

# Kernekraft



Hemingway Club, Hørsholm-Rungsted  
Tirsdag d. 11. oktober 2022

Erik Both  
erik@both.dk

# Om oplægsgiveren

- Pensioneret fysiklektor fra DTU.
- Tidligere bestyrelsesmedlem i REO.
- Ingen professionel erfaring med kernekraft, men har i 1964 bestået kurset Reaktorfysik på DTU.
- Har for mange år siden arbejdet med dosisberegning og radioaktive stoffer.

# Kilder

- Ølgaard, Claussen, Both, Hartling, Spektrum. Stråling og kernekraft. Gyldendal, e-bog. Desværre udgået.
- Claussen, Both, Hartling, Spektrum 2, Gyldendal. Indeholder en ældre version af ovenstående.
- Data fra bl.a. [iea.com](http://iea.com), [transparency.entsoe.eu](http://transparency.entsoe.eu), og [klimaraadet.dk](http://klimaraadet.dk).

# Indhold

- Lidt om REO.
- Introduktion til kernekraft.
  - Ioniserende stråling
  - Hvordan virker kernekraft?
  - Forskellige typer og generationer
  - Copenhagen Atomics og Seaborg
  - Kernekraft verden rundt
- Kernekraft vs. andre former for elproduktion.
  - Forsyningssikkerhed
  - Priser
- Myter omkring kernekraft.

# Ren Energioplysning (REO)

- Stiftet som Reel Energioplysning i 1976 som modsvar til misinformation fra bl.a. OOA.
- Medlemsbaseret oplysningsorganisation – drevet af frivillige.
- REO ønsker, at Folketingsbeslutningen fra 1985 omgøres, og at kernekraft tænkes ind i dansk energiforsyning.
- REO vil overbevise danskerne om fordelene ved kernekraft, herunder forsyningssikkerhed og billigste samlet pris for grøn omstilling, samt at kernekraft er ren og sikker.
- Oplysning gennem [www.reo.dk](http://www.reo.dk), "Kort Nyt", den offentlige debat og foredrag for foreninger og meningsdannere.



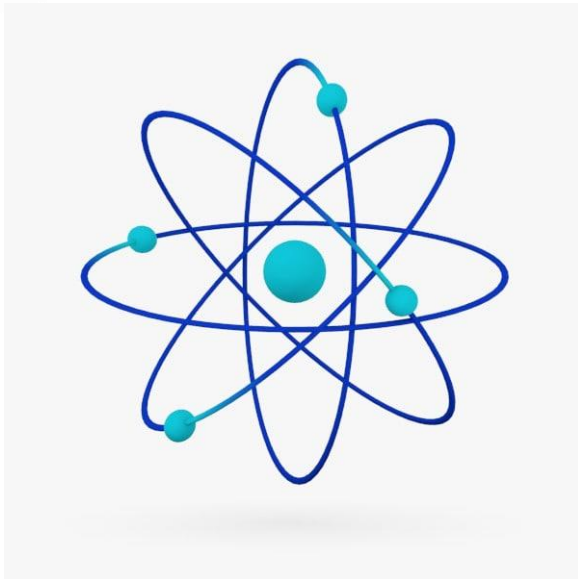
# Kernkraftens historie 1

1896	Becquerel	Radioaktivitet
1898	Curie'erne	Radium, polonium
1905	Einstein	$E = mc^2$
1911	Rutherford	Lille positiv atomkerne
1913	Bohr	Elektronbaner
1920'erne	Mange forskere	Kvantemekanik

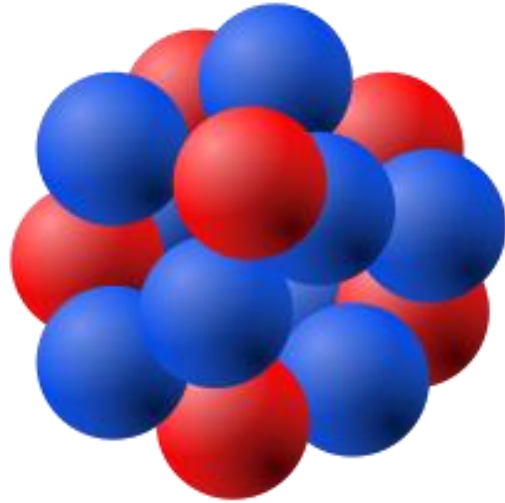
# Kernekraftens historie 2

1926	Chadwick	Neutronen opdages
1930'erne	Mange	Neutronbestråling giver nye isotoper
1938	Hahn, Strassmann	Fission af urankerne
Dec. 1942	Fermi m.fl.	Kernereaktor
Aug. 1945	Mange	A-bombe

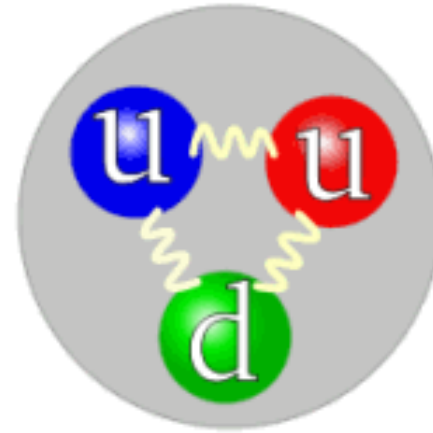
# Atomers opbygning



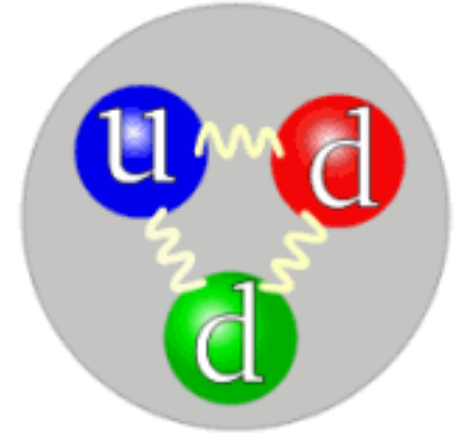
Atom  
 $\sim 10^{-10}$  m



Atomkerne  
 $\sim 10^{-14}$  m



Proton

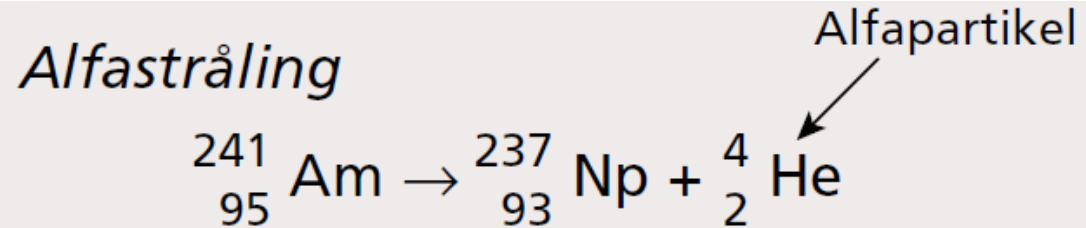


Neutron

u: up quark  
d: down quark



# Alfastråling

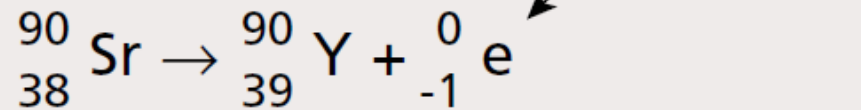


Americium-241 henfalder til neptunium-237 ved udsendelse af en alfapartikel. Halveringstiden er 458 år.

Alfapartikler kan ikke trænge gennem huden hos et menneske. Men hvis strålingen kommer fra atomer inden i kroppen, er den farlig.

# Betastråling

## Betastråling



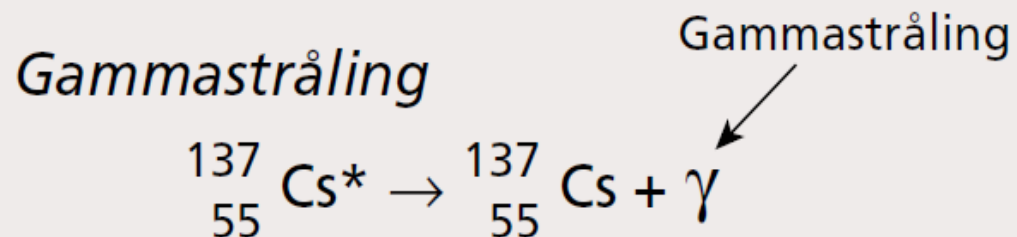
Strontium-90 henfalder til yttrium-90 ved udsendelse af en betapartikel. Halveringstiden er 29 år.

Betapartiklen er en negativt ladet elektron.

Det findes også beta-processer, hvor der udsendes en positron (en "positiv elektron").

I begge procestyper udsendes tillige en neutrino, der ikke er vist i skemaet til venstre.

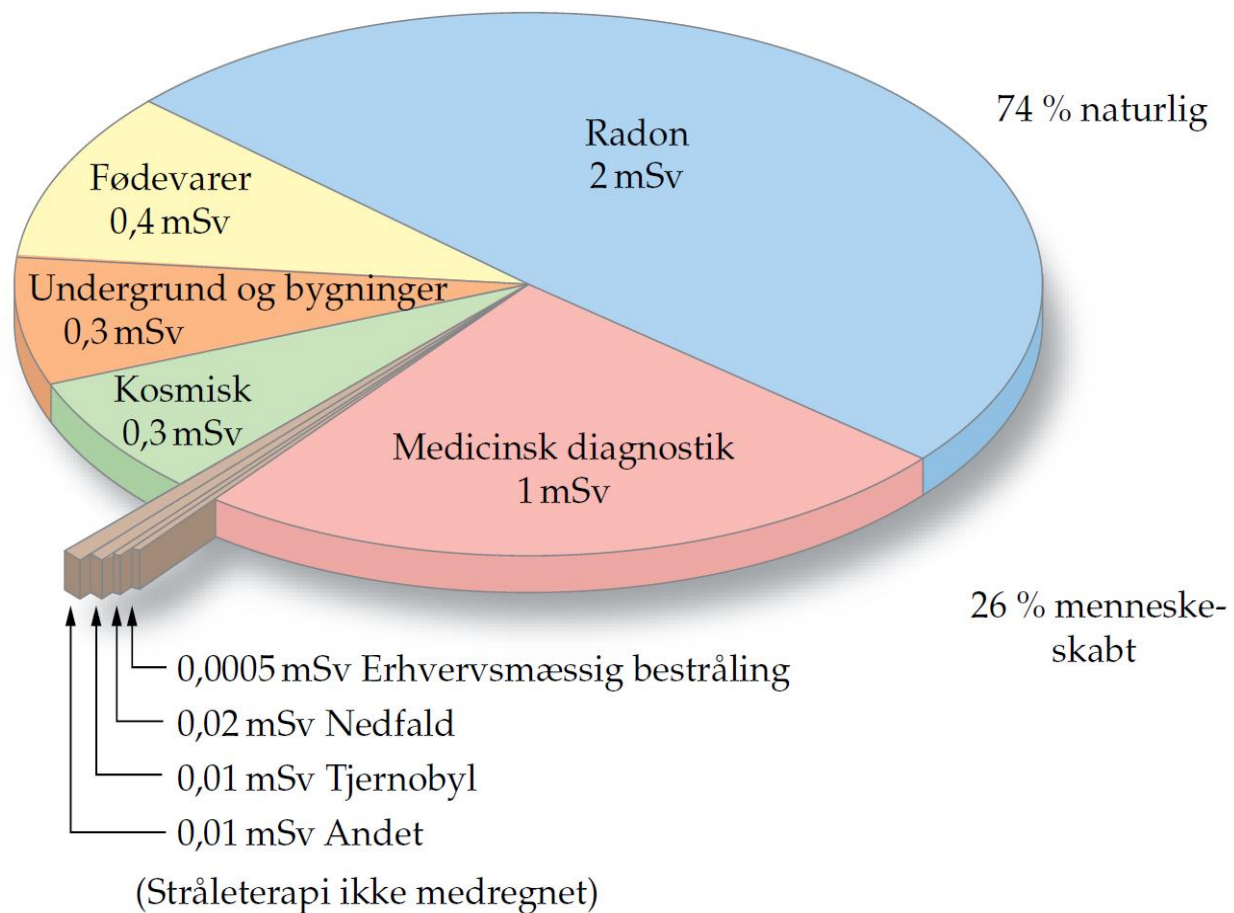
# Gammastråling



Caesium henfalder fra en energirig tilstand ved udsendelse af gammastråling. Halveringstiden er 30 år.

Efter udsendelse af en alfa- eller betapartikel er kernen normalt i en exciteret tilstand, der medfører udsendelse af gammastråling. Gamma- og røntgenstråling er det samme. Gammastråling kommer fra kernen, mens røntgen kommer fra elektronerne.

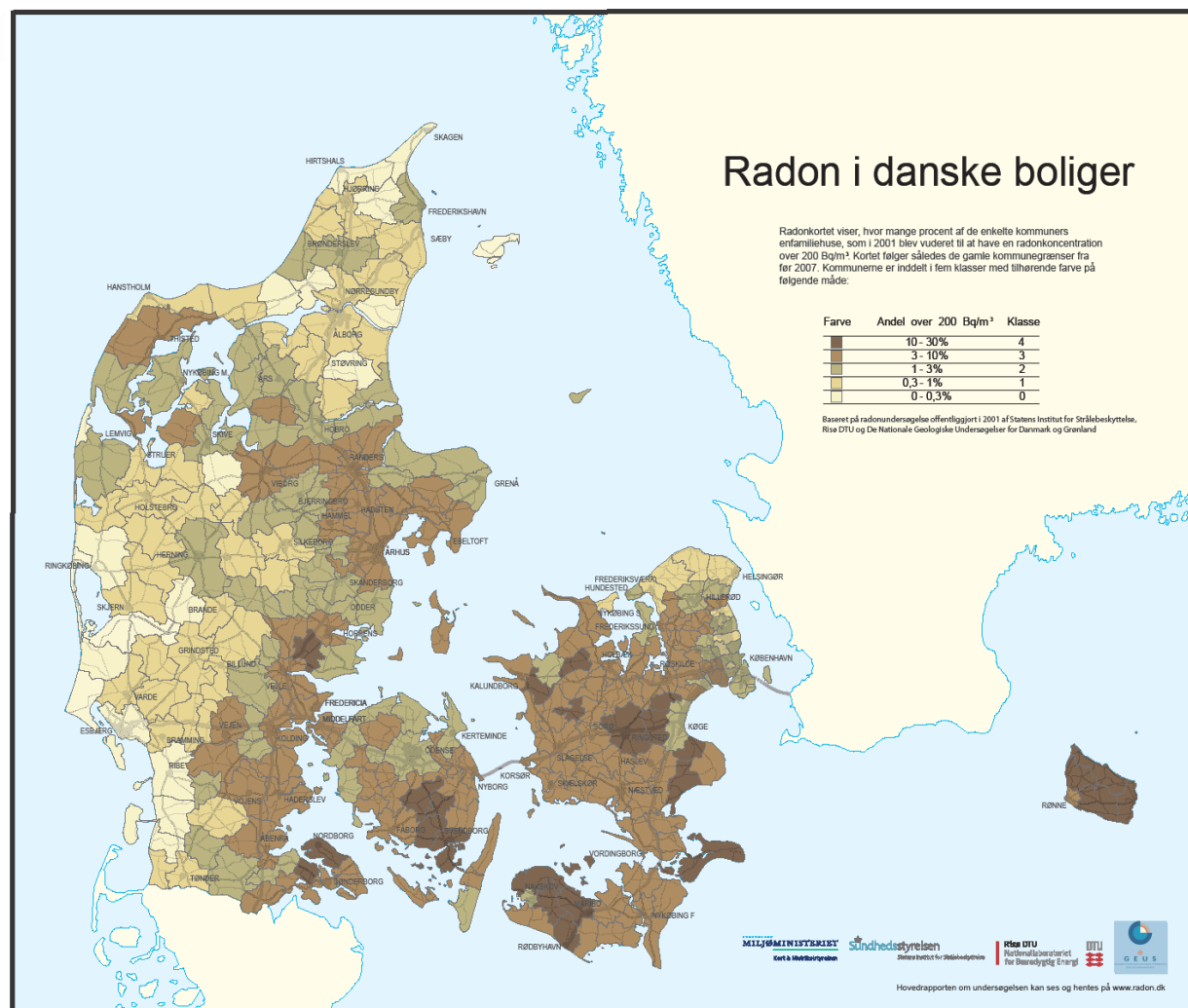
# Danskernes dosis



En dansker modtager årligt i gennemsnit en dosis på 4 mSv (millisievert).

