

Kjernekraft: fordeler, utfordringer og usikkerheter

Ole Christian Lind

Fokus på best mulig beslutningsgrunnlag



VG 01.02.2023

Et flertall av nordmenn er for norsk kjernekraft. Her atomkraftverket Grohnde ved Emmerthal i nordvestlige Tyskland. Foto: Halvard Alvik / NTB

Flertall for atomkraft i Norge i ny meningsmåling

Et knapt flertall i befolkningen er enig i at Norge bør bygge ut kjernekraft, viser en spørreundersøkelse fra Opinion.

- Kjernekraft-tilhengere i Norge har fått mye oppmerksomhet de siste måneder



Prometheus

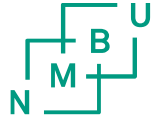
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heinrich_fueger_1817_prometheus_bringing_fire_to_mankind.jpg

- Viktig at alle aspekter kommer frem før man tar beslutning om kjernekraft

Mange fordeler med kjernekraft

- Selve energiproduksjonen har:
 - Svært lave utslipp av klimagasser og annen forurensing
 - Liten arealbruk
- Relativt stabil energikilde
- Regulerbar
- Scorer godt på mange sikkerhets- og risikoparametere (f.eks. antall dødsfall per MWe...)
 - Men er dette de eneste/mest relevante parametere?

Utfordringer i kjernekraftspørsmålet



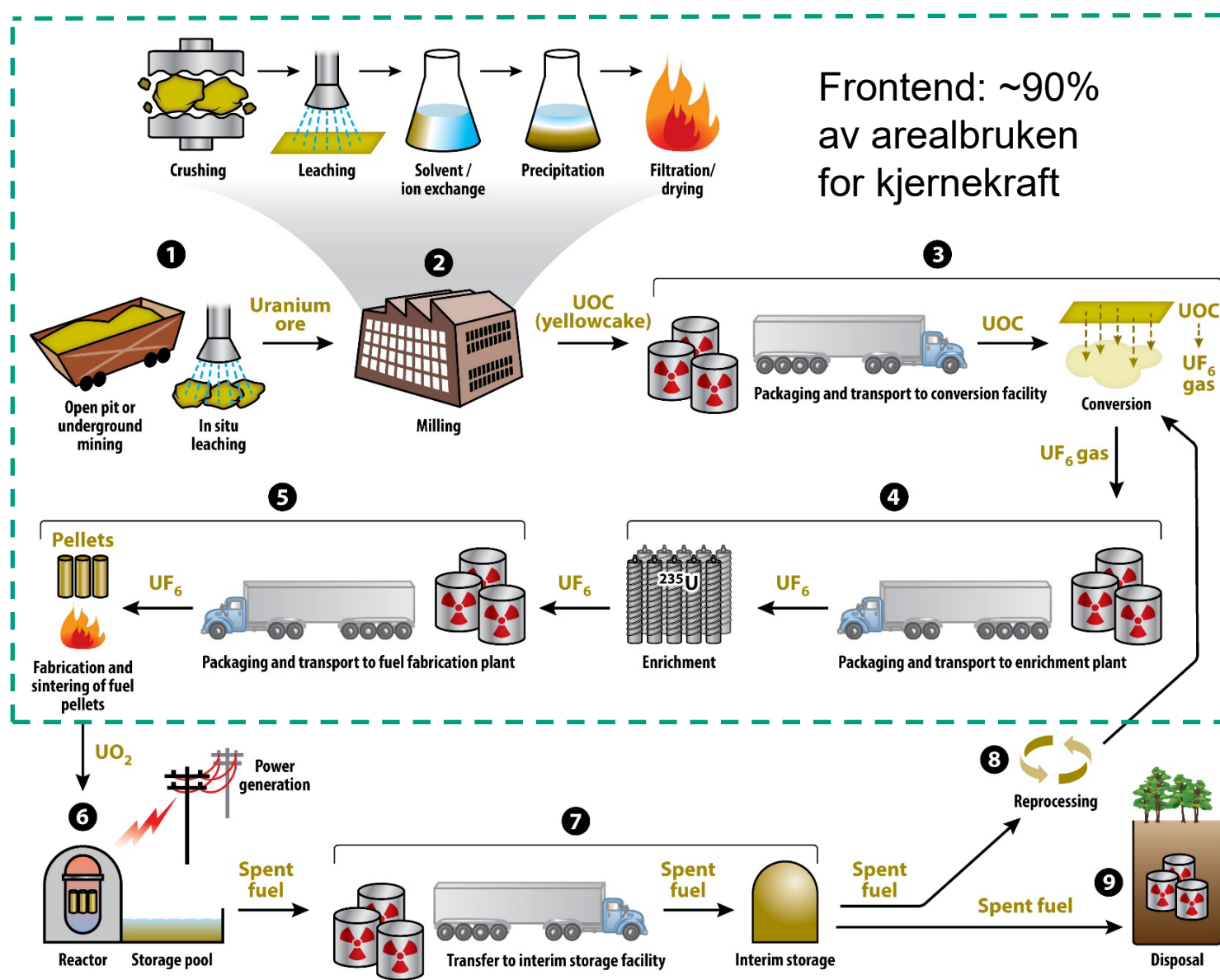
- Avfallsproblematikk
- Risiko for ulykker og frykten for utslipp av radionuklider
- Geopolitisk ustabilitet og ikke-spredningsspørsmål
- Kostnader knyttet til drift og utbygging
 - Operatører
 - Forvaltning
- I Norge kan vi i tillegg få utfordringer knyttet til
 - Begrensninger i.f.t. å skaffe 1) nok mennesker med 2) riktig kompetanse som 3) kan sikkerhetsklareres innen 4) relativt kort tidsrom
 - Storsatsing på kjernekraft kan bety reduserte ressurser for forskning og utvikling på fornybar energi, energieffektivisering og energilagring

