



FFI Forsvarets
forskningsinstitutt

25/017

FFI-RAPPORT

Sikkerhetsaspekter ved kjernekraft i Norge

Halvor Kippe

Sikkerhetsaspekter ved kjernekraft i Norge

Halvor Kippe

Emneord

Kjernekraft
Kjernevåpen
Samfunnssikkerhet
Ikke-spredning
Uran

FFI-rapport

25/017

Prosjektnummer

1619
1709

Online ISSN

2704-2383

Engelsk tittel

Security aspects of nuclear power in Norway

Godkjenner

Stig Rune Sellevåg, *forskningsleder*
Anders Helgeland, *forskningsleder*
Janet Martha Blatny, *forskningsdirektør*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

Sammendrag

Debatten om Norge bør satse på kjernekraft pågår i perioden denne rapporten skrives. Debatten omfatter i liten grad spørsmål om samfunnssikkerhet, sårbarheter i krise og krig og prinsipielle, langsiktige ikke-spredningsaspekter forbundet med kjernekraft. Denne rapporten bidrar med en kunnskapssammenstilling for å bidra til en mer fullstendig debatt om kjernekraft i Norge. Rapporten utdyper spesielt fire aspekter:

- Det finnes historiske eksempler på preventive angrep og forsøk på sabotasje mot kjernefysiske anlegg – og ikke minst krigshandlinger ved kjernekraftverk i Ukraina. Disse forteller oss også om hva slags hendelser vi bør planlegge og dimensjonere beredskapen for dersom kjernekraft skal etableres i Norge.
- Det globale kjernekraftmarkedet er dominert av noen få, statlig styrte aktører, og både kjernekraft- og petroleumssektorene har vært gjenstand for ren maktpolitikk av store tilbyderstater. En eventuell etablering av kjernekraft i Norge bør derfor inkludere et langsiktig¹ blick på hvilke statlige aktører vi i så fall gjør oss avhengige av.
- Kjernekraftinfrastruktur må ses på som samfunnskritisk infrastruktur. Anleggene må underlegges sikkerhetsloven og objektsikringsinstruksen, og personell med fysisk tilgang bør sikkerhetsklareres. Både aktive anlegg og anlegg som er under dekommisjonering, men ikke friklasset ennå, bør underlegges fysisk sikring med tanke på både statlige og ikke-statlige trusler i fred, krise og krig.
- Uranbasert kjernekraftteknologi gir opphav til plutonium bundet i brukt brensel, og bruk av thorium gir opphav til våpenanvendelig uran-233. Den internasjonalt mest aktuelle sluttbehandlingsstrategien for brukt brensel er direkte deponering i geologiske deponier etter flere tiår med kjøling. Slike deponier vil utgjøre enorme, kunstige forekomster av plutonium i hundretusenvís av år. All planlegging bør derfor ta innover seg risikoen for at framtidige regimer eller ressurssterke aktører vil kunne grave opp deponert brensel, separere plutonium og bruke det i kjernevåpen.

¹ I utgangspunktet i et planlagt anleggs forventede levetid, som typisk er flere tiår. Dersom en legger opp til å motta tjenester for sluttbehandling (inkludert deponering) av brukt brensel, må også dette tidsperspektivet tas med i betraktningene.

Summary

Issues like societal security, crisis, and wartime vulnerabilities, as well as principled, long-term non-proliferation aspects associated with nuclear power are rarely mentioned in the Norwegian nuclear power discourse. The aim of this report is to provide an additional knowledge base to facilitate a conversation about nuclear power in Norway that includes these important aspects. The four most important points in this report are these:

- History has shown certain cases of preventive attacks and sabotage attempts on nuclear facilities, as well as warfighting at Ukrainian nuclear power plants. These incidents provide insights into what kind of events we should plan to prevent, in case nuclear power is established in Norway.
- Only a few, state-controlled providers dominate the global nuclear power market, and both the petroleum and the nuclear power sectors have seen instances of pure power politics from major provider states. The establishment of any nuclear power in Norway should include a long-term² view on any potential state actor dependencies.
- Nuclear power infrastructure must be considered critical to the society. The facilities must therefore be subject to the Security Act and the Object Security Act, and personnel with physical access should have security clearances. Active facilities, as well as facilities under decommissioning, should be subject to physical security measures adequate to deal with state and non-state threats in peace, crisis, and war.
- Uranium-based nuclear power technology gives rise to plutonium bound in spent nuclear fuel, and the use of thorium generates weapons-usable uranium-233. The globally most accepted strategy for handling spent nuclear fuel is to cool it for decades before depositing it in a geological repository. Such repositories will constitute huge, artificial deposits of plutonium for hundreds of thousands of years. The risk that future regimes or resourceful actors may succeed in digging up spent fuel and separate its plutonium for use in nuclear weapons should be included in all such planning.

² Initially for the expected lifespan of a planned facility, typically several decades. In case foreign actors are expected to contribute to the handling of spent nuclear fuel (with or without repositories), this should also be taken into account in the long-term planning.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	6
1 Innledning	7
2 Krigshandlinger mot kjernefysiske anlegg og folkerett	8
3 Historiske, preventive militærangrep mot atomanlegg	13
4 Villedede, uønskede handlinger i fredstid	18
5 Langsiktige ikke-spredningsaspekter for dagens og morgendagens kjernekraftkonsepter	21
5.1 Slutthåndteringsalternativer for dagens kjernekraft	22
5.2 Nye utfordringer for mer innovative kjernekraftkonsepter	24
6 Forsyningssikkerhet og sårbarhet i verdikjeder i global kjernekraftindustri	28
7 Vurderinger og konklusjoner	32
Referanser	35

Forord

Denne rapporten er skrevet med utgangspunkt i forskningen utført av FFI innen kjernevåpenteknologi og atomsikkerhet. FFI har ekspertise innen militære anvendelser av atomteknologi og mulige uønskede handlinger utført av ikke-statlige aktører. Rapporten inkluderer ikke systematiske vitenskapelige undersøkelser spesifikt for denne rapporten, men vurderingene er basert på nevnte kunnskapsgrunnlag. Rapporten er ment som en kunnskapssammenstilling for å bidra til en mer fullstendig debatt om kjernekraft, ikke som et forsøk på å generere ny og original kunnskap.

Enkelte problemstillinger fortjener trolig en dypere utredning i et eventuelt oppfølgende arbeid. Den nasjonale kjernekraftdebatten bør inkludere vurderinger av sikkerhet og ikke-spredning i alle faser, og også svært langsiktige sluttbehandlingsstrategier. Ambisjonen er at denne rapporten skal bidra til det.

Kjeller, 7. april 2025
Halvor Kippe

1 Innledning

Klimakrisen har gitt kjernekraft nye tilhengere i Norge. Den offentlige debatten preges i vesentlig grad av argumenter knyttet til kjernekraftens åpenbare klimamessige fortrinn, og stabiliteten denne tilbyr i kontrast til andre klimavennlige, men væravhengige alternativer som vindkraft og solenergi. En forventet økning i det nasjonale kraftbehovet i framtiden gir også næring til disse diskusjonene. Tilhengere og motstandere snakker ofte om byggetider, kapitalkostnader, arealutnyttelse og forventet strømpris fra kjernekraft sammenliknet med andre energikilder.

Krigen i Ukraina har imidlertid gjort oss oppmerksomme på helt andre, og mer dramatiske, sider ved det å ha kjernekraftverk etablert på egen jord: Hva om det blir krig? Hva kan konsekvensene bli om en reaktor eller et lager for brukt brensel rammes av krigshandlinger? Hva skjer om de ansatte ved et kjernekraftverk må evakuere på kort varsel? Hva skjer om den eksterne strømtilførselen blir borte over flere dager? Hva skjer om ekstern vannforsyning blir avbrutt? Kan spaltbare eller andre radioaktive materialer komme i feil hender som følge av krigshandlinger og vekslende territoriell kontroll? Kan kjernekraftverk bli mål for andre typer angrep enn fysiske, for eksempel cyberoperasjoner? Visse kjernefysiske anlegg i andre land har allerede vist seg sårbare overfor cybertrusler [1]. Hvilke ekstra faremomenter vil altså en kjernekraftinfrastruktur føre til i en krigssituasjon på norsk jord?

Videre bør vi spørre oss om en eventuell norsk kjernekraftsatsing vil bli avhengig av teknologi, brensel eller andre innsatsfaktorer fra stater vi ikke har et sikkerhetssamarbeid med. Spesielt har Russland satset stort på å bli en global tilbyder av både petroleum og kjernekraft (både reaktorer og brensel). Det gir landet stor innflytelse overfor såkalte *klientstater* som kjøper dette fra dem. Russland har for lengst demonstrert sin vilje til å utnytte sin store markedsrett i begge sektorer [2-4].

I den offentlige debatten nevnes ofte ulike kjernekraftkonsepter som skal ha ulike fortrinn med tanke på for eksempel forventede byggekostnader (og dermed kapitalkostnader, altså kostnadene forbundet med langsiktig lånefinansiering), driftssikkerhet, og volum og levetid på brukt brensel eller avfall fra det. Det er viktig at aktuelle teknologiske konsepter utredes grundig også når det gjelder ikke-spredning og fysisk sikring i så lange tidsperspektiver som realitetene krever. Eksempelvis har den viktigste plutoniumisotopen³ for kjernevåpenanvendelser, plutonium-239, en halveringstid på over 24 000 år. Brukt brensel fra vanlige kjernekraftreaktorer i normal drift inneholder rundt én prosent plutonium, og det skiftes normalt ut 25 til 30 tonn brensel per år i en standard reaktor på 1 GW elektrisk effekt. Selv et moderat kjernekraftprogram vil derfor føre til tonnevis med plutonium bundet i brukt og svært radioaktivt brensel. Skulle en aktør i framtiden forsøke å separere ut dette plutoniumet, kan alt sammen brukes i kjernevåpen. Noen få kilo plutonium er nok til et kjernevåpen av

³ Isotoper er varianter av et grunnstoff, hvor antall nøytroner i kjernen er det som skiller dem. Tallet som angir dem i skrivemåten vi bruker i denne rapporten, er summen av antall protoner og nøytroner (samlebetegnelse nukleoner) i kjernen. For eksempel er det 94 protoner og 145 nøytroner i kjernen til et plutonium-239-atom.

implosjonstypen, avhengig av plutoniumkvaliteten og våpendesignen. Dette diskuteres nærmere i kapittel 3 og kapittel 5.

Kjernekraftverk må anses som samfunnskritisk infrastruktur. Dette er tydelig illustrert med Zaporizjzja kjernekraftverk i Ukraina. Kjernekraftverk og tilhørende infrastruktur i Norge vil derfor måtte regnes som skjermingsverdige objekter og infrastruktur under sikkerhetsloven (jf. § 7-1). Dette vil også utløse krav om sikkerhetsklarering av personell og fysisk sikring.

Denne rapporten utarbeides samtidig som et regjeringsutnevnt utvalg som skal vurdere nær sagt alle relevante sider knyttet til eventuell etablering av kjernekraft i Norge.⁴ Fokuset i denne rapporten er imidlertid snevrere og rettet mot sikkerhetsaspekter forbundet med villede handlinger (det som på engelsk kalles *security*, i motsetning til *safety*, som handler om aspekter knyttet til trygg drift). Rapporten tar dermed ikke for seg en helhetlig stilling til spørsmålet om kjernekraft i Norge, men vil belyse en del viktige og problematiske aspekter som bør tas med i vurderingen.

2 Krigshandlinger mot kjernefysiske anlegg og folkerett

I dette kapittelet skal vi se litt nærmere på hva konsekvensene kan bli dersom et kjernekraftverk angripes militært, spesielt med tanke på om kjølingen slås ut. Vi gir ingen detaljerte konsekvensutredninger, men vil trekke veksler på relevante og kjente eksempler.

Pålitelig kjøling krever pålitelig strømforsyning

Kjernekraftverk bruker en del av sin egen kraftproduksjon til å drive pumper til kjøling av både reaktorer og våte lagre (basseng) med brukt brensel. Brukt brensel står i årevis i slike bassenger før det er kaldt nok til å lagres i tørre lagre. Når et kraftverk må stenge ned egen kraftproduksjon, er det avhengig av å hente kraft fra det eksterne kraftnettet for å opprettholde kjølingen. Mister det tilgang til ekstern kraft, må det benytte nødstrøm fra dieselgeneratorer for å drive pumpene som kjøler både nedstengte reaktorer og bassengene med brukt brensel. Kjernekraftkatastrofen i Fukushima-Daiichi i Japan i 2011 demonstrerte hvor prekært det kan bli om kraftreaktorer og våte lagre for brukt brensel mister aktiv kjøling. Vi kommer tilbake til den hendelsen i kapittel 4. Selv om kjedereaksjonen av spaltninger i reaktorkjernen er stengt, vil restvarmen fra radioaktiviteten i spesielt fisjonsproduktene danne betydelig varme i lang tid framover. Nivået på restvarmen illustreres i tabell 2.1. Der ser vi at når en standard kjernekraftreaktor stenges ned, vil den typisk fortsatt avgi 6 – 7 prosent (avhengig av utbrenningsgraden) av den maksimale, termiske effekten i restvarme umiddelbart etter

⁴ Se <https://nettsteder.regjeringen.no/kjernekraftutvalget/>.

nedstengning. Tabellen viser også at det dannes flere megawatt varme i over ett år etterpå. Uten aktiv kjøling vil vannet i et basseng med brukt brensel fordampe, og brenselet vil etter hvert smelte. Da vil store mengder radioaktivitet kunne slippe ut til omgivelsene, avhengig av om reaktoren har en intakt inneslutning eller ikke. Brensel som står i reaktorkjernen, vil også etter hvert smelte om det ikke kjøles aktivt.

