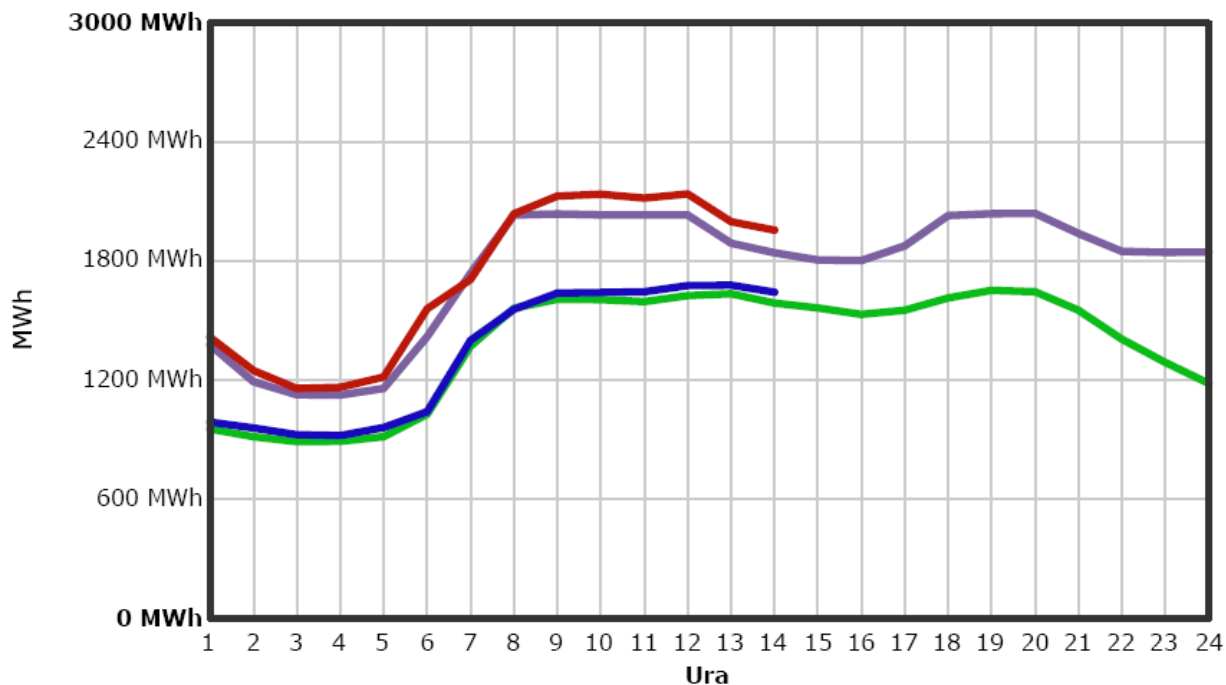
Poraba prostora

- 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

Shranjevanje energije in energijske pretvorbe ter Nekaj energetskega scenarijev za Slovenijo

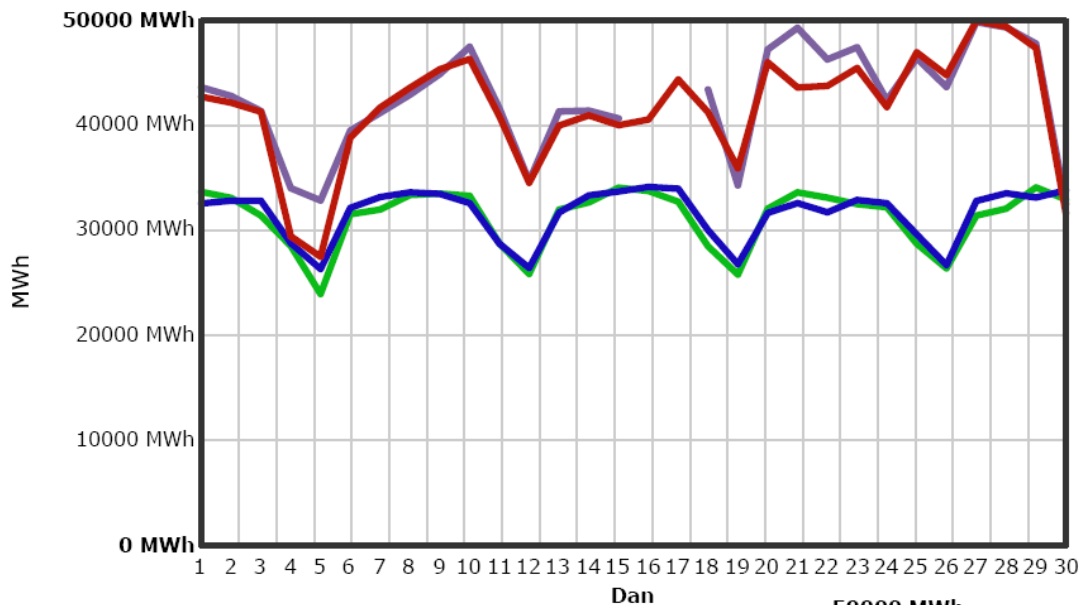
dnevna proizvodnja in poraba
elektrike 8.11.2010 (MWh/h)



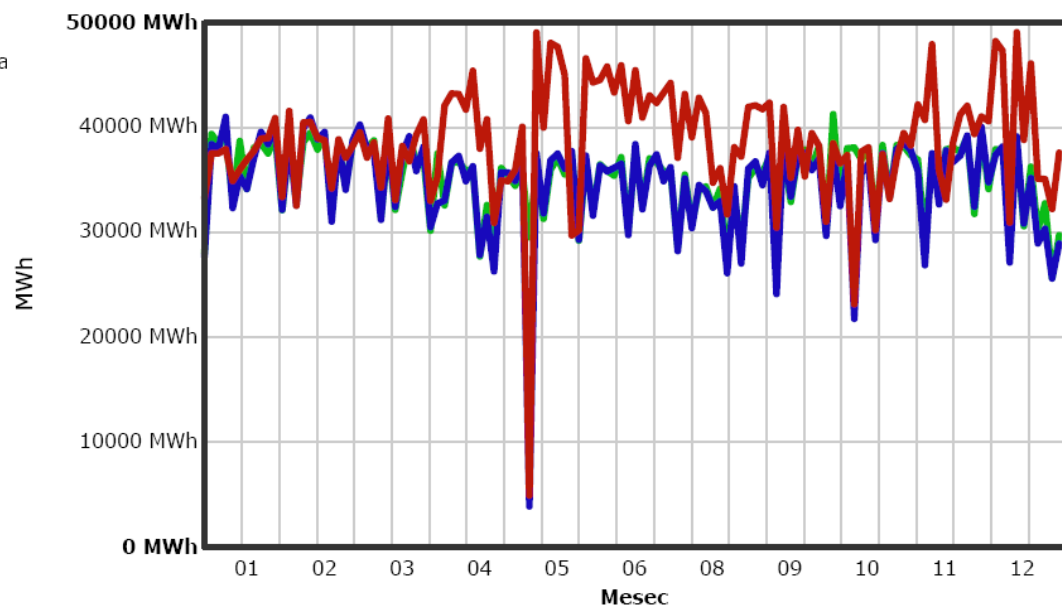
vir: www.eles.si

● Predviden prevzem ● Dejanski prevzem ● Predvidena proizvodnja ● Dejanska proizvodnja

mesečna proizvodnja in poraba elektrike oktober 2010 (MWh/dan)



● Predviden prevzem ● Dejanski prevzem ● Predvidena proizvodnja



● Predviden prevzem ● Dejanski prevzem ● Predvidena proizvodnja ● Dejanska proizvodnja

letna proizvodnja in poraba elektrike 2008 (MWh/dan)

Zbiralniki energije

Kemični, elektrokemični

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

Biološki

- hrana

Električni

- kondenzator

Mehanski

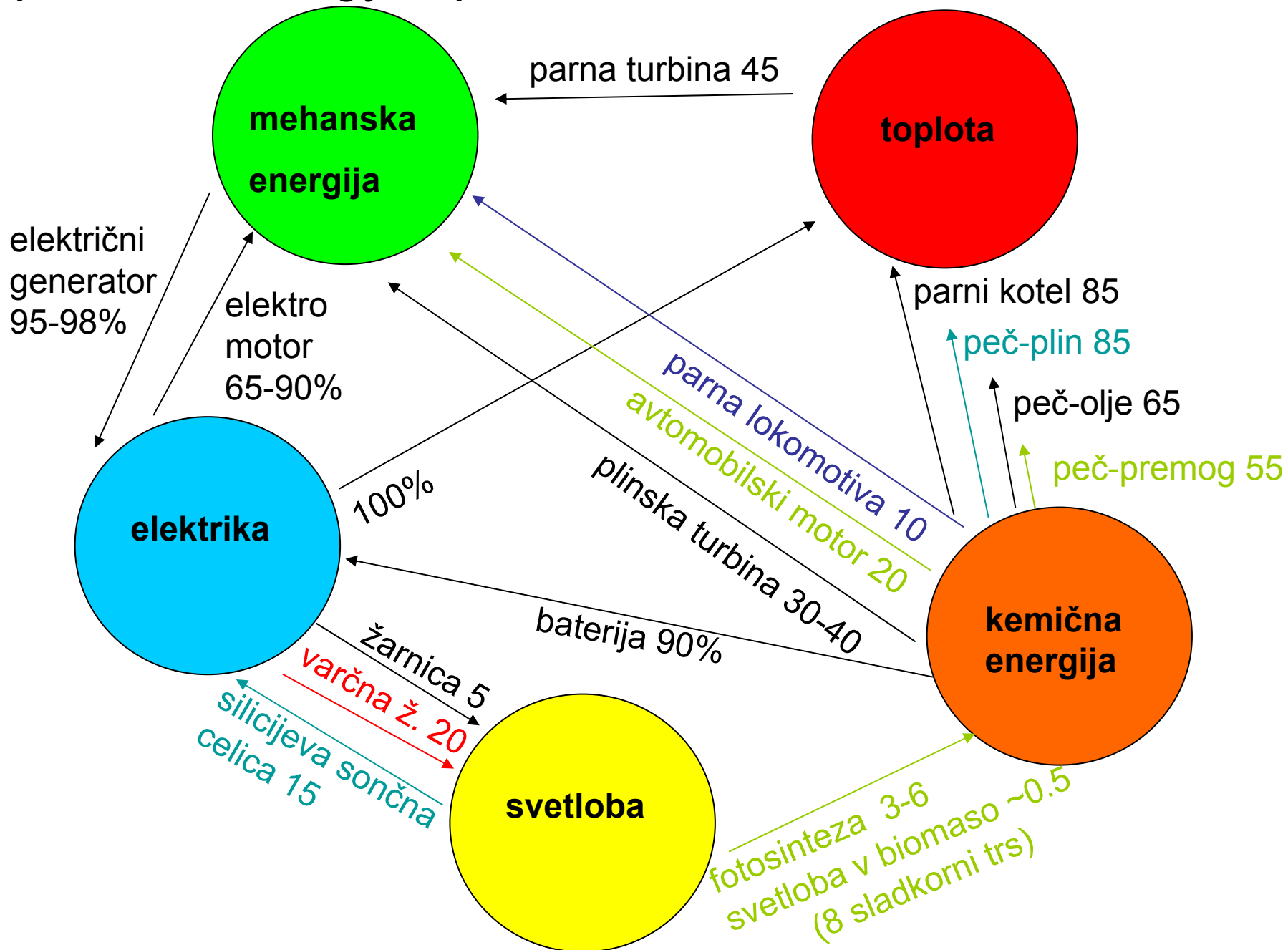
- vztrajnik, stisnjen zrak

Toplotni

- kamen



tipični izkoristki energijskih pretvorb



Estimated Levelized Cost of New Generation Resources, 2016.

ocene so
narejene
za ZDA

Za ostale
dele sveta
so lahko
številke
tudi precej
drugačne.

Odvisno
od
razpoložljivi-
vosti virov.

| Plant Type | Capacity Factor (%) | U.S. Average Levelized Costs (2008 \$/megawatthour) for Plants Entering Service in 2016 | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---|-----------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | | Levelized Capital Cost | Fixed O&M | Variable O&M (including fuel) | Transmission Investment | Total System Levelized Cost |
| Conventional Coal | 85 | 69.2 | 3.8 | 23.9 | 3.6 | 100.4 |
| Advanced Coal | 85 | 81.2 | 5.3 | 20.4 | 3.6 | 110.5 |
| Advanced Coal with CCS | 85 | 92.6 | 6.3 | 26.4 | 3.9 | 129.3 |
| Natural Gas-fired | | | | | | |
| Conventional Combined Cycle | 87 | 22.9 | 1.7 | 54.9 | 3.6 | 83.1 |
| Advanced Combined Cycle | 87 | 22.4 | 1.6 | 51.7 | 3.6 | 79.3 |
| Advanced CC with CCS | 87 | 43.8 | 2.7 | 63.0 | 3.8 | 113.3 |
| Conventional Combustion Turbine | 30 | 41.1 | 4.7 | 82.9 | 10.8 | 139.5 |
| Advanced Combustion Turbine | 30 | 38.5 | 4.1 | 70.0 | 10.8 | 123.5 |
| Advanced Nuclear | 90 | 94.9 | 11.7 | 9.4 | 3.0 | 119.0 |
| Wind | 34.4 | 130.5 | 10.4 | 0.0 | 8.4 | 149.3 |
| Wind – Offshore | 39.3 | 159.9 | 23.8 | 0.0 | 7.4 | 191.1 |
| Solar PV | 21.7 | 376.8 | 6.4 | 0.0 | 13.0 | 396.1 |
| Solar Thermal | 31.2 | 224.4 | 21.8 | 0.0 | 10.4 | 256.6 |
| Geothermal | 90 | 88.0 | 22.9 | 0.0 | 4.8 | 115.7 |
| Biomass | 83 | 73.3 | 9.1 | 24.9 | 3.8 | 111.0 |
| Hydro | 51.4 | 103.7 | 3.5 | 7.1 | 5.7 | 119.9 |
| | | | | | | |

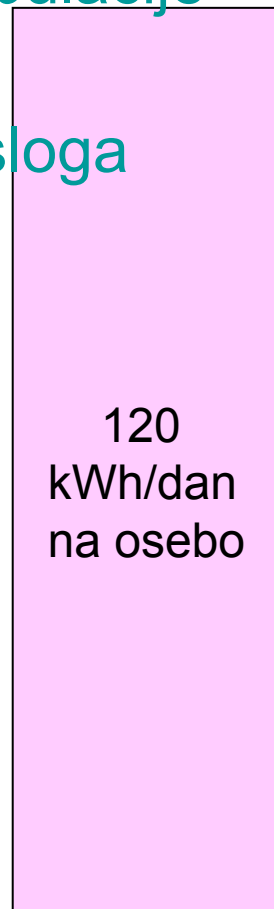
Source: Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2010, December 2009, DOE/EIA-0383(2009)

Kako pripraviti brezogljčni NEP

NEP - Nacionalni Energetski Plan

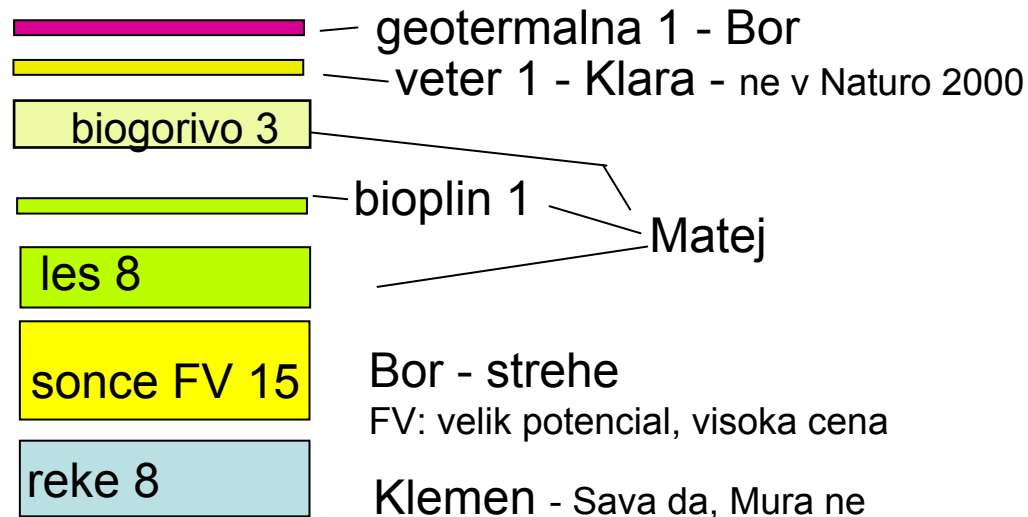
Poraba:

- zmanjšanje populacije
- sprememba življenjskega sloga
- tehnologija, učinkovitost



Oskrba:

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



sprememba življenjskega sloga

(=genetsko spreminjanje organizmov)



homo sapiens

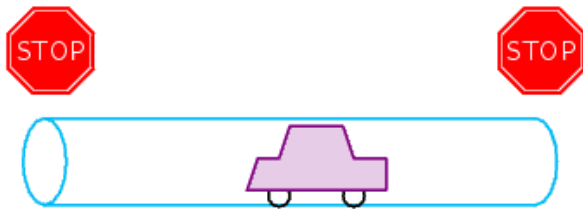
homo sapiens z vgrajenim genom za zmanjšano porabo energije (David MacKay)



Why transport uses energy



● Air resistance

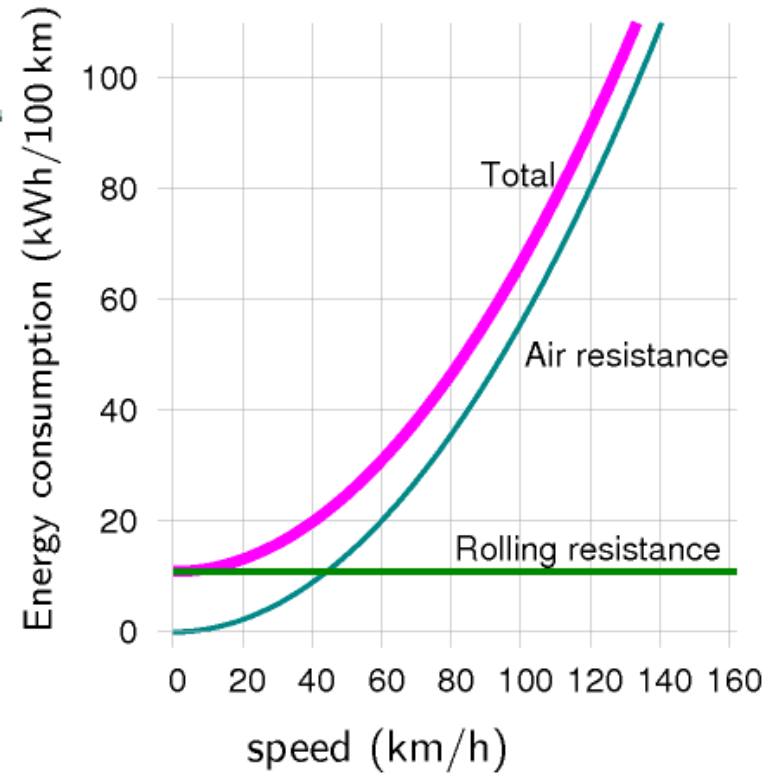


● Acceleration/deceleration

● 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 - ogrevanje

1) zmanjšanje temperature

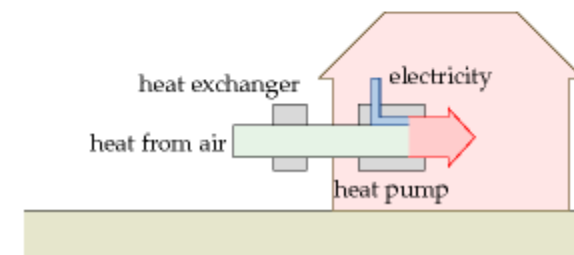
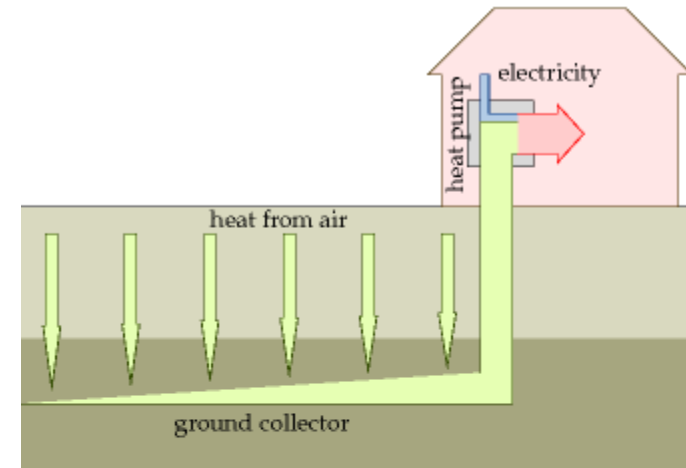


2) izolacija stavb



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

biomasa - les



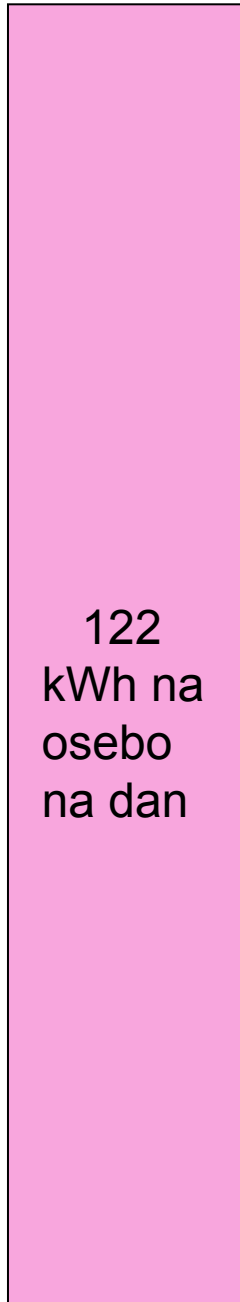
Slike:

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

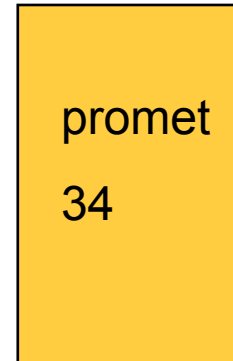
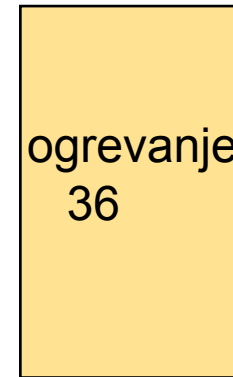
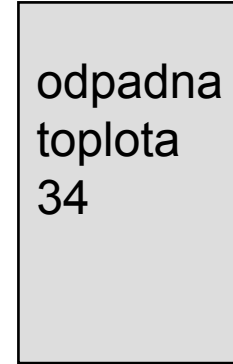
<http://epsom-ewellenergy.org.uk/2008/11/11/insulation-in-the-home/>
MacKay

SLO energija brez izpustov CO₂

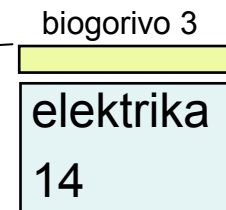
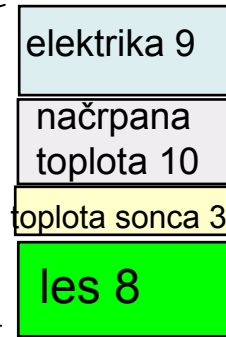
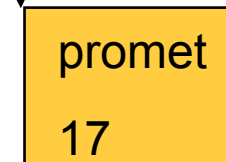
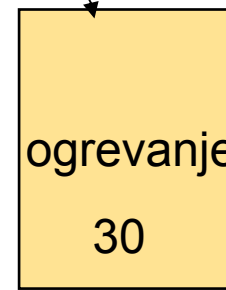
NEP Nacionalni Energetski Plan



Poraba



Tehnologija, učinkovitost



učinkovitost

učinkovitost

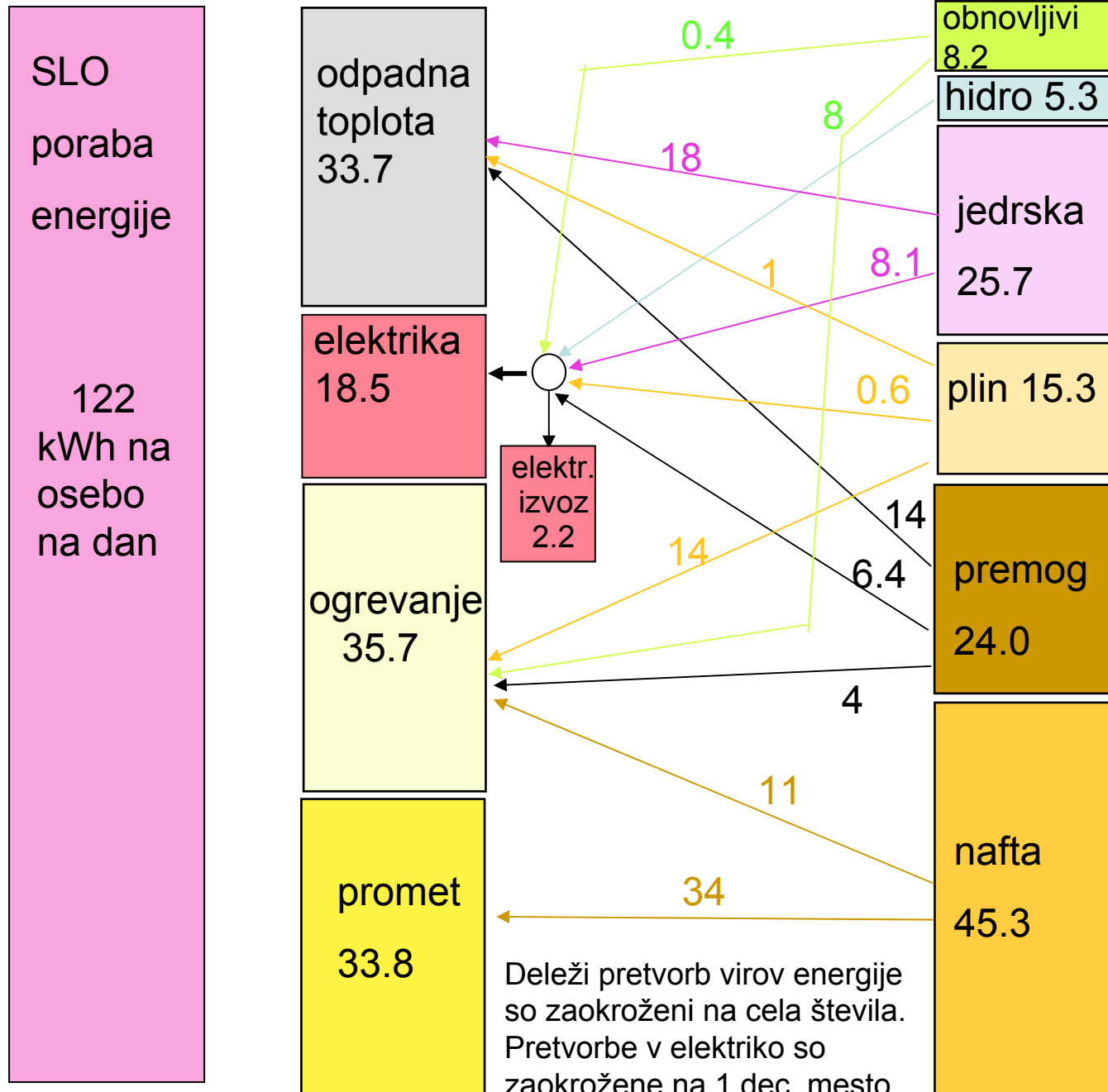
Ključne ideje

boljša izolacija
toplotne črpalke
2 m² kolektorjev/os
izkoristiti 80% prirastka

5% površine SLO za tovorni promet
električna vozila

Poraba

Viri



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

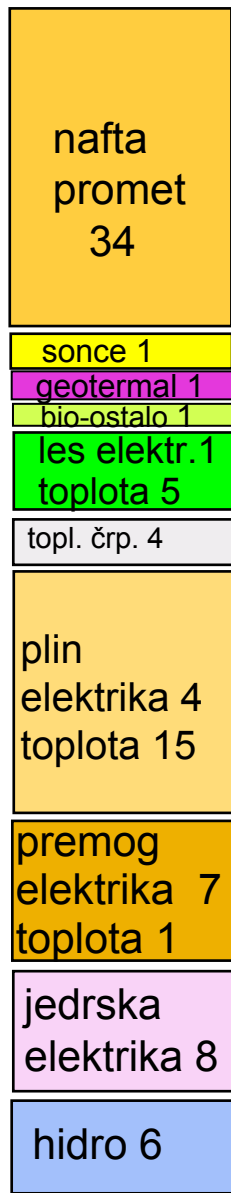
ogrevanje = ogrevanje+ kmetijstvo+ industrija (neelektrična poraba)

