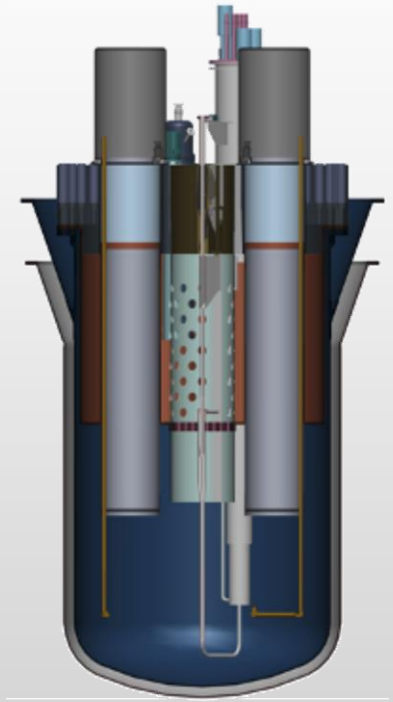
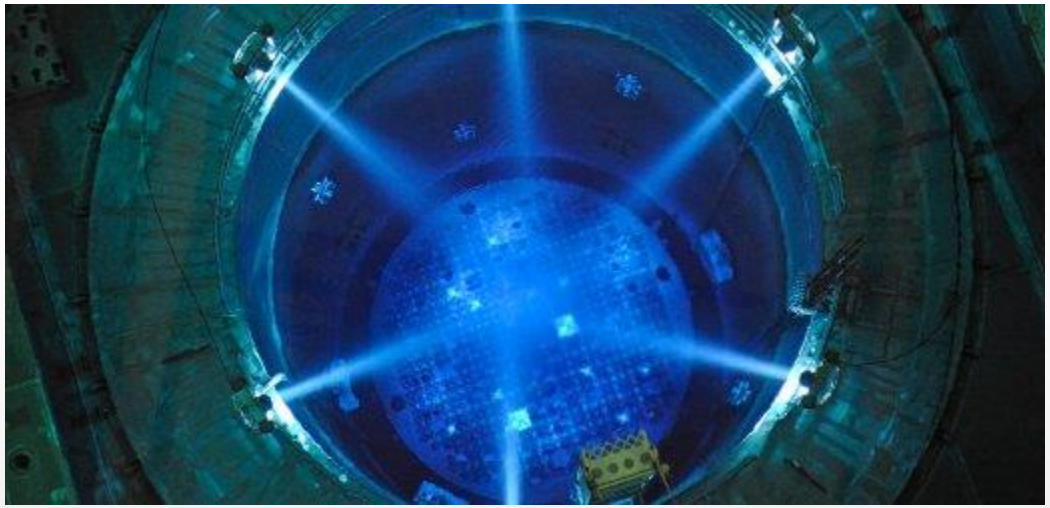
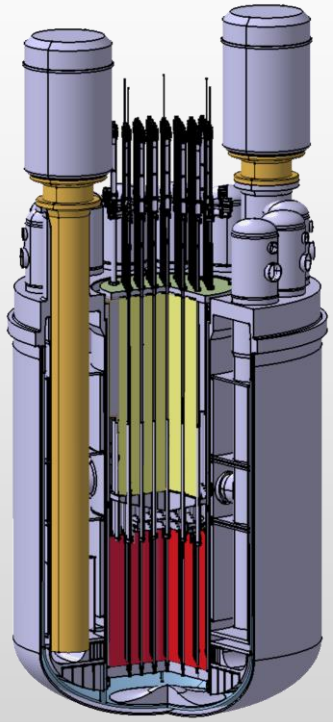






Tuumareaktoritest

Marti Jeltsov

Eesti Energeetika Veteranide Ühendus

21.11.2019 Tallinn

Endast

Nõo Reaalgümnaasium

- Füüsika ja programeerimise suund

Tartu Ülikool

- BSc kraad füüsikas

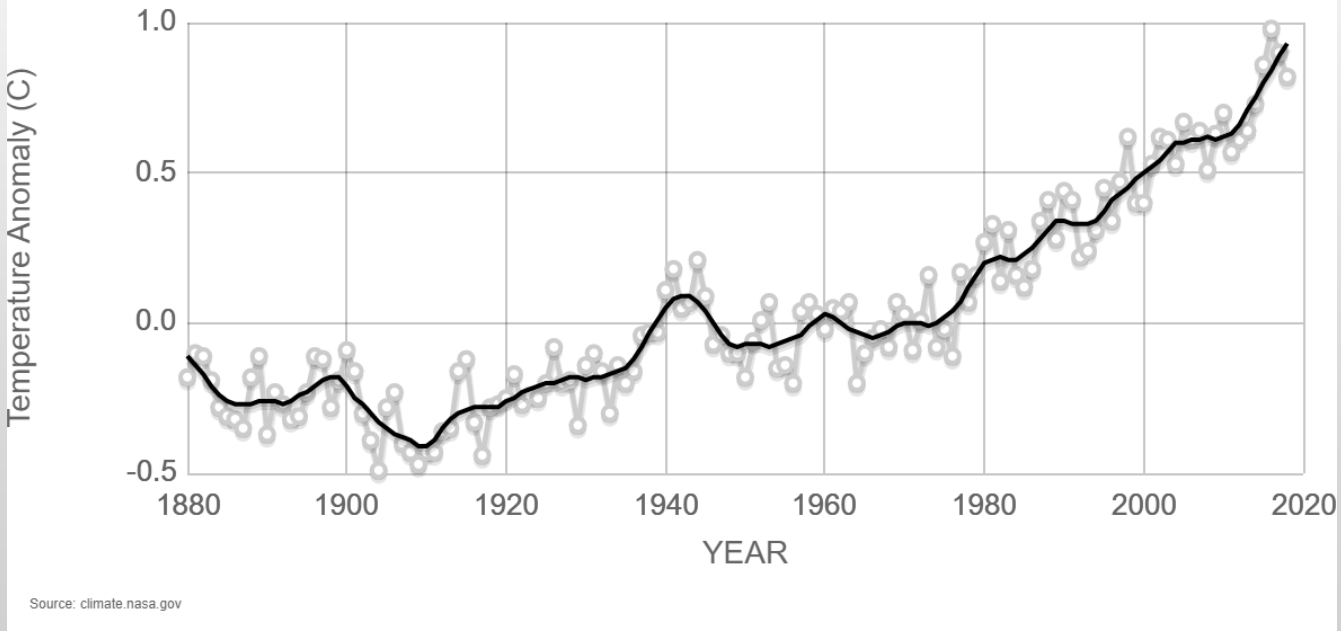
Kuninglik Tehnoloogiainstituut KTH Stockholm

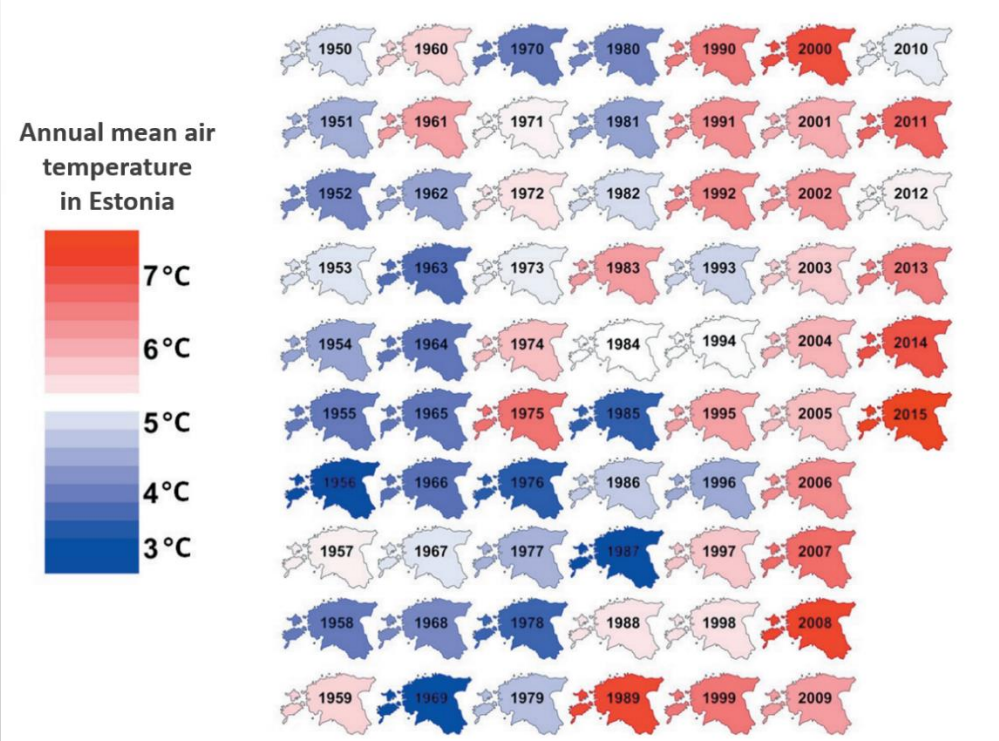
- MSc ja PhD kraad tuumaenergeetikas

Vattenfall, Estflow Consulting, Fermi Energia, Eesti Masinatööstuse Liit

- Ettevõtlus ja pro-bono tegevused

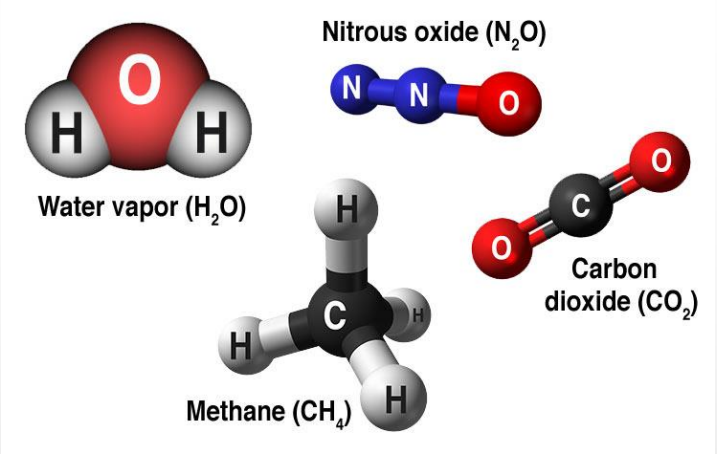
Konsensuslik mure: kliima soojeneb





Sepp et al., „Kust tead, et kliima soojeneb," Riigikogu toimetised, 38, 2018

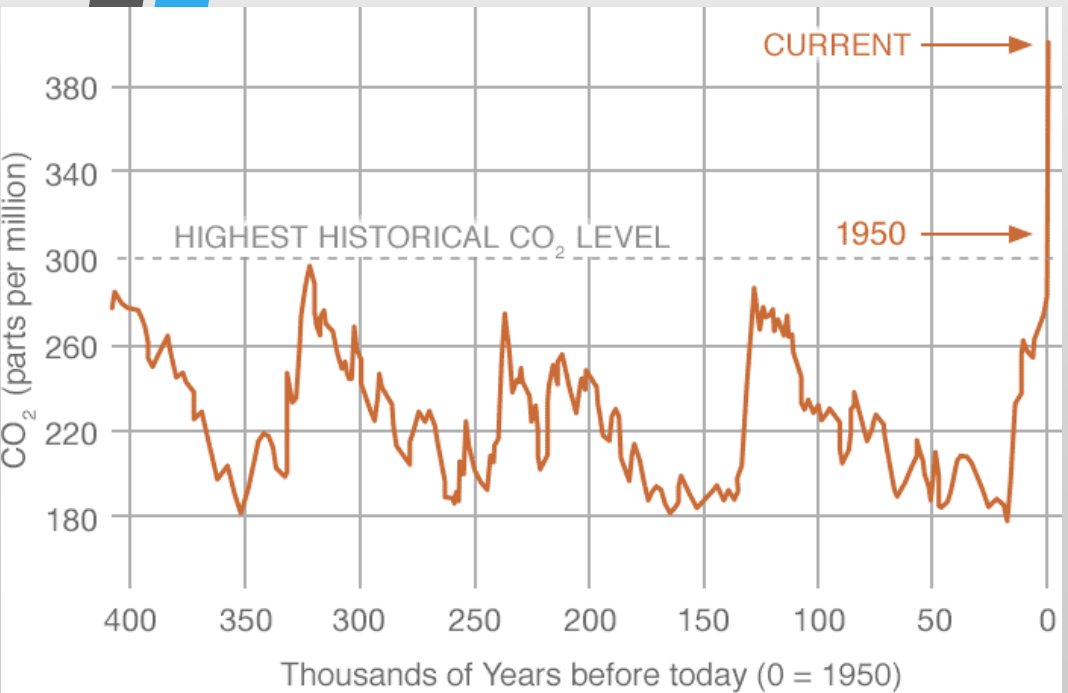
Kasvuhoonegaasid

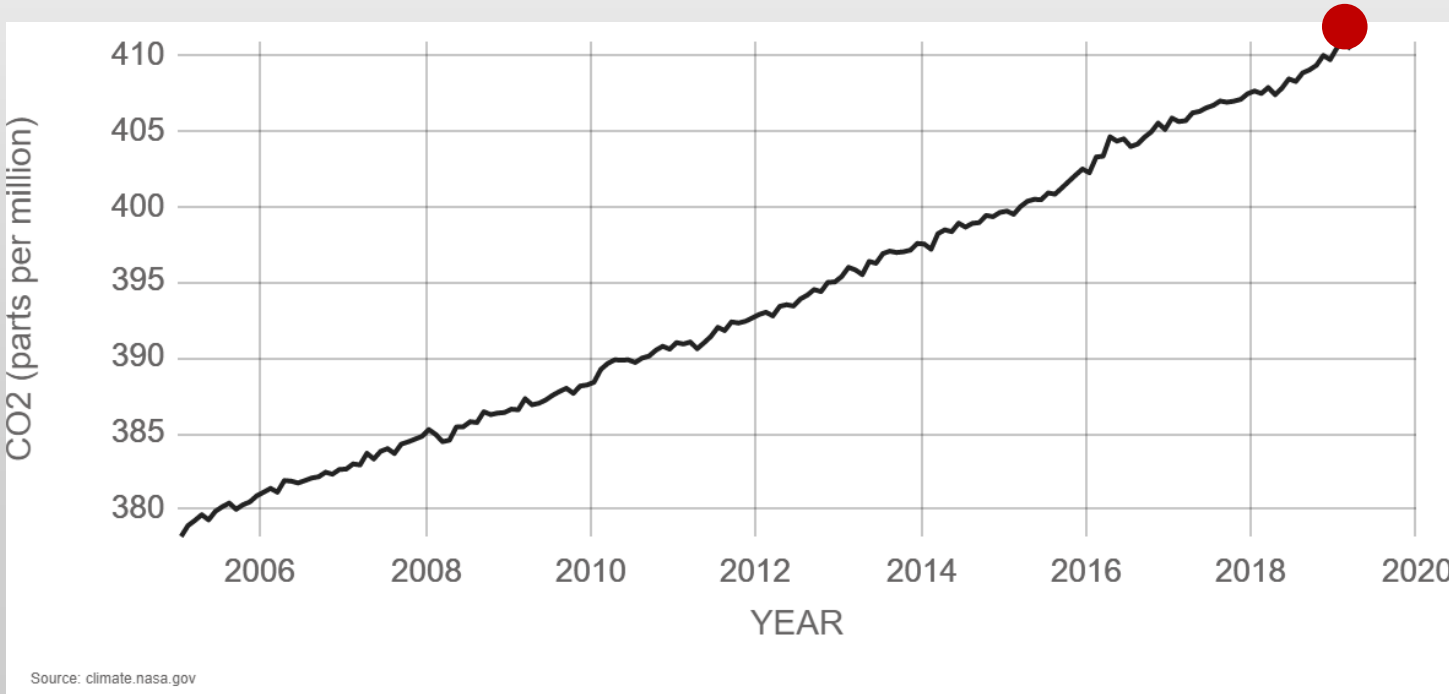


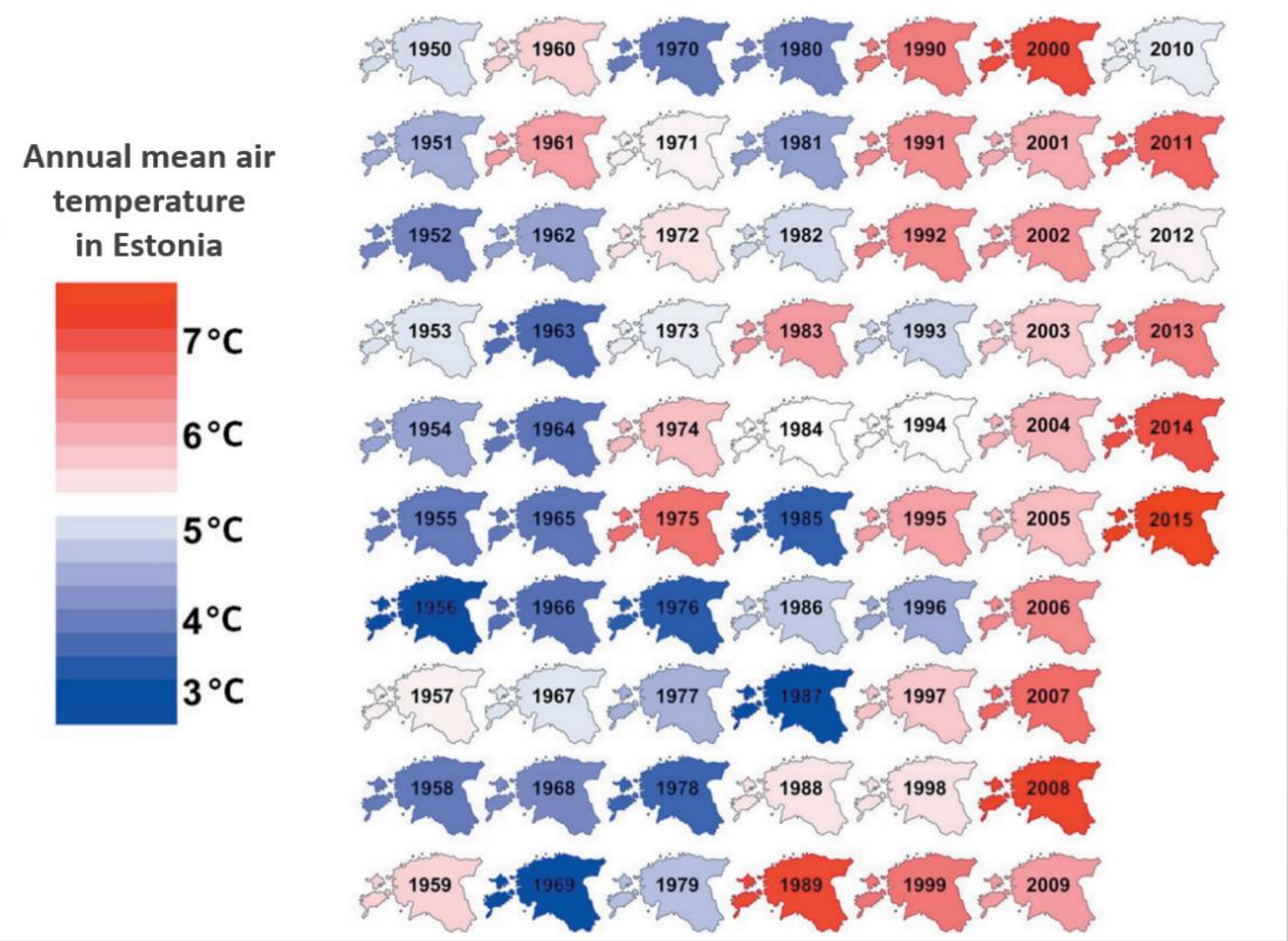
CO_2 tase on Tööstusrevolutsiooni algusest alates tõusnud 3 korda