Tabell 2.1 Restvarme etter nedstengning av en kraftreaktor på 3000 MW termisk effekt, som normalt tilsvarende rundt 1000 MW elektrisk effekt i standard reaktortyper. Tilpasset fra [5].

Tid fra nedstengning	Restvarme som fraksjon av maksimal, termisk effekt	Restvarme (MW) i en typisk reaktor med 3000 MW termisk effekt
0	0,065	195
1 s	0,055	165
10 s	0,050	150
1 min	0,035	105
10 min	0,020	60
30 min	0,015	45
1 h	0,012	36
12 h	0,006	18
1 d	0,005	15
10 d	0,0025	7,5
30 d	0,0020	6,0
60 d	0,0015	4,5
1 y	0,0009	2,7

Norges internasjonale forpliktelser

Norge er bundet av «Konvensjonen for fysisk vern av nukleært materiale og nukleære anlegg» (1987) [6]. Det betyr blant annet at vi er forpliktet til å forhindre tyveri og sabotasje av spaltbare materialer i fredelig bruk, på lager eller i transport, og å forhindre sabotasje mot fredelige kjernefysiske anlegg. Dette er et statlig ansvar (inkludert for internasjonal transport). Det betyr at den norske stat er forpliktet til å stille klare krav til eventuelle foretak som ønsker å bygge kjernekraftverk i Norge, slik at kravene i konvensjonen etterleves. I praksis betyr dette at den ansvarlige for kraftverket ikke bare må påse at personellet beskyttes mot stråling (jf. «Konvensjonen for kjernefysisk tryggleik» [7]), men også etablere fysiske barrierer og en sikkerhetskultur som har som formål å forhindre at uvedkommende får tilgang til kjernefysiske anlegg og materialer. De konkrete sikringstiltakene må gjøres på bakgrunn av en vurdering av dimensjonerende trusler, som i praksis Politiets sikkerhetstjeneste (PST) har ansvar for å utarbeide.

Videre er Norge part i Genève-konvensjonene. «Tilleggsprotokoll til Genève-konvensjonene av 12-08-1949 hva angår beskyttelse av ofre for internasjonale væpnede konflikter (Protokoll I)» sier i Artikkel 56 «Beskyttelse av anlegg og installasjoner som innebærer katastrofefare» [8]:

1. Selv når disse gjenstander utgjør militære mål, skal ikke anlegg eller installasjoner som innebærer katastrofefare, nemlig demninger, diker og kjernekraftanlegg, gjøres til gjenstand for angrep, dersom et slikt angrep kan forårsake at kreftene som innebærer katastrofefare, frigjøres med etterfølgende alvorlige tap blant sivilbefolkningen. Andre militære mål som befinner seg ved eller i nærheten av slike anlegg eller installasjoner, skal ikke gjøres til gjenstand for angrep dersom et slikt angrep kan forårsake at kreftene som innebærer katastrofefare, frigjøres fra anleggene eller installasjonene med etterfølgende alvorlige tap blant sivilbefolkningen.

2. Den særlige beskyttelse mot angrep som bestemt i paragraf 1, skal opphøre:

- a) når det gjelder en demning eller et dike, bare dersom de brukes til annet enn sine normale funksjoner og på regelmessig og avgjørende måte til direkte støtte for militære operasjoner, og dersom et slikt angrep er den eneste praktisk mulige måte å bringe en slik støtte til opphør;
- b) når det gjelder et kjernekraftanlegg, bare dersom det leverer elektrisk kraft på regelmessig og avgjørende måte til direkte støtte for militære operasjoner, og dersom et slikt angrep er den eneste praktisk mulige måte å bringe slik støtte til opphør;
- c) når det gjelder andre militære mål som befinner seg på eller i nærheten av disse anlegg eller installasjoner, bare dersom de brukes på regelmessig og avgjørende måte til direkte støtte for militære operasjoner, og dersom et slikt angrep er den eneste praktisk mulige måte å bringe slik støtte til opphør.

3. I alle tilfeller skal sivilbefolkningen og de enkelte sivilpersoner fortsatt ha rett til all den beskyttelse som gis dem av folkeretten, herunder beskyttelsen gjennom forholdsregler som bestemt i Artikkel 57. Dersom beskyttelsen opphører og noen av de anlegg, installasjoner eller militære mål som er nevnt i paragraf 1, blir angrepet, skal alle praktisk mulige forholdsregler tas for å unngå frigjøring av de krefter som innebærer katastrofefare.

Forbeholdene i punkt 2 åpner dessverre for at en stridende part kan argumentere for militær nødvendighet av å angripe et kjernekraftverk. Imidlertid gjentas dette forbudet mot angrep mot kjernekraftverk uten slike forbehold i Tilleggsprotokoll II, Artikkel 15 «Beskyttelse av anlegg og installasjoner som innebærer katastrofefare» [9]:

Selv når disse gjenstander utgjør militære mål, skal ikke anlegg eller installasjoner som innebærer katastrofefare, nemlig demninger, diker og kjernekraftanlegg, gjøres til gjenstand for angrep dersom et slikt angrep kan forårsake at kreftene som innebærer katastrofefare, frigjøres med etterfølgende alvorlige tap blant sivilbefolkningen.

Det skulle dermed være klart at militære angrep mot et kjernekraftanlegg er i strid med Genève-konvensjonen. Allikevel vil det være klokt å ta høyde for at krigshandlinger kan ramme eventuelle kjernekraftinstallasjoner på norsk jord. Det bør tas med i betraktningen i eventuelle diskusjoner om lokalisering og fysisk sikring.

Krigen i Ukraina viser problemstillingen i praksis

Krigen i Ukraina understreker hvor viktig slike avgjørelser er. Der er kjernekraftverkene lengst unna grensa til Russland fortsatt i drift per vinteren 2025, mens de seks reaktorene i Zaporizjzja kjernekraftverk, som er okkupert av russiske styrker, er stengt ned. I august 2024 ble det rapportert om en brann i ett av kjøletårnene ved anlegget, som følge av militær aktivitet (begge parter skyldte på hverandre) [10].



*Figur 2.1 Zaporizjzja kjernekraftverk. (Fra Wikimedia Commons, lastet opp av brukeren Rehman. CC-BY-SA-3.0,2.5,2.0,1.0.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Kernkraftwerk_Saporisc_hschja_retouched-1.JPG&action=edit&redlink=1)*

I krigen i Ukraina har krigshandlinger blitt utført innenfor gjerdene til kjernekraftverkene i både Zaporizjzja og Tsjernobyl.⁵ Implementering av «Konvensjonen for fysisk vern av nukleært materiale og nukleære anlegg» og Genève-konvensjonene var til lite hjelp for å hindre dette, til tross for at både Russland og Ukraina er parter i disse. Krigshandlingene har forårsaket frykt for betydelige utslipp av radioaktivitet fra reaktorene selv og fra våte og tørre lagre av brukt brensel. Det har også vært frykt for liv og helse til arbeiderne ved disse anleggene. Høsten 2022

⁵ Det er ikke alltid klart hvilken eller hvilke av partene som står bak den enkelte handling.

ble det rapportert om granatangrep som traff blant annet tørrlageret for brukt brensel ved Zaporizjzja kjernekraftverk. Heldigvis førte det ikke til utslipp av radioaktivitet, selv om det ble skader på bygningen og kommunikasjonslinjene til overvåkingssystemet [11].

Andre angrep mot kraftinfrastruktur

I krigen i Ukraina har det vært gjentakende og massive russiske angrep mot kraftinfrastrukturen i store deler av landet, inkludert kjernekraftsektoren [12, 13]. Men det er ikke første gang et land i krig angriper kraftinfrastrukturen i et annet land. Blant annet angrep USA kraftforsyningsnettverket (men ikke kraftstasjonene) under krigen i Irak i 2003 [14]. Selv om missil- og bombeangrep ikke har vært rettet mot reaktorbygningene eller de våte lagrene for brukt brensel i Ukraina (som nevnt ble et tørt lager rammet av et granatangrep i 2022 i forbindelse med den russiske overtakelsen av anlegget), har bortfall av trafo-stasjoner og annen infrastruktur gjort det nødvendig å stenge en rekke kjernekraftreaktorer i flere perioder.

Det krever langt mindre av et nødstrømsystem å kjøle en aktiv reaktor enn en stengt reaktor, og moderne kjernekraftverk har heldigvis som regel en betydelig grad av redundans i nødstrømsystemer. For eksempel har kjernekraftverket i Zaporizjzja hele tre dieselgeneratorer per reaktor, selv om det bare trengs én til å gjøre dette. Normalt sett har kjernekraftverket også nok diesel til å kjøle én nedstengt reaktor og det tilhørende bassenget med brukt brensel i ti dager [11]. Behovet for kjøling er imidlertid langt mer langvarig, som tabell 2.1 illustrerer. Man er derfor avhengig av å gjenopprette ekstern kraft eller å etterforsyne med drivstoff til generatorene dersom reaktorene stenges over lengre tid. Disse utfordringene er spesifikke for kjernekraft.

Kraftverket i Zaporizjzja er det første og hittil eneste operative kjernekraftverket som har blitt utsatt for krigshandlinger. Kraftverket i Tsjernobyl har vært stengt for produksjon i over tjue år, men store mengder brukt brensel lagres fortsatt ved anlegget. Tidligere eksempler på militære angrep mot kjernereaktorer har funnet sted i Midtøsten, og disse har rammet enten forsøksreaktorer (operative eller under bygging, og gjerne forbundet med frykt for at de skal brukes til plutoniumproduksjon) eller kraftreaktorer under bygging. Heldigvis har ingen av angrepene til nå ført til radioaktive utslipp [15]. Vi skal kort beskrive disse tidligere angrepene i det neste kapittelet.

3 Historiske, preventive militærangrep mot atomanlegg

I en kjernereaktor er det fisjonsproduktene, altså stoffer som er fragmenter fra spaltede kjerner av spesielt uran og plutonium, som utgjør det største bidraget til radioaktiviteten. De viktigste fisjonsproduktene har halveringstider på noen år eller tiår.⁶ Disse dominerer den totale radioaktiviteten i brukt brensel i de første rundt hundre årene etter endt bestråling. Etter hvert som disse begynner å dø ut, vil radioaktiviteten fra aktinider⁷ stå for det største bidraget, altså metallene med atomnumre 89 til og med 102. Det er spesielt uran, plutonium, americium og neptunium som står for det største bidraget til radioaktiviteten over lengre tid.⁸ Derfor er det operative reaktorer, stengte reaktorer med brukt brensel stående i, reprosesseringsanlegg (se kapittel 5) og våte og tørre lagre for brukt brensel som utgjør den største bekymringen med tanke på utslipp etter et militært angrep.

Ubestrålt brensel utgjør en nærmest ubetydelig strålefare i forhold. Angrep mot brenselssyklusanlegg i «front end», altså fra uranmalm til ferskt, ubestrålt brensel, vil normalt ikke gi opphav til store utslipp av radioaktivitet. Riktignok kan det være snakk om tonnevis av materialer, men med lav spesifikk aktivitet (målt i becquerel per gram). Naturlig og lavanrikt uran (se faktaboksen nedenfor) utgjør ingen ekstern strålefare, men bør ikke innåndes eller svelges. Situasjonen blir en helt annen så snart man har benyttet brenselet i en reaktor.

Historisk sett har militære angrep mot kjernereaktorer eller andre atomanlegg gjerne skjedd i to ulike kontekster. Enten har det vært preventive angrep for å forsinke en antatt utvikling av kjernevåpen, eller som vi ser for tiden i krigen i Ukraina: for å ramme kraftproduksjon – og dermed blant annet våpenindustrien – hos en krigsmotstander (som diskutert i forrige kapittel). Vi skal i dette kapittelet se litt nærmere på kjente tilfeller av preventive angrep mot atomanlegg.