Izgube elektrike in koristne toplote pri transformaciji niso napisane

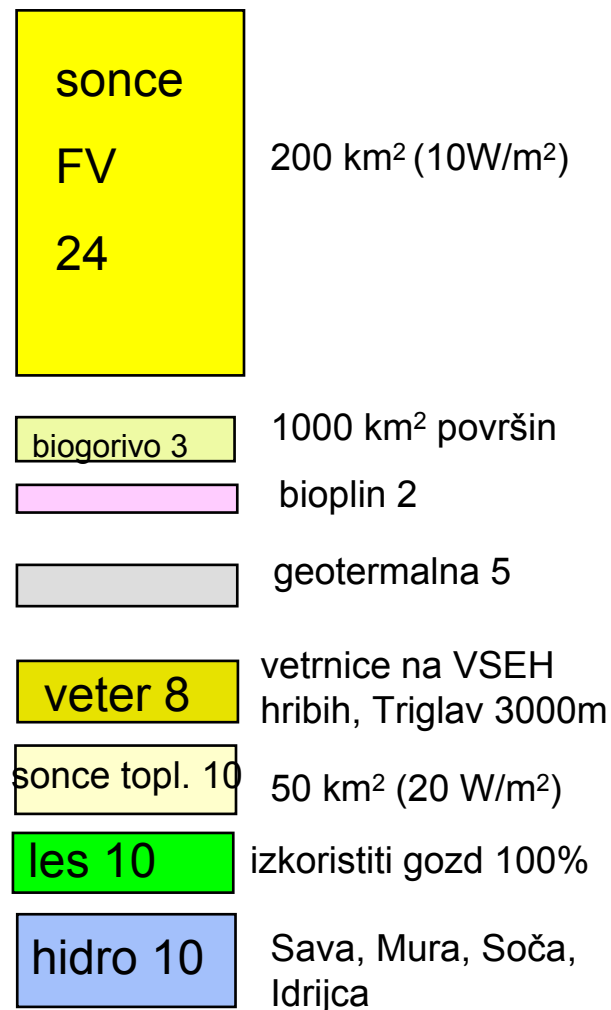
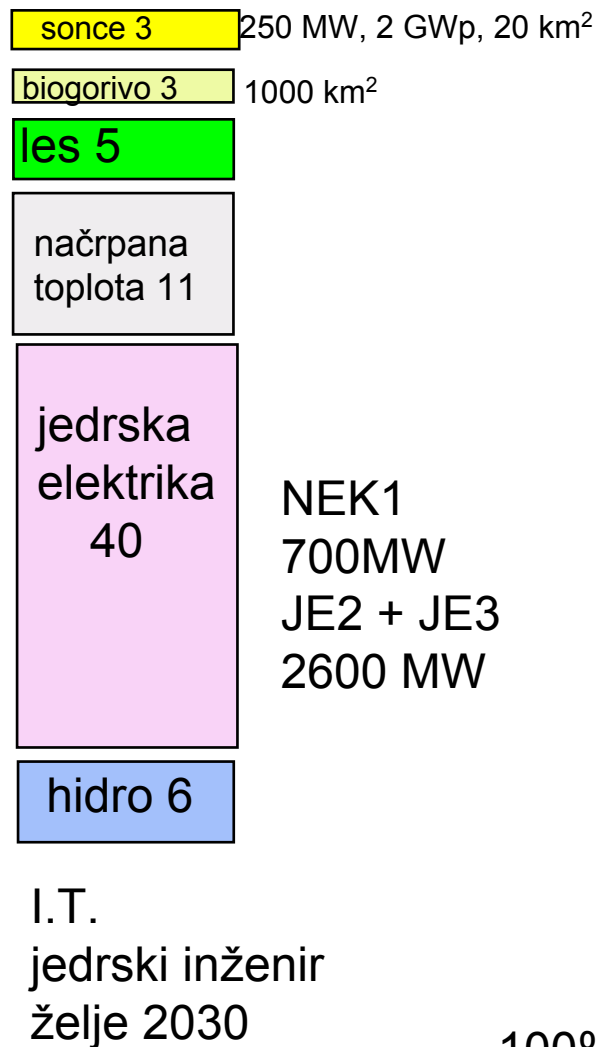
Deleži pretvorb virov energije so zaokroženi na cela števila. Pretvorbe v elektriko so zaokrožene na 1 dec. mesto.

vir: statistični letopis 2009

Nekaj energetskih načrtov (kWh/dan/osebo)



I.T. napoved 2020



100% obnovljivi,
lastni viri - zeleno
za vsako ceno

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

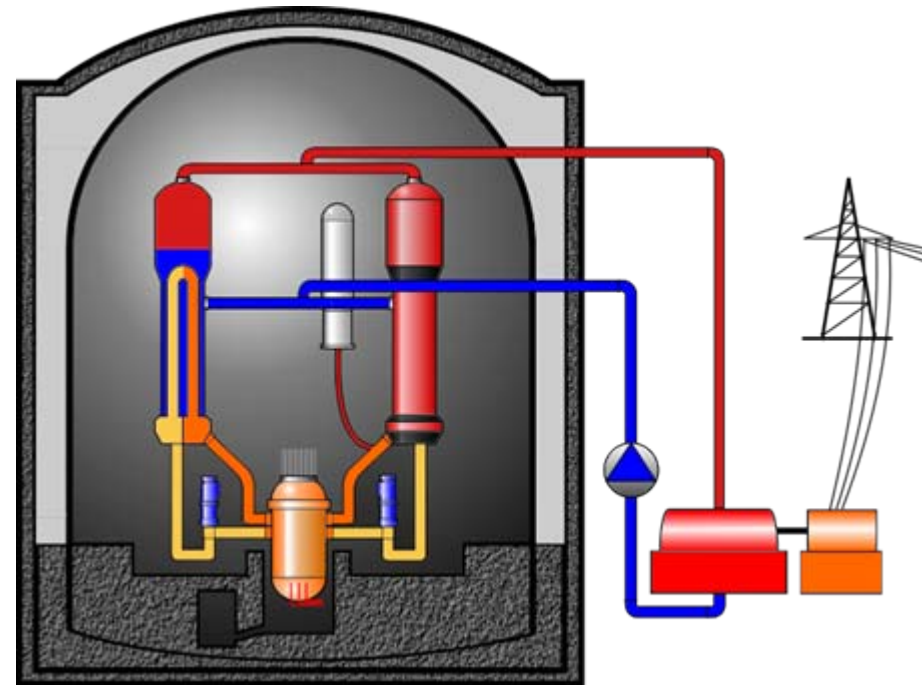
literatura:

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

Poglavja 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, Toplota - Poglavje Termodinamika



Jedrska fizika - osvežitev

Semiempirična masna enačba opisuje maso jedra z masnim številom A in vrstnim številom Z :

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

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

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

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

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

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

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

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

povprečna vez. energ. na nukleon

*

št. nukleonov

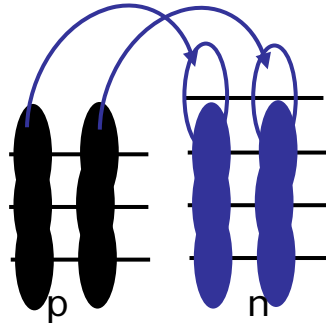
prispevek nukleonov na površini; slabše vezani;

$$V \propto r^3 \propto A; S \propto r^2 \propto A^{2/3}$$

elektrostatski odboj med protoni;

$$\propto Z^2 e^2 / 4\pi \epsilon_0 r^3 \propto Z^2 / A^{1/3}$$

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

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

Znani pojmi

| | |
|---|--|
| gostota nevtronov | N |
| gostota jeder | n |
| hitrost nevtronov | v |
| mikroskopski presek za sipanje, absorbcijo, fisijo... | σ |
| makroskopski presek | $\Sigma = \sigma n$ (m ⁻¹) |
| nevtronski fluks | $\Phi = N v$ (nevtronov/m ² /s) |
| povprečna prosta pot nevtrona | 1/ Σ |

hitrost reakcije (št. reakcij na enoto časa) = (N v dS) (n σ dx) dS presek tarče, dx - debelina tarče
 = (N v) (n σ) dV jedrav se v tarči ne prekrivajo
 = $\Phi \Sigma$ dV

radioaktivni razpadi

| | |
|--------------------|--|
| razpadna konstanta | λ (s ⁻¹) |
| aktivnost | $A = \lambda n(t)$ (razpadi/s= Becquerel [Bq]) 1 Curie [Ci] = 3.7 x 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 |
| | Cezij-137 | 30 let |

Aktivnost: granit - 10²-10³ Bq/kg

vir ~10⁵-10⁶ Bq - zaščita ni potrebna

rabljen gorivni element ~10¹³⁻¹⁴ Bq

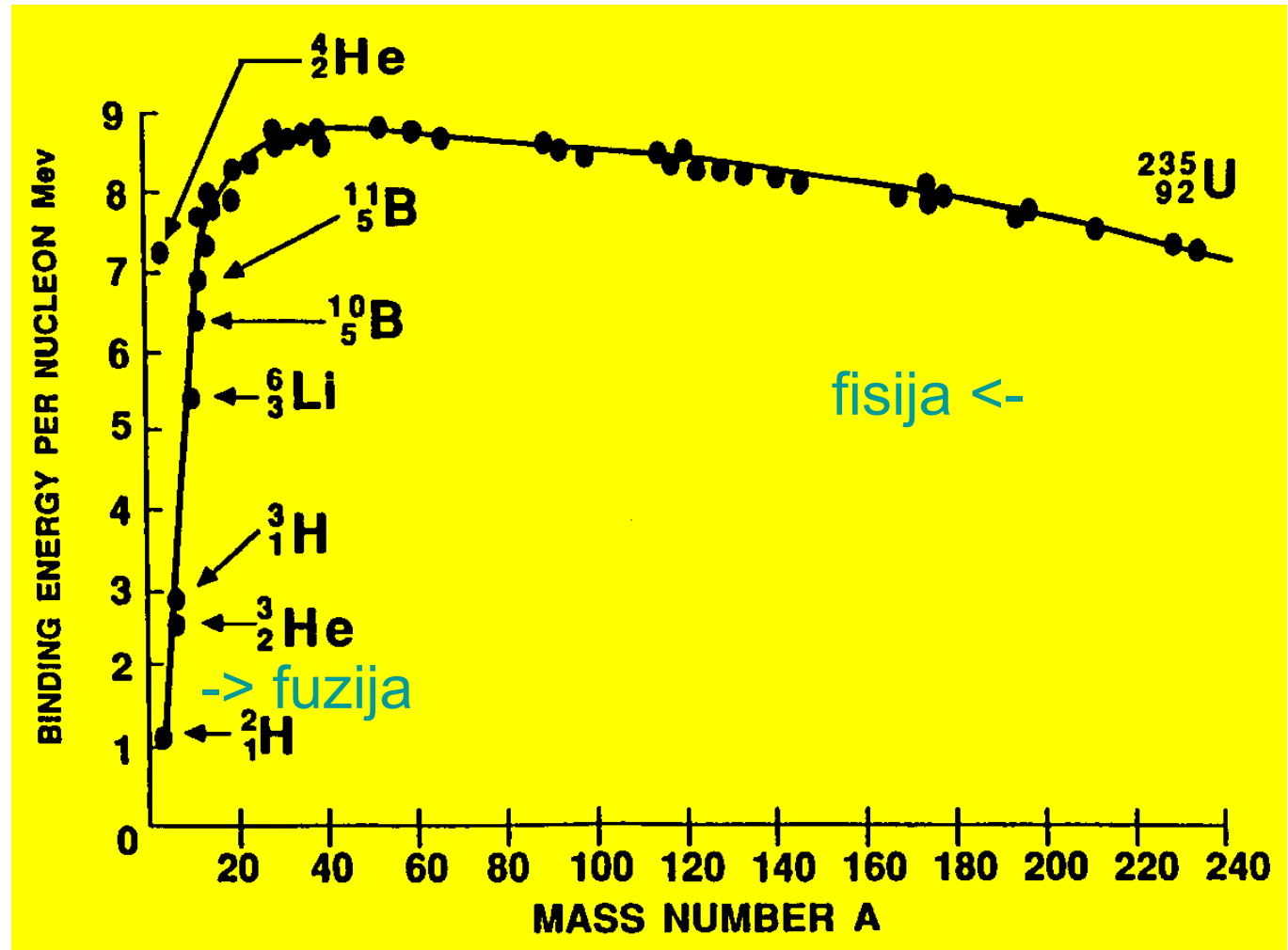
Vezavna energija/nukleon

Kandidati za fisijo z nizko energijskimi nevtroni:

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

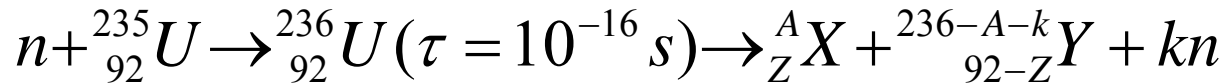
Pri zajetju nevtrona z zanemarljivo W_k , se sprosti energija parjenja ($\sim w_4 \delta / A^{1/2}$)

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 $\sim 2.2 \text{ km/s}$

$$W_{\text{zač}} = m_n c^2 + W_k^n + M(235, 92) c^2$$

$$W_{\text{kon}} = M(X) c^2 + M(Y) c^2 + k m_n c^2 + W_k$$

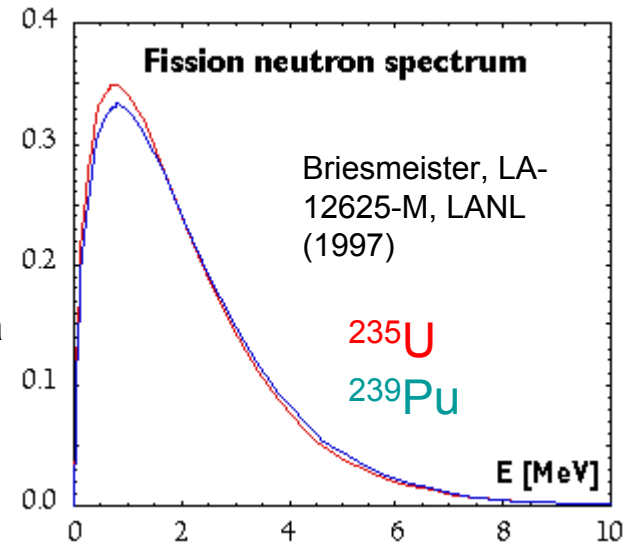
W_k : skupna kinetična energija končnih jeder in n

št. nukleonov v začetnem in končnem stanju je enako

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

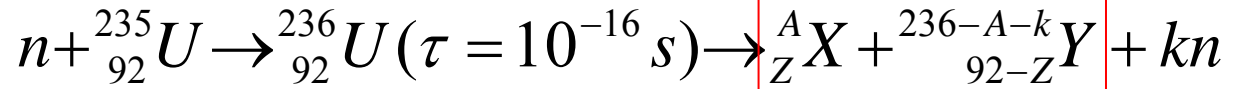
(primer $A=120, Z=45$)

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



| Porazdelitev sproščene energije: | |
|----------------------------------|----------|
| razcepki | 165 MeV |
| nevtroni | 5 MeV |
| γ (fisija+zajetje) | 12 MeV |
| zaostali β, γ | 15 MeV |
| antinevtrini | (10 MeV) |

Razcepki fisije



razcepki v JT:

- sproščanje zaostale toplote zaradi nestabilnosti

razcepkov:

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

P_0 - topl. moč reaktorja med delovanjem

t - čas od zaustavitve reaktorja (s)

t_0 - čas delovanja pred ustavitvijo (s)

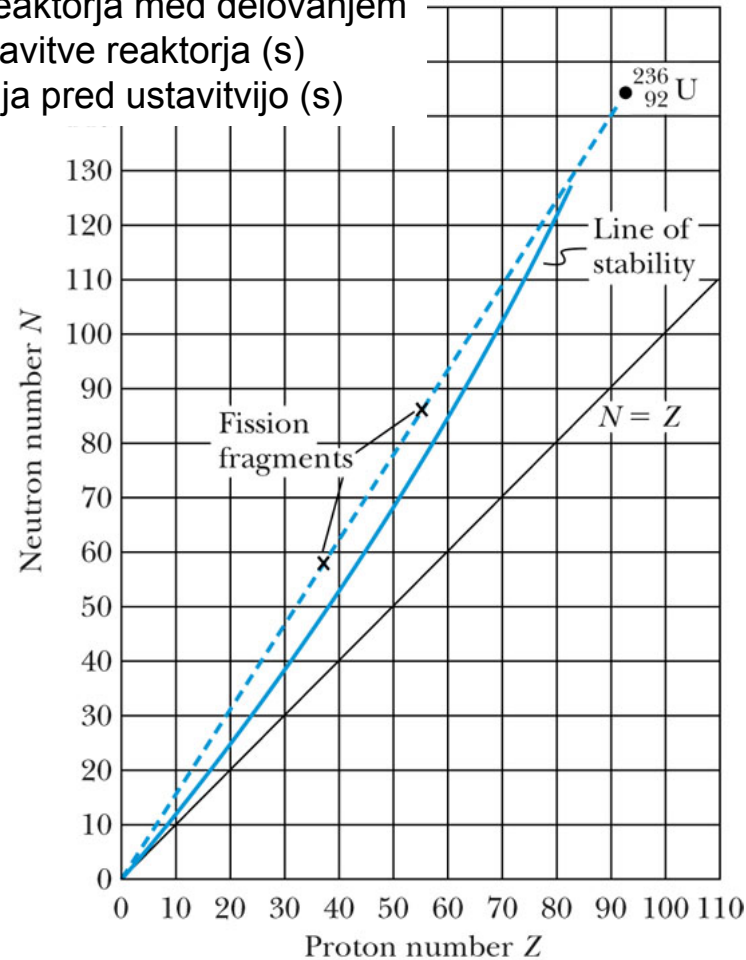
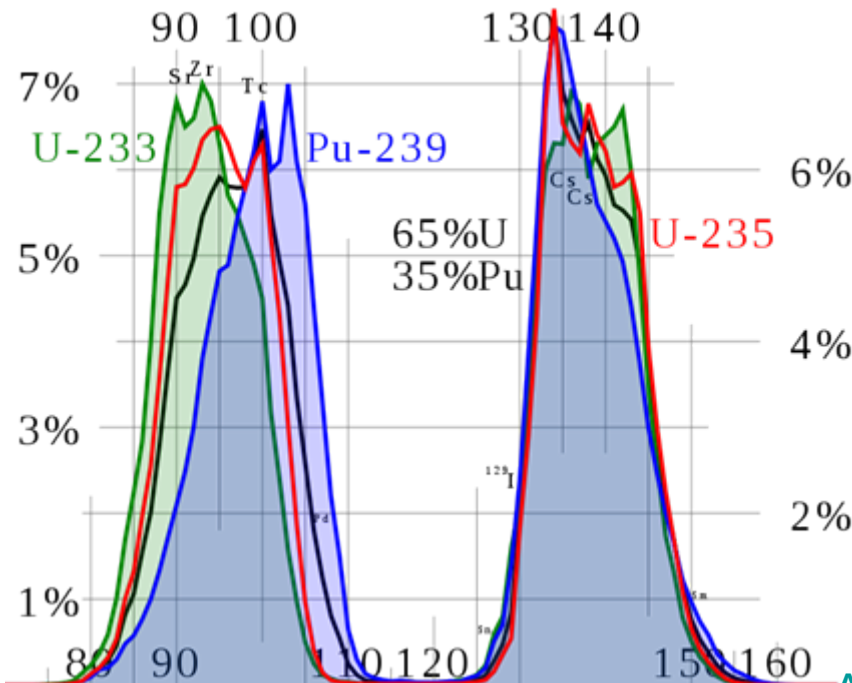
- radioaktivnost goriva

- zakasneli nevtroni

- nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone

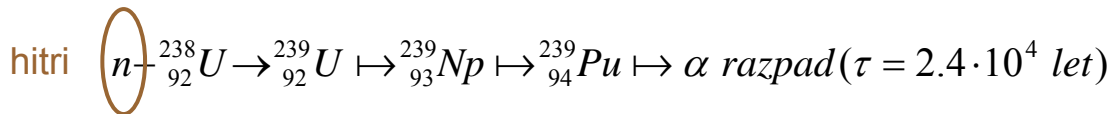
(${}^{135}\text{Xe}$, ${}^{145}\text{Sm}$)

porazdelitev razcepkov

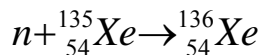


Ostale jedrske reakcije nevtronov

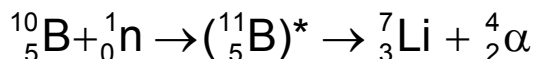
zajetje:



če naj se reakcija sama vzdržuje (v gorivu, ki vsebuje znaten ali večinski delež ${}^{238}\text{U}$) \rightarrow nastale n pri cepitvi ${}^{235}\text{U}$ je potrebno upočasniti

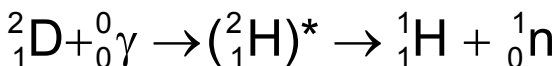
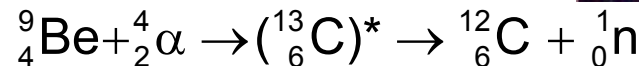
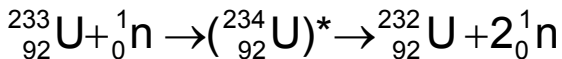


presek za zajetje term. nevtrona $\sim 2\text{-}3 \cdot 10^6$ barn



presek za zajetje term. nevtrona ~ 4000 barn

1n \rightarrow 2n

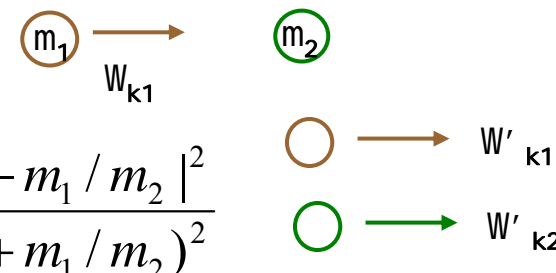
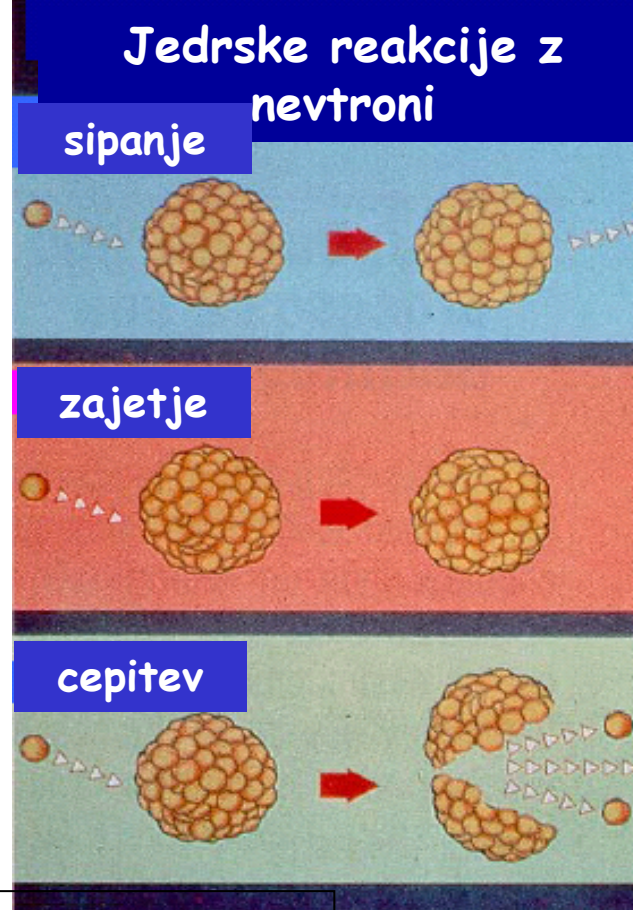


nastanek n

sipanje:

moderatorji:

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



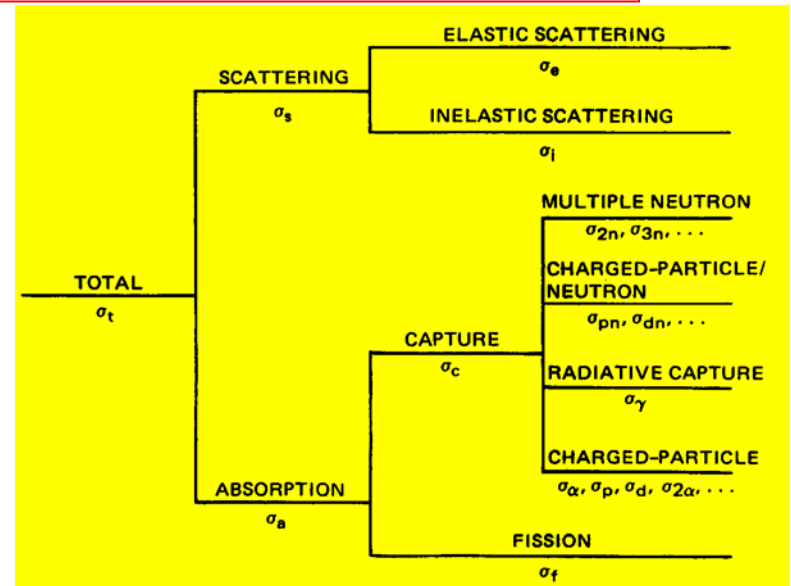
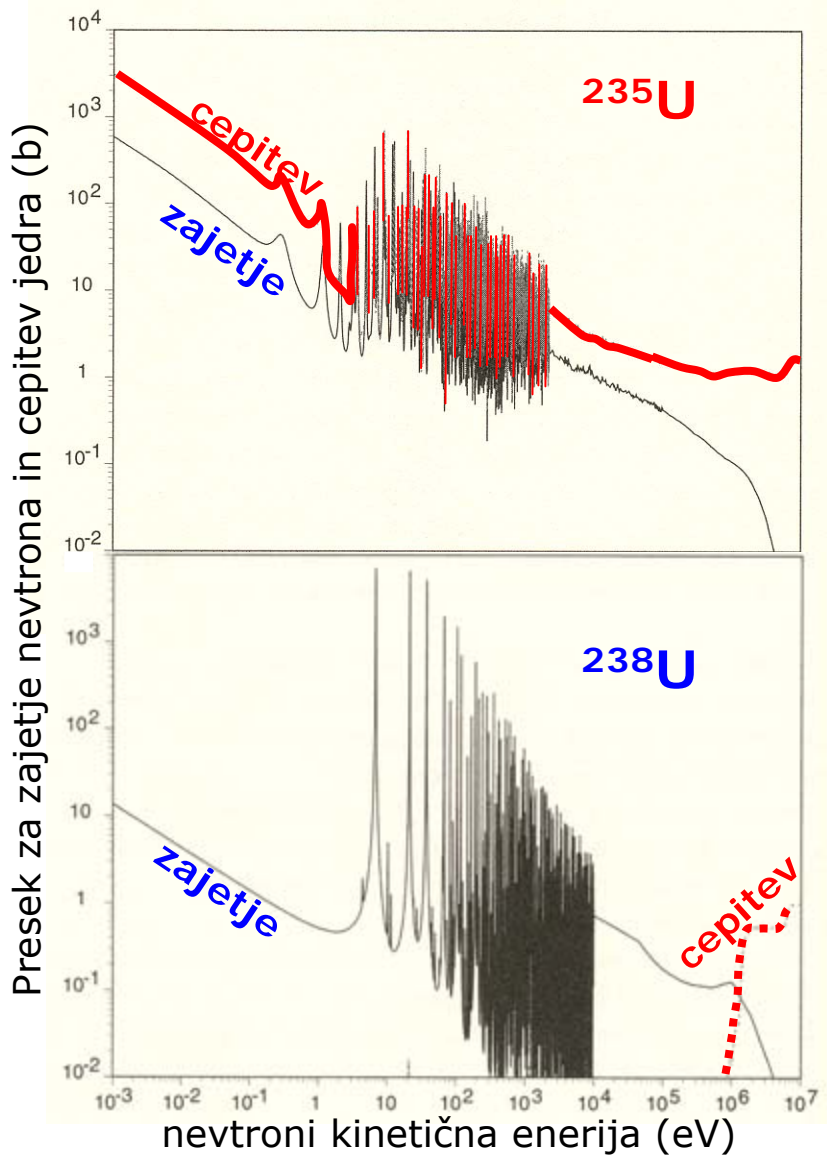
Presek za zajetje n in cepitev

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

Presek za cepitev

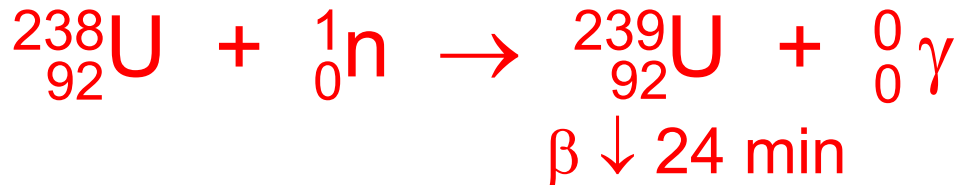
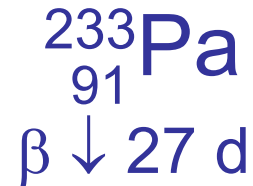
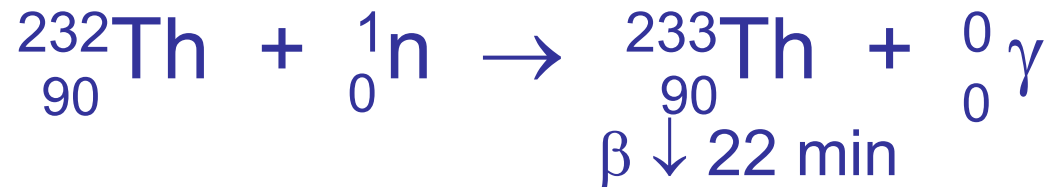
^{238}U : $\sigma_f \sim 1 \text{ b}$ za $E_n > 1 \text{ MeV}$
 $\approx 0 \text{ b}$ za $E_n < 1 \text{ eV}$
 pretežno: sipanje ($\sim 8\text{b}$) + zajetje

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



Zajetje => gorivo (oplodni reaktor)

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



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 kontrolne palice,
- detektor sevanja,
- 2 "varnostna sistema"

http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/cp-1_critical.htm



kladivo

Kontrolirana verižna reakcija - pred Fermijem

Oklo - Gabon (danes rudnik urana)

16 "reaktorjev"

Pred 2 milijardama let - delovali so več stotisoč let

Moč ~100 kW

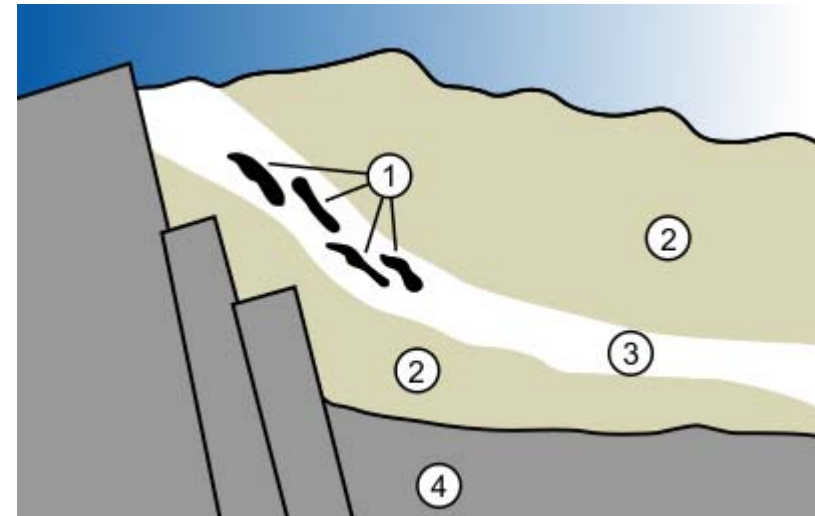
1972 - Francozi ugotovijo "premajhen" delež ^{235}U v rudi.
(do min 0.44% namesto 0.72%, kot v drugih rudah na planetu)

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:



za fisijo zadošča nevtron z zelo majhno energijo.

