

Det finske Olkiluoto-atomkraftværk består af tre reaktorer, hvor den nye reaktor 3 alene har en effekt på hele 1.600 MW. Den har dermed den største effekt for en enkelt reaktor i Europa. Foto: Shutterstock.



Atomkraft på dagsordenen igen: **FRA FORBUD TIL KLIMADEBAT**

Atomkraft har i årtier været fortællingen om ulykker med nedsmeltede reaktorer, radioaktivt udslip og uanbringeligt atomaffald. Trods en historisk stærk modstand mod kernekraft i Danmark, rører debatten på sig igen, og det er relevant i en tid med klimakrise og et næsten umætteligt behov for energi, siger Hans Fynbo, professor i kernefysik ved Aarhus Universitet.

Forfatteren
Henriette Stevnhøj,
journalist, Aarhus
Universitet



Om forskeren

Hans Fynbo er professor i kernefysik ved Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet.

Han arbejder primært med grundforskning om atomkerner og kerneastrofysik og har siden 2023 undervist i reaktorfysik.

fynbo@phys.au.dk

Faktaboksene er udarbejdet af Aktuel Naturvidenskab.

Få emner indenfor energiforsyning har vakt så stærke følelser som atomkraft eller kernekraft, som er den mere teknisk korrekte betegnelse, fordi energien netop kommer fra spaltning af atomets kerne (fission). Mange danskere kender formentlig det gule logo med den smilende sol og teksten "Atomkraft? Nej tak" – et symbol, der i 1970'erne og 1980'erne blev ikonisk for modstanden mod atomkraft i Danmark.

Modstanden førte til, at et flertal i Folketing i 1985 stemte nej til atomkraft som en del af fremtidens energiforsyning. Beslutningen gjorde Danmark til et af de få lande i Euro-

pa, som aktivt fravalgte atomkraft. Modstanden byggede blandt andet på en stærk antiatomkraft-bevægelse (Organisationen til Oplysning om Atomkraft, OOA), som havde skabt stor skepsis i befolkningen. Ulykker som Three Mile Island forstærkede modstanden og frygten for udslip af radioaktive stoffer.

Det spillede også ind, at der ikke fandtes, hvad der blev anset for en tilfredsstillende løsning på, hvad man skulle stille op med radioaktivt affald. Det blev set som uacceptabelt at efterlade affald, som kunne være farligt i tusindvis af år – de planer, der var for deponering af det brugte brændsel, blev af nogle betragtet som usikre.

I stedet satsede Danmark i første omgang på fossil gas og nye kul-kraftvarmeværker med Avedøreværket (1990), Fynsværket (1991), Esbjergværket (1992) og Nordjyllandsværket (1998), hvoraf det sidste stadig er i brug. Samtidigt udvikledes vedvarende energi som vind- og solkraft i kombination med biomasse og energibesparelse.

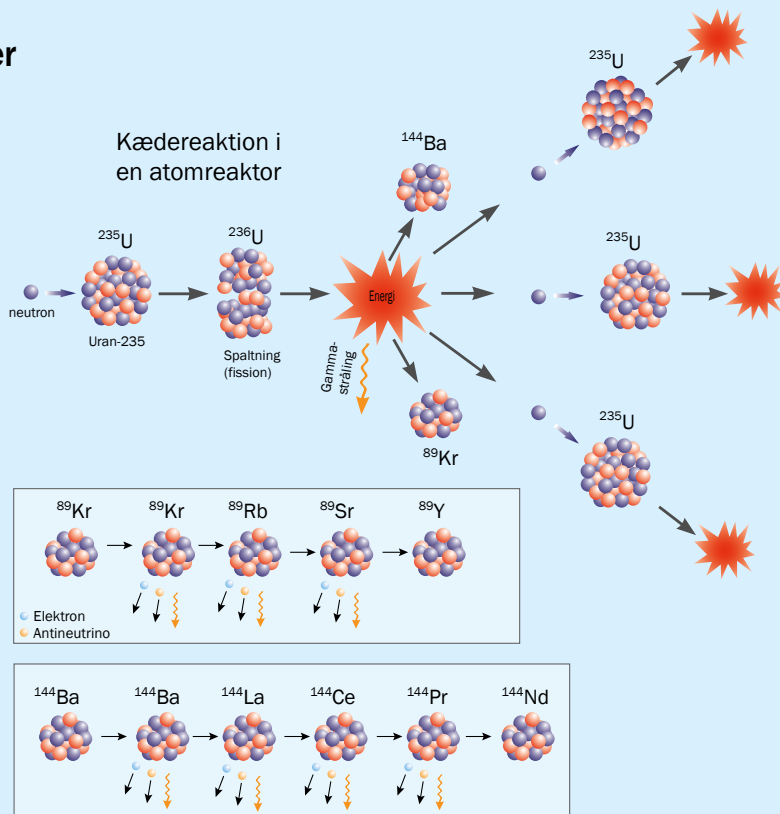
Det har blandt andet banet vejen for Danmarks vindmølleindustri, men har omvendt ledt til en stor afhængighed af i første omgang kul og sidenhen biomasse og kun en ret beskeden reduktion af vores CO₂-udledning, når biomassen regnes med.