CO_2 on kõige pikemaajalise mõjuga kliimasoojenemise tegur

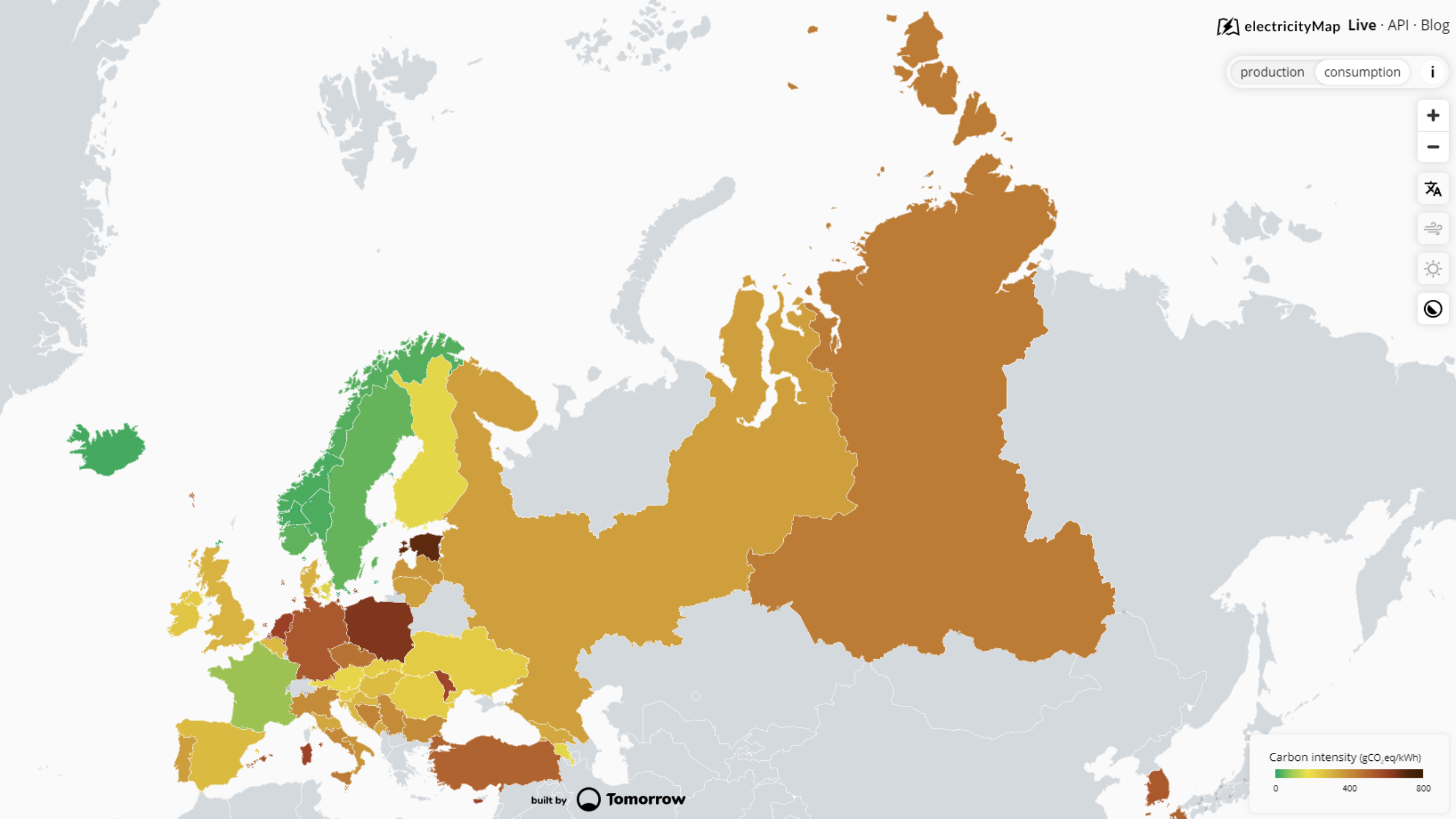
Viimane mõõtmine: 410 ppm!



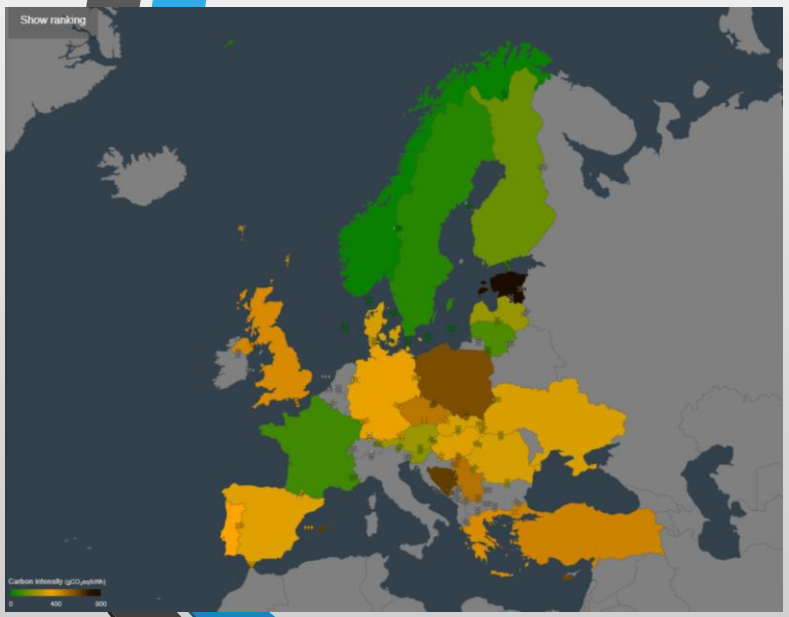




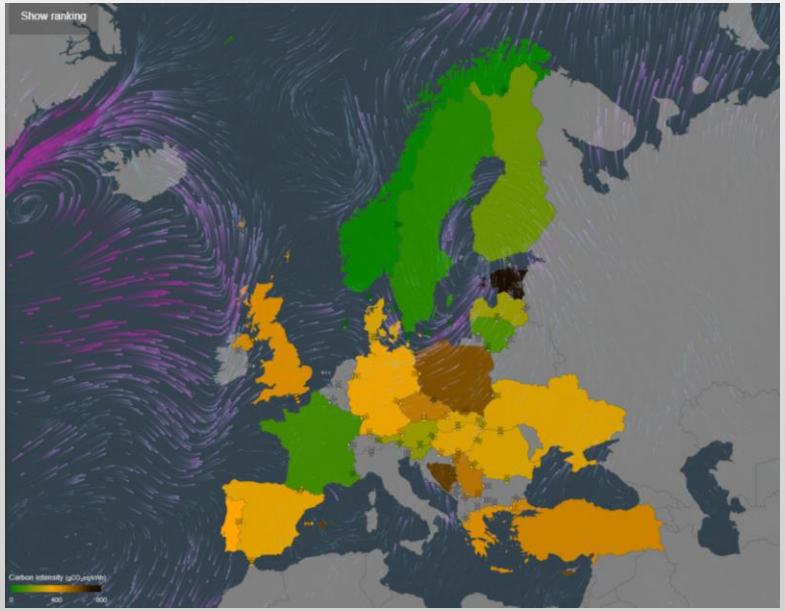
Sepp et al., „Kust tead, et kliima soojeneb," Riigikogu toimetised, 38, 2018


electricityMap Live · API · Blog
production
consumption
i
Carbon intensity (gCO2eq/kWh)
0
400
800
built by Tomorrow

Talvepäev



CO2 intensiivsus



Tuule potentsiaal

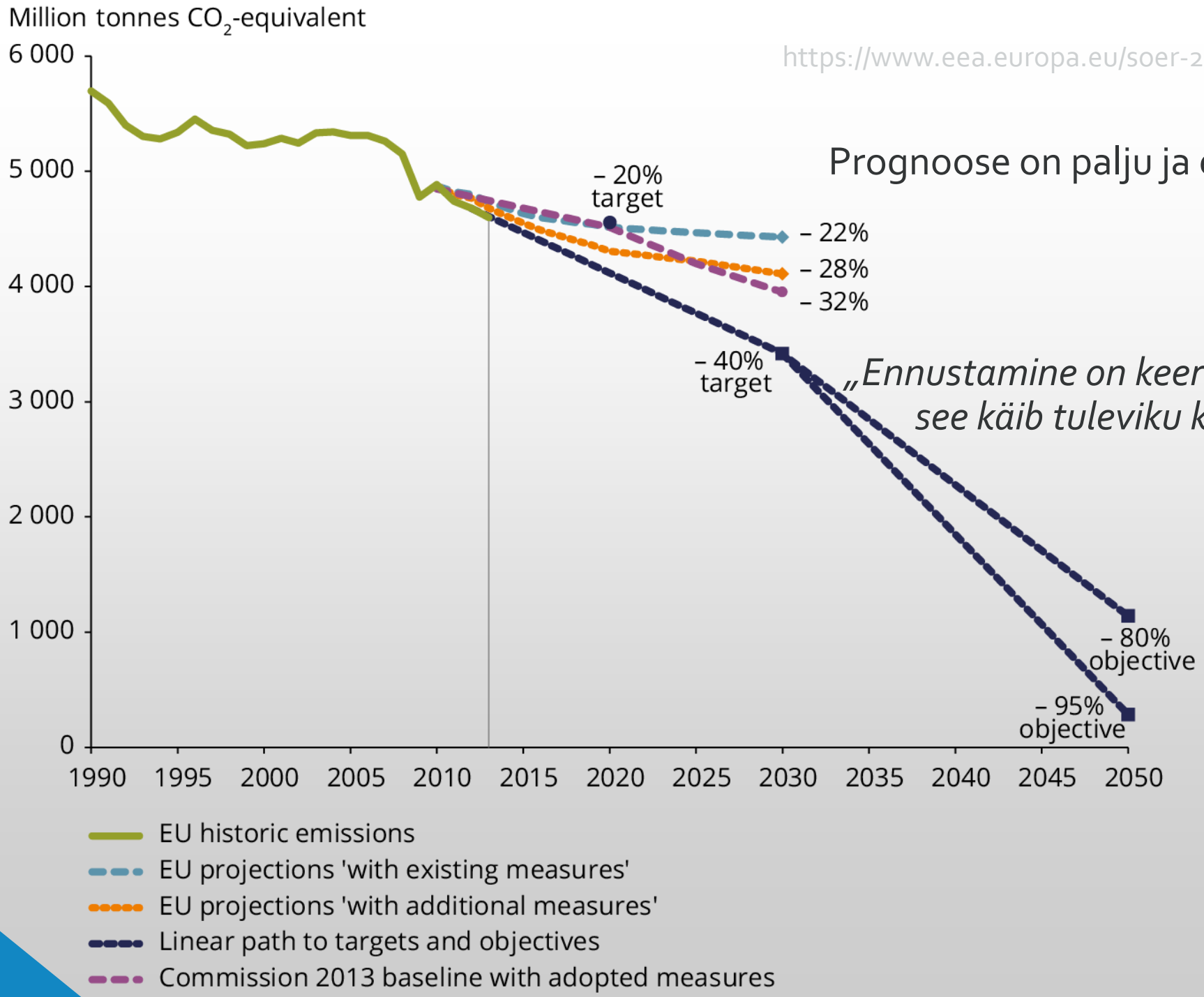
Päikese potentsiaal

12 detsember 2017

Allikas: www.electricitymap.org

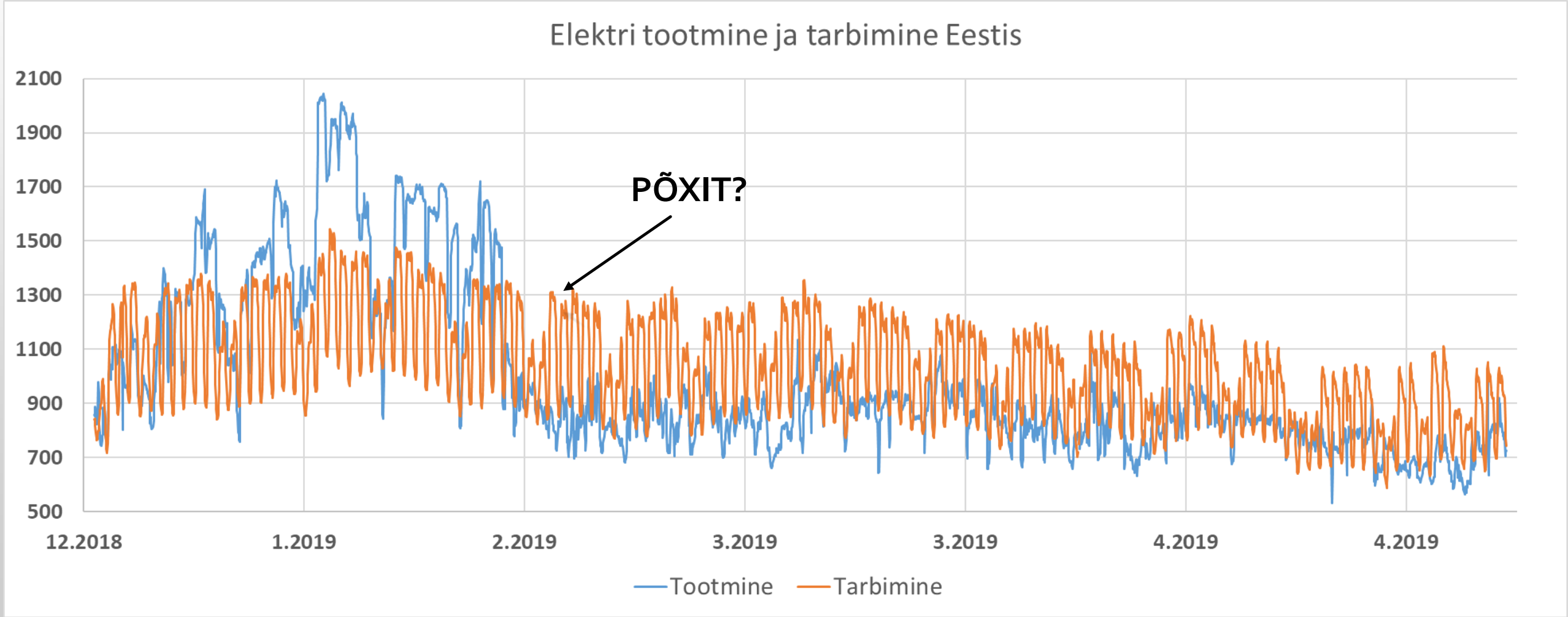
https://www.eea.europa.eu/soer-2015/synthesis/report

Prognoose on palju ja erinevaid!



„Ennustamine on keeruline, eriti siis kui see käib tuleviku kohta" - Nils Bohr

EU kliimapoliitika mõjub

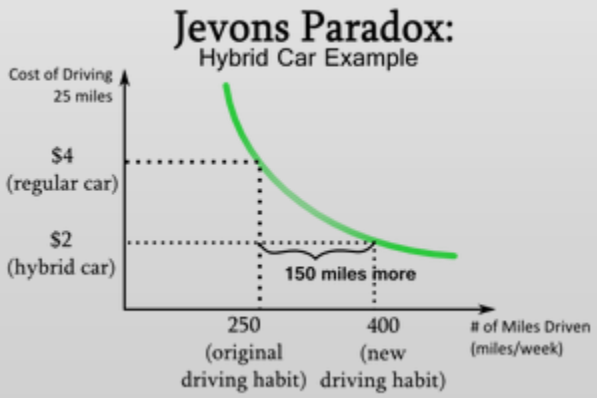


Kui põletada enam ei saa?

