



**CHALMERS**



# Hållbar elproduktion

En jämförelse mellan GenIV-kärnkraft och vindkraft i

Sverige

Kandidatarbete inom Industriell ekonomi

David Arvidsson  
Axel Emanuelsson  
Linn Fredriksson

Johan Nilsson  
Adam Pauli  
Filip Schwartz

**INSTITUTIONEN FÖR TEKNIKENS EKONOMI OCH ORGANISATION**

---

**AVDELNINGEN FÖR ENVIRONMENTAL SYSTEM ANALYSIS**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2020

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

Kandidatarbete TEKX04-20-05



# Hållbar elproduktion

En jämförelse mellan GenIV-kärnkraft och vindkraft i Sverige

Sustainable electricity generation

A comparison between GenIV-nuclear power and wind power  
in Sweden

David Arvidsson  
Axel Emanuelsson  
Linn Fredriksson

Johan Nilsson  
Adam Pauli  
Filip Schwartz

Hållbar elproduktion

En jämförelse mellan GenIV-kärnkraft och vindkraft i Sverige

David Arvidson	Johan Nilsson
Axel Emanuelsson	Adam Pauli
Linn Fredriksson	Filip Schwartz

© David Arvidsson, 2020

© Axel Emanuelsson, 2020

© Linn Fredriksson, 2020

© Johan Nilsson, 2020

© Adam Pauli, 2020

© Filip Schwartz, 2020

Kandidatarbete TEKX04-20-05

Teknikens ekonomi och organisation

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Göteborg, Sverige 2020

Gothenburg, Sweden 2020

## Sustainable electricity generation

### A comparison between GenIV-nuclear power and wind power in Sweden

David Arvidsson      Johan Nilsson

Axel Emanuelsson    Adam Pauli

Linn Fredriksson    Filip Schwartz

Department of Technology Management and Economics

Chalmers University of Technology

#### SUMMARY

Climate change is an acute problem and sustainable development is a prerequisite for meeting today's needs at no expense to future generations. The Swedish electricity demand is expected to increase by up to 60 percent by the year 2045, at the same time as an undergoing decommissioning of Swedish nuclear power. The question is which type of power source can sustainably meet the need that arises. The purpose of the study was to compare the next generation of nuclear power, GenIV-nuclear power, with wind power based on sustainable development in Sweden, and to investigate what functions the technologies could potentially contribute with in addition to electricity generation in Swedish society. Life cycle assessment were used to compare the ecological impact of technologies and the UN's Sustainable Development Goals were the basis for a more comprehensive sustainability analysis. Through an explorative literature study, indicators on economic, ecological and social sustainability were compiled and whether the various electricity generators contribute to the Sustainable Development Goals.

There are uncertainties in the estimated costs of GenIV-nuclear power as no complete systems are currently operated commercially. The reason is that GenIV-nuclear power is not economically sustainable against other power sources. By contrast, GenIV-nuclear power contributes with less greenhouse gas emissions and is therefore ecologically competitive. From a societal perspective, GenIV-nuclear power could contribute with consistent electricity generation and inertia, which are the prerequisites for a stable electricity supply. As GenIV-nuclear power cannot currently be implemented on market terms, it cannot contribute to achieving the Sustainable Development Goals by 2030, which wind power has great potential for.

Keywords: GenIV-nuclear power, Wind power, Sustainability

Note: The report is written in Swedish.

## SAMMANFATTNING

Klimatförändringarna är ett akut problem och hållbar utveckling är en förutsättning för att tillgodose dagens behov utan bekostnad på framtida generationer. Det svenska elbehovet förväntas öka med upp till 60 % fram till år 2045, samtidigt som det sker en avveckling av den svenska kärnkraften. Frågan är vilken eller vilka elproduktionsslag som på ett hållbart sätt kan tillgodose behovet som uppstår. Syftet med studien var att jämföra nästa generations kärnkraft, GenIV-kärnkraft, med vindkraft utifrån hållbar utveckling i Sverige, samt undersöka vilka funktioner teknikerna potentiellt kan bidra med utöver elproduktion i det svenska samhället. Livscykelanalyser användes för att jämföra teknikernas ekologiska påverkan och FN:s globala mål låg till grund för en mer övergripande hållbarhetsanalys. Genom en explorativ litteraturstudie sammanställdes indikatorer över ekonomisk, ekologisk och social hållbarhet samt huruvida de olika elproduktionsslagen bidrar till de globala målen.

Det råder osäkerheter i de beräknade kostnaderna för GenIV-kärnkraft eftersom kompletta system inte drivs kommersiellt i dagsläget. Anledningen är att GenIV-kärnkraft inte är ekonomiskt hållbart gentemot alternativa elproduktionsslag. Däremot bidrar GenIV-kärnkraft med mindre utsläpp av växthusgaser och är därför ekologiskt konkurrenskraftigt. Ur ett samhällsperspektiv skulle GenIV-kärnkraft kunna bidra med jämn elproduktion och svängmassa som är förutsättningar för stabil elförsörjning. Eftersom GenIV-kärnkraft i dagsläget inte kan implementeras på marknadsmässiga villkor kan den inte bidra till att uppnå de globala målen till år 2030, något som vindkraften har stor potential till.

Nyckelord: GenIV-kärnkraft, Vindkraft, Hållbarhet

Notera: Rapporten är skriven på svenska.



# Förord

Denna uppsats är vår slutexamination för en kandidatexamen och är skriven på avdelningen Environmental System Analysis på institutionen för Teknikens ekonomi och organisation vid Chalmers tekniska högskola under vårterminen 2020.

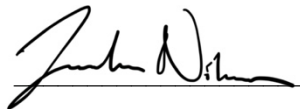
Vi vill rikta ett stort tack till våra två handledare Anna Nyström Claesson, Universitetsadjunkt vid Teknikens ekonomi och organisation samt Klara Insulander Björk, forskare inom subatomär-, högenergi- och plasmafysik vid institutionen för Fysik. Vi vill tacka er för er strålande vägledning, uppmuntran och expertis vilken varit ovärderlig för arbetet.

Vi vill även tacka de personer som ställt upp på intervjuer, intervjuerna har hjälpt oss att navigera inom ett väldigt brett ämne och haft stor påverkan på vår arbetsprocess.

Chalmers tekniska högskola  
Göteborg, Sverige  
14:e maj 2020



David Arvidsson



Johan Nilsson



Axel Emanuelsson



Adam Pauli



Linn Fredriksson



Filip Schwartz



# Innehållsförteckning

<b>NOMENKLATUR</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INLEDNING</b> .....	<b>3</b>
1.1 SYFTE .....	3
1.2 AVGRÄNSNINGAR .....	4
<b>2. BAKGRUND</b> .....	<b>5</b>
2.1 SVERIGES ELSYSTEM .....	5
2.2 FN:S GLOBALA MÅL FÖR HÅLLBAR UTVECKLING.....	6
2.3 LIVSCYKELANALYS.....	8
2.4 DAGENS KÄRNKRAFT .....	11
2.5 VINDKRAFT.....	18
2.6 ELPRODUKTION I FRAMTIDEN .....	22
2.7 GENIV-KÄRNKRAFT .....	25
<b>3. METOD</b> .....	<b>30</b>
3.1 LITTERATURSTUDIE .....	30
3.2 INTERVJUER.....	30
3.3 LIVSCYKELPERSPEKTIV .....	31
3.4 INDIKATORER.....	34
3.5 GLOBALA MÅLEN.....	35
3.6 ANALYSSTRATEGI .....	35
<b>4. RESULTAT</b> .....	<b>36</b>
4.1 KOSTNADER .....	36
4.2 MILJÖPÅVERKAN .....	36
4.3 SAMMANSTÄLLNING INDIKATORER .....	40
4.4 JÄMFÖRELSE UTIFRÅN DE GLOBALA MÅLEN .....	41
<b>5. ANALYS</b> .....	<b>43</b>
5.1 EKONOMISK OCH EKOLOGISK HÅLLBARHET .....	43
5.2 TEKNIKERNAS BIDRAG TILL DE GLOBALA MÅLEN.....	45
5.3 GENIV-KÄRNKRAFT OCH VINDKRAFT UR ETT SAMHÄLLSPERSPEKTIV .....	46
<b>6. DISKUSSION</b> .....	<b>48</b>
6.1 METODKRITIK.....	48
6.2 ETISKA DILEMMA.....	49
6.3 RESULTATVALIDITET.....	50
6.4 VIDARE STUDIER.....	50
<b>7. SLUTSATS</b> .....	<b>51</b>
<b>KÄLLFÖRTECKNING</b> .....	<b>52</b>
<b>BILAGA 1</b> .....	<b>61</b>

# Nomenklatur

*Aktinider* - Grundämnen med lång halveringstid och därmed låg radioaktivitet.

*CO<sub>2</sub>-ekvivalent* - Mått på utsläpp av växthusgaser vars potential för global uppvärmning sätts i relation till potentialen för CO<sub>2</sub>.

*Fission* - Klyvning av atomkärnor, genom beskjutning av neutroner. En process som frigör energi.

*Fissionsprodukter* - Grundämnen med kort halveringstid och därmed hög radioaktivitet.

*Förnybar energi* - Energi som kommer från källor som naturligt förnyas.

*Ganexprocessen* - En process för att återvinna kärnbränsle.

*kWh* - Energienheter. 1 kWh är den mängd energi som 1 kW energikällan producerar under 1 h arbete.

*Livscykelanalys (LCA)* - Kartläggning av en produkts totala miljöpåverkan genom hela dess livscykel.

*Miljövarudeklaration (EPD)* - Internationell standard för att redovisa en produkts miljöpåverkan.

*Moderator* - Ämne som används för att sänka hastigheten på snabba neutroner för att underhålla kedjereaktionen i en reaktor.

*Purexprocessen* - Den process som möjliggör upparbetning.

*Snabb neutron* - Neutron med hög hastighet som har relativt låg chans att få <sup>235</sup>U att fissionera.

*Svängmassa* - Tung rörelseenergi som ger elnätet tid att upprätthålla elbalansen.

*Termisk neutron* - Neutron som saktats ned av en moderator och relativt hög chans att få <sup>235</sup>U att fissionera.

*Upparbetning* - Process som omvandlar använt bränsle från kärnkraftverk så att det kan användas igen.

# 1. Inledning

För att bekämpa klimatförändringarna krävs miljövänliga energikällor vilket gör att behovet av hållbar elproduktion ökar. Genom Parisavtalet fastställdes ett mål att hålla en global temperaturökning under 2°C detta århundrade samt att försöka eftersträva ett mer krävande mål genom att hålla temperaturökningen under 1,5°C. Vidare är avtalet ett medel för att öka länders benägenhet att ta ställning till klimathotet och engagera sig i att minska utsläppen av växthusgaser (United Nations, 2015). Dessutom har Sveriges regering som mål att Sverige ska vara helt klimatneutralt och fossilfritt vid år 2045 (Bengtsson, 2019). Även de globala målen är ett initiativ till att lösa klimatkrisen, samt avskaffa extrem fattigdom, minska ojämlikheter och orättvisor i världen, främja fred och rättvisa till år 2030 (UNDP, 2020).

Det pågår en debatt om huruvida kärnkraften har en roll i det svenska elsystemet eller ej då det inte är ett förnybart elproduktionsslag (Vattenfall, 2019). Kärnkraften har länge förknippats med stora risker för samhället i och med olyckorna som exempelvis Tjernobyl 1986 och Fukushima 2011 (Strålsäkerhetsmyndigheten, u.å.). Sedan dagens befintliga reaktorer konstruerades har utvecklingen inom kärnkraft kommit långt, men trots det får tekniken ingen bred politisk acceptans, främst på grund av risker, men även på grund av att avfallshanteringen är en krävande och långvarig process. Det har sedan 60-talet forskats kring GenIV-kärnkraft som bygger på återvinning av kärnavfall, men det konkurrerades ut av andra lättare och billigare reaktorkoncept (Haas m.fl, 2019). Fördelarna med återvinning är att många gånger mer energi kan utvinnas ur samma mängd kärnbränsle, mängden radioaktivt avfall kan minskas och slutförvaringstiden förkortas. En annan fördel med GenIV-kärnkraft är de nya säkerhetssystemen som minskar risken för olyckor. Ett alternativ till kärnkraften som är mycket aktuellt i Sverige är vindkraften. Det är ett helt förnybart elproduktionsslag som växer i den svenska elproduktionen. Vindkraften har utmaningar främst i form av intermittens. Ur ett helhetsperspektiv blir även distributionen av energi en avgörande fråga i framtiden (ABB u.å; Vattenfall, u.å.). Sverige är beroende av stabil och konsekvent elproduktion. Kärnkraft bidrar till ett stabilt system medan vindkraft ger en inkonsekvent elproduktion (Svenska kraftnät, 2017). Det finns fördelar med GenIV-kärnkraft men även en del utmaningar som är anledningen till att det inte finns något GenIV-system i drift i Sverige idag (Westlén, 2016).