Kjernebrenselssyklusen



Rossing gruve, Namibia

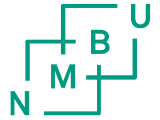
Pemba.mpimaji, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons



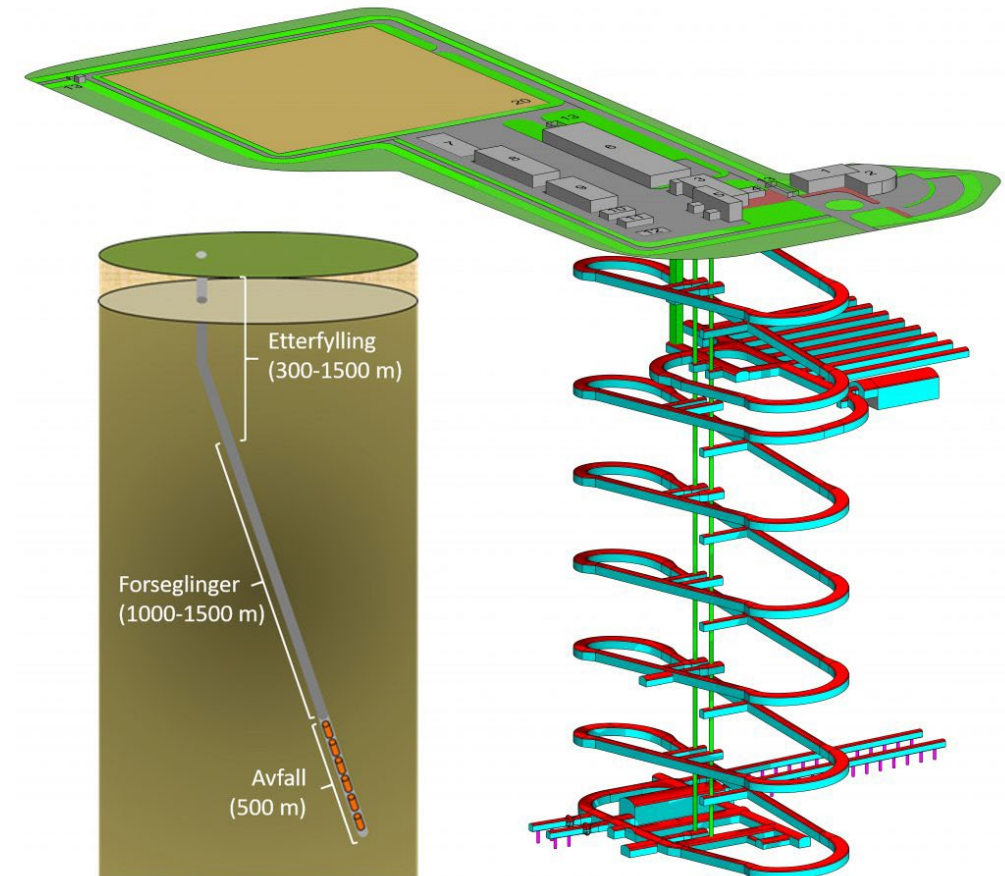
Kristo MJ, et al. 2016.

Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 44:555–79

Utfordringer knyttet til avhending og lagring



- Sluttforvaring må ta hensyn til at avfallet skal kunne lagres på en sikker måte i flere tusen år
 - Sikre mot lekkasje til biosfæren
- Lokalisering deponi
 - Bare Sverige og Finland har funnet varige løsninger for å deponere dagens brukte brensel
 - Utredninger og vurderinger for bygging av sluttlagre (deponi) 30–40 år
 - Byggeprosessen i Finland >20 år
 - Størst utfordring er ofte tilslutning fra innbyggere og lokale myndigheter



www.nnd.no, BGE-TEC og AINS Group

Risiko for ulykker og frykten for utslipp av radionuklider



- Risiko = konsekvens x sannsynlighet
 - Sannsynligheten vil aldri bli 0
- Menneskelige feil har skjedd og vil skje igjen
- Three Mile Island: Mekanisk feil, operatørfeil og mangelfullt lederskap
- Chernobyl: Operatørfeil, iboende svakheter i reaktordesign og mangelfull sikkerhetskultur
- Fukushima: Ledelsen ved anlegget og forvaltningen ignorerte risiko for at sjømuren var for lav gitt historiske tsunamidata
 - Operatørfeil av liten betydning

Royal Navy orders investigation into nuclear submarine 'repaired with glue'

Claims made that broken bolts on HMS Vanguard's reactor chamber were stuck on instead of replaced



The Guardian 01.02.2023

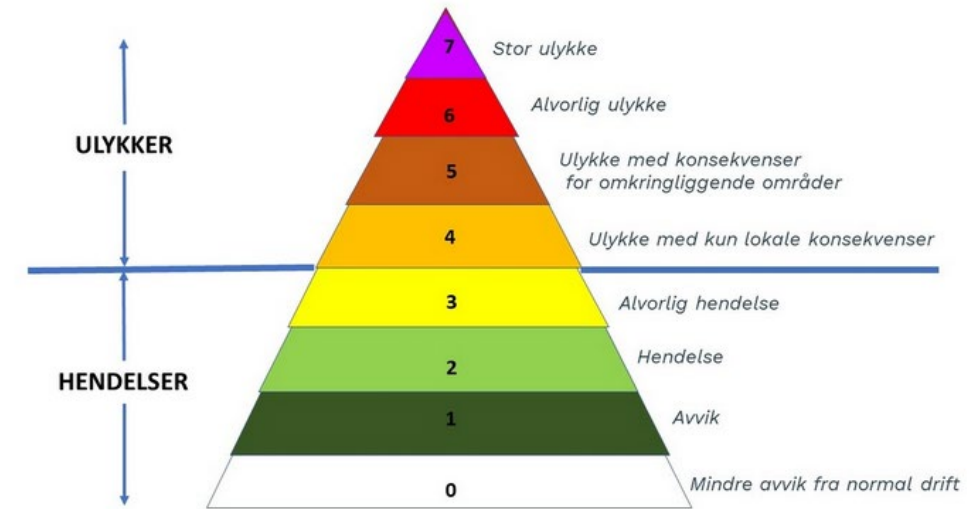
📷 HMS Vanguard in 2009. Photograph: Chris Bacon/PA

The **Royal Navy** has ordered an urgent investigation amid claims that workers on a Trident nuclear armed submarine fixed broken bolts in the vessel's reactor chamber using glue.

The faulty repairs on the cooling pipes aboard HMS Vanguard were found after one of the bolts fell off during an inspection, **the Sun** reported.

Historiske nukleære hendelser og ulykker

- Hendelser (INES 2-3) er uforutsette situasjoner og tekniske feil som oppstår under normal kraftverksdrift, og som ikke har ført til strålingsutslipp eller alvorlig skade på utstyr
- Ulykker (INES 4-7) fører til strålingsutslipp eller alvorlig skade på kjernekraftverkets utstyr
 - Nivå 7: betydelig ulykke, større utslipp, omfattende helse- og miljøeffekter, krever planlagte og utvidede mottiltak
- Mest kjente ulykker: Three Mile Island, USA, 1979; Tsjernobyl, Sovjetunionen 1986; Fukushima, Japan, 2011
- Minst 100 kjente hendelser og ulykker frem til 2014 inkl flere reaktorulykker ..., men mange alvorlige utslipp er ikke med i statistikken til UNSCEAR (2008)



Skisse som viser nivåene i INES-skalaen.