⁶ To av de viktigste fisjonsproduktene er strontium-90 og cesium-137, som har halveringstider på henholdsvis 29 og 30 år.

⁷ Også kalt *aktinoider*, *actinoider* og *actinider*.

⁸ Den tredje hovedkategorien av radioaktivitet fra kjernekraftverk er *aktiveringsprodukter*, som er stoffer som dannes når nøytroner fanges inn i stabile stoffer (*transmutasjon*) i reaktorstrukturen, kjølevann og annet. Disse utgjør generelt en langt mindre strålefare enn fisjonsprodukter og aktinider bundet i brukt brensel, men må deponeres trygt når et anlegg dekommisjoneres.

Anriket uran

I naturen er hele 99,3 prosent av alt uran av isotopen uran-238. Denne kan spaltes, men ikke av nøytroner av alle energier. Den kan dermed ikke alene opprettholde en kjedereaksjon av spaltninger i en kjernereaktor eller i et kjernevåpen. Men nesten alt av de resterende 0,7 prosent av uranet består av isotopen uran-235. Denne kan spaltes av nøytroner med alle energier, og utgjør derfor den virksomme isotopen i kjernereaktorer og i kjernevåpen. Andre isotoper vil også dannes og bidra til energiproduksjonen i en reaktor etter hvert, spesielt plutonium-239.

Nesten alle kjernereaktorer bruker *anriket uranbrensel*. Det er uranbrensel hvor andelen av uran-235 er økt, som regel i en blandning av mellom tre og fem prosent uran-235. Anriket brensel gir mer kompakte reaktorer med høyere energitetthet (energiproduksjon per volum) enn reaktorer med naturlig uranbrensel. De vanligste kraftreaktorene krever anriket brensel for å kunne gå kritisk (se faktaboksen om tungtvannsreaktorer på neste side).

Siden isotoper har de samme kjemiske egenskapene (de er samme grunnstoff), benyttes fysiske separasjonsteknikker (spesielt gassentrifugering) for å anrike uran. Restproduktet, som har mindre enn 0,7 prosent uran-235, kalles *utarmet uran*. Uran anriket til under 20 prosent uran-235 kalles *lavanriket uran*. Fra og med 20 prosent uran-235 kalles *høy-anriket uran*, hvor *våpenuran* ofte sies å være over 90 prosent uran-235. Det går imidlertid ingen skarp grense. Uranet i bomben brukt mot Hiroshima hadde i gjennomsnitt 80 prosent uran-235 (det var satt sammen av mange deler).

Tungtvannsfabrikken i Vemork

Man kan argumentere for at tungtvannsakksjonene på Vemork under andre verdenskrig var det første tilfellet av militære angrep mot et kjernefysisk anlegg. En tungtvannsfabrikk kan regnes som et sensitivt brenselssyklusanlegg. Tyskerne planla å benytte noen tonn tungtvann i reaktorer som kunne drives av naturlig uranbrensel, altså ikke anriket som i moderne kjernekraftreaktorer. Faktaboksen nedenfor forklarer hvorfor dette var relevant i et kjernevåpenprogram.

Tungtvannsfabrikken i Vemork ble altså ansett som vital for Tysklands kjernevåpenprosjekt. Den ble derfor angrepet både med bombefly og i den berømte kommandoaksjonen utført av norske spesialsoldater. Et slikt anlegg inneholder ikke uran eller andre radioaktive stoffer. Og tungtvann er kun skadelig for mennesker om det inntas i betydelige mengder. Relevansen i denne sammenhengen er derfor først og fremst at angrepene dannet en presedens for preventive militærangrep mot kjernefysiske flerbruksanlegg.

Om tungtvannsreaktorer og plutoniumproduksjon

Vanlig vann («lettvann») bremser (*modererer*) nøytroner fra kjernespaltninger (*fisjon*) svært effektivt. Når nøytroner er i termodynamisk likevekt⁹ med kjølemiddelet, sies de å være *termiske*.¹⁰ Termiske nøytroner har langt lettere for å utløse fisjon i urankjerner enn hurtige nøytroner (med typisk noen få MeV).¹¹ Nøytronene er hurtige når de kommer rett fra en fisjon. Utfordringen er at lettvann også absorberer nøytroner i betydelig grad. Denne absorpsjonen gjør at tapet av nøytroner blir for stort til at en reaktor kan gå kritisk, med mindre en benytter anriket uranbrensel (se faktaboksen i forrige kapittel).

Tungtvann er vann som inneholder hydrogenatomer med et nøytron i kjernen, altså tungt hydrogen eller *deuterium*. Tungtvann er derfor rundt elleve prosent tyngre enn vanlig vann. Bruker man tungtvann som kjølemiddel og moderator istedenfor lettvann, bruker nøytronene litt lengre reisevei for å termaliseres (altså bremses til termodynamisk likevekt), men de absorberes i langt mindre grad.¹² Da klarer man seg med naturlig (ikke anriket) uranbrensel, og slipper å bygge et anrikningsanlegg for formålet (eller kjøpe anrikningstjenester).

Med naturlig uranbrensel får en produsert langt mer plutonium enn i en reaktor med anriket brensel for en gitt termisk effekt. Årsaken er at plutoniumet dannes ved innfangning av nøytroner i uran-238, som det er langt mer av per atom av uran-235 i naturlig uran enn i anriket uran. Anriket brensel kan stå mye lengre enn naturlig uranbrensel i en reaktor før det må skiftes ut. Selv om konsentrasjonen av plutonium øker med utbrenningsgraden (hvor mye energi brenselet har produsert), reduseres samtidig kvaliteten på det (isotopsammensetningen). I moderne kjernevåpen regner vi med at det brukes mellom to og fem kilo plutonium per våpen, avhengig av designen.

Spesielt inneholder høyt utbrent, anriket brensel små mengder av plutonium-238 og vesentlig større av plutonium-240. De er de mest ugunstige av isotopene som dannes i relevante konsentrasjoner i uranbrensel. Isotopene har betydelig varmeutvikling¹³ og høy bakgrunn av spontane fisjonsnøytroner¹⁴ [16]. Varmen kan føre til deformasjoner i høyeksplosivene i et implosjonskjernevåpen. Og de spontane fisjonsnøytronene kan utløse kjedereaksjonen for tidlig og dermed redusere sprengkraften, såkalt *predetonasjon*. Disse forholdene gjør det vanskeligere å lage pålitelige kjernevåpen med full sprengkraft enn om en har *våpenplutonium* med typisk rundt 93 prosent plutonium-239. Men alle kvaliteter av plutonium kan brukes til å lage kjernevåpen [16]. Det inkluderer også plutonium fra brukt kjernekraftbrensel, som normalt sett har 50–70 prosent plutonium-239 [16, 17]. Det kaller vi gjerne *reaktorplutonium*.

⁹ Altså når nøytronenes bevegelsesenergi er omtrent som bevegelsesenergien til omgivelsene sine.

¹⁰ I tekniske termer betyr det at gjennomsnittsennergien er rundt 0,025 eV.

Bushehr-kraftverket i Iran

På midten av 1970-tallet begynte vesttysk kjernekraftindustri byggingen av et kjernekraftverk med to trykkvannsreaktorer med lavanriket uranbrensel i Bushehr i Iran, ved Den persiske gulf. Byggingen ble stanset etter den islamske revolusjon i landet i 1979. Under krigen mot Irak fra 1980 til 1988 bombet Irak de påbegynte reaktorene flere ganger. Heldigvis hadde ingen av dem fått brensel ennå, så det førte ikke til utslipp av radioaktivitet. Selv om disse reaktorene ikke ville vært ideelle til produksjon av våpenplutonium (se faktaboksen om tungtvann og plutoniumproduksjon i forrige delkapittel), var trolig den langsiktige bekymringen stor nok til at Irak valgte å angripe det uferdige anlegget. De to reaktorene ville nemlig samlet gitt opphav til rundt 400–600 kg reaktorplutonium (bundet i brukt brensel) per år dersom de hadde blitt ferdigstilt og drevet på en økonomisk hensiktsmessig måte. I prinsippet kunne så mye plutonium gi opphav til 40–120 kjernevåpen per år, avhengig av våpendesignen og utnyttelsesgraden av plutoniumet (en del går tapt i kjemiske prosesser).¹⁵ Det hadde dessuten krevd at Iran hadde bygd et reprosesseringsanlegg for å separere ut plutoniumet [18].

Arbeidet på den ene reaktoren ble gjenopptatt av russisk kjernekraftindustri på 1990-tallet. Da den endelig skulle motta den første ladningen med brensel høsten 2010, uttalte USAs tidligere sikkerhetsrådgiver og FN-utsending John Bolton til FOX News at Israel burde bombet reaktoren tidligere og at «... så snart staven er i reaktoren, vil et angrep risikere å spre radioaktivitet til lufta, og kanskje til vannet i Den persiske gulf». Uttalelsen illustrerer forskjellen i vurderinger når det gjelder å angripe en uferdig reaktor kontra en reaktor som er i drift [19].

Osirak- og Al-Kibar-reaktorene i Irak og Syria

Israel hadde trolig gode grunner til å avstå fra å angripe kjernekraftverket i Bushehr. De la imidlertid ikke slike bånd på seg ved to tidligere anledninger. Den såkalte *Begin-doktrinen* går ut på at Israel skal slå ned framvoksende atomtrusler før de materialiserer seg [20]. Doktrinen har gitt en rekke utslag gjennom historien, hvor langt fra alt er bekreftet fra israelsk hold. Blant annet har sentrale forskere knyttet til atomprogrammene i både Iran og Irak blitt drept i attentater. Og ved to anledninger har israelske kamppfly ødelagt en reaktor i land i regionen. I 1981 angrep de en reaktor utenfor Bagdad, populært kalt *Osirak* (dens egentlige navn var *Tammuz-1*), i frykt for at den franskbygde reaktoren (basert på den franske reaktoren *Osiris*) kunne sette Irak i stand til å produsere plutonium til kjernevåpen. Det var i forbindelse med denne operasjonen, kalt *Operasjon opera*, at Begin-doktrinen ble erklært [21].

¹¹ Typisk noen få MeV.

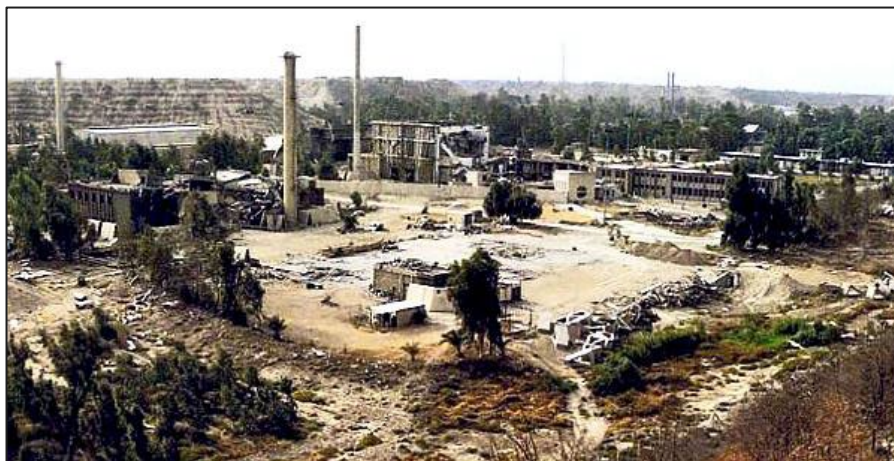
¹² En kan også bruke svært ren grafitt som moderator, men da må brenselet kjøles av en gass eller en væske. Tyskerne trodde ikke det var mulig å oppnå lav nok nøytronabsorpsjon i grafitt på den måten, så de satset alt på tungtvann.

¹³ Hele 560 W/kg for plutonium-238 og 6,8 W/kg for plutonium-240. Det meste av denne varmen kommer fra alfastråling.

¹⁴ Om lag 2600 nøytroner per gram per sekund for plutonium-238, som er fem størrelsesordener mer enn for plutonium-239, og rundt 910 nøytroner per gram per sekund for plutonium-240.

¹⁵ Som nevnt i faktaboksen i forrige delkapittel, ville disse våpnene trolig hatt en noe redusert, og mindre pålitelig sprengkraft enn moderne kjernevåpen med våpenplutonium.

Av tilsvarende grunn angrep israelske fly en reaktor i Deir ez-Zor-guvernmentet øst i Syria i 2007 (*Operasjon frukthage*). Den såkalte *Al-Kibar-reaktoren* ble bygd med nordkoreansk assistanse, og var av samme type som reaktoren Nord-Korea har brukt til å produsere plutonium til sine kjernevåpen (en gass-grafitt-reaktor basert på den britiske Calder-Hall-reaktoren i Sellafield) [22]. Begge disse reaktorene var antatt å være nær ved å få satt inn sin første ladning med brensel, men var altså ikke satt i drift da angrepene fant sted. Angrepene førte derfor ikke til noen vesentlig spredning av radioaktivitet.