## 1.1 Syfte

Syftet med studien var att jämföra GenIV-kärnkraft och vindkraft utifrån hållbar utveckling i Sverige samt att undersöka vilka funktioner GenIV-kärnkraft och vindkraft potentiellt kan bidra med utöver elproduktion i det svenska samhället.

Utifrån syftet formulerades följande forskningsfrågor:

- Kan GenIV-kärnkraft vara ekonomiskt och ekologiskt hållbart jämfört med vindkraft?
- Hur bidrar teknikerna till FN:s globala mål för hållbar utveckling?
- Hur bidrar GenIV-kärnkraft jämfört med vindkraft ur ett samhällsperspektiv?

## 1.2 Avgränsningar

Studien har avgränsats till Sverige då en global undersökning skulle bli alltför omfattande. Ytterligare avgränsning har gjorts till att jämföra endast GenIV-kärnkraft med vindkraft då denna är det främsta hållbara alternativet i Sverige. Solkraft har exkluderats ur studien på grund av dess låga utbredning i Sverige och även vattenkraft har exkluderats då utbyggnad av vattenkraft inte är aktuellt på grund dess stora inverkan på den lokala miljön.

## 2. Bakgrund

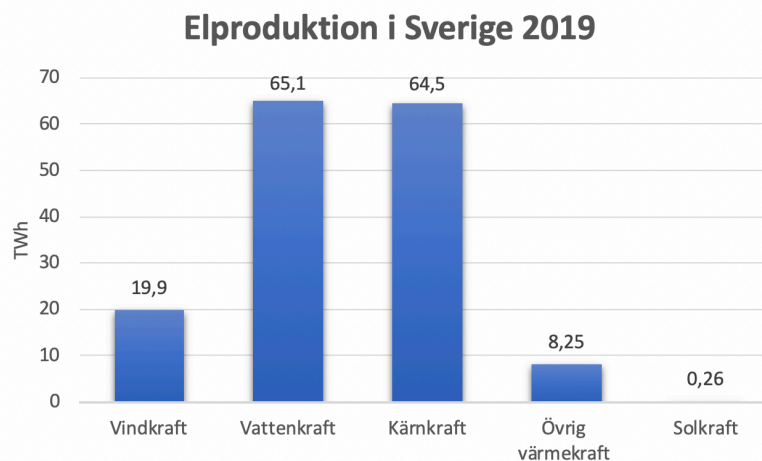
I följande avsnitt presenteras bakgrund kring ämnet samt relevanta teoretiska ramverk som livscykelperspektiv och FN:s globala mål för hållbar utveckling.

### 2.1 Sveriges elsystem

Elektricitet förbrukas i samma stund som den produceras, vilket innebär att elproduktion och eldistribution måste vara synkroniserat i elsystemet. För att systemet ska vara fungerande måste det finnas möjlighet att i realtid hantera förändringar i utbud och efterfrågan på elektricitet, vilket ställer höga krav på elproduktionen och eldistributionen (Uniper, 2019). I följande avsnitt presenteras Sveriges elproduktion och därefter eldistribution.

#### 2.1.1 Elproduktion

Elproduktionen i Sverige är till 98% fossilfri och utgörs främst av el producerat av kärnkraft och vattenkraft, men även bland annat vindkraft, solkraft och övrig värmekraft. Enligt Climate Change Performance Index (CCPI) rankas Sverige som det bästa av 58 länder vad gäller utsläpp av växthusgaser samt bland de fyra bästa vad gäller förnybar elproduktion och klimatpolicy (CCPI, 2020). I övrig värmekraft inkluderas el producerat från fossila bränslen samt biobränslen. Under 2019 producerades totalt 163 TWh i Sverige, varav kärnkraft och vattenkraft tillsammans stod för ca 80% och vindkraft för ca 12% av produktionen (Svenska kraftnät, 2020). Figur 2.1 ger en överblick av Sveriges elproduktion 2019.



*Figur 2.1 Sveriges elproduktion fördelat på vindkraft, vattenkraft, kärnkraft, övrig värmekraft samt solkraft baserat på statistik från svenska kraftnät*

Kärnkraften stod 2019 för 41% av elproduktionen i Sverige, vilket motsvarade ca 64 TWh. Det finns för närvarande tre kärnkraftverk med tillhörande reaktorer i drift; Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Det pågår just nu en avveckling av kärnkraften och 2017 stängdes två av tre reaktorer i Oskarshamn ned, Ringhals 2 stängde ned 2019 och Ringhals 1 kommer att tas ur drift under 2020. Kärnkraften står tillsammans med vattenkraften för Sveriges baskraft (Uniper, 2019).

Den svenska vindkraften domineras av landbaserad vindkraft där utbyggnad pågår i hela landet (Energimyndigheten, 2020). Enligt Energimyndighetens korttidsprognos för perioden 2018 till 2022

kommer vindkraftens kapacitet i Sverige fördubblas från 17 TWh 2018 till 38 TWh 2022 (Energimyndigheten, 2020). Exempel på utbyggnation av vindkraften är vindkraftsparken Blakliden/Fäbodberget som kommer bestå av totalt 84 vindkraftverk och beräknas leverera elektricitet från och med år 2022 (Vattenfall, u.å.).

Vattenkraften stod 2019 också för ca 40% av Sveriges elproduktion och fungerar väl som en reglerkraft för elsystemet och kan komplettera andra mindre pålitliga energikällor (Energimyndigheten, 2020). Vilket bidrar med stabilitet till elsystemet och kompletterar intermittenta energikällor på ett bra sätt.

### 2.1.2 Eldistribution och balans i elnätet

Den producerade elektriciteten behöver distribueras till olika geografiska platser, vilket sker genom elnätet som består av lokal-, region- och transmissionsnätet (Svenska kraftnät, 2020). Utbyggnationen av förnybar elproduktion, främst av vindkraft kräver en omfattande utbyggnad av det svenska transmissionsnätet, för att möjliggöra distribution över långa sträckor av elektriciteten vilken vindkraften producerar (Svenska kraftnät, 2020).

Enligt Svenska kraftnät fungerar inte det svenska elsystemet om produktion och förbrukning av el ej balanserar vid varje given tidpunkt. Balanshållningen mellan produktion och användning bygger på planering av produktionen. De balansansvariga företagen gör prognoser för användningen och producerar elektricitet utefter prognoserna (Svenska kraftnät, 2016). För att säkerställa balansen i systemet hålls elektricitetens frekvens runt 50 Hz (Uniper, 2018). Systemets förmåga att upprätthålla frekvensen är beroende av den så kallade svängmassan, den tunga rörelseenergi som finns i turbiner och generatorer i vatten- och kärnkraften, i elsystemet (Uniper, 2018). Med mycket svängmassa får systemet mer tid att justera frekvensen och är mer stabilt (Sweco, 2016). Enligt Sweco medför de stora generatorer som vattenkraft och kärnkraft drivs av en hög grad av svängmassa till elsystemet, medan vindkraft och solkraft i nuläget saknar denna balanserande funktion. Allteftersom kärnkraften avvecklas och väderberoende energikällor byggs ut blir det allt mer komplicerat att upprätthålla balansen i systemet (Svenska kraftnät, u.å.). Utan bidraget av svängmassa från dagens kärnkraftsreaktorer skulle frekvensen i det svenska kraftnätet under år 2021 vid en plötslig störning löpa stor risk att hamna under 49,0 Hz. Det kan i värsta fall leda till kaskadeffekter och en total mörkläggning av hela landet (Sweco, 2016). På lång sikt måste det på grund av den pågående avvecklingen av kärnkraftverk tillföras ny svängmassa till systemet. Det finns olika tekniska lösningar för hur det kan göras, men oavsett vilken lösning som väljs innebär den betydande kostnader. Det finns i nuläget ingen uppskattning för hur stora dessa kostnader kan bli (Sweco, 2016). Avvecklingen av befintlig kärnkraft kan alltså innebära en större risk för nationell effektbrist. För att undvika effektbrist kan Svenska kraftnät förbereda en effektreserv eller avtala med stora elanvändare om att temporärt minska sin elförbrukning. Övriga åtgärder omfattar handel med grannländer och som sista åtgärd kan en manuell förbrukningsfrånkoppling göras, vilket innebär att Svenska kraftnät beordrar underliggande nät att göra vissa regioner strömlösa till följd av att elen inte räcker till (Svenska kraftnät, 2017).

## 2.2 FN:s globala mål för hållbar utveckling

De 17 globala målen fastslogs 2015 av FN:s 193 medlemsländer för att ge en agenda kring hållbar utveckling. Målen innebär bland annat att världen ska till senast år 2030 utrota extrem fattigdom, minska ojämlikheter och orättvisor i världen, behålla och främja fred och rättvisa, och lösa den globala klimatkrisen (UNDP, 2007). Därför anses de globala målen vara ett bra verktyg för att jämföra olika elproduktionslag med avseende på hållbarhet. Fem av de globala målen ansågs extra relevanta för

denna studie. Dessa mål, med tillhörande delmål, presenteras i följande avsnitt och används senare för att jämföra GenIV-kärnkraft och vindkraft utifrån hållbar utveckling.

### 2.2.1 Mål 7 - Hållbar energi för alla

En av de viktigaste målen för studien anses vara mål 7 och i synnerhet delmål 7.2 - "Ökad andel förnybar energi i världen". Hållbar energi är en förutsättning för hållbar utveckling av samhället. Tillgången till hållbar, tillförlitlig och förnybar energi samt rena bränslen är förutsättningar för att kunna möta flera av de utmaningar som de globala målen skildrar, till exempel klimatkrisen. En stor del av jordens befolkning har inte tillgång till elektricitet, samtidigt som efterfrågan på energi globalt väntas öka med 37 procent till år 2040 (Globala Målen, 2020). Diskussionen kring hållbar energi inkluderar både vindkraft såväl som GenIV-kärnkraft.

### 2.2.2 Mål 9 - Hållbar industri, innovationer och infrastruktur

Grunden för alla framgångsrika samhällen är en fungerande och stabil infrastruktur och för att möta framtida utmaningar måste industrier och infrastruktur göras mer inkluderande och hållbara. Innovation och teknologiska framsteg är en avgörande faktor för att hitta hållbara lösningar för ekonomiska- och klimatmässiga utmaningar. Det bidrar till att skapa nya marknader och arbetstillfällen som kan bidra till en effektiv resursanvändning. Dessutom är investering i hållbara industrier, forskning, miljövänlig teknik och innovation viktiga sätt att skapa förutsättningar för en hållbar utveckling (Globala Målen 2020). Eftersom studien behandlar olika elproduktionsslag, vilket är en viktig del av landets infrastruktur anses mål 9 vara relevant. Studien fokuserar på framtida elproduktionsslag och därmed är delmål 9.4 "Uppgradera all industri och infrastruktur för ökad hållbarhet" relevant. Enligt globala Målen skall infrastrukturen rustas upp och industrin göras mer hållbar, med effektivare resursanvändning och flera rena och miljövänliga tekniker och industriprocesser till år 2030.