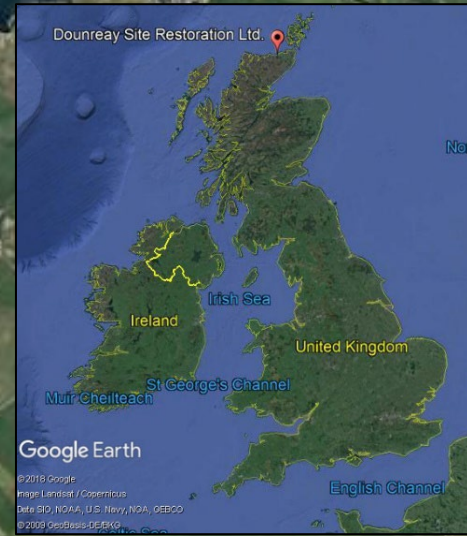
INES
Av Knut Hofstad.

<https://snl.no>

Dounreay reprosesseringsanlegg, Skottland

Utslipp av radioaktive partikler sent 1950 til 1970-tallet

- Fragmenter av brukt brensel ble funnet på strander nær Dounreay Fuel Reprocessing Facility (UKAEA) første gang i 1986
- Man finner ca 5 – 10 partikler per mnd
 - Fra kBq til 200 MBq
- Sandside Beach stengt for en periode

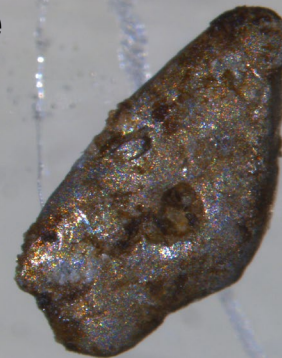


Dounreay Foreshore

Dounreay Site Restoration Lt

Sandside Beach

**Materials Test Reactor (MTR)
Particle**



**Dounreay Fast Reactor (DFR)
Particle**



Figure 3.1. NUVIA's Beach monitoring Softrak vehicle

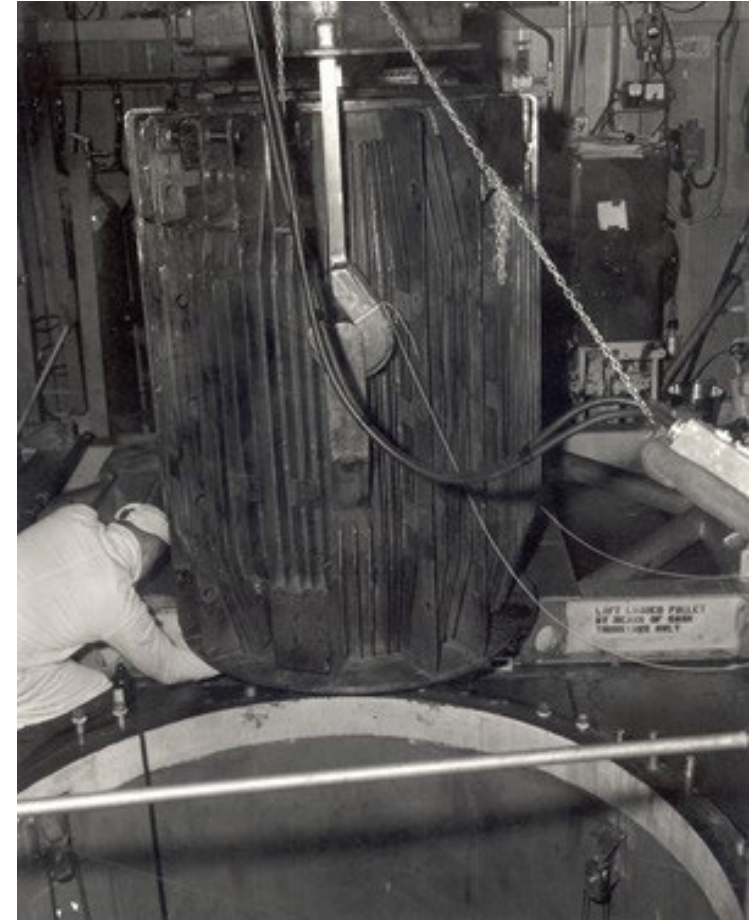
Google Earth

Image © 2018 Getmapping plc
Image Landsat / Copernicus
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Minireaktor på McMurdo-basen i Antarktis

Portable Medium Power Plant 3 (PM-3A)

- 1.8 MW, 93.1% ^{235}U
- Operativ 1962 – 1972 (US Navy)
- 438 tekniske feil
 - Inkludert div. utslipp og en hydrogenbrann som skadet kontrollsystemer
- Dekommisjonering ferdig 1979
 - 365 tonn avfall til USA
- Tilsvarende reaktorer var i drift på Grønland og i Wyoming