Figur 3.1 Øverst: Restene av Osirak-reaktoren (Tammuz-1) etter flyangrepet i 1981 (Wikimedia Commons, lastet opp av brukeren Enemenemu, CC-BY-SA-4.0). Nederst: Al-Kibar-reaktoren i Syria før og etter den ble ødelagt av israelske kampfly i 2007 (U.S. Government, gjort tilgjengelig på Wikimedia Commons av brukeren Joshdboz, CC-PD-Mark).

Hva er overføringsverdien til norske forhold?

De ovennevnte angrepene ble utløst av en frykt for at en motstander skulle utvikle kjernevåpen. Det er i utgangspunktet ikke en relevant kontekst for en eventuell kjernekraftsatsning i Norge, så lenge dagens samfunnsform bevares og våre ikke-spredningsforpliktelser opprettholdes. Vi kan imidlertid ikke utelukke at en motstander vil kunne bruke en slik bekymring som et falskt påskudd for et angrep mot norsk kjernekraftinfrastruktur i forbindelse med en framtidig konflikt.

Krigen i Irak fra 2003 er et dystert eksempel på at feilaktig etterretning (bevisst eller ikke) knyttet til et påstått kjernevåpenprogram kan få katastrofale konsekvenser. Eventuell norsk kjernekraft vil ligge mange år fram i tid og vil forventes å ha lang levetid.¹⁶ Vi kan derfor ikke utelukke at sikkerhetssituasjonen på et tidspunkt vil kunne bli prekær og kanskje ikke helt ulik den Ukraina sto overfor, spesielt i 2022. Da var informasjonsbildet preget av desinformasjon og frykt for ulike russiske falskt-flagg-operasjoner [23, 24].

For å understreke eventuell bekymring for russiske angrep mot kjernefysiske installasjoner, ble det i slutten av 2024 lekket informasjon om at det i russisk militært planverk fra ti år tidligere forelå planer om å angripe ikke-militær infrastruktur i Japan og Sør-Korea, inkludert både flere kjernekraftverk og brenselssyklusanleggene i Tokai i Japan. Foruten noen nedlagte gass-grafittreaktorer er det både en brenselsfabrikk og et nedlagt reprosesseringsanlegg i Tokai med store mengder brukt brensel og atomavfall [25, 26].

4 Villede, uønskede handlinger i fredstid

Kjernekraftverk kan være fristende mål for terrorister som ønsker å spre frykt, eller aktivister som er villige til å gå drastisk til verks for å få oppmerksomhet rundt sin sak. Det vil imidlertid kreve både fysisk tilgang og detaljert kunnskap om det spesifikke anlegget, i tillegg til om kjernekraftteknologi generelt, for å forårsake en hendelse som fører til utslipp av radioaktivitet. Derfor er det i første rekke innsidertrusselen som har størst potensial til å føre til hendelser med store fysiske konsekvenser for personell og nærmiljøet.

Både selve reaktorene og samlokaliserte basseng for brukt brensel kan være aktuelle mål for en aksjon der hensikten er å oppnå utslipp av radioaktivitet. Begge disse krever aktiv kjøling, så sabotasje mot kjølepumper kan være spesielt kritisk. Moderne kjernekraftverk har som nevnt i kapittel 2 flere uavhengige reservesystemer for kraftforsyningen til pumpene. Skulle kjølingen bli slått ut lenge nok til å forårsake en nedsmelting av brensel, står man i verste fall overfor

¹⁶ Ofte planlegges moderne kjernekraftverk å ha levetider på 60 år med muligheter for forlengelse ved oppgraderinger.

utslippskonsekvenser sammenliknbare med dem som inntraff i Fukushima-Daiichi kjernekraftverk som følge av en tsunami i 2011. Der smeltet hele tre reaktorkjerner i den grad at det førte til store utslipp inne på anlegget og en god del til atmosfæren og i havet.

For at et slikt utslipp skal påføre forhøyede stråledoser til befolkningen i omkringliggende områder, må det normalt sett mer til enn bortfall av kjøling. Enten må det være snakk om en reaktor med grafitt i kjernen, slik som RBMK-reaktoren¹⁷ i Tsjernobyl i 1986, eller at radioaktiviteten spres med eksplosiver og/eller en vedvarende brann. Åtte RBMK-reaktorer i Russland og fem avanserte, gasskjølte reaktorer (*advanced gas-cooled reactor* – AGR) i Storbritannia er de eneste kraftreaktorene med grafitt i kjernen i drift per tidlig 2025 [27, 28].

Praktisk talt alle moderne kjernekraftverk har en ytre inneslutning som under normale omstendigheter forhindrer utslipp til omgivelsene. En hydrogeneksplosjon som i Fukushima-Daiichi vil imidlertid kunne bryte en slik inneslutning. Hydrogengass dannes når temperaturen i kjølevannet blir for høy, slik at vannet reagerer som en syre med zirkoniumlegeringen som brenselkapslingen gjerne består av. Det er derfor svært vesentlig med hydrogenbrennere i reaktorinneslutningen for å forhindre at knallgass (en blanding av hydrogen- og oksyngengass) akkumuleres i forbindelse med tap av kjøling. Tsjernobylulykken innebar på sin side en kraftig dampeksplasjon som følge av en ukontrollert effektøkning. Dampesplasjonen eksponerte den ødelagte reaktorkjernen. Reaktoren manglet en skikkelig ytre inneslutning. Brann i tonnevis med grafittblokker bidro til å løfte utslippene høyt nok til at enorme mengder radioaktivitet ble transportert i stratosfæren og førte til betydelig nedfall i store deler av Europa, ikke minst Norge.

Verken hendelsen i Fukushima-Daiichi eller i Tsjernobyl skyldtes villede handlinger. De fungerer allikevel som illustrasjoner av hvor omfattende utslipp en kan forvente dersom tilsvarende reaktorer utsettes for villede handlinger som fører til enten langvarig tap av kjøling (som i Fukushima-Daiichi) eller en dampeksplasjon i en grafittmoderert reaktor uten en skikkelig inneslutning (som i Tsjernobyl). De to nevnte katastrofene fikk store samfunnsmessige konsekvenser.¹⁸ Og den globale kjernekraftindustrien fikk en betydelig knekk etter begge hendelsene.

Kjente tilfeller der små grupper har angrepet kjernekraftverk

Heldigvis er det få dokumenterte hendelser med angrep mot kjernekraftverk med bruk av våpen eller eksplosiver. Ett tilfelle som skiller seg ut, skjedde i Sør-Afrika i 1982. Der utførte to personer fra en kommandogruppe i det sørafrikanske politiske partiet ANC et politisk motivert raid mot et kjernekraftverk i Koeberg utenfor Cape Town. Vel vitende om at de to reaktorene ennå ikke hadde fått satt inn sin første ladning med brensel, plasserte og detonerte de

¹⁷ «Reaktor bolsjoj mosjtsjnosti kanalnyj», som er grafittmodererte reaktorer kjølt av kokende vann.

¹⁸ Her forsøker vi ikke å sammenlikne hendelsene ved kjernekraftverket i Fukushima-Daiichi med de generelle konsekvensene av tsunamien som forårsaket hendelsene ved kjernekraftverket. Tusenvis av mennesker ble drept av tsunamien, og de materielle ødeleggelsene var enorme.

eksplosiver på lokkene til begge reaktortankene. Siden reaktorene ikke var i gang, førte det ikke til utslipp av radioaktivitet [29].

I 2016 utførte to brødre knyttet til ISIS et selvmordsbombeangrep mot flyplassen i Brussel. I etterkant kom det fram at de to hadde overvåket en ansatt ved kjernekraftverket i Tihange i Belgia. Myndighetene stengte derfor ned begge landets kjernekraftverk i Tihange og Doel til politiet fikk oversikt over situasjonen. Frykten for at noen på innsiden var forberedt på å bistå terrorister med tilgang til anleggene, førte til at personell ble sendt hjem og grundige undersøkelser ble gjennomført. Undersøkelsene avdekket blant annet at en tidligere ansatt ved kraftverket i Doel hadde vært ISIS-tilhenger. Vedkommende hadde imidlertid dødd i kamper for ISIS i Syria fire år før disse hendelsene [30].

Det er som nevnt altså innsidertrusselen som oftest nevnes som den mest alvorlige forbundet med mulig kjernefysisk terrorisme, sabotasje eller tyveri av spaltbare eller andre radioaktive materialer. Denne risikoen understreker betydningen av å kreve sikkerhetsklarering av personell ved slike anlegg. Krav om sikkerhetsklarering innebærer bakgrunnssjekker. Det er også åpenbart at eventuelle kjernekraftverk må omfattes av sikkerhetsloven og objektsikringsforskriften [31].

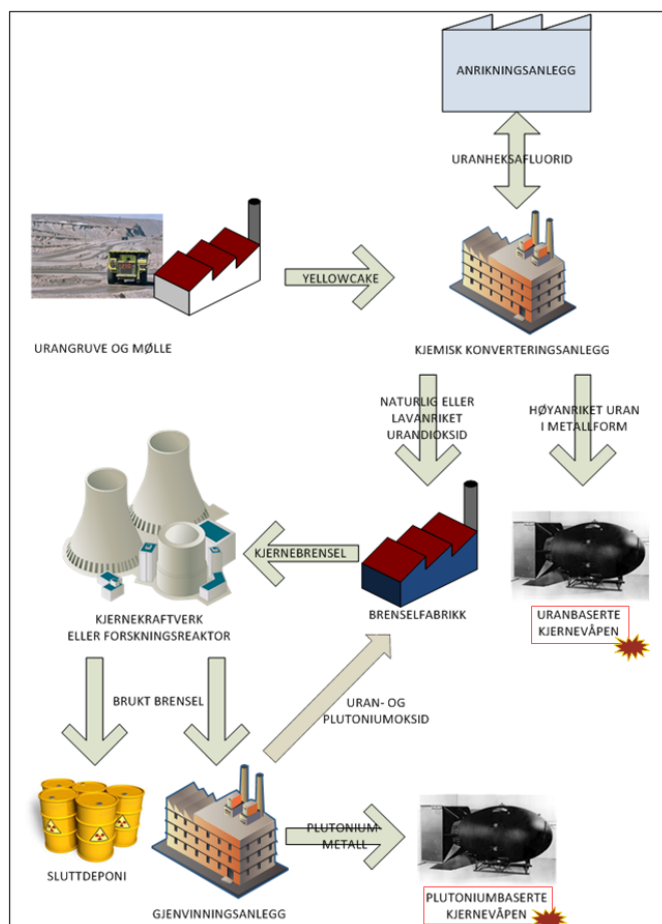
I 2012 oppdaget en bombehund små mengder eksplosiver på en lastebil innenfor gjerdet til Ringhals kjernekraftverk i Sverige. Selv om det ikke var detonatorer koblet til eksplosivene, og selv om lastebilen ikke var i nærheten av reaktorene eller lagrene med brukt brensel, vakte episoden stor oppsikt. Enkelte fryktet at det dreide seg om et forsøk på å teste den fysiske sikringen. I dette tilfellet ble eksplosivene oppdaget, men altså ikke før lastebilen var kommet innenfor det ytre gjerdet til anlegget [32].

Det finnes også andre eksempler på tilløp til voldsbruk, tvang eller forsøk på tyveri eller sabotasje ved kjernekraftanlegg globalt, men i det store bildet er dette svært sjeldne hendelser. Allikevel må man vektlegge slikt i trusselvurderinger og planverk knyttet til fysisk sikring og personellsikkerhet. Skadepotensialet kan nemlig være stort, og den psykososiale belastningen på befolkningen kan være vesentlig selv i tilfeller hvor ingen blir stråleskadd eller på annet vis direkte berørt av en hendelse.

Datasikkerhetstrusler er ikke tatt opp eksplisitt her, men det er også relevant for problematikken i dette kapittelet. I kapittel 6 vil vi komme inn på et kjent eksempel på et cyberangrep mot kjernefysisk infrastruktur (som heller ikke førte til dokumenterte stråleskader på personell). Eksempelene i dette kapittelet er langt fra utfyllende, men illustrerer hva slags hendelser en bør ta høyde for om kjernekraft etableres i Norge. Det skal altså mye til for at slike hendelser fører til store utslipp av radioaktivitet, men de spesielle karakteristikkene til kjernekraft kan allikevel gjøre slike anlegg til mål for aksjoner og situasjoner som kan føre til større frykt og uro i befolkningen enn for andre typer anlegg.