Prednost nizko energijskih nevtronov ($\sim\text{eV}$) 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 $\sim 0.025\text{ eV}$?

Moderatorji - upočasnjevanje nevtronov

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 | 0.0.27 | 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 | |
|------------------|--|----------|
| ²³⁸ U | 99.275% | 12000 Bq |
| ²³⁵ U | 0.72% | 600 Bq |
| ²³⁴ U | 0.0054% | 12000 Bq |

Nevtroni v reaktorju - enostavna slika:

Pomnoževalni koeficient- 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 nevtroni vseh energij)

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

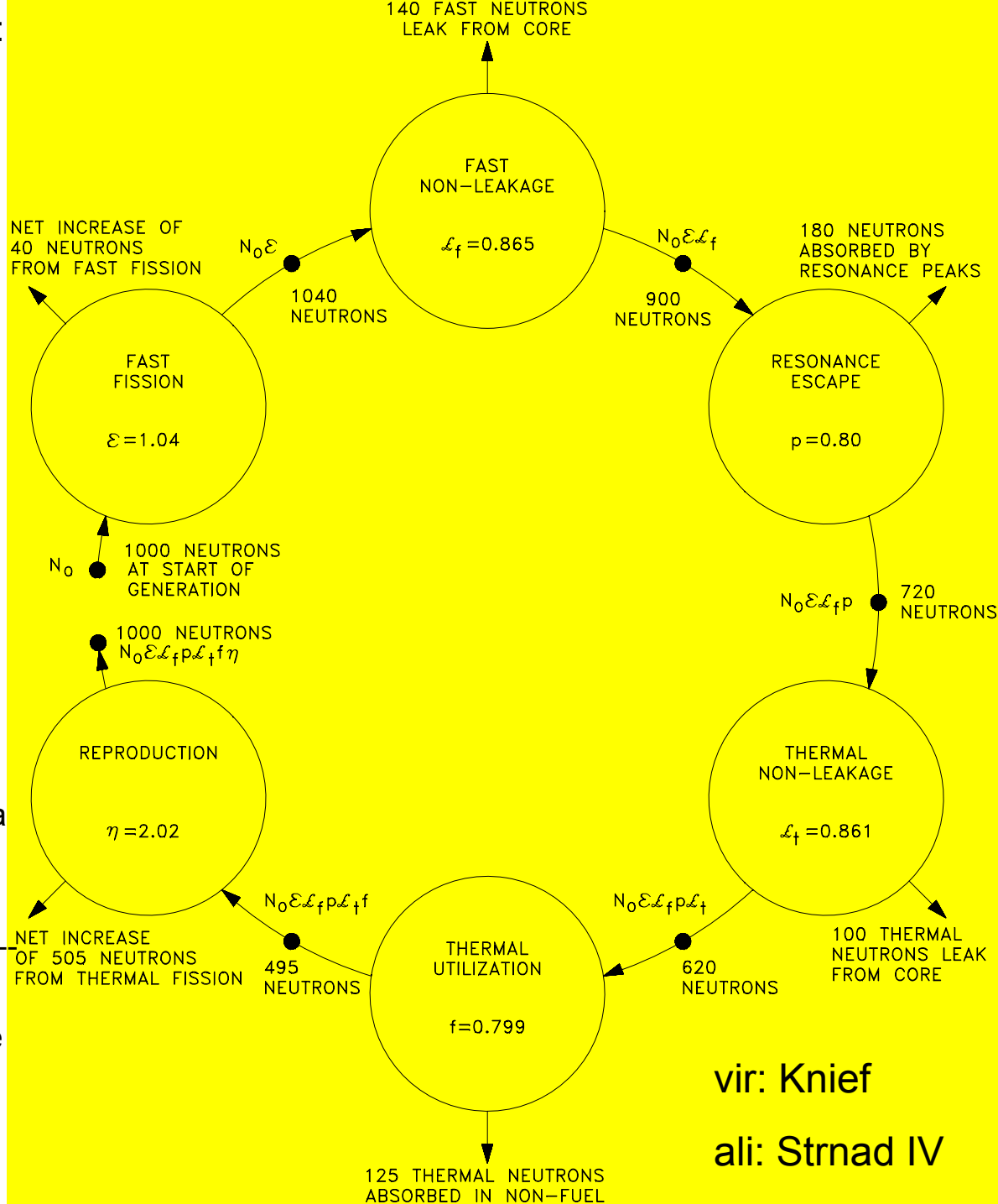
p - verjetnost za pobeg resonančni absorpciji pri zaviranju nevtronov

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

$\eta = \frac{\text{(št. hitrih n, nastalih pri cepitvi s term. n)}}{\text{(št. term. n, ki se absorbirajo v gorivu)}}$

P_f - verjetnost, da hiter nevtron ne pobegne iz reaktorja

P_t - verjetnost, da termičen nevtron ne pobegne iz reaktorja



vir: Knief

ali: Strnad IV

$$\eta = \frac{\sum v_i \Sigma_{f-i}}{\sum \Sigma_{a-i}} = \frac{\sum v_i n_i \sigma_{f-i}}{\sum n_i \sigma_{a-i}}$$

v_i št. nastalih nevtronov pri
cepitvi jedra i

n_i gostota jeder
izotopa/elementa i

$$f = \frac{\Sigma_{a-f}}{\Sigma_a}$$

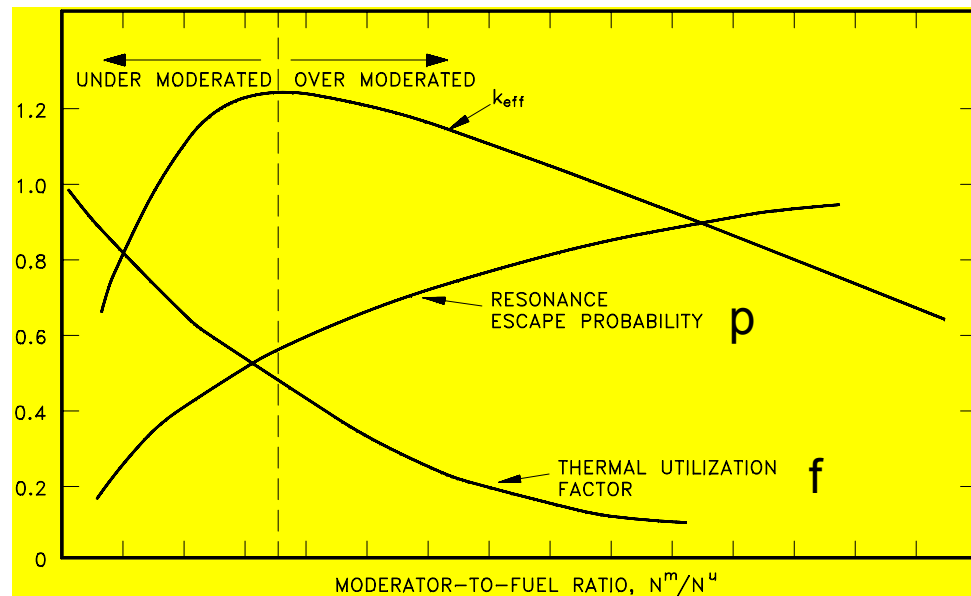
makroskopski absorbcijski presek goriva /
makroskopski abs. presek goriva, moderatorja,
struktur sredice

ε, ρ meritve

Domača naloga:
Primer 3.13 Lamarsh

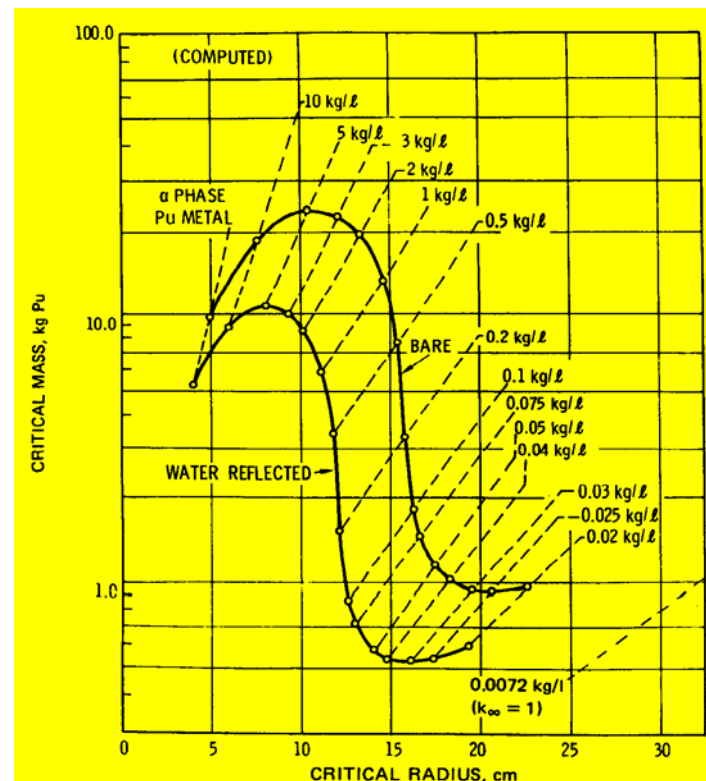
Uporaba moderatorja

- enakomerna zmes naravnega U in moderatorja ne more biti kritična (premajhen p - prevelika absorbcija nevtronov med zaviranjem)
- kosi naravnega urana v D_2O ali grafitu so lahko kritični: po fisiji nevtron zapusti gorivo, se upočasni v reaktorju in pride spet v gorivo. večji p , manjši f : delež termičnih nevtronov absorbiranih v gorivu.



"Kritična masa" plutonija v vodi (~500 g)

(v polietilenu - večja gostota H jeder, prisoten tudi C - boljši moderator od vode $m_{crit} \sim 350$ g)



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 življenjskem času nevtronov $l_p=10^{-4}$ s, se število nevtronov in moč reaktorja v 1 sekundi poveča za

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

Reaktivnost - brezdimenzijska količina - "enote"

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

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

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

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

β_{eff} definiran 2 prosojnici naprej

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

Kontrolne 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 nevtroni pri cepitvi ^{235}U

6 glavnih skupin:

$T_{1/2}$ - razpolovni čas prednika

λ_i - razpadna konstanta prednika

β_i - delež zakasnelih nevtronov skupine i v celotnem št. nastalih nevtronov 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 zakasnelimi nevtroni

življenski čas nevtronov:

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

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 zakasnelih nevtronov

$C_i(t)$ - koncentracija razcepkov, ki ob razpadu oddajo zakasneli nevtron

Kako se pri spremembi pomnoževalnega faktorja $k=1 \rightarrow k=1.001$, ter povprečnem življenjskem času takojšnjih nevtronov tlačnovodnega reaktorja $l_p=2.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ spreminja število nevtronov in moč reaktorja, če vseh 6 skupin zakasnelih 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 nevtronov

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

$$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$$

kotni fluks nevtronov 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 sipanje nevtronov 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 nevtronov v sredici reaktorja)
- časovne spremembe v neskončnem izotropnem in homogenem reaktorju...
- zanemaritev porazdelitve fluksa po energijah ali delitev nevtronov po energijah v nekaj energijskih grup

Presega okvir JTE, podrobnosti pri predmetu Radiacijska in reaktorska fizika

Kaj še vpliva na nevtronski fluks v reaktorju?

Oblika reaktorja - pobeg nevtronov

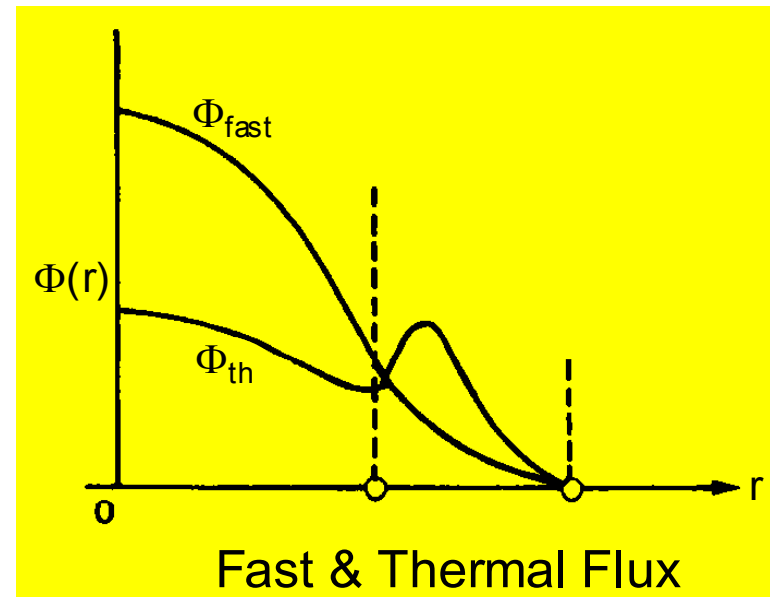
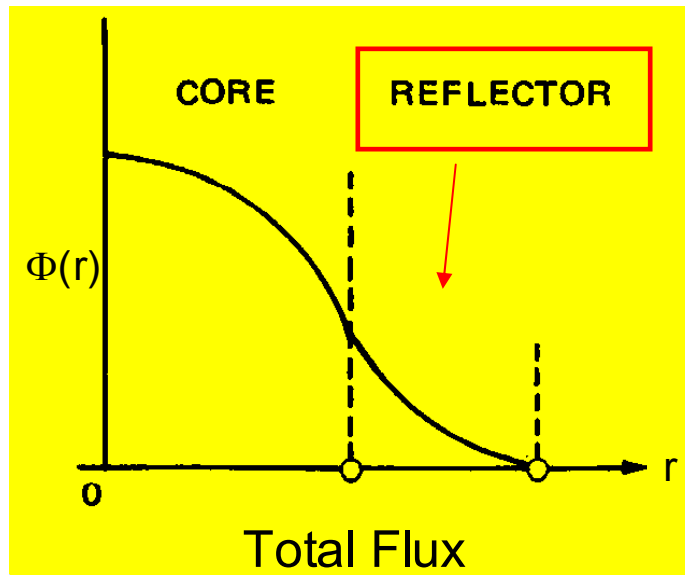
predpostavimo, da imajo vsi nevtroni enako energijo:

$$\frac{1}{v} \frac{d\Phi}{dt} = \nu \Sigma_f \Phi - \Sigma_a \Phi - D \nabla^2 \Phi$$

↑
produkcija

↑
absorbcija

↑
difuzija nevtronov -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 - negativen, če je v gorivu do ~20% ^{235}U , drugače lahko pozitiven (NEK $\sim 10^{-4}/\%$ 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 v moderatorju - negativen (BWR)

koef. moči reaktorja - upošteva vsoto vseh zgornjih prispevkov:

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

Naj bo VEDNO negativen!

(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**

- spreminjanje količine goriva (CANDU)

- absorbcija (večina reaktorjev):

kontrolne palice (srebro, indij, kadmij),

nevtronski strupi v hladilu,

borova kislina v hladilu

tlačnovodnega reaktorja

gorljivi strupi

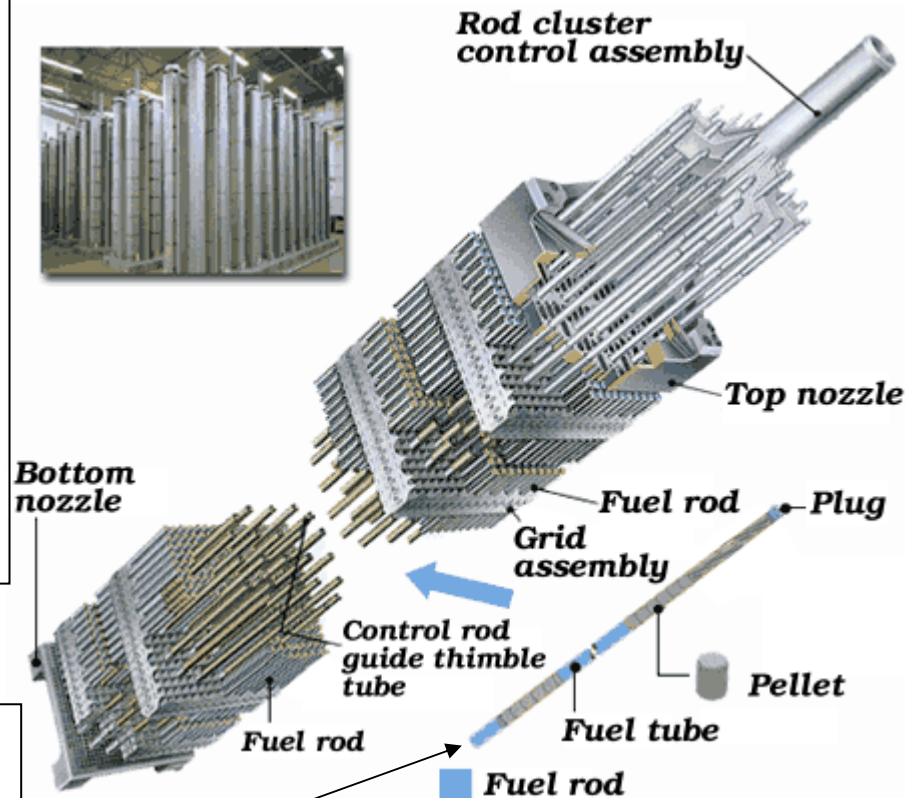
maks. koncentracija bora v hladilu ni dovolj, če je gorivo novo. V gorivo se doda "strupe" (borove spojine)

- 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 zaprta.

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

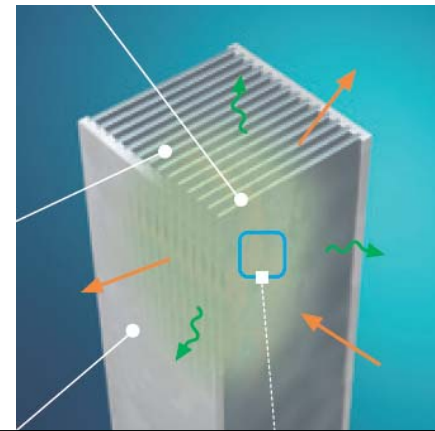
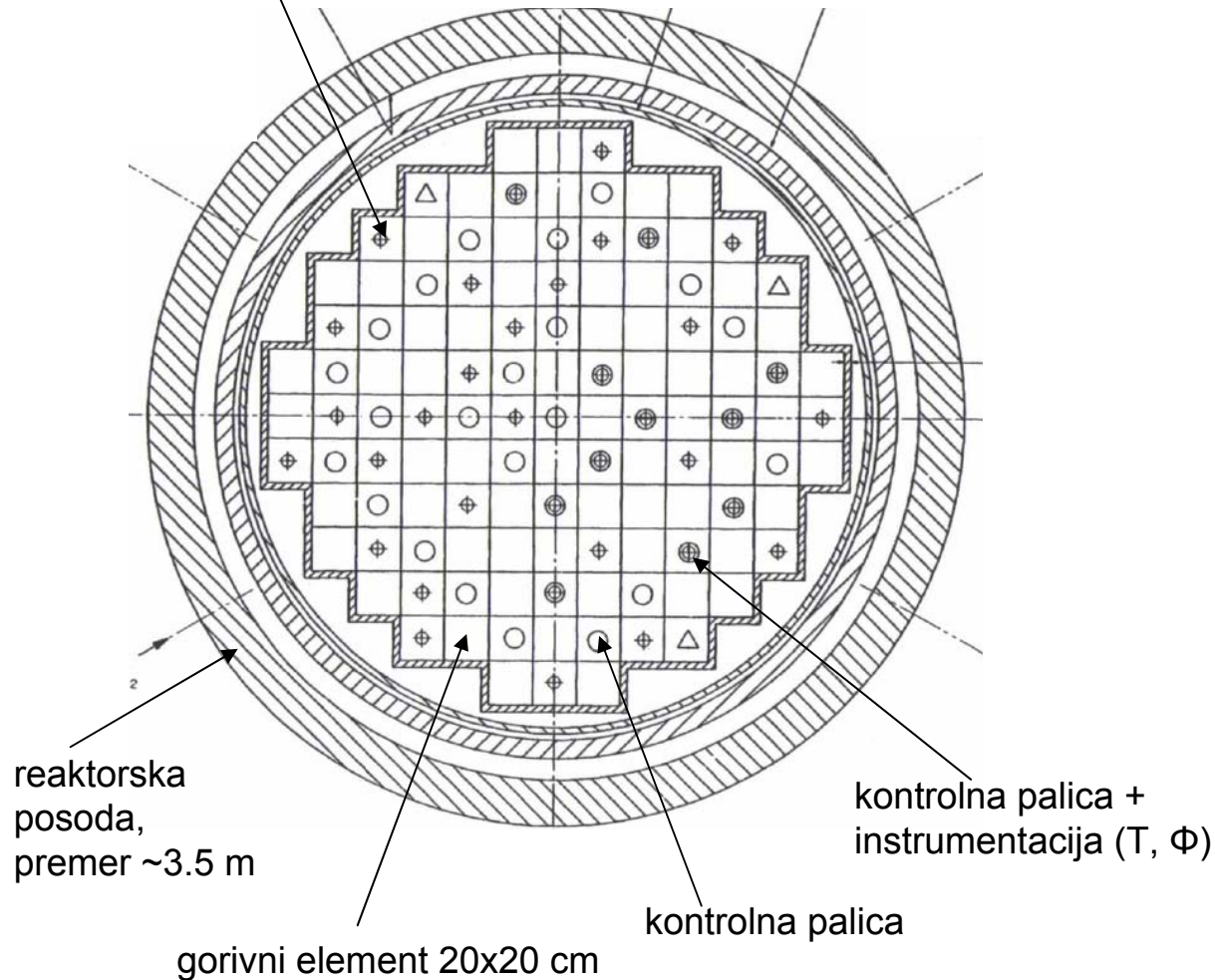


Število nevtronov in izgorevanje goriva

tloris sredice JE Krško

$$\Phi \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ n/m}^2/\text{s}$$

instrumentacija (T, Φ)



Gorivni element
raziskovalnega
reaktorja OYSTER
(TU Delft)

8x8x60 cm

9 elementov v sredici

3 MW

NEK:

28435 gorivnih palic

121 gorivnih elementov

235 gorivnih palic/element

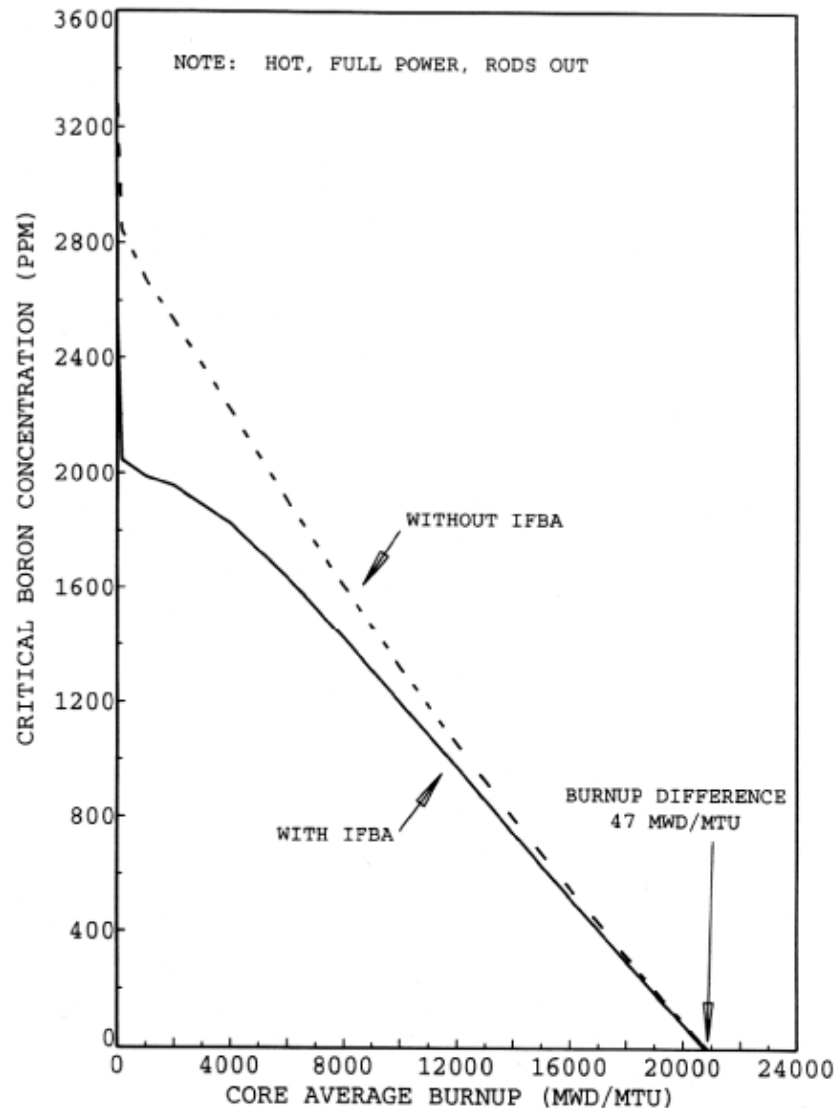
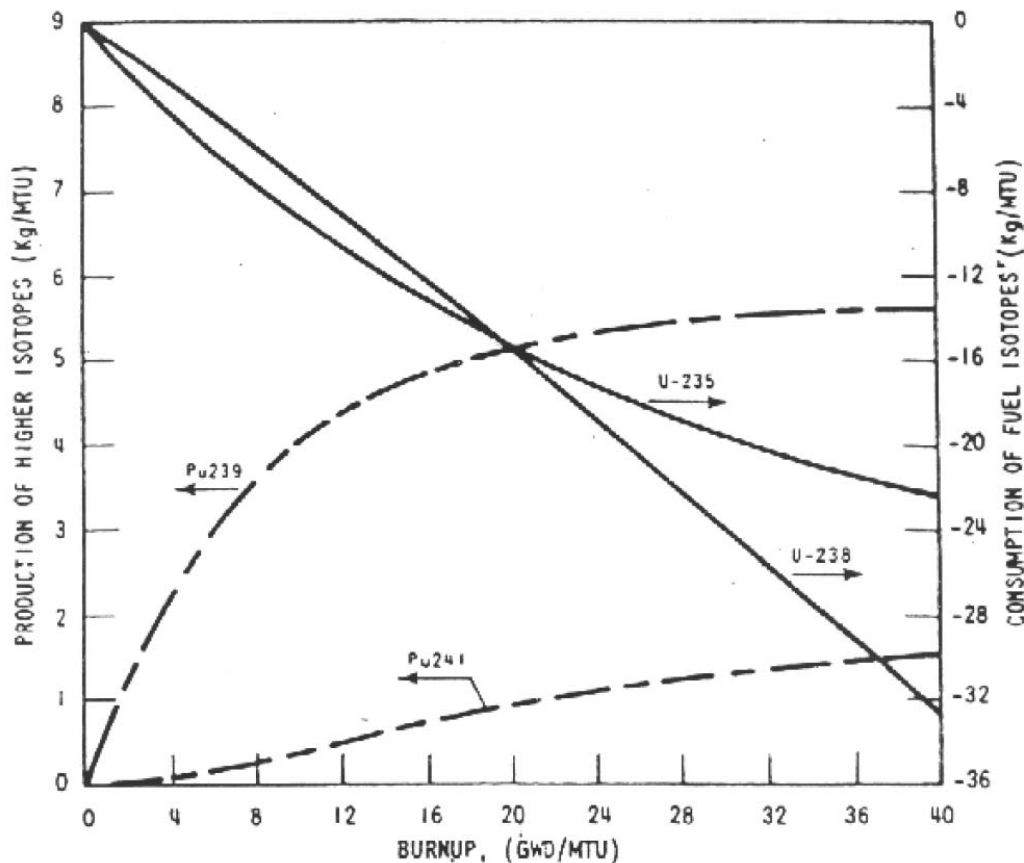
20 vodil kontrolnih palice/element

1 vodilo instrumentacije/element

Izgorevanje goriva

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

bor v hladilu - od 2000 ppm \rightarrow 0 ppm



- MWD/MTU = MWdni/metric-ton-U
- ppm - parts per million
- NEK 50 ton goriva, cikel 18 mesecev, 2000 MW \Rightarrow cikel \sim 20000 MWD/MTU
- gorivni element je v reaktorju 2-3 cikle

Izgorevanje goriva

nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone

- SAMARIJ-149

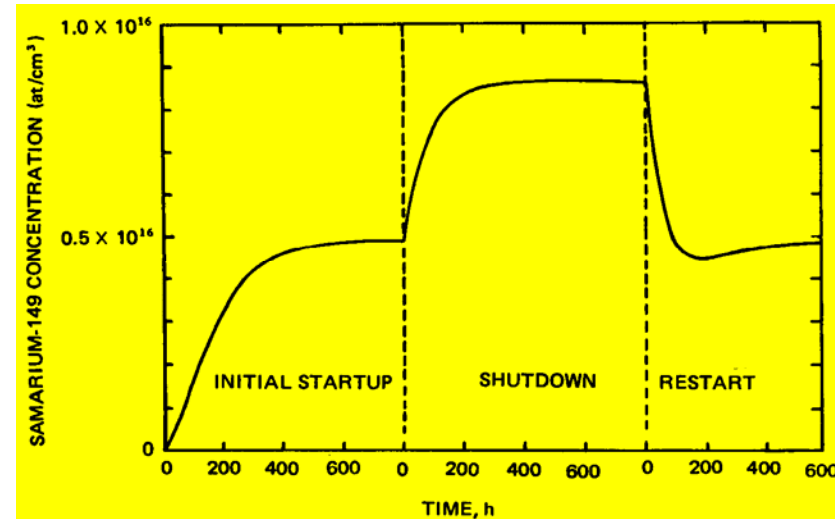
- Absorpcijski presek za termične nevtrone $\sigma_a = 41,000 \text{ b}$
- Nastanek: $^{149}\text{Nd} \rightarrow ^{149}\text{Pm} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$

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

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

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

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



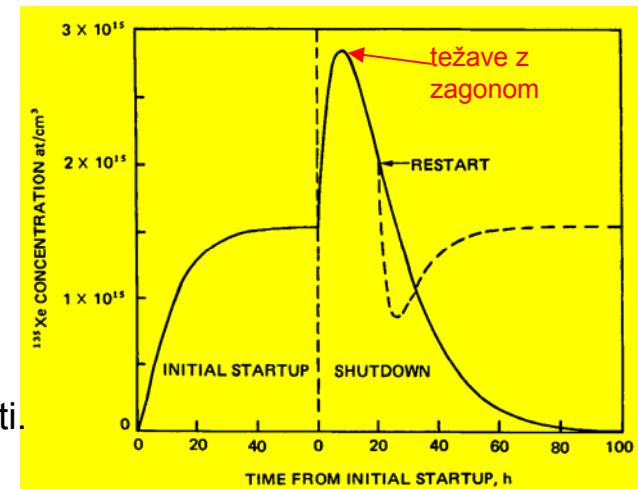
- KSENON-135

- Absorpcijski 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 $T_{1/2} < 22 \text{ s}$)

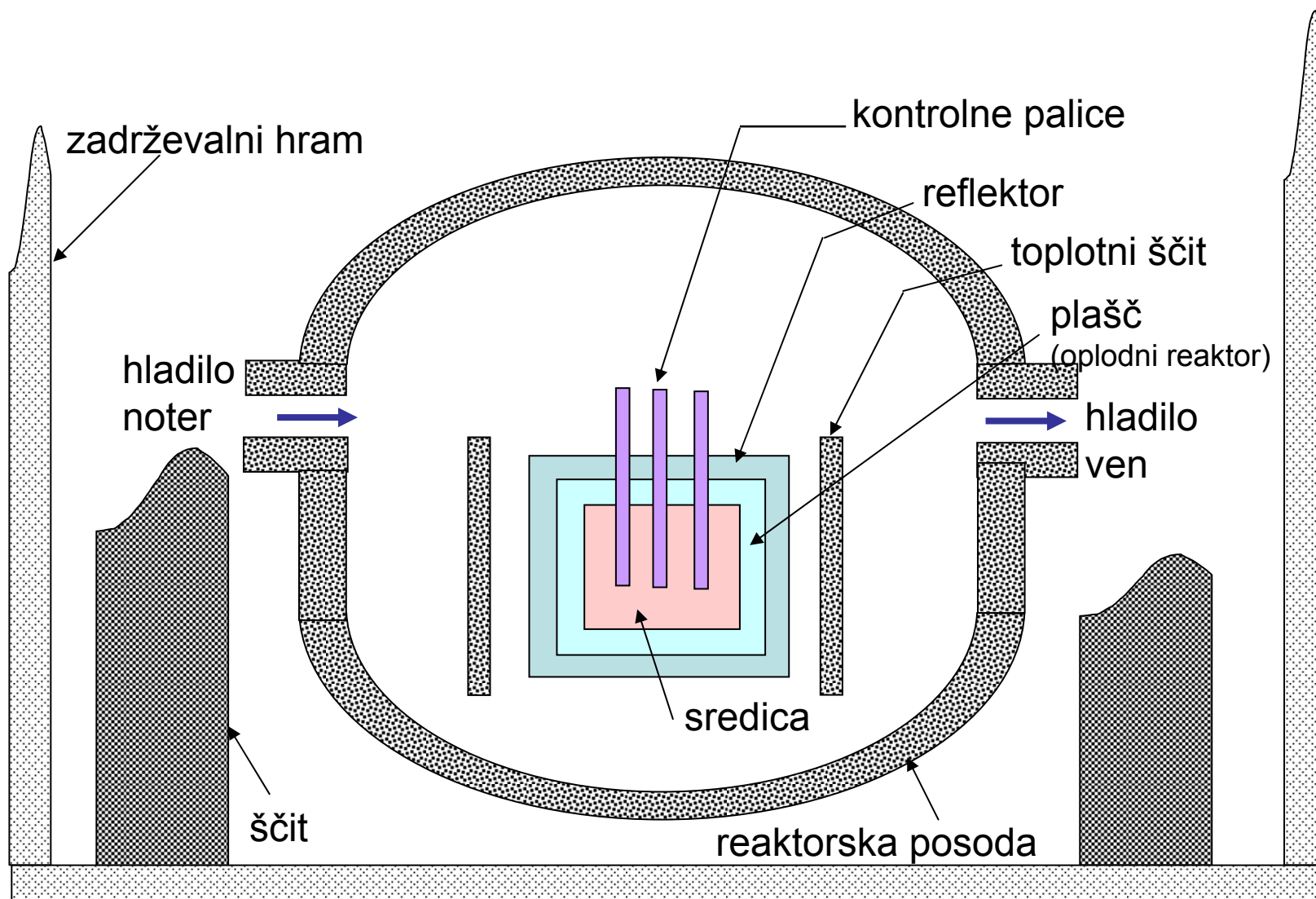
$$\frac{dI}{dt} = \gamma^{\text{Te}} \Sigma_f \Phi - \lambda^{\text{I}} I \quad I = n_{\text{I}} \quad \lambda^{\text{I}} = \ln 2 / (6.7 \text{ ur})$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma^{\text{Xe}} \Sigma_f \Phi + \lambda^{\text{I}} I - X \sigma_a \Phi - \lambda^{\text{Xe}} X \quad X = n_{\text{Xe}} \quad \lambda^{\text{Xe}} = \ln 2 / (9.2 \text{ ur})$$



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

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 (CO₂)

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

...

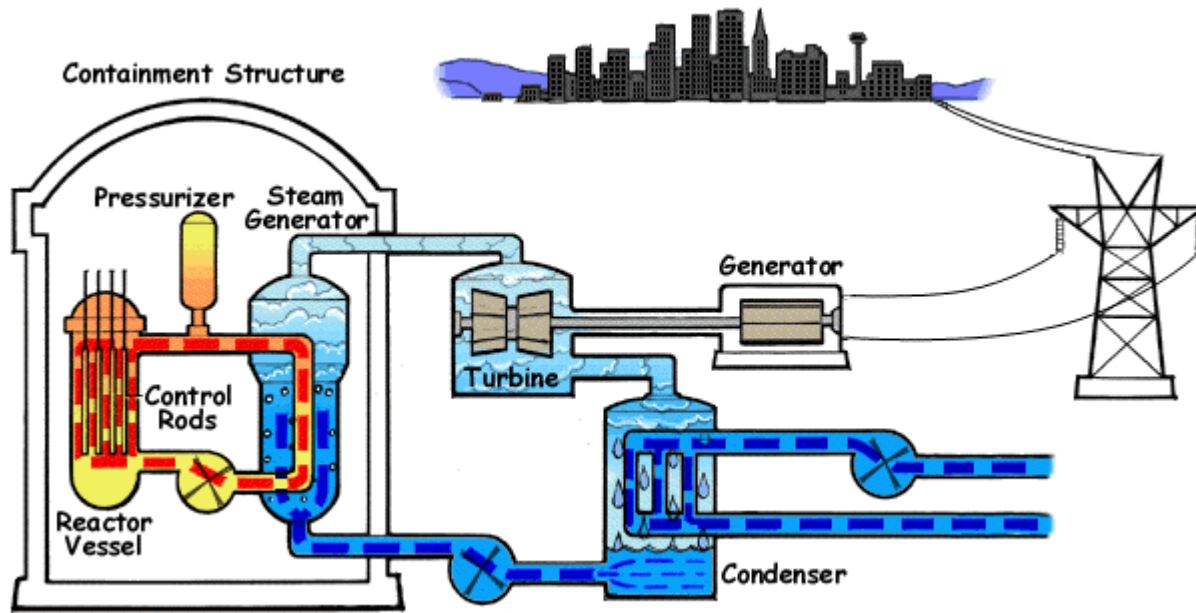
hitri reaktorji (hitri nevtroni - oplodni)

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: $p \sim 150-160$ 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 črpalnišče

8-Hladilni stolpi

9-Črpalnišče vode

10-Iztok hladilne vode

11-Stikališče

12-Upravna stavba

13-Jez na Savi

14-Skladišče RAO

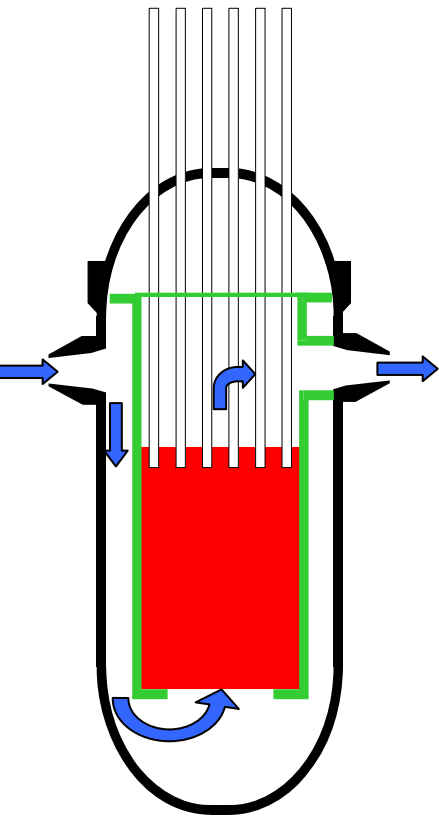
15-Dizel generatorja

16-Vratarnica

17-Garaže

18-Upravna stavba

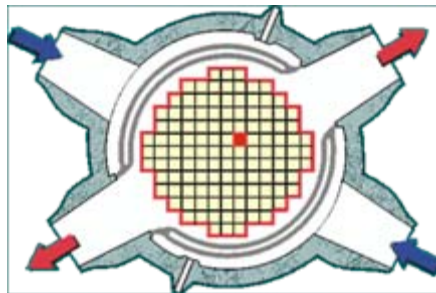
Krško - reaktorska posoda



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

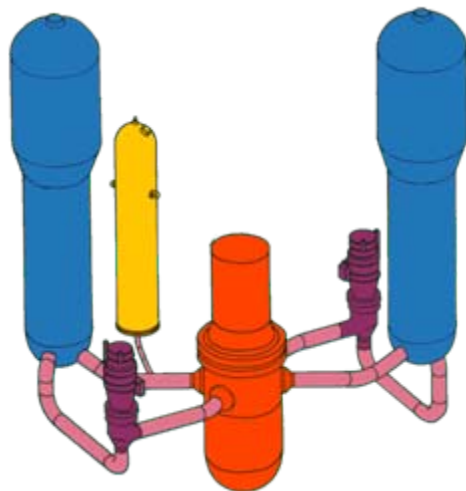
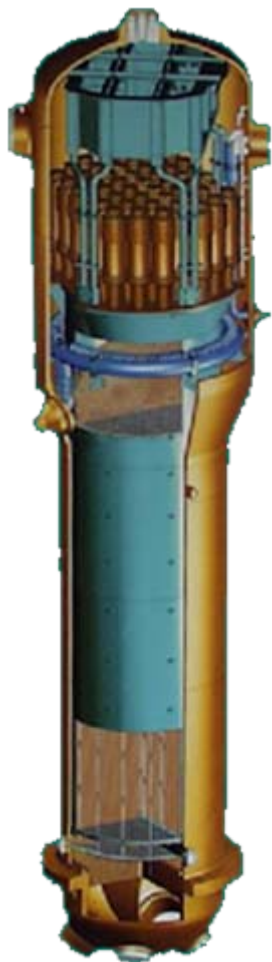
Snov: H_2O
Dodatki: H_3BO_3

vir: www.nek.si

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: 9220 kg/s

Tlak: 15,41 MPa (157 ata)

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 U-cevi: 1,09 mm

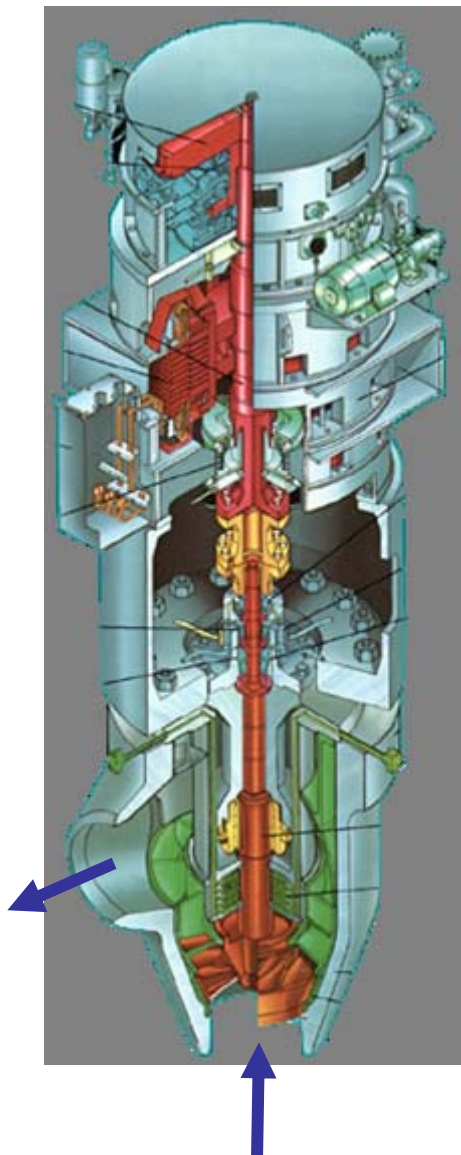
Krško - primarni sistem, črpalka, tlačnik

Črpalka:

Število črpalk: 2

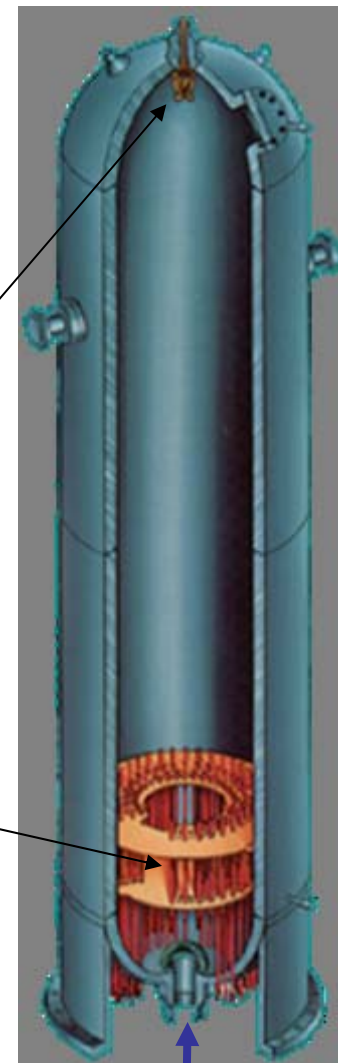
Zmogljivost črpalke: 6,3 m³/s

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

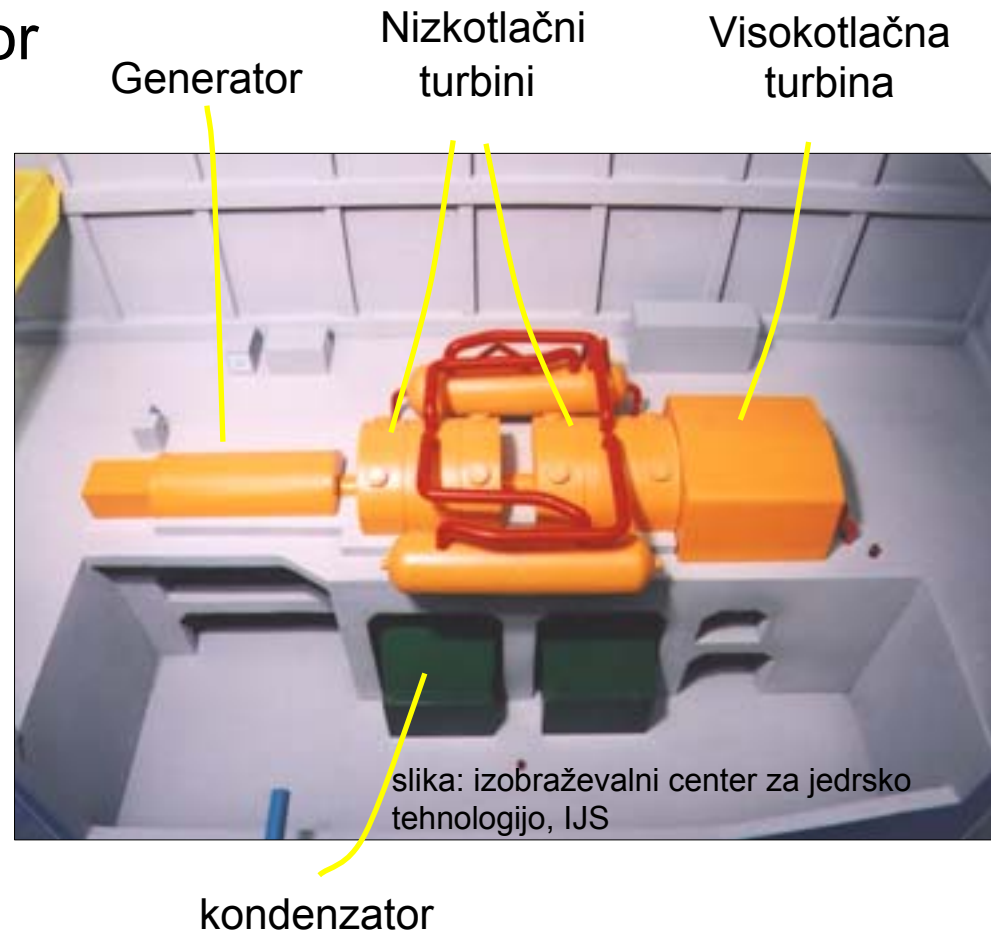
Nazivna napetost: 21 kV

Nazivna frekvenca generatorja: 50 Hz

Nazivni $\cos \varphi$: 0,85

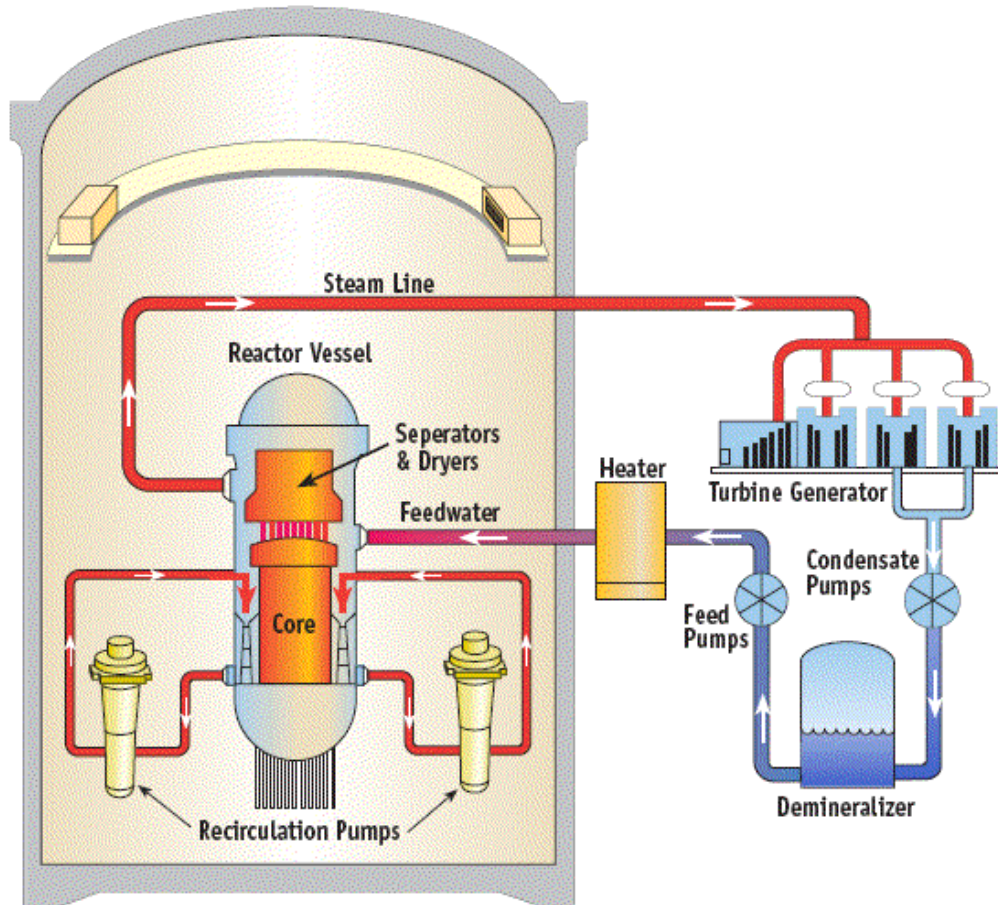
Blokovna transformatorja - Nazivna moč: 1 x 500 MVA, 1 x 400 MVA, Prestavno razmerje: 21/400 kV

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



BWR - Vrelvodni 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.
- Kontrolne palice skozi dno posode.
- Brez bora v hladilu.

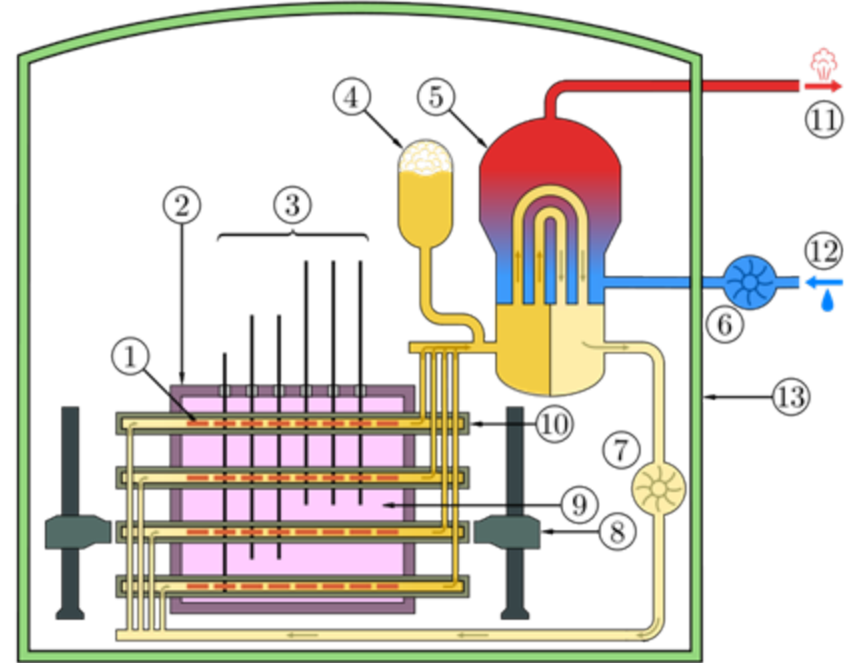
Recirkulacijske črpalke: pretok skozi sredico 7x večji od toka pare. Z recirkulacijskimi črpalkami je mogoče nadzorovati moč reaktorja.

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 - kontrolne 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.