- Tuleb edasi minna puhaste tehnoloogiatega
- Võimalus innovatsiooniks Eestis – nagu me harjunud olema

Efektiivsuse probleem: Jevoni paradoks

- <u>Tõhusam ressursikasutus viib nõudluse kasvuni</u>
- Näited:
  - Fossiilsete kütuste kasutamine energeetikas
  - Elektriautod

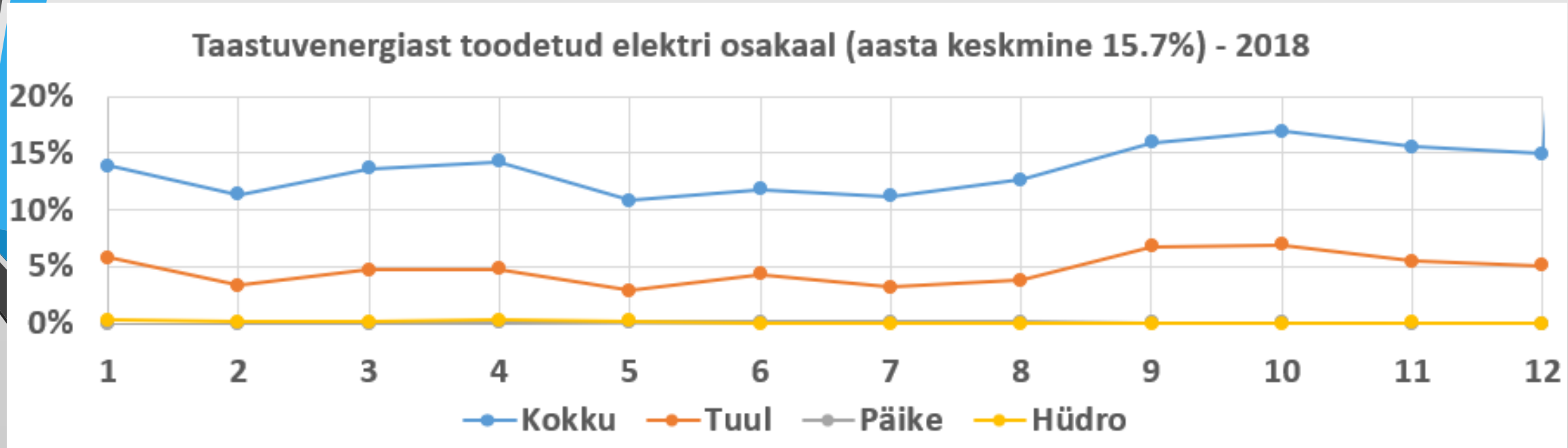


Jätkusuutlikkus ja varustuskindlus

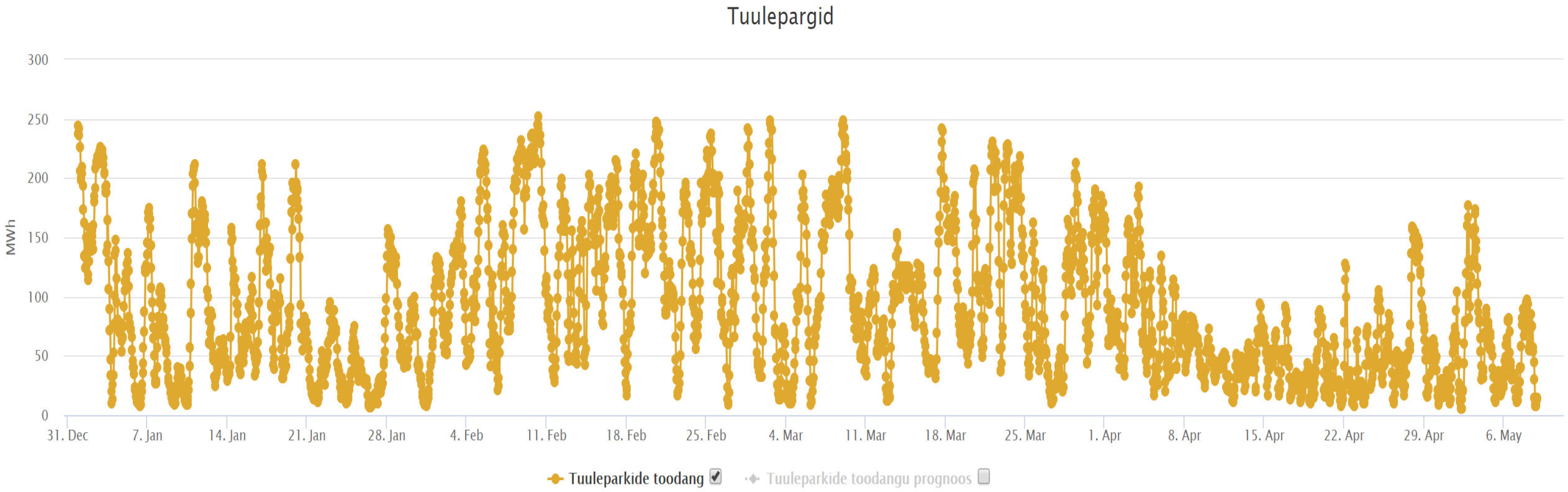
Biomassi kasutamine vabastab CO2 ja pakub konkurentsi põllumajandusele (*Indirect Land Use Change*)

Tuul ei taga täna ega ilmselt lähiajal varustuskindlust

- Tuuleenergia toodang Eestis 2018: Võimsus 300 MW, keskmine 70 MW, mediaan 51 MW

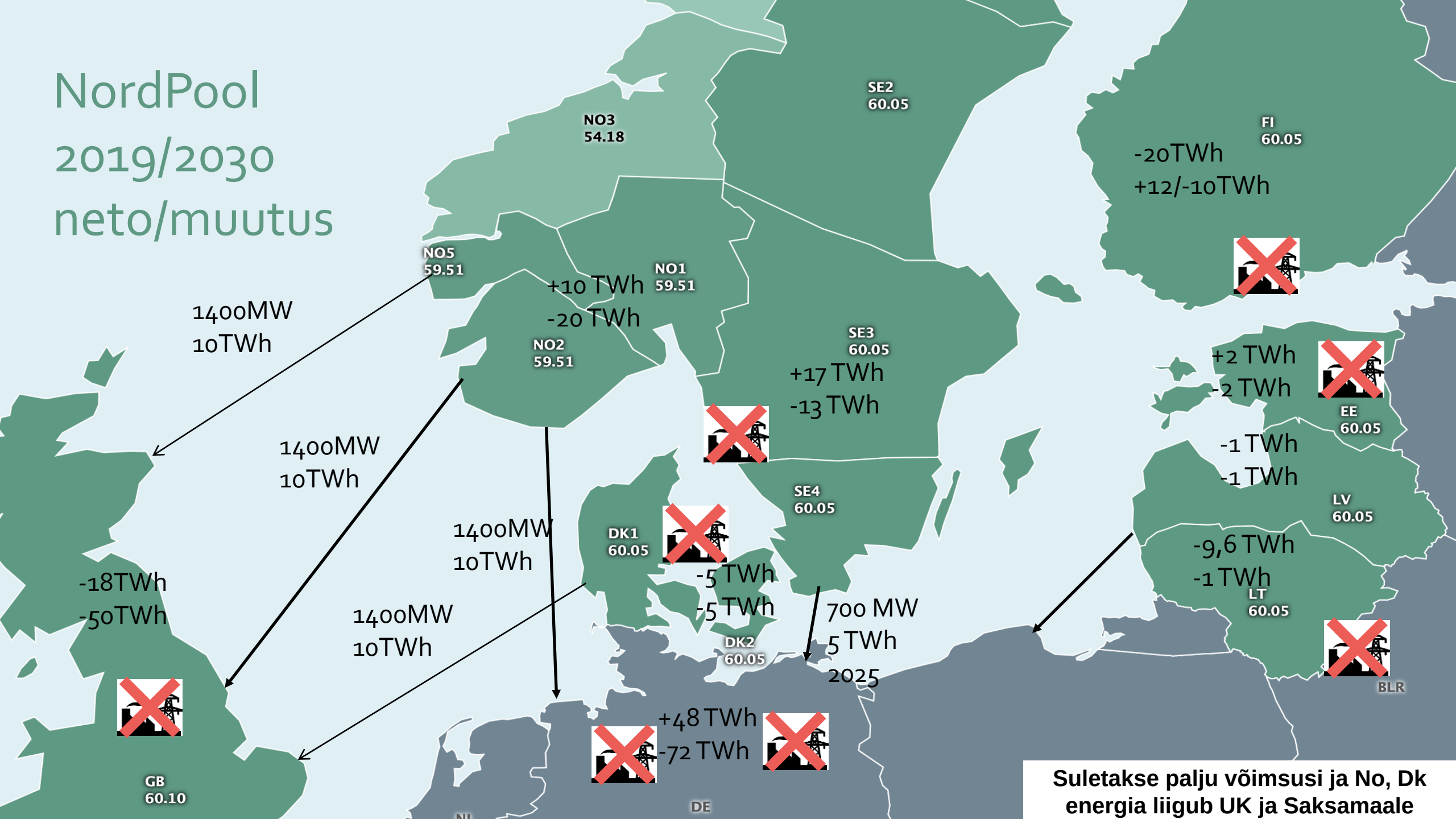


Ja see stabiilsuse küsimus



Allikas: Elering

NordPool 2019/2030 neto/muutus

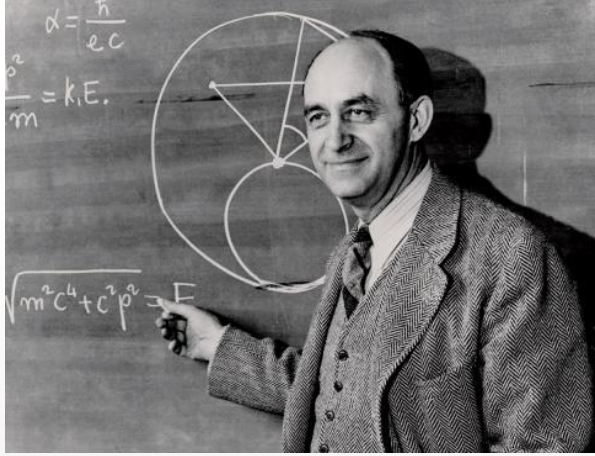


Suletakse palju võimsusi ja No, Dk energia liigub UK ja Saksamaale

Mida siis teha?

- Elektri varustuskindlus halveneb seoses põlevkivielektri vähenemisega
- Ainult tuule- ja päikeseenergiale panustamisega kaasneb sõltuvus gaasist - fossiilne kütus, mis on kallis ja kallineb veelgi tänu emissioonipoliitikale
- Fermi Energia näeb tõsise võimalusena väikesel moodulreaktoril (VMR) põhinevat tuumajaama
  - Selleks on alustatud koostööd uusima põlvkonna reaktorite arendajatega, kelle tehnoloogia on USAs ja Kanadas litsenseerimisel.
  - Koostöös partneritega Eestist, Soomest, Belgiast on hetkel teostamisel VMR sobivusuuring

Fermi Energia OÜ



- Nimi: Enrico Fermi- tuumaenergeetika isa;
  1. maailma tuumareaktori Chicago pile autor.
- **Sandor Liive** – nõukogu esimees, endine AS Eesti Energia juhatuse esimees
- **Kalev Kallemets** – MA, juhatuse liige, tuumaenergia ökonoomika Müncheni ülikoolis, MTÜ Eesti Tuumajaam juhatuse liige
- **Henri Ormus** MSc – juhatuse liige, KTH, Fennovoima projektiinsener, Euroopa Tuumaühenduse asepresident
- **Marti Jeltsov** PhD – KTH, Estflow Consulting asutaja, Rootsi Tuumaenergeetika Selts, tuumaenergeetika insener, energiaturgude ekspert
- **Kaspar Kööp** PhD – KTH, reaktorite ohutus- ja riskianalüüsi ekspert
- **Mait Müntel** PhD – Nõukogu liige, CERNi füüsik, Lingvist.com asutaja ja tegevjuht
- **Merja Pukari** PhD – Nõukogu liige, tuumkütuse insener, Vattenfalli projektijuht

Tuumaenergia

- Tehnoloogia, mis eksisteerib, on süsinikuvaba, pakub odavat ja stabiilset elektrit.
- Kuid sellegi tehnoloogia levikul leidub väljakutseid.

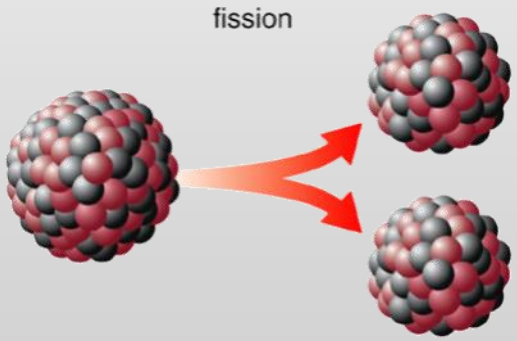
Tuumareaktsioon

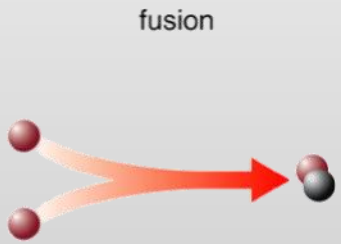
Tuumade lõhustumine

- Rasked tuumad jagunevad kaheks tänu neutronitega "pommitamisele"
- Tekkivate tuumade masside summa on väiksem kui esialgse tuuma mass

Tuumade ühinemine

- Kerged tuumad ühinevad tänu kui neid kiire hooga kokku "pommitada"
- Tekkiva tuuma mass on väiksem kui tema koostisosade masside summa





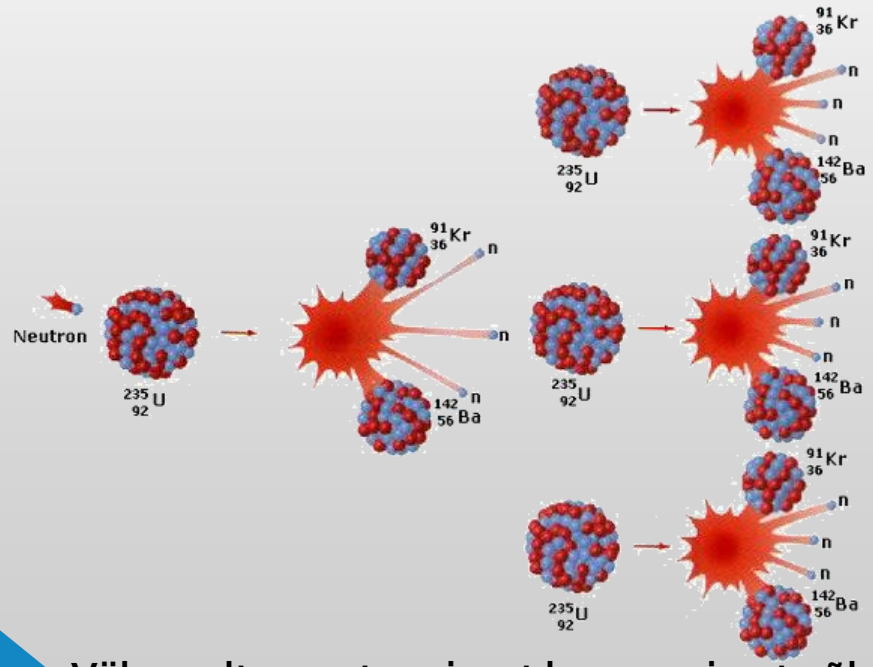
Kadunud mass

$$E = mc^2$$

Ahelreaktsioon

Efektiivne neutronkordaja
(keskmine neutronite arv ühes lõhustumises põhjustamaks järgmist):

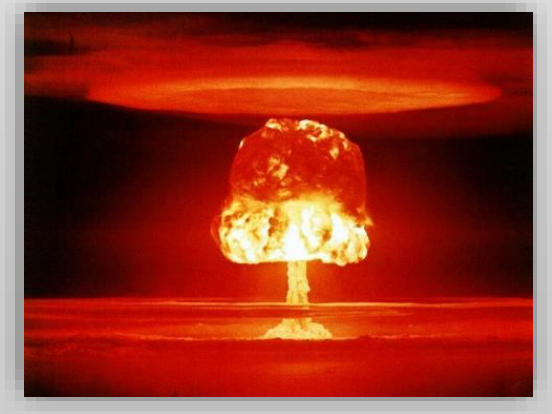
$k < 1$ (subkriitiline): Ahelreaktsioon hääbub,
$k = 1$ (kriitiline): Jätkusuutlik ahelreaktsioon, i.e. reaktoris,
$k > 1$ (ülekriitiline): Iga reaktsioon toodab rohkem neutroneid kui eelmine, i.e. tuumarelvades.