Kernespaltning og kædereaktioner

Kravet til brændslet i en atomreaktor, er, at atomkernerne i brændslet skal kunne spaltes, når de optager en neutron – sådanne atomkerner kalder man fissible. Den naturlige isotop uran-235 udmærker sig ved at kunne netop det. Det kan den langt mere almindelige isotop uran-238 (som udgør over 99 % af naturligt forekommende uran) derimod ikke umiddelbart. Men når uran-238 har optaget en neutron, henfalder den efter kort tid ved udsendelse af en elektron (betapartikel) til neptunium-239 og derefter ved endnu et henfald til plutonium-239. Og plutonium-239 er fissibel. I lighed hermed kan isotopen thorium-232 optage en neutron og derefter henfalde til den fissible isotop uran-232. Isotoperne uran-238 og thorium-232, der kan "forædles" til brugbart brændsel, kalder man fertile. Denne forædling foregår typisk i en såkaldt formeringsreaktor, men i princippet kan de laves i enhver reaktor.

Figuren viser en kædereaktion i en reaktor, hvor uran-235 optager en neutron og derefter spaltes til krypton og barium (det kan også være andre isotoper, der dannes ved spaltningen). Samtidig frigives tre neutroner, der efterfølgende kan optages af nye uran-235-kerner, som dermed spaltes osv.

Nedenunder er vist, hvordan spaltningsprodukterne krypton og barium efterfølgende kan henfalde til andre isotoper ved udsendelse af en elektron (betahenfald), antineutrino og gammastråling – i nævnte rækkefølge, men indenfor så ultrakort tid, at der i praksis er tale om samtidige hændelser. Selvom disse spaltningsprodukter også er radioaktive, er det ikke



dem, der udgør den største udfordring ved opbevaring af atomaffaldet, da deres halveringstid typisk er relativt kort (i størrelsesordenen få hundrede år). Det er derimod den "ubrugte" del af uranbrændslet – eller tunge isotoper som plutonium-239, der også dannes i kerneprocesserne, som er det største problem, da halveringstiden af disse er flere tusinde år. Faktisk er der meget energi gemt i disse tunge grundstoffer, og der arbejdes derfor på at udvikle reaktorer, der kan udvinde denne energi i stedet for at deponere elementerne i slutlagre.

Atomkraft igen på dagsordenen

Den seneste tid er debatten om atomkraft blevet vakt til live igen. For eksempel har Liberal Alliance for nylig fremlagt et udspil, som handler om at gøre op med forbuddet og indføre atomkraft i Danmark.

Hans Fynbo, professor i kernefysik ved Aarhus Universitet, fornemmer, at debatten stadig er en varm kartoffel, men også, at interessen for regulær viden om atomkraft er vokset. Det mærker han ikke kun hos de studerende, han har undervist i emnet de seneste tre år, men også ude blandt folk, når han holder foredrag i erhvervsklubber og på Folkeuniversitetet.