### 2.2.3 Mål 13 - Bekämpa klimatförändringar

Mål 13 och i synnerhet delmål 13.2 "Integrera åtgärder mot klimatförändringar i politik och planering" hänvisar till att klimatförändringar är ett verkligt och obestridligt hot mot dagens civilisation. Global uppvärmning skulle kunna medföra allvarliga konsekvenser för bland annat ekosystem, havsförsurning och vattentillgång. För att klara av utmaningen krävs att klimatlösningar integreras i politiken och planering på nationell nivå (Globala målen, 2020). Mål 13 anses relevant eftersom investeringar i eventuella elproduktionsslag påverkas mycket av politiken.

### 2.2.4 Mål 16 - Fredliga och inkluderande samhällen

Mål 16 handlar om att främja fredliga och inkluderade samhällen för hållbar utveckling, förse alla med rättvisa och bygga upp effektiva och jämlika institutioner med ansvar på alla nivåer (Globala Målen, 2020). Mål 16 anses relevant till projektet eftersom tekniken bakom GenIV-kärnkraft förändrar bränslecykeln och potentiellt kan minska spridning av kärnvapen. Studien berör specifikt delmål 16.4 "Bekämpa organiserad brottslighet och olaga finans- och vapenflöden" i synnerhet när det gäller kampen mot organiserad brottslighet kring kärnvapen och hoten mellan stormakter i världen gällande potentiella kärnvapenkrig. Delmål 16.4 har som mål att till 2030 minska de olagliga ekonomiska flöden samt vapenflöden och bekämpa alla former av organiserad brottslighet (Globala målen, 2020).

## 2.2.5 Mål 17 - Genomförande och globalt partnerskap

De globala målen kan inte förverkligas utan samarbete och globalt partnerskap. Vidare skall inget land eller någon grupp lämnas utanför utvecklingen och detta kräver bland annat globalt samarbete. Internationella investeringar och samordnad politik behövs för att säkerställa bland annat nyskapande teknisk utveckling. Mål 17 och specifikt delmål 17.6 "Samarbeta och dela kunskap kring vetenskap, teknik och innovation" anses relevant eftersom för stora teknikutvecklingar såsom GenIV-kärnkraft kommer ett tätt samarbete bli avgörande då enskilda länder inte kommer ha tillräckliga resurser för vidareutveckling och implementering (Westlén, 2016).

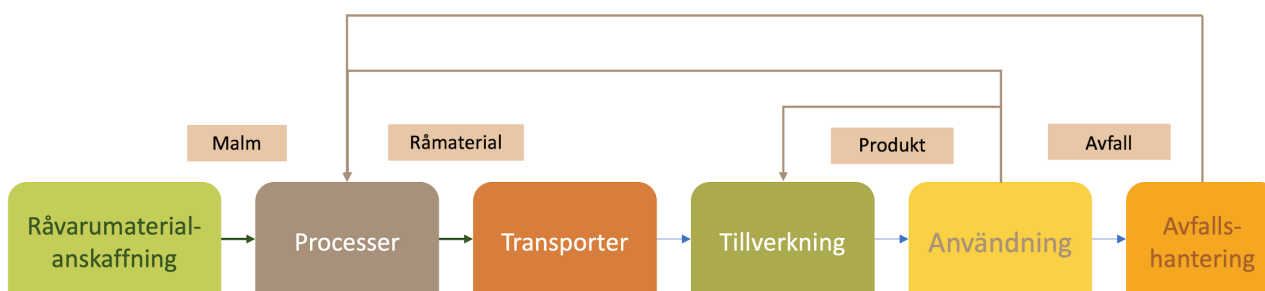
## 2.3 Livscykelanalys

Följande avsnitt beskriver vad en livscykelanalys (LCA) är, hur ett tillhörande flödesschema vanligtvis ser ut, hur metodiken kring LCA ser ut samt hur analys av data går till.

### 2.3.1 Livscykelmodellen

En livscykelanalys (LCA) är en kartläggning av en produkts miljöpåverkan genom hela livscykeln (Baumann & Tillman, 2004). Det finns flera internationella standarder för hur en LCA ska se ut men det är definierat som en metod för att bedöma olika miljöaspekter. Samtliga processer i en produkt eller ett system analyseras för att kartlägga den totala miljöpåverkan, från utvinning av råmaterial genom tillverkning och användning till avfallshantering. Eftersom metoden är standardiserad går det därför att jämföra olika teknikers eller tekniska lösningars miljöpåverkan mot varandra med hjälp av en funktionell enhet. En funktionell enhet är en enhet som är central för de undersökta teknikerna eller tekniska lösningarna. Till exempel kan den funktionella enheten vid jämförelse av två elproduktionslag vara 1 kWh (Baumann & Tillman, 2004).

En livscykelanalys kan hantera olika sorters miljöbelastande aspekter, exempelvis utsläpp av växthusgaser eller negativa konsekvenser för biologisk mångfald och behandlade aspekter kan variera beroende på LCA:ns syfte. En LCA inkluderar traditionellt sex steg under produktens livstid; råmaterialanskaffning, processer, transporter, tillverkning, användning och avfallshantering.



Figur 2.2 Cirkulär livscykelmodell där återvinningsflöden presenteras i form av bakåtpilar. Produkterna av processerna presenteras i små bruna boxar på pilarna

Under dessa sex steg samlas data in om systemet gällande de aspekter som valts att jämföras och beskrivs i relation till den valda funktionella enheten. Varje miljöbelastande aspekt för varje steg genom produktens livscykel adderas och sätts i relation till den funktionella enheten varpå olika produkter kan jämföras (Baumann och Tillman, 2004). Vidare samlas data gällande de undersökta aspekterna in för



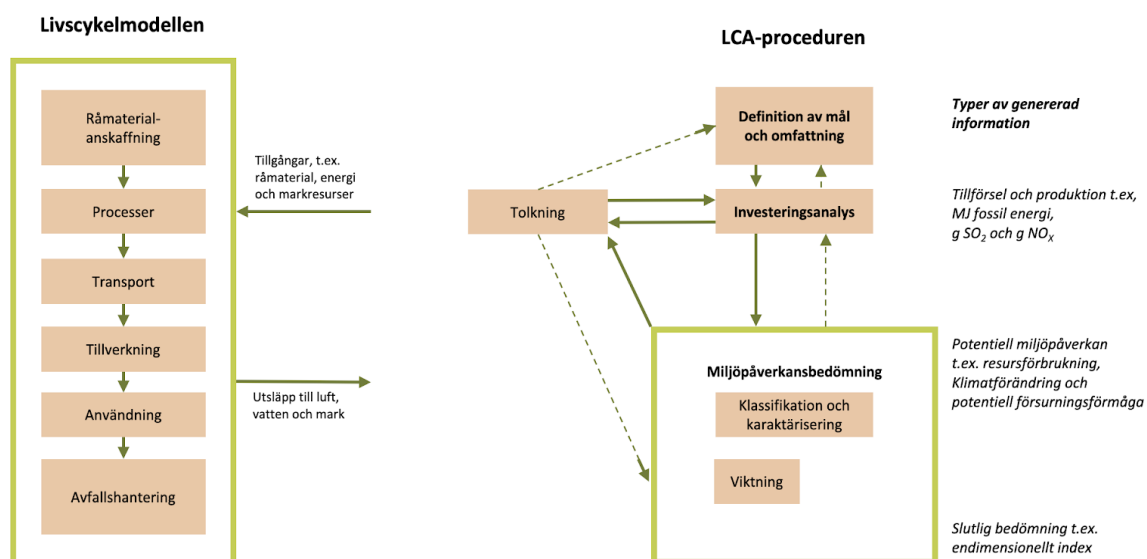
de inflöden och utflöden som produkten har. Dessa inflöden och utflöden är miljöpåverkande steg som beror på produkten men som inte är en direkt del eller följd av de tidigare nämnda sex stegen. För att utföra en livscykelanalys visualiseras produktens livscykel i en livscykelmodell. En livscykelmodell kan beskrivas både med linjära och cirkulära flöden, vilket illustreras i Figur 2.2 där bakåtpilarna representerar återflöden. Anledningen till att ha livscykelmodeller är för att det ska bli enkelt och tydligt att ta fram värden för varje process. När det finns värden för alla steg av produktens livscykel kan olika livsstadier jämföras och analyseras (Baumann och Tillman, 2004).

### 2.3.2 LCA-metodik

LCA-proceduren utförs enligt Baumann och Tillman i fyra steg:

1. **Definition av mål och omfattning.** Fastställ hur undersökningen av systemet ska göras och vad som är syftet med den aktuella LCA:n. Fastställ funktionell enhet, systemavgränsningar och vilka aspekter som ska inkluderas.
2. **Inventeringsanalys.** Utveckla en systemmodell baserat på de krav som ställts upp i definition av mål och omfattning. Systemmodellen är uppbyggd som en flödesmodell över ett tekniskt system med sina egna specifika systemgränser, vilka fastställer vilken del av en produkt eller system som ska studeras
3. **Miljöpåverkansbedömning.** Översätt de miljömässigt relevanta belastande flödena till mer miljömässigt relevant information. Det innefattar information som beskriver den direkta miljöpåverkan mer än bara information om utsläpp och resursanvändning som presenteras i Inventeringsanalysen. Beskriver därmed den direkta miljöbelastningen som produkten bidrar med.
4. **Tolkning.** Tolkning av insamlad data och information sker genom hela LCA-proceduren som kan ses i Figur 2.3.

Se Figur 2.3 för illustration av en linjär livscykelmodell och LCA-proceduren.



Figur 2.3 Livscykelmodellens- och LCA-procedurens flödesschema. I livscykelmodellen innebär bruna boxar fysiska processer och pilar innebär energiflöden och materialflöden. I LCA-proceduren innebär bruna boxar steg i proceduren och heldragna pilar anger stegens ordningsföljd. Streckade pilar anger möjliga upprepningar i proceduren

### 2.3.3 Biotopmetoden

En LCA innefattar även markanvändning och dess påverkan på biologisk mångfald som följd av exploatering av land och vatten, vilket kan kvantifieras med hjälp av Biotopmetoden, utvecklad av Vattenfall. Metoden baseras på jämförelser av den aktuella biotopen före och efter projektets utveckling. Enligt biotopmetoden syftar *före* till situationen innan konstruktionsarbetet påbörjades och *efter* till situationen efter att biotopen har stabiliserats under de nya förhållandena. Det grundläggande antagandet är att förändring i biologisk mångfald, orsakad av användning av mark och vatten, reflekteras i förluster eller vinster av varierande typer av biotoper. Metoden inkluderar de aktiviteter som direkt kan kopplas till förändring av biologisk mångfald, medan indirekt påverkan exkluderas (Vattenfall, 2015).

Biotopmetoden utgörs av fyra steg:

1. **Avgränsning.** Redogör för information om anläggningen samt fastläggning av systemgränser.
2. **Identifiering av biotop.** Redogör och ta fram information om vilka biotoper som är närvarande genom att undersöka material, bilder och genom att besöka områdena. Kvantifiera biotoperna genom att ge dem värden.
3. **Kategorisering av biotop.** Bedömning av biotopens kvalitet i både före och efter den har stabiliserats. En biotops kvalitet är till för att förmedla vikten av just den biotopen i förhållande till andra i undersökningen. Kvaliteten kan vara kritisk biotop, ovanlig biotop, allmän biotop och teknotop. En kritisk biotop är ett område som av sin struktur, innehåll av arter, historia och fysiska miljö har stor betydelse för flora och fauna. I denna miljö lever, eller kan det leva, utrotningshotade arter. En sällsynt biotop är en biotop som avviker från dess omgivning genom en stor tillgång av arter, existens av sällsynta arter eller arter av betydande funktion. En Teknotop är områden utan förutsättningar för biologisk produktion, exempelvis hårdgjorda ytor och byggnader. Slutligen är en allmän biotop övriga biotoper som inte kan tilldelas till någon av de övriga kategorierna.
4. **Rapportering av resultat.** Verksamheten betygsätts med en kvalitetsnivå: A, B eller C, varav A representerar högsta kvalitet.