Vähemalt 1 neutron igast lagunemisest põhjustab uue lagunemise

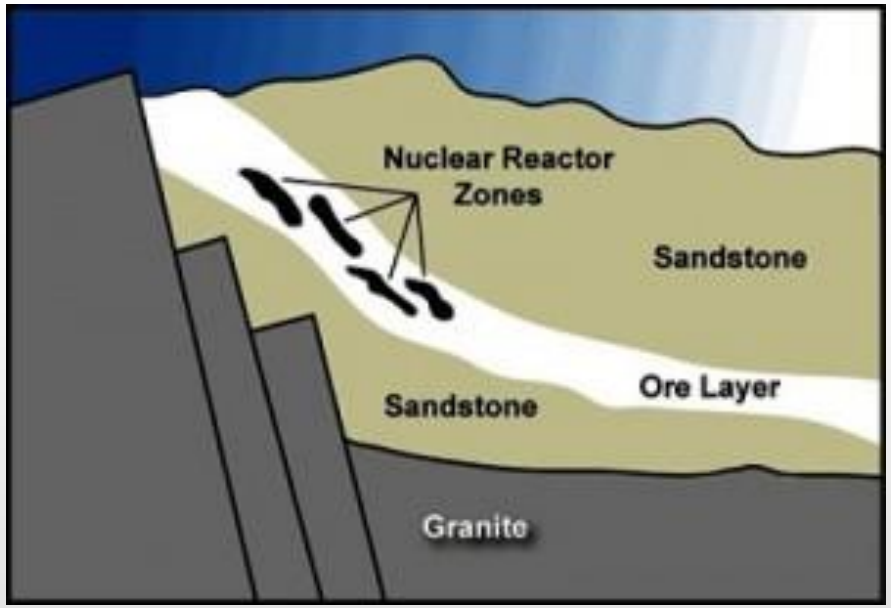
Kontrollitult tuumajaamades

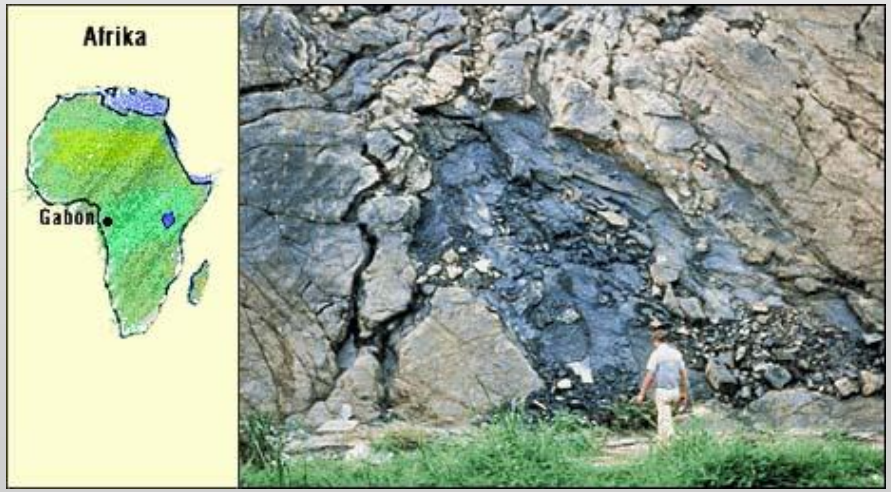
Kontrollimata tuumaplahvatustes



Looduslik tuumareaktor – Oklo, Gabon

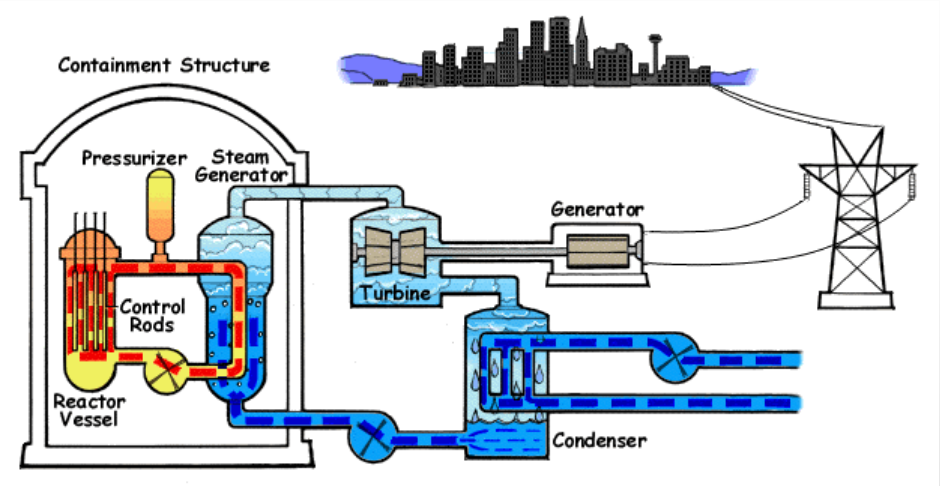
- Avastati 1972 Prantsuse füüsiku Francis Perrin'I poolt
- "Töötas" 1.7 miljardit aastat tagasi
- 16 "tuuma", 3-5% U-235 sisaldusega
  - Suurus: cm – m
  - Temperatuur: 400-500 °C
- 3h tsükkel võimsusega 100 kW:
  - 30 minutit
    - Vesi sattus uraanirikasse kivimipiirkonda, toimis neutronite aeglustina
    - Tekkinud soojuse mõjul kees vesi ära ning reaktsioon peatus
  - 2.5 tundi:
    - Reaktori jahtudes vesi naases ning tsükkel kordus
  - Kestis ligi 150,000 aastat
  - "Stardineutron" U-235/238 spontaansest lõhustumisest
- Teadaolevalt ainus koht maailmas, ahelreaktsiooni toimimiseks vajaliku uraani, vee ja füüsiliste tingimuste kombinatsiooniga
- **Oklo demonstreeris tuumajäätmete lõppladestuse võimalikkust pinnases**

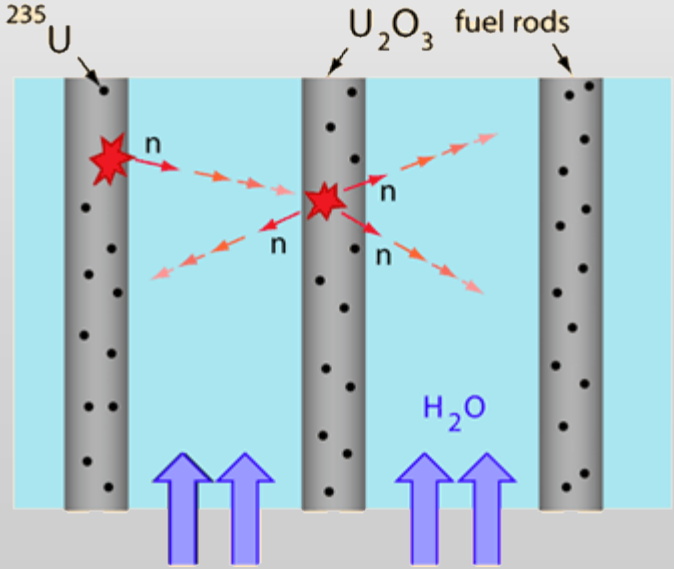




Tuumareaktor – „edev moodus vee keetmiseks“

- Seade stabiilse ja kontrollitud ahelreaktsiooni säilitamiseks.
- Tuumareaktsioonide käigus vabanev energia kasutatakse ära jahutusvedeliku abil.
- Kasutatakse näiteks
  - elektri tootmiseks,
  - lennukikandjate ja allveelaevade käitamiseks,
  - isotoopide tootmiseks,
  - materjaliteaduses.





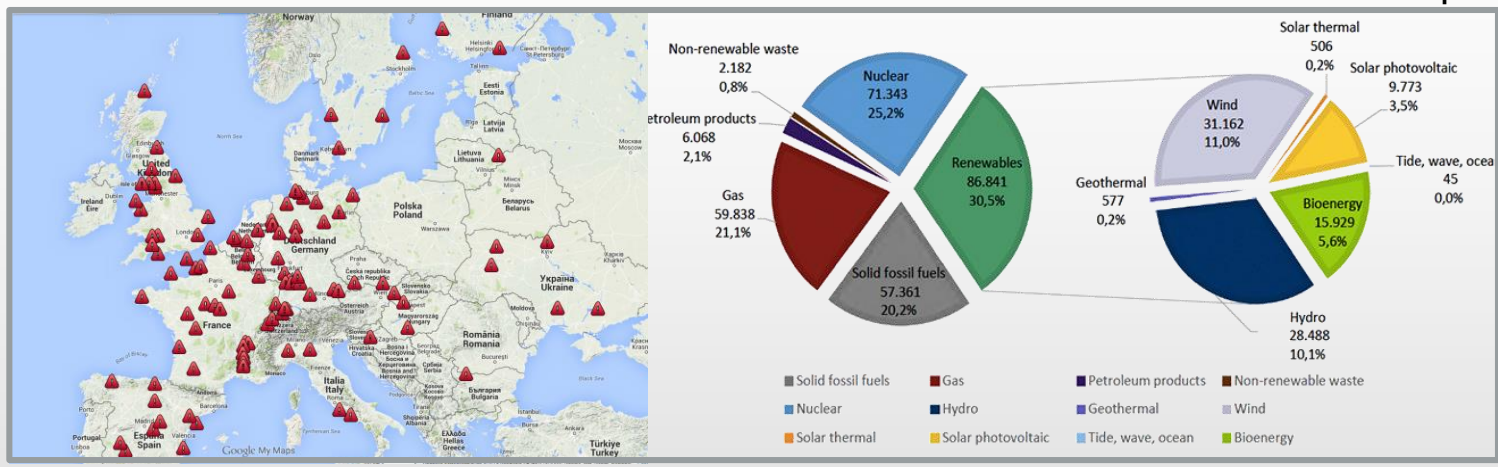
Vedelik jahuti ja aeglustina kütuse vahel

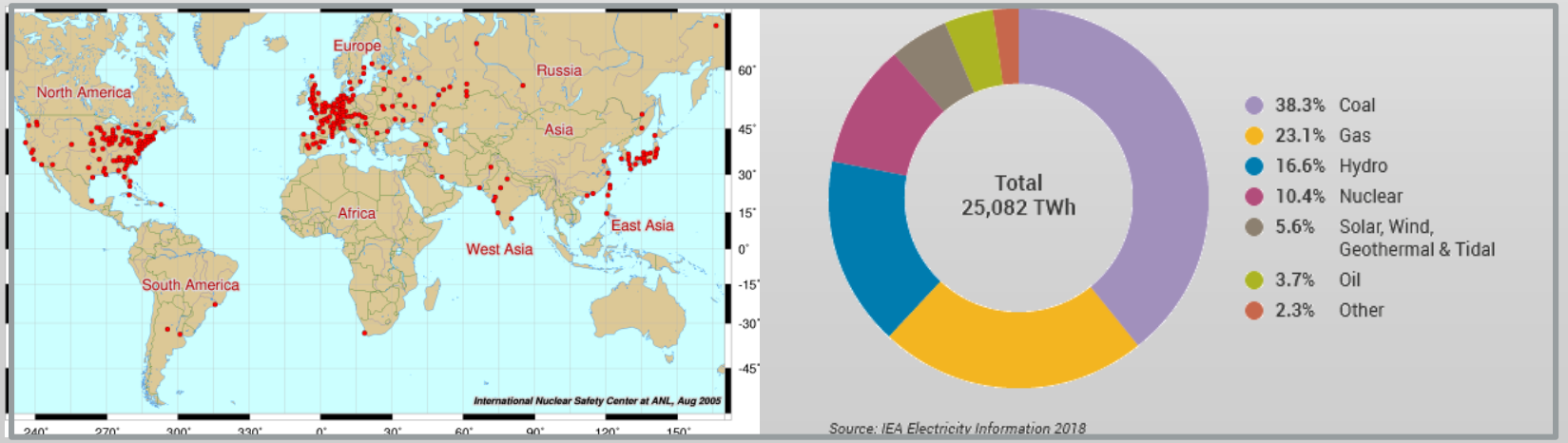
Tuumaenergia täna maailmas

- 450 jaama töötab 30 riigis
- Kogemust 18 000 reaktor-aastat
- Kokku 400 Gwe
- 11% maailma elektritoodangust

- Hetkel ehitatakse 54 tuumajaama 18 riigis
  - Enam kui pooled Aasias

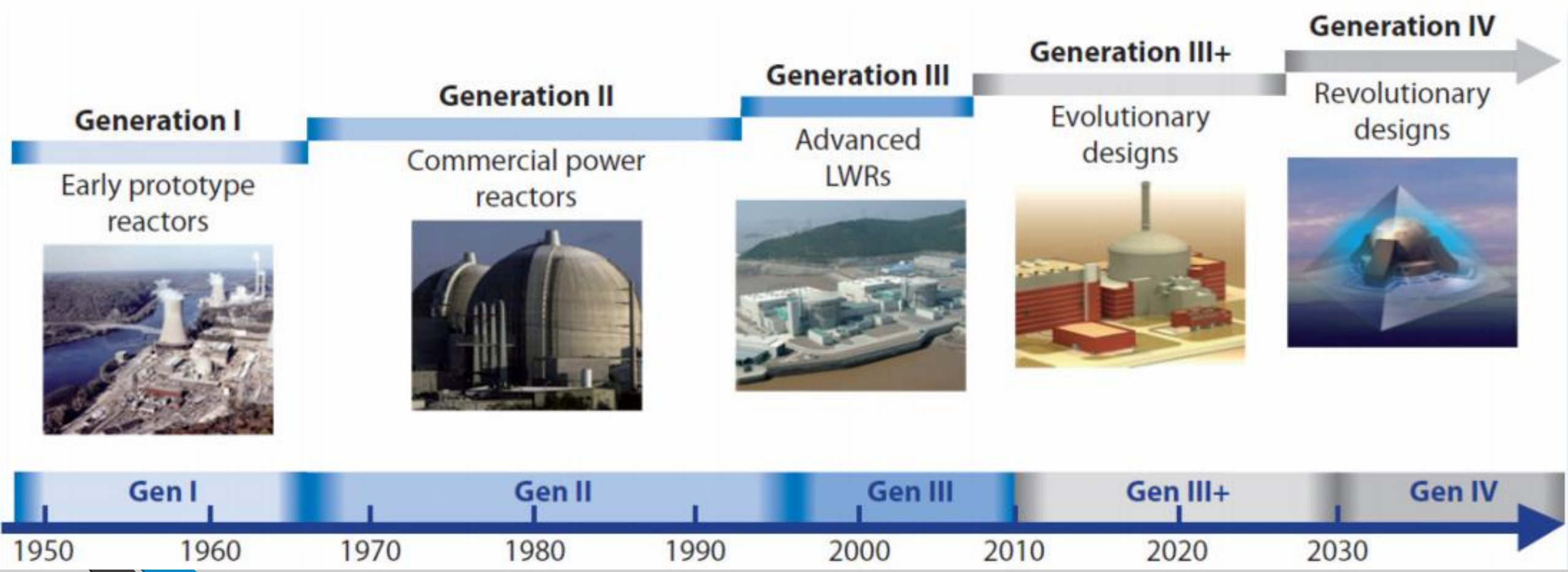
Euroopa





Maailm

Tuumareaktorite põlvkonnad



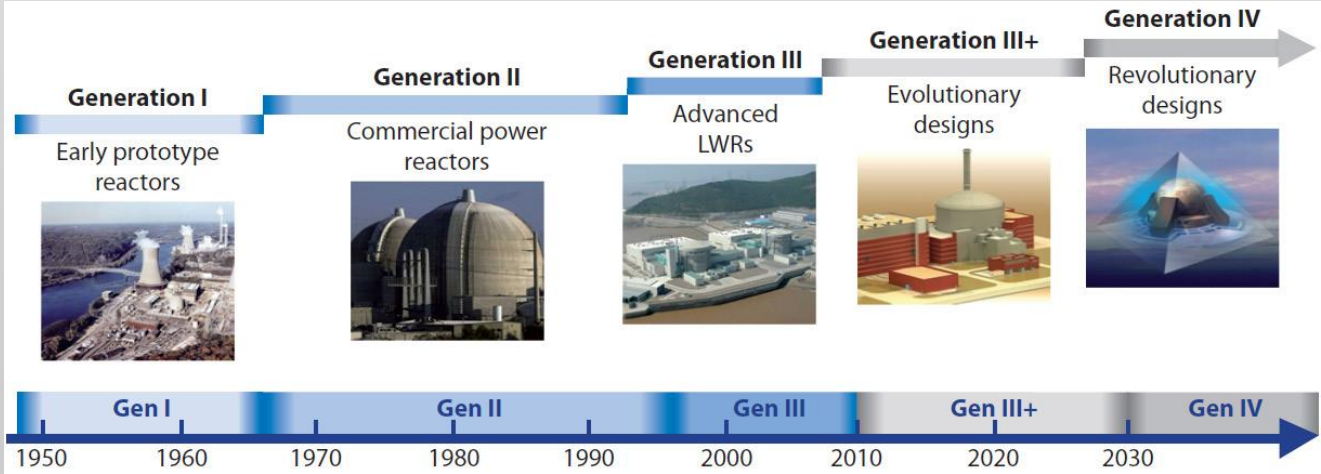
Reaktorite neljas põlvkond

Eesmärgid

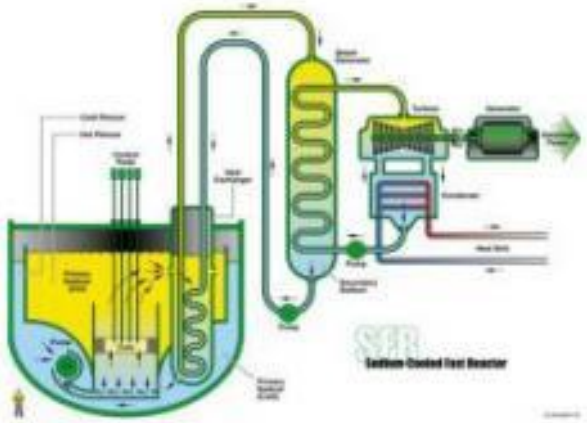
- **Jätkusuutlikkus**
  - Efektiivsem kütusekasutus (i.e. breeding)
  - Jäätmete hulga ja radioaktiivsuse vähendamine (transmutation of minor actinides)
- **Majanduslik tasuvus ja konkurentsivõime**
  - Tehases tootmine, moodul-lahendused
- **Ohutus**
  - Parendatud töökindlus ja ohutus
  - Veelgi madalam tuuma sulamise tõenäosus
  - Minimaalsed mõjud väliskeskkonnale (abi, evakuatsioon, reostus)
- **Turvalisus**
  - Kütus terroristide jaoks mitteatraktiivsel kujul
  - Minimaalne tuumarelva materjali leviku oht

Reaktoritüübid

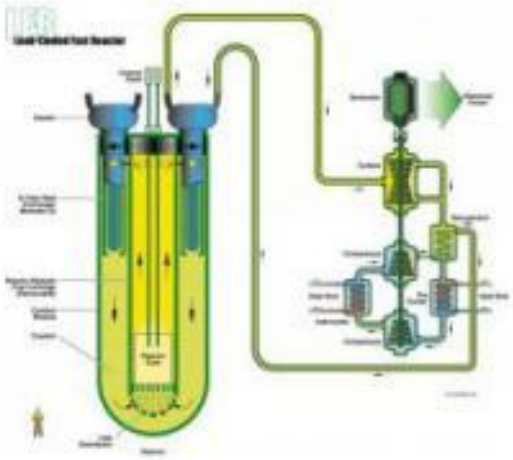
- Ülikõrgtemperatuuri reaktor (VHTR)
- Gaasjahutusega reaktor (GFR)
- Sulasoolareaktor (MSR)
- Ülekriitilise vee reaktor (SCWR)
- Naatriumjahutusega reaktor (SFR)
- Pliijahutusega reaktor (LFR)