»Efter Ruslands invasion i Ukraine blev forsyningssikkerhed pludselig meget konkret, og energi er ikke længere bare et spørgsmål om miljøhensyn og klima. En del unge tager også afstand fra den ældre generations modstand, fordi de ikke har tillid til, at sol og vind kan stå alene som løsning på klimakrisen. Det har givet et fornyet syn på atomkraft som en mulig energikilde«, siger Hans Fynbo.

Det 40 år gamle forbud mod atomkraft i Danmark har dog sat sine spor, mener Hans Fynbo.

»Set fra et forskningsperspektiv står vi mere eller mindre på bar bund, hvis forbuddet om atomkraft i Dan-

mark bliver ophævet. Forskningsområdet har ligget på vågeblus i årtier, og det er ikke bare ærgerligt, men også en problematisk position«, mener Hans Fynbo.

En kædereaktion i en reaktor

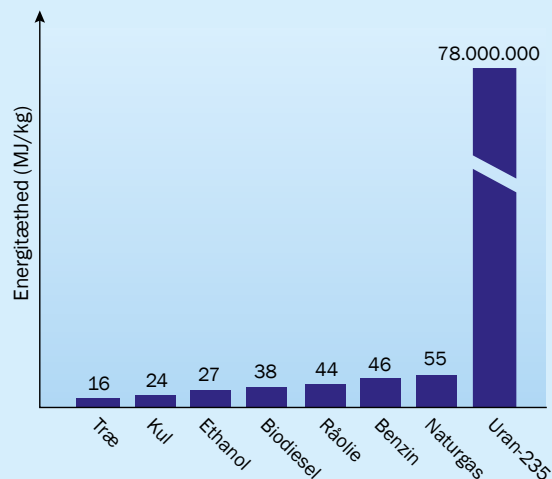
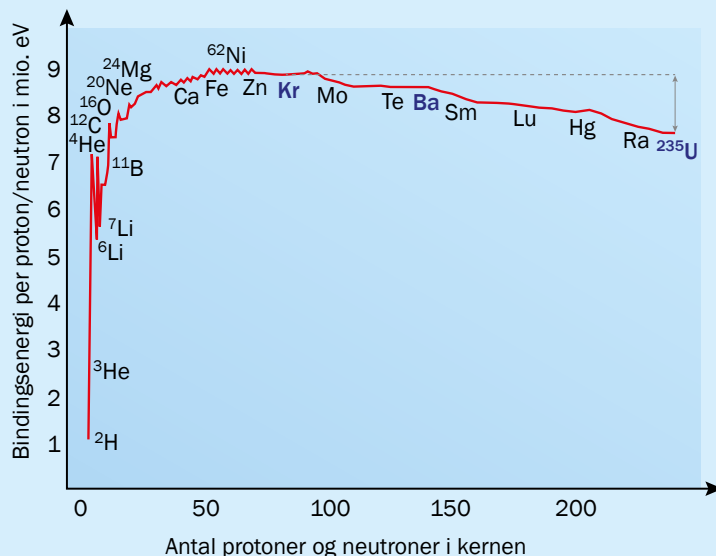
Før debatten kan forstås, må vi først en tur ned i selve reaktorkernen for at se, hvordan energien overhovedet bliver skabt. Grundlæggende er atomkraft at frigive energi, der kommer ved at spalte store atomkerner. I et atomkraftværk bruges et tungt grundstof som uran som brændsel. Når en urankerne spaltes, frigøres der en stor mængde energi i form af varme. Samtidig dannes nye neutroner, som kan ramme andre ker-

Energi i atomkerner

At atomkraft er en så potent energikilde, hænger sammen med, at kræfterne i atomkerner er langt stærkere end kræfterne mellem atomer. Derfor kan kerneprocesser producere meget større energimængder end kemiske processer, hvor atomer og molekyler reagerer med hinanden. I fysikken og kemien beskriver den såkaldte Q-værdi den energi, som frigives i en reaktion – eller som kræves, for at den kan foregå (en positiv Q-værdi betyder, at der frigøres energi i processen). Q-værdien for en kernereaktion beregnes ud fra forskellen mellem massen af atomkerner og partikler i starttilstanden og i slutttilstanden. Denne masseforskel kan omregnes til energi ved hjælp af Einsteins formel $E=mc^2$, som netop viser, at masse og energi er ækvivalente størrelser.