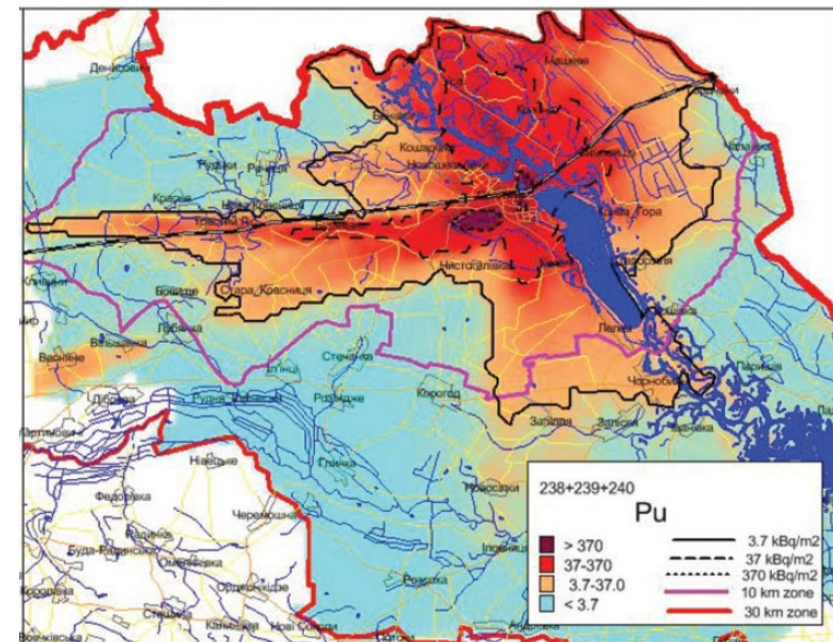
<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/reid2/>

Sammenlikning av risiko for ulike energiformer



Riktig sammenlikningsgrunnlag?

- Er antall døde riktig konsekvens å vurdere ift sammenlikning av risiko?
- Andre (ulykkes)konsekvenser som bør inkluderes:
 - Helse inkl psykososiale
 - Miljømessige
 - Økonomiske
 - Mottiltak
 - Tap i oppdrettsnæring, fiskerier, jordbruk, reindrift, turisme, eksport
 - Tapt landareal pga restriksjoner som følge av kontaminering?
 - Sosiale inkl etiske aspekter
 - Evakuering, fraflytting, mottiltak, sosiale forhold



Plutonium depositions i Tsjernobyl eksklusjonssone, 4,143 km² (Kashparov, 2019)

Utfordringer med kjernekraft knyttet til klimaendringer?



- Redusert effekt pga hetebølger og manglende kjøling
- Ekstremvær og andre naturkatastrofer – store krav til dimensjonering for kraftverk og avfallslagring

U.S. News NEWS

Home / News / National News / How Heat Waves Threaten Nu...

Nuclear Power, Once Seen as Impervious to Climate Change, Threatened by Heat Waves

The nuclear power sector is often portrayed as resistant to unpredictable weather associated with climate change. Heat waves, however, are punching holes in that narrative.