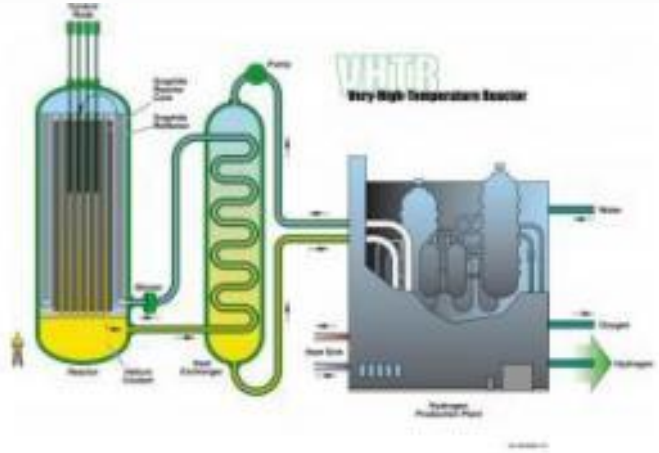
6 tehnoloogiat



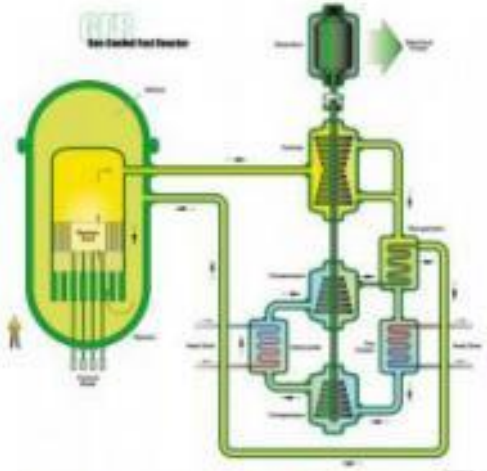
Sodium Fast Reactor



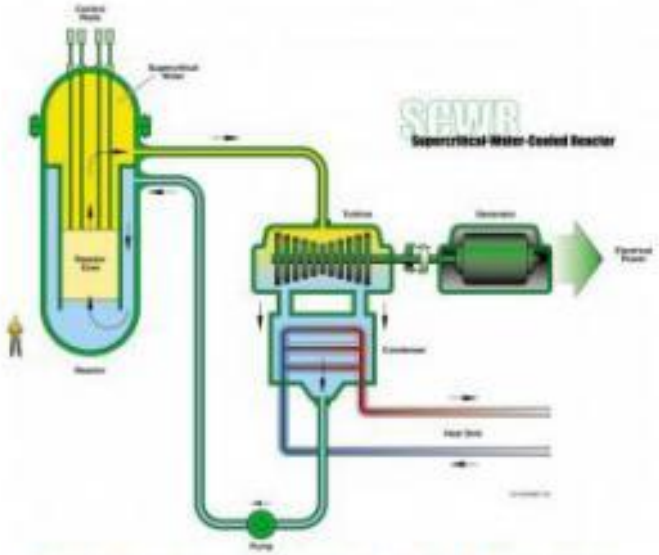
Lead Fast Reactor



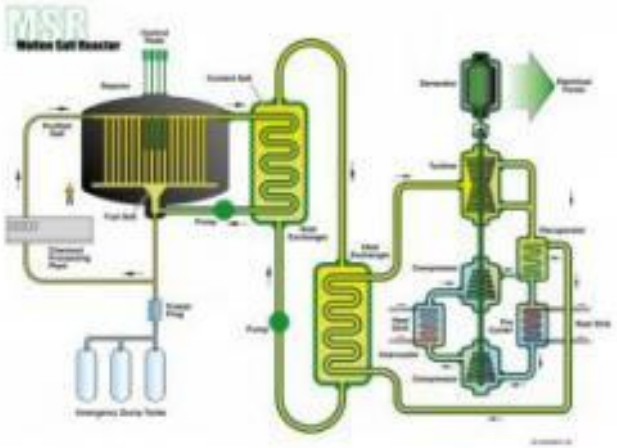
Very High Temperature Reactor



Gas Cooled Fast Reactor

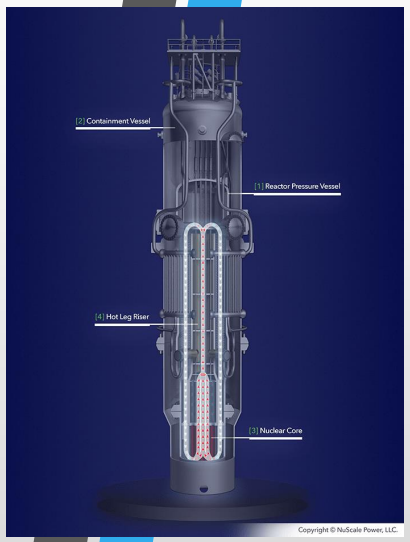


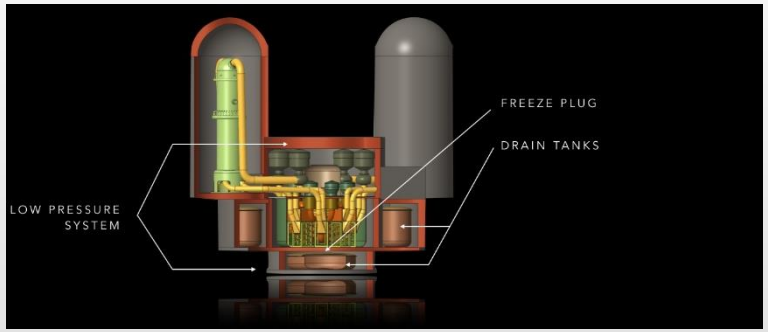
Supercritical Water Cooled Reactor

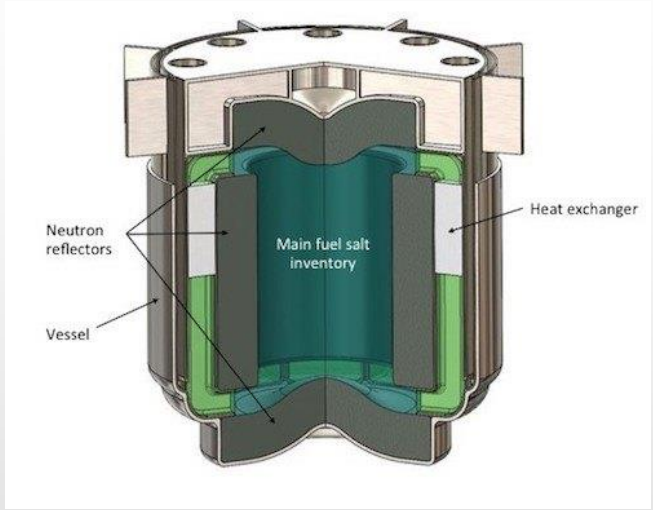


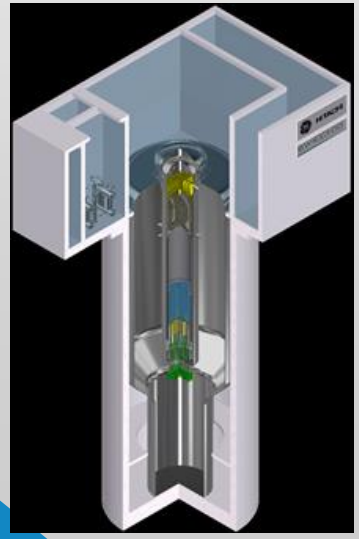
Molten Salt Cooled Reactor

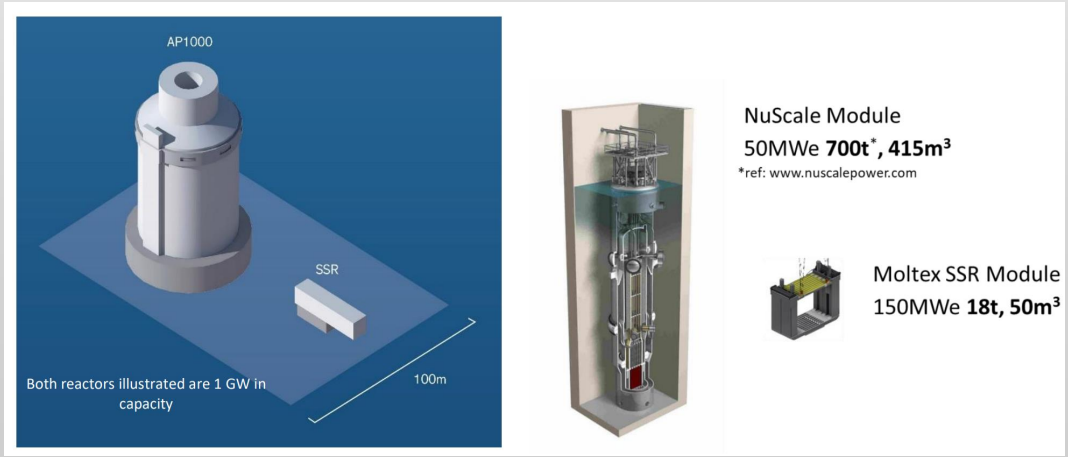
Väikesed moodulreaktorid





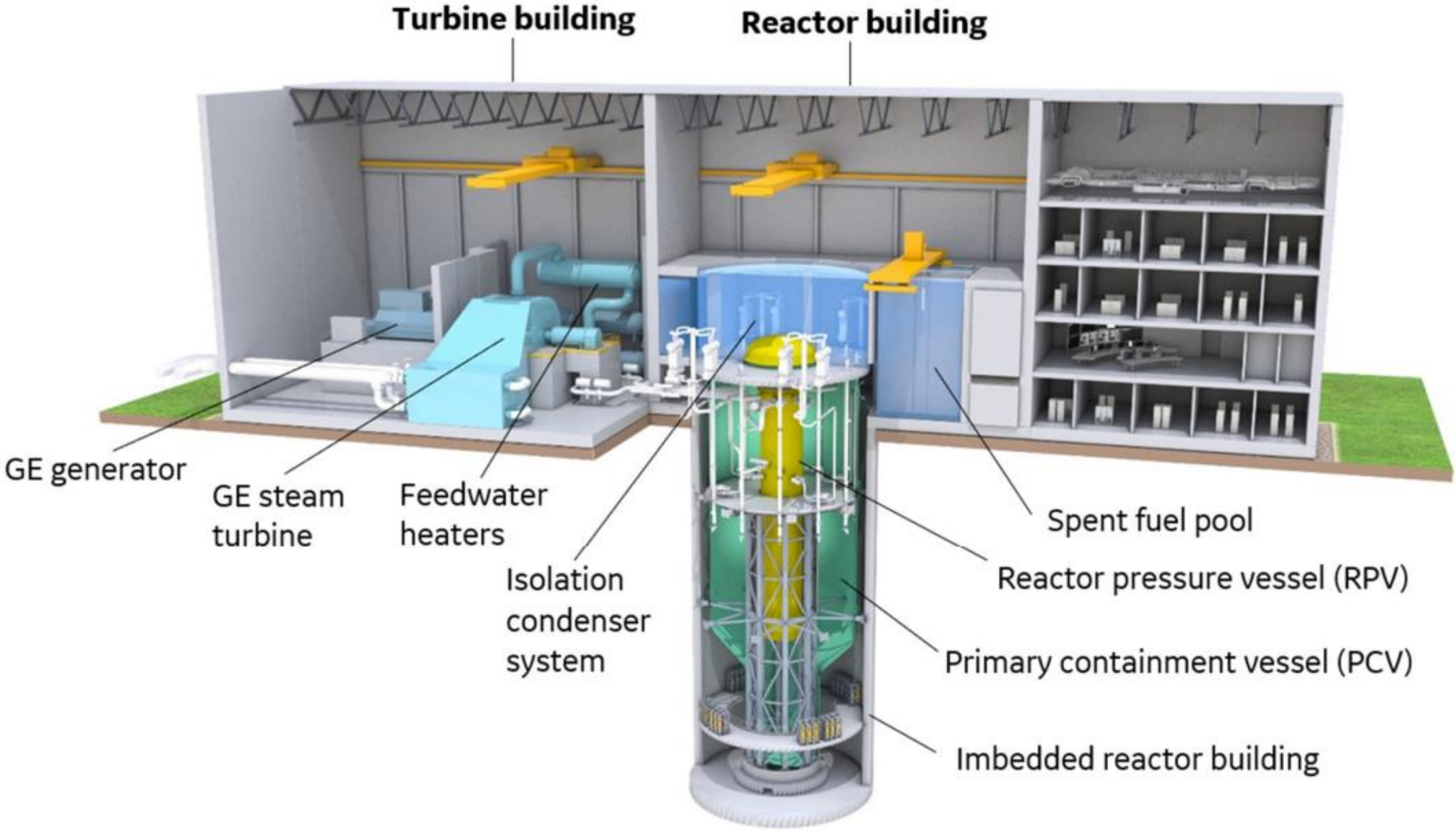


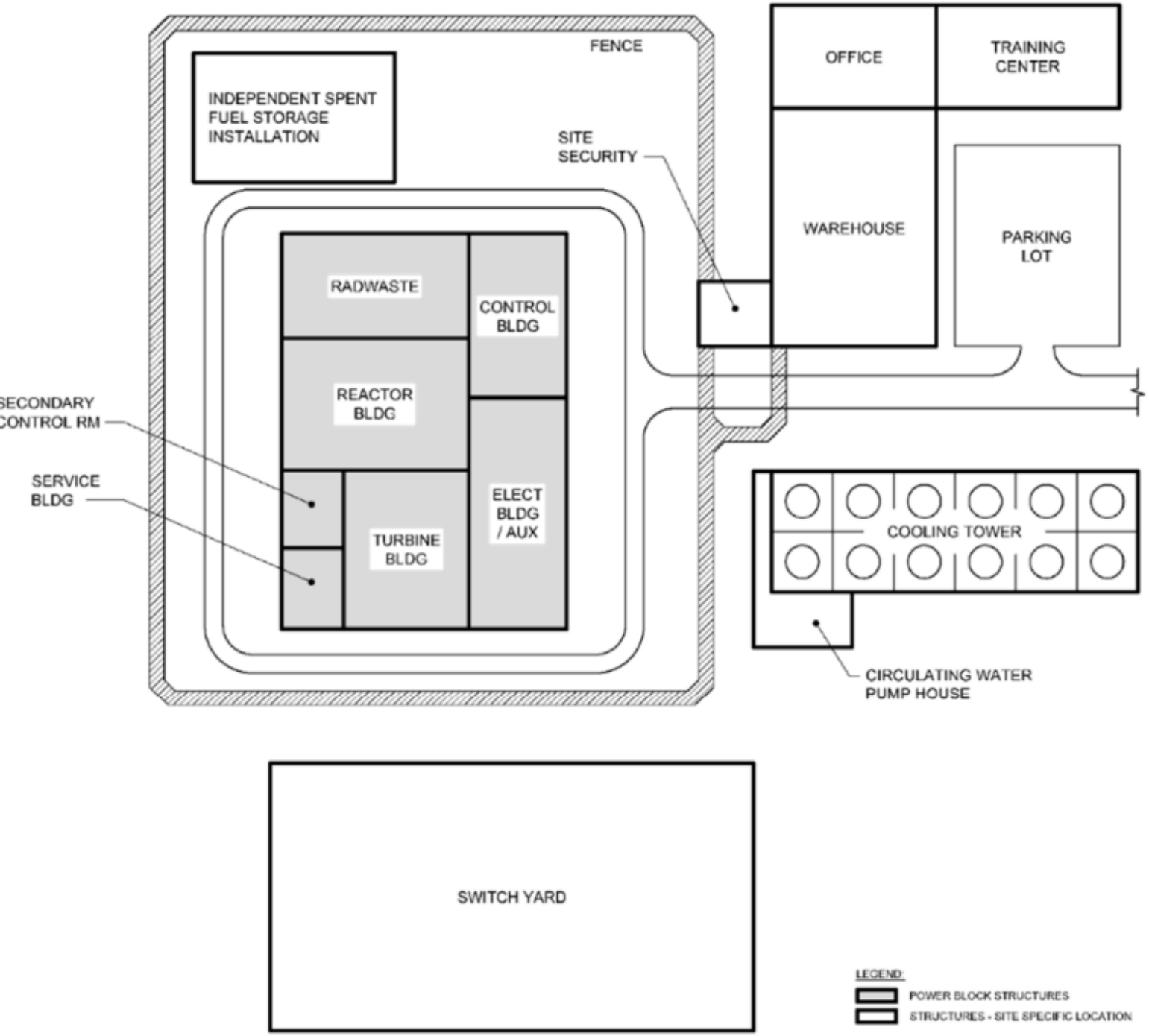


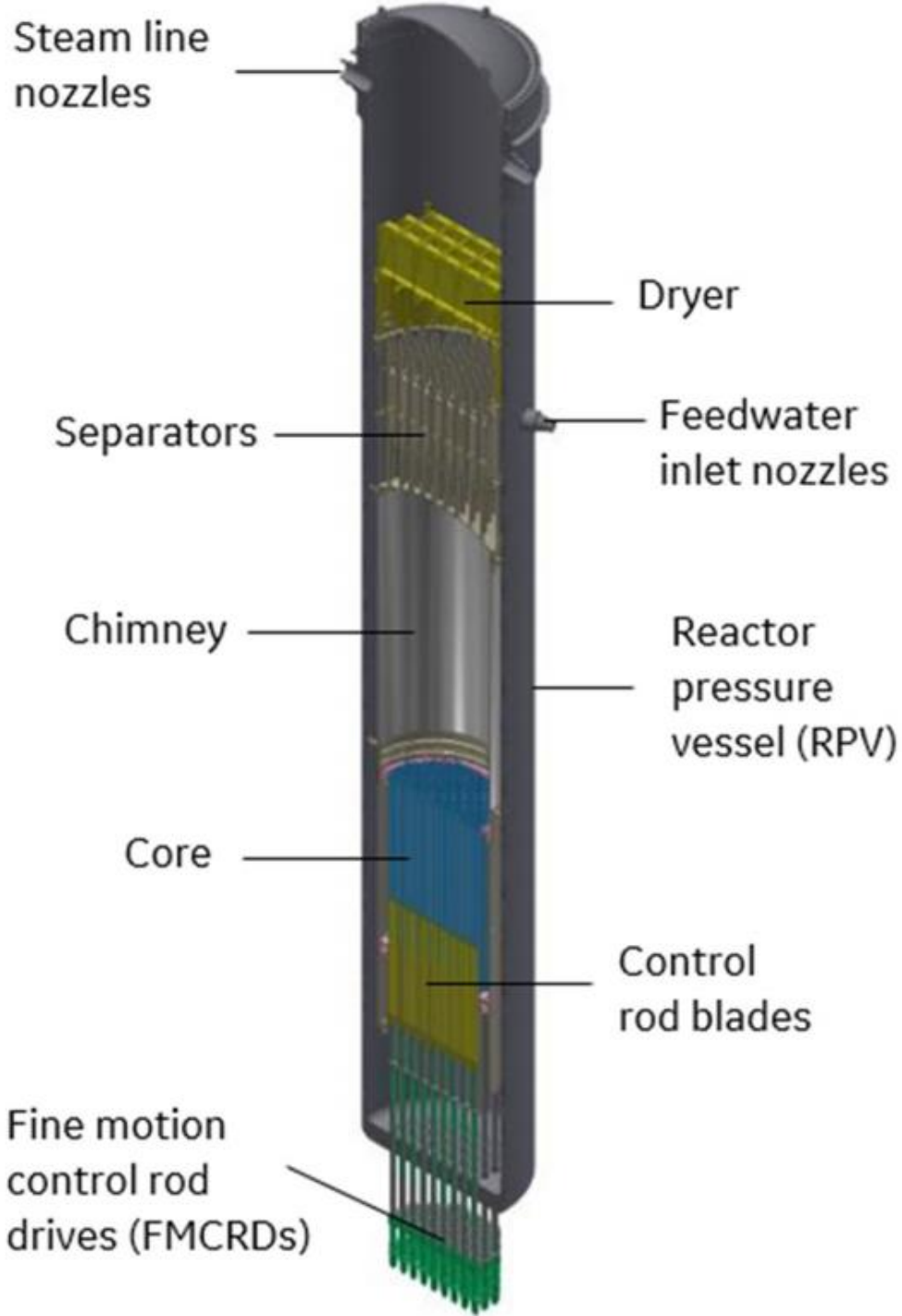


GE Hitachi BWRX-300

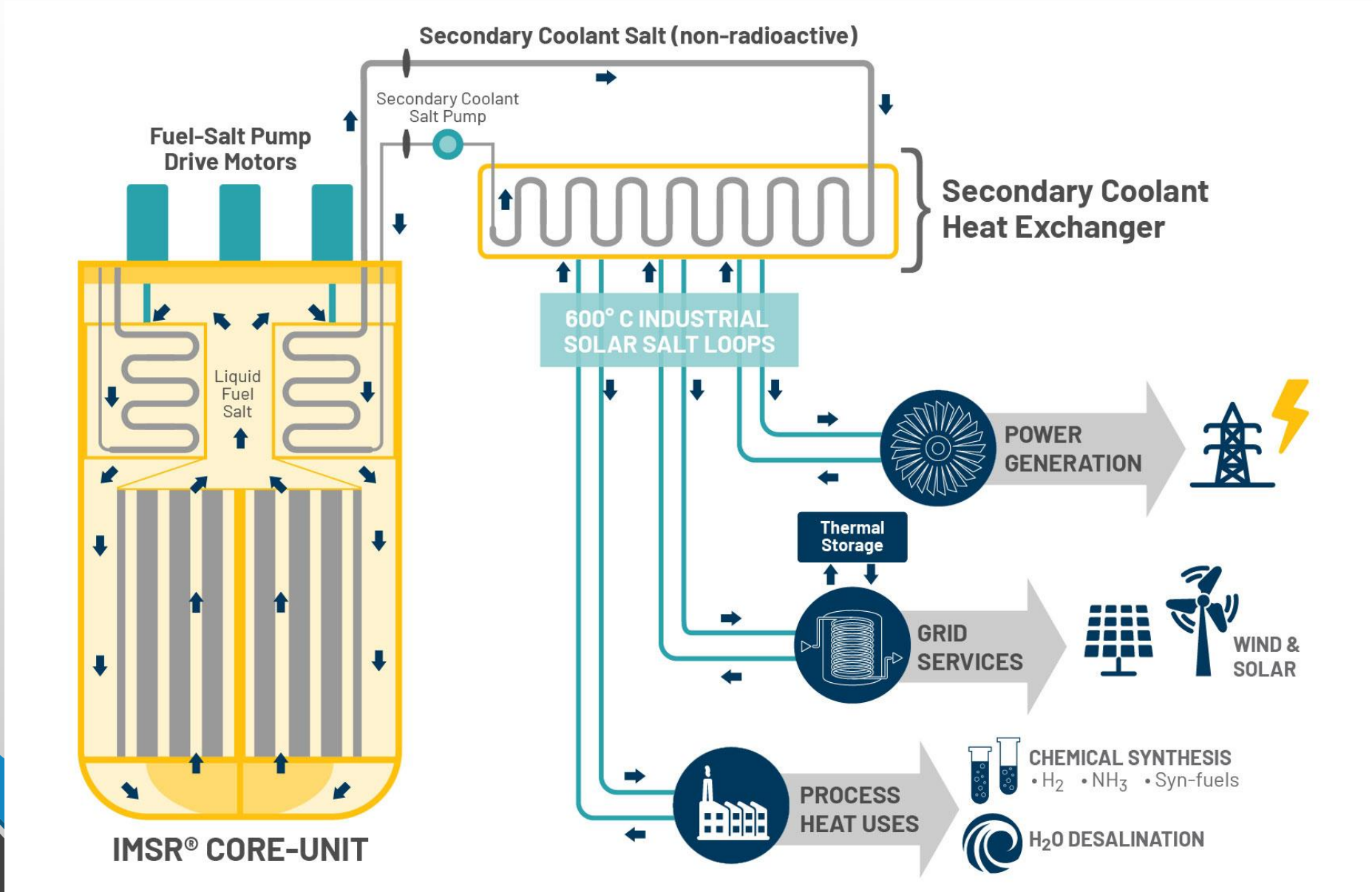
- Tipptasemel ohutustase
- Arendatud majanduslikult konkurentsivõimeliseks gaasijaamadega
- Kuni 60% madalamad kapitalikulud MW kohta