5 Langsiktige ikke-spredningsaspekter for dagens og morgendagens kjernekraftkonsepter

Alle vurderinger av eventuell etablering av kjernekraft på norsk jord bør inkludere betraktninger knyttet til hvilke langsiktige ikke-sprednings- og sikkerhetsutfordringer konkrete teknologivalg vil føre til i hele brenselssyklusen. Som nevnt innledningsvis dannes det betydelige mengder plutonium i vanlig kjernekraftbrensel. Deponering av brukt brensel kan dermed danne grunnlaget for en stor, kunstig forekomst av plutonium med en levetid på hundretusenvis av år. Dette kan i prinsippet hentes ut igjen og brukes i kjernevåpen, og innsatsen er lavere enn om man skulle produsere nytt. Vi skal i dette kapitlet se litt nærmere på disse utfordringene både med tradisjonell sluthåndtering (direkte deponering) og andre foreslåtte alternativer. Figur 5.1 illustrerer den kjernefysiske brenselssyklusen (sivil og militær), hvor blant annet ulike alternativer for sluthåndtering av bestrålt brensel er gjengitt.



Figur 5.1 Illustrasjon av den kjernefysiske brenselssyklusen slik den fungerer for standard kjernekraftteknologi. (Hentet fra en FFI-rapport om temaet [33].)

5.1 Slutthåndteringsalternativer for dagens kjernekraft

Dagens kjernekraftindustri benytter i realiteten en av to ulike strategier for slutthåndtering av brukt brensel: en åpen brenselssyklus eller en lukket brenselssyklus.

I en *åpen brenselssyklus* brukes brenselet én gang, og så deponeres det etter planen i geologiske deponier etter flere tiårs kjøling i våte og etter hvert tørre mellomagre. Ingen slike deponier er satt i drift i verden når denne rapporten utgis, men et finsk deponi (Figur 5.2) er nær ved å få driftskonsesjon [34].

I en *lukket brenselssyklus* blir brenselet repressert. Repressering innebærer en kjemisk separasjon av bestanddelene i det brukte brenselet. Figur 5.3 viser et britisk represseringsanlegg. Hensikten med repressering er både å sortere ut de ulike avfallsstoffene for individuell håndtering (i praksis å gjøre dem kjemisk stabile og egnet for deponering i tusenvis av år), og å gjenbruke spaltbare stoffer i nytt brensel. Av verdens rundt 400 000 tonn med brukt brensel er rundt 70 prosent mellomagret i påvente av deponering eller videre behandling. De resterende 30 prosent er repressert. Bestanddelene er enten gjenbrukt (se neste avsnitt) eller mellomagret i påvente av endelig deponering [35].

Repressering i dag

Plutonium og i noen grad uran gjenbrukes som brensel i standard kjernekraftreaktorer. Når oksider av disse to stoffene blandes og brukes i reaktorbrensel, kalles det *MOX-brensel* (*Mixed OXides*). Mesteparten av uranet i MOX-brensel er ferskt og ikke gjenbrukt. Uran fra repressering gjenbrukes i stedet oftere som urandioksidbrensel etter å ha blitt anriket på nytt for å kompensere for forbruket av uran-235 [35].

Som nevnt i kapittel 3 er det aktinidene som står for det største bidraget til radioaktiviteten i brukt brensel fra rundt hundre år etter endt bestråling (når fisjonsproduktene har begynt å dø ut). En mulig ekstra gevinst av repressering oppstår dermed om man lykkes i å redusere det endelige aktinideinnholdet per produsert energienhet sammenliknet med en åpen brenselssyklus, slik at tidsperspektivet for et geologisk deponi i prinsippet kan reduseres fra mange tusen år til i beste fall mange hundre år. Som vi skal komme tilbake til i neste delkapittel, krever det gjerne gjenvinning i flere omganger for å realisere dette fullt ut. Årsaken er at det alltid dannes betydelige mengder nye aktinider (spesielt ved nøytroninnfangninger i uran) når en reaktor kjører med gjenvunnet brensel. Per i dag er det imidlertid kun brensel gjenvunnet én gang som benyttes i kjernekraftverk [35].



Figur 5.2 Deponeringsbrønner i det geologiske deponiet i Onkalo i Finland.
(<https://www.posiva.fi/en/index.html>)



Figur 5.3 Reprosesseringsanlegget THORP i Sellafield i Storbritannia. (Av Raymond Knapman, CC BY-SA 2.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7938335>)

Reprosessering har også ulemper

Det er to hovedgrunner til at ikke alle kjernekraftland reprosesserer. Det ene er at det ikke er økonomisk lønnsomt. Eksempelvis estimerte en fransk studie fra år 2000 at MOX-brensel var hele fem ganger dyrere enn nytt urandioksidbrensel [17]. Dette varierer åpenbart med prisen på en rekke innsatsfaktorer, men gjennomgående har lav pris på uran og overskuddskapasitet på anrikningstjenester gjort det ulønnsomt å reprosessere.

Den andre grunnen er av mer normativ art. Reprosessering innebærer altså separasjon av plutonium, som er kjernevåpenanvendelig i alle isotopiske sammensetninger [16, 17]. Reprosessering regnes derfor som spredningssensitiv flerbruksteknologi på linje med urananrikning. Kjernefysiske tilbyderstater søker derfor å begrense utbredelsen av denne industriprosessen gjennom eksportrestriksjoner. I normalt utbrent brensel fra vanlige kjernekraftreaktorer er det rundt én prosent plutonium bundet i brenselet. Det er imidlertid ca. 0,75 prosent plutonium i gjennomsnitt i all verdens brukte kjernekraftbrensel [36, 37].¹⁹ Grovt sett kan vi dermed estimere at det finnes over to tusen tonn plutonium bundet i brukt kjernekraftbrensel per 2025. Det er nok til godt over to hundre tusen implosjonskjernevåpen med over ett kilotonn forventet sprengkraft (tilsvarende tusen tonn TNT), avhengig av utnyttelsesgraden og våpendesignen [16, 36]. Det aller meste av dette brenselet er imidlertid så radioaktivt at en aktør trenger betydelige materielle ressurser for å kunne hente ut og misbruke plutonium uten å utsette seg selv for akutt, dødelig strålefare. Slikt brensel regnes derfor som selvbeskyttende (som altså er en påstand med visse forbehold).

Det er åpenbart at enhver strategi et land måtte velge for å sluttbehandle brukt kjernekraftbrensel må ta høyde for at plutonium og andre aktinider kan falle i hendene på aktører som ønsker å utvikle kjernevåpen i framtiden. Plutonium-239 er den klart viktigste isotopen i denne sammenheng. Den har en halveringstid på hele 24 100 år. Det innebærer at sluttbehandlingsstrategier for brukt brensel må gjelde for flere hundretusen år framover, dersom man ikke lykkes i å omdanne eller spalte praktisk talt alle de våpenanvendelige aktinidene. Per 2025 ser de fleste kjernekraftstater i stedet ut til å planlegge direkte deponering av brensel etter én gangs bruk. Da unngår man voksende beholdninger av separert plutonium i vår levetid, men etterlater gigantiske forekomster av plutonium og andre aktinider i framtidige geologiske deponier. Disse kan være fristende for framtidige regimer eller ikke-statlige aktører med våpenambisjoner. Det er ikke opplagt hva slags styreform vi kommer til å ha i Norge gjennom et mange tusen års perspektiv, og om det er forsvarlig å etterlate et slikt deponi til alle som kommer etter oss.

5.2 Nye utfordringer for mer innovative kjernekraftkonsepter

Avfall og deponier

Diskusjoner om geologiske deponier dreier seg oftest om faren for utslipp av radioaktivitet til omgivelsene i deponiets forventede driftstid, snarere enn ikke-spredningsaspektene forbundet med deponeringen av våpenanvendelige aktinider, som vi diskuterte i delkapittel 5.1. Gjennom kjernekraftshistorien er flere alternative brenselssyklusstrategier både foreslått og forsøkt utviklet med det for øyet å redusere aktinideinnholdet i atomavfall, slik at deponier kan planlegges for mange hundre år og ikke mange hundretusen år.

De fleste foreslåtte såkalte *Generasjon IV-konseptene* legger opp til en lukket brenselssyklus, der aktinideinnholdet skal reduseres betraktelig ved bruk av hurtige reaktorer (altså reaktorer

¹⁹ Da har vi tatt høyde for reaktortyper som ikke tillater like høye spesifikke utbrenningsgrader som standard kok- og trykkvannsreaktorer med lavanriket urandioksid som brensel (vanligvis 40–50 termiske gigawatt-dager per tonn uran, GW_d/tU).

som ikke modererer nøytroner) [38]. Et hurtig nøytronspektrum er langt mer effektivt enn et termisk til å spalte aktinider som ellers ville endt opp som svært langlivet avfall, spesielt americium, neptunium og curium, i tillegg til en del høyere plutoniumisotoper. I flere konsepter er ambisjonen at en til og med kan «forbrenne» aktinider fra reprocessert brensel fra tidligere reaktortyper. Dermed vil man kunne redusere den historiske avfallsproblematikken og ikke bare framtidens. Denne gevinsten forutsetter imidlertid at man reprocesserer brenselet i flere omganger, siden det alltid dannes en del nye aktinider for hver syklus. For det mest modne konseptet, basert på kjøling med flytende natrium, må man dessuten skille plutonium fra de andre aktinidene. Årsaken er at brensel med en blanding av plutonium og aktinider med høyere atomnummer vil kunne gi ustabil drift i slike reaktorer, og i verste fall åpne for en løpsk kjedereaksjon som i Tsjernobyl-katastrofen [39].

Ved gjentatte runder med reprocessing med en tradisjonell såkalt *PUREX-prosess*²⁰ vil andre våpenanvendelige aktinider enn uran og plutonium akkumuleres på kjøpet, i første rekke americium, curium og neptunium. Disse har til nå ikke eksistert i høye nok konsentrasjoner til at de har utgjort noen reell statlig spredningsbekymring eller fare med tanke på terroristbruk til kjernevåpen. Men for hver gjenvinningssyklus vil konsentrasjonen av disse i brukt brensel øke, selv om man lykkes med en netto reduksjon i den totale aktinidebeholdningen for hver syklus. Etter hvert vil konsentrasjonen av disse nå nivåer som gjør at de må tas med i betraktningen. Det er mulig å skille ut disse aktinidene samlet, men de vil da være kun ett kjemisk prosessstrinn unna å skilles fra hverandre. Enkelte av disse stoffene har liknende utfordringer som reaktor-plutonium med tanke på våpenanvendelighet, spesifikt en høy bakgrunn av spontane fisjonsnøytroner og høy varmeutvikling fra radioaktivt henfall. Allikevel er de kritiske massene små nok til at det er uforsvarlig å se bort fra muligheten for at de kan misbrukes i kjernevåpen. Tabell 5.1 illustrerer disse egenskapene for de relevante aktinidene [39, 40].

Enkelte Generasjon IV-konsepter basert på flytende saltbrensel legger opp til en slags kontinuerlig rensing av fisjonsprodukter under drift ved bruk av avdamping og filtrering. Slik kan en noe høyere spesifikk utbrenningsgrad enn vanlig oppnås uten at spredningssensitive aktinider skilles ut underveis, og det åpner for en netto forbrenning av aktinider i visse tilfeller. Men for å oppnå tilsvarende gevinster for volum- og levetidsreduksjon som i konsepter med gjentatt bruk av tradisjonell reprocessing må også dette brenselet før eller siden reprocesseres i mer tradisjonell forstand for å fjerne de fisjonsproduktene som ikke lar seg filtrere eller dampe ut [41].

Små, modulære reaktorer

I den norske debatten fremmes ofte såkalte *små, modulære reaktorer* (SMR). Formålet med slike var i utgangspunktet å forsøke å redusere byggekostnadene ved å gjøre det mulig å prefabrikkere sentrale komponenter som for større reaktorer måtte bygges på stedet. Reduserte byggekostnader skulle gjøre det enklere å finansiere bygging av ny kjernekraft og forkorte tiden det ville ta å tjene inn kapitalkostnadene i strømmarkedet. Foruten å produsere kraft til det åpne markedet, nevnes av og til muligheten for å produsere hydrogen som energibærer og

²⁰ Industristandarden for å løse opp brukt uranbrensel og skille ut fisjonsprodukter og aktinider: <https://snl.no/PUREX>

strømproduksjon forbeholdt datasentre. Til nå er ingen slike konsepter kommersialisert, men én demonstrasjonsreaktor er i drift i Russland og én er under bygging i Kina. En rekke slike initiativer er basert på tradisjonell teknologi.

I Vesten er det trolig *NuScale* sitt lettvannsreaktorkonsept som har kommet lengst. Det regnes som Generasjon III+ og er det eneste SMR-konseptet som har fått godkjenning av tilsynsmyndighetene i USA per 2025. En rekke innovative løsninger blant annet i kategorien Generasjon IV er også lansert og under utvikling, inkludert flere med saltsmeltebrensel. Mange av konseptene i begge kategoriene mottar statlige subsidier, men gjennomgående viser det seg vanskeligere og vanskeligere å gjøre disse konkurransedyktige jo nærmere de kommer realisering. Også i denne sammenhengen er Russland en sentral aktør. De planlegger å eksportere Generasjon III+ trykkvannsreaktorer basert på teknologi brukt i reaktordrevne isbrytere i nordområdene. I 2024 signerte de en avtale om bygging av seks slike i Usbekistan [42-47].