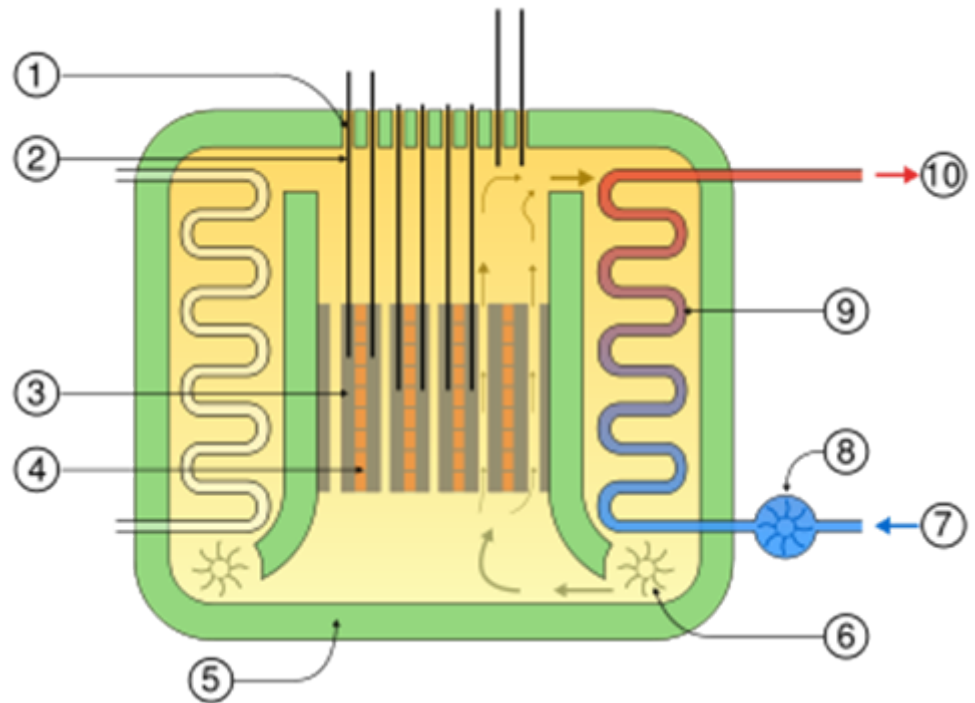
GCR - plinsko hlajeni reaktorji

Nekaj 10 reaktorjev - predvsem v VB

slika: AGR (Advanced GR) - VB

- moderator grafit

- hladilo CO₂



"Uparjalnik" v posodi, 1. cevi za menjavo goriva, 2 - kontrolne palice, 3 - grafit, 4 - gorivo, 5 - betonska tlačna posoda in ščit, 6 - črpalka CO₂, 7 - voda, 8 - vodna črpalka, 9 - izmenjevalec toplote - "uparjalnik", 10 - para

Projektirana za menjavo goriva med delovanjem.

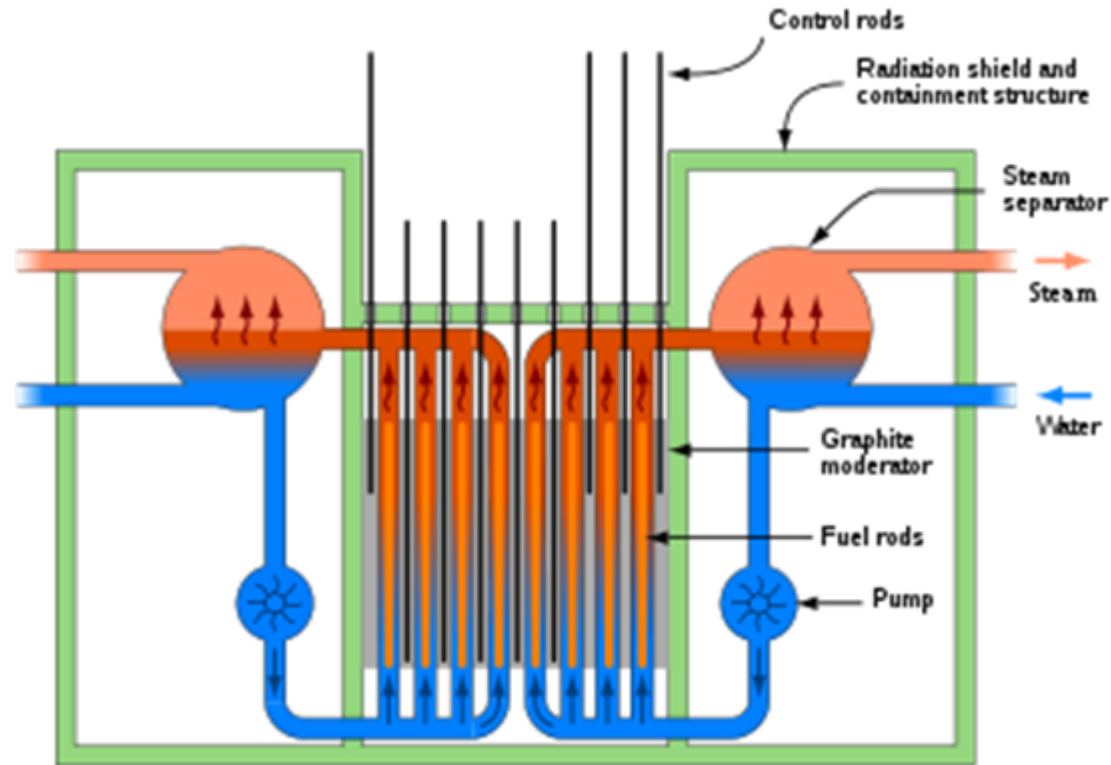
RBMK - reaktor

~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.

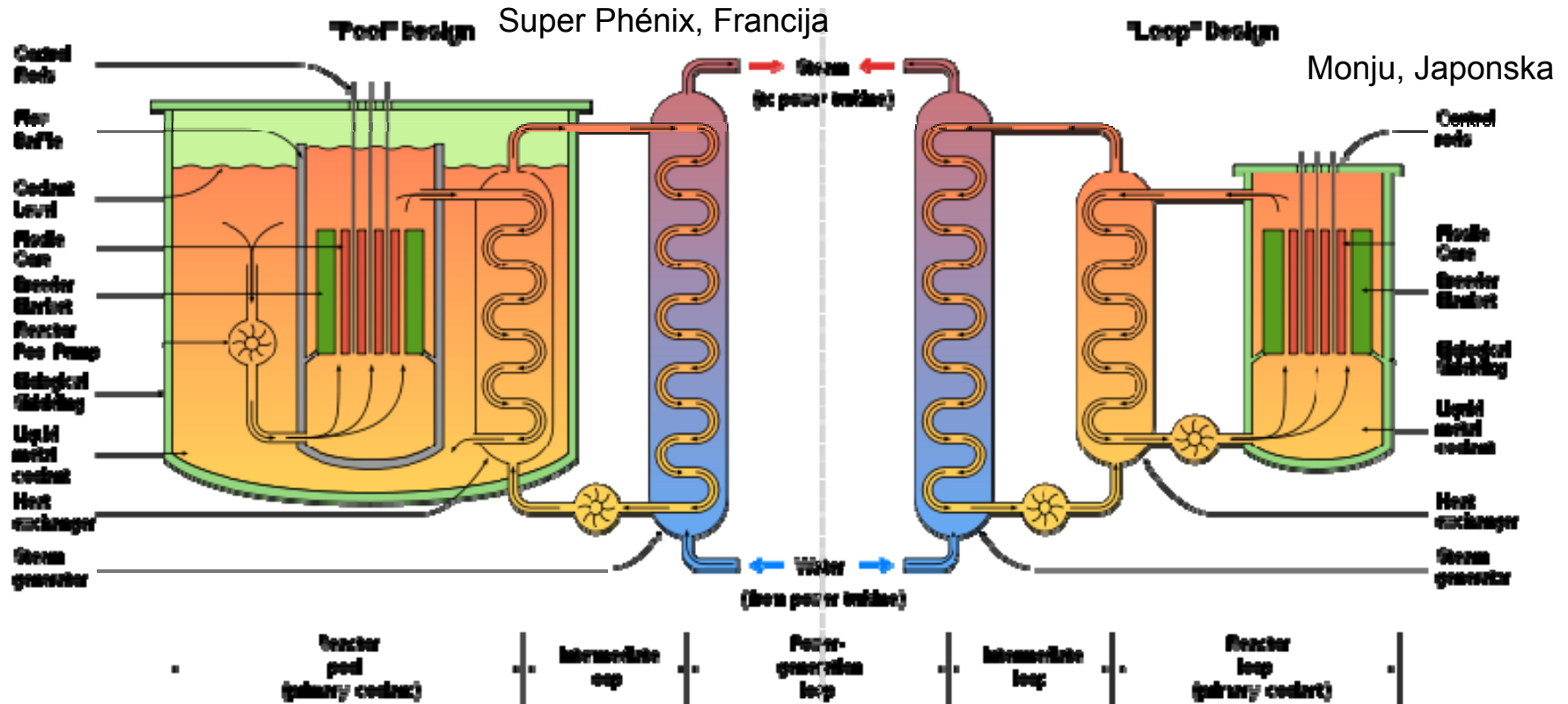


gorivo - 2% obogateni uran - omogoča menjavo goriva med delovanjem.

1000 in 1500 MWe reaktorji.

Hitri reaktorji - LMFBFR

slika: wikipedia



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

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

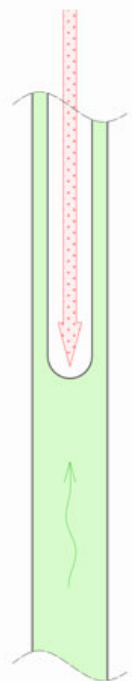
Na: visoka T vrelišča, ni korozije kovinskih struktur, pri sobni temperaturi se strdi, se močno aktivira, puščanje se opazi - Na v zraku reagira.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

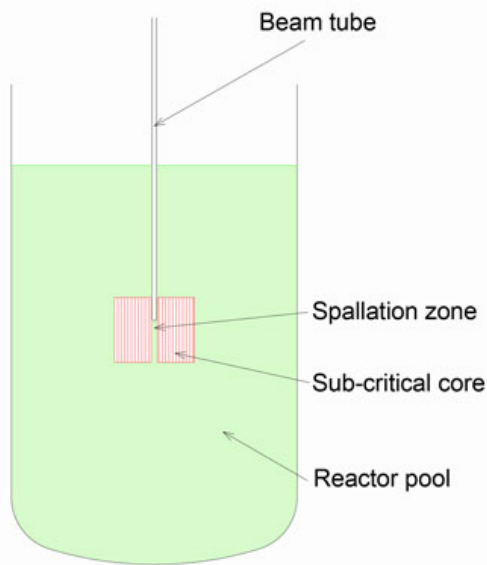
- **Very High Temperature Reactor (VHTR)** - za procese, ki zahtevajo toploto pri visokih energijah - termo-kemična proizvodnja vodika. Hladilo helij, na izhodu iz sredice temperatura 1000°C . Jedrsko gorivo - TRISO kroglice - gorivo prevlečeno s tremi sloji izotropnih materialov - odporno na visoke temperature. Ovoji vsebujejo grafit. Kroglice so lahko samostojne (pebble bed reactor) ali v blokih grafita. Odvajanje toplote gorivu hladi na maks. 1600°C med normalnim obratovanjem in izrednimi dogodki.
- **Gas-cooled Fast Reactor (GFR)** uporablja helij kot hladilo, fisijo vzdržujejo hitri nevtroni. 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 nevtroni, zaprt gorivni cikel. Glavni cilji: oplodni reaktor, transmutacija aktinidov. Temperatura natrija (hladila) na izhodu iz sredice $\sim 550^{\circ}\text{C}$. 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 svincom - zelo majhna absorpcija hitrih nevtronov in kemično inertno hladilo. Temperatura hladila na izstopu iz reaktorja višja od 550°C (do 800°C , odvisno od vzdržljivosti materialov 😊). 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 toplote vmed normalnim obratovanjem in med izrednimi dogodki.
- **Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)** - nadgradnja današnjih lahkovodnih reaktorjev. Tlak hladila ~ 25 MPa, temperatura $> 500^{\circ}\text{C}$. Primarno hladilo gre neposredno na turbino. Osnovni cilj - poceni elektrika (visok termični izkoristek). Zaradi nižje gostote vode pri nadkritičnih p in T bo spekter nevtronov trši, višje bo razmerje med proizvedenim in porabljenim gorivom, ter manj radioaktivnih aktinidov.
- **Molten Salt Reactor (MSR)** - spekter nevtronov 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 temperature nad 700°C , kar pomeni visok izkoristek.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

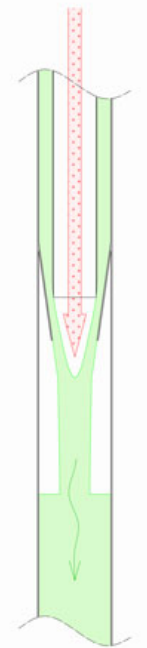
- Accelerator-driven subcritical nuclear system (ADS)** - hiter nevtronski spekter za sežiganje jedrskih odpadkov (minor actinides - vsi aktinidi razen goriva). Sistem sestavljajo trije glavni deli: pospeševalnik protonov, tarča, v kateri iz protonov nastanejo nevtroni (spallation target) in podkritična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



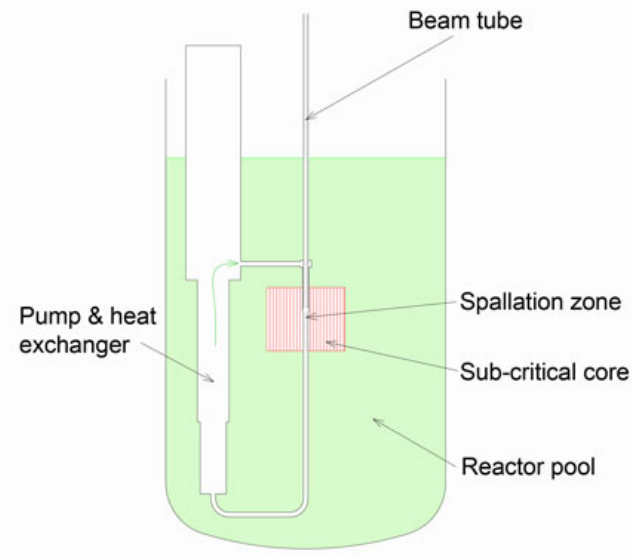
Window target design



Window target design



Windowless target design



Windowless target design

Hlajenje reaktorja - gorivna palica

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

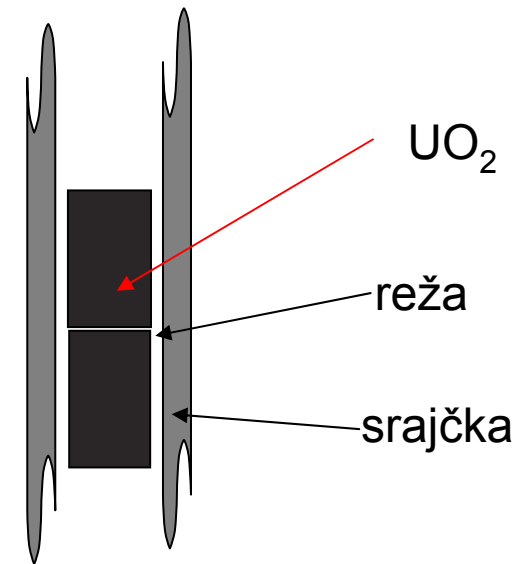
1) prevajanje toplote v tabletki UO_2 in v srajčki
Poissonova enačba:

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

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

2) Reža - prenos toplote s konvekcijo, 10-20% pa z radiacijo. Z izgorevanjem se gorivo deformira (napihne) in reža izgine...

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 tabletki 2000 K. Toplotna prevodnost tabletki je 2 W/m/K, toplotna 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

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

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

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

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

h - toplotna prestopnost (heat transfer coefficient) -

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

empirične korelacije (eksperimenti):

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

λ topl. prevodnost tekočine

D_e efektivni premer kanala

Nu Nusseltovo število - brezdim. topl. prestopnost

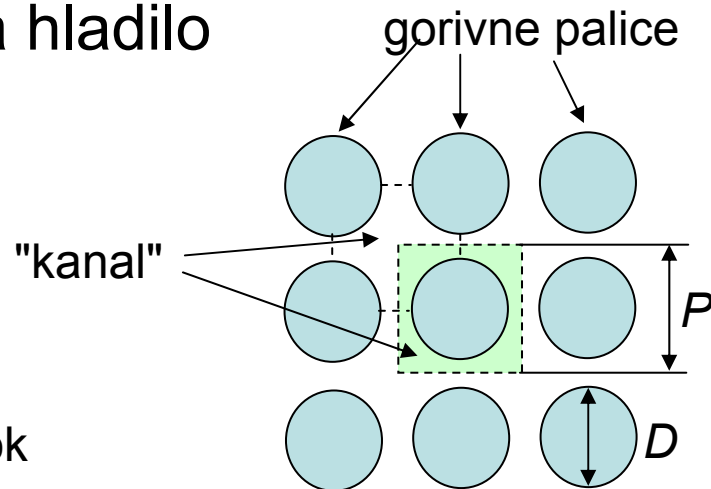
Inženirski zapis:

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

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

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

JE Krško: $P=1.232 \text{ cm}$, $D=0.95 \text{ cm}$



Voda ali plin V cevi:

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

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

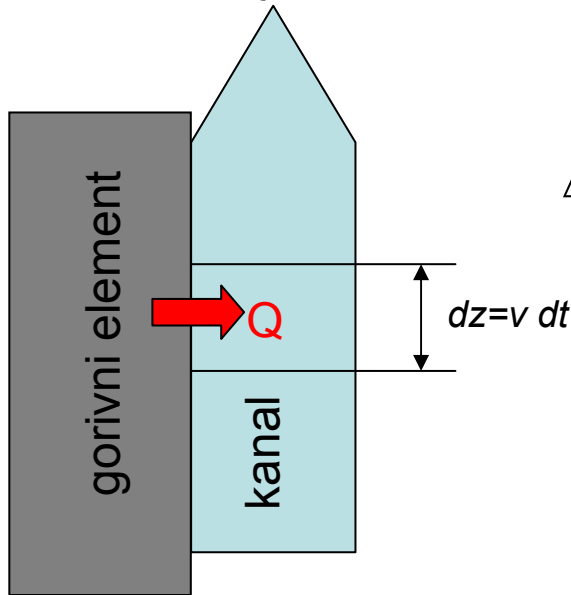
$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{Prandtlovo število}$$

Hlajenje reaktorja - temperatura vzdolž kanala

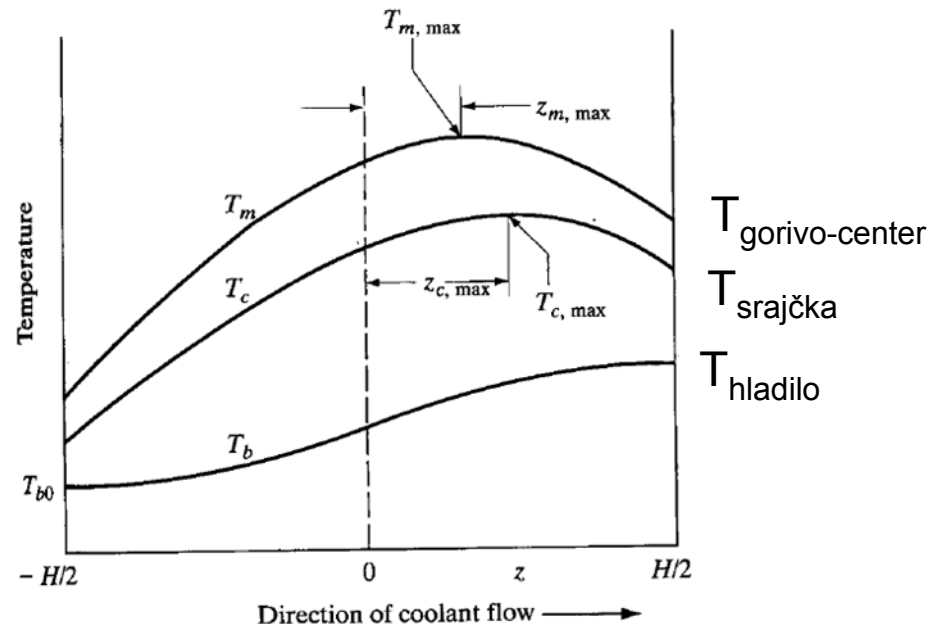
Moč vzdolž kanala sredice ni konstantna:

$$q = q(z)$$

Hladilo se kot homogen blok premika po kanalu ob gorivnem elementu s povprečno hitrostjo v - temperatura hladila:



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



slika desno

(Lamarsh, Baratta):

$$q(z) = q_{\text{max}} \cos(\pi z / H)$$

Hlajenje reaktorja

Moč reaktorja je sorazmerna fluksu termičnih nevtronov (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.

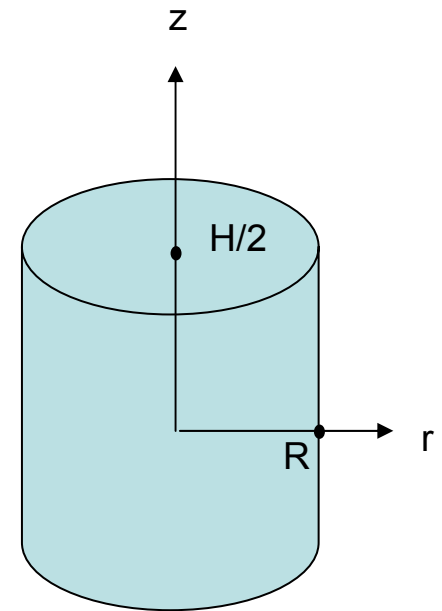
V homogenem reaktorju cilindrične oblike brez reflektorja sta nevtronski fluks in porazdelitev moči sorazmerna:

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

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

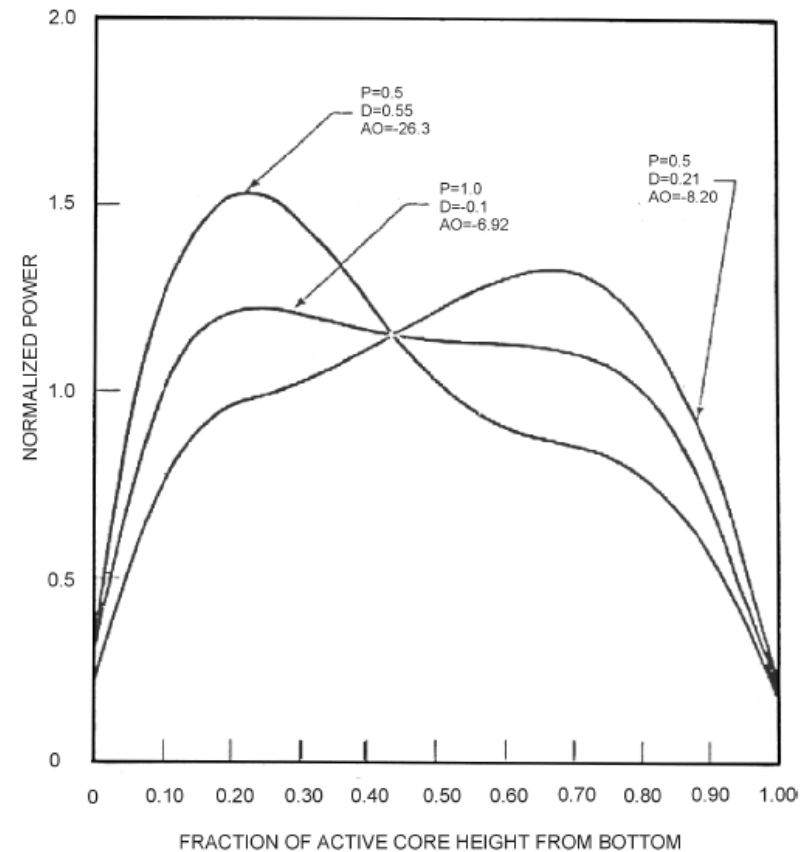
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1.003 | 1.271 | 1.043 | 0.969 | 1.281 | 1.157 | 0.530 |
| 2 | 1.271 | 1.058 | 1.066 | 1.272 | 1.075 | 1.098 | 0.492 |
| 3 | 1.043 | 1.067 | 1.064 | 1.139 | 1.236 | 0.934 | |
| 4 | 0.969 | 1.273 | 1.140 | 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 $F_{\Delta H} = 1.373$

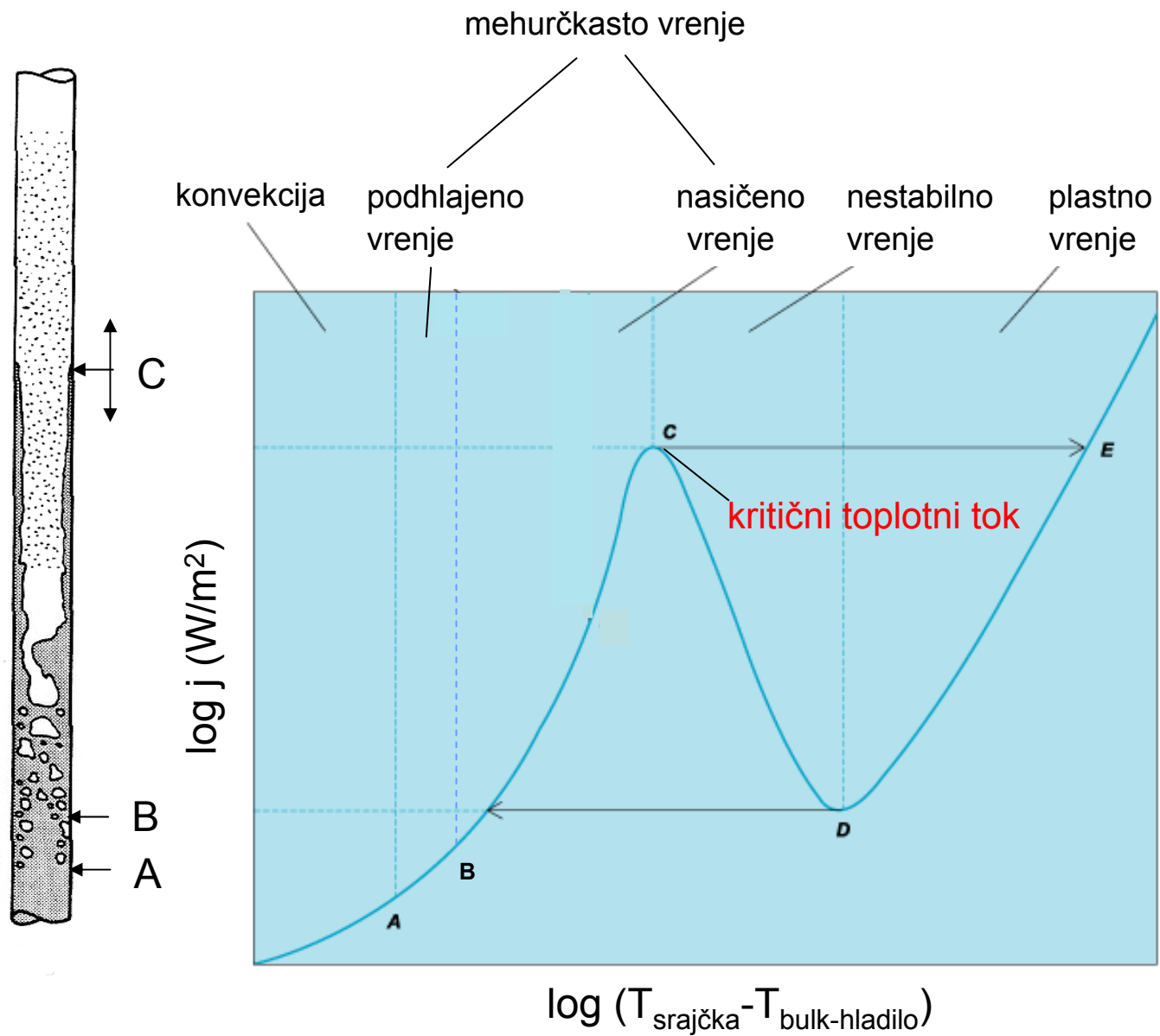
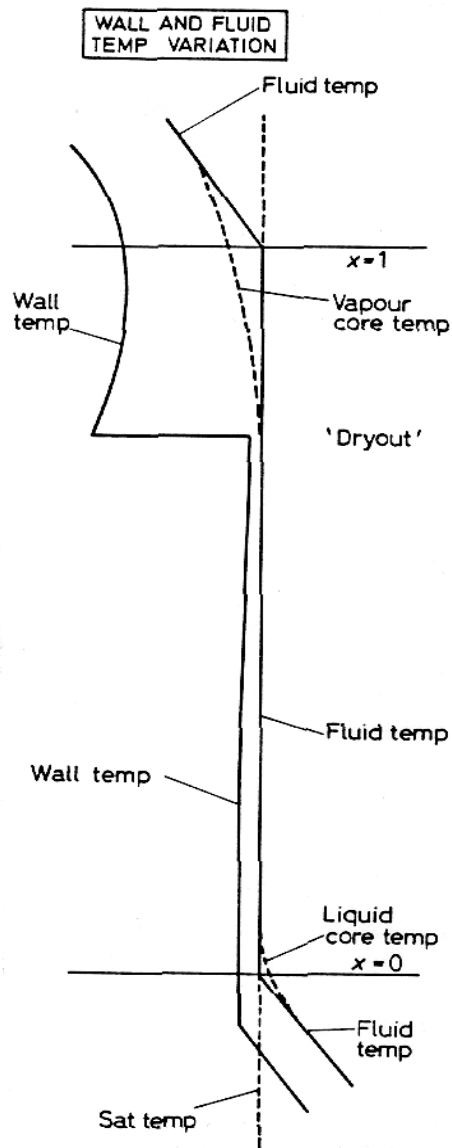
Relativna moč sredice JE Krško

vir:

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



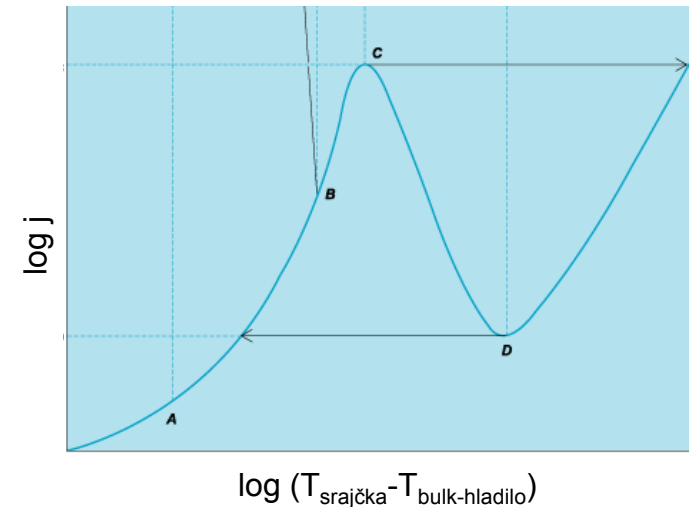
Prenos toplote z vrenjem



Hlajenje reaktorja - omejitve

Hlajenje reaktorja:

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



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

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

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

Težava: natančna vrednost $j_{\text{kritični}}$ 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

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

Projektiranje reaktorja:

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

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

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

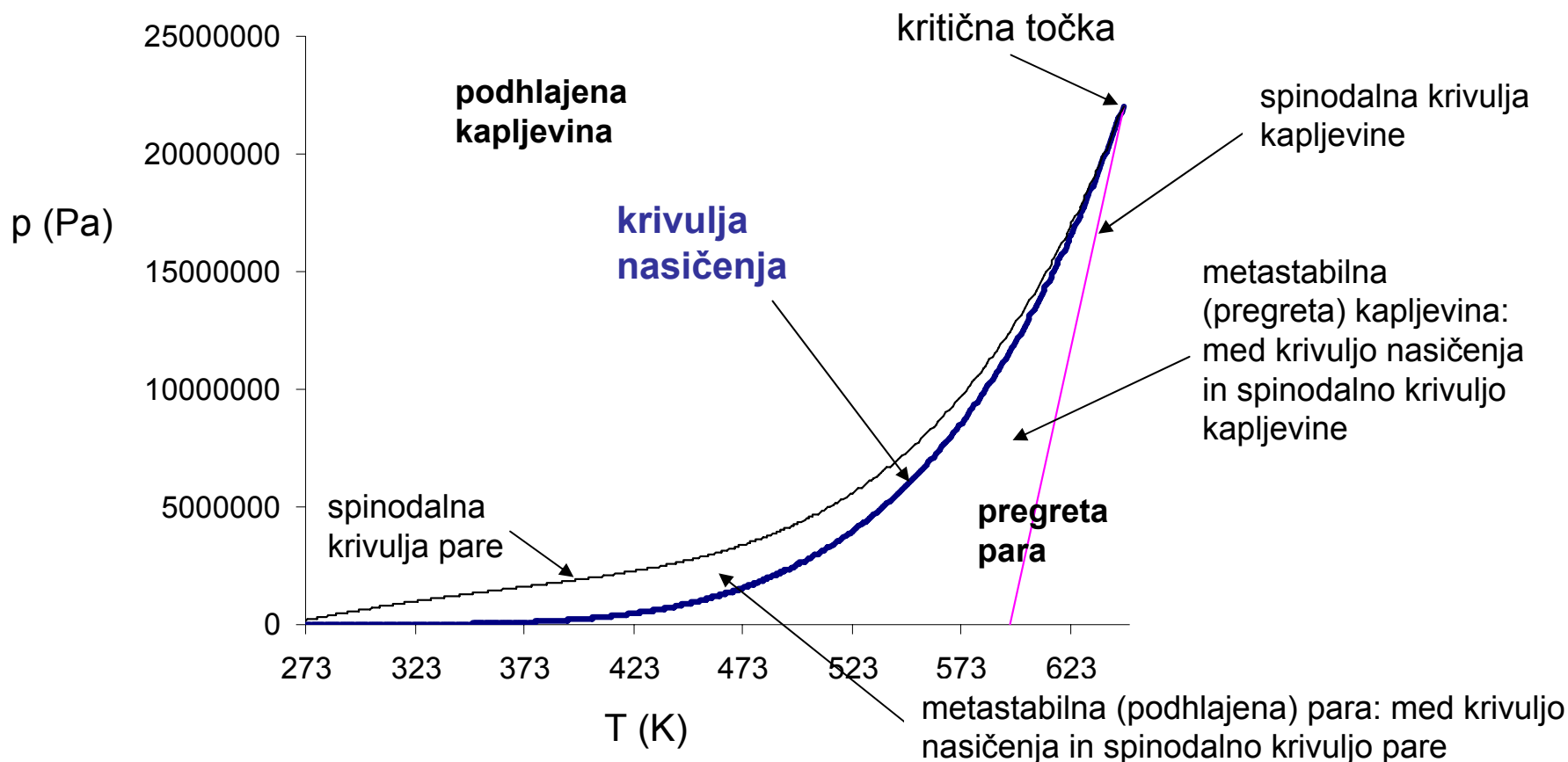
$$F_{\Delta H}(r)_{\max} = \frac{\text{prirastek entalpije v najbolj vročem kanalu}}{\text{povprečen prirastek entalpije v sredici}}$$

Izračunaj maksimalni dovoljen toplotni 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 $P = P_{\max}(0.3 + 0.7 \cdot \cos(\pi \cdot z/H))$, $H = 3.66$ 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 "Toplota", Kuščer, Žumer.

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



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 sipanje, tvorba parov

γ - zelo prodorno sevanje

Radioaktivni razpad:

| | |
|--------------------|---|
| gostota jeder | n |
| razpadna konstanta | $\lambda(\text{s}^{-1})$ |
| aktivnost | $A = \lambda n(t)$ (razpadi/s= Becquerel [Bq]) $1 \text{ Curie [Ci]} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ $dn/dt = -\lambda n; \quad n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)$ |
| 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

$\mu = n \sigma$ - linearni koeficient atenuacije

(μ / ρ) - masni koeficient atenuacije

pri prehodu skozi steno debeline x velja:

$$\Phi_{\text{FOTONOV}} = \Phi_{0\text{-FOTONOV}} \exp(-\mu x)$$

| | |
|---|------------------------|
| 1 adult human (100 Bq/kg) | 7000 Bq |
| 1 kg of coffee | 1000 Bq |
| 1 kg superphosphate fertiliser | 5000 Bq |
| The air in a 100 sq metre Australian home (radon) | 3000 Bq |
| The air in many 100 sq metre European homes (radon) | 30 000 Bq |
| 1 household smoke detector (with americium) | 30 000 Bq |
| Radioisotope for medical diagnosis | 70 million Bq |
| Radioisotope source for medical therapy | 100 000 000 million Bq |
| 1 kg 50-year old vitrified high-level nuclear waste | 10 000 000 million Bq |
| 1 luminous Exit sign (1970s) | 1 000 000 million Bq |
| 1 kg uranium | 25 million Bq |
| 1 kg uranium ore (Canadian, 15%) | 25 million Bq |
| 1 kg uranium ore (Australian, 0.3%) | 500 000 Bq |
| 1 kg low level radioactive waste | 1 million Bq |
| 1 kg of coal ash | 2000 Bq |
| 1 kg of granite | 1000 Bq |

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 jedrskih 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 STOHAŠTIČNIH učinkov sevanja.

Natančno merjenje bioloških posledic (preveč natančno za potrebe varstva pred sevanji): 1) obsevanje kulture celic s standardnim sevanjem (200 keV gamma)
2) obsevanje z drugim tipom sevanja z enako energijo in primerjava posledic

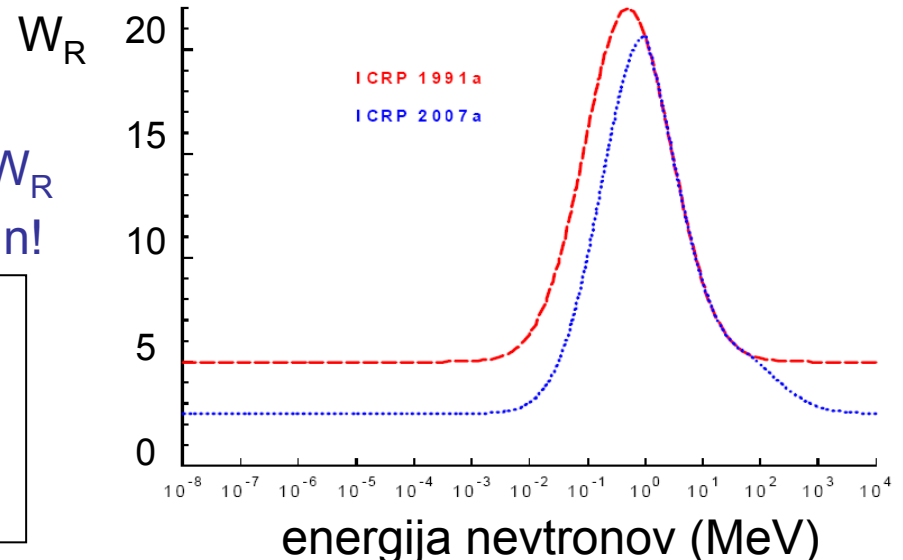
Za doze manjše od nekaj 10 mSv:

Utežni faktor w_R :

Ekvivalentna doza: H [Sv] = D [Gy] · 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:

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

$D_{T,R}$ - 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 možgani žleze slinavke koža | mehur jetra požiralnik ščitnica | kostni mozeg prsi danka pljuča želodec OSTALO | spolne žleze |

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 (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)

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

Sevanje tal - 500 (Kerala - na JZ obali Indije - gosto poseljeno - zelo visoko naravno ozadje - mineral monazit - netopen v vodi - TH veriga - 4000-30000 $\mu\text{Gy}/\text{leto}$ - 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 (30-40)

Černobil skupaj 720, danes ~1-10
(maksimum: 30.4.1986 4:00 - 1.6 $\mu\text{Sv}/\text{h}$, ^{131}I , ^{137}Cs)

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

Polet iz Evrope v ZDA in nazaj ~50 (2-3/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...

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 $\cdot 5,3 \text{ MeV/razpad} = 2300 \text{ J}$

Absorbirana doza $480 \text{ J} / 75 \text{ kg} = \mathbf{30 \text{ Gy}}$

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 ustrezno, prav tako ni ustrezna 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": $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^-$ ali $\text{H}^+ + \text{OH}^-$ 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 bruhamo v dveh urah. Velike spremembe krvi, krvavitve, povečana 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 preživeli 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

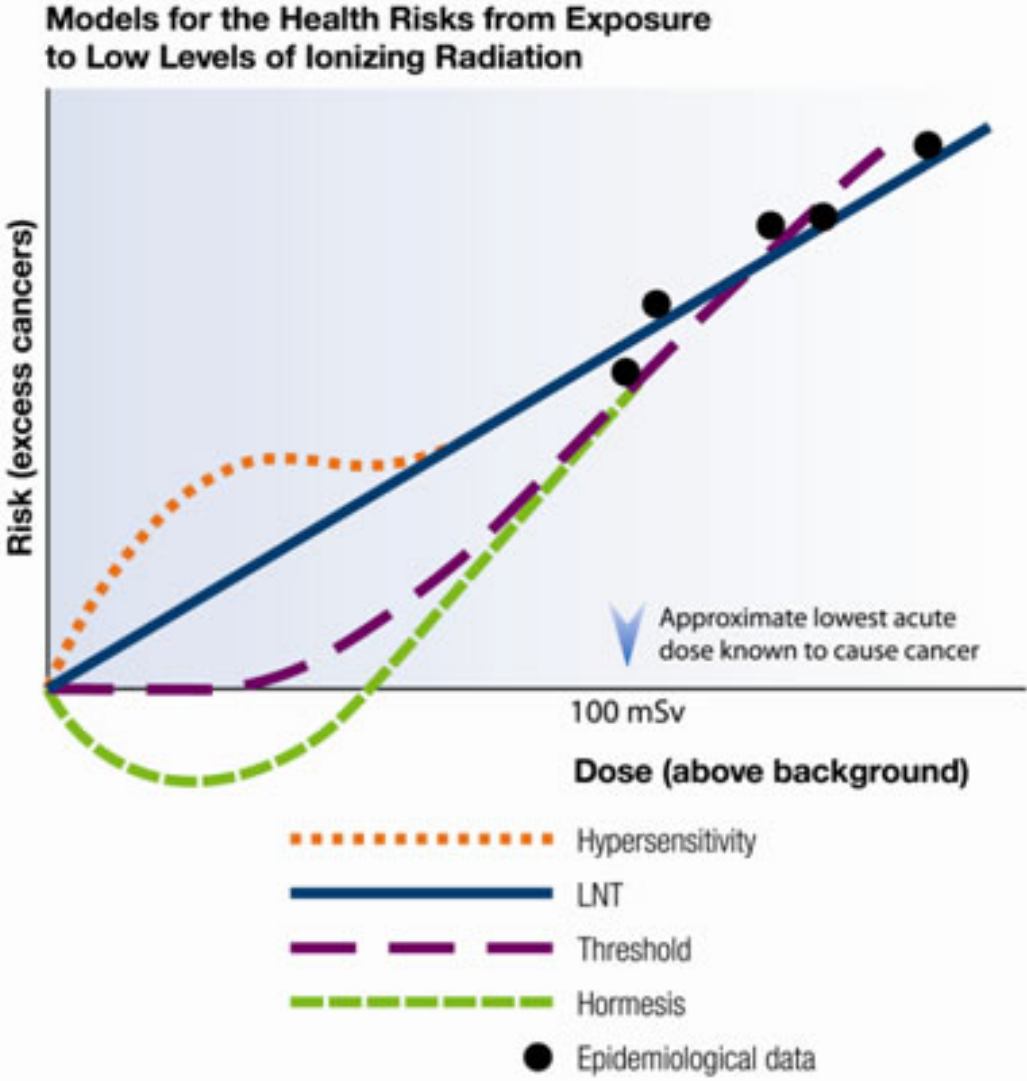
Nominal Probability Coefficients (% Sv⁻¹)

| 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

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

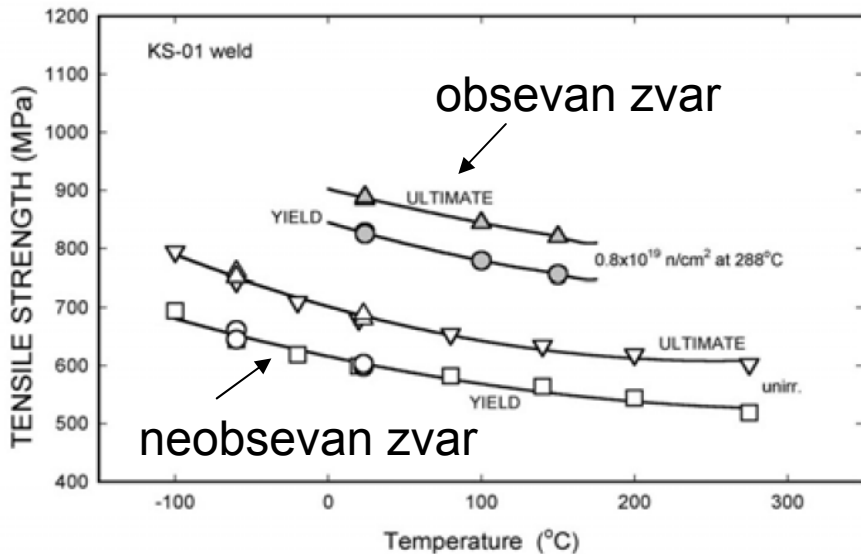
Uprava RS za varstvo pred sevanji:

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 uporabljajo zgolj v miroljubne namene.

Učinki sevanja na materiale jedrskih elektrarn



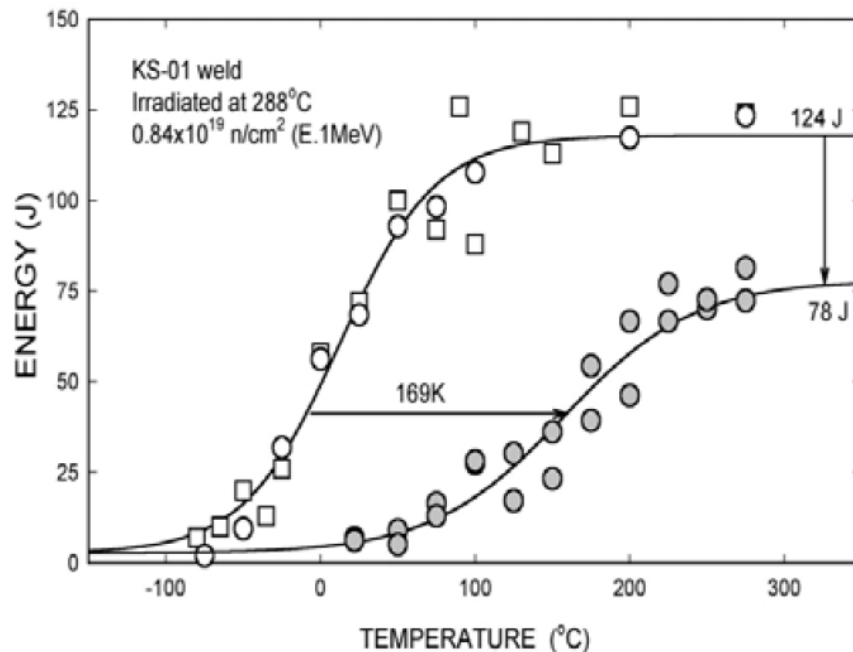
yield strength - meja prožnosti

ultimate strength - meja natezne trdnosti

vir:

R. K. NANSTAD, M.A. SOKOLOV, and D.E. McCABE

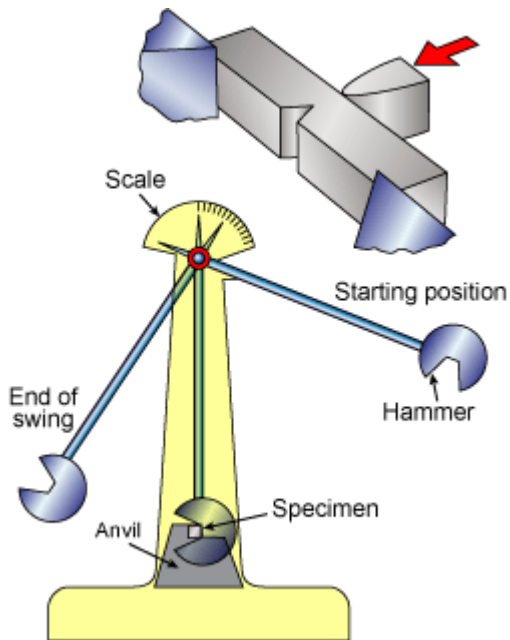
Oak Ridge National Laboratory, 2001



Desno:

Charpy-jev test in rezultati

Charpyjevega testa za obsevan in neobsevan vzorec



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 ustrezno zasnovo reaktorja, z zagotavljanjem kakovosti med projektiranjem, gradnjo in vzdrževanjem, ter z usposabljanjem osebja.
- 2) 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).
- 3) Zaščita: jedrske elektrarne so opremljene z varnostnimi sistemi, ki tudi v primeru malo verjetne odpovedi vitalnih delov opreme preprečijo prekomerne izpuste radioaktivnih snovi.
- 4) Blaženje: v hipotetičnem primeru - ko bi odpovedali tako preventivni kot zaščitni ukrepi in bi prišlo do taljenja sredice, so elektrarne (še posebej nove) opremljene s posebnimi varnostnimi sistemi za blaženje posledic in omejevanje radioaktivnih izpustov.
- 5) Blaženje posledic izpustov radioaktivnih snovi.

O jedrski varnosti

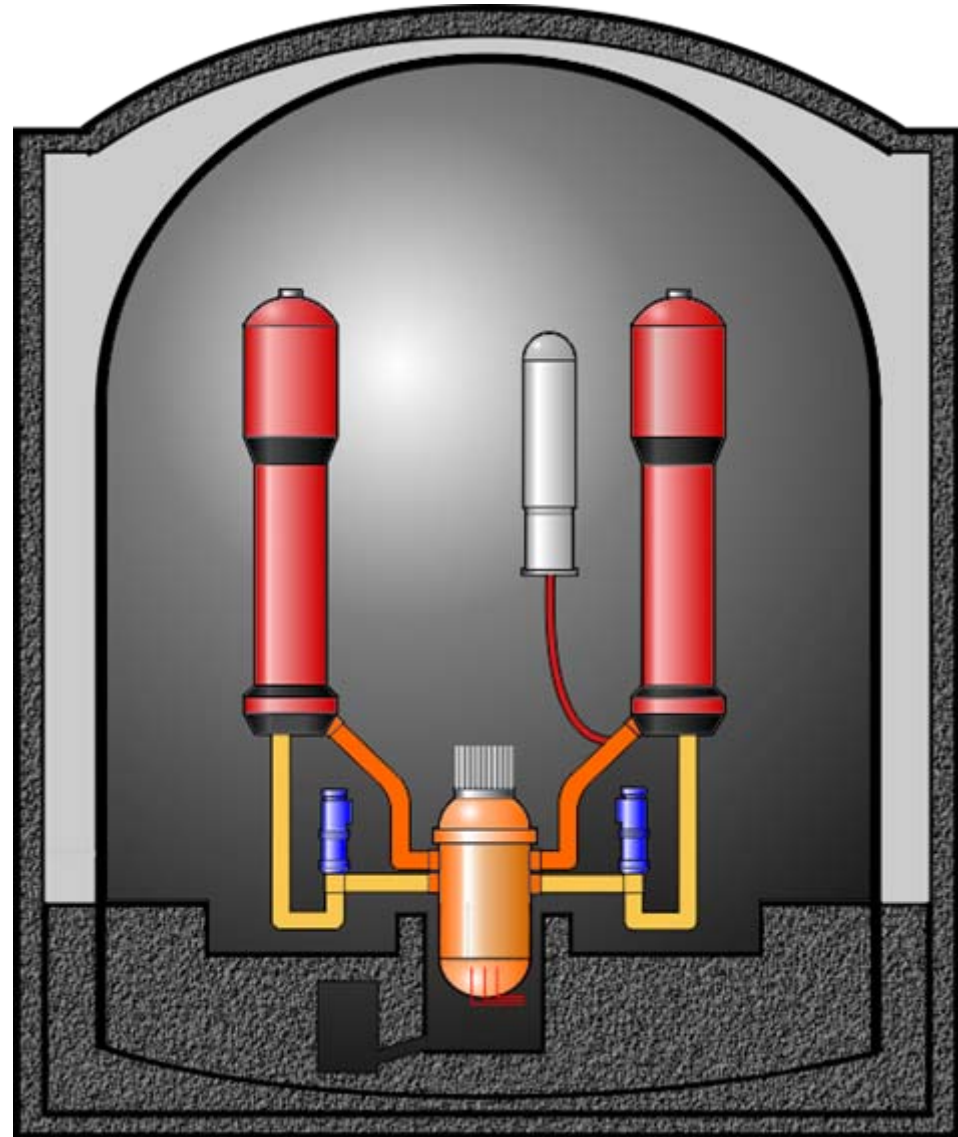
Jedrska varnost:

Izpuste 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 40000 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 s kontrolnimi palicami ali z boriranjem hladila)
- visoka kakovost, preizkušanje...

Projektne nesreče

predpostavljene odpovedi nekaterih ključnih sistemov

Analize projektnih nezgod so osnova za oceno sprejemljivosti reaktorja.

Analize morajo pokazati, da v okolici 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)

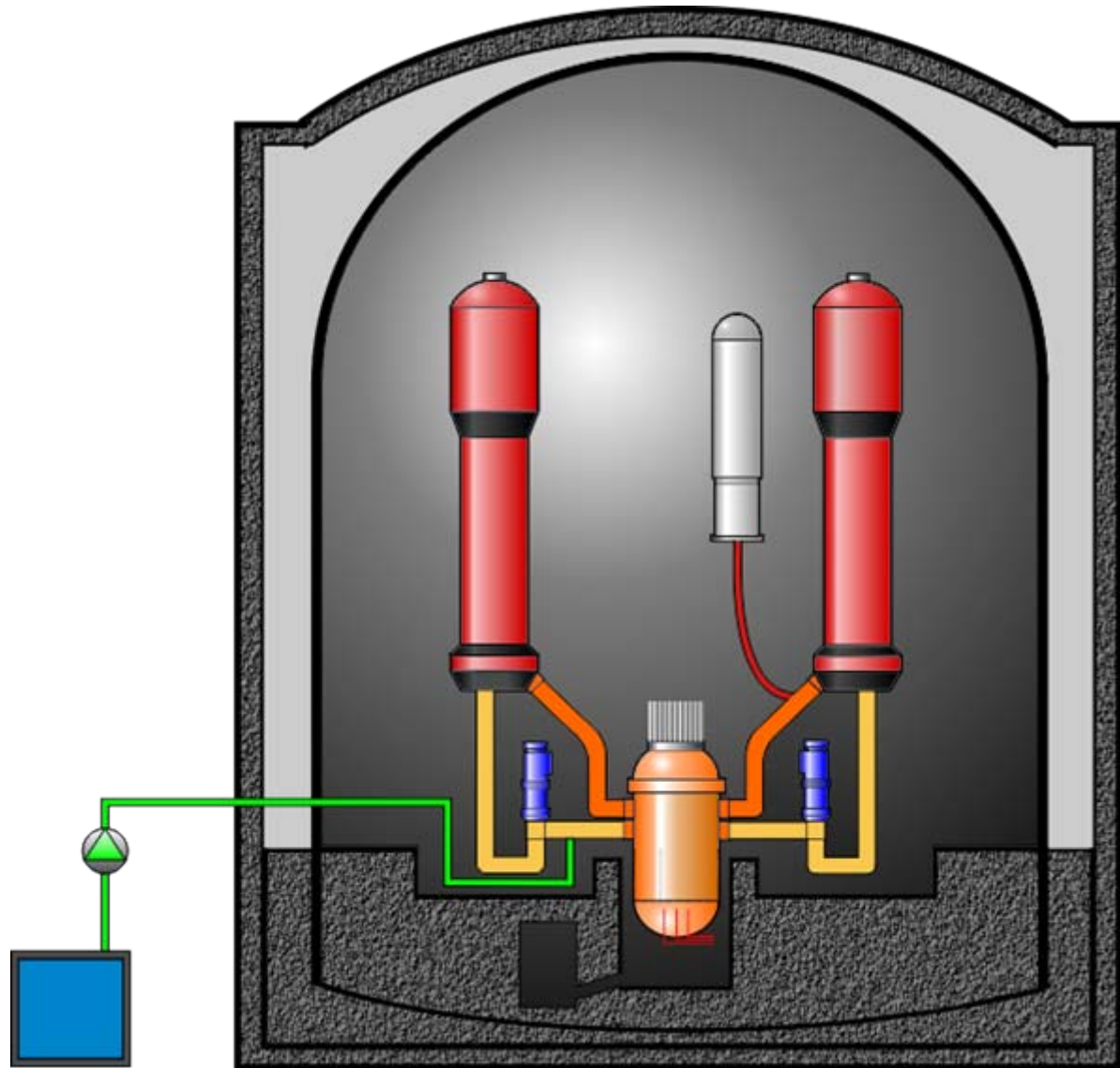
Varnostni sistemi JEK

Sistema za visokotlačno in nizekotlačno 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.