- Vähendatud mudel litsenseeritud ESBWR reaktorist
- Tavapärased ehitusvõtted
- Jaama inimtööjõuvajadus miinimumini viidud


Turbine building
Reactor building
GE generator
GE steam turbine
Feedwater heaters
Isolation condenser system
Spent fuel pool
Reactor pressure vessel (RPV)
Primary containment vessel (PCV)
Imbedded reactor building

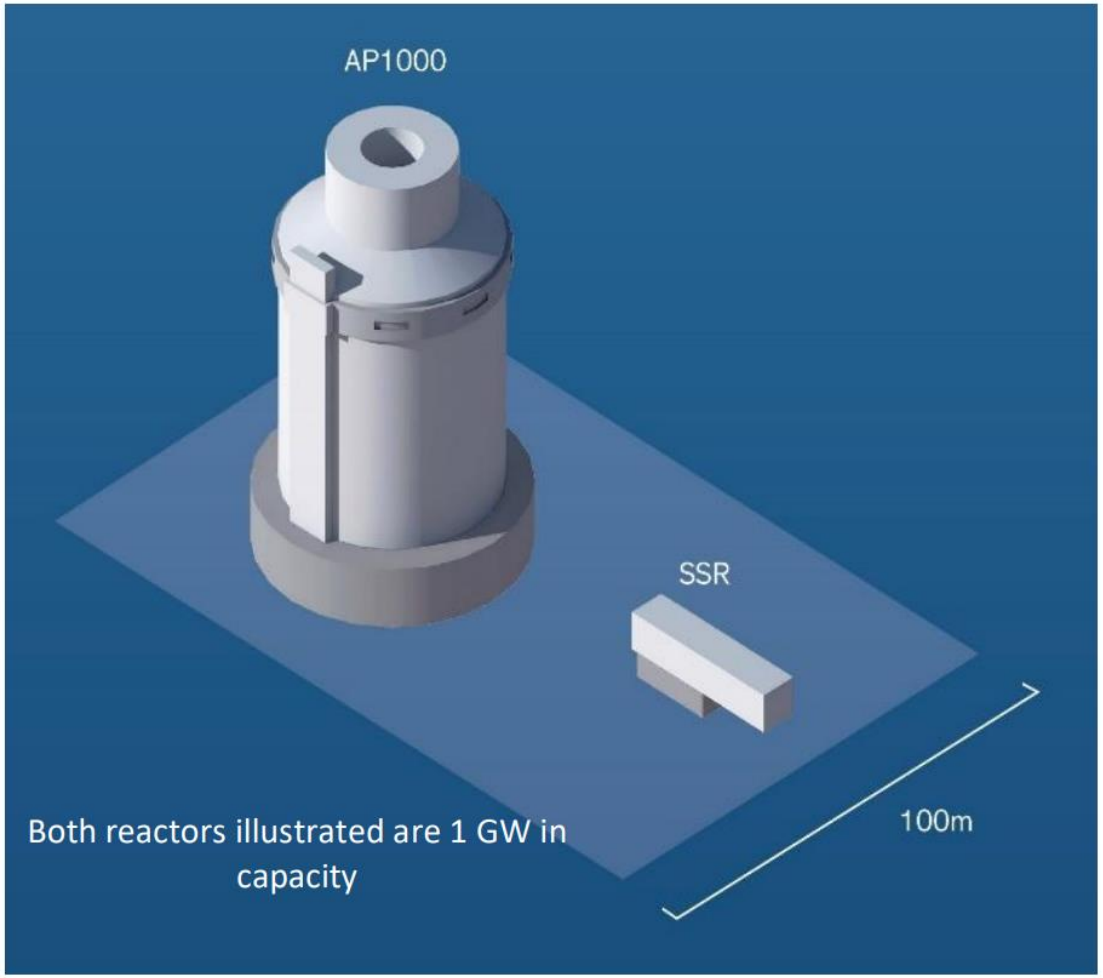

FENCE
INDEPENDENT SPENT FUEL STORAGE INSTALLATION
SITE SECURITY
OFFICE
TRAINING CENTER
WAREHOUSE
PARKING LOT
RADWASTE
CONTROL BLDG
REACTOR BLDG
SECONDARY CONTROL RM
SERVICE BLDG
TURBINE BLDG
ELECT BLDG / AUX
COOLING TOWER
CIRCULATING WATER PUMP HOUSE
SWITCH YARD
LEGEND:
POWER BLOCK STRUCTURES
STRUCTURES - SITE SPECIFIC LOCATION


Steam line nozzles
Dryer
Separators
Feedwater inlet nozzles
Chimney
Reactor pressure vessel (RPV)
Core
Control rod blades
Fine motion control rod drives (FMCRDs)