Påverkan på den biologiska mångfalden beror alltså på relationen mellan kvaliteten på biotopen före konstruktionen påbörjades och efter att biotopen har stabiliserats till de nya förhållandena. Gällande kärnkraften har Vattenfall studerat livscyklerna för Forsmark och Ringhals, där varje respektive process inom livscykeln betygsattes med A, B eller C utifrån påverkan på biologisk mångfald. Gällande vindkraften har studier gjorts på 10 olika vindkraftsparker i Sverige, Danmark, Tyskland, Storbritannien och Nederländerna, där varje vindkraftspark betygsätts på samma sätt. Baserat på dessa resultat ges hela livscykeln ett betyg där A ges om > 75 % av processerna är av kvalitetsnivå A, betyg B ges om > 75 % av processerna är av kvalitetsnivå A eller B medan betyg C ges i alla övriga fall (Vattenfall, 2015).

### 2.3.4 Miljövarudeklaration

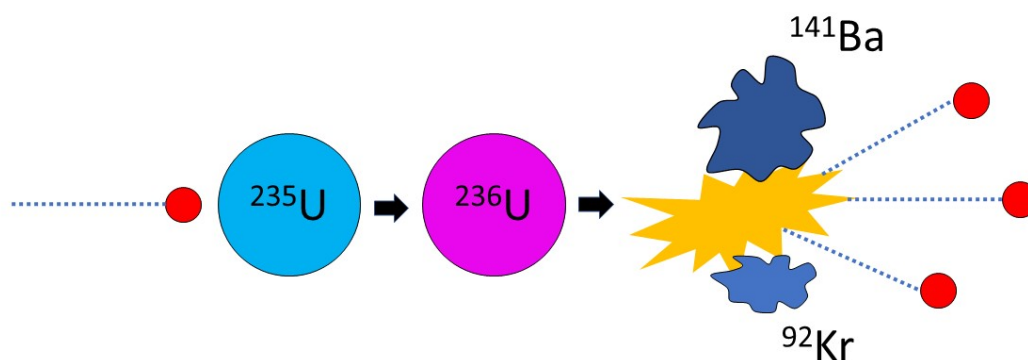
EPD-systemet (Environmental Product Declaration; miljövarudeklaration) känt som miljömärkning typ III och standardiserad av ISO 14025, etablerar principer och specificerar procedurer för produktutveckling. En miljövarudeklaration är ett dokument som hör till en produkt och sammanfattar beskrivningen av miljöpåverkan, baserat på LCA-metodiken, och valideras av dess självständighet. Informationen är objektiv, kvantifierbar, verifierbar, jämförbar, och pålitlig, och används primärt för kommunikation mellan företag (Maria Proto, 2010).

## 2.4 Dagens kärnkraft

I följande avsnitt presenteras fission, som är den fysikaliska process som tillämpas vid utvinning av energi i ett kärnkraftverk, en kort beskrivning av olika generationer av kärnkraft, bränslecykeln för dagens kärnkraft samt olika utmaningar som kärnkraften står inför idag.

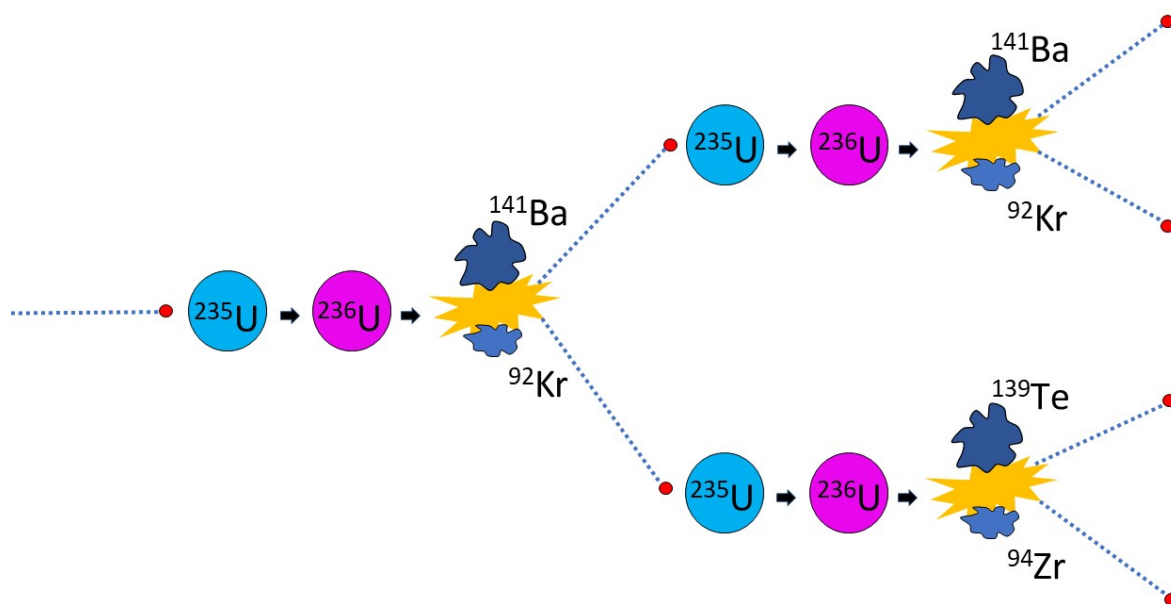
### 2.4.1 Fission och periodiska systemet

Kärnkraftverk producerar elektricitet genom att använda den energi som frigörs vid en process som kallas fission vilket innebär att atomkärnor splittras genom att de träffas av fria neutroner (WNA, 2018). Ett kilo naturligt förekommande uran kan genom fission i teorin frigöra cirka 140 GWh energi vilket motsvarar produktionen från en 1000 MW koleldad anläggning som arbetar på full effekt i nästan sex dagar (Breeze, 2014). Naturligt förekommande uran består primärt av två isotoper, uran-235 ( $^{235}\text{U}$ ) och uran-238 ( $^{238}\text{U}$ ). Största delen är uran-238 men 0,7% är uran-235. När en atom av uran-235 eller uran-238 träffas av en neutron kan detta leda till att en fissionsreaktion uppstår. Fissionsprodukterna av denna reaktion fördelas slumpvis, störst sannolikhet är att det blir barium ( $^{141}\text{Ba}$ ) och krypton ( $^{92}\text{Kr}$ ) samt en avsevärd mängd energi och tre neutroner, se Figur 2.4.



Figur 2.4 Illustration av fissionsprocessen

Naturligt förekommande uran kan användas som bränsle vid fissionsreaktioner men i de flesta fall används uran som genomgått en anrikningsprocess och innehåller därmed mer uran-235 än vad det normalt skulle göra, en anrikning till ungefär 4-5% är vanligt. I reaktorn startas en kedjereaktion, det vill säga att en neutron kolliderar med en uranatom som klyvs. Detta leder i sin tur till att fler neutroner frigörs som sedan klyver andra uranatomer som splittras och frigör energi. (WNA,2018), se Figur 2.5.



Figur 2.5 Illustration av kedjereaktionen där uran sönderfaller till barium och krypton, samt tellur och zirkonium (WNA, 2018)

Neutronerna i reaktorn kan ha olika hastigheter. De neutroner som frigörs vid fission har hög hastighet och kallas för snabba neutroner och de som saktas ner kallas termiska neutroner. Sannolikheten att uran-235 ska fissionera är större när termiska neutroner används och är att föredra i dagens kärnkraftverk. Energin i atomkärnan omvandlas till kinetisk energi i neutronerna. Kinetisk energi från dessa neutroner kommer att skingras vid kollision med andra atomer och molekyler inom reaktorhärden. Det är genom att sakta ned neutronerna med en moderator och kontrollera antalet neutroner inom reaktorhärden som kedjereaktionen kan underhållas i kärnkraftverk. Vatten utgör en bra moderator som används i de flesta aktiva reaktorerna. Energin absorberas i vattnet och i takt med att neutronerna saktas ned stiger temperaturen på vattnet. Genom att sedan föra vattnet till en värmeväxlare kan denna värme koka vattnet som bildar ånga och driver en turbin. Med en generator omvandlas sedan rörelseenergin från turbinen till elektricitet. (Breeze, 2014).

I en kärnreaktor bildas fissionsprodukter och aktinider. Fissionsprodukterna bildas när atomkärnorna i bränslet klyvs och därmed sönderfaller till lättare grundämnen vilka har olika hög grad av radioaktivitet. Fissionsprodukter har ofta hög radioaktivitet och kort halveringstid och behöver lagras i några hundra år. Om fission inte sker utan neutronen fångas in uppstår aktinider med lägre radioaktivitet men längre halveringstid, som kan behöva lagras i 100 000 år (Asprey & Morss, 2013). Den radioaktiva strålningen som uppstår utstrålar tillräckligt med energi för att kunna påverka atomerna i levande celler hos människor och därmed skada det genetiska materialet (EPA, 2011). Fissionsprodukterna och aktiniderna är ett problem när det gäller avfallshanteringen på grund av deras radioaktivitet och långa halveringstid (Asprey & Morss, 2013), se Figur 2.6 för typiska fissionsprodukter och aktinider i periodiska systemet.

Typiska fissionsprodukter

Typiska aktinider

1 IA 1A	2 IIA 2A											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A
1 H Hydrogen 1.008	2 He Helium 4.003											5 B Bor 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorin 18.998	10 Ne Neon 20.180
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											11 Al Aluminium 26.982	12 Si Silicon 28.086	13 P Phosphorus 30.974	14 S Sulfur 32.066	15 Cl Chlorin 35.453	16 Ar Argon 39.948
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 Sc Scandium 44.956	4 Ti Titanium 47.867	5 V Vanadium 50.942	6 Cr Chrom 51.996	7 Mn Mangan 54.938	8 Fe Järn 55.845	9 Co Cobalt 58.933	10 Ni Nickel 58.693	11 Cu Koppar 63.546	12 Zn Zink 65.38	13 Ga Gallium 69.723	14 Ge Germanium 72.631	15 As Arsen 74.922	16 Se Selen 78.971	17 Br Brom 79.904	18 Kr Krypton 83.798
19 K Kalium 39.098	20 Ca Kalcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chrom 51.996	25 Mn Mangan 54.938	26 Fe Järn 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Koppar 63.546	30 Zn Zink 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsen 74.922	34 Se Selen 78.971	35 Br Brom 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirkon 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybden 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Rutenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Kadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimon 121.760	52 Te Tellur 127.6	53 I Jod 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platin 195.085	79 Au Guld 196.967	80 Hg Kvicksilver 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Bly 207.2	83 Bi Bismut 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatin (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (278)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (280)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (289)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessin (294)	118 Og Oganesson (294)
		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967	
		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium (254)	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium (262)	

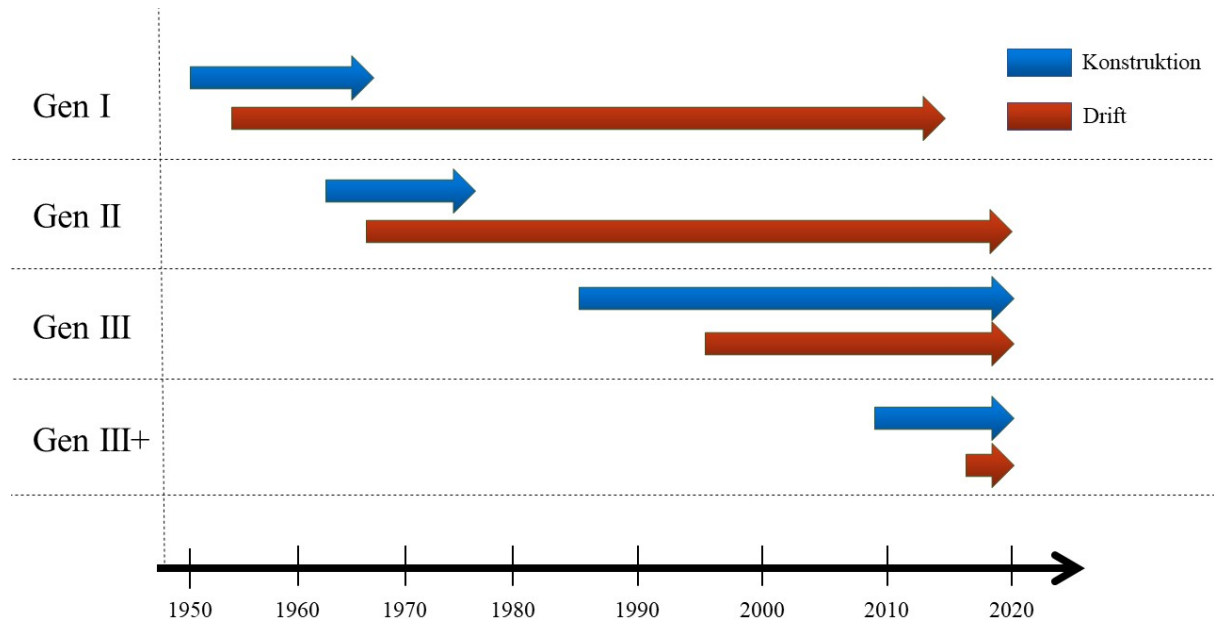
Figur 2.6 Fissionsprodukter och aktinider som finns i kärnavfallet direkt efter att det tagits ur reaktorn. Inringat i svart är uran och plutonium. Kärnavfallskomposition enligt Radioactivity.eu (u.å.). Black and White Periodic Table av Science Notes (2020)