By Alan Neuhauser | July 1, 2019



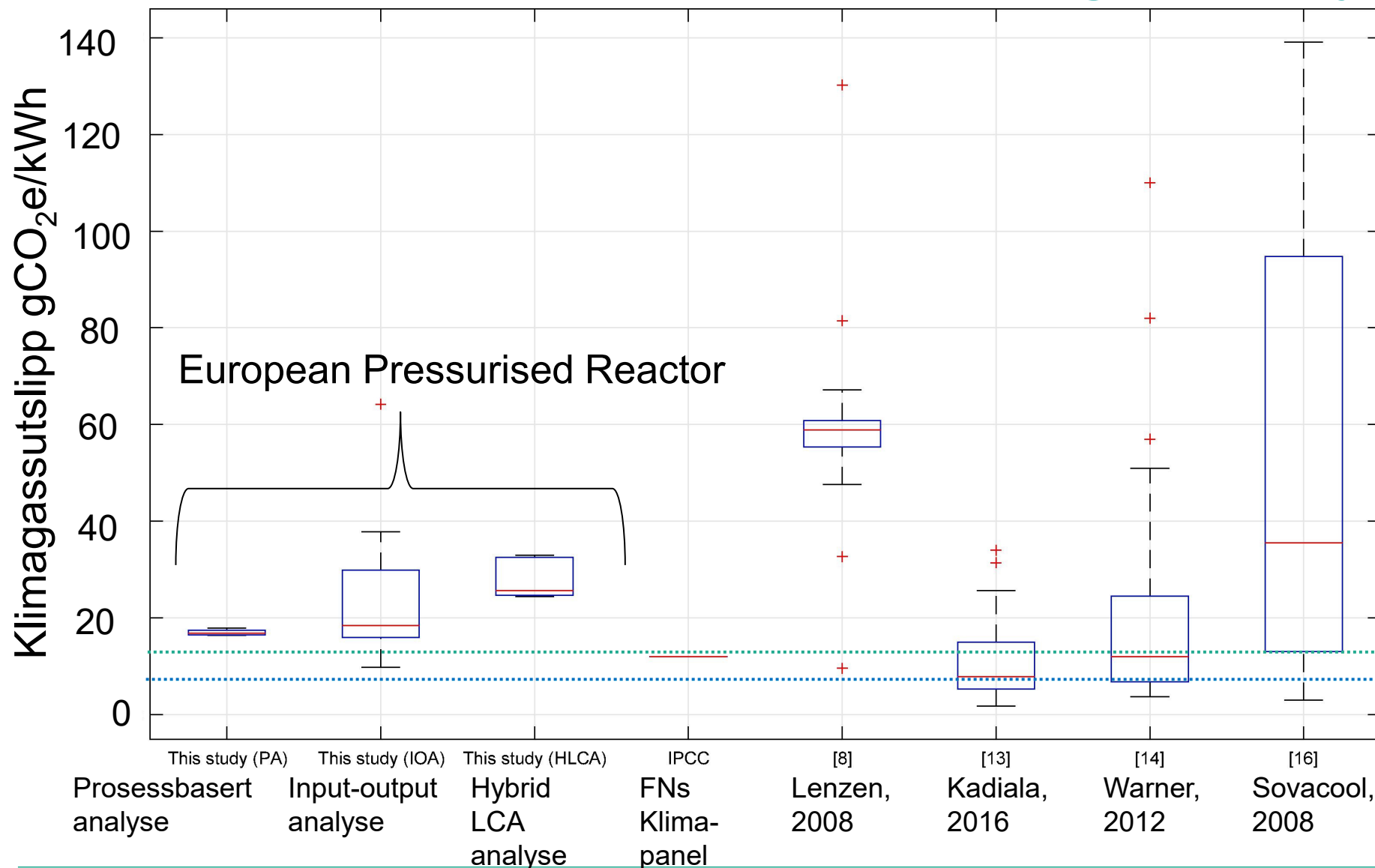
Forsinkelser og overskridelser

Olkiluoto 3, Finland

- Konstruksjon startet 2005
- Opprinnelig planlagt ferdig 2009
- Full kapasitet september 2022
- Nye forsinkelser – ny dato for endelig levering: 29. mars 2023
- Opprinnelig budsjett 3.2 mrd EURO
- Endelig kostnad 9 mrd EURO
- Liknende problemer ved f.eks. Flamanville (F) og Hinkley Point C (UK)

(Image: TVO)

Usikkerheter i utslippsestimater for klimagass fra kjernekraft



- Gjennomsnittsverdier 17-28 gCO₂e/kWh_e (min. 8 – maks. 64)
- Høyere estimater enn de fra kjernekraft-industrien (x2 – x10)
- Estimatenes avhenger i stor grad av forutsetningene om karbonavtrykket til energien