Terrestrial Energy 200MW ISMR



AP 1000 – NuScale - Moltex



NuScale Module

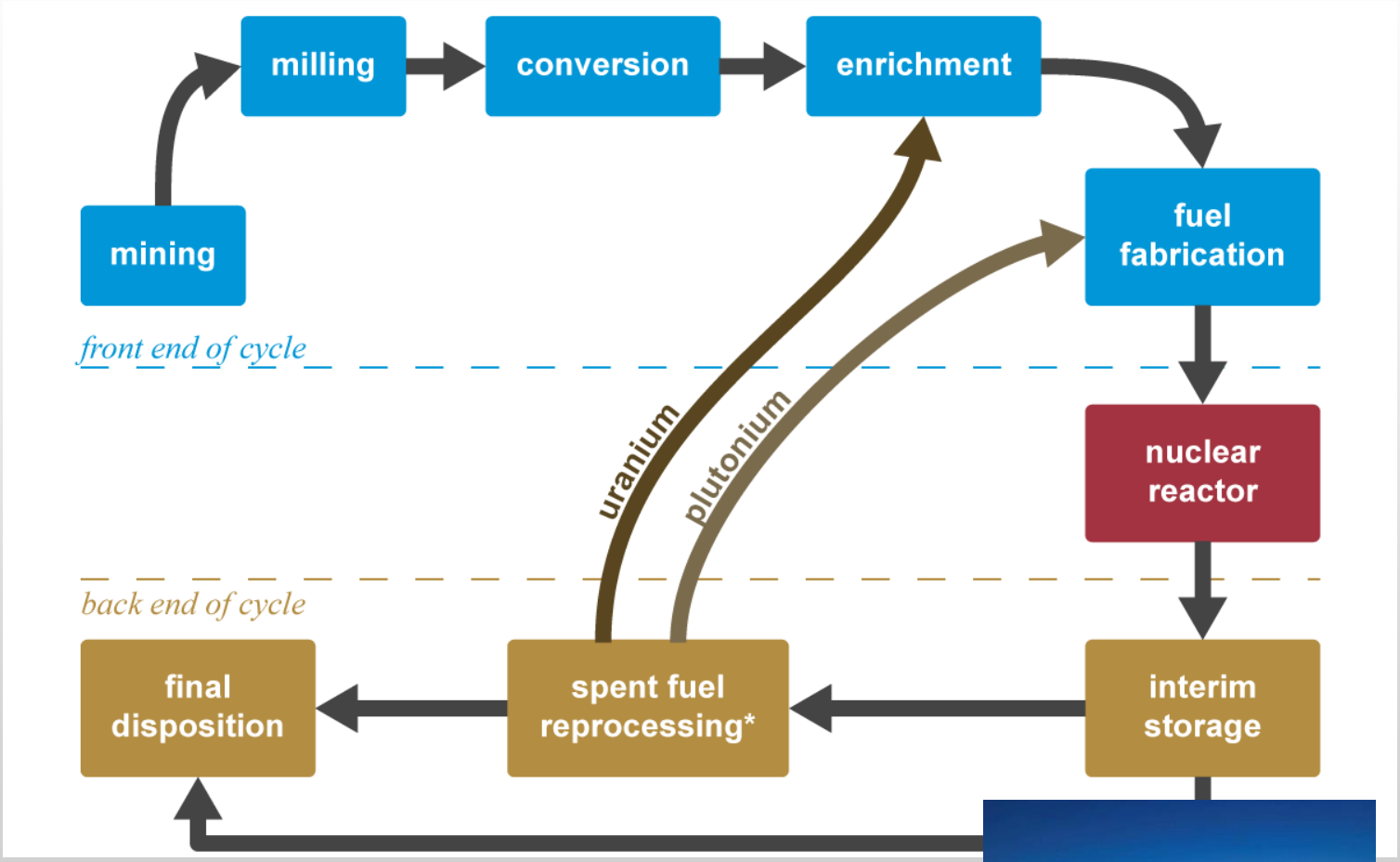
50MWe **700t***, **415m³**

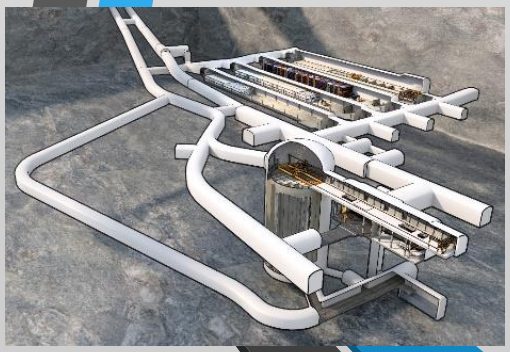
*ref: www.nuscalepower.com

Moltex SSR Module

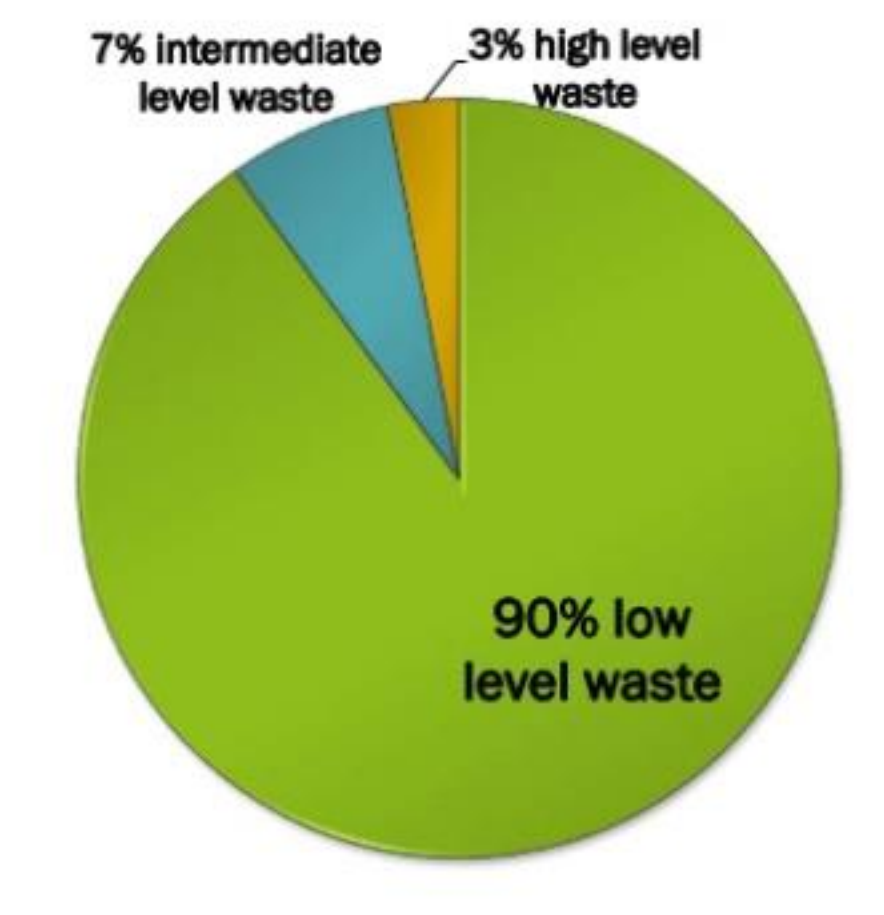
150MWe **18t, 50m³**

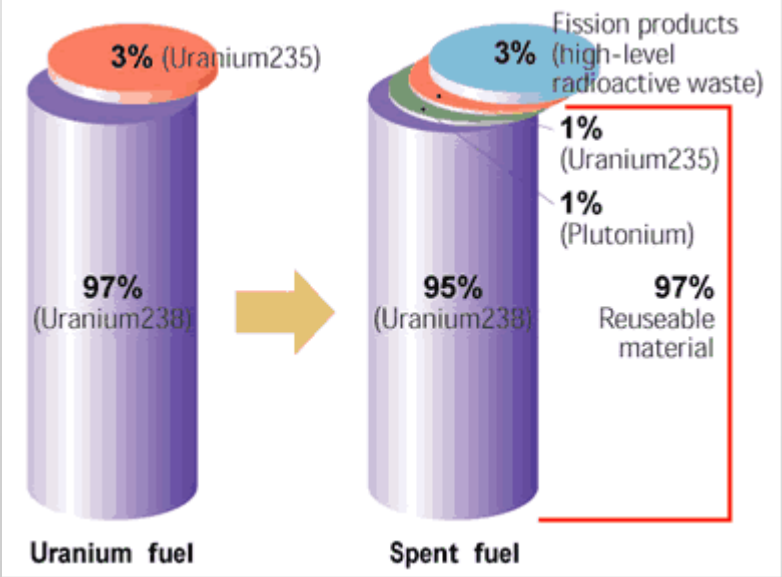
Tuumkütusetsükkel

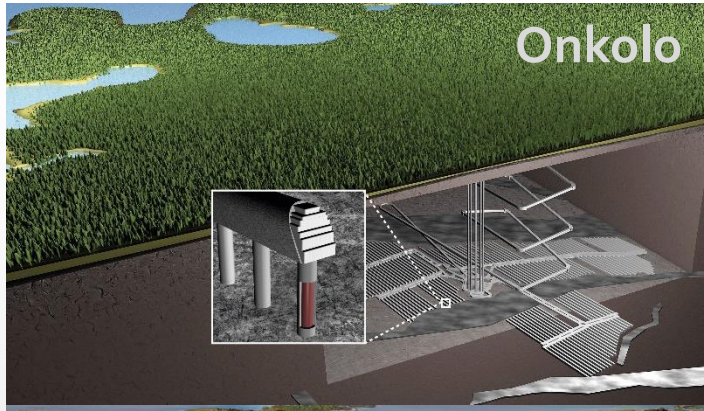




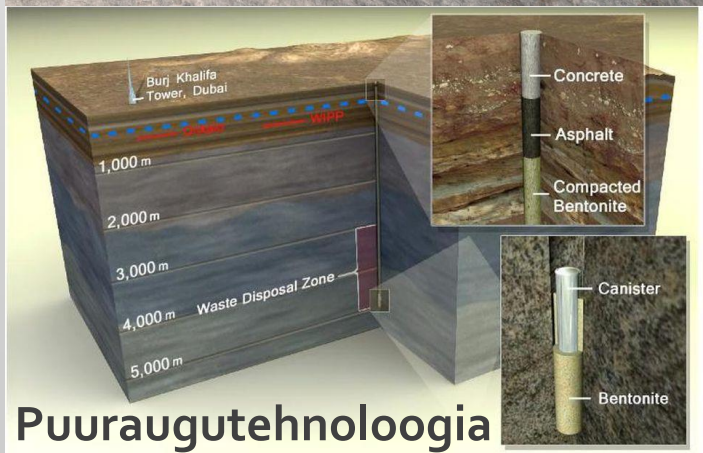
Jäätmetest


7% intermediate level waste
3% high level waste
90% low level waste

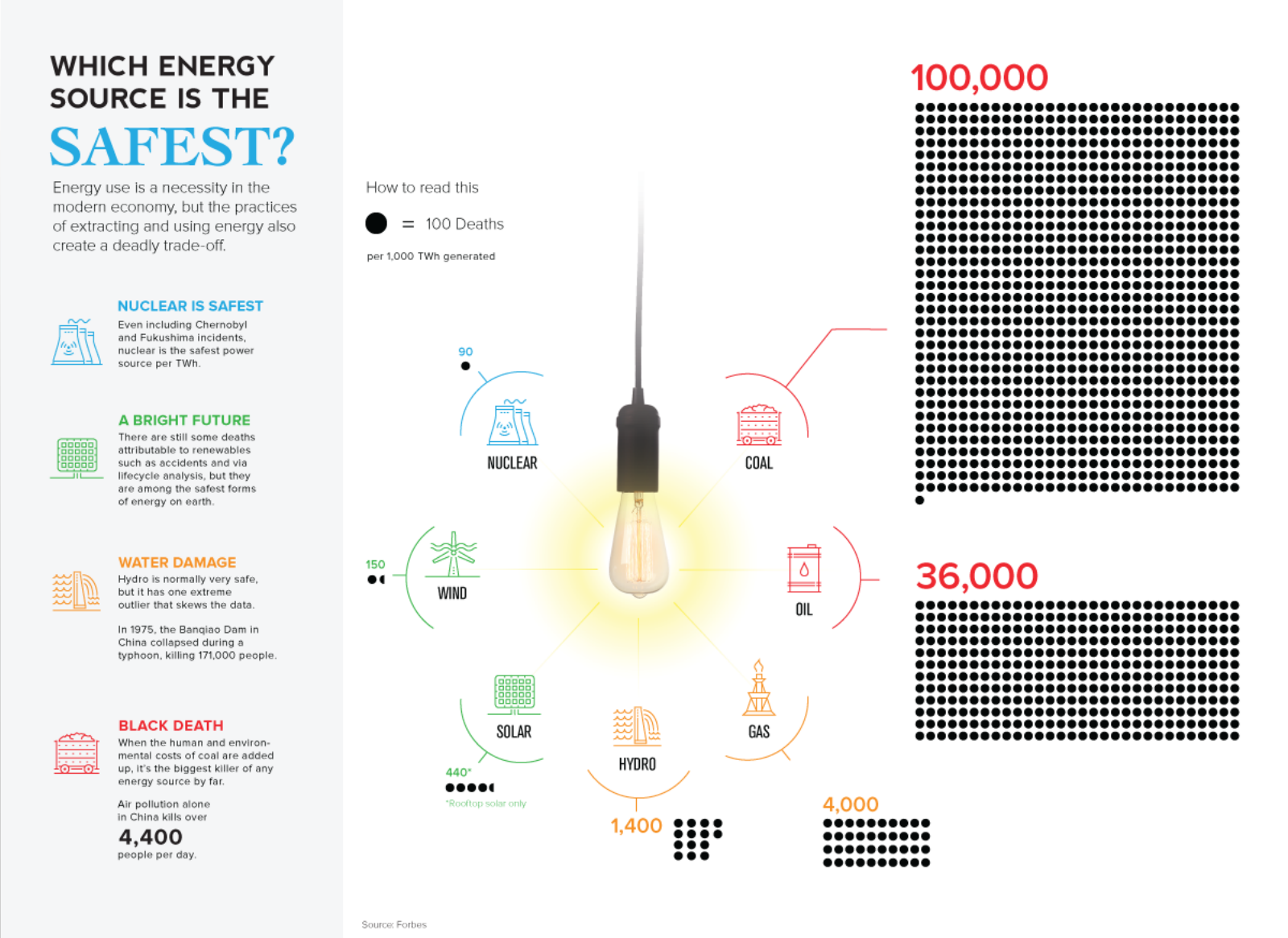

3% (Uranium235)
97% (Uranium238)
Uranium fuel
3%
Fission products (high-level radioactive waste)
1% (Uranium235)
1% (Plutonium)
95% (Uranium238)
97% Reuseable material
Spent fuel


Onkolo

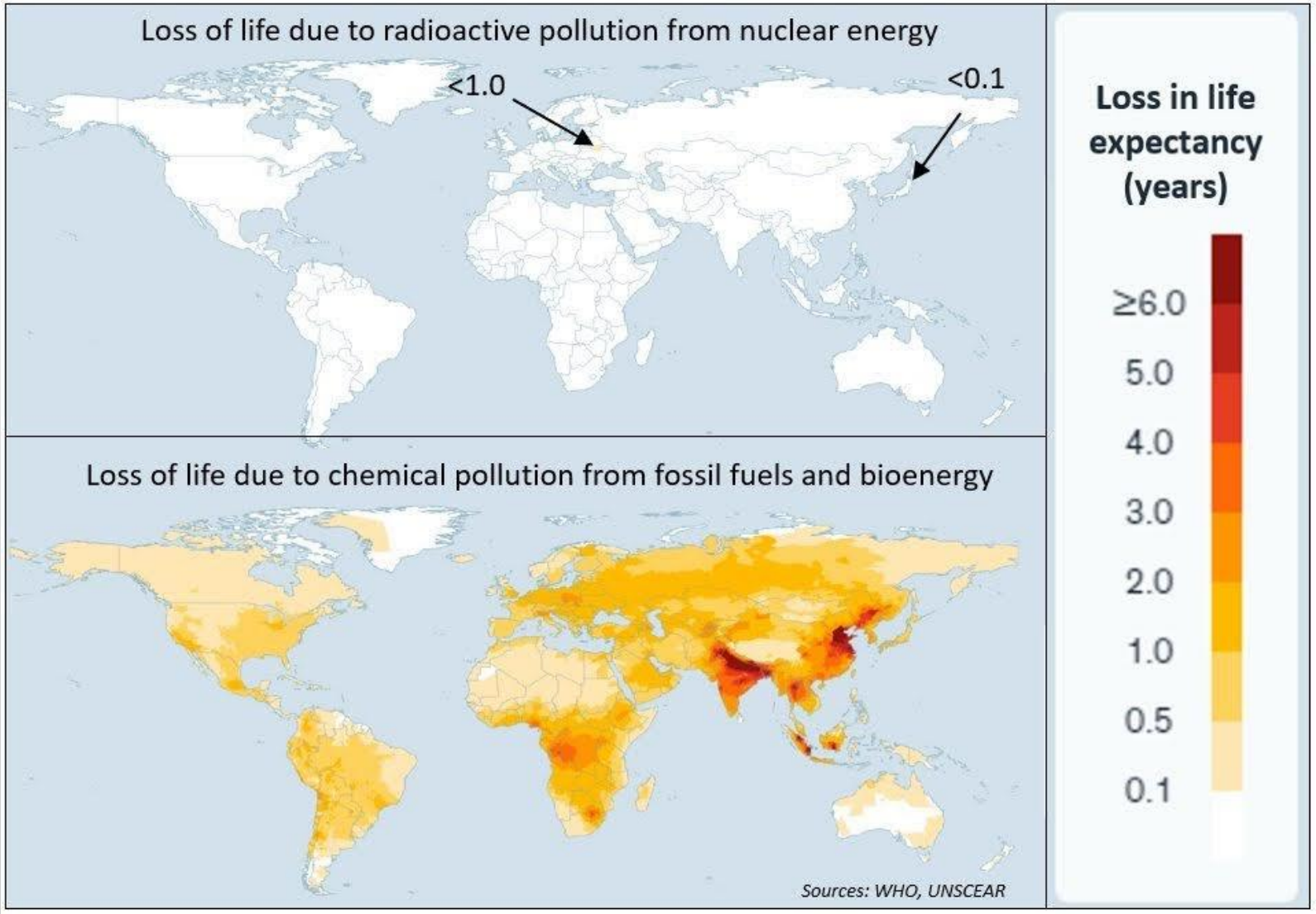
SKB


Burj Khalifa Tower, Dubai
WIPP
1,000 m
2,000 m
3,000 m
4,000 m
5,000 m
Waste Disposal Zone
Concrete
Asphalt
Compacted Bentonite
Canister
Bentonite
Puuraugutehnoloogia