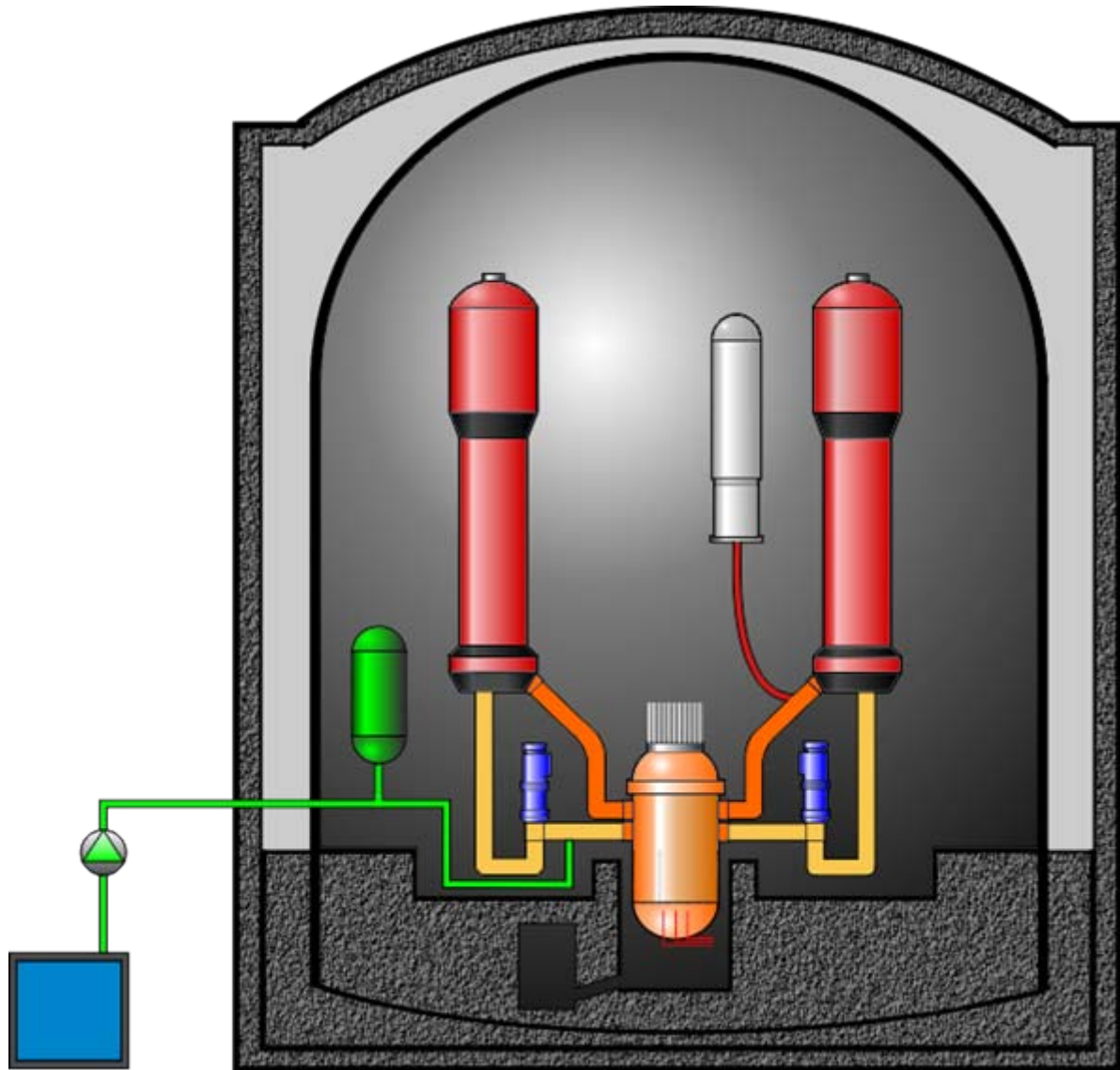


Varnostni sistemi JEK

Pasivna vodna akumulatorja

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

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

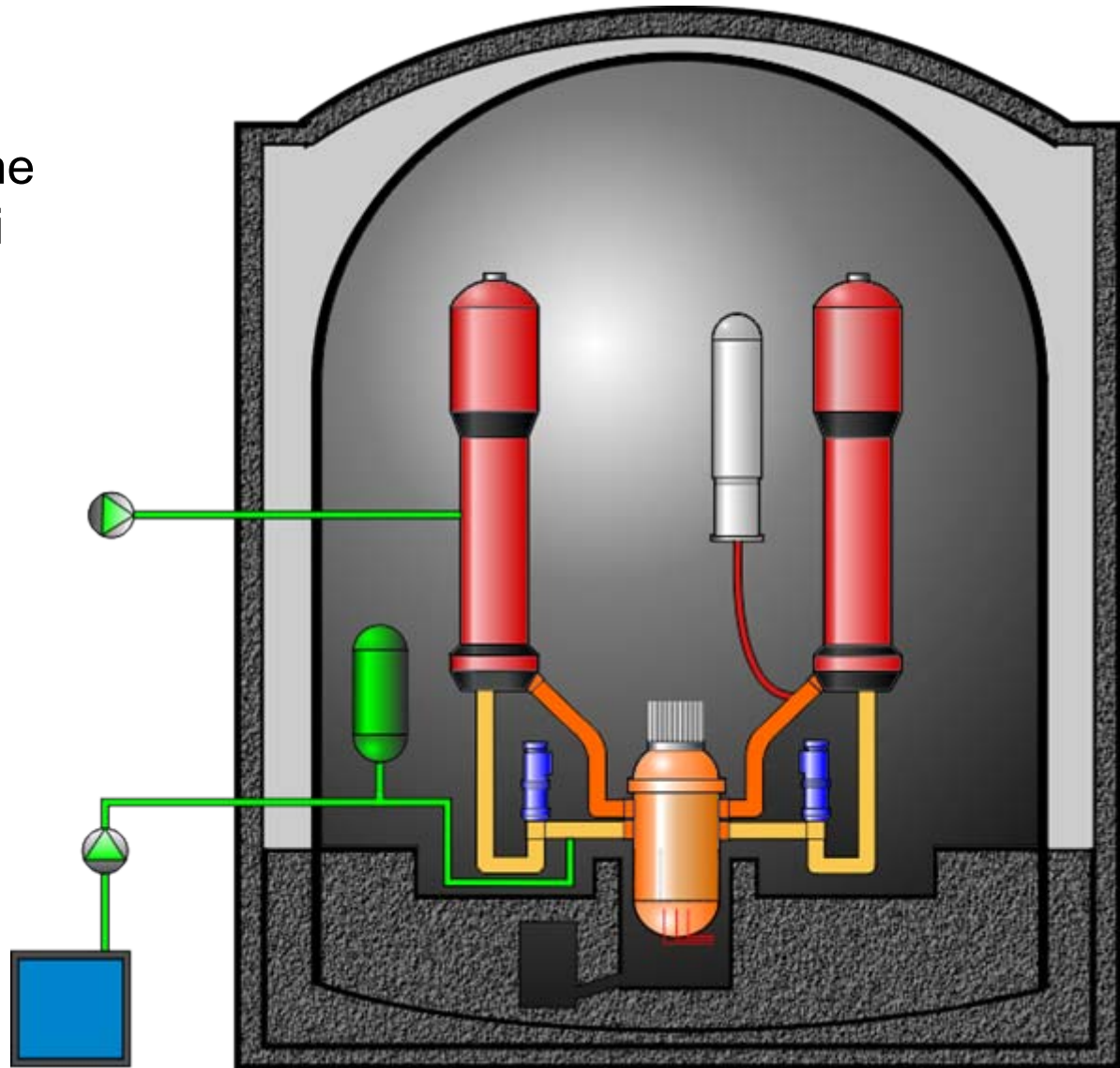


Varnostni sistemi JEK

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

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

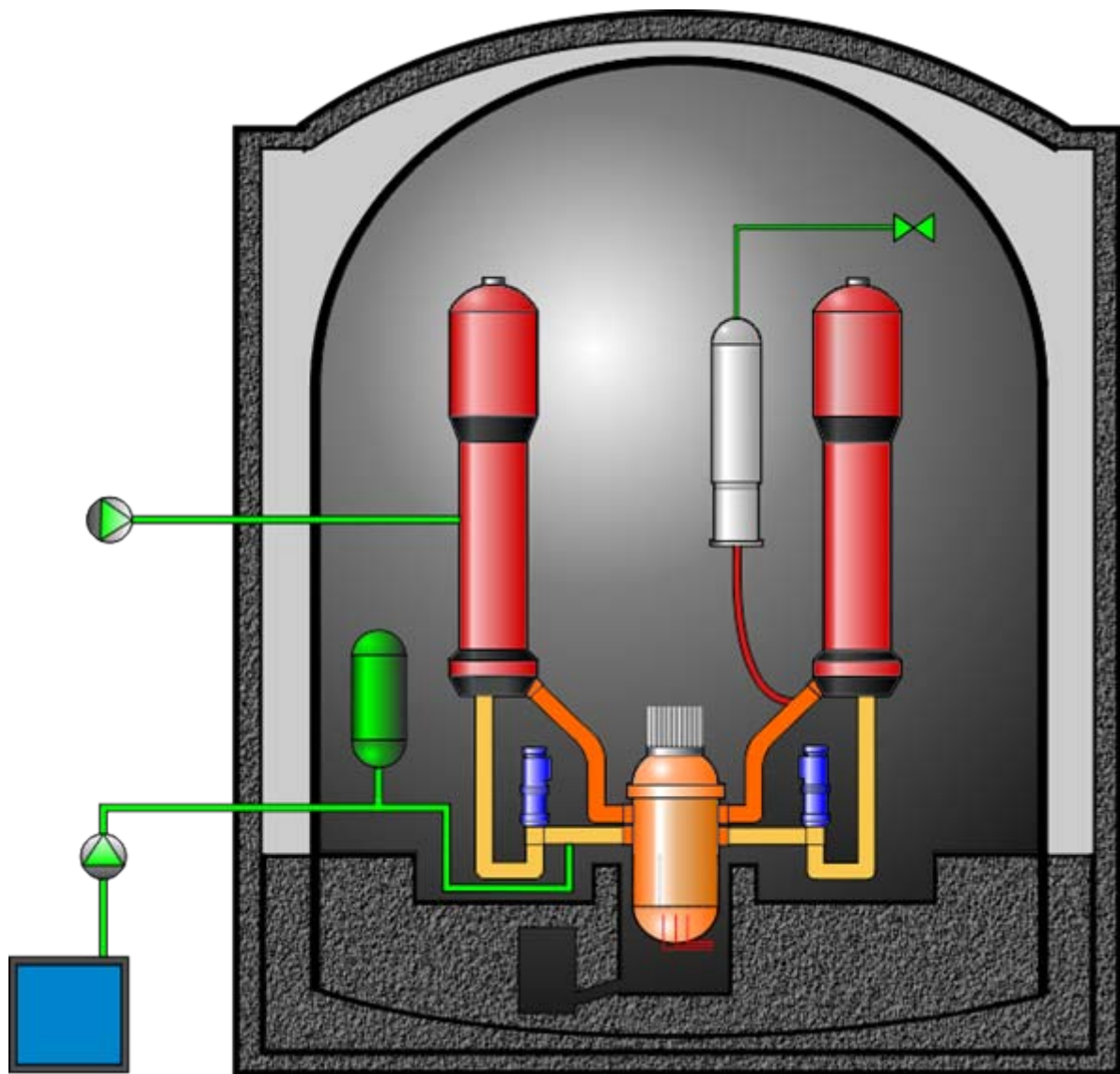
Preko sekundarne strani uparjalnika odvaja zaostalo toploto iz goriva.



Varnostni sistemi JEK

Varnostni ventili na tlačniku

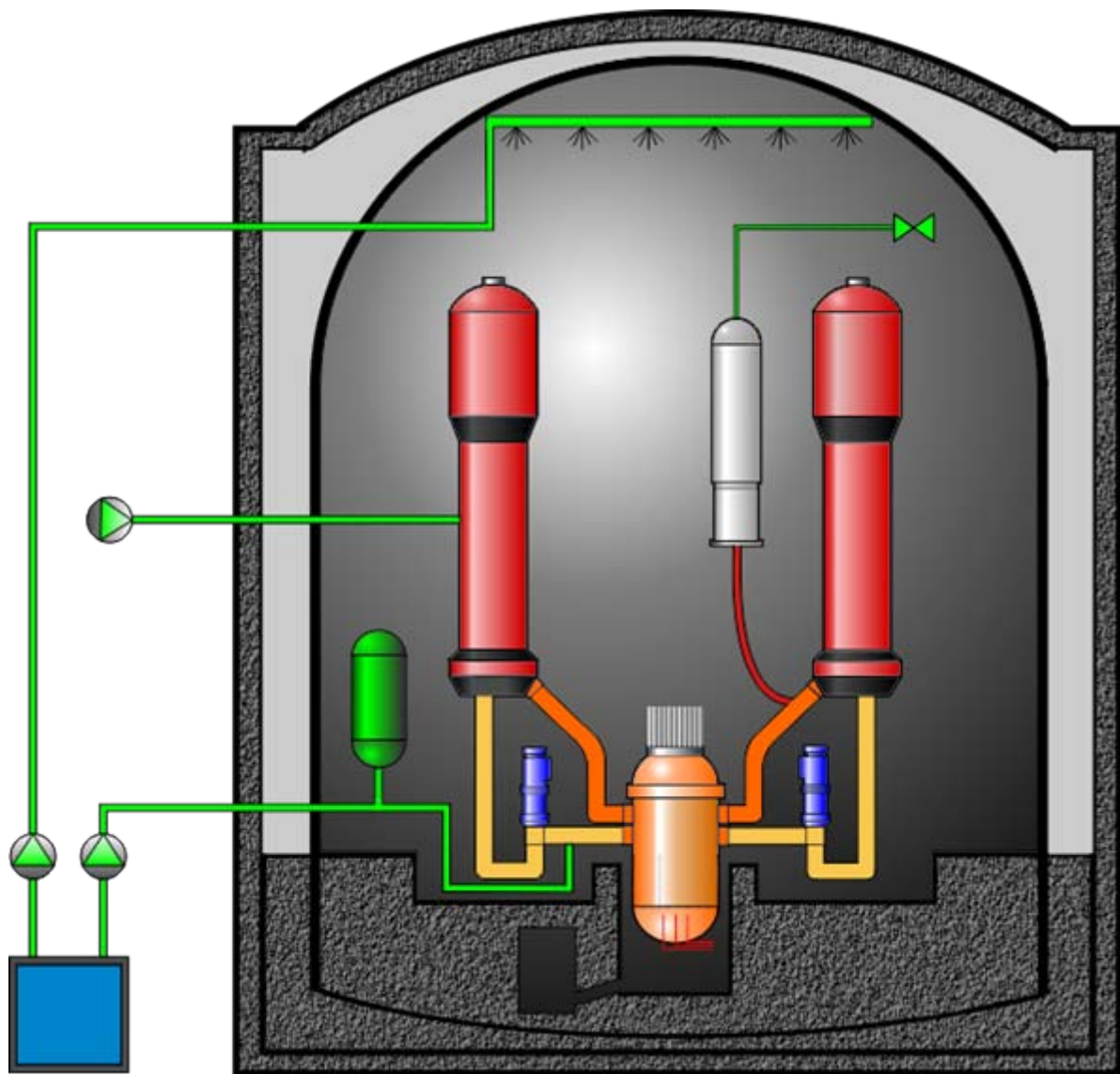
Varnostni ventili se odprejo pri previsokem tlaku in varujejo celovitost primarnega sistema.



Varnostni sistemi JEK

Prhe zadrževalnega hrama

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



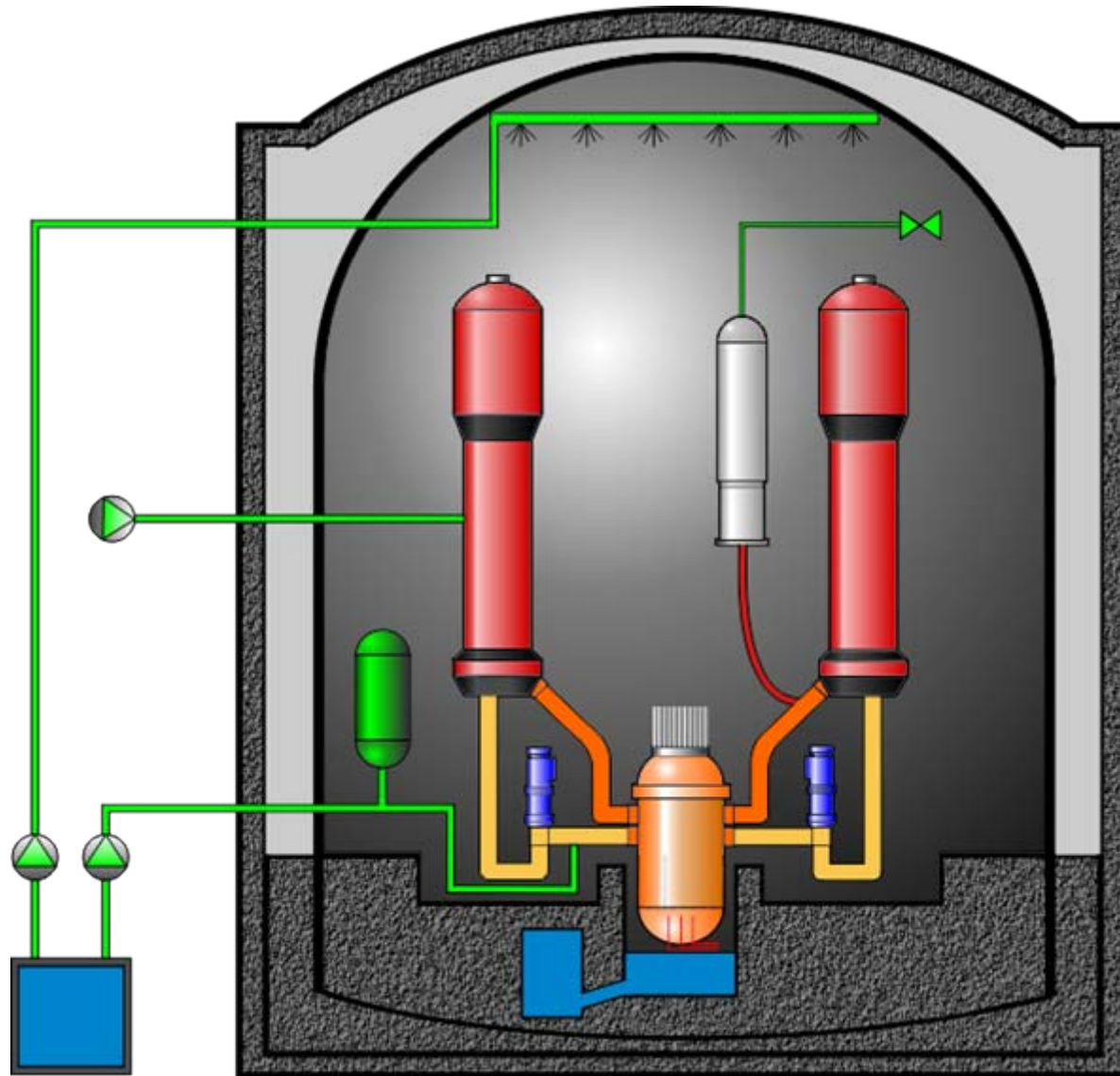
Nesreče s taljenjem sredice

(Severe accidents)

Poplavljanje reaktorske votline med nezgodo s taljenjem sredice

Če bi odpovedali prej naštetni 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), so poleg elementov v tabeli z radiološkega vidika pomembni še Cezij in Stroncij.

Končni rezultat analize projektnih nezgod je ocena izpustov!

Širjenje fisijskih 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 fisijskih 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 (7.215E+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) | - |

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 | |
| zadužitve 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 1985)

| Total deaths | Probability of death per person per year | Accident |
|-------------------------|---|----------------------|
| Motor vehicles | 46 263 | 2.0×10^{-4} |
| Falls | 11 937 | 5.1×10^{-5} |
| Fires, burns | 5 010 | 2.1×10^{-5} |
| Poisoning | 4 911 | 2.1×10^{-5} |
| Drowning | 4 444 | 1.9×10^{-5} |
| Inhalation/ingestion | 3 541 | 1.5×10^{-5} |
| Medical misadventures | 2 463 | 1.0×10^{-5} |
| Firearms and handguns | 1 668 | 7.1×10^{-6} |
| Air and space transport | 1 234 | 5.2×10^{-6} |
| Water transport | 1 131 | 4.8×10^{-6} |
| Electricity | 888 | 3.8×10^{-6} |
| Railway | 570 | 2.4×10^{-6} |
| Lightning | 162 | $8. \times 10^{-7}$ |
| All other | 8 851 | |
| Total | 92 911 | 3.9×10^{-4} |

Deaths due to accidents, homicides and suicides

TABLE 14-6Average 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.

vir: Knief, Nuclear engineering

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

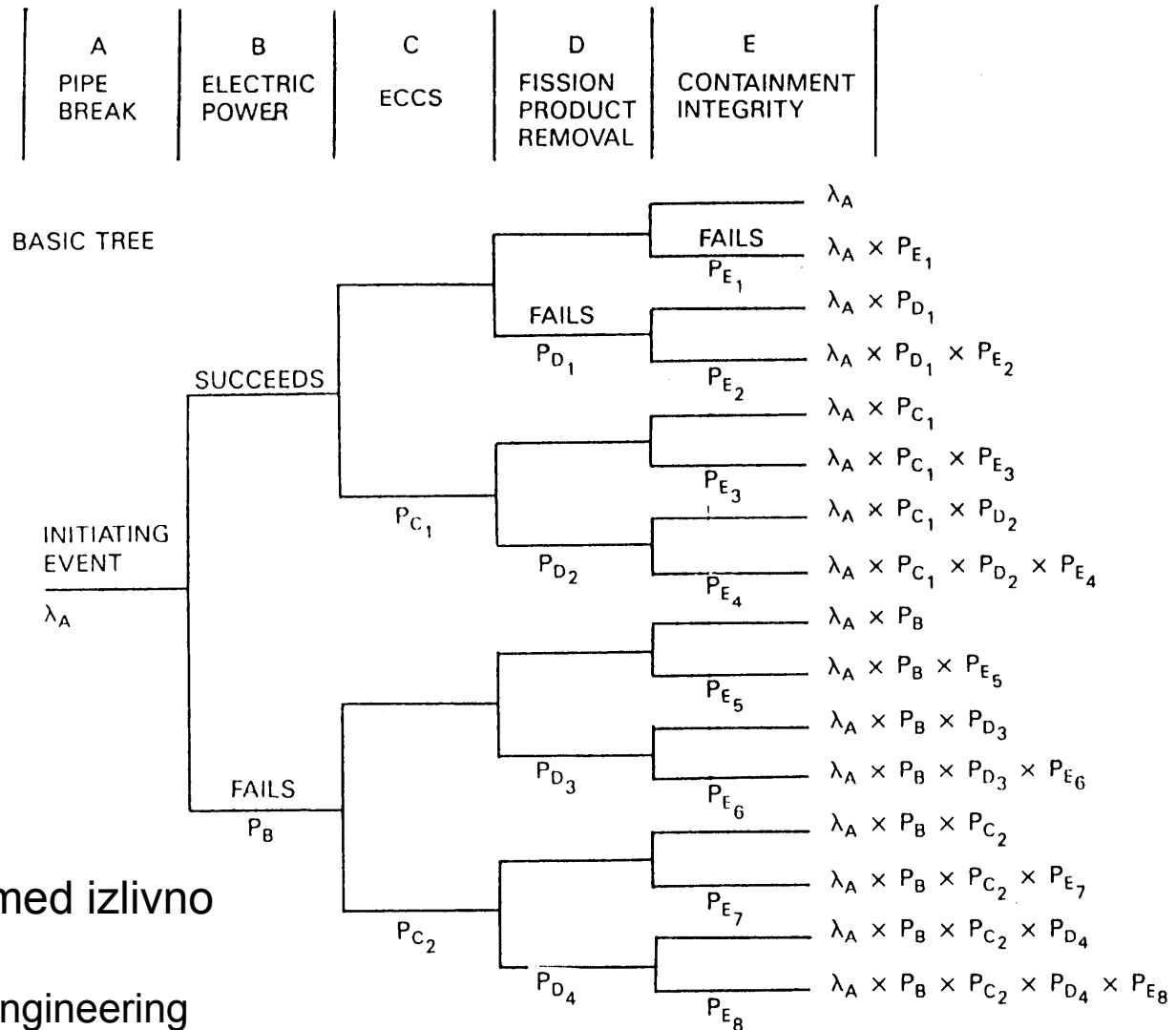
| Risk | General Attitude | |
|-----------|----------------------------------|-------------|
| 10^{-2} | Natural Death Reference | |
| 10^{-3} | Unacceptable, Difficult to find | |
| 10^{-4} | Effort and Money Spent to Reduce | (SLO ceste) |
| 10^{-5} | Mild Inconvenience to Avoid | (SLO umori) |
| 10^{-6}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

Osebno sprejemanje tveganja - ljudje se ne odločamo po številkah:

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

.....

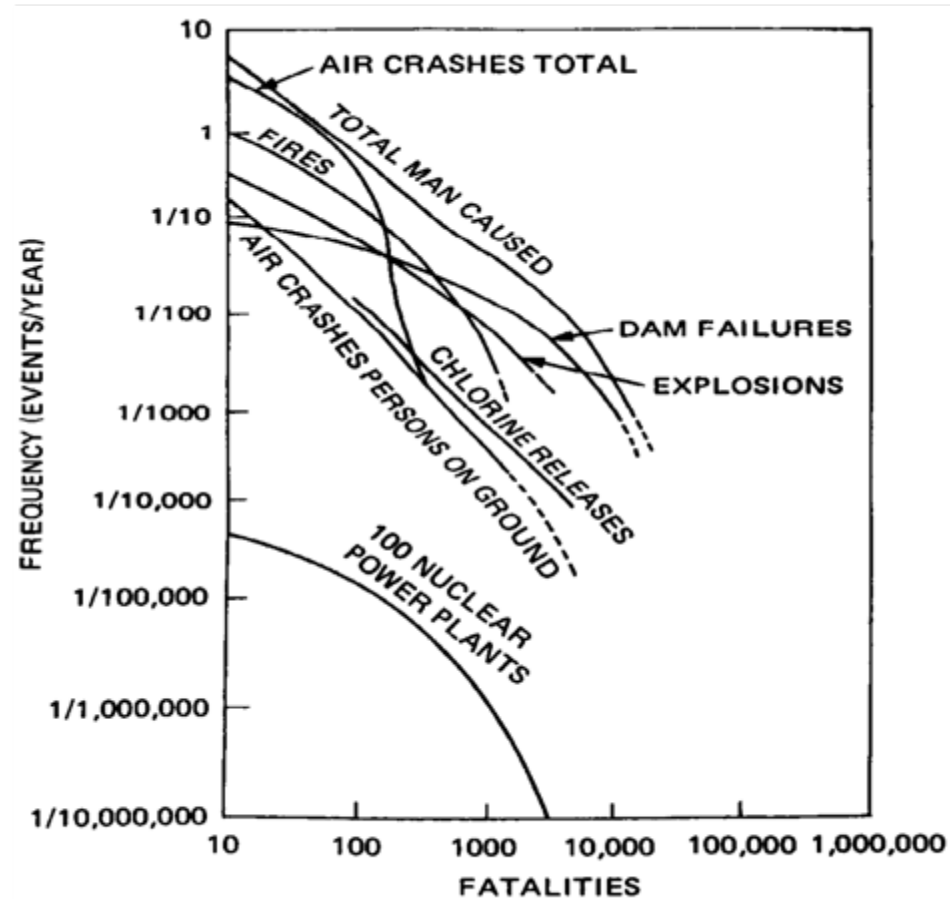
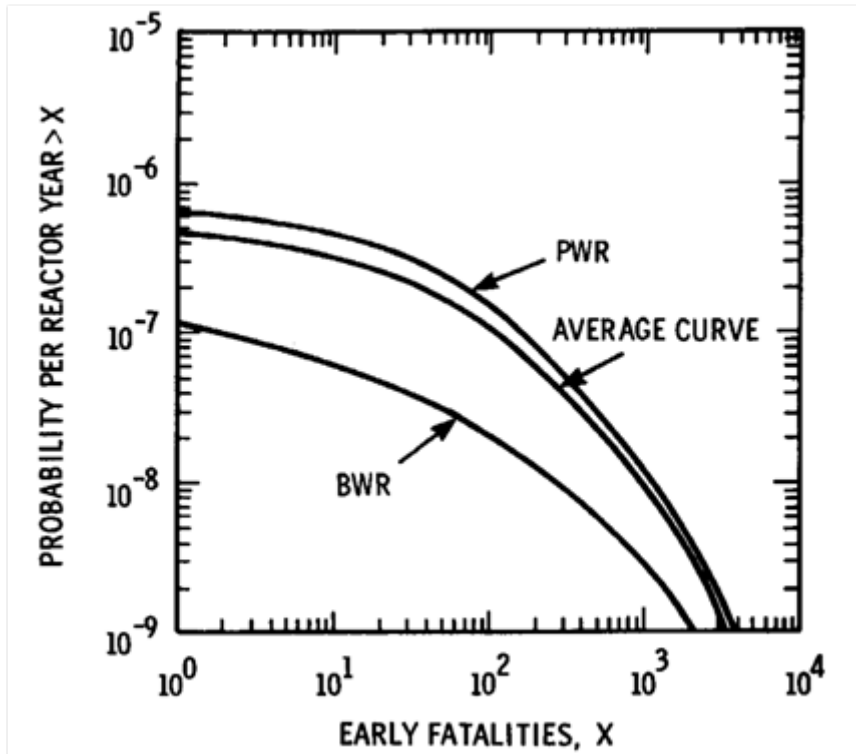
Verjetnostne varnostne analize JE



Drevo dogodkov med izlivno nezgodo

vir: Knief, Nuclear Engineering

"Reactor Safety Study - WASH 1400 (1975)



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

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!