Et par steder rundt i verden er årlig dosis over 70 mSv, uden at der er fundet nogen overdødelighed.

# Radonkort

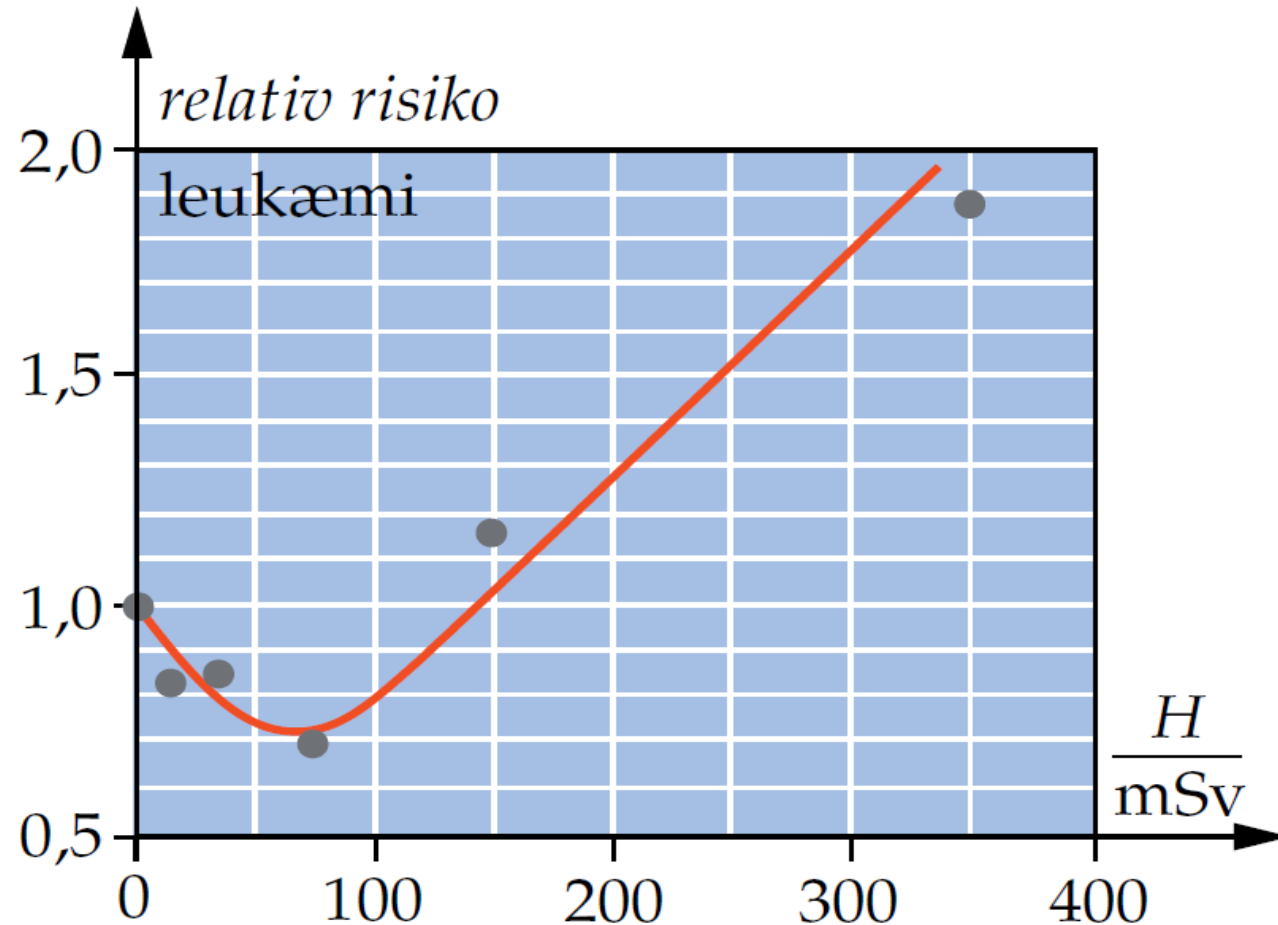


Hørsholm kommune er i næstlaveste gruppe. Bornholm er det sted i Danmark, hvor flest boliger ligger over den angivne strålingsintensitet på 200 Bq/m<sup>3</sup>.

# Strålingskader

- Ioniserende stråling kan lave skader på DNA-strengen.
- Der sker spontant mange DNA-skader, men organismen reparerer dem i løbet af få dage.
- Antallet af spontane skader er flere millioner gange større end skader forårsaget af baggrundsstrålingen.
- Især alfastråling fra stoffer i kroppen er farlig, da det påvirker flere tætliggende basepar i DNA-strengen.

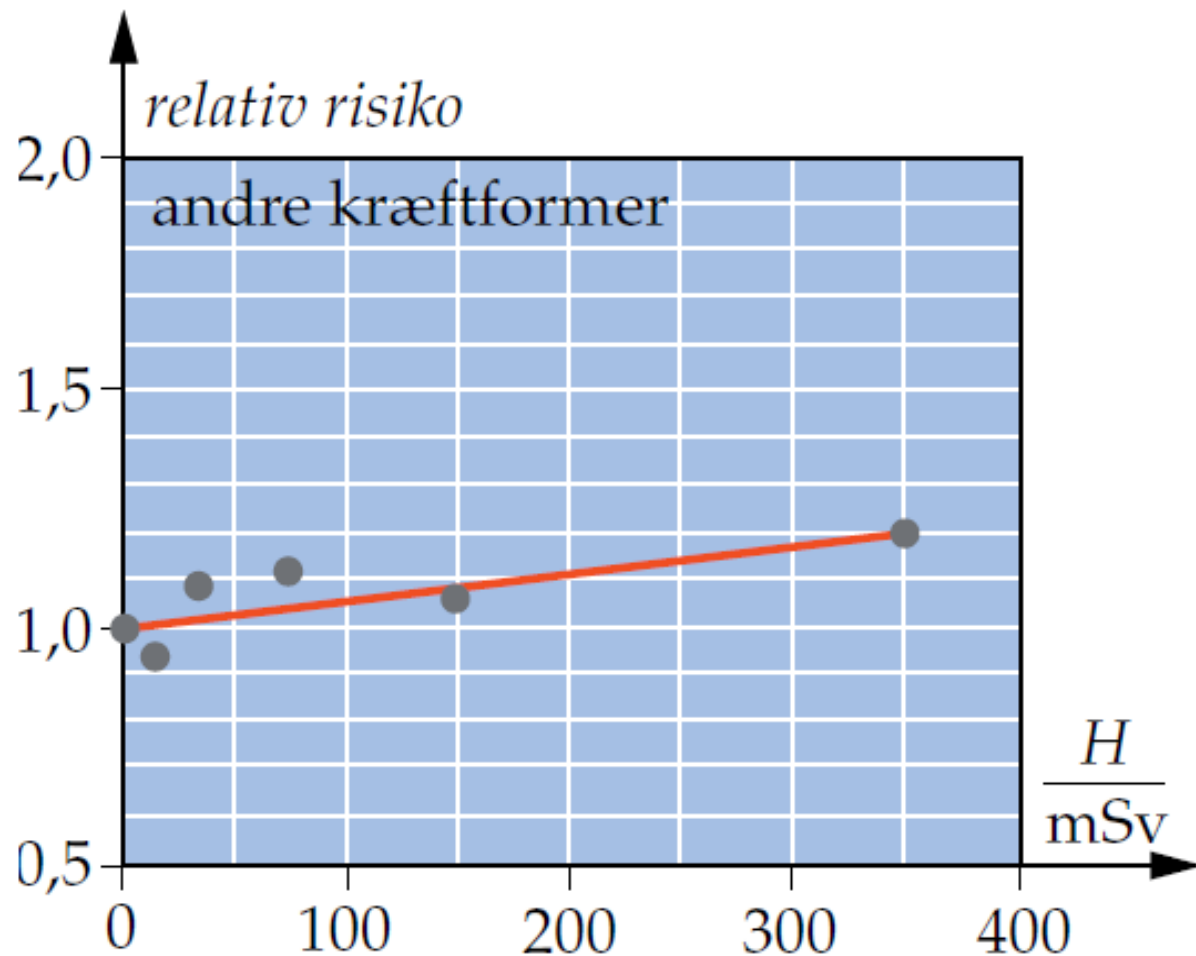
# Hormese?



Data stammer fra  
årelange registreringer af  
atombombeofre i Japan.

Er små doser mon godt  
for sundheden?

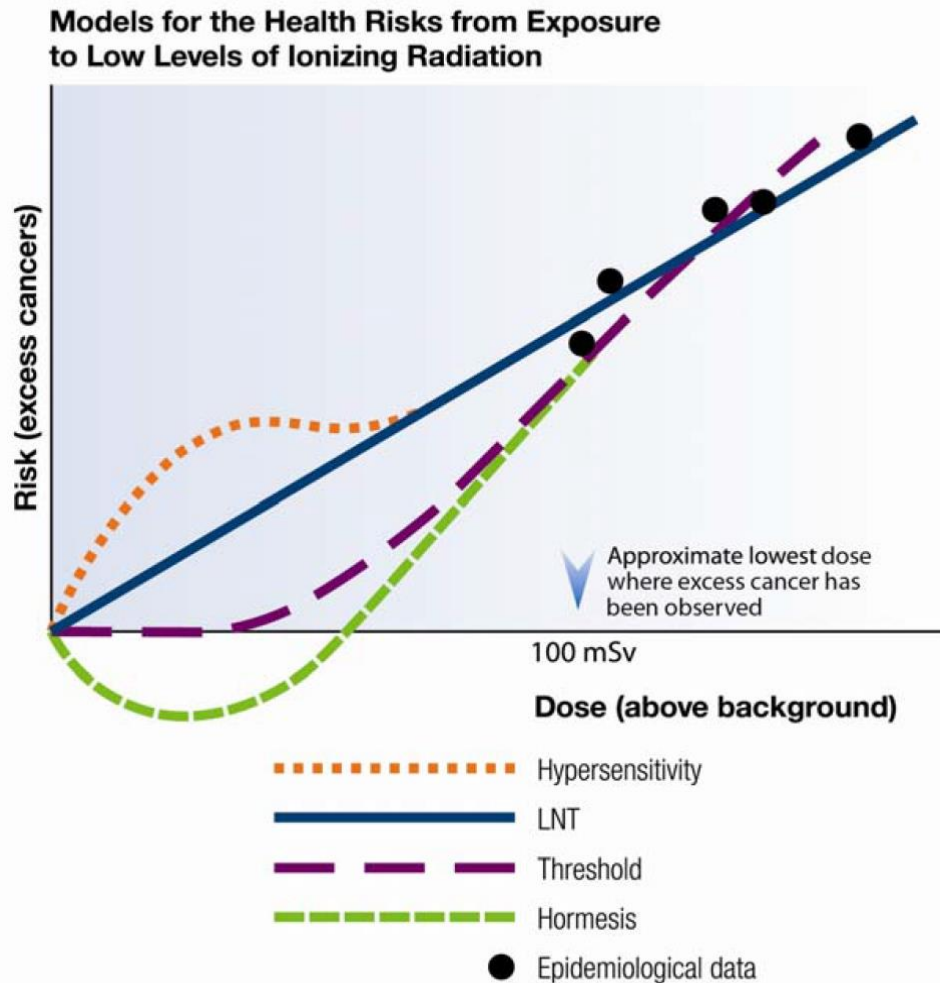
# Ingen hormese?



Data stammer fra årelange registreringer af atombombefofre i Japan.



# Den officielle fare/dosis-graf

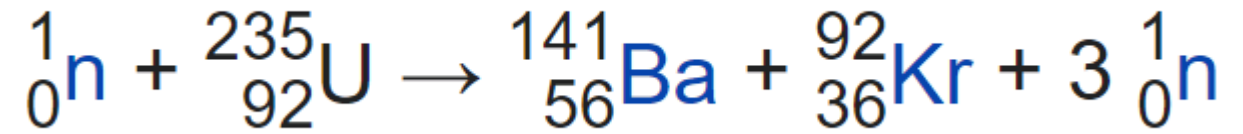
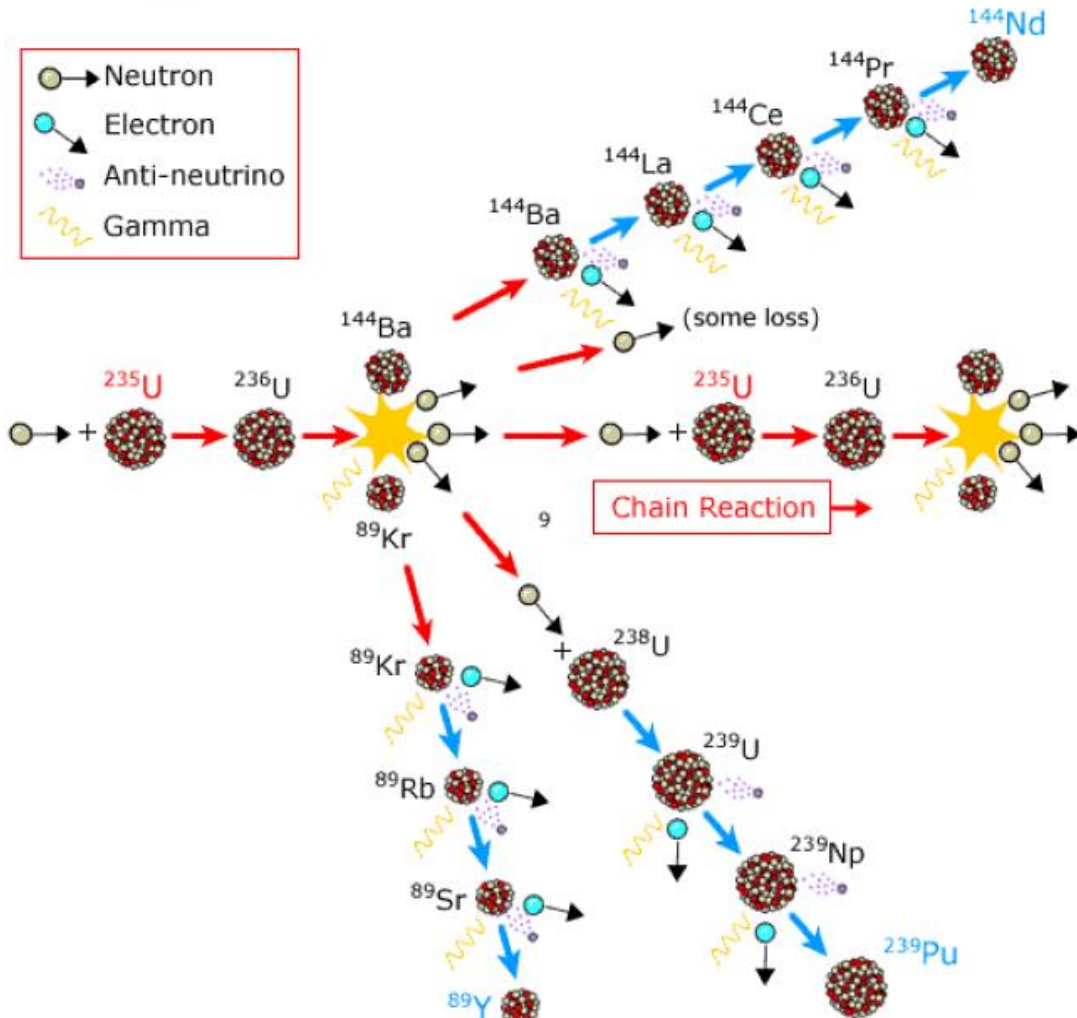


Det er ret kendt, hvor meget store doser øger kræftrisikoen. Men risikoen ved små doser er ukendt. Hvis den grønne eller lilla kurve er sandheden, kaldes fænomenet hormese.