## 2.4.2 Olika generationer av kärnkraftverk

Kärnkraftverken har utvecklats genom olika generationer där framförallt säkerheten förbättrats med passiva säkerhetssystem och effektivare bränsleanvändning. De första prototyperna av kärnkraftsreaktorer kallas för GenI och byggdes under 50- och 60-talet (Haas m.fl., 2019). De togs direkt från militära användningsområden för att användas kommersiellt utan att ett lämpligt säkerhetssystem utvecklades. De flesta tidiga reaktorerna var grafitmodererade, som innebär att kärnreaktorn inte är självstabiliserande vilket dagens lättvattenreaktorer är (International Atomic Energy Agency, 1986). Reaktorerna var därför väldigt svåra att reglera och blev på så sätt en säkerhetsrisk. GenII började användas under 1960-talet och de flesta av världens aktiva reaktorer klassas som GenII. Samtliga av Sveriges sju aktiva reaktorer är GenII (Strålsäkerhetsmyndigheten, u.å.; SKB, 2017). Den största skillnaden från GenI var att reaktorerna fick ett säkerhetssystem och reaktorerna var designade för att användas kommersiellt. Reaktorerna är oftast lättvattenreaktorer (LWR), men det finns även tungvattenreaktorer (HWR). Säkerhetssystemet i dessa reaktorer bygger på elektriska eller mekaniska system som startas antingen av operatör eller automatiskt om det behövs (Haas m.fl., 2019).

Vidare utvecklades system till GenIII och GenIII+ som på många sätt är lika GenII-reaktorerna fast med några förbättringar. De är utvecklade i syfte att öka säkerheten och effektiviteten. Genom GenIII minskade även risken för härdsmläta och bränslet kunde användas mer effektivt och genom detta även minska mängden avfall. Dessutom är de lättare att manövrera och mindre känsliga för driftstörningar. Tillgängligheten och livslängden förbättrades och livslängden blev nu ca 70 år, 30 år längre än livslängden för de tidiga GenII-reaktorerna (Haas, 2019). De första varianterna av GenIII reaktorer har varit i drift i Japan sedan 1996 och har fortsatt att utvecklas (WNA, 2020). Se Figur 2.7 för tidslinjen av kärnkraftens generationer.

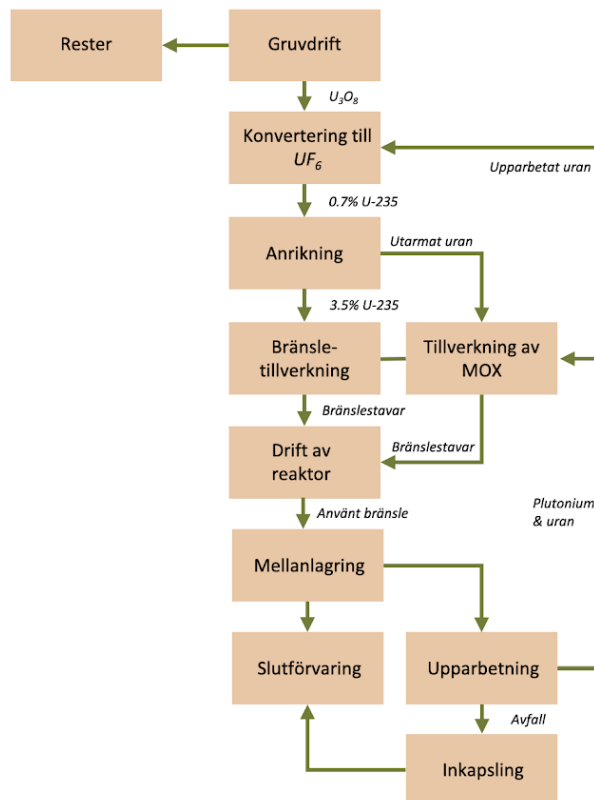
Teori, och prototyper av GenIV-reaktorer har funnits sedan 50-talet och arbetet för att konstruera ett GenIV-system har pågått länge. Det finns GenIV-reaktorer i drift, men inte ett komplett GenIV-system. Anledningen till att GenIV inte togs vidare var att det inte var tillräckligt konkurrenskraftig mot lättvattenreaktorer (WNA, 2020).



Figur 2.7 Grafisk presentation med tidslinje för de olika generationerna av kärnkraft. Inspiration från Haas m.fl (2019)

### 2.4.3 Bränslecykel för dagens kärnkraftverk

De olika aktiviteter som är förknippade med produktionen av elektricitet från kärnreaktioner kallas kollektivt för kärnbränslecykeln (WNA, 2017). Bränslecykeln för dagens kärnkraft presenteras i Figur 2.8.



Figur 2.8 Bränslecykel för dagens kärnkraft med inspiration från WNA (2017). Uranbrytning sker vid gruvdriften

I bränslecykeln bearbetas uran för att fungera i ett kärnkraftverk. Uranmalm bryts i gruvor och krossas därefter samt löses upp och kondenseras till uranoxid ( $U_3O_8$ ). I bearbetningen separerar man ut de naturligt förekommande radioaktiva isotoper som ligger i berggrunden tillsammans med uranet vilka separeras och isoleras från omgivningen (WNA, 2017), de benämns rester i Figur 2.8.  $U_3O_8$  raffinerar till urandioxid ( $UO_2$ ) som sedan konverteras till uranhexafluorid ( $UF_6$ ). I  $UF_6$  är den naturliga koncentrationen av uran-235 för låg för att användas som kärnbränsle och därför anrikas  $UF_6$  för att erhålla en ökad koncentration av uran-235 till 3-5%.

I bränsletillverkningen formas kärnbränslet till keramiska pellets som sedan innesluts i tuber som kallas bränslestavar. Bränslestavarna samlas ihop till en bränsleansamling som reaktorn består av. Flera hundra bränsleansamlingar utgör härden i en reaktor. Efter ungefär 18-36 månader är koncentrationen fissionsprodukter för liten för att kunna användas och tas då ur reaktorn. Mängden elektricitet som produceras från en bränsleansamling beror på vilken typ av reaktor och hur den används. Det använda bränslet har vanligtvis ungefär 1 % U-235, 0,6 % fissilt plutonium (totalt 1 % plutonium), 95 % U-238 och resten fissionsprodukter och andra aktinider. När bränslet tas från reaktorn ger det ifrån sig både

värme och radioaktiv strålning. En del av avfallet upparbetas för att därefter användas i reaktorn igen (WNA, 2017).

Efter att kärnbränslet varit i reaktorn måste det förvaras i cirka ett år i bassänger vid kärnkraftverken. Där kyls bränslet ner samtidigt som vattnet skyddar mot strålning. Därefter transporteras det använda kärnbränslet till mellanlagring. Där lagras kärnbränslet i vattenbassänger som finns i bergrum ungefär 50 meter under marken (Strålsäkerhetsmyndigheten, 2018).

Efter mellanlagring finns det två alternativ för det använda bränslet, det första alternativet är att upparbeta det så att den användbara delen av bränslet går tillbaka in i reaktorn. När kärnavfallet upparbetas separeras uranet och plutoniumet från avfallsprodukterna genom att ta isär bränslestavarna och lösa upp dem i syra för att separera de olika materialen (Ramanjuam, 1998). Detta sker genom purexprocessen där uran och plutonium renas och konverteras till oxider, medan fissionsprodukterna neutraliseras och lagras för efterföljande behandling och slutförvar. Då möjliggörs återvinning av uran och plutonium till nytt bränsle och en mindre mängd avfall. Uranet som tagits från upparbetningen kan användas som bränsle efter konvertering och anrikning (WNA, 2017). Det plutonium som erhålls kan användas till att tillverka bränsle av blandade uran- och plutoniumoxider (MOX). I reaktorer som använder MOX ersätts det vanliga uranbränslet som annars används.

Det andra alternativet för det använda bränslet är att det skickas direkt till slutförvar. Det avfall som uppkommer från upparbetning hamnar även det i slutförvar. Slutförvar beskrivs i avsnitt 2.4.6 (Använt kärnbränsle).

#### 2.4.4 Kärnkraftens kostnader

En stor utmaning med dagens kärnkraft är höga kostnader. Ett exempel på det är att Vattenfall valt att i förtid ta Ringhals 1 och 2 ur drift i förtid på grund av ekonomiska skäl (Energiföretagen, 2018). Alternativa tekniker, utveckling och subventioner av dessa har lett till ett prisfall på elmarknaden, till en nivå där kärnkraften har svårt att konkurrera (Energiföretagen, 2018). Investeringskostnaderna är stora för ett kärnkraftverk och även kostnaderna för till exempel uppgradering av turbiner och generatorer. Därutöver tillkommer kostnader för förvaring av det radioaktiva bränslet, kostnader för säker hantering av bränslet och säkerheten kring kärnkraftverk. Detta är kostnader som inte tillkommer vid några andra av Sveriges energikällor (SVT, 2018).

#### 2.4.5 Miljöbelastning från kärnkraften

Kärnkraften har som störst miljöpåverkan vid uranbrytning. Varje år krävs ca 1 500 ton naturligt uran för Sveriges elproduktion, vilket blir ca 200 ton anrikat uran (Strålsäkerhetsmyndigheten, u.å.) som 2019 producerade totalt 64 TWh (Ekonomifakta, 2020). Genom uranbrytning kan följande miljöpåverkan uppstå; skador på markområden, frigörelse av giftiga ämnen, uppkomst och spridning av surt lakvatten, avfall samt utsläpp från processanläggningarna (Höglund, 2010). Dessutom kan damm, buller och hälsoeffekter uppstå och påverka de som arbetar med uranet. Uranbrytning liknar på många sätt andra gruvor såsom de svenska järnmalmgruvorna. Vattenfall utför regelbundna kontroller för att säkerställa att uranbrytningen sker på rätt sätt och att personalen är skyddad. Vidare måste alla gruvföretagen ta fram en plan för hur gruvområdet ska återställas efter gruvdriftens slut. Om uran fortsätter användas i samma mängd som i dag uppskattas uranet räcka i ca 100 år (Wikdahl, 2009). Wikdahl menar även att det är troligt att det inom 30-50 år kommer finnas reaktorer som är bättre på att utnyttja uran och att uranet då antagligen kommer räcka i ett tusenårigt perspektiv.



Den uppskattade energidensiteten för kärnkraft globalt är över 3000 GWh/km<sup>2</sup> vilket betyder att kärnkraften upptar en väldigt liten area jämfört med andra elproduktionsslag (Cheng & Hammond, 2017).

#### 2.4.6 Använt kärnbränsle

Använt uranbränsle är radioaktivt under lång tid och måste förvaras säkert. Hanteringen består av tre steg, korttidsförvaring, mellanlagring och slutförvar. Korttidsförvaringen pågår under minst ett år där aktiviteten och värmeutvecklingen minskar med 90 procent. I mellanlagringen förvaras bränslet i kylda vattenbassänger i minst 30 år. Här minskar både aktiviteten och värmeutvecklingen med ytterligare 90 procent. I Sverige har vi mellanlagring för använt kärnbränsle i Oskarshamn (Strålsäkerhetsmyndigheten, 2019).