Innovative konsepter er ennå ikke modne

Det er nokså gjennomgående for innovative kjernekraftkonsepter at det gjenstår vesentlig utviklingsarbeid knyttet til spesielt materialer i brensel og primærkjølekrets (ikke minst med tanke på korrosjonsproblematikk). I tilfeller som reaktorer med flytende saltbrensel (nevnt i forrige avsnitt), hvor brenselet skal renses kontinuerlig under drift, er nettopp denne prosessen et av de store uløste problemene. De fleste av disse foreslåtte konseptene innebærer helt andre brenselssammensetninger enn tradisjonelt urandioksid, spesielt med bruk av ulike fluoridsalter. Her er både uran og thorium²¹ aktuelle brenselmaterialer. Det gjør at en fortløpende reprosessering også må baseres på andre prosesser enn standard PUREX. Her har ingen demonstrert fullt fungerende løsninger. I de senere år er det derfor også foreslått enklere konsepter uten fortløpende reprosessering, der fokuset er å forbrenne aktinider framfor å formere nye for mest mulig effektiv energiproduksjon [48].

Det finnes talløse forslag til konsepter for innovative reaktor- og brenselssykluser med ulike teknologiske modenhetsnivåer. Flere av dem har forventede fortrinn når det gjelder avfalls- eller ikke-spredningsproblematikk, men i enkelte tilfeller går en fordel på ett område på bekostning av et annet (for eksempel redusert langsiktig spredningsrisiko for prisen av økt spredningsrisiko i driftsfasen). Mange av konseptene har røtter helt tilbake til 1950- og 1960-tallet, men er ennå ikke kommersialisert. Trolig vil det ta flere tiår før konsepter som virkelig gjør en forskjell for den globale sluttbehandlingspraksisen eventuelt blir fullt ut etablerte og konkurransedyktige. Lykkes industrien med dette, kan det redusere de svært langsiktige utfordringene med tanke på ikke-spredning og sikkerhet knyttet til geologiske deponier. Men da bør man sørge for at teknologivalg møtes med tilpassede regulatoriske krav knyttet til fysisk sikring og forsterket

²¹ Thorium-232 kan absorbere nøytroner og etter hvert danne uran-233. Denne uranisotopen er spaltbar, og den er omtrent like våpenanvendelig som plutonium-239. En utfordring for reaktordrift med thorium er at protactinium-233, med en halveringstid på 27 døgn, er et mellomtrinn i produksjon av uran-233 fra thorium-232. Denne isotopen absorberer nøytroner i betydelig grad, noe som driver ned reaktiviteten i en reaktor og gjør det vanskelig å klare seg uten andre, spaltbare stoffer i brenselet. Thorium kan imidlertid brukes i kombinasjon med tradisjonelt, lavanriktet uranbrensel i standard reaktortyper til tross for dette.

sikkerhetskontroll, slik at man ikke øker ikke-spredningsproblematikken i driftsfasen og før endelig deponering av avfallet. Inntil videre ser det ut til at mer evolusjonære konsepter²² er det som lar seg realisere og kommersialisere, hvilket innebærer de fundamentalt samme utfordringene knyttet til langlivet avfall som vi har sett til nå.

Tabell 5.1 Eksempler på kritiske masser for utvalgte aktinider som dannes i brukt brensel i en trykkvannsreaktor. Isotopsammensetningene er representative for høyt utbrent urandioksidbrensel. Massene gjelder tenkte metallkuler omgitt av vakuum. De er gitt i grå felt i tabellen, målt i kilogram og angitt ved tre ulike tider (hvite felt) etter at brenselet er tatt ut av en reaktor i drift. Våpenuran (her angitt som HEU og satt lik anrikningsgraden til uranet som ble brukt i Hiroshima-bomben) og våpenplutonium (angitt som WGPu, her definert som 95 prosent plutonium-239) er gjengitt til sammenlikning. Bakgrunnen av spontane fisjonsnøytroner listes også. Den er angitt som antall nøytroner per kilogram per sekund. Jo høyere denne er, jo mer krevende er det å forhindre en predetonasjon og dermed en redusert (men svært betydelig) sprengkraft i et implosjonskjernevåpen. Hentet og tilpasset fra [39].

	Kritisk masse (kg)			Bakgrunn av spontane fisjonsnøytroner (nøytroner per kilo per sekund)		
	Tid ute av reaktoren (år)			Tid ute av reaktoren (år)		
	1	10	50	1	10	50
Plutonium	14,7	14,8	15,1	$4,8 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^5$
Neptunium	65,1	65,1	65,1	0,1	0,1	0,1
Americium	184,2	113,6	94,6	865	1080	1150
Curium	22,2	20,4	17,8	$9,9 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$7,8 \cdot 10^9$
Americium og curium	83,7	87,1	88,2	$2,5 \cdot 10^9$	$7,8 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$
HEU (80 % U-235)	69,5	69,5	69,5	5,5	5,5	5,5
WGPu (95 % Pu-239, 5 % Pu-240)	10,3	10,3	10,3	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$

²² Her mener vi konsepter som bygger på en gradvis utvikling av etablerte teknologier, i første rekke trykk- og kokvannsreaktorer, i motsetning til innovative kjernekraftkonsepter (som for eksempel saltsmelteteknologi).

6 Forsyningssikkerhet og sårbarhet i verdikjeder i global kjernekraftindustri

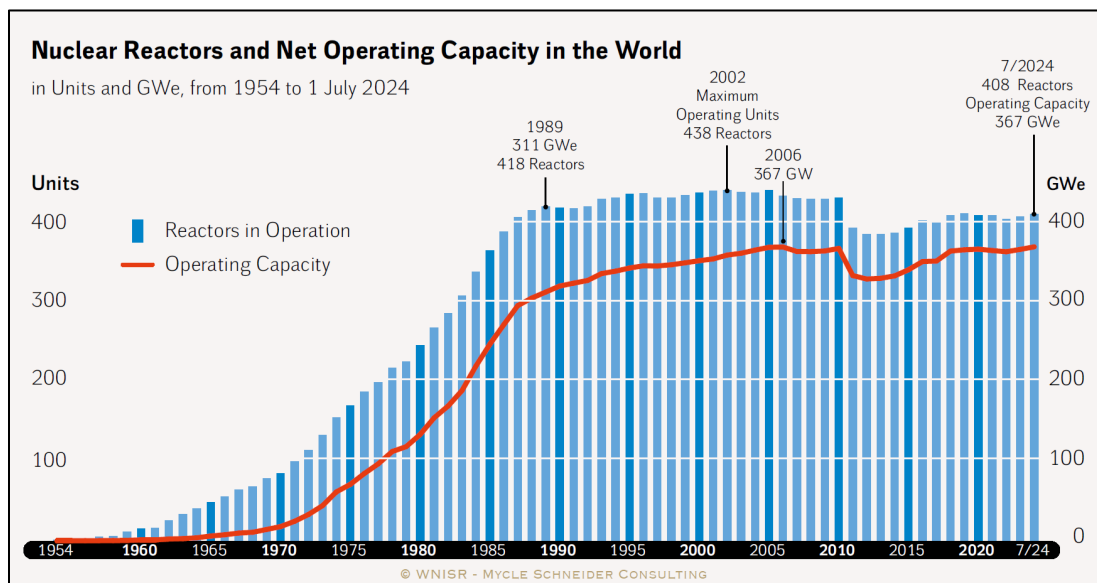
Totalt er det 59 kraftreaktorer under bygging i 13 land i verden per 2024. Fra slutten av 2019 til utgangen av 2024 var det utelukkende russiske og kinesiske, statlig styrte selskaper som begynte å bygge nye kjernekraftreaktorer i verden, totalt 35 stykker. Kina bygde på det tidspunktet alle sine 27 i sitt eget land, mens Russland bygde 20 av 26 reaktorer i sju andre land. Blant OECD-landene²³ var det kun Storbritannia (to reaktorer som bygges av franske EDF), Sør-Korea (to reaktorer) og Tyrkia (fire reaktorer som bygges av Russland) som hadde flere enn én kraftreaktor under bygging ved slutten av 2024 [43]. Tabell 6.1 viser hvor mange kraftreaktorer som var under bygging i verden per 1. juli 2024 og hvor mange som bygges av nasjonale eller utenlandske tilbydere.

Til tross for at aktører både i Norge og ellers i verden i mange år har etterspurt en økning i kjernekraftproduksjon for å møte økt etterspørsel og erstatte fossile kraftkilder, har ikke den globale kjernekraftbransjen klart å innfri de siste par tiårene. Det er mange årsaker til det. Blant annet er svært mange av dagens kraftreaktorer gamle, med en gjennomsnittlig alder på over 32 år per 2024. Selv om flere av dem trygt kan oppgraderes og gis forlenget levetid, betyr det allikevel at mange nye reaktorer må bygges kun for å erstatte dem som etter hvert stenges ved slutten av sitt livsløp. Realiteten er at det i årene 2004 til 2023 ble startet 102 nye kraftreaktorer og stengt ned 104. Hele 49 av de 102 nye reaktorene ble bygd i Kina, så nedgangen ellers i verden var betraktelig. Diagrammet i Figur 6.1 illustrerer utviklingen i antall operative kjernekraft-reaktorer og samlet årlig produksjonskapasitet i verden i hele kjernekraftens historie fram til midten av 2024 [43].

²³ Om OECD: <https://snl.no/OECD>.

Tabell 6.1 Oversikt over alle kraftreaktorer under bygging per 1. juli 2024. (Tilpasset fra [43].)

Land	Antall reaktorer under bygging (egenbygde i parentes)	Reaktorer med utenlandsk tilbyder	Samlet elektrisk effekt (MWe)	Offisiell bygge-start	Forventet produksjons-start	Forsinkede reaktorer
Kina	27 (23)	Russland (4)	29101	2017–2024	2024–2029	1
India	7 (3)	Russland (4)	5398	2004–2021	2024–2027	5
Russland	6 (6)		3960	2018–2024	2025–2030	2
Tyrkia	4 (0)	Russland (4)	4456	2018–2022	2025–2028	4
Egypt	4 (0)	Russland (4)	4400	2022–2024	2028–2031	0
Sør-Korea	2 (2)		2680	2017–2018	2024–2025	2
Bangladesh	2 (0)	Russland (2)	2160	2017–2018	2024–2025	2
Storbritannia	2 (0)	Frankrike (2)	3260	2018–2019	2030–2031	2
Argentina	1 (1)		25	2014	2028	1
Frankrike	1 (1)		1630	2007	2024	1
Iran	1 (0)	Russland (1)	974	1976	2028	1
Japan	1 (0)		1325	2007	2030	1
Slovakia	1 (0)	Russland (1)	440	1985	2025	1
Totalt	59		59809	1976–2024	2024–2031	23



Figur 6.1 Utviklingen i antall kjernekraftreaktorer og samlet årlig produksjonskapasitet fra starten i 1954 og til midten av 2024. Søylen viser antallet reaktorer (units), og den røde linjen viser den samlede kapasiteten (maksimal elektrisk effekt målt i GWe) det gjeldende år [43].

Kjernekraftindustri i utvalgte land

Sørkoreansk kjernekraftindustri strever for tiden med stor gjeld og utfordringer med eksport av reaktorer til spesielt europeiske land. Årsaken til disse utfordringene er i første rekke at amerikanske Westinghouse har saksøkt den statseide, sørkoreanske tilbyderer for ulovlig teknologioverføring, siden de koreanske reaktorene er utviklet sammen med Westinghouse og basert på dennes lisensierte teknologi. Westinghouse mener derfor at all slik eksport må godkjennes av energidepartementet i USA i tråd med den amerikanske atomenergiloven. I tillegg stiller europeiske tilsynsmyndigheter strengere krav til nye kjernekraftverk enn for eksempel De forente arabiske emirater, der sørkoreansk industri nylig har bygd et kjernekraftverk. Kraftverket er Midtøstens andre operative kjernekraftverk etter kraftverket i Bushehr i Iran. Europas strengere krav kompliserer og fordyrer byggingen. Dessuten er europeiske arbeidsuker langt kortere enn de sørkoreanske, og det påvirker byggetiden, og dermed kapitalkostnadene, betraktelig [43, 49].

Japan har fortsatt 21 stengte kraftreaktorer som følge av innstrammede regler etter Fukushima-katastrofen, men har ambisjoner om å øke kjernekraftkapasiteten igjen i årene som kommer [43].