# Naturligt og beriget uran

- Naturligt uran indeholder 0,72 % uran-235.
- Reaktorer benytter normalt uran, der er beriget til mere end 3 %.
- Reaktorer i u-både er beriget til over 20 % uran-235.
- Bomber beriget langt højere.

# Fission (spaltning) af uran-235



- Der frigives i gennemsnit 200 MeV per fission.
- $\text{C} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$  frigiver 4 eV.
- Altså 50 millioner gange mere energi per spaltning i forhold til afbrænding af et kulstofatom.

# Det handler om energitæthed



- 10 gram beriget uran.
- 450 liter olie.
- 480 kubikmeter naturgas.
- 1 ton kul.



# En meget gammel reaktor

En uranleverance fra Oklo-minen i Gabon indeholdt i 1972 ned til 0,3 % uran-235. Forklaringen var, at der for 2 milliarder år siden havde været en naturlig reaktor på dette sted. "Reaktoren" virkede i en halv milliard år. Affaldet fra "reaktoren" kunne dokumentere, at der var foregået en fission.



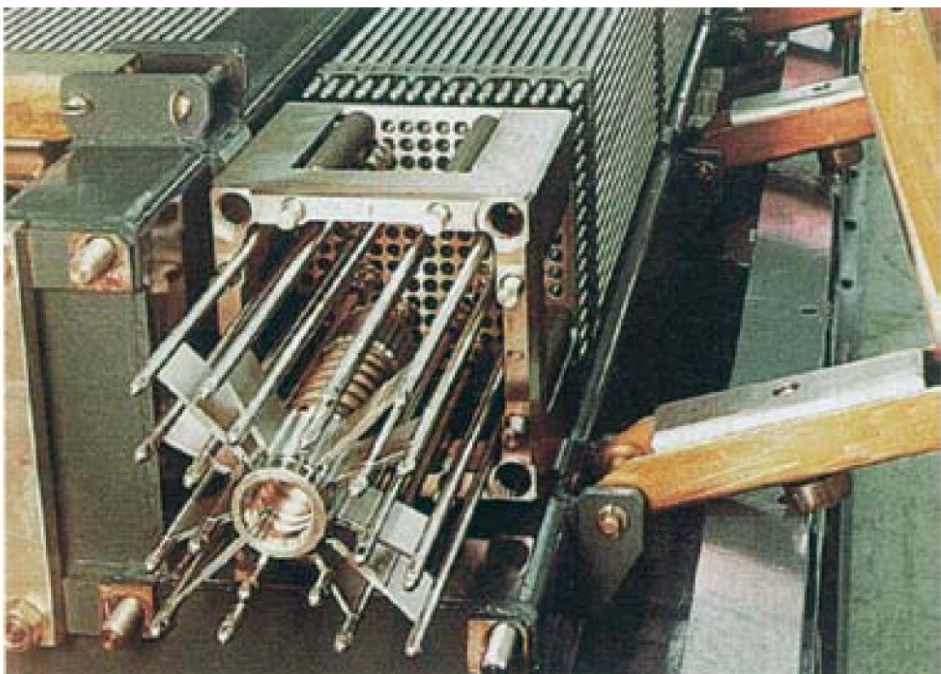
# Kernekraft er den præcise term

- Engelsk: Nuclear power.
- Tysk: Kernkraft.
- Svensk: Kärnkraft.
- Dansk: Atomkraft => Kernekraft.

# Termer vedr. kernekraft

- **Moderator** er et stof, som anvendes til at sænke bevægelsesenergien på hurtige neutroner.
- I kernereaktorer anvendes oftest almindeligt ferskvand, men visse konstruktioner anvender i stedet tungt vand eller grafit.
- **Kontrolstave** bruges til at kontrollere kædereaktionen i en kernereaktor. Stavene regulerer neutrontætheden.
- Stavene indeholder et stærkt neutronabsorberende materiale, hyppigt bor, som kan skydes ind og ud af reaktorkernen.

# Brændselselement og -piller



Pillerne af urandioxid har en masse omkring 10 g og en størrelse lidt mindre end træbrændelsespiller.

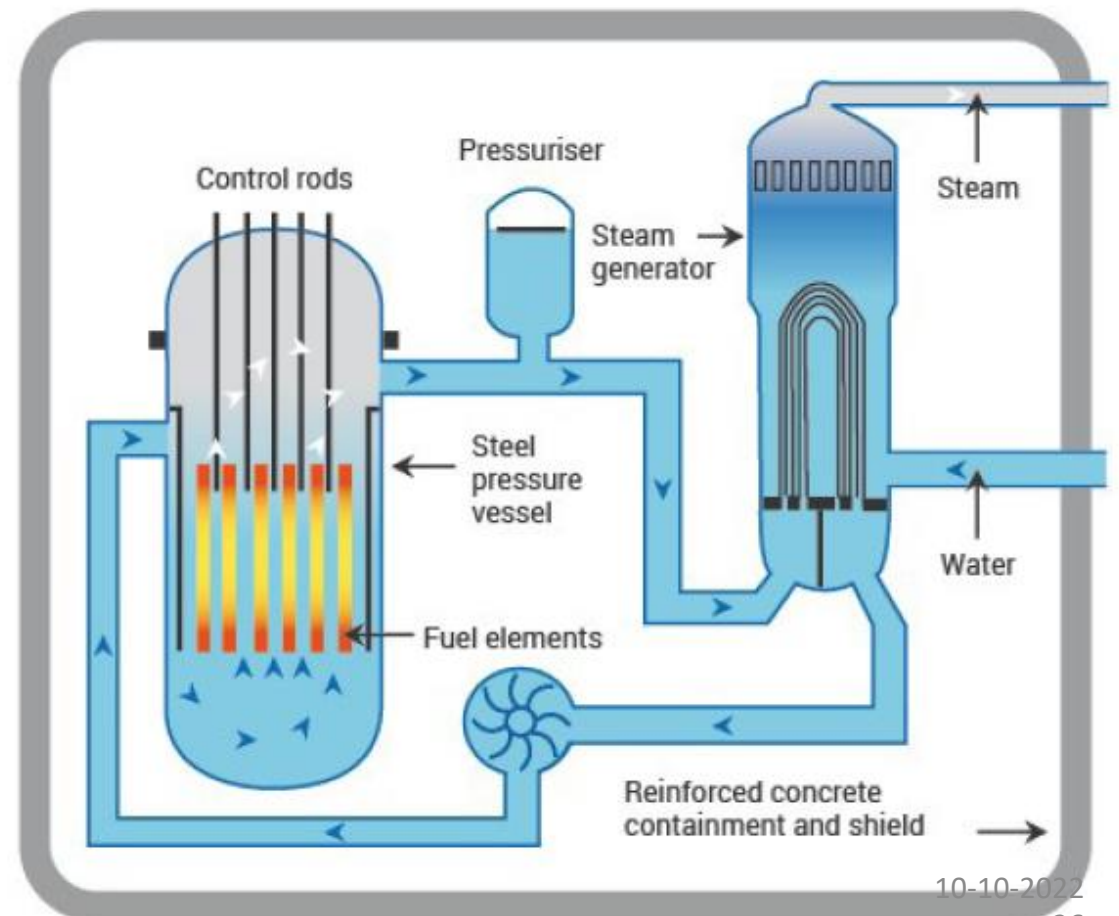
Brændselselementet består af 236 brændselsrør. Den varme damp kommer ud gennem røret midt i brændselselementet.



# Trykvandsreaktor

- Uranbrændslet findes i en vandfyldt tryktank.
- Vand bruges både som kølemiddel og moderator.
- Trykket i reaktortanken er ca. 150 bar.

A Pressurized Water Reactor (PWR)



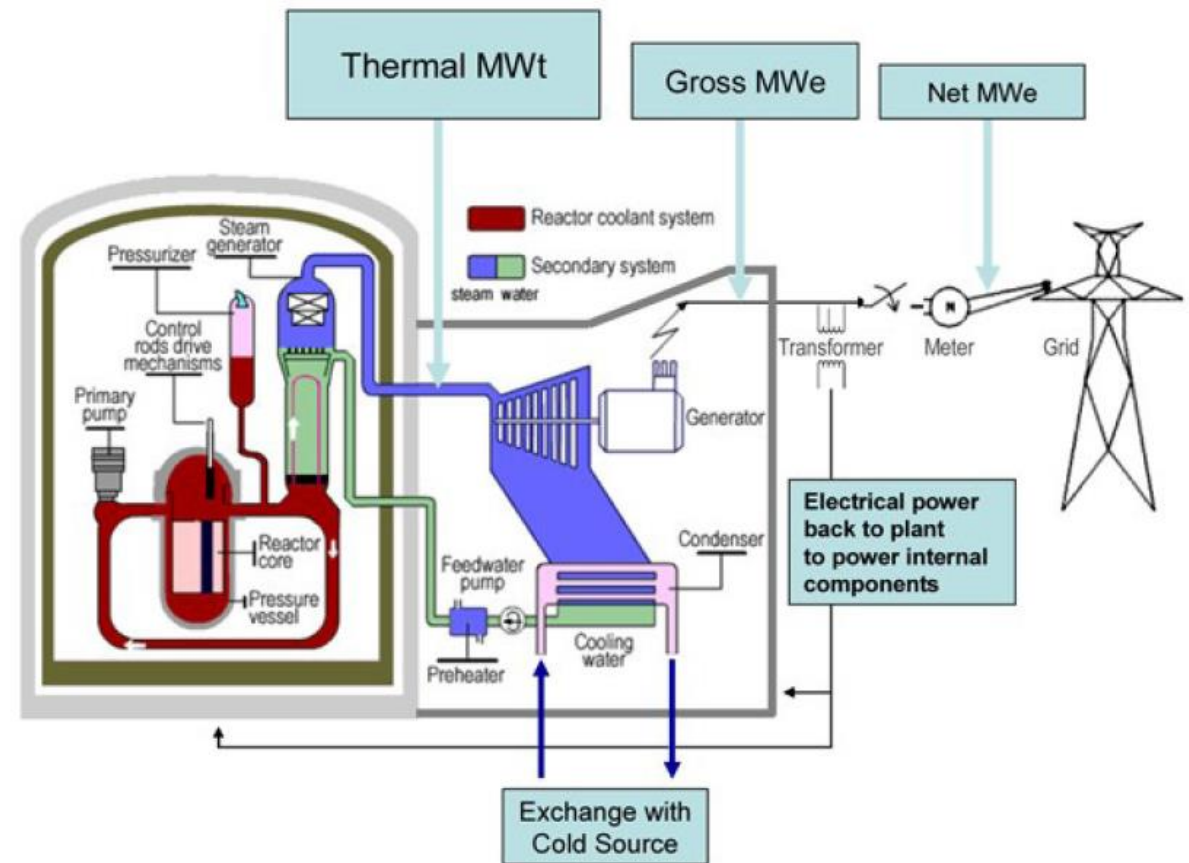
# Data for Brokdorf

Data for det nu lukkede kernekraftværk i Brokdorf.

Brændselsmængde	Antal brændselsstave	Antal kontrolstave	Tryk	Kølemiddelstrøm gennem kernen	Termisk effekt	Nyttevirkning
103 t UO <sub>2</sub>	45 548	61	15,7 MPa	67 680 t/time	3 765 MW	36,4 %

# Generering af elektricitet

- Adskiller sig ikke væsentligt fra almindelige termiske kraftværker.
- Dog er temperaturen på dampen væsentligt lavere (lidt over 300 °C) end på et fossilt kraftværk (ca. 600 °C).
- Det skyldes begrænsninger i temperatur og tryk, som især reaktorens vandindhold sætter.
- Mindre effektivt til fjernvarme.



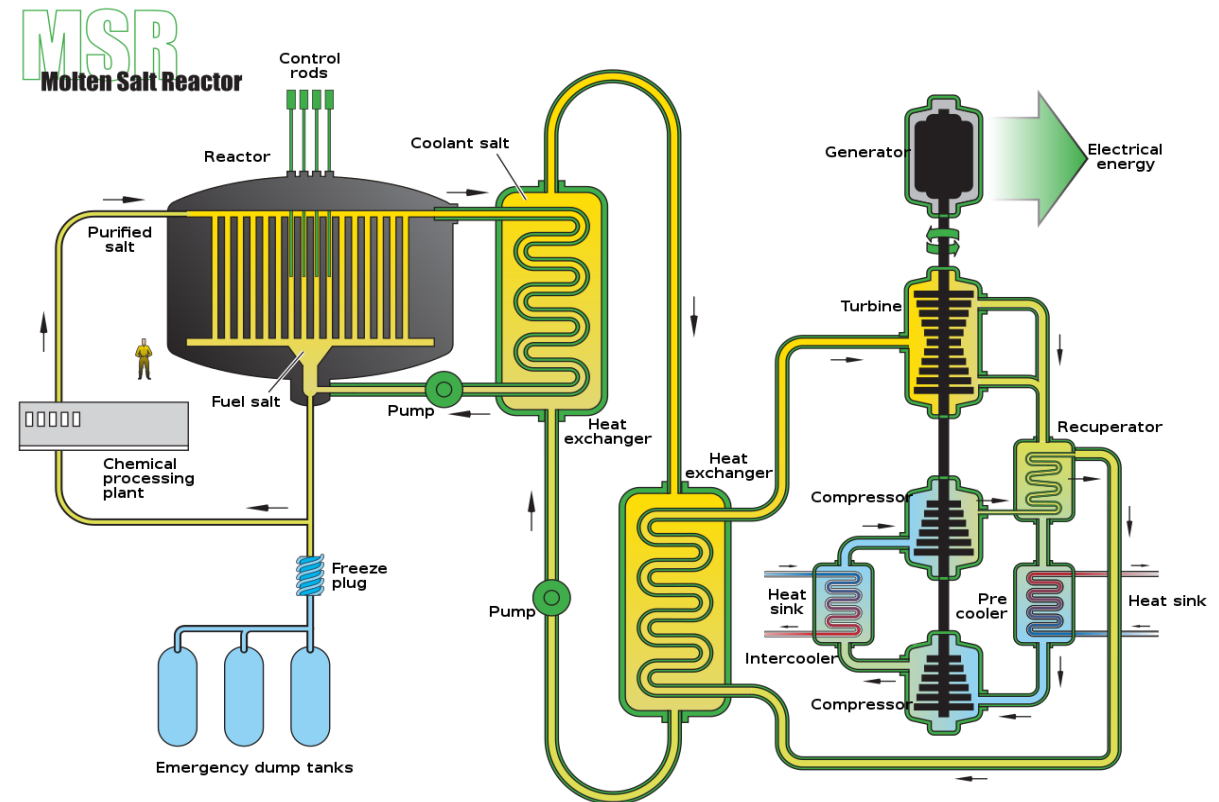
Source: World Nuclear Association

# Værkernes generationer

- Man taler om fire generationer af kernekraftværker.
- Generation 1 er det mest usikre.
- Generation 4 er det mest sikre.
- De fleste nuværende værker er generation 3.
- Tjernobyl var generation 2.