Sverige har i dagsläget drygt 6 000 ton använt kärnbränsle som är högaktivt och behöver isoleras i minst 100 000 år. Det pågår en tillståndsprövning om att bygga ett slutförvar i Sverige då vi för närvarande inte har något (Kärnavfallsrådet, u.å.). Om det skulle byggas ett slutförvar i Sverige anses det mest lämpligt att förvara det använda bränslet på 250 - 1000 meters djup i stabila geologiska formationer med naturliga barriärer (sten, salt, lera). Detta kallas för ett multibarriärkoncept, med barriärer för att motverka att avfallet ska påverka människor och omgivande miljö. I dagsläget finns endast en anläggning som byggts med syfte att ha djupförvaring som har licens för förvaring och det är Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) i USA. Det finns däremot flera anläggningar som används för djupförvaring, men dessa har byggts i till exempel gamla saltgruvor och anses inte vara lika säkra (WNA, 2020).

#### 2.4.7 Olyckor, kärnvapen och kostnader

Kärnkraft är förknippat med risker som skapar debatt. Tekniken har varit inblandad i olyckor, till exempel Harrisburg 1979, Tjernobyl 1986 och Fukushima 2011 som har skapat oro och påverkat stora delar av samhällets attityder till tekniken. I Tjernobyl och Fukushima handlade det om att stora mängder radioaktiva ämnen spred sig och påverkade omgivningen, i Harrisburg var spridningen av radioaktiva ämnen väldigt begränsad (Strålsäkerhetsmyndigheten, u.å.). Globalt uppskattas det att antalet människor som avlidit på grund av kärnkraft uppgår till 90 personer per biljon producerad kWh, inkluderat de högsta estimaten som finns tillgängliga för dödsfall relaterat till Tjernobyl, Fukushima samt brytning av uranium (Conca, 2012).

I Sverige har strålsäkerhetsmyndigheten ett samlat ansvar över strålskydd, kärnsäkerhet och att nukleära ämnen inte sprids (Strålsäkerhetsmyndigheten, u.å.). De ställer krav och kontrollerar att dessa uppfylls av alla svenska verksamheter som hanterar eller kommer i kontakt med strålning, inkluderande Sveriges tre aktiva kärnkraftverk.

En ytterligare utmaning med dagens kärnkraft är kopplingen mellan kärnkraft och kärnvapen (Azar, 2007). Sveriges termiska reaktorer använder anrikat kärnbränsle med 4 - 5 % U-235. Anrikningsprocessen kan också användas för att uppnå en koncentration av U-235 motsvarande 95-99%, vilket kan användas som kärnvapenbränsle. Dagens uppberedningsanläggningar kan separera plutonium, som är en restprodukt från dagens bränslecykel, från avfallet av det använda kärnbränslet, och även det uppberedade plutoniumet kan användas som kärnvapenbränsle. Det finns alltså mer än ett sätt att konvertera delar av dagens kärnkrafts bränslecykel till att tillverka kärnvapen. Utveckling av kärnkraft leder inte direkt till utveckling av kärnvapen, men möjligheten till utveckling av kärnvapen

kan öka. Det händer att civil kärnkraft används som täckmantel för att utveckla kärnvapen samt tillåtelse att importera nödvändig kunskap (Azar, 2007).

## 2.4.8 Kostnader dagens kärnkraft

I Tabell 2.1 presenteras investeringskostnad och elkostnad för dagens kärnkraft.

Tabell 2.1 Investeringskostnad och elkostnad för dagens kärnkraft

Investeringskostnad [Mkr/MW]	37,2
Elkostnad [öre/kWh]	43,22 - 152,71 (median 74,34)

Energikommissionen (2016) beräknade att investeringskostnaden för en kärnkraftsreaktor baserat på dagens teknik skulle uppgå till 37,2 Mkr/MW och elkostnaden till 51 öre/kWh. Bexelius och Diklev (2018) presenterar att elkostnaden för ett 1 000 MW kärnkraftverk med dagens teknik ligger i intervallet 43,22 - 152,71 öre/kWh, med median på 74,34 öre/kWh.

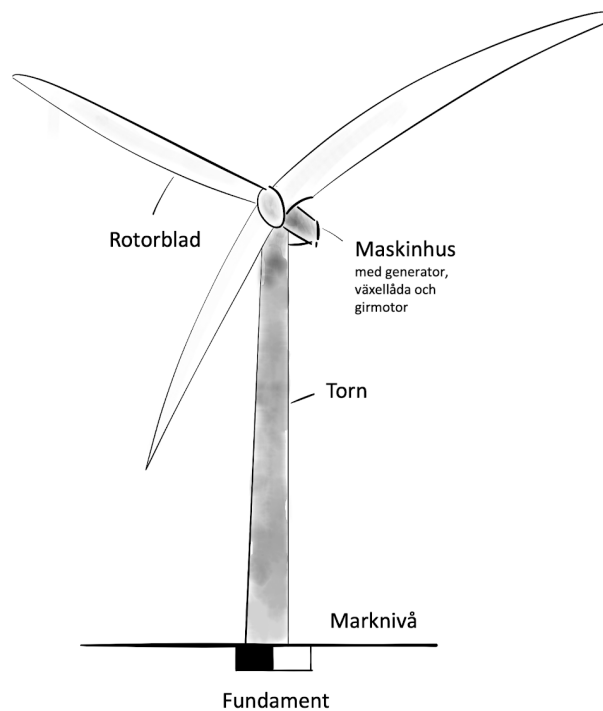
Kärnkraftsolyckor genom historien har bland annat medfört stora kostnader; exempelvis uppskattades kostnaderna fem år efter olyckan i Fukushima att ha uppgått till ca 350 miljarder kr (Abrahamson, 2016). Vid en olycka är reaktorinnehavaren ansvarig för ca 12 miljarder kronor (Regeringskansliet, 2018), vilket inkluderas i elkostnaden.

## 2.5 Vindkraft

I följande avsnitt presenteras tekniken bakom vindkraft, dess utmaningar samt ett flödesschema som illustrerar tillverkningen av ett vindkraftverk.

### 2.5.1 Teknik

Olika typer av vindkraftverk delas in i två stora huvudgrupper, horisontalaxlade (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbine) och vertikalaxlade (VAWT- Vertical Axis Wind Turbine) (Wizelius, 2015). De flesta vindkraftverk som producerar elektricitet storskaligt i Sverige är horisontalaxlade med rotorn placerad mot vinden. En vanligt förekommande modell i Sverige kallas snabbblöpare och illustreras i Figur 2.19.



Figur 2.9 En snabblöpare består av fundament, torn, rotorblad, transformator och maskinhus med generator, växellåda, girmotor

Vindkraftverkets rotorblad är kopplade till en växellåda och en generator genom en drivaxel (Breeze, 2014). Rotationen regleras av växellådan, för att matcha elnätets frekvens, varpå den mekaniska energin överförs till generatorm som genererar elektricitet. Toppen kan rotera efter vindriktningen för att rotorbladen ska kunna ta upp så mycket av vindens energi som möjligt (Breeze, 2014).

Enligt European Wind Energy Association, EWEA, (u.å.) har dagens landbaserade vindkraftverk medeleffekt på ungefär 2,5 - 3 MW, med rotorbladens diameter på ungefär 100 meter. Havsbaserade vindkraftverk som tillverkas idag har en medeleffekt på ungefär 3,6 MW (EWEA, u.å.). Dagens havsbaserade vindkraften har en rotordiameter på ungefär 120 meter (Breeze, 2014). De specifika längderna på rotorbladen är också beroende på vindhastigheten vid de platserna. Om det är lägre vindhastigheter kan det vara mer lönsamt att bygga vindkraftverk med större rotorblad eftersom de tar upp mer av energin i luften. Med högre vindhastigheter kan det vara mer lönsamt att ha mindre rotorblad (Breeze, 2014). Höjden för tornen i vindkraftverken brukar i regel vara ungefär dubbla längden för rotorbladen, vilket resulterar i en tornhöjd mellan 20 till över 100 meter (Naturvårdsverket, u.å.). Livslängden för vindkraftsturbiner är normalt mellan 20 till 25 år men kan ibland gå upp till 30 år (Energimyndigheten, 2016).

Fundamentet till kraftverket fyller två funktioner, att bära upp verkets tyngd så det inte sjunker ner i marken samt som motvikt så att verket inte välter. Konstruktionen av fundamentet varierar beroende på lokala markförhållanden. Fundamentet grävs ner 2-3 meter ner i marken och har antingen formen av en cirkel eller kvadrat med 7-25 meters sida/radie beroende på vindkraftverkets storlek samt rådande markförhållanden. Betongfundamentet armeras och härdas och därefter monteras tornet (Wizelius, 2015).

## 2.5.2 Intermittens & transport av komponenter

Vindkraft är ett väderberoende, så kallad intermittent, elproduktionsslag, vilket innebär att det inte kan förse elnätet med jämn elproduktion (Breeze, 2014). Runt 3-5 m/s kan ett vindkraftverk börja producera el, vid 12-16 m/s har det maximal elproduktion och vid 25 m/s finns det risk att det blåser sönder och därmed måste rotorbladen låsas (Vindkraft.se, u.å.). Eftersom vindstyrkan varierar på olika platser fördelas vindkraftsparkerna jämt ut över landet för att ständigt kunna producera elektricitet (Breeze, 2014). Genom att kombinera prognoser för samhällets elbehov med väderprognoser är det möjligt att planera övriga energikällors produktion för att möta det aktuella elbehovet (Breeze, 2014). Vidare menar Breeze att trots detta krävs ett väl integrerat elnät för att kunna distribuera elektricitet långa sträckor till olika platser i landet.

Vindkraftverken består av stora komponenter och byggs ofta på platser där det är glest och lågtrafikerat. Byggnationen av vindkraftverken bidrar därför med hög belastning på kommunala vägar vilka ofta har låg bärighet, profil- och planstandard vilket gör att tung trafik riskerar att köra sönder vägarna. För att motverka detta är det därför viktigt att i tidigt skede planera vart vindkraftverken skall stå och att vägarna dit klarar transporten av komponenterna (Trafikverket, 2010).