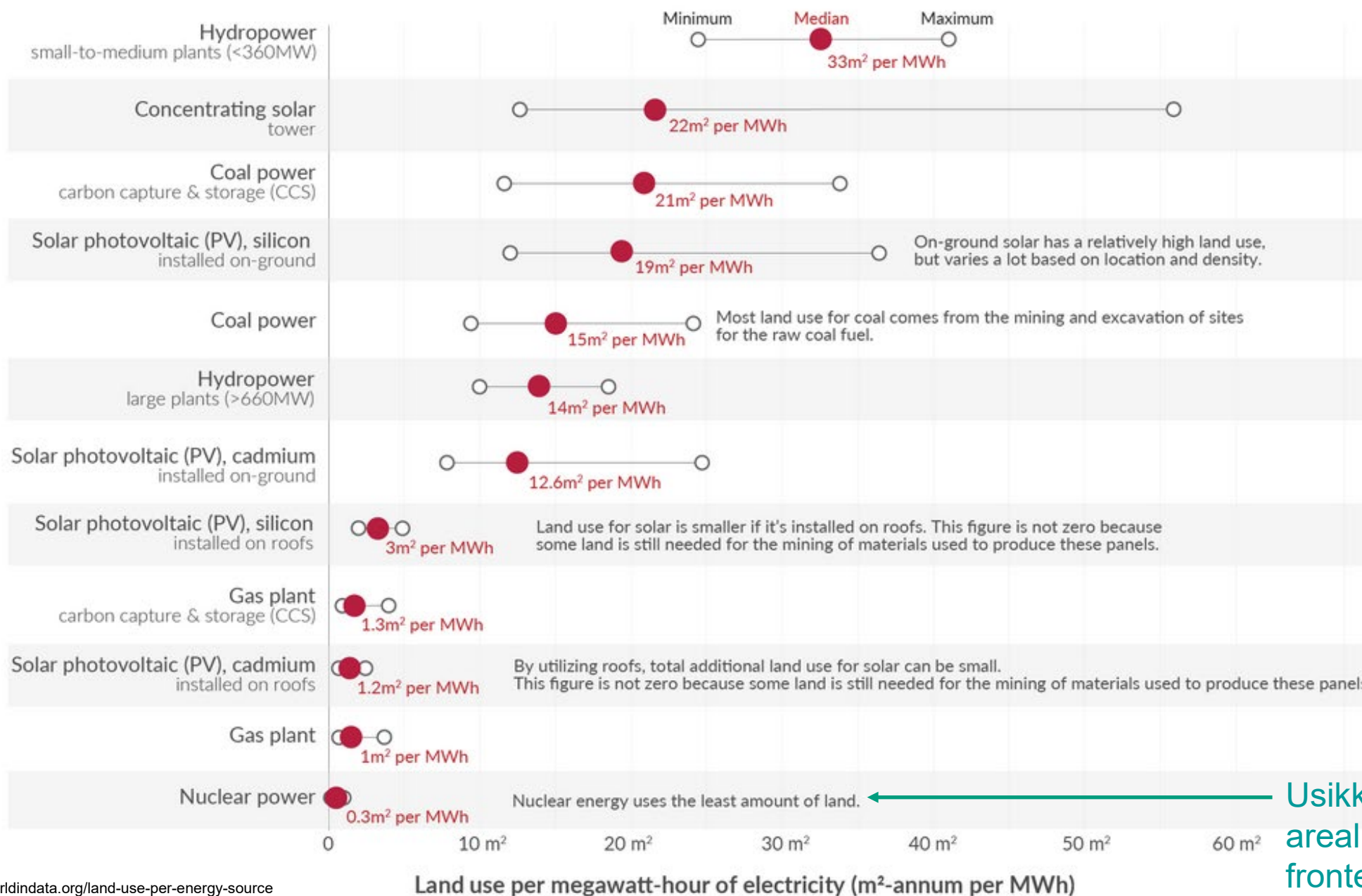
Vind: ~8 – 20 (IPCC)

Hydro: ~4 – 14 (IPCC)

Land use of energy sources per unit of electricity



Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.



Usikkerhet rundt estimert arealbruk ifm frontend/backend?

Menneskelige ressurser

- Kan ikke importere all nødvendig kompetanse
- Sikkerhetsklarering krever norsk pass
- 40 nye studieplasser (20 UiO, 20 NMBU) innen nukleære fag
 - Omfattende rekrutteringsarbeid foran oss
 - Masterutdanning 5 år
 - PhD minimum 8 år



 **Khrono 10år**

Bedriftene mangler 700 personer med doktorgrad

Norske bedrifter melder om stor mangel på personer med riktig høyere utdanning. — Vi må dimensjonere utdanningssystemet mer etter arbeidslivets reelle behov, sier NHO-sjefen.



Small Modular Reactors (SMR)



- Reaktorer som produserer <300 MWe
- Prefabrikeres og masseproduseres i fabrikker og bygges som moduler nær urbane områder
- Leverandører hevder de er sikrere og har reduserte kostnader sammenliknet med større kjernekraftverk
- Ca 70 forskjellige reaktorkonsepter under utvikling
 - 30 av disse innebærer kjøling med andre medier enn vann (He, flytende Na, saltsmelter)

Small Modular Reactors (SMR)

Ikke bare fordeler

- Nøytronlekkasje, bruk av nøytronreflektorer og/eller kjemisk reaktivt brensel og kjølemedier fører til:
 - 2-x30 mer volum av avfall enn vanlige kjernekraftverk
 - Mer kjemisk reaktivt avfall enn vanlige kjernekraftverk
- Høyere varmeavgivelse fra avfall
- Større mengder geokjemisk mobile fisjonsprodukter (^{129}I , ^{99}Tc , and ^{79}Se)
- Brukt brensel vil inneholde relativt høye konsentrasjoner fissilt materiale – krever nye tilnærminger ndg kritikalitetshensyn under lagring og avfallshåndtering



MAY 30, 2022

Stanford-led research finds small modular reactors will exacerbate challenges of highly radioactive nuclear waste

Small modular reactors, long touted as the future of nuclear energy, will actually generate more radioactive waste than conventional nuclear power plants, according to research from Stanford and the University of British Columbia.