# Generation 4 kernekraft

- Dækker over flere typer. I det følgende ses på en smeltet salt-reaktor.
- Lange stave erstattet af flydende salt.
- Seaborg og Copenhagen Atomics i Danmark
- Nogle typer kan bruge “affald” fra ældre reaktortyper.
- Sikker, da de smeltede salte i nødstilfælde vil størkne og indkapsle det radioaktive materiale.
- Højere temperaturer => kan også bruges til fjernvarme.



# En kommende reaktortype?

- SMR betyder Små Modulære Reaktorer.
- Denne reaktortype skal bygges på en fabrik og transporteres til stedet, hvor den skal benyttes.
- Definitionen af en SMR er en reaktor, hvis effekt er under 300 MW.
- Der forskes verden rundt intensivt i denne reaktortype.
- To danske firmaer, Copenhagen Atomics og Seaborg er godt i gang.

# Flere termer vedr. kernekraft

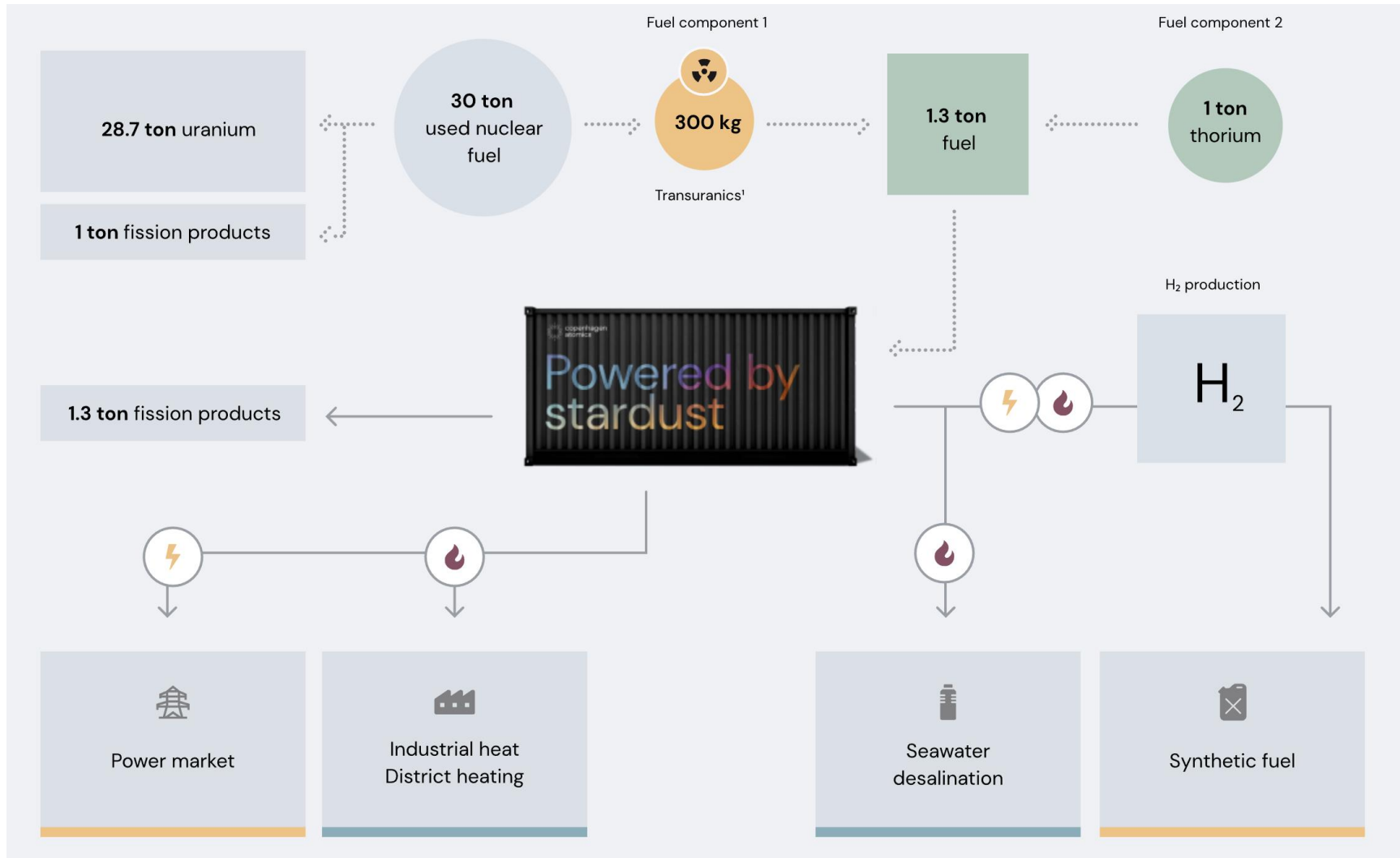
- Et **fissibelt** stof kan spaltes ved neutronbestråling. Uran-235 er det eneste naturligt forekommende stof, der er fissibelt.
- Et **fertil** stof kan ved neutronbestråling konverteres til et fissibelt stof. Thorium-232 er et naturligt forekommende stof, der er fertil. Ved neutronbestråling omdannes det efter en række trin til det fissionable uran-233.

# Copenhagen Atomics

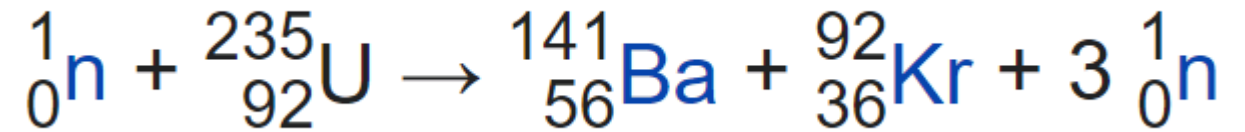
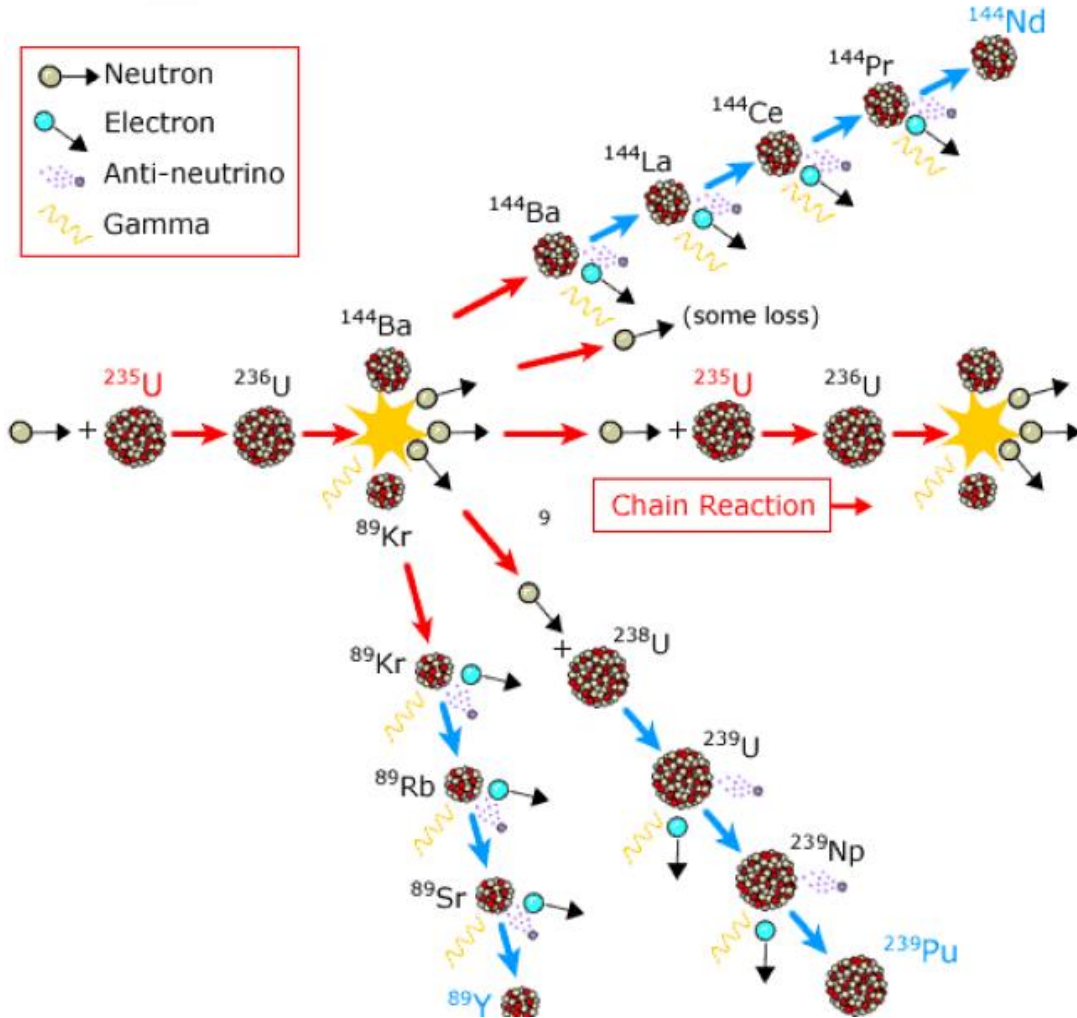
- Brændstof: Thorium og affald fra traditionelle reaktorer i smeltet salt.
- Wasteburner: Kan omdanne langlivet affald til kortlivede isotoper.
- Reaktoren placeres i en container.
- Høj temperatur i reaktoren.
- Atmosfæretryk i reaktoren.



# Proces, Copenhagen Atomics



# Fission (spaltning) af uran-235



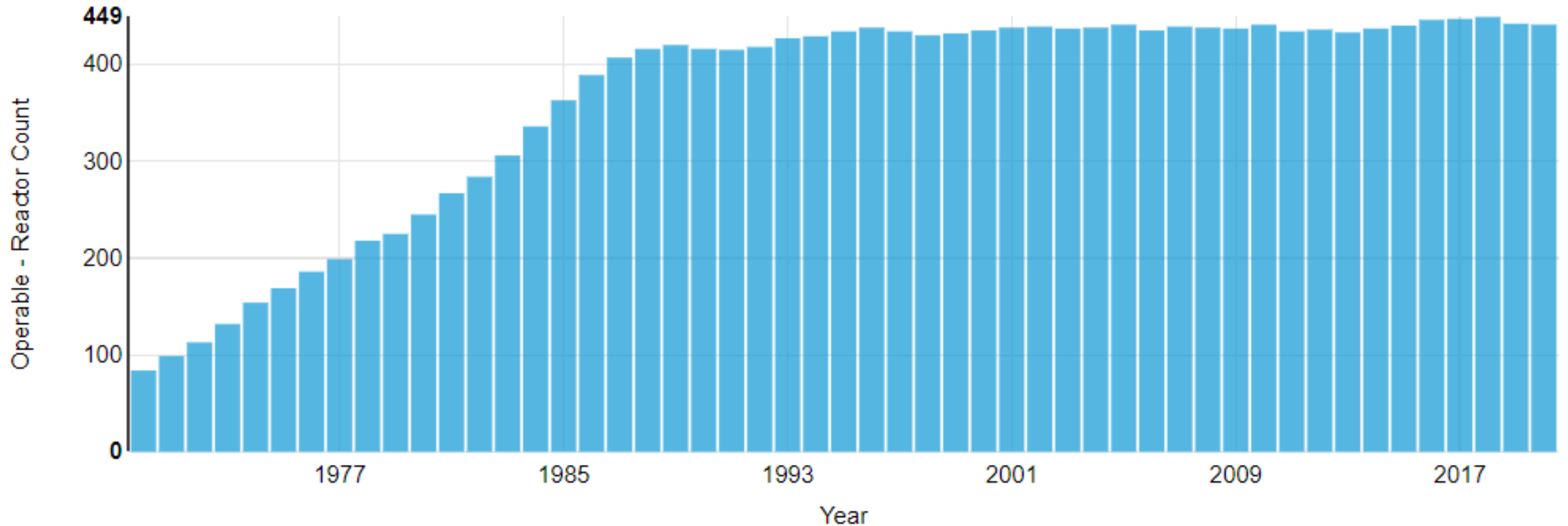
- Der frigives i gennemsnit 200 MeV per fission.
- $\text{C} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$  frigiver 4 eV.
- Altså 50 millioner gange mere energi per spaltning i forhold til afbrænding af et kulstofatom.

# Seaborg

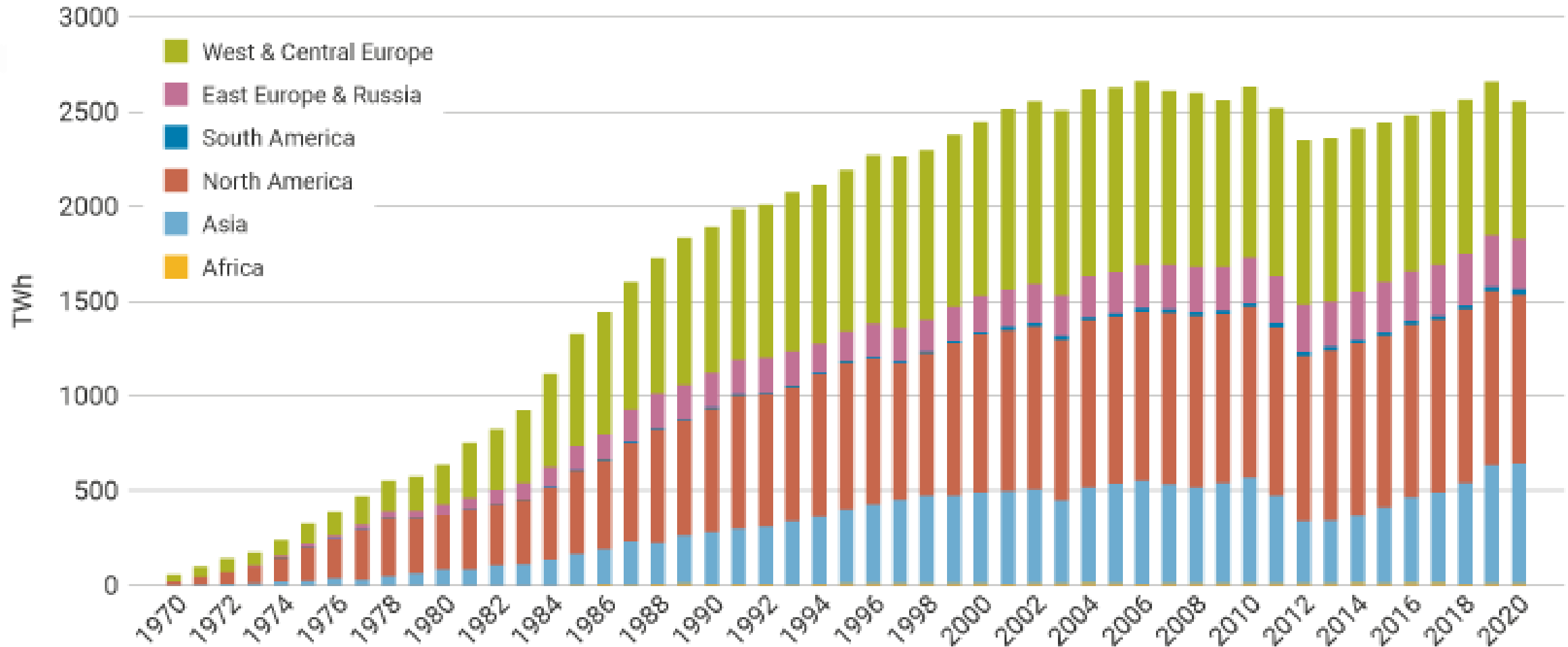
- Brændstof: Uran i smeltet salt.
- Reaktor placeret på en pram.
- Forventer mange kunder i Østasien.
- Høj temperatur i reaktoren.
- Atmosfæretryk i reaktoren.
- Efter ca. 10 års drift sendes reaktoren retur til producent, hvor kortlivet affald fjernes. Resten benyttes som brændstof i de næste reaktorer.