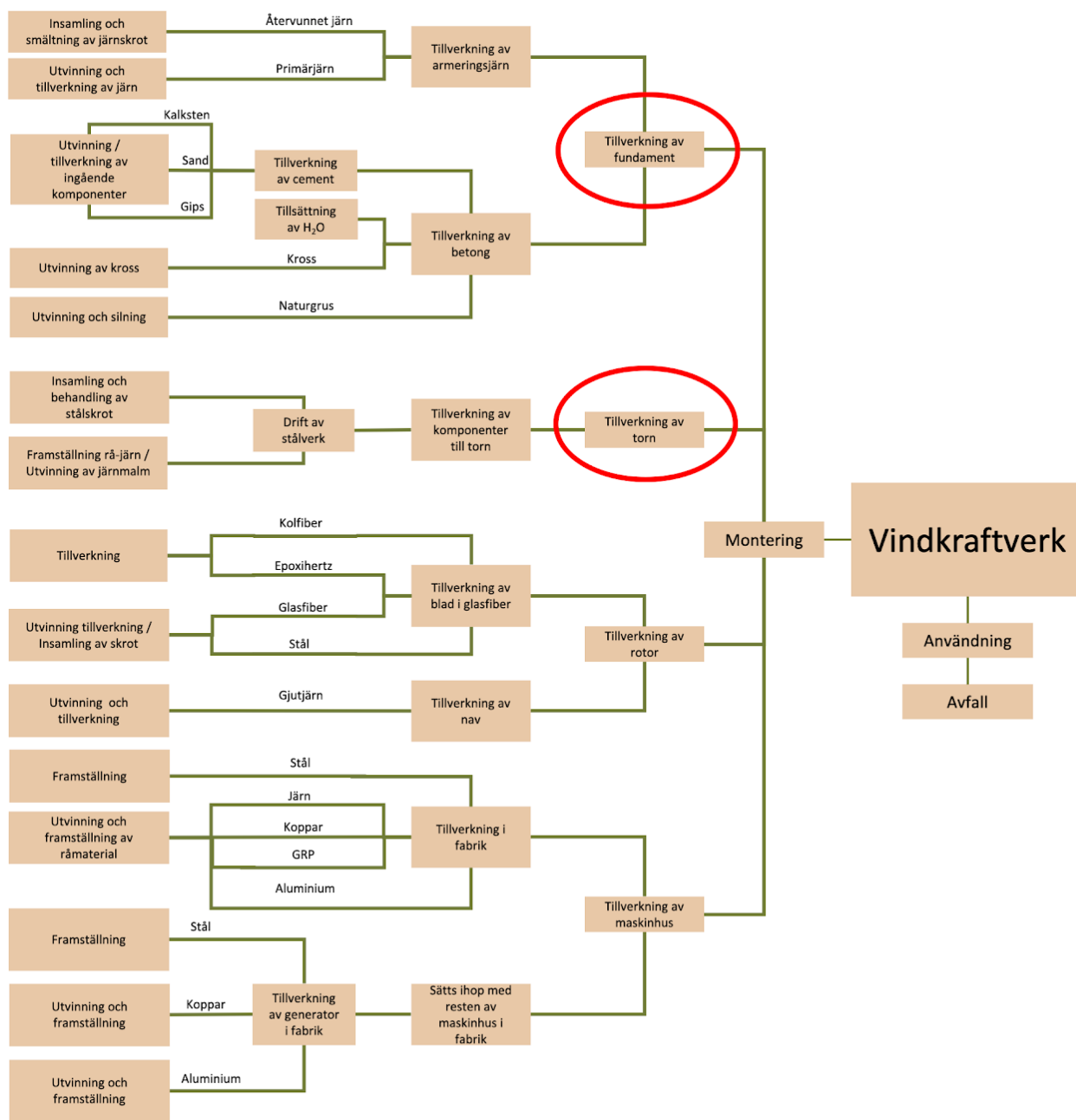
## 2.5.3 Lokal miljöpåverkan

Det krävs en stor mängd yta för att kunna konstruera vindkraftsparker (Agarwal m.fl, 2016), och elproduktionen för ytan som vindkraften upptar uppgår till 875 GW/km<sup>2</sup> (Cheng och Hammond, 2017). Vindkraftverk ligger ofta på platser långt ifrån städerna där det finns möjlighet till att använda marken till att odla, föda upp boskap med mera (Agarwal m.fl, 2016). Den kraft som skapas från en vindturbin beror till största delen på vindhastigheten, som i sin tur påverkas av hinder såsom byggnader och topografi och vindkraftverk kan därmed inte byggas var som helst (Agarwal m.fl, 2016).

Vindkraft kan medföra negativa konsekvenser för den biologiska mångfalden i det lokala området. Dels vad gäller markytan som påverkar djurens naturliga habitat, dels vad gäller fåglar som kolliderar med vindkraftverkets rotorblad i luften. Vindkraftverk orsakar även en stor mängd ljud och är en av de viktigaste aspekterna för planering och kan leda till lägre värde på fastigheter i närheten och kan i vissa fall vara skadligt för människor. Vindkraftverk har även en estetisk påverkan på omgivningen och vindkraftverk i arbete orsakar flimrande skuggor på grund av rotorbladens rörelse som kan vara störande för lokalbefolkningen (Agarwal m.fl, 2016).

## 2.5.4 Tillverkning av vindkraftverk

Nedan presenteras ett utförligt flödesschema för samtliga ingående komponent, råmaterial samt processer som krävs för att tillverka ett vindkraftverk. I boxarna presenteras processerna där det från vänster börjar med bland utvinning av råmaterial och framställning av stål. I flödet åt höger, på pilarna, går det att följa produkterna mellan processerna. Flödesschemat slutar med montering av de viktigaste komponenterna fundament, torn, rotor och maskinhus följt av användning samt avfallshantering. Tillverkningen av ett vindkraftverk, som Figur 2.10 tydligt visar, är en komplicerad process som omfattar många och relativt komplicerade steg.



Figur 2.10 Figuren presenterar alla ingående komponenter och processer för tillverkningen av ett vindkraftverk. Ringarna visar vart i flödet miljöbelastningen är som störst. Inspiration från Mikael Hammar (2016)

En stor del av miljöbelastningen kommer från tillverkningen av fundamenten som består av 90 m<sup>3</sup> betong, armeringsjärn, kross samt naturgrus och tillverkningen av tornet. Tornet består av en mycket stor andel stål där miljöbelastningen för framställning av stålet är påtaglig. Sammanfattningsvis har dessa två processer högst koldioxidekvivalentutsläpp vid tillverkningen av kraftverket (Hammar, 2016). Tillverkningen av rotorbladen står för den lägsta miljöbelastningen enligt Hammar (2016). Ringarna i Figur 2.10 visar vart i flödet miljöbelastningen är som störst. Återvinning av material och komponenter av ett vindkraftverk är en viktig process där det går att minska koldioxidekvivalentutsläppen. Den

process som har möjlighet att bidra till störst minskning är återvinning av armeringsjärn i fundamentet. Genom att återvinna armeringsjärnen går det att spara ca 6800 kg koldioxidekvivalentutsläpp per producerat vindkraftverk (Hammar, 2016).

### 2.5.6 Kostnader vindkraft

I Tabell 2.2 presenteras investeringskostnad och elkostnad för vindkraft i Sverige.

Tabell 2.2 *Investeringskostnad och elkostnad för vindkraft i Sverige*

Investeringskostnad [mkr/MW]	10 - 12
Elkostnad [öre/kWh]	40 - 63
Prognostiserad elkostnad 2030 [öre/kWh]	28 - 50

Investeringskostnaden uppgår till 10 - 12 miljoner kr/MW (Energikommisionen, 2016; Svensk Vindenergi, u.å.). Variationen i investeringskostnad för vindkraft beror främst på val av turbin, avstånd till nätanslutning och övrig infrastruktur (Svensk Vindenergi, u.å.). Elkostnaden för vindkraft är baserad på de projekt som var planerade för byggnation i Sverige 2016 (Energimyndigheten, 2016). Den totala elkostnaden har minskat drastiskt för vindkraft globalt de senaste 30 åren och kostnaderna förväntas fortsätta sjunka framöver. Det som driver utvecklingen är större och billigare turbiner, högre navhöjder, platsoptimerade parkutformningar samt förbättrat underhållsarbete (Energimyndigheten, 2016). Enligt Energimyndighetens prognos (2017) för år 2030 kommer kostnaden för landbaserad vindkraft minskas till 28 - 50 öre/kWh.

Kostnader för eventuella olyckor har inte identifierats.

### 2.5.7 Dödstal

Antalet dödsfall per biljon producerad kWh ligger globalt på 150 personer. De flesta av de som dör är arbetare som faller från vindkraftverken under underhållsarbete (Conca, 2012). Det har inte identifierats några dödsfall i Sverige relaterat till vindkraften.

## 2.6 Elproduktion i framtiden

Framtidens elproduktion och elbehov kan förändras jämfört med dagens och i och med energiöverenskommelsen har Energimyndigheten skapat en vision för Sverige. Det framtida elbehovet och de politiska styrmedel som används för en hållbar framtid är viktiga aspekter.

### 2.6.1 Framtida elbehov

Elanvändningen i Sverige har under de senaste 25 åren varit 130 - 140 TWh per år, men har sedan 1970 ökat med 4 - 5 % per år, från 60 TWh (IVA, 2016). En ökad elektrifiering av samhället där fossila bränslen ersätts av elektricitet, inom till exempel fordonsindustrin, samt en ökad digitalisering, varpå nya behov av elektricitet uppstår, medför en eventuell ökning av elbehovet i Sverige (Svenskt näringsliv, 2019). Svenskt näringsliv prognostiserar en ökning av elbehovet på 60 % till år 2045. Det skulle innebära att den svenska elanvändningen skulle uppgå till över 200 TWh per år. Dessutom kommer majoriteten av dagens elproduktion nå sin ursprungliga livslängd fram till år 2045, vilket kräver en omfattande ombyggnation av elnätet (Svenskt näringsliv, 2019).

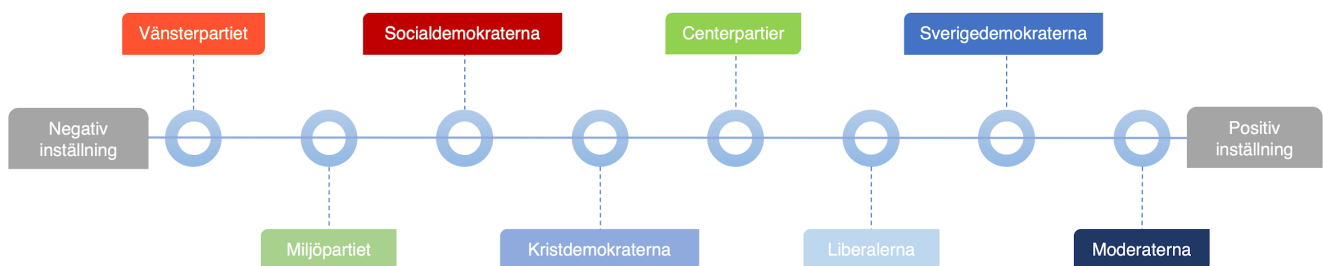
Det multidisciplinära forskningsprojektet North European Energy Perspectives Project (NEEPP) skapade på uppdrag av Energiföretagen en prognos för den svenska elanvändningen 2045 som uppgår till 177,1 TWh/år jämfört med 132,8 TWh/år 2020, en ökning motsvarande cirka 33%. Ökningen drivs framför allt av en ökad elanvändning inom industrin samt transportsektorn. Prognoserna från Svenskt Näringsliv och NEEPP drar olika slutsatser kring hur omfattande ökningen av elbehovet i Sverige kommer att vara år 2045, men båda parter prognosticerar att elbehovet kommer att öka markant (NEEPP, 2019).

## 2.6.2 Energiöverenskommelsen

Enligt Regeringen (2016) skall Sverige ha ett stabilt elsystem med hög leveranssäkerhet, en låg miljöpåverkan och el till konkurrenskraftiga priser. Ett av målen är att år 2040 ha 100% förnybar elproduktion, men det är inte ett stoppdatum som förbjuder kärnkraft, det innebär inte allt kärnkraft tvingas stängas. Vidare menar Regeringen att svensk kärnkraft står inför stora investeringsbehov för att möta kommande säkerhetskrav. I och med det beslutade Strålsäkerhetsmyndigheten att kraven skulle vara uppfyllda till år 2020, i annat fall får inte reaktorerna drivas vidare. 27 april 2020 konstaterade Strålsäkerhetsmyndigheten (2020) att strålsäkerheten på Forsmark var acceptabel men att det finns utmaningar kopplade till långtidsdriften.

## 2.6.3 Officiella åsikter från dagens riksdagspartier

Sveriges riksdagspartier har olika syn på frågan om energi och i synnerhet kärnkraften. Nedan presenteras kort riksdagspartiernas inställning till kärnkraft, negativ till vänster och positiv till höger.