Europeisk og amerikansk kjernekraftindustri har i flere tiår slitt med gigantoverskridelser, forsinkelser, konkurser og forlatte prosjekter, der den britiske reaktoren Hinkley Point C og de

amerikanske reaktorene Watts Bar 2 og Vogtle 3 og 4 er de mest framtreddende eksemplene. Kjernekraftindustrien i Europa og Nord-Amerika, med franske og amerikanske aktører i spissen, har mer enn nok med å forsøke å erstatte reaktorer som stenges ved slutten av sine livsløp med nye [50, 51].

Mens amerikanske myndigheter i alle år har stilt krav til mottakerstater av kjernekraftteknologi om å avstå fra selv å utvikle sensitiv flerbruksteknologi (anrikning av uran og reprosessering av brukt brensel),²⁴ følger det ingen slike begrensninger ved kinesisk eller russisk kjernekraft-eksport. Russerne tilbyr dessuten en finansieringsordning kalt «build, own, operate». Denne innebærer at russiske selskaper bygger, eier og drifter kjernekraftverk i mottakerstaten i mange år framover, og mottakerstaten forplikter seg til å kjøpe strøm fra kraftverket til en forhåndsbestemt pris gjennom hele perioden. Akkuyu kjernekraftverk i Tyrkia er et slikt eksempel som har blitt realisert. Der bygger det russiske, statseide foretaket Rosatom fire kraftreaktorer som etter planen ferdigstilles fra og med 2025 og i årene framover. Dette gir Russland betydelig innflytelse over Tyrkia [52]. I Pakistan har Kina bygd alle landets seks kraftreaktorer, og begynte byggingen av en sjuende i januar 2025.²⁵ Kina har finansiert store deler av utbyggingen, men operatørene er pakistanske [53]. Den kinesiske kjernekraftutbyggingen i Pakistan er en sentral del av det såkalte «belte-vei-initiativet», der utbygging av transportårer og annen infrastruktur skal knytte Kina tettere til store deler av verden.

Kjernekrafteksport har i flere tiår speilet den globale stormaktrivaliseringen. Ved begynnelsen av 2025 ser det ut til at det er autoritære stormakter som dominerer på denne arenaen og øker sin innflytelse, spesielt i alliansefrie land. Samtidig er det viktig å huske på at tidslinjene for planlegging og etablering av kjernekraft normalt er så lange at det internasjonale politiske landskapet, og dessuten globale markedsposisjoner, kan endres en del innen en eventuell bindende beslutning om anskaffelse skal tas [54].

Sårbarheter og avhengigheter følger byggingen av kjernekraftverk

Selv om kun en håndfull globale tilbydere sitter på overordnet, lisensiert reaktorteknologi, har gjerne moderne kjernekraftprosjekter et svært høyt antall underleverandører. For eksempel var det over 1900 underleverandører fra 28 land i det finske prestisjeprosjektet Olkiluoto 3, som var den første påbegynte kraftreaktoren av tredje generasjon i verden (men ikke den første til å gå kritisk, altså starte opp). I så store prosjekter er det krevende å ha kontroll på alle verdikjeder. Allikevel er det viktig å forsøke å unngå sårbarheter overfor kompromitterte komponenter i slike anlegg, spesielt i kontroll- og driftssystemer.

Det såkalte *Stuxnet*-viruset (som teknisk sett regnes som en orm) demonstrerte hvordan et cyberangrep kan trenge inn i blant annet kjernekraftverk verden over. Viruset ble først identifisert av uavhengige datasikkerhetsgrupper i 2010. Det ble utviklet av Israel og USA for å ramme gassentrifugeanlegget for anrikning av uran i Natanz i Iran under *Operation Olympic Games*. Det spredte seg imidlertid langt bredere og ble påvist blant annet på PC-ene til enkelte

²⁴ Gjennom såkalte «123-avtaler» etter seksjon 1.2.3 i den amerikanske atomenergiloven.

²⁵ Derfor er ikke denne inkludert i tabell 6.1, som angir status per 1. juli 2024.

ansatte ved Bushehr kjernekraftverk i Iran, men ikke på kontrollsystemene til kraftverket [55, 56].

En tilbyder av kjernekraftteknologi gir gjerne visse garantier for trygg drift overfor operatøren og nasjonale tilsynsmyndigheter. Garantiene forutsetter imidlertid at operatøren utelukkende benytter lisensiert brensel i reaktorene. Det ligger store investeringer og mange års arbeid bak godkjenning og lisensiering av kjernekraftbrensel. I praksis betyr det at et avhengighetsforhold til en tilbyder gjerne ikke stanser når anlegget settes i drift. Snarere blir operatøren avhengig av å kjøpe brensel fra et bestemt sett av leverandører, som typisk kommer fra samme stat som tilbyderen av selve reaktorteknologien, eller en stat som er vennlig innstilt til denne. Det finnes også eksempler der tilbyderen etablerer lisensiert brenselproduksjon i et land hvor de også bygger kjernekraftverk. For eksempel har amerikanske Westinghouse en egen fabrikk i Västerås i Sverige, der de produserer og selger brensel til blant annet svenske reaktorer med Westinghouse-teknologi [57].

Ukrainas kjernekraftsektor er bygd med russisk reaktorteknologi. Krigen har åpenbart gjort det vanskelig for Ukraina å kjøpe brensel produsert i Russland. Heldigvis for Ukraina har Westinghouse produsert brensel til russiske trykkvannsreaktorer helt siden 2001. Fabrikken deres i Västerås tilbyr nå slikt brensel til både ukrainske, finske, slovakiske og tsjekkiske kjernekraftverk med russisk reaktorteknologi [58]. På den måten svekkes det russiske monopolet og dermed innflytelsen. Kvalifisering av kjernekraftbrensel er ikke gjort over natta, så det er viktig at nykommerstater innen kjernekraft nøye vurderer forsyningskjeden for både reaktor- og brenselsteknologien med et langsiktig blikk på mulige sikkerhetspolitiske utfordringer.

7 Vurderinger og konklusjoner

I en paneldebatt under en internasjonal workshop organisert av Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) og OECDs Nuclear Energy Agency (NEA) i desember 2023 ble det slått fast at vurderingene knyttet til de dimensjonerende truslene som legges til grunn i beredskapsarbeidet rundt kjernekraftverk, såkalte *design basis threats*, også bør inkludere regulære krigshandlinger og store naturkatastrofer [59]. Direkte missilangrep og tap av territoriell kontroll ble nevnt eksplisitt. Den globale sikkerhetssituasjonen og de lange planlagte levetidene til nyere kjernekraftverk tyder på at dette er en fornuftig vurdering, selv om det vil kreve store ressurser av objekteiere og sikkerhets- og forsvarsmyndigheter. Slike trusselvurderinger må dessuten også gjøres for stengte kjernekraftverk, der store mengder brukt brensel gjerne lagres i påvente av slutthåndtering.

Det internasjonale atomenergibyrået (IAEA) har bistått Ukraina i arbeidet med å opprettholde trygghet (*safety*) og fysisk sikring (*security*) ved kjernekraftverkene etter Russlands

fullskalainvasjon i februar 2022. De har i den sammenhengen utarbeidet sju pilarer for slike tilstandsvurderinger [59]:

1. Anleggenes fysiske integritet må være intakt.
2. Systemer og utstyr nødvendig for trygghet og fysisk sikring må være på plass.
3. Driftspersonell må være i stand til å utføre sine plikter uten trusler og press.
4. Ekstern strømforsyning må være tilgjengelig.
5. Forsynings- og transportlinjer til og fra kjernekraftverk må være uforstyrrede.
6. Beredskaps- og overvåkingsressurser må være tilgjengelige både på og utenfor kjernekraftverk.
7. Pålitelige kommunikasjonslinjer til tilsynsmyndigheter og andre må være tilgjengelig ved kjernekraftverk.

Kravet til intakt fysisk integritet må gjelde også i krig. Det vil dermed si at kjernekraftverk må kunne beskyttes mot militære anslag. Dersom man etablerer kjernekraftverk i Norge, bør man vurdere å implementere i militært planverk at mobilt luftvern og eventuelt missilforsvar kan utplasseres for å beskytte kraftverkene og tilhørende infrastruktur dersom trusselsituasjonen tilsier det.

En annen lærdom fra krigen i Ukraina dreier seg om geografisk plassering av kjernekraftverk. Det nedlagte kjernekraftverket i Tsjernobyl har vekslet på å være under russisk og ukrainsk kontroll siden 2022, og det store kjernekraftverket i Zaporizjzja er per vinteren 2025 stadig i russiske hender. Begge disse kraftverkene ligger forholdsvis nær grensa mot Russland. Det kan ofte være gode grunner til at kjernekraftverk lokaliseres der de gjør, ikke minst nærhet til en stor og pålitelig vannkilde. Men det er viktig å ta med i vurderingen faren for at et kraftverk enten kan falle på fiendtlige hender eller havne innen rekkevidden til indirekte ild (artilleri, rakettartilleri og missiler).

Nærhet til kraftkrevende industrisentre vil være et relevant kriterium for lokalisering av eventuelle kjernekraftverk. Også her bør man ha i bakhodet hvilke risikomultipliserende konsekvenser dette kan få. Kan sabotasje eller militære angrep mot kjernekraftverket true personellet eller driften ved industrianleggene? Og kan forsøk på å ramme et kjernekraftverk med indirekte ild risikere å ramme industrianleggene? Kan dette i så fall føre til utslipp av giftige industrikjemikalier?

Tidslinjene for etablering av kjernekraft i demokratiske land har vist seg å være svært lange, mens lista over globale teknologitilbydere er kort. For tiden er det stort sett Kina og Russland som bygger kjernekraftverk. Valg av tilbyder av lisensiert teknologi kan danne sikkerhetspolitiske bindinger i flere tiår framover, dersom en velger en tilbyder med

monopol på lisensiert brenselproduksjon. Et slikt valg bør derfor gjøres med et langsiktig blikk på hvilke statlige aktører vi risikerer å gjøre oss avhengige av. Det er også viktig å være oppmerksom på eventuelle sårbarheter i de svært omfattende verdikjedene et moderne kjernekraftverk er avhengig av. En kompromittert verdikjede kan utnyttes av statlige aktører i krise eller krig, for eksempel for å forstyrre driften gjennom en cyberoperasjon.

I en uforutsigbar tid har vi ikke råd til å overse hvilke utfordringer en norsk kjernekraft-industri kan medbringe med tanke på sikring mot villede, uønskede handlinger i fred, krise og spesielt krig. Tidslinjene for etablering, drift og dekommisjonering er lange, og planleggingen må derfor ta innover seg hendelser som fra et år til et annet virker helt usannsynlige. Det kanskje mest krevende er fullt ut å ta høyde for hvilke utfordringer en slutthåndteringsstrategi for brukt brensel bringer med seg i et ikke-spredningsperspektiv. Disse utfordringene gjelder både kjernekraftverk og eventuelle fartøysreaktorer. Er det slik at norske myndigheter skal tillate innovativ kjernekraftteknologi som lover å forhindre deponering av plutoniumholdig brukt brensel, men som ikke er teknologisk moden på mange år, og som kanskje aldri vil la seg kommersialisere? Eller skal man tillate å etablere tradisjonell kjernekraftteknologi og dermed akseptere at man etter mange tiår med drift vil måtte deponere brukt brensel (intakt eller reprosessert) med tonnevis av våpenanvendelig plutonium, som vil kunne misbrukes i kjernevåpen når som helst i de neste hundretusenvis av år?

Det er mange store og viktige problemstillinger som norske myndigheter må forholde seg til når de en dag eventuelt skal avgjøre å åpne opp for kjernekraft i Norge eller ikke. Dersom de gir grønt lys, bør de gjøre det med forutsetninger som er basert på en tilstrekkelig forståelse for problemstillingene som løftes frem i denne rapporten. I motsatt fall risikerer de å introdusere langsiktige sårbarheter som kunne ha vært unngått. Forhåpentligvis vil denne rapporten bidra til at også dyster, men viktige aspekter ved kjernekraften tas med i den helhetlige, nasjonale diskusjonen som handler om alle aspekter av kjernekraft, positive som negative.