# Aktive reaktorer verden rundt

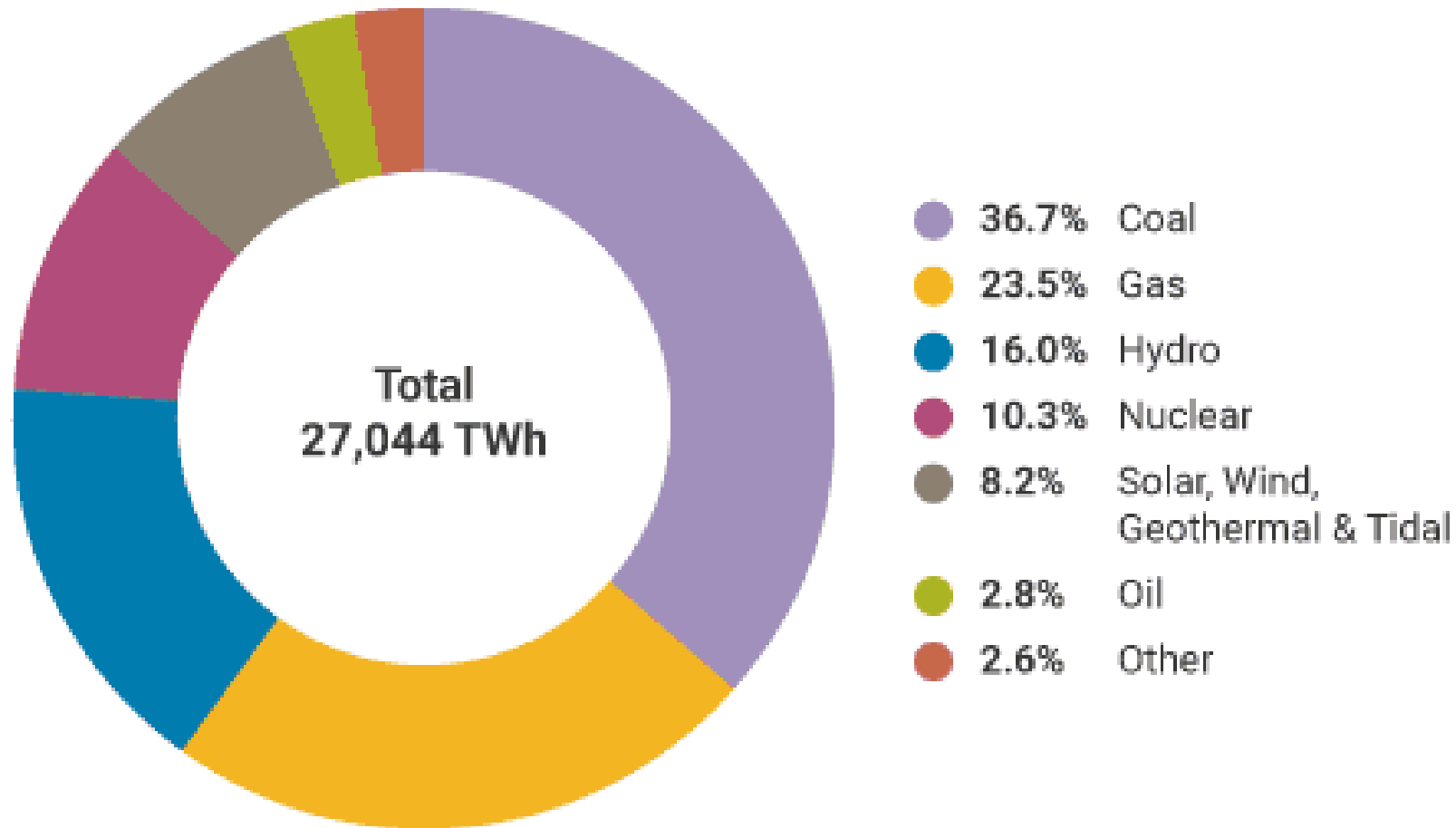
Number of Operable Reactors Worldwide



# Produktion fordelt på verdensdele

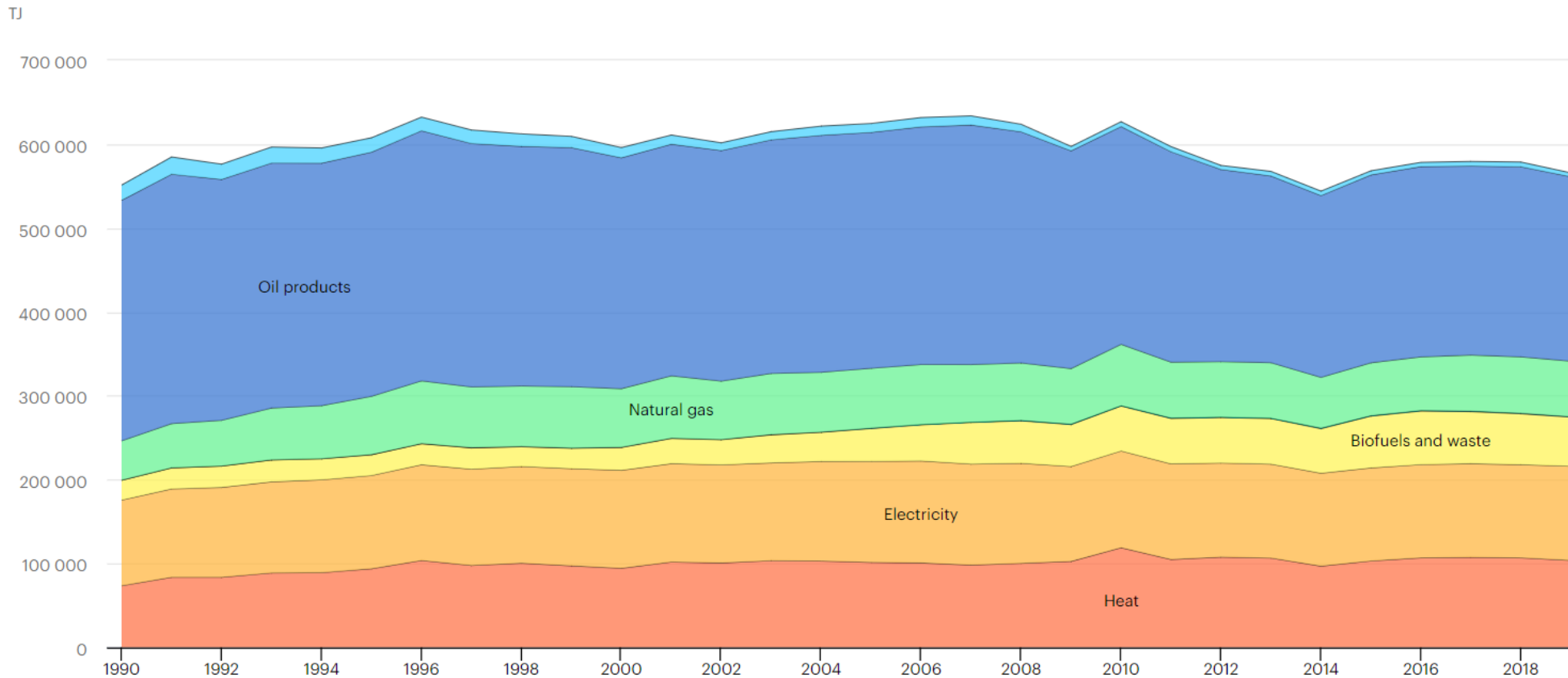


# Verdens elektricitetsproduktion 2019



Source: IEA

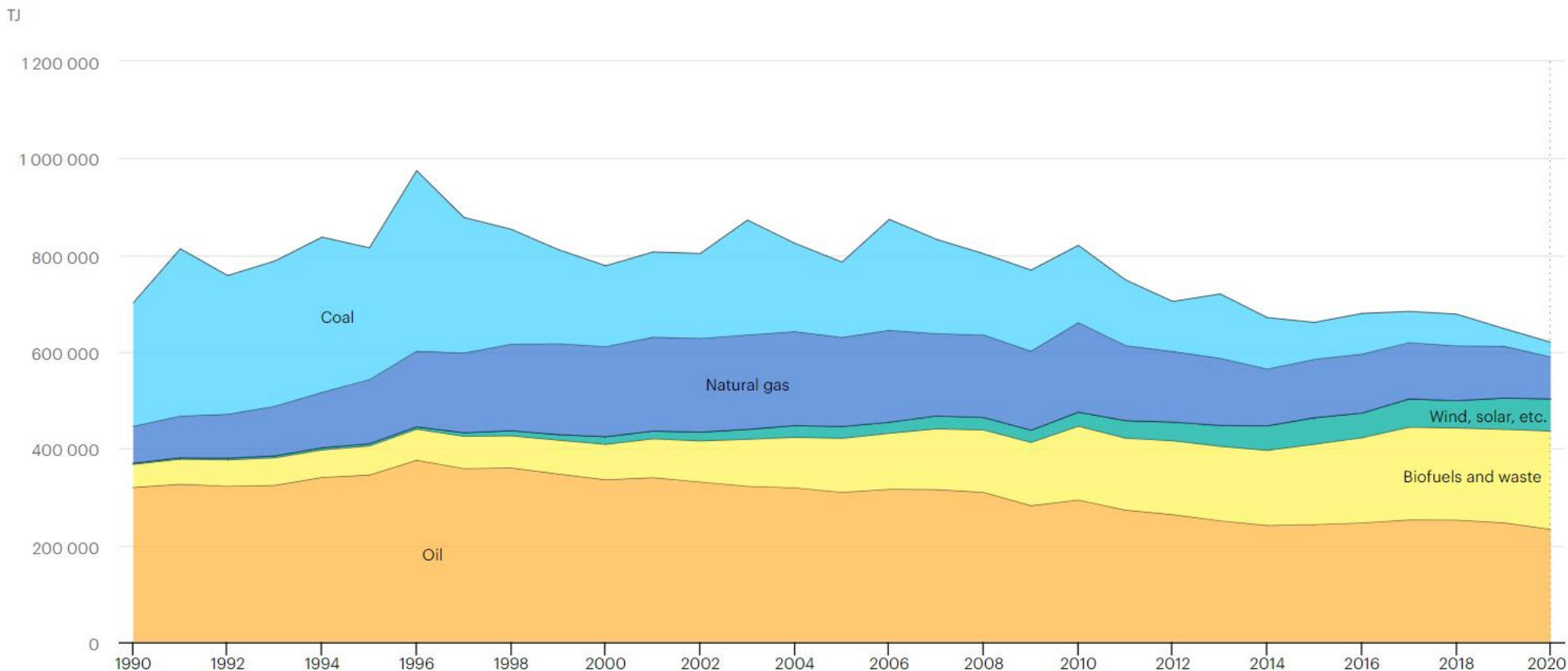
# Energiforbrug i Danmark fordelt på kilder



Kilde,  
<https://www.iea.org/countries/denmark>

Elektricitet udgør 20 % af energiforbruget.

# Energiproduktion i Danmark fordelt på kilder



- Kilde, <https://www.iea.org/countries/denmark>

- Vind og sol dækker 10% af produktionen.
- Elektrisk energi har højere kvalitet end fossil energi.
- Der er meget langt igen til Klimarådets forslag om 70 % reduktion i CO<sub>2</sub>-udslippet i 2030.



# Elsystemer med meget sol og vind

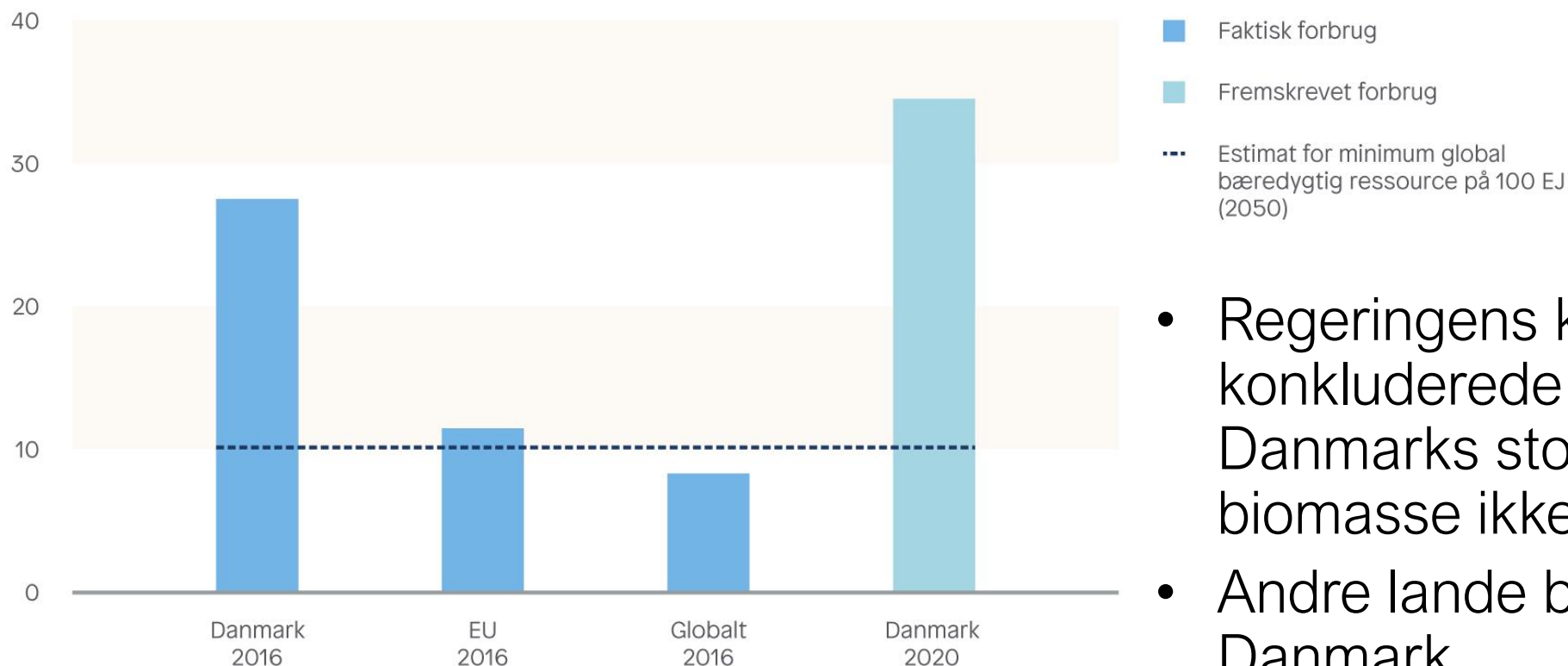
- For at kunne holde både en frekvens på 50 Hz og have justeringsmuligheder ved et varierende elforbrug er det nødvendigt med store roterende masser (turbiner og generatorer). Mon politikerne har erkendt dette forhold?
- Se videoen [www.youtube.com/watch?v=0Oh\\_w5KrEVc](https://www.youtube.com/watch?v=0Oh_w5KrEVc)

# Er Danmarks brug af biomasse bæredygtig?

- Hvis biomassen genskabes løbende, så er den næsten CO<sub>2</sub>-neutral.
- I Danmark vokser skov i gennemsnit 8 kubikmeter per hektar per år. CO<sub>2</sub>-neutralitet med det nuværende forbrug kræver et areal svarende til ca. 35% af Danmark.
- Vi har ikke nok biomasse i Danmark; mere end det halve af træ-biomassen er importeret. Er det mon CO<sub>2</sub>-neutralt?
- Biomasse og biodiversitet kæmper mod hinanden.