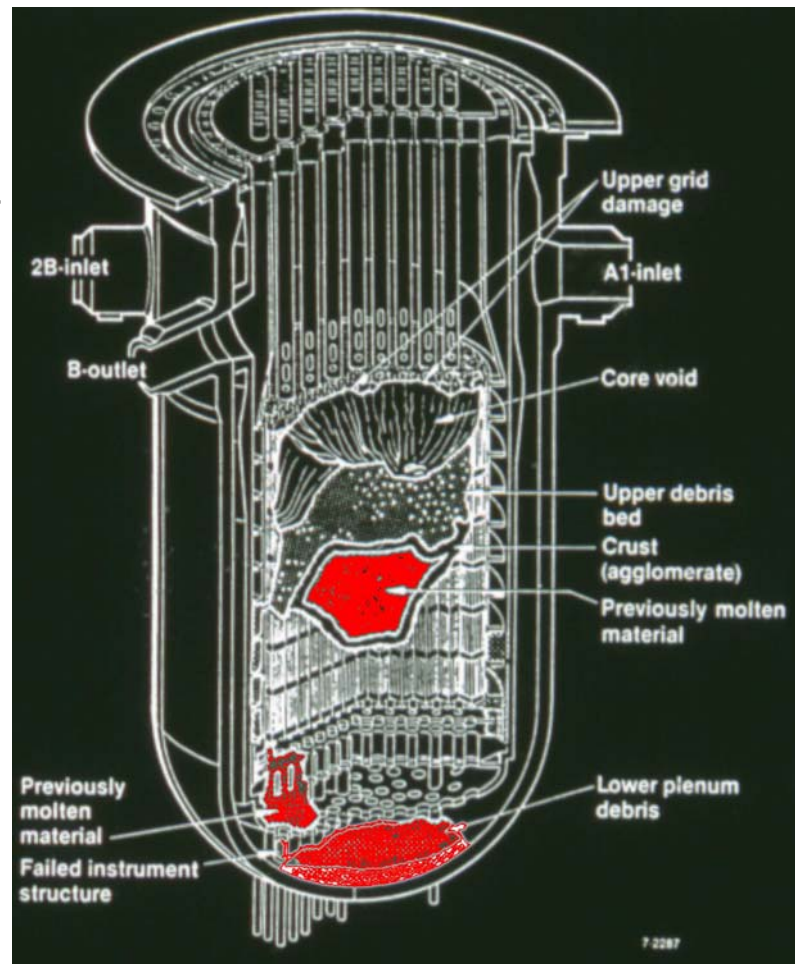
Zmanjšajo pretok sistema za zasilno hlajenje sredice, da bi preprečili napolnitev tlačnika s kapljevino.

Zaradi vibracij ustavijo primarni črpalke.

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

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

TMI-1 podaljšana licenca do 2034 (60 let)



Majhne radiološke posledice:

2,000,000 ljudi po 15 μ Sv

maks. ~ 370 μ Sv

...velike posledice za jedrsko industrijo.

Černobil 1986

RBMK reaktor - **projektne pomanjkljivosti**:

- pozitivni skupni reaktivnosti koeficient pri nizkih močeh
- počasen sistem za ustavitev reaktorja s kontrolnimi palicami
- brez zadrževalnega hrana
- možnost blokade varnostnih sistemov

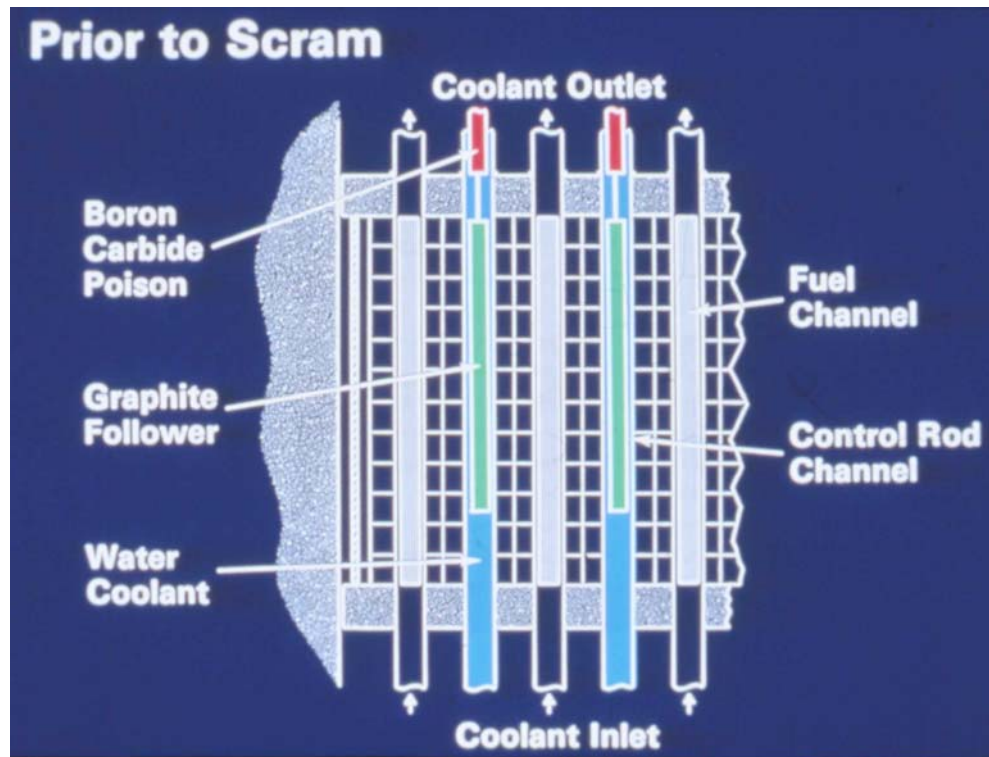
Človeške napake:

Organizacijske:

- neustrezni postopki,
- neusposobljeno osebje...

Konkretne

- 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 (padeč letala).

EPR (AREVA, EU)

Enoten sistem za srednjetačno in nizektačno varnostno vbrizgavanje

Napredni vodni akumulatorji (iz US-APWR)

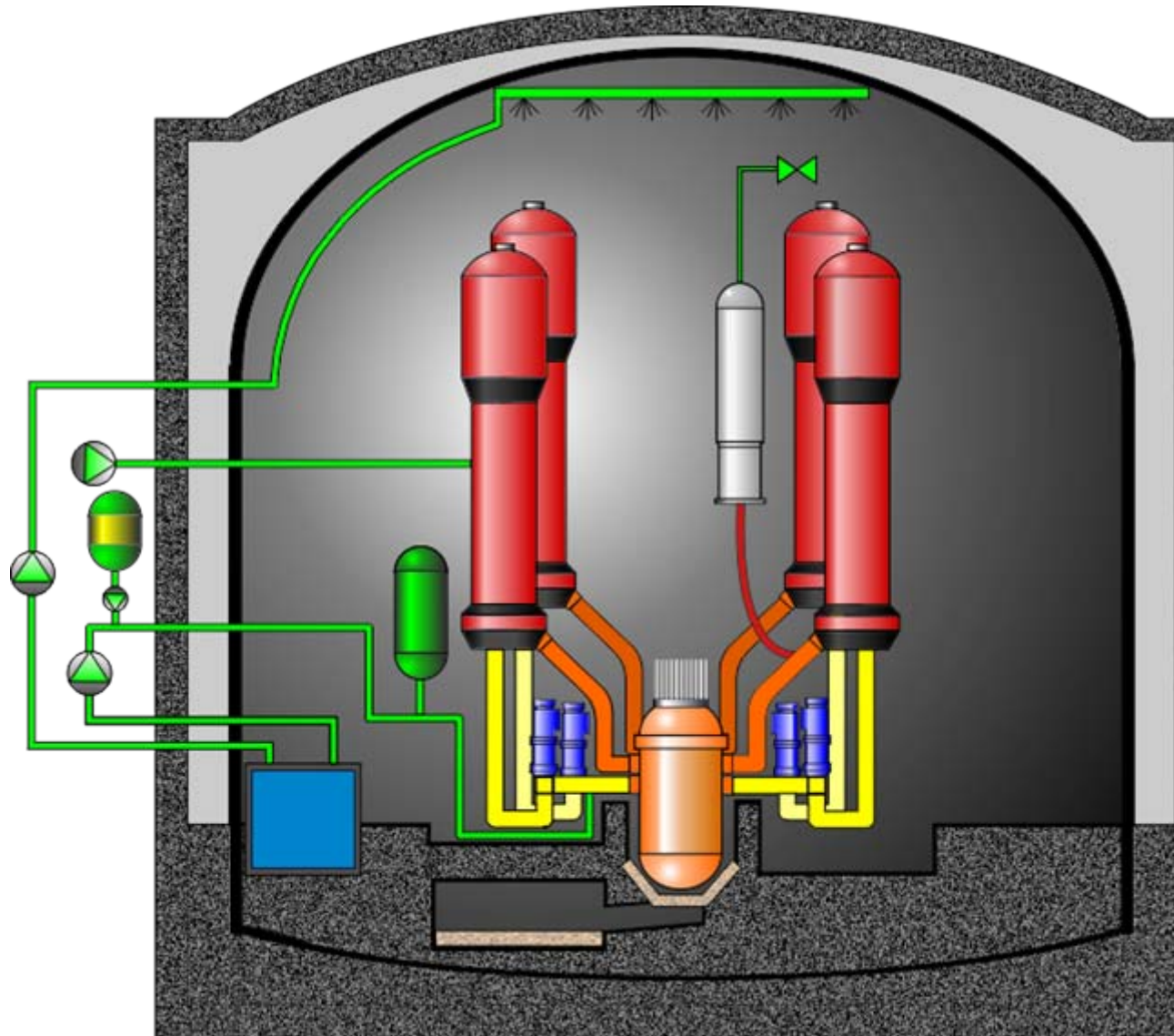
Sistem za dodatno boriranje

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

Prhe zadrževalnega hrama

Varnostni ventili na tlačniku

Lovilec staljene sredice

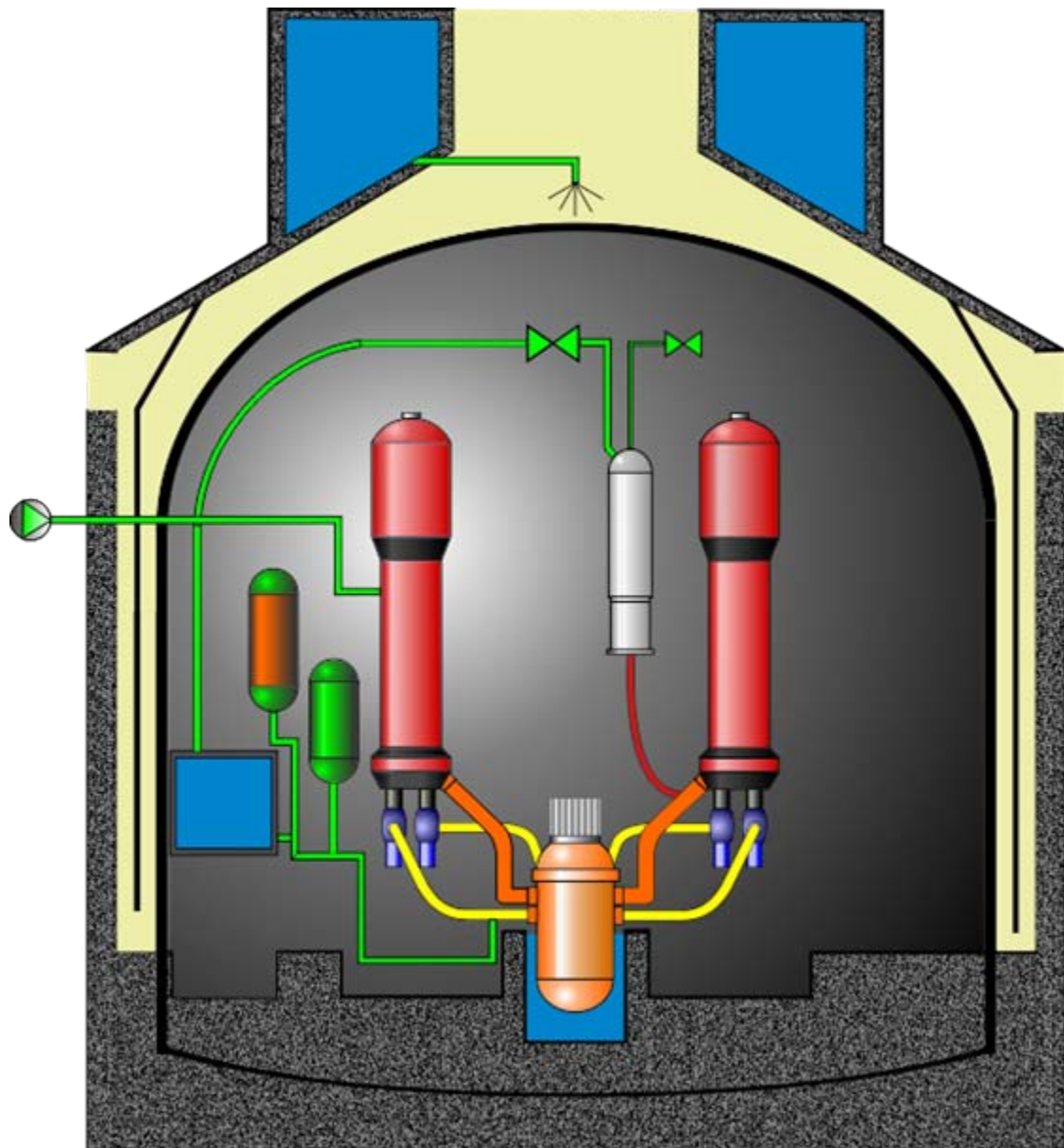


AP1000 (Westinghouse, ZDA)

Inovativen sistem za blaženje nezdod s taljenjem sredice.

Ustrezna zasnova za učinkovito zunanje hlajenje reaktorske posode.

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



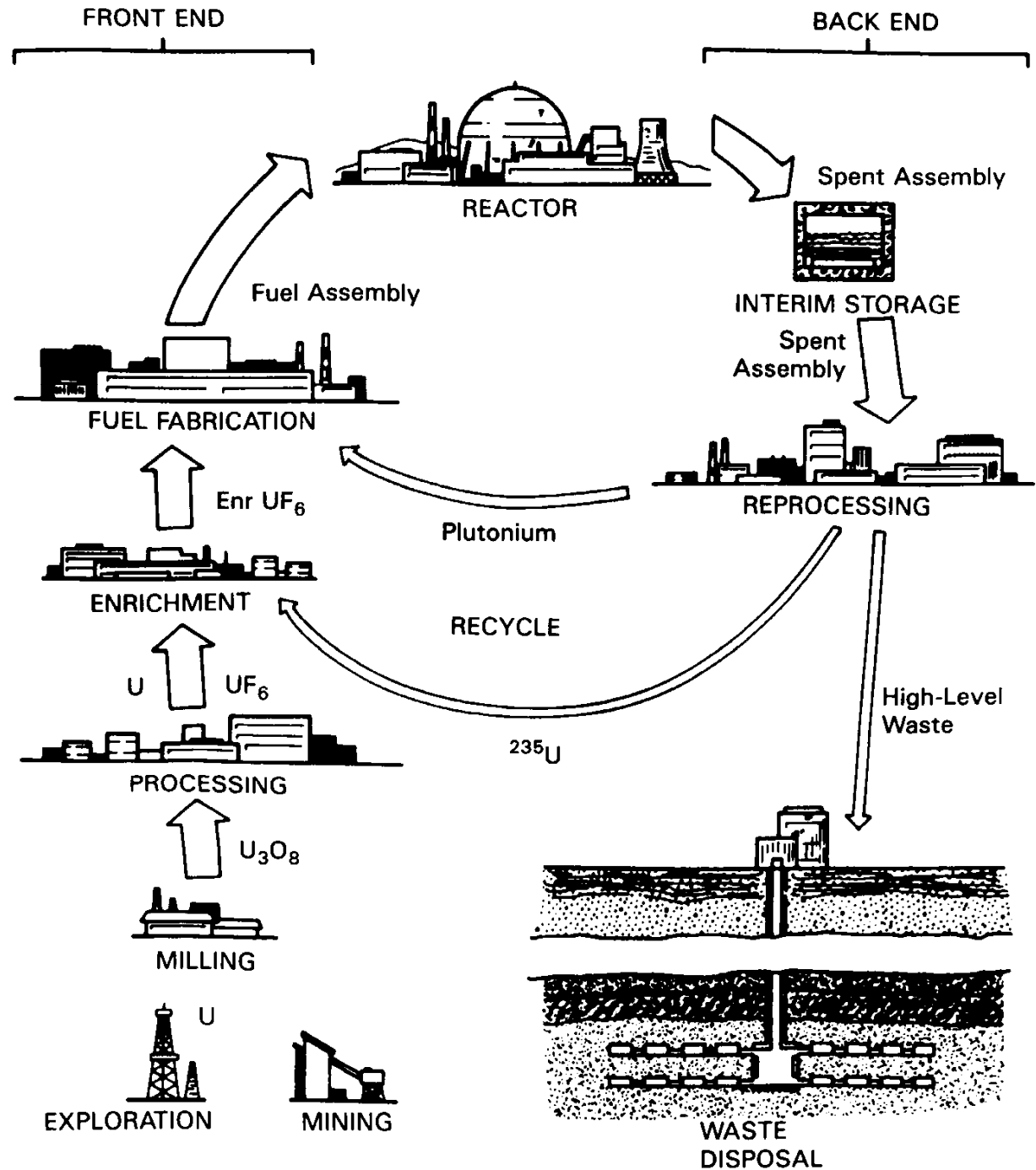
Analiza tveganja

| | 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.

Lahkovodni reaktor -
gorivni cikel

vir: Knief:
Nuclear Engineering



Januar 2010, približna cena 1 kg urana v obliki UO_2 reaktorskega goriva (www.world-nuclear.org):

| | | |
|---------------------|----------------------------|-----------|
| Uran: | 8.9 kg U_3O_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:

$$SWU = V(p) + V(t) (F-1) - V(f) F$$

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

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

"vrednostna funkcija"

p - obogatitev obogatenega urana (masni delež U^{235})

t - obogatitev osiromašenega urana

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

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

$V(0.00711)=4.869$, $V(0.002)=6.188$, $V(0.04)=2.924$

$F = 7.436$

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 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 raztapljanjem 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 UF₆ in obogatitev urana

Konverzija

- prečiščevanje rumene pogače (eliminacija primesi z znatnim basorbcijskim presekom za nevtrone)
- konverzija v UF₆ (sublimira pri 56 °C)

Obogatitev

| Metode | Separacijski faktor | Poraba energije (kWh/kgSWU) | Tržni delež 2010 (%) |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| - 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 jedrskih bomb

Tehnologija "problematična" s stališča neširjenja jedrskega orožja !



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

Izdelava goriva

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

Recikliranje goriva

- recikliranje Pu v izrabljenem gorivu

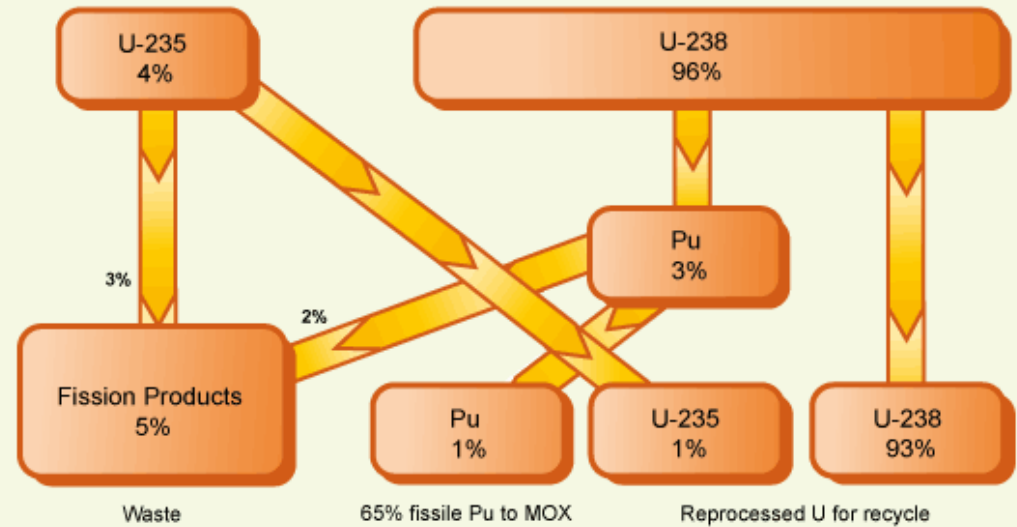
- 7 UO_2 izrabljenih gorivnih elementov da 1 MOX element (Mixed Oxide Fuel) + trdni visokoradioaktivni odpadki s 35% volumna in mase izrabljenega goriva

- zahtevna tehnologija predelave - deluje v Evropi in na Japonskem - ne v ZDA

- recikliranje U^{235} - precej bolj zahtevno...

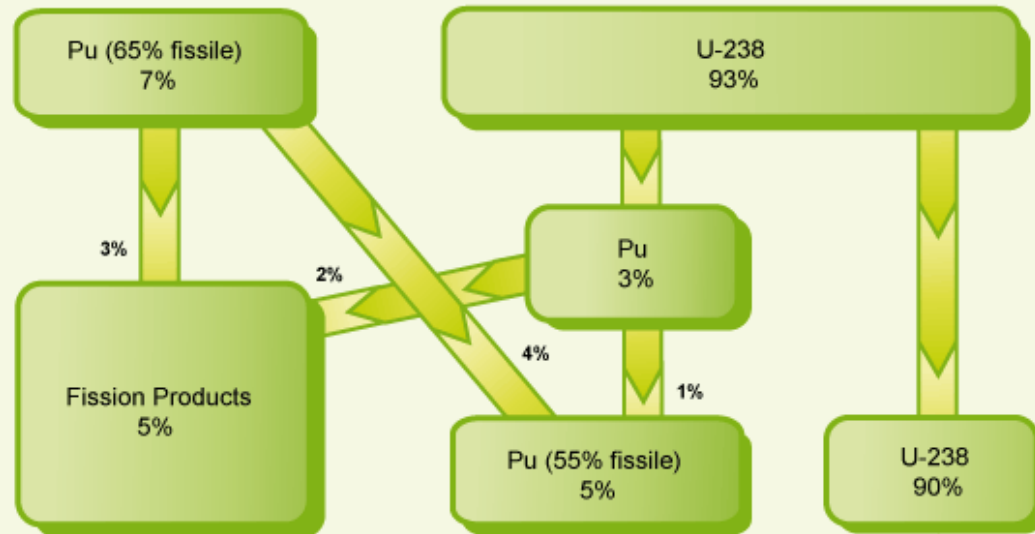
vir: www.world-nuclear.org

Reaction in standard UO_2 fuel



Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides

Reaction in MOX fuel



Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides

Visoko radioaktivni odpadki

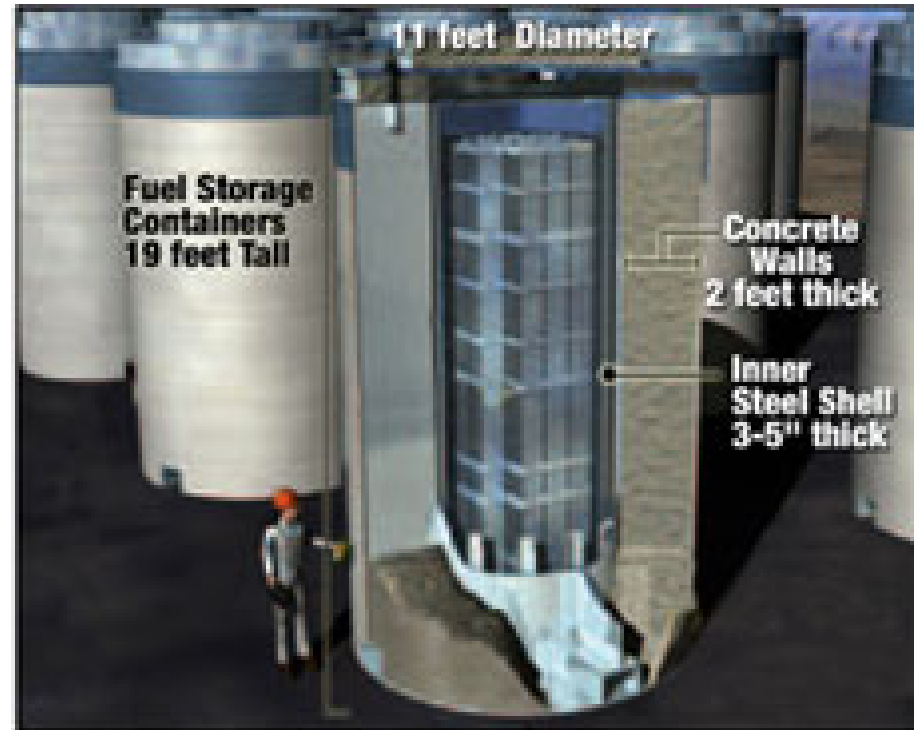
JEK - 7000 m³ volumen goriva
(60 gorivnih elementov/18 mesecev,
60 let) = 2400 gorivnih elementov ob
zaprtju.

V zabojih: 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.

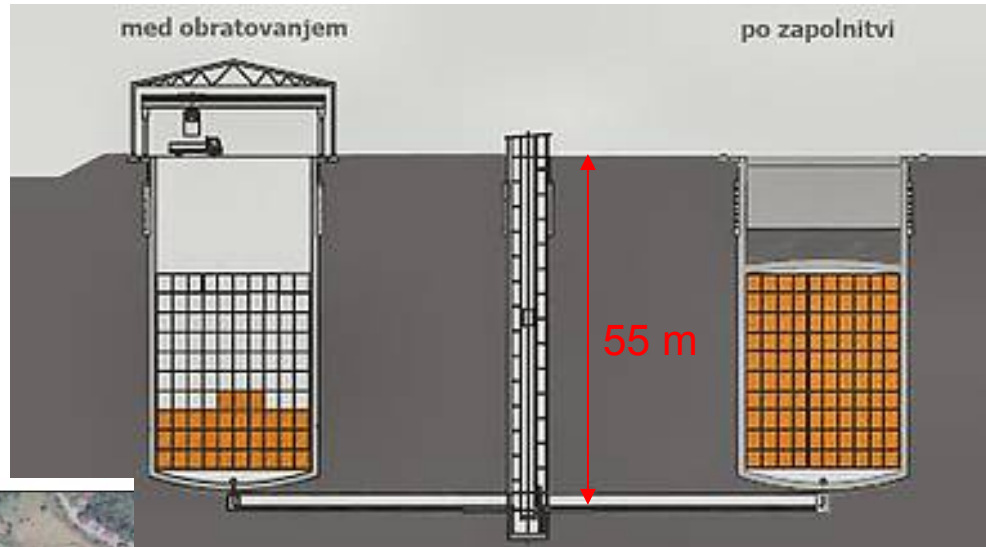


Odlaganje ?

Morda raje skladiščenje?

Kakorkoli že: Volumen teh odpadkov je majhen.

Nizko in srednje radioaktivni odpadki



JEK



vir: RAOPIS, Februar 2007