Referanser

- [1] A. Isaac og A. Lawson. *Sellafield apologises after guilty plea over string of cybersecurity failings*. The Guardian. 8. august 2024. Tilgjengelig: https://amp.theguardian.com/business/article/2024/aug/08/sellafield-apologises-guilty-plea-security-failings-nuclear?mkt_tok=ODEzLVhZVS00MjIAAAGU7GfuDwZcwDWD7-W0cv9IEVD9643Qup9ZgWM4xUKXDdlwCc5cDE_WsUnpnq87QRz4kzGTK_mBuXdp3x1YTUIwnomB9K0WKF969uSNB1xbdeg
- [2] (18. november 2024) Russia places 'tit-for-tat' ban on US uranium exports. *World Nuclear News*. Tilgjengelig: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/russia-places-ban-on-us-uranium-exports>
- [3] *Russia halts Turkey gas project talks amid Syria row*. BBC. 3. desember 2015. Tilgjengelig: <https://www.bbc.com/news/world-europe-34995472>
- [4] *Russia halts gas supplies to Ukraine after talks breakdown*. BBC. 1. juli 2015. Tilgjengelig: <https://www.bbc.com/news/world-europe-33341322>
- [5] "Residual Heat," utg: nuclear-power.com, 2025. Tilgjengelig: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/residual-heat/>
- [6] *Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (CPPNM) and its Amendment*, IAEA, 1979. Tilgjengelig: <https://www.iaea.org/publications/documents/conventions/convention-physical-protection-nuclear-material-and-its-amendment>
- [7] *Convention on Nuclear Safety*, IAEA, 1994. Tilgjengelig: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/convention-nuclear-safety>
- [8] *Tilleggsprotokoll til Genève-konvensjonene av 12-08-1949 hva angår beskyttelse av ofre for internasjonale væpnede konflikter (Protokoll I)*, 1977. Tilgjengelig: <https://lovdata.no/dokument/TRAKTAT/traktat/1977-06-08-1>
- [9] *Tilleggsprotokoll til Genève-konvensjonene av 12. august 1949 hva angår beskyttelsen av ofre for ikke-internasjonale væpnede konflikter (Protokoll II)*, 1977. Tilgjengelig: <https://lovdata.no/dokument/TRAKTAT/traktat/1977-06-08-2?q=Tilleggsprotokoll%20til%20Geneve-konvensjonene%20av%2012-0#shareModal>
- [10] (12. august 2024) Fire at Zaporizhzhia cooling tower. *World Nuclear News*. Tilgjengelig: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Fire-at-Zaporizhzhia-cooling-tower>
- [11] Western European Nuclear Regulators Association «WENRA position on the safety situation of Zaporizhzhya NPP after reported shelling activities», 10. august 2022.
- [12] C. Méheut. *Russia, Targeting Ukraine's Grid, Moves to Cut Off Its Nuclear Plants*. The New York Times. 29. november 2024. Tilgjengelig: https://www.nytimes.com/2024/11/29/world/europe/russia-ukraine-electric-grid-nuclear-power.html?smid=nytcore-ios-share&referringSource=articleShare&mkt_tok=ODEzLVhZVS00MjIAAAGXLWci5wsclmM9jPvPHhObx8qQm7BhKoZsZ7DfJEKJbExZFElULwcRNN3hOm1Mle7b5qmrJ8uva9V4h6FbBqqDXwtLcTWIsGFtHAMP2Hx9RKO
- [13] I. H. Storaas. *Reuters: Minst en million mennesker uten strøm i Ukraina etter russisk angrep*. VG. 28. november 2024. Tilgjengelig: <https://www.vg.no/nyheter/i/Xjay5E/melding-om-russiske-angrep-flere-steder-i-ukraina>
- [14] "United States/United Kingdom, Conduct of the 2003 War in Iraq," i *How does law protect in war?*, utg: International Committee of the Red Cross, 2014. Tilgjengelig:

-
- <https://casebook.icrc.org/case-study/united-statesunited-kingdom-conduct-2003-war-iraq>
- [15] J. Carlson, "Prohibition of military attacks on nuclear facilities," utg: Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation, 2022. Tilgjengelig: https://vcdnp.org/wp-content/uploads/2022/09/Attacks-on-nuclear-facilities_Carlson-updated.pdf
- [16] C. Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium," *Science & Global Security*, vol. 17, ss. 170-185, 2009.
- [17] F. N. von Hippel, M. Takubo, og J. Kang, *Plutonium - How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare*: Springer, 2019.
- [18] H. Kippe «Irans kjernefysiske program - for kraftproduksjon eller kjernevåpen?» FFI, Kjeller, Norge, 09/00083, 01.11.2008.
- [19] P. Crail. (2011) Iran's First Power Reactor Goes Critical. *Arms Control Today*. Tilgjengelig: <https://www.armscontrol.org/act/2011-06/irans-first-power-reactor-goes-critical>
- [20] A. Yadlin, "The Begin Doctrine: The Lessons of Osirak and Deir ez-Zor," i *INSS Insight No. 1037*, utg, 2018. Tilgjengelig: <https://www.inss.org.il/publication/the-begin-doctrine-the-lessons-of-osirak-and-deir-ez-zor/>
- [21] M. Braut-Hegghammer, "Revisiting Osirak: Preventive Attacks and Nuclear Proliferation Risks," *International Security*, vol. 36, 2011.
- [22] E. von Follath og H. Stark. *The Story of 'Operation Orchard': How Israel Destroyed Syria's Al Kibar Nuclear Reactor*. Der Spiegel. 2. november 2009. Tilgjengelig: <https://www.spiegel.de/international/world/the-story-of-operation-orchard-how-israel-destroyed-syria-s-al-kibar-nuclear-reactor-a-658663.html>
- [23] *False flag? Russia says Ukraine plans to detonate a 'dirty bomb'*. Al Jazeera. 23. oktober 2022. Tilgjengelig: <https://www.aljazeera.com/news/2022/10/23/false-flag-russia-says-ukraine-plans-to-detonate-a-dirty-bomb>
- [24] J. Borger og L. Harding. *US claims Russia planning 'false-flag' operation to justify Ukraine invasion*. The Guardian. 14. januar 2022. Tilgjengelig: <https://www.theguardian.com/world/2022/jan/14/us-russia-false-flag-ukraine-attack-claim>
- [25] C. Cook og M. Seddon. *Russia trained officers for attacks on Japan and South Korea*. Financial Times. 31. desember 2024. Tilgjengelig: <https://www.ft.com/content/d345a6e7-2d72-4dcb-9c12-76d571ba75eb>
- [26] "Japan's Nuclear Fuel Cycle," utg: World Nuclear Association, 2021. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-fuel-cycle>
- [27] "RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors," utg: World Nuclear Association, 2022. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/appendices/rbmk-reactors#operating-rbmk-plants>.
- [28] National Audit Office «The decommissioning of the AGR nuclear power stations», *How we blew up Koeberg (... and escaped on a bicycle)*. Mail & Guardian. 15. desember 1995. Tilgjengelig: <https://mg.co.za/article/1995-12-15-how-we-blew-up-koeberg-and-escaped-on-a-bicycle/>
- [30] K. Vick. (25. mars 2016) ISIS Attackers May Have Targeted Nuclear Power Station. *Time*. Tilgjengelig: <https://time.com/4271854/belgium-isis-nuclear-power-station-brussels/>
- [31] *Instruks om vakthold og sikring av objekter ved bruk av sikringsstyrker fra politiet og Forsvaret i fred, krise og væpnet konflikt*, Forsvarsdepartementet FOR-2019-06-21-870, 2019. Tilgjengelig: <https://lovdata.no/dokument/INS/forskrift/2019-06-21-870>

-
-
- [32] T. N. Blekeli. *Sjokkert over sikkerheten ved svensk kjernekraftverk*. NRK. 21. juni 2012. Tilgjengelig: <https://www.nrk.no/buskerud/sjokkert-over-sikkerheten-1.8215061>
- [33] H. S. Heireng «Uranets vei til kjernekraft og kjernevåpen – en innføring i kjernefysisk flerbruksteknologi» FFI, Kjeller, Norge, 15/01688, 01.11.2015.
- [34] "Nuclear Power in Finland," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland#fuel-cycle>
- [35] "Processing of Used Nuclear Fuel," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel>
- [36] International Panel on Fissile Materials «Global Fissile Material Report 2006»,
- [37] D. Albright, F. Berhkout, og W. Walker «Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996 - World Inventories, Capabilities and Policies»,
- [38] "Generation IV Nuclear Reactors," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors>
- [39] E. Buhmann og G. Kirchner, "Proliferation Relevance and Safeguards Implications of Partitioning and Transmutation Nuclear Fuel Cycles," *Science & Global Security*, vol. 26, ss. 91-108, 2018.
- [40] «Implications of partitioning and transmutation in radioactive waste management» International Atomic Energy Agency,
- [41] L. Krall og A. Macfarlane, "Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors," *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 74, ss. 326-334, 2018.
- [42] S. Thomas og M. V. Ramana, "A hopeless pursuit? National efforts to promote small modular nuclear reactors and revive nuclear power," *WIREs Energy and Environment*, vol. 11, 2022.
- [43] M. Schneider, A. Froggatt, J. Hazemann, Ö. Gürbüz, P. Jobin, P. Johnstone, *et al.* «The World Nuclear Industry Status Report 2024»,
- [44] Rosatom, "The Russian Federation and Uzbekistan sign an agreement on the construction of a small nuclear power plant," utg. Tilgjengelig: <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/-the-russian-federation-and-uzbekistan-sign-an-agreement-on-the-construction-of-a-small-nuclear-powe/>
- [45] D. Schlissel «Eye-popping new cost estimates released for NuScale small modular reactor», 11. januar 2023.
- [46] "Nuclear Power in China," utg: World Nuclear Association, 2025. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>
- [47] "Nuclear Power in Russia," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/Information-Library/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia-Nuclear-Power>
- [48] "Molten Salt Reactors," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors>
- [49] "Nuclear Power in South Korea," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea>
- [50] "Nuclear Power in the USA," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power>

-
- [51] "Nuclear Power in the United Kingdom," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom>
- [52] "Nuclear Power in Turkey," utg: World Nuclear Association, 2024. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey>
- [53] "Nuclear Power in Pakistan," utg: World Nuclear Association, 2025. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/pakistan>
- [54] N. L. Miller og T. A. Volpe, "The rise of the autocratic nuclear marketplace," *Journal of Strategic Studies*, vol. 46, 2023.
- [55] *Stuxnet worm hits Iran nuclear plant staff computers*. BBC. 26. september 2010. Tilgjengelig: <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-11414483>
- [56] D. Sanger. *Obama Order Sped Up Wave of Cyberattacks Against Iran*. The New York Times. 1. juni 2012. Tilgjengelig: <https://www.nytimes.com/2012/06/01/world/middleeast/obama-ordered-wave-of-cyberattacks-against-iran.html>
- [57] "Nuclear Power in Sweden," utg: World Nuclear Association, 2025. Tilgjengelig: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden>
- [58] (2023). *Westinghouse Delivers First VVER-440 Fuel Assemblies to Energoatom*. Tilgjengelig: <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-delivers-first-vver-440-fuel-assemblies-to-energoatom>
- [59] «Radiological Protection During Armed Conflict: Improving Regulatory and Operational Resilience» DSA, NEA,

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan, med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs formål

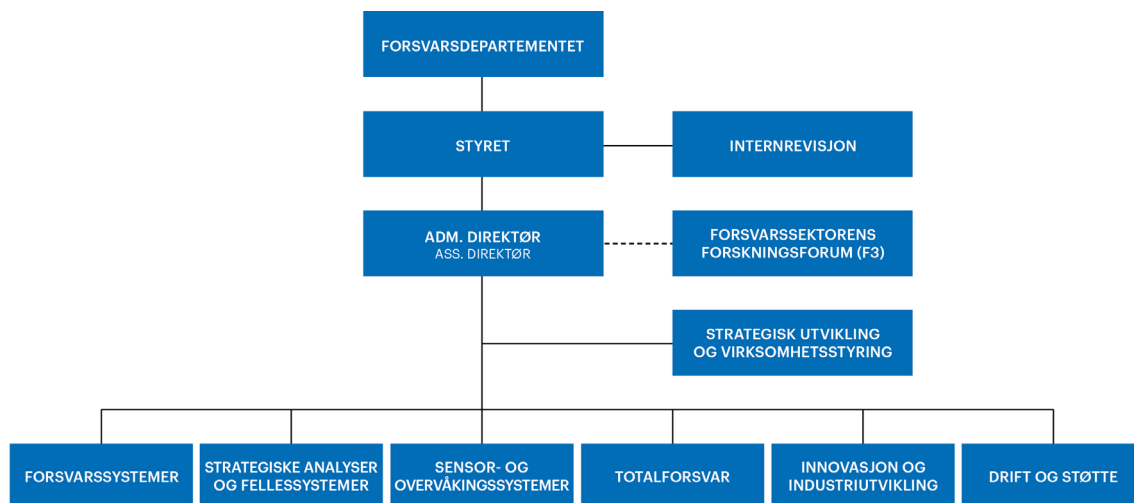
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

FFIs visjon

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs verdier

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.



Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telefon: 91 50 30 03
E-post: post@ffi.no
ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
PO box 25
NO-2027 Kjeller
NORWAY

Visitor address:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telephone: +47 91 50 30 03
E-mail: post@ffi.no
ffi.no/en