# Forbruget er globalt set ikke bæredygtigt

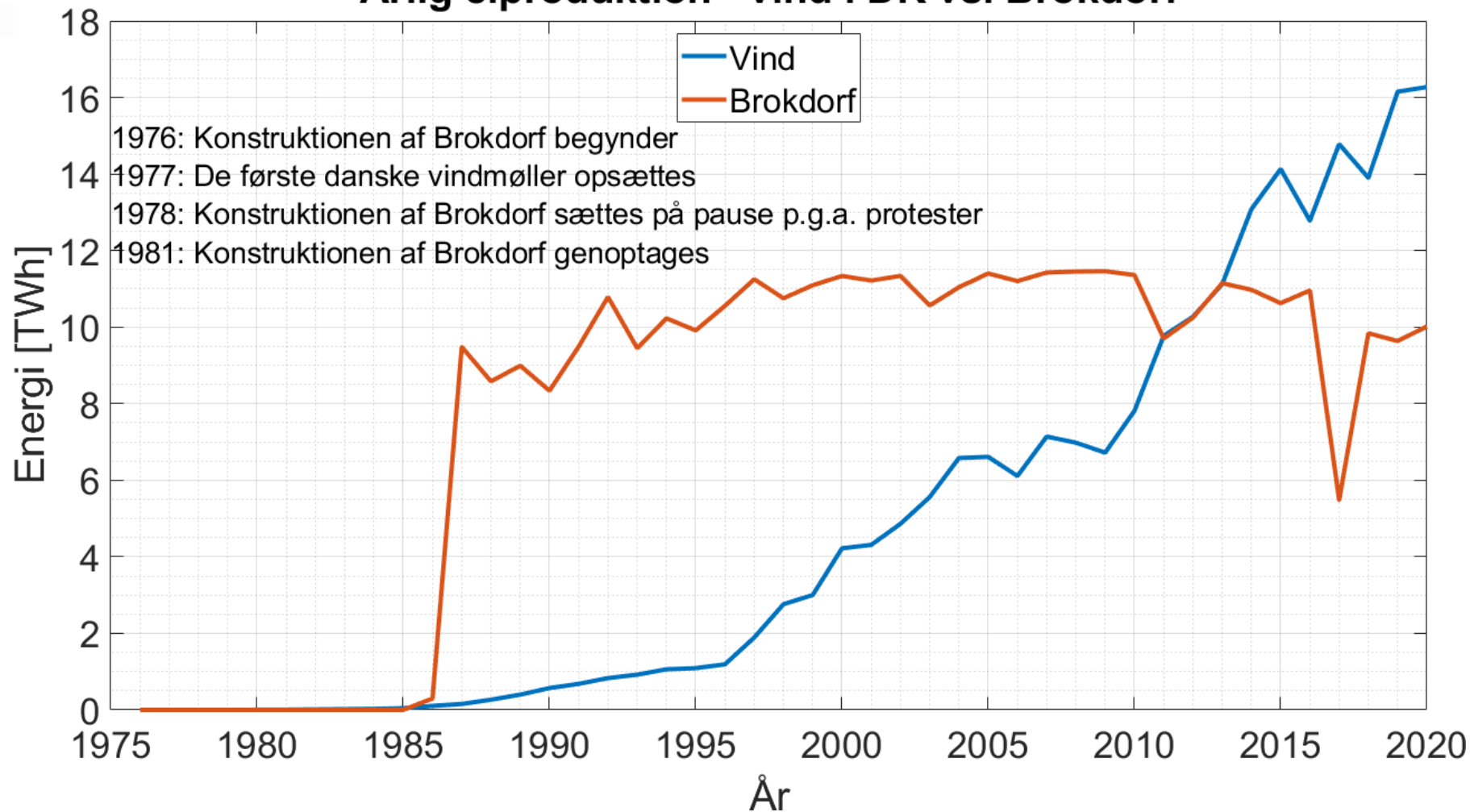
GJ bioenergi  
pr. indbygger



- Regeringens klimaråd konkluderede i 2016, at Danmarks store forbrug af biomasse ikke er bæredygtigt.
- Andre lande bør ikke kopiere Danmark.

# Dansk vind vs. et kernekraftværk

## Årlig elproduktion - vind i DK vs. Brokdorf



# Brokdorf vs. Kriegers Flak

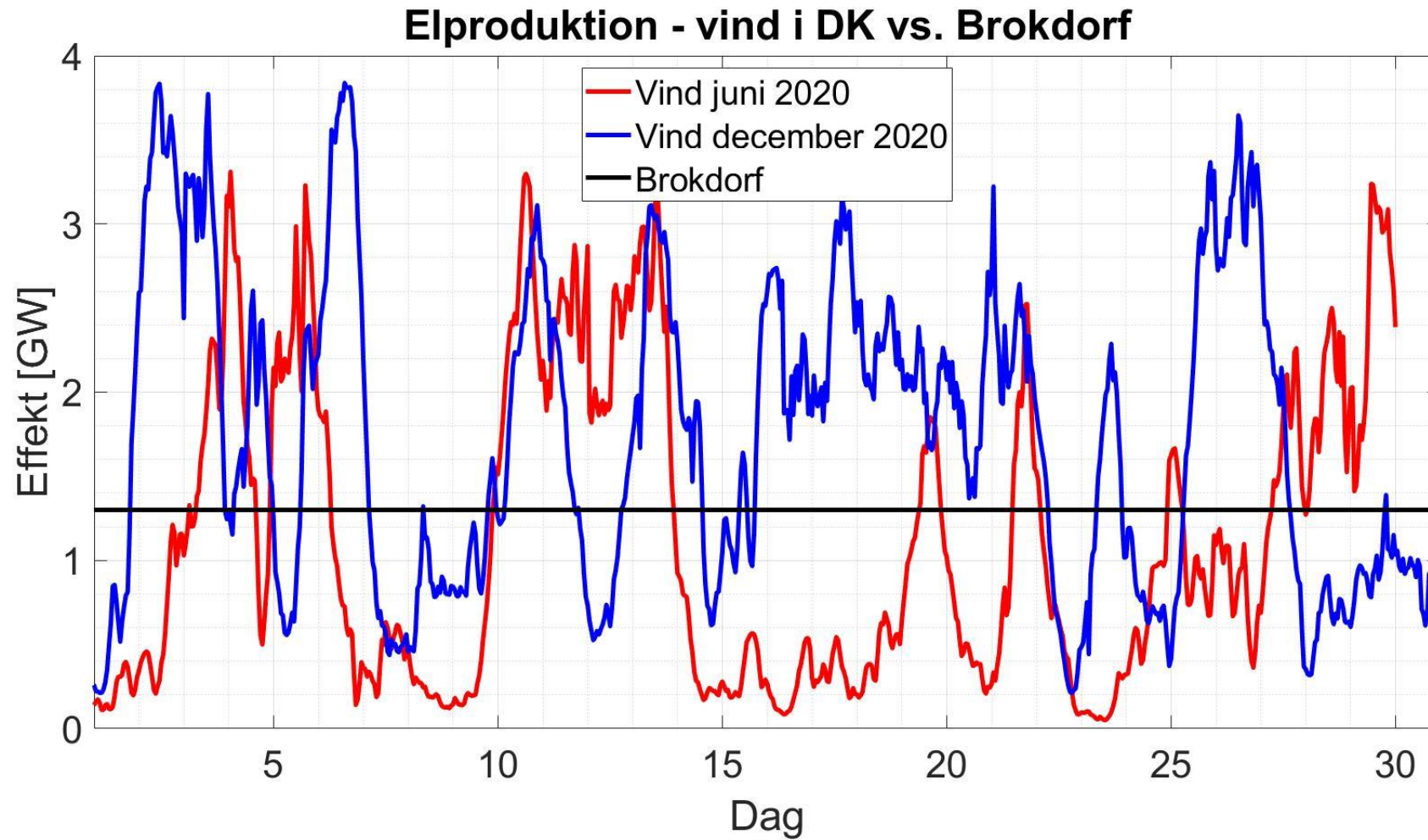


- 1440 MWe næsten konstant.
- Gennemsnit 1300 Mwe.  
Kapacitetsfaktor 90,8 %.
- Sat i drift i 1986 - meget billig i drift.
- Lukket 31/12-2021 men kunne køre måske 40 år endnu. ☹️
- Pris: 34 mia. nutidskroner.

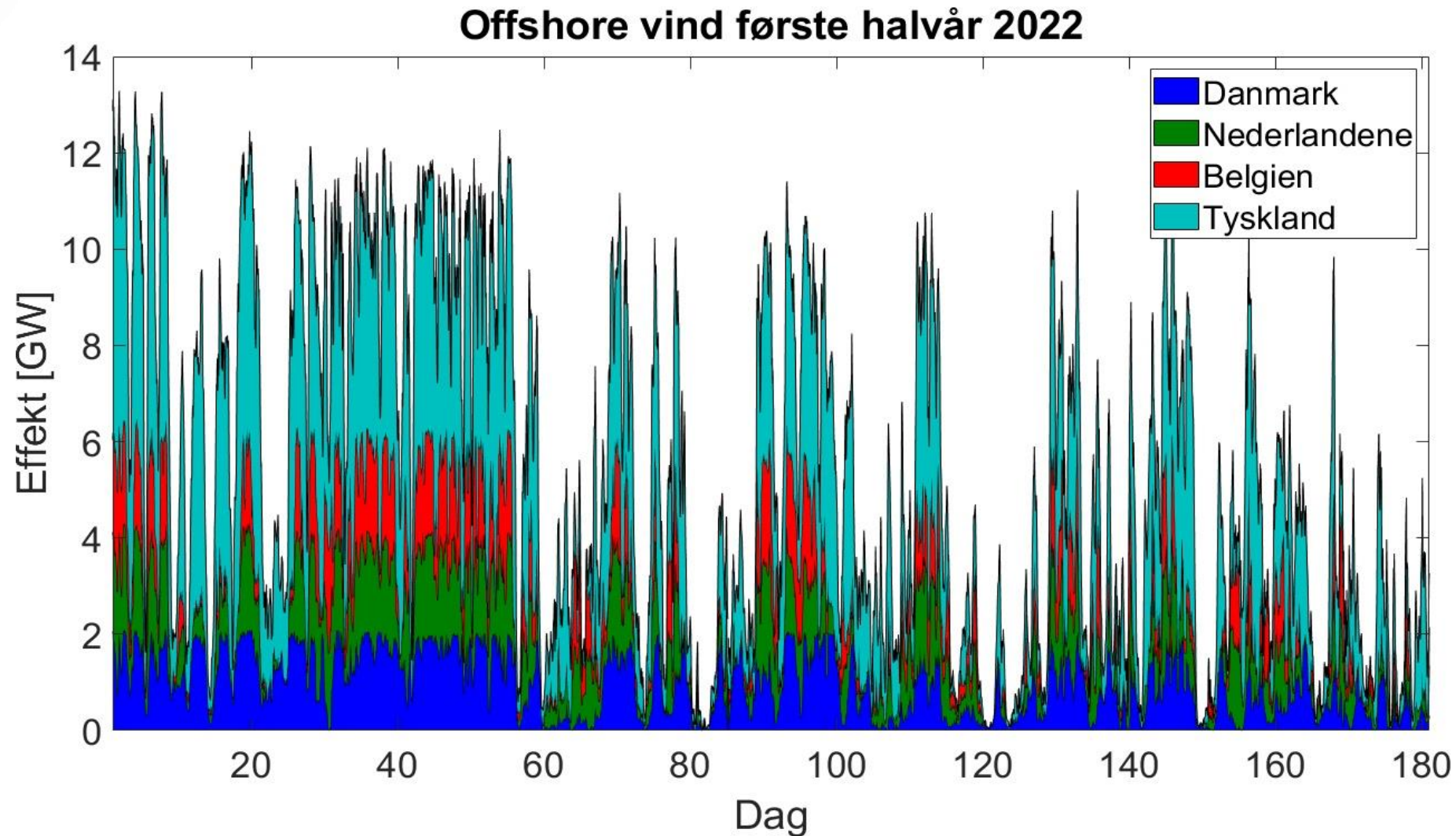


- Effekten er mellem 0 og 600 MW som vinden blæser. Kapacitetsfaktor ca. 50 %, dvs. 300 MW i gennemsnit.
- Fylder 132 km<sup>2</sup>.
- Forventet levetid 30 år.
- Pris: 9 mia. kr.