Figuren viser bindingsenergien per proton/neutron (målt i millioner elektronvolt, eV) for en række forskellige isotoper i forhold til det samlede antal protoner/neutroner i kernen (den samlede bindingsenergi for isotopen kan altså findes ved at gange tallet på y-aksen med det samlede antal protoner/neutroner i kernen). Når uran-235 spaltes til for eksempel barium og krypton, har de sidstnævnte en højere bindingsenergi per partikel – forskellen er cirka en million elektronvolt per proton/neutron. Denne energiforskel frigives ved spaltningen, hvilket betyder at der samlet frigives cirka 200 millioner elektronvolt ved spaltning af en enkelt uran-235-kerne. Hvis man regner det om til enheden joule, vi normalt bruger om energi, svarer det til 3×10^{-11} joule per spaltet uran-235-kerne, da 1 elektronvolt er lig med $1,6 \times 10^{-19}$ joule. Det betyder, at 1 kg rent uran-235 kan producere 78 millioner megajoule energi. Energitætheden i uran er altså helt enormt stor sammenlignet med konventionelle brændsler (se figur).

Bemærk i øvrigt, at hvis man ser på den modsatte ende af kurven, fremgår det, at man i stedet for at spalte



atomer kan frigøre en masse energi ved at fusionere to lette kerner til en tungere – for eksempel to tunge hydrogenerisotoper (deuterium) til helium.

ner og få dem til at spaltes – det kaldes en kædereaktion. Varmen fra spaltningen bruges til at opvarme vand, så der dannes damp. Dampen driver en turbine, der er koblet til en generator, som producerer elektricitet. Eller varmen alene kan bruges til for eksempel fjernvarme.

Brændslet i et atomkraftværk afhænger af typen af reaktor, men normalt er det uran, der er et tungt, naturligt metal, der findes i jordskorpen. Den naturlige isotop uran-235 kan bruges direkte, mens uran-238, som udgør over 99 % af naturligt forekommende uran, først

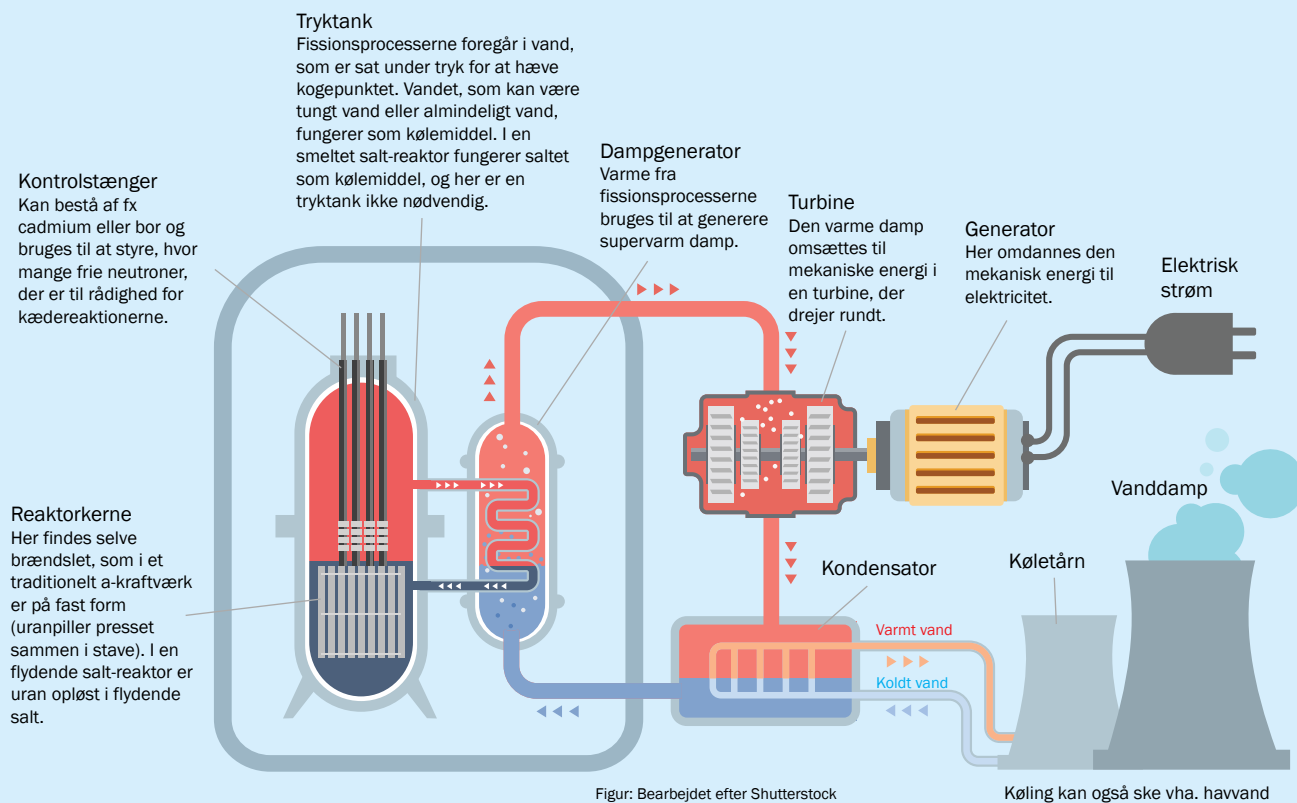
skal omdannes til plutonium-239 for at kunne spaltes i kædereaktioner (se boks).