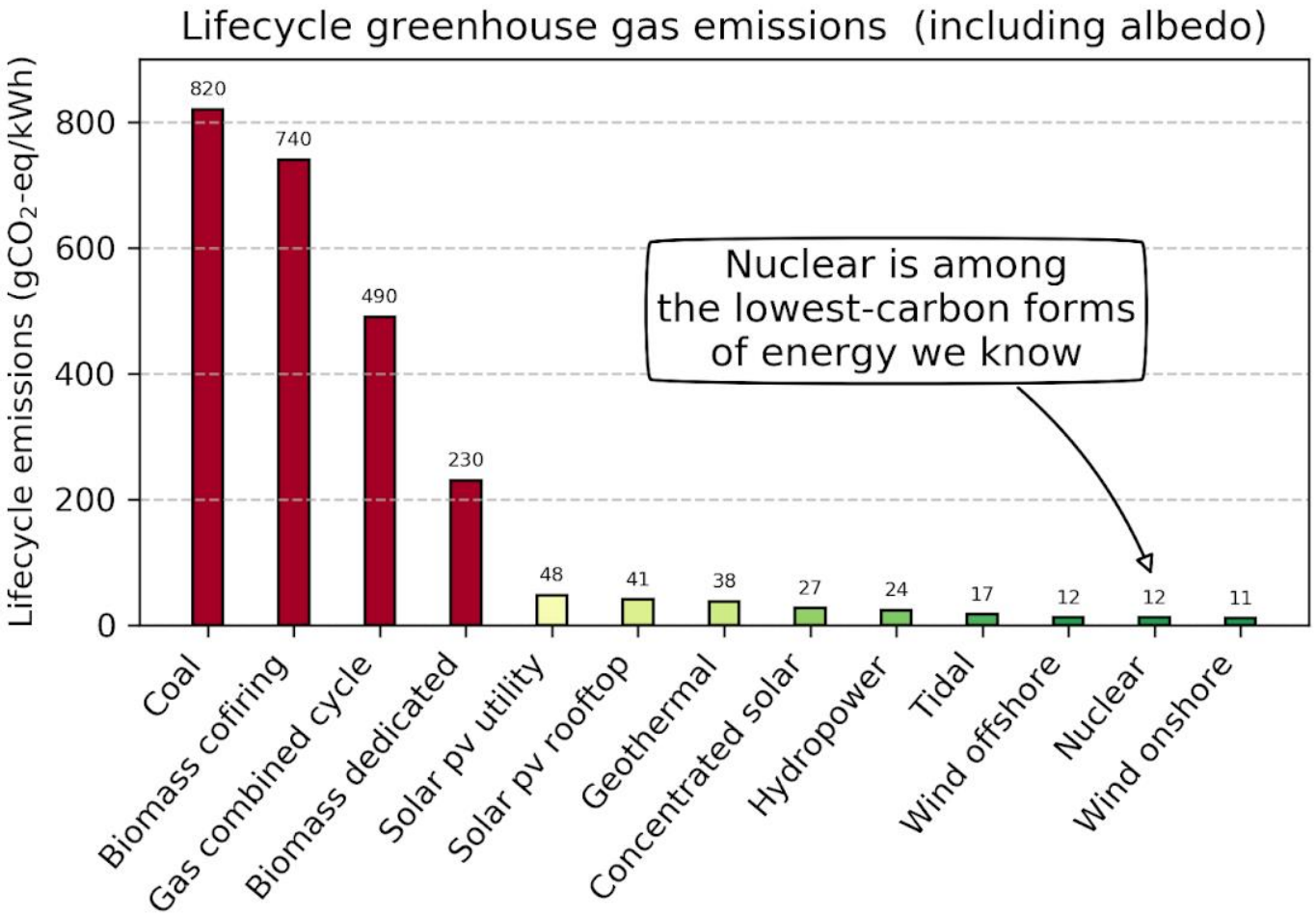
Natuke võrdlust



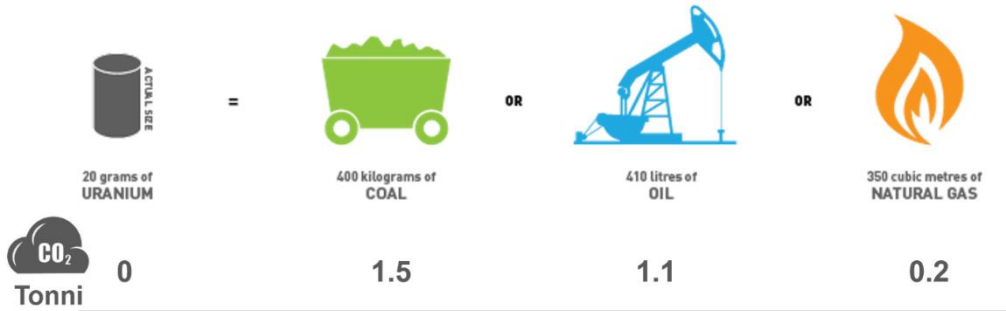
Natuke võrdlust



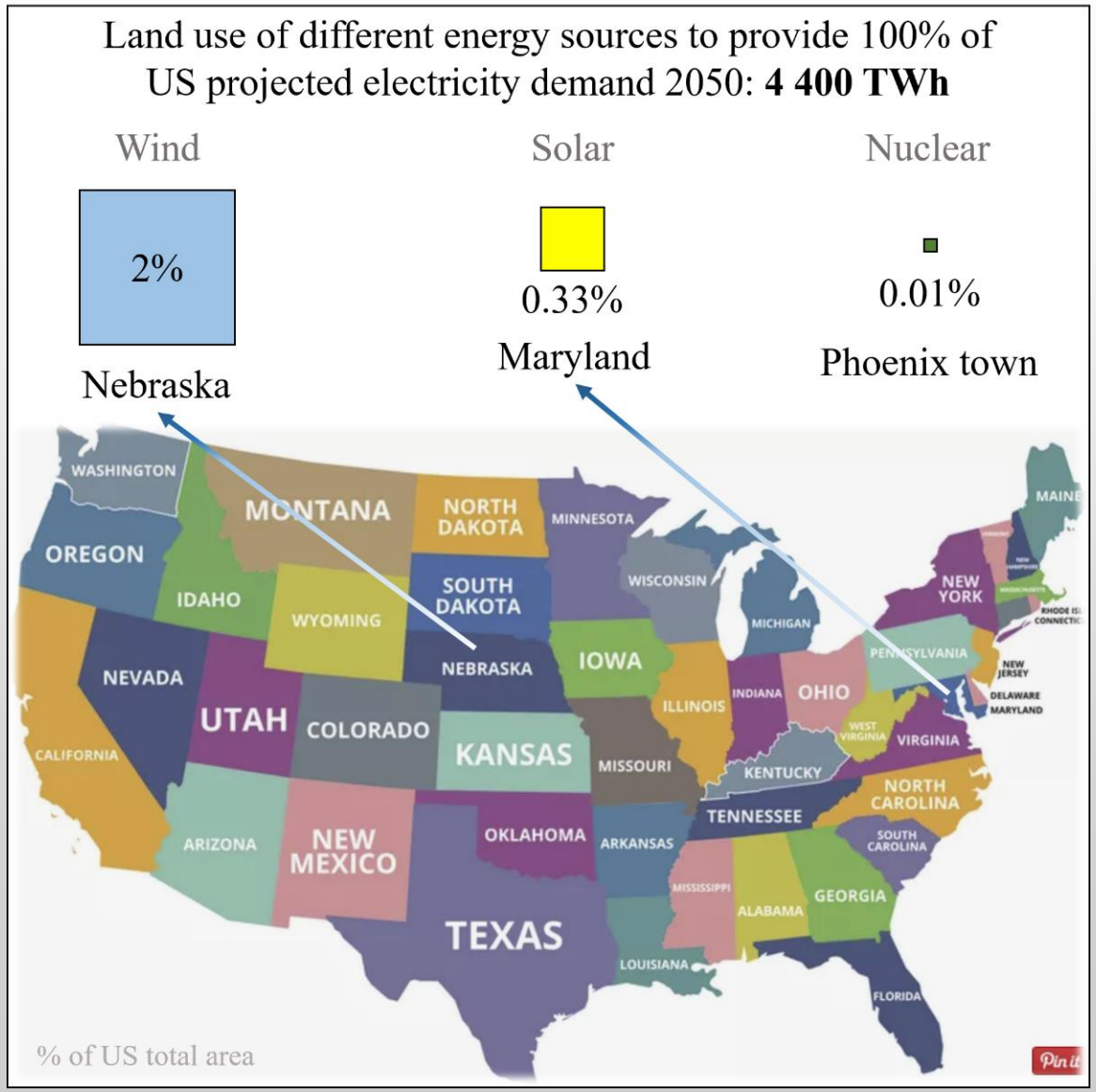
Natuke võrdlust – CO2

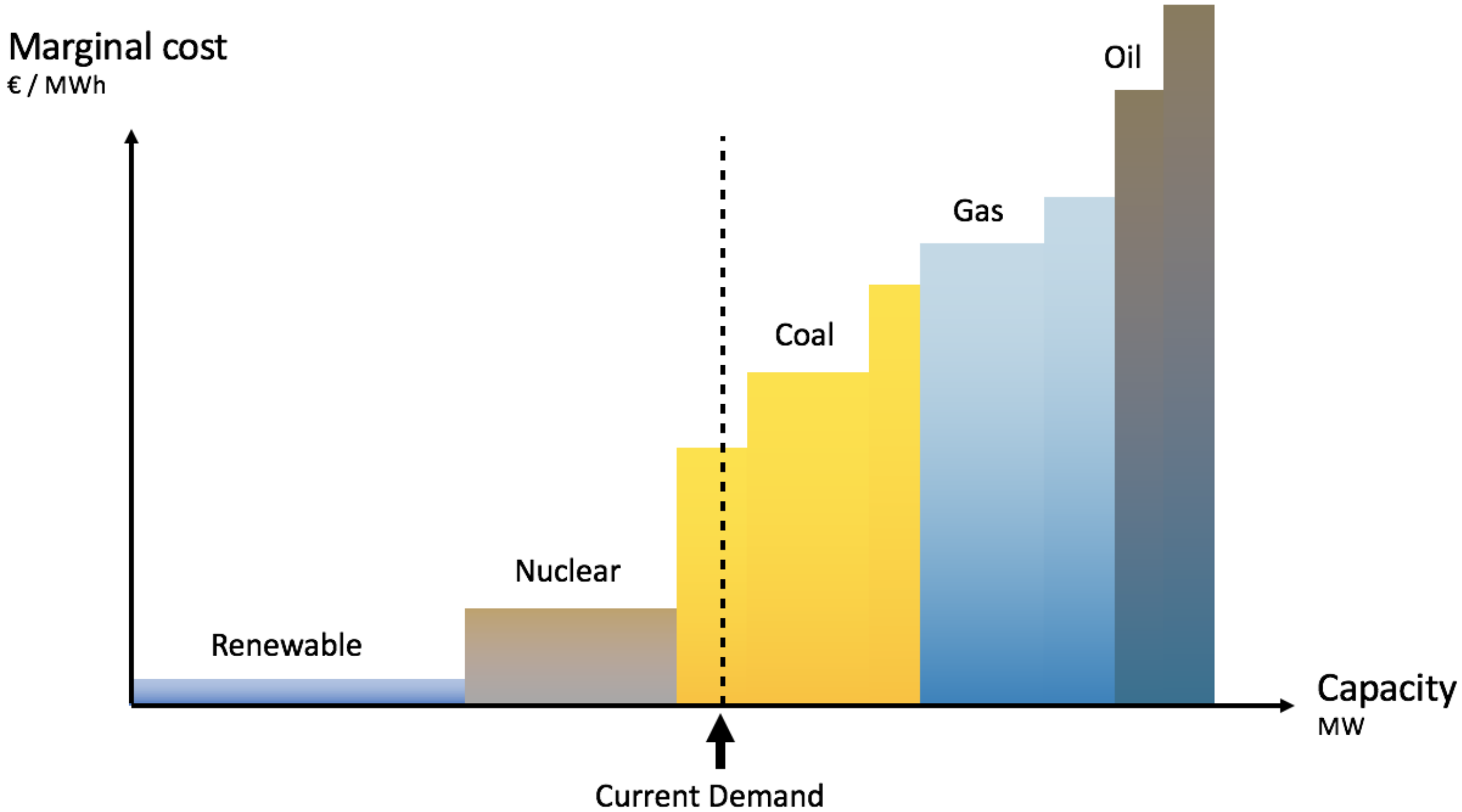


Schlömer S., et.al., 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC (Table A.III.2, pg 1335). Plot by Nick Touran of whatisnuclear.com.



Natuke võrdlust




Marginal cost
€ / MWh
Oil
Gas
Coal
Nuclear
Renewable
Capacity
MW
Current Demand

Tuumaenergeetika suurimad väljakutsed

1. Elektritootmisviiside ebavõrdne kohtlemine turul
   - Elektriturud ei võta arvesse eri tootmisviiside kõiki eeliseid ja puuduseid.
   - Süsiniku hinnastamine ei arvesta pikaajalisi mõjusid kliima(muutuse)le.
   - Pikaajalise, jätkusuutliku, 24/7 tuumaenergia tootmine on alahinnatud ning tagavara tootmise maksumus vahelduvatele elektriallikatele ei ole adekvaatselt arvesse võetud.

2. Ebaühtlased regulatsioonid
   - Rahvusvaheliste standardite puudumine koormab tuumajaamade litsenseerimist ja disani ning piirab globaalset arengut.

3. Sotsiaalsed aspektid
   - Hetke energiasüsteem ei vaatle ohutust suures plaanis.
   - Mõjusid tervisele ja keskkonnale ei võrrelda tihti samadel alustel
   - **Tuumaenergia debatt keskendub ainult ohutusele** ignoreerides muid mõjureid nagu majanduslikkus, tööstuse areng, sotsiaalsed hüved, avalik tervis ning keskkond.

Litsenseerimine

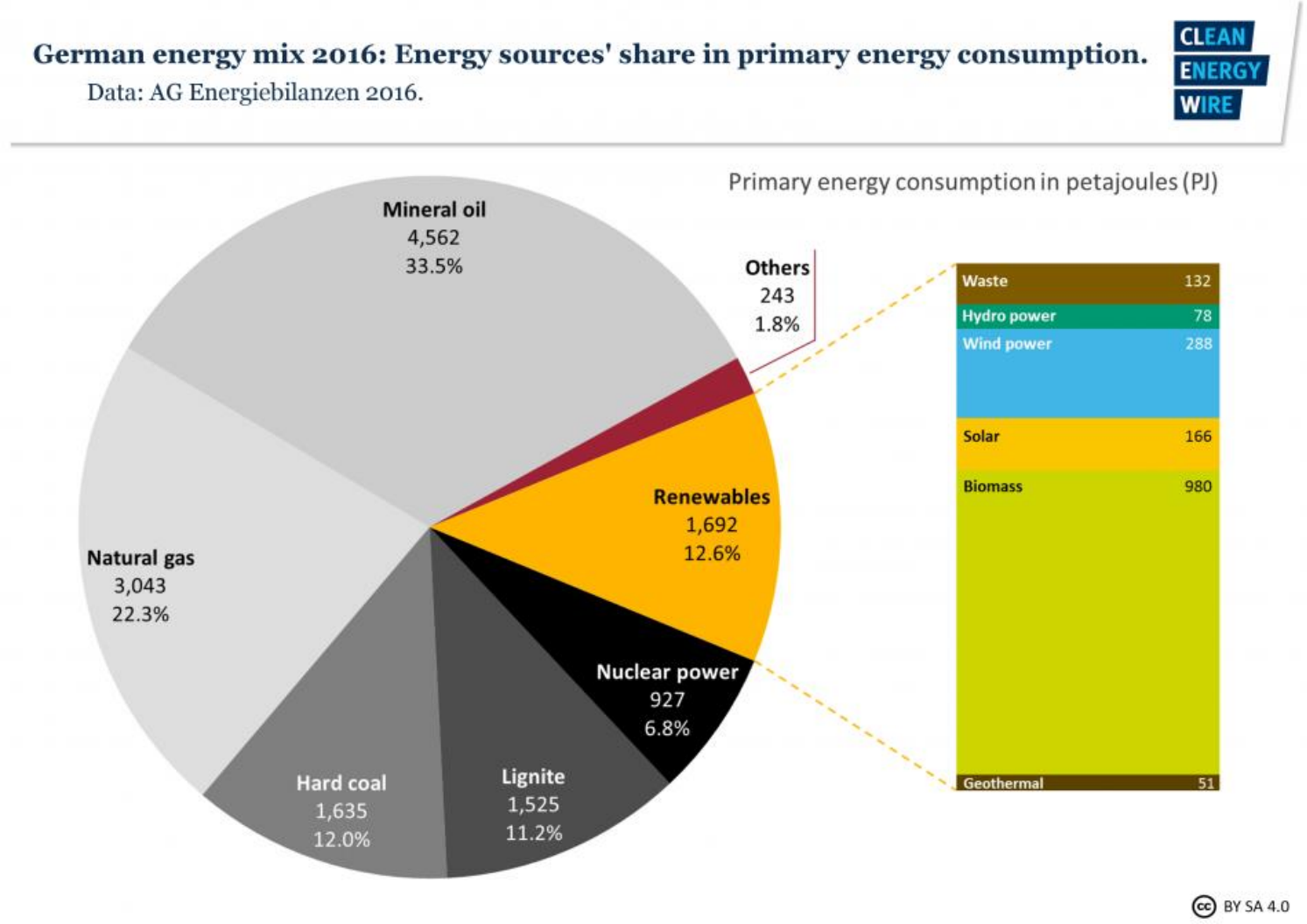
- Litsenseerimine peab arenema (ja areneb ka) vähemalt sama kiires tempos kui reaktoridisainide arendamine
  - Ühtsed standardid
  - Reaktoridisainide arendamisel on **rõhk kandunud innovatsioonilt reaktoritehnoloogias innovatsioonile tõestatud tehnoloogia turule toomises**
    - MSRE kogemusel ELYSIUM, Terrestrial, Moltex
    - Tõestanud veetehnoloogiate „lihtsamad" versioonid NuScale, GE Hitachi BWRX-300
- Lisaks elektritootmisele on olulisel kohal nn kõrge temperatuuri kaasproduktid
  - Kütuste rafineerimine
  - (Kaug)sooja pakkumine
  - Ammoniaagi tootmine
  - Vesiniku tootmine
  - Salvestamine
  - Joogivee puhastamine

Kokkuvõtteks

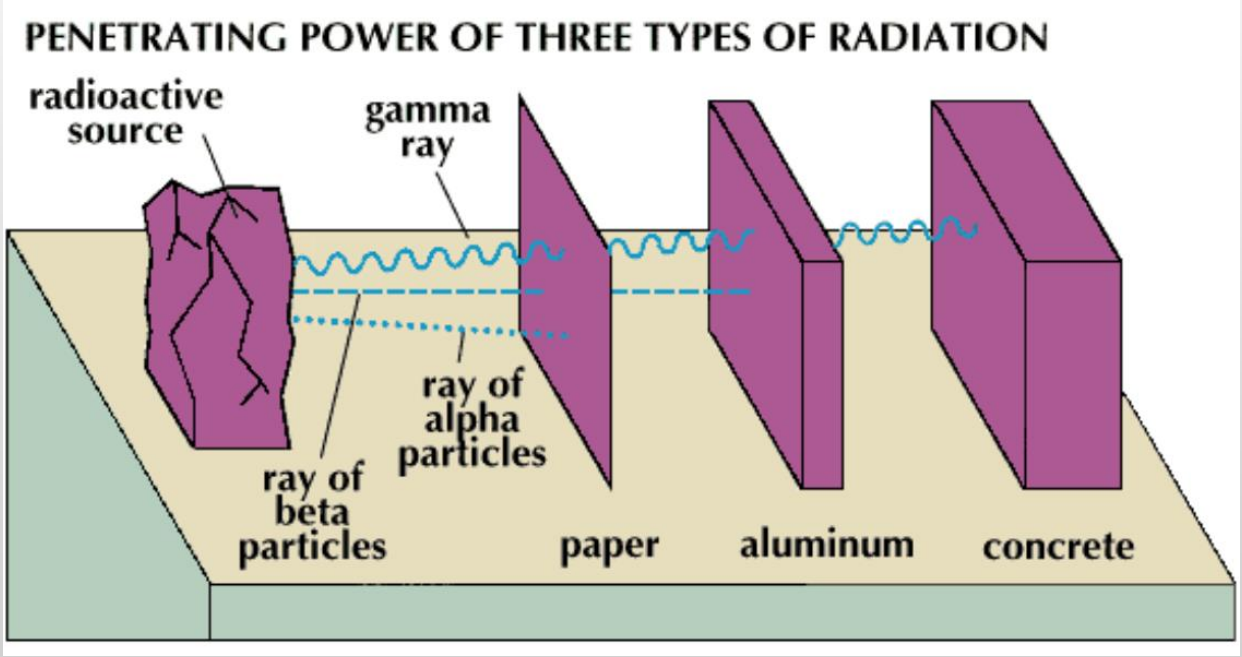
- Kliima soojeneb CO_2 taseme tõusuga. Nõudlus energia järgi kasvab.

Põletamise aeg on läbi!

- Taastuvate energiaallikate kasv on pidurdumas, rakendamine ajas ja ruumis piiratud (kuniks pole vastavamahulist salvestust ning ülekandeliine).
- Ainult juhuslike tootmisega tootmisvõimsustega ei ole võimalik tagada elektri varustuskindlust ning suur väljakutse tagada pinge stabiilsust.
- Tuumaenergia muutub väiksemaks ja sobivamaks avatud elektriturule.
- 4nda põlvkonna ja väiksemad tehnoloogiad võimaldavad asukohti tarbijate lähedal.
- Kõrgtemperatuurne 600C väljund võimaldab süvadekarboniseerimist vesiniku ja selle derivaatide (sünteetiline kütus, ammoniaak, metanool jne) tootmist.


German energy mix 2016: Energy sources' share in primary energy consumption.
Data: AG Energiebilanzen 2016.
CLEAN ENERGY WIRE
Primary energy consumption in petajoules (PJ)
Mineral oil 4,562 33.5%
Others 243 1.8%
Renewables 1,692 12.6%
Natural gas 3,043 22.3%
Nuclear power 927 6.8%
Hard coal 1,635 12.0%
Lignite 1,525 11.2%
Waste 132
Hydro power 78
Wind power 288
Solar 166
Biomass 980
Geothermal 51
BY SA 4.0

Kiirgustüübid

Characteristic	Alpha Particle	Beta Particle	Gamma Ray
Nature	Helium Nucleus	Fast electron	Photon
Charge	+2e	-e	0
Mass	$6.64 \times 10^{-27} kg$	$9.1 \times 10^{31} kg$	0
Penetrative Power	A few cm of air	A few mm of metal	Many cm of lead
Detection	• Causes strong fluorescence • Affects photographic film • Is affected by electric and magnetic fields	• Causes fluorescence • Affects photographic film • Affected by electric and magnetic fields	• Causes weak fluorescence • Affects photographic film • Is not affected by electric and magnetic fields

Kiirguse läbivusvõime