# Vind giver strøm, som vinden blæser

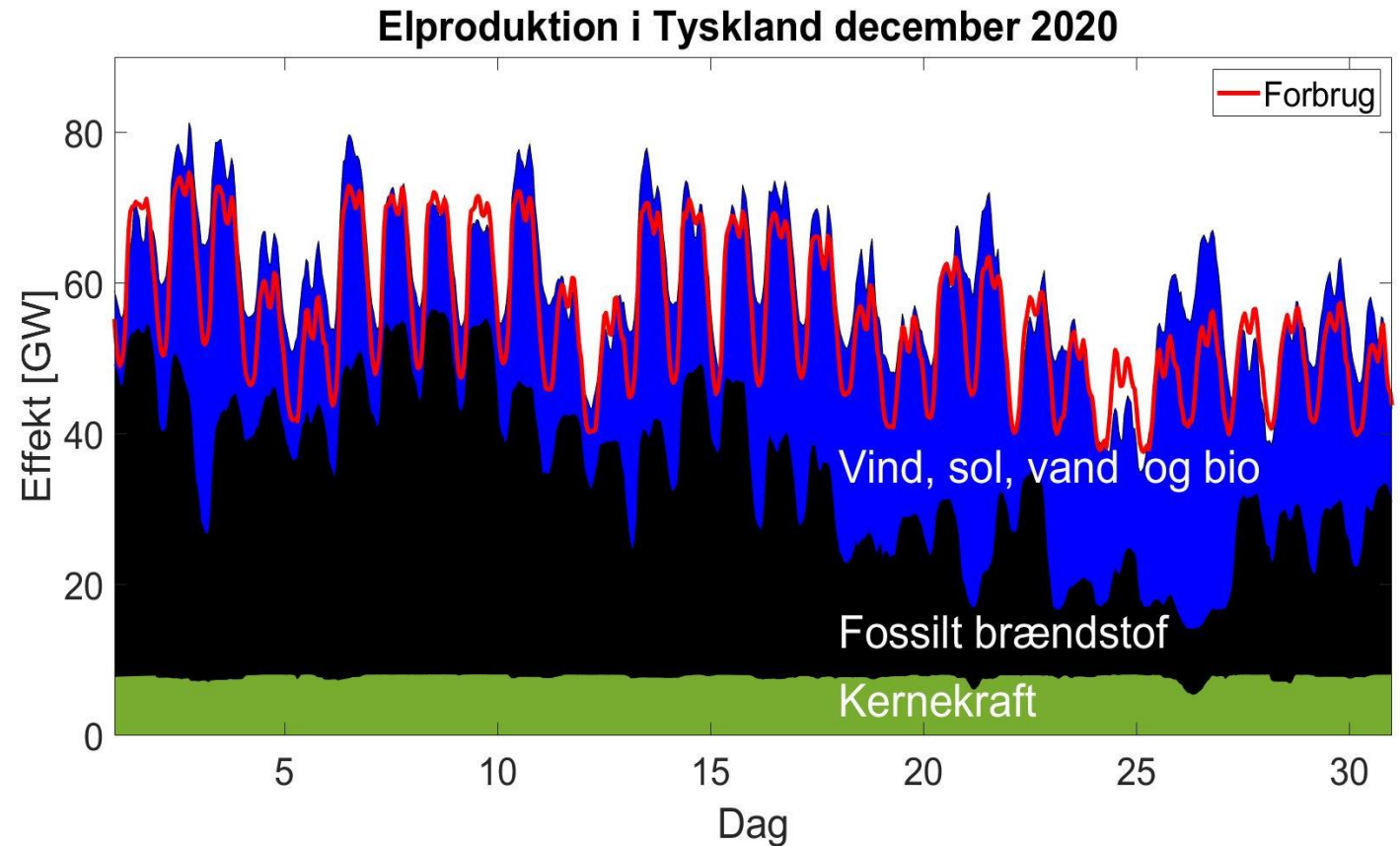


# Er udligning mellem landene mulig?



# Lukning af kernekraft er skadeligt

- Kul og gas bruges til at udjævne vind og sol.
- Når de sidste reaktorer lukker, bliver det kun endnu værre.
- Et studie fra National Bureau of Economic Research anslår, at udfasningen af kernekraft i Tyskland har ført til en stigning i CO<sub>2</sub>-udledningen på 13 % samt 1142 ekstra dødsfald årligt i Tyskland.<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Stephen Jarvis, Olivier Deschenes, Akshaya Jha (2019) "The Private and External Costs of Germany's Nuclear Phase-Out" NBER Working Paper N<sup>o</sup> 26598 doi: 10.3386/w26598 Kan downloades her: <https://www.nber.org/papers/w26598>



# Et elsystem alene med sol og vind?

- Et elsystem alene baseret på sol og vind kan ikke fungere.
- Et "sol/vindsystem" er kun stabilt, hvis der samtidig er værker med turbiner fra hydro/kerne/gas/olie.
- Danmark er ikke et foregangsland, men et taberland, hvis vi baserer os på sol og vind. Kun med hjælp fra andre lande kan vi få da få et stabilt elsystem.

# Starten på blackouts?

Lørdag den 14. august 2021 skinnede solen i Tyskland, og de mange solcelleanlæg leverede midt på dagen en effekt på 30 GW. Men også den dag gik solen ned, og kl. 20 var effekten faldet til 3 GW. Vinden var svag og aftog i aftenens løb. Behovet for effekt var 50 GW, og selv med pumpekraftværker og kulfyrede kraftværker, kunne behovet ikke dækkes. Muligheden for import var ringe. Derfor måtte man uden varsel lørdag aften afkoble nogle store forbrugere (aluminium- og kobberværker). Senere fulgte afkobling af flere industrier, dog med et kort varsel.

# Nedlukninger af el i Danmark

Hvis vi rammer en meget hård, kold vinter - og det samtidig er vindstille, så vi ikke har energi fra vindmøllerne - så vil vi være et sted, hvor vi har et presset energisystem, forklarer Kristoffer Böttzauw fra Energistyrelsen den 25/9 2022.

Elselskaberne får “et døgnns tid” til at skabe balance ved at få store elslugere som for eksempel kraftvarmeværker med elkedler til at skrue ned. **Hvis man stadig ikke er i mål på det kritiske tidspunkt, bliver der lukket ned for strømmen til helt almindelige kunder som boliger og virksomheder.**

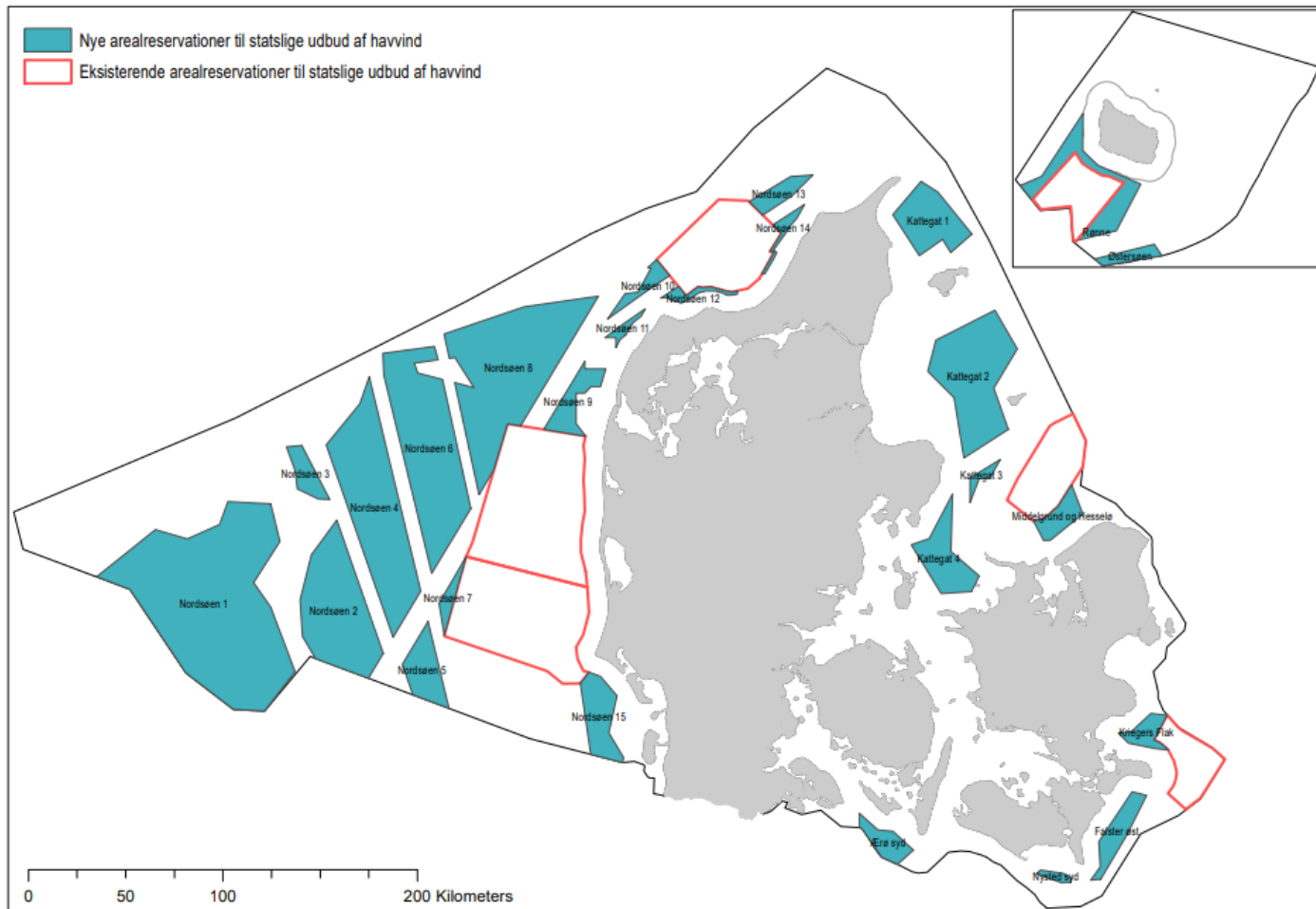
# Energiøerne (transformerøerne)

- Hvem skal aftage strømmen?
- Hvad skal bruges som backup, når det ikke blæser?
- Vindmøller stoppes allerede i dag, når der er overskud af energi.



I den politiske aftale om energiøerne stod der:  
*"Såfremt der primo 2022 ikke er indgået en forpligtende aftale om etablering af udlandsforbindelser, vil det være op til en politisk beslutning, om eller hvordan det skal have betydning for det videre arbejde med energiøerne."*

# Områder reserveret til havvind m.m.

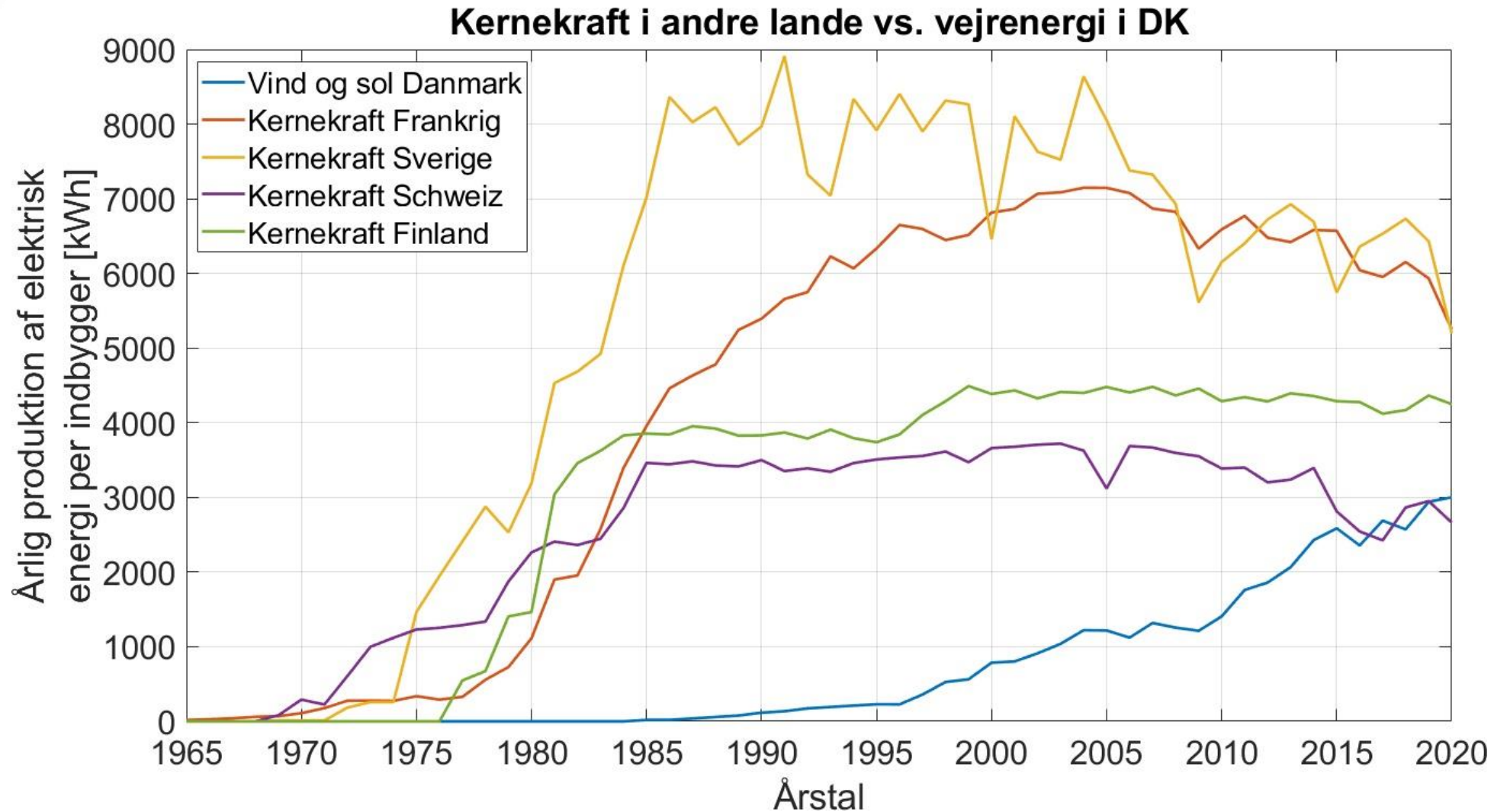


Områder reserveret til havvind og energiøer. Stakkels trækfugle, fragtskibe og fiskere.

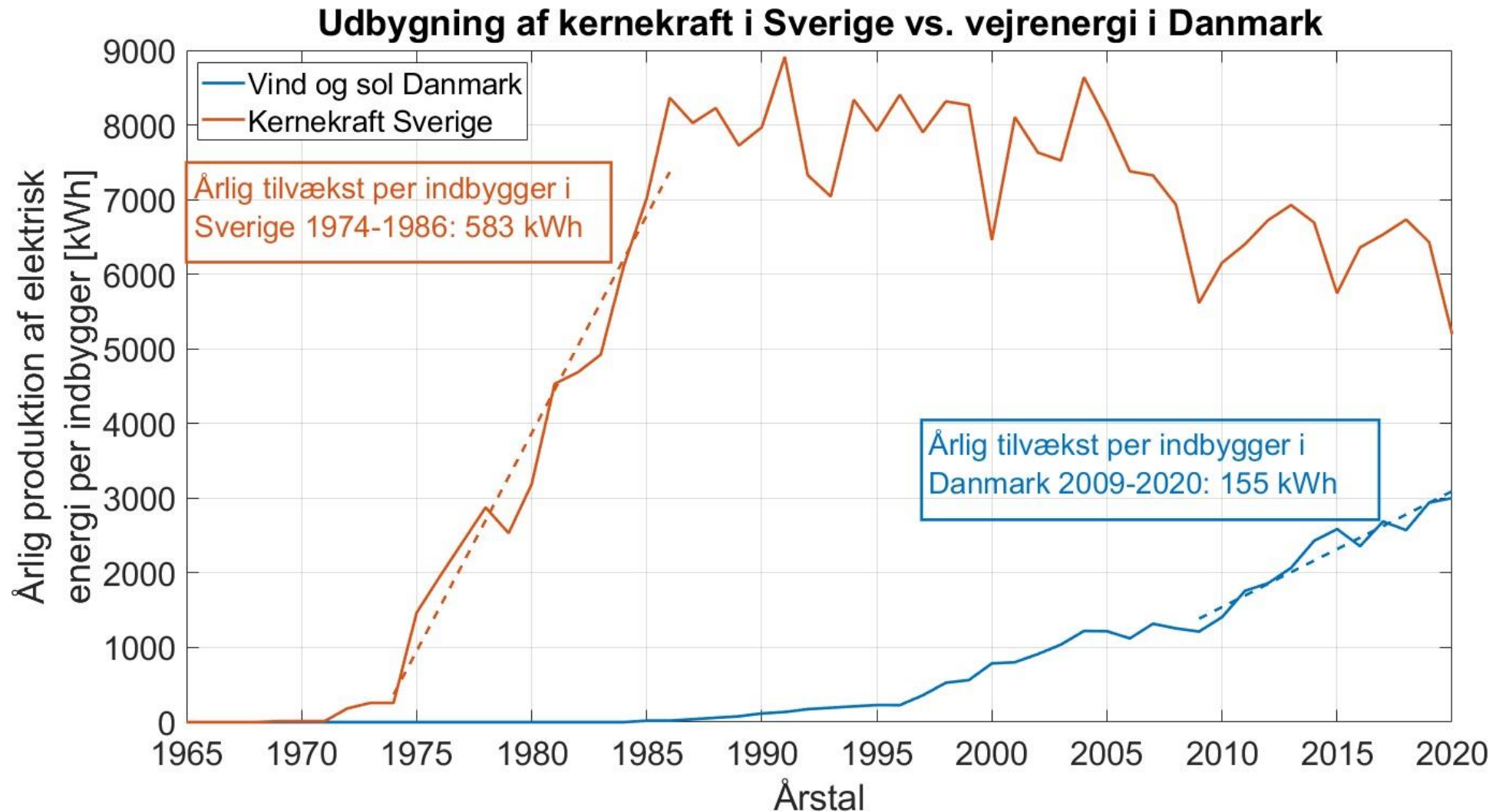
# Power to X

- Der findes ikke noget storskala-system endnu.
- Stort energi-tab i processen.
- Det er en kæmpe risiko at løbe, ja dybt uansvarligt, at basere sin energipolitik på en teknologi, der endnu ikke er opfundet.
- Vi baserer heller ikke vores energipolitik på fusionsenergi, selvom der foregår en masse forskning i det i disse år.
- Håb er ikke en strategi.