I forhold til traditionelle kraftvarmeverker, der bruger kul, affald eller biomasse som brændsel, skal et atomkraftværk bruge en forsvindende lille mængde uran. I praksis svarer cirka 1 kilo uran til energien i cirka 2,5 millioner kilo træ.

De første kommercielle atomkraftværker blev bygget i 1950'erne. De oprindelige reaktordesigns er siden blevet udviklet, så man i dag taler om, at moderne reaktorer tilhører generation 3.

I dag er der på verdensplan 31 lande, der udnytter atomkraft til produktion af elektricitet, fordelt på cirka 440 reaktorer. Samlet bidrager det med cirka 9 procent af verdens elektricitetsproduktion. USA er klart det land i verden med flest atomkraftreaktorer i drift – 94 styk – mens Kina ligger nummer 2 med 57.

I Europa er Frankrig med 56 reaktorer det land med flest aktive atomreaktorer, som dækker cirka 70 procent af landets elektricitetsbehov. Herefter kommer Rusland med 36 reaktorer, Ukraine med 15 reaktorer og Storbritannien med ni.



Sådan virker et atomkraftværk

Et atomkraftværk er i princippet et dampkraftværk, hvor varmekilden er en kernereaktor. Processen består af fire hovedtrin: I reaktoren skaber kontrollerede fissionsprocesser en enorm mængde varmeenergi. Den overføres via et kølemiddel (for eksempel vand) til at producere damp. Dampen driver en turbine, som er forbundet til en generator, der omdanner den roterende bevægelse til elektrisk energi. Selvom princippet er det samme, findes der mange forskellige reaktortyper. Forskellene ligger i selve reaktorens design, som har betydning for værkets effektivitet, sikkerhed og brændselstype. De afgørende designvalg er: Kølemiddel og moderator. Hvilket stof bruges til at transportere

varmen væk fra kernen (kølemiddel) og til eventuelt at nedbremse neutronerne for at holde fissionen i gang (moderator). Ofte er det den samme ting, for eksempel almindeligt "let vand" eller "tungt vand". De fleste reaktorer i dag bruger langsomme (termiske) neutroner, som er blevet nedbremset (modereret). Fremtidens reaktorer kan i højere grad komme til at bruge hurtige neutroner, som ikke nedbremses. Her kan kølemidlet for eksempel være smeltet bly eller smeltet natrium. Hvad angår selve brændslet bruger langt de fleste reaktorer fast brændsel i form af stave, men der udvikles også typer med brændslet opløst i flydende salt.