PNAS

RESEARCH ARTICLE

ENVIRONMENTAL SCIENCES

OPEN ACCESS



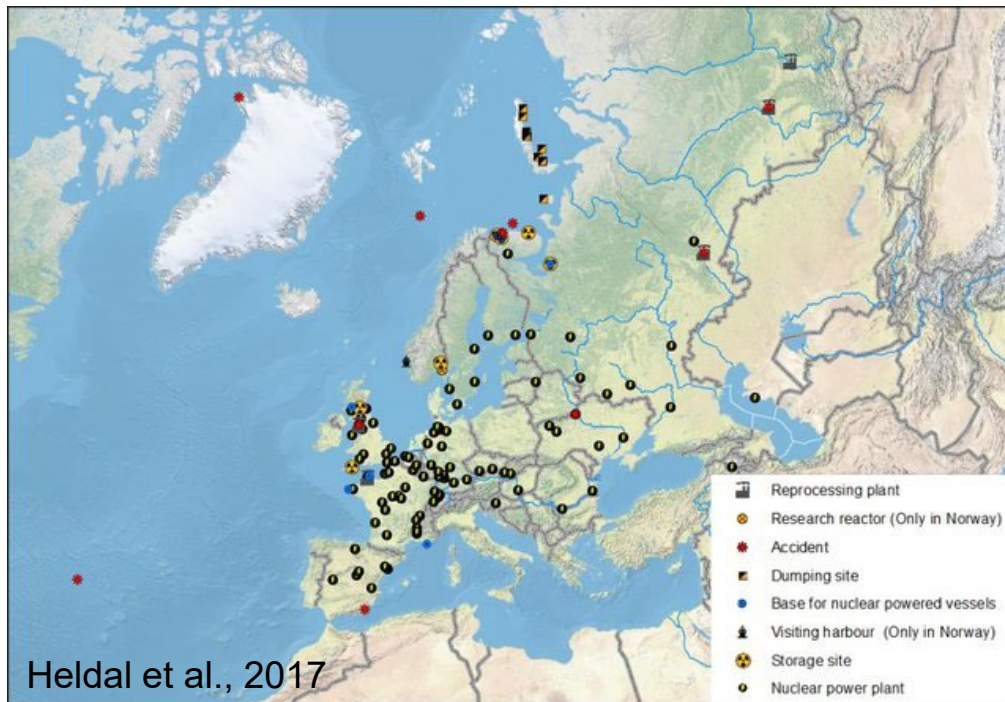
Nuclear waste from small modular reactors

Lindsay M. Krahl^{a,1,2}, Allison M. Macfarlane^b, and Rodney C. Ewing^a

Edited by Eric J. Schelter, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA; received June 26, 2021; accepted March 17, 2022 by Editorial Board Member Peter J. Rossky

Vi slipper ikke unna nukleær risiko uansett

- Mange kilder nær Norge
- Anløp/besøk i norske farvann av allierte atomdrevne fartøy
 - USS Harry S. Truman, 2 x 550 MW_{th} reaktorer d.v.s. tilsvarende effekten i Tsjernobyl reaktor nr. 4



https://www.researchgate.net/publication/319651131_Radioactive_substances_in_Norwegian_farmed_Atlantic_salmon_Salmo_salar

Oppsummering I



- Kjernekraft vil fortsette å være en viktig del av energimiksen i Europa
- Kjernekraftindustriens nye installasjoner i store nukleære nasjoner sliter med store forsinkelser og enorme kostnadsoverskridelser
- Neppe klokt å stenge eksisterende kjernekraftverk nå?

Oppsummering II



- I Norge må vi tenke oss svært nøye om før vi satser på kjernekraft
 - Behov for et solid kunnskapsgrunnlag
 - Begrenset kompetanse/menneskelige ressurser kan bli en avgjørende faktor
 - Vi satser på å utdanne mange flere kjernefysikere, kjernekjemikere osv., men hvor skal vi få alle kandidatene fra?
 - Bare det å skaffe nok folk til å dekommisjonere 4 forskningsreaktorer og lagre avfallet kan bli en utfordring!
 - Stor satsing på kjernekraft vil kunne «stjele» ressurser fra FoU på fornybar energi/energilagring/energieffektivisering og ta svært lang tid
 - På den annen side kan/bør det være synergieffekter i kompetanseoppbygging ifm dekommisjonering av forskningsreaktorene og evt. satsing på kjernekraft

Takk til

Deborah Oughton og øvrige kolleger
på Seksjon Miljøkjemi, MINA, NMBU
Dieter Rudolf Christian Röhrich, UiB



Takk for oppmerksomheten