# Historisk er kernekraft hurtigst 1

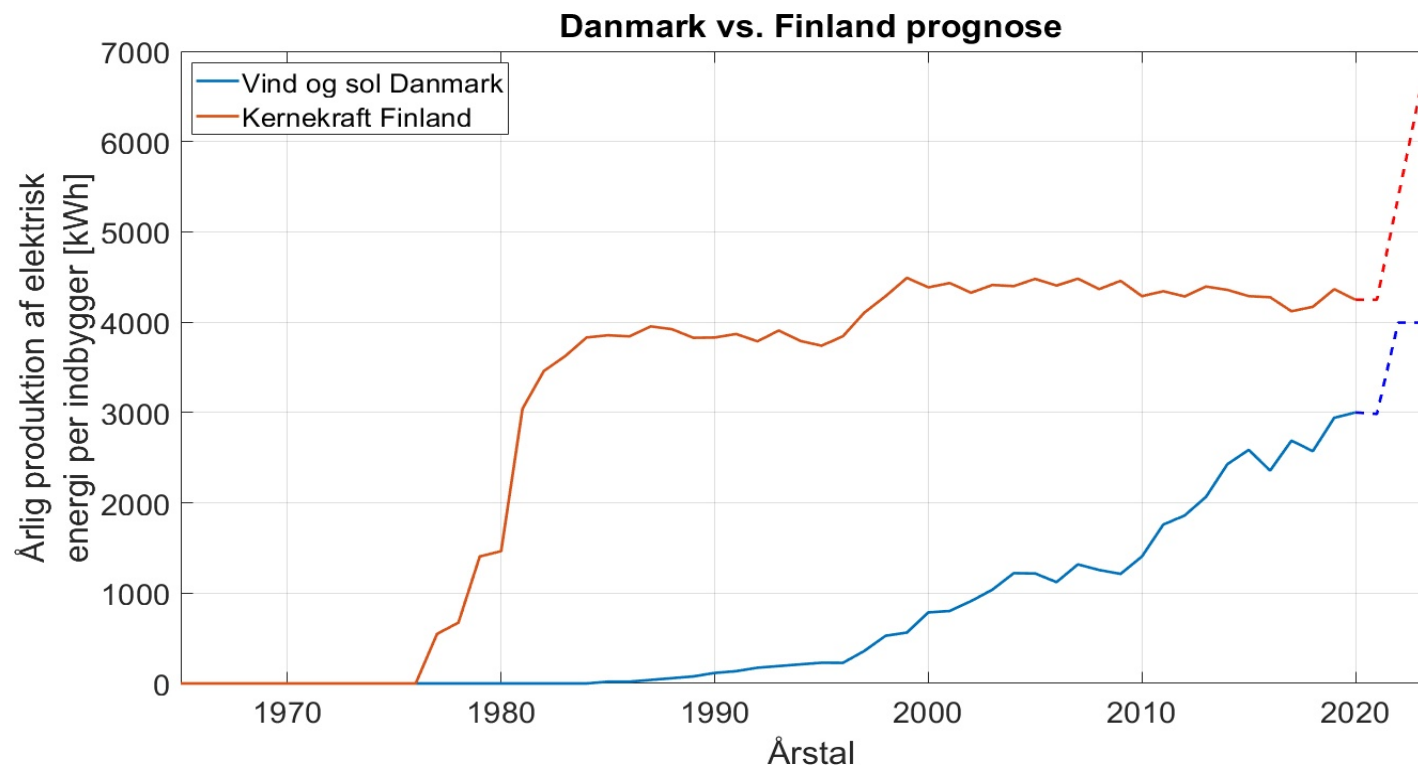


# Historisk er kernekraft hurtigst 2





# “Skrækeksemplet” Finland



- “Vi har ikke tid til kernekraft.”
- Modstandere henviser altid til Olkiluoto 3; men Finland fører stort netop pga. Olkiluoto 3.
- Finland planlægger at bygge et nyt værk. Men krigen i Ukraine har udsat det tilsigtede færdiggørelsestidspunkt i 2029 (den punkterede røde linje).

# LCOE i Europa ifølge IEA

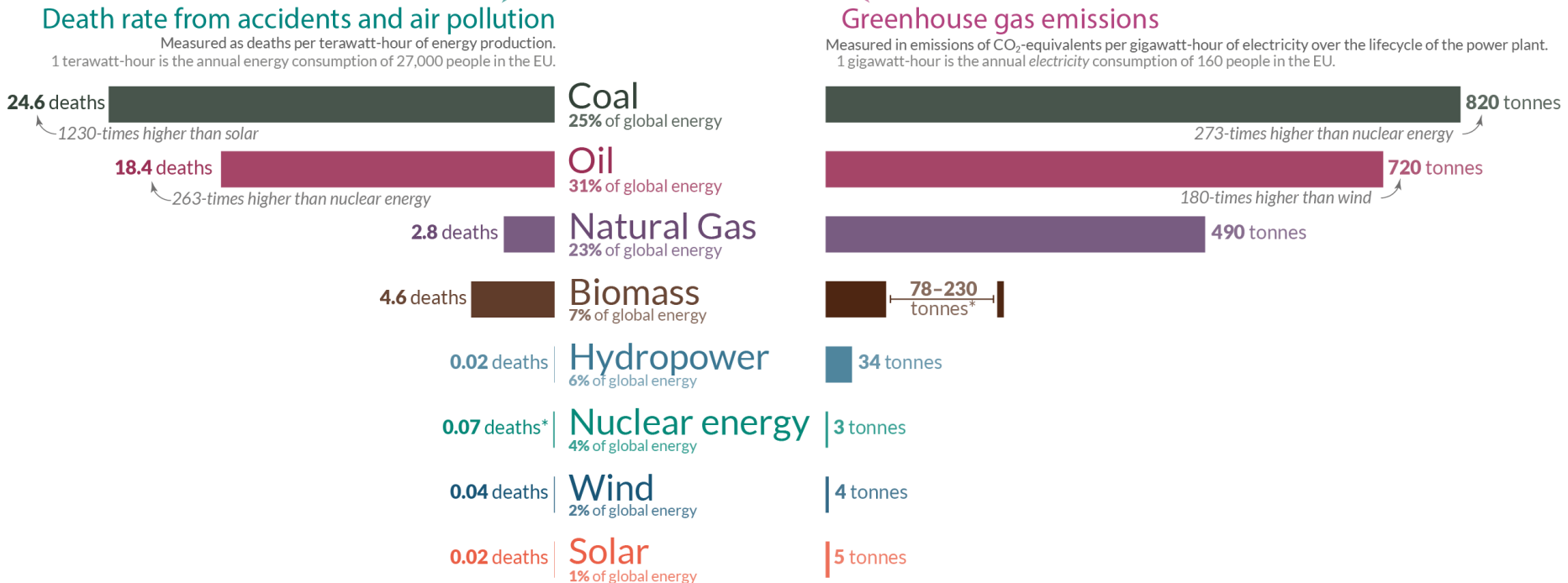
Type	Pris [øre/kWh] (Diskonteringsats = 3%)	Pris [øre/kWh] (Diskonteringsats = 7%)
Kernekraft	29,5	46,6
Off-shore vind	44,6	59,0
On-shore vind	28,9	36,1
Store solcelle-parker	36,1	45,9

- $LCOE = \frac{\text{Alle etablerings- og driftsomkostninger (inkl. CO}_2\text{-skat) i hele levetiden}}{\text{Elektricitetsproduktion over hele levetiden}}$
- Misvisende når vejrenergi fylder meget, da IEA ikke tager backup med i beregningerne. IEA (2020), Projected Costs of Generating Electricity 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

# Kernkraft er farlig

Our World  
in Data

## What are the **safest** and **cleanest** sources of energy?



\*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop residues vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.

\*The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).

Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.

Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*;

Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

# Tjernobyl vs. Banqiao-dæmningen

Tjernobyl (1986)	Banqiao-dæmningen (1975)
<b>68.000</b> blev evakueret	Mere end <b>10 millioner</b> blev evakueret
Ca. <b>300</b> km <sup>2</sup> land blev evakueret	<b>12.000</b> km <sup>2</sup> land blev evakueret
54 mennesker døde i ulykken på kort sigt. Det allermest pessimistiske estimat for ulykken er lavet af WHO, som estimerede <b>4000</b> døde i en periode på 60 år.	Et ukendt antal døde, estimeret til at være mellem <b>26.000</b> og <b>240.000</b>

- Tjernobyl er lige så irrelevant for kernekraft i Danmark, som Banqiao er irrelevant for vandkraft i Norge.

# Affald i en coladåse



Hvis Danmark i hele Rasmus' levetid fik 50 % af sin el fra kernekraftværker, ville Rasmus' andel af affaldet kunne være i coladåsen.

# Affald

- Det højradioktive affald til deponering eller lagring fra et mellemstort kernekraftværk udgør få ton/år, altså af størrelsesorden  $1 \text{ m}^3/\text{år}$ .
- Produktion af 12 TWh (ca. 1/3 af DK's elforbrug) danner 1,6 ton fissionsprodukter plus ca. 0,5 ton transuraner.
- Hertil kommer en vis mængde mellem- og lav-radiokativt affald, som kræver kortere tids opbevaring.
- På billedet ses en hal i Schweiz, hvor alt høj-radiokativt affald fra 40 års drift af kernekraftværker i Schweiz er gemt.



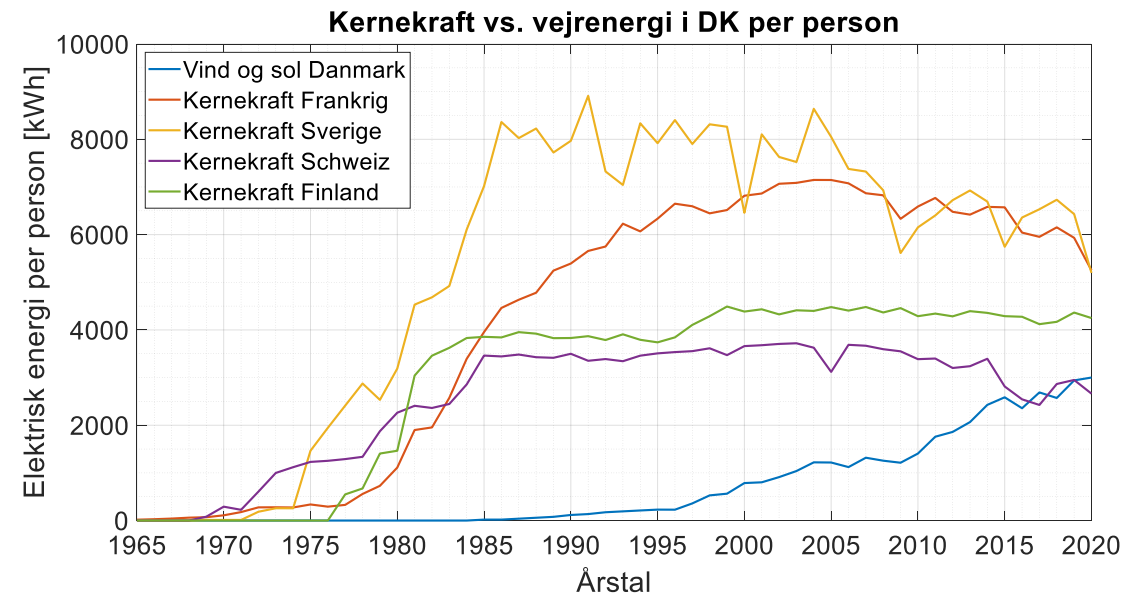
# Dobbelte standarder

- Hvad med vind og sol?



# Det tager lang tid at bygge?

- Historisk har det taget 6-7 år at bygge.
- Modstanderne “cherry-pick’er” dårlige eksempler.
- Hvis der skal “cherry-pick’es”, så bliver det Barakah kernekraftværk i De Forenede Arabiske Emirater. Bygget på 8 år.
- Pris: Det halve af energierne. Vil kunne levere hele Danmarks nuværende strømforbrug.
- Forventet levetid 80 år vs. energiernes 30 år.
- Reaktorerne på Barsebäck bygget på 4½ år.





# Der er kun uran til 30 år?

- Der har altid kun været ressourcer til 30 år.
- Der er masser af uran i havet.
- Der er masser af thorium.
- Breeder-reaktorer producerer selv spalteligt materiale.
- Nogle mener (måske overdrevet), at der med kommende kernekraft-reaktorer, der udnytter al energi, er uran nok til hele Universets levetid.

# Konklusion

- Kernekraft er næsten CO<sub>2</sub>-fri.
- Kernekraft leverer 24/7.
- Kernekraft er samlet set den billigste løsning.
- Kernekraft er sikker.
- Der er rigelige forsyninger af brændstof, og man kan nemt lagre til flere år (ingen afhængighed af en ustabil verden).
- Hvis politikerne indtager en teknologi-neutral tilgang, så vil kernekraft sandsynligvis ende som det bedste valg.
- Danmark er ikke foregangsland. Det går langsomt og andre lande har ikke areal nok til at kopiere Danmark.

# Vil du vide mere?

- [www.reo.dk](http://www.reo.dk)
- <https://world-nuclear.org/>
- <https://www.nuclear-power.com>
- Samfundstanker CEPOS med Rasmus Toft-Petersen. Ingen global grøn omstilling uden kernekraft:  
<https://www.dk4.dk/item/7179/samfundstanker-gaest-rasmus-toft-petersen>
- C. Petresch, B. Lohmann Andersen, E. Andersen, Vort strålingsmiljø. Fysikforlaget.

# Kernekraft

Tak for jeres opmærksomhed



Hemingway Club, Hørsholm-Rungsted  
Tirsdag d. 11. oktober 2022

Erik Both  
erik@both.dk