Generation I

Tidlige prototype-reaktorer



Fermi-1, USA

Generation II

Kommercielle atomreaktorer



Cattenom, Frankrig

Generation III/III+

Evolutionære designs – avancerede letvands-reaktorer



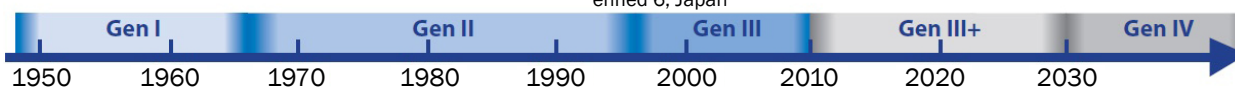
Kashiwazaki-Kariwa, enhed 6, Japan



Novovoronezh II, Rusland

Generation IV

Nye designs – fx små modulære reaktorer eller smeltet-salt-reaktorer



Overordnet inddeler man kernereaktorer i fire generationer, hvor de fleste aktive atomreaktorer i dag vil klassificeres som generation II, som i princippet har samme design som de første kommercielle kernereaktorer. Moderne kraftværker er generation III (eller III+), som er videreudviklinger af generation II-reaktorer med forbedret sikkerhed og effektivitet. Generation IV henviser derfor til fremtidens reaktorer, der endnu er under udvikling som smeltet-salt-reaktorer, og som først forventes at komme i kommerciel drift fra cirka 2030.



Foto: Shutterstock

Ulykker har sat sit præg på debatten om atomkraft og gør det stadig. Tjernobyl-ulykken skete den 26. april 1986 på Tjernobyl-atomkraftværk nær byen Pripjat i det daværende Sovjetunionen, nu Ukraine. En sikkerhedstest gik galt, og reaktoren overophedede, hvilket førte til en eksplosion og brand. Store mængder radioaktivt stof blev spredt, et ukendt antal mennesker døde eller blev syge, og tusinder måtte evakueres. Området omkring reaktoren er fortsat ubeboet, og ulykken førte til strengere sikkerhedsregler for atomkraft verden over. I baggrunden ses det halvrunde ståltag, som dækker den ødelagte reaktor 4 med den midlertidige sarkofag. Taget er 275 meter bredt, 108 meter højt og har kostet cirka 12 milliarder kr. at fremstille i 2016. Det skal forhindre yderligere udslip.

Foruden atomkraft til energiproduktion, findes der på verdensplan omkring 220 forskningsreaktorer, som udover forskningsformål også bruges til for eksempel produktion af medicinsk udstyr eller isotoper brugt i industrielle processer. Også i Danmark har vi været med på vognen, idet Risø Forskningscenter i perioden 1957-2001 drev tre forsøgsreaktorer, som siden blev nedlagt og afviklet. Selvom vi ikke har kernekraft i Danmark, findes der to virksomheder (Saltfoss og Copenhagen Atomics), som arbejder med udvikling af små smeltet-salt-reaktorer.

Lange udsigter til el fra a-kraft

Hans Fynbos motivation til at bringe viden om atomkraft ind i debatten om energiforsyning i Danmark er for at balancere diskussionen.

»Energipolitik handler om miljø, sikkerhed og økonomi, der skal afvejes. I den diskussion skal viden om

atomkraft som energiforsyning tages med ind. I takt med, at vi bliver stadig flere mennesker på jorden og klodens temperatur stiger, haster det med at finde driftssikre alternativer til fossil energi. I Frankrig og Sverige er det lykkedes at reducere brug af fossile brændsler, og forklaringen er mestendels atomkraft», siger Hans Fynbo.

Selv om forbuddet mod atomkraft blev ophævet i Danmark, vil det tage noget tid, før der løber strøm fra kernekraft i danske elledninger, vurderer han.

Det internationale atomenergiagentur (IAEA) har en køreplan for opbygningen af de nødvendige faglige og myndighedskompetencer. Hvis vi i Danmark i dag beslutter os for at indføre atomkraft, vil det tage 10-15 år, før vi kan få dansk atomkraftstrøm i ledningerne. Men selv om Danmark ikke står med egne reaktorer, får vi allerede i dag strøm fra atomkraft fra Sverige.

Myter har defineret manges holdning til a-kraft

Sikkerhed er altafgørende for tilliden til at tage atomkraft i brug. Værket skal være konstrueret til ikke at nedsmelte, som i teorien er risikoen, hvis brændslet overopheder og kølingen svigter. Der må ikke ske udsivning af radioaktivt materiale til omgivelserne. Desuden skal værket været passivt sikret. Det vil sige, at det skal kunne »klare sig selv» i et betydeligt stykke tid, hvis det rammes af for eksempel jordskælv, tsunami eller andre udefrakommende ulykker.

Netop spørgsmålet – eller tilliden – til sikkerheden er et tema, som fylder meget i debatten om atomkraft. Og her har misinformation fået lov til at sprede sig, siger Hans Fynbo.

»Myter om atomkraft er et studie i sig selv, og mange af dem er afsæt for den store mistro til energiformen. Manges frygt bundet i, at

atomkraft forekommer unaturligt, og det er svært at forstå, hvordan det fungerer. Det trigger angst, og så kommer modstanden,« siger Hans Fynbo.

Han fremhæver ulykkerne på værkerne Tjernobyl og Fukushima, som har inspireret til flere film og dokumentarer om atomkraft-ulykker. Det gælder eksempelvis Fukushima-ulykken, som fandt sted den 11. marts 2011 i Japan. Her forårsagede et kraftigt jordskælv og en efterfølgende tsunami, at voldsomme vandmængder strømmede ind over Fukushima Daiichi-atomkraftværket og ødelagde strømforsyningen og kølesystemerne til kraftværket. Flere reaktorer blev overophedede, og der opstod delvise nedsmeltninger af kernerne og eksplosioner i reaktorbygninger. Mere end 150.000 mennesker blev evakueret, og området omkring blev forurenet af radioaktivt materiale. I dag er der stadig omkring 20.000 mennesker, der ikke har kunnet vende tilbage til deres hjem.

Hans Fynbo mener ikke, at ulyk-

kerne på atomkraftværkerne skal bagatelliseres, men:

»Ulykkerne har historisk fået stor opmærksomhed og er ofte blevet fremstillet som særligt katastrofale. De er uden tvivl alvorlige, men de sker sjældent og deres konsekvenser er, set i forhold til naturkatastrofer som oversvømmelser, dæmningsbrud eller langvarig tørke, relativt begrænsede,« siger Hans Fynbo og tilføjer:

»10 år før ulykken på Tjernobyl-værket brast Banqiao-dæmningen i Kina, og et sted mellem 20.000 og 200.000 mennesker blev revet med af vandmasserne, og over 10 millioner blev hjemløse. De færreste associerer noget med ordet "Banqiao", mens alle kender "Tjernobyl".«

Alle teknologier bør overvejes

Han peger på, at der, efter hans opfattelse, gennem årene har været en tendens til at omtale ulykker på atomkraftværker som værre end andre ulykker eller katastrofer. Det hænger ufortjent ved, mener han.

»Sikkerheden på de værker, der bygges i dag, er meget højere end på gamle værker. Ingen vil bygge en Tjernobyl-reaktor i dag, og sammenligningen holder slet ikke. Det er misinformation at påstå andet. Atomkraft er en af de energiformer, som har kostet færrest menneskeliv gennem historien i forhold til den mængde energi, der er produceret,« siger Hans Fynbo.

»Om Danmark skal indføre atomkraft er et politisk spørgsmål. Min vurderinger er, at vi i en tid med klimakrise har brug for alle teknologier, der kan reducere udledningen af CO₂ og andre drivhusgasser. Derfor bør alle energiløsninger overvejes, når vi taler om grøn omstilling. Fra atomkraft til sol, vind og andre alternativer til fossile brændstoffer.

Mange tror, at vi i Danmark er langt med at reducere CO₂-udslippet, men regner man biomassen med, har vi siden 1990 kun reduceret udslippet med 18 procent. Kun 12 procent af vores energi kommer fra sol og vind (2022- tal).« ■

Videre læsning

<https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>

<https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=46703#:~:text=Når%20CO2%20fra%20afbrænding,et%20fald%20på%2018%20pct.>

<https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=49236>



Bliv studerende for en dag

Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt - og du bliver klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg **Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Medicinalkemi, Matematik, Matematik-økonomi** eller **Kunstig intelligens** på SDU i Odense.

Tilmeld dig på
sdu.dk/nat/studerendeforendag