Figur 2.11 Grafik som visar partiernas ställning till kärnkraften i energipolitiken från positivt inställda åt vänster till negativt inställda åt höger

Moderaterna tycker att den svenska energipolitiken ska värna om klimatet, säkerställa el till konkurrenskraftiga priser och garantera nödvändig tillgång på el. Moderaterna vill satsa på alla relevanta elproduktionslag för Sverige och nämner specifikt att kärnkraft är ett sådant. Partiet vill satsa på forskning kring kärnkraften och påpekar specifikt att kärnkraften skall ha möjligheten att fortsätta vara en viktig del i energiförsörjningen i Sverige under lång tid. Moderaterna vill satsa mer pengar på forskning kring kärnkraft och tycker det är viktigt att ha kvar kärnkraft för att inte bli beroende av importerad icke-förnybar el. Moderaterna menar att ett elproduktionslag som står för 40% av Sveriges elförsörjning kan bli svår att ersätta (Moderaterna, u.å.). Moderaterna vill även att elmarknaden

omstruktureras så att det blir bättre betalt för el från bland annat kärnkraft som utan konstant levererar lika mycket el, än för bland annat vindkraft som bara levererar vid rätt förutsättningar (Sveriges Radio, 2019). Moderaterna har sedan valet 2018 70 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

I Sverigedemokraternas valmanifest för valet 2018 beskriver partiet att de vill satsa på säker och effektiv kärnkraft. Specifikt beskriver partiet att de vill satsa på forskning och utveckling av GenIV-kärnkraft och dessutom förhindra avvecklingen av Ringhals reaktorerna som ännu inte nått hela sin livslängd (Sverigedemokraterna, u.å.). Partiet menar att den ökade andelen väderberoende elproduktion i Sverige medför att stor del av elproduktionen inte infaller när efterfrågan är som störst. Detta leder till ett produktionsöverskott som leder till export. Detta ser Sverigedemokraterna som ett problem då utbudet inte alltid stämmer överens med efterfrågan och det kan leda till att det ekonomiska värdet av elen blir lågt (Sverigedemokraterna, 2020). Sverigedemokraterna har sedan valet 2018 62 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

I liberalernas nuvarande partiprogram är kärnkraften viktig för en klimatneutral elproduktion. Det ska finnas möjlighet att bygga nya kärnreaktorer i Sverige förutsatt att de klarar höga säkerhetskrav. Dessutom anser partiet att mer forskning krävs för att minska riskerna som finns vid drift, hantering av bränsle samt hantering av avfall (Liberalerna, 2017). Partiet menar att problemet med förnybar energi, som exempelvis vindkraft, är att den inte är lika stabil som kärnkraft och att samhället behöver el årets alla dagar oavsett hur mycket det blåser. Därför vill partiet värna om Sveriges energimix, en blandning av kärnkraft och förnybara energikällor (Liberalerna, u.å.). Liberalerna har sedan valet 2018 20 mandat (Riksdagen, 2018).

Centerpartiet vill att elproduktionsslagen i Sverige skall vara helt förnybara 2040 enligt energiöverenskommelsen från 2016. Partiet vill att vindkraften skall öka ännu mer och producera energi för ett hållbart samhälle, de lyfter också fram den havsbaserade vindkraften, som är en outnyttjad källa. Dessutom vill partiet avskaffa fastighetsskatten på vindkraft (Centerpartiet, u.å.). De vill avskaffa kärnkraften men inte genom politiska beslut, eftersom de tror att kärnkraften kommer att fasas ut på grund av ekonomiska problem. Partiet vill inte ha en utbyggnad av kärnkraft då det inte är förnybart och de anser att kärnkraft har en negativ verkan på miljön och att riskerna är för stora (Centerpartiet, u.å.). Centerpartiet har sedan valet 2018 31 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

I Kristdemokraternas nuvarande partiprincip från 2015 pekar partiet på att den svenska kärnkraften ska fasas ut i takt med att den ersätts av förnybar energi. Kristdemokraterna hävdar att kärnkraft kommer under en överskådlig tid att spela en viktig roll i energibehovet i Sverige (Kristdemokraterna, 2015). Partiet menar att vindkraften är ett förnybart elproduktionsslag och fyller därför en viktig roll i Sveriges energiförsörjning. Partiet vill att nationella riktlinjer ska finnas för hur lokalsamhället ska få del av vinsten vid vindkraftsetablering (Kristdemokraterna, u.å.). Kristdemokraterna har sedan valet 2018 22 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

Socialdemokraterna vill ställa om energisystemet så att kärnkraften ersätts av miljövänliga och förnybara energikällor. Partiet hävdar att detta kräver både satsningar för att utveckla alternativa elproduktionsslag och satsningar på att minska den totala förbrukningen genom att effektivisera användningen av energi. Partiet vill fasa ut kärnkraften genom att successivt ersätta den med förnybar energi eftersom de anser att vi kommer behöva kärnkraft en lång tid framöver och att den skall hanteras på ett säkert och effektivt sätt (Socialdemokraterna, 2013). Socialdemokraterna menar att energidebatten inte får fastna i kärnkraftsfrågan utan måste bli bredare och handla mer om



energieffektivisering framför allt när det gäller vindkraft (Svensk vindenergi, 2013). Socialdemokraterna har sedan valet 2018 100 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

Miljöpartiet motsätter sig byggandet av nya kärnkraftsreaktorer eller ökat effektuttag ur de redan befintliga reaktorerna i Sverige. Dessutom vill partiet omedelbart starta en avveckling av den befintliga kärnkraften. Partiet rekommenderar istället att använda sig av vindkraft, vågkraft och solenergi för att möta energibehovet (Miljöpartiet, 2013). En utbyggnad av havsbaserad vindkraft kan ersätta hela reaktorer. Med lång kust har Sverige goda förutsättningar. Miljöpartiet vill att Sverige satsar på havsbaserad vindkraft (Miljöpartiet, u.å.). Miljöpartiet har sedan valet 16 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

Vänsterpartiet vill ha ett samhälle med 100 procent förnybar energiförsörjning senast år 2040. Genom att satsa på energieffektivisering och förnybar energi som sol-, vind-, bio- och geoenergi ska ett ekologiskt hållbart samhälle skapas. Vänsterpartiet är negativa till kärnkraft och menar att det inte bara är ett osäkert elproduktionsslag utan också dyr och försvårar omställningen till en förnybar energiproduktion. Partiet vill se en avveckling av kärnkraft så fort som möjligt och menar att det krävs omfattande investeringar i energieffektivisering och satsningar på förnybar energi som vindkraft för att minska energisektorns utsläpp (Vänsterpartiet, 2018). Vänsterpartiet har sedan valet 2018 28 mandat i riksdagen (Riksdagen, 2018).

## 2.7 GenIV-kärnkraft

I följande avsnitt presenteras vad som kännetecknar GenIV-kärnkraft.

### 2.7.1 Återvinning av kärnavfall

I dagens reaktorer utnyttjas bara någon procent av den energi som finns i kärnbränslet varpå resten blir avfall. Genom återvinning av avfallet är det möjligt att tillverka nytt kärnbränsle och ta vara på 50-100 gånger mer energi (GIF, 2013). Det leder till minskad förvaring av radioaktivt avfall, men även tiden det behöver förvaras. Nytt uran behöver inte brytas och anrikas utan det kärnavfall som finns från dagens kärnkraft kan istället användas länge (Ny teknik, 2012).

### 2.7.2 GenIV-kärnkraft idag

Olika typer av reaktorer, som senare har klassificerats som GenIV-reaktorer, har varit en diskussionsfråga sedan 1950-talet. Anledningen att inget av dessa koncept finns i stor skala beror på en kombination av brist på finansiering, tillgängliga material med de materialegenskaper som krävs samt kunskap kring kontroll av kärnreaktionen (Haas m.fl, 2019). Under senare tid har GenIV-kärnkraft kommit på tal igen vilket har resulterat i att bland annat uppkomsten av GenIV-initiativet (Haas m.fl, 2019). I och med GenIV-initiativet 2000, som startade genom U.S Department of Energys "Generation IV International Forum" (GIF) med målet att utveckla en tekniskt ny generation av reaktorer. Idag finns tio medlemsländer som deltar i initiativet; Argentina, Brasilien, Kanada, Frankrike, Japan, Sydkorea, Sydafrika, Schweiz, Storbritannien och USA) men även Euratom deltar. Euratom, eller "fördraget om Europeiska atomenergigemenskapen" ska bland annat främja forskning och spridning av teknisk information och se till att kärnmaterial för civilt bruk inte används för andra ändamål, exempelvis militära (Europaparlamentet, 2012).

Europeiska kommissionen inledde år 2010 European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII), för att stötta tre GenIV-projekt som en del av EU:s plan för att främja teknik med låga koldioxidutsläpp. ESNII valde att gå vidare med några av projekten. ASTRID, en natriumkyld snabbreaktor som skulle byggas i Frankrike, “Allegro”, en gaskyld snabbreaktor som stöds av Central- och Östeuropa samt den blykylda snabbreaktorn ALFRED i Rumänien. Syftet med ESNII är att demonstrera GenIV-teknologier som sluter kärnbränslecykeln och skapar långsiktiga lösningar för avfallshantering. ASTRID förväntades byggas i Marcoule under 2020 och anslutas till nätet år 2025 (WNA, 2019), vilket dock inte blev fallet då projektet markant överskred sin budget (Reuters, 2019).

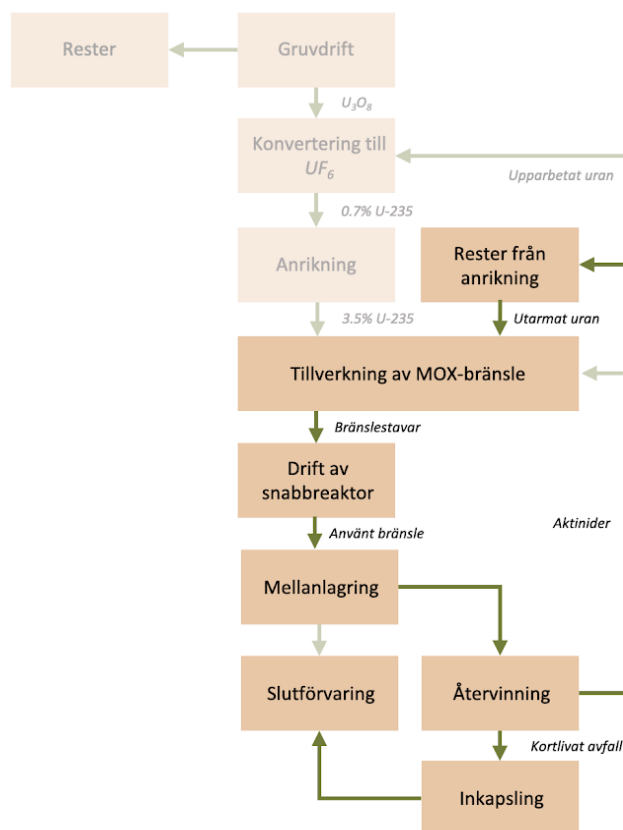
Det svenska företaget Blykalla har tagit fram en blykyld snabbreaktor med avsikten att implementera tekniken i Kanada (Blykalla, 2019). Företaget härstammar från Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm (SvD Näringsliv, 2017).

### 2.7.3 Hållbar energi

Kriterierna för GenIV-kärnkraft berör fyra olika områden som omfattar hållbarhet, ekonomi, säkerhet, pålitlighet och fysiskt skydd (WNA, 2019). Vad gäller hållbarhet så finns kriterier som ska uppfyllas. Det första är att tillhandahålla en hållbar energiproduktion som uppfyller målen angående ren luft och främjar långsiktig tillgänglighet av system och effektivt bränsleutnyttjande för global energiproduktion. Det andra är att minimera och hantera sitt kärnkraftsavfall och särskilt minska den långsiktiga förvaltningsbördan och därmed förbättra skyddet för folkhälsan och miljön. Vidare innebär de ekonomiska kriterierna att GenIV-kärnkraft kommer att ha en tydlig lägre livscykelkostnad jämfört med andra energikällor och att GenIV-kärnkraft kommer ha en finansiell risk som är jämförbar med andra energiprojekt. GenIV-kärnkraft kommer ha ett betydligt bättre säkerhetssystem som medför minskad risk för härdsmälta. Dessutom innebär en sluten bränslecykel mer effektiv och hållbar elproduktion.

## 2.7.4 Bränslecykel för GenIV-kärnkraft

I Figur 2.12 illustreras GenIV-kärnkrafts bränslecykel jämfört med dagens kärnkraft.



Figur 2.12 Illustration av den slutna bränslecykeln för GenIV-kärnkraft. Mellanlagring, inkapsling, slutförvar, bränsletillverkning och tillverkning av MOX sker på liknande vis som i dagens kärnkraft, men vissa av processerna från dagens kärnkraft har bytts ut eller tagits bort. Inspiration från Energiforsk (u.å.)

Enligt Energiforsk (u.å.) är bränslecykeln i ett GenIV-system sluten i syfte återanvända bränslet för att få ut mer energi. Om kärnkraftens elproduktion fortsätter att vara på samma nivå som den är idag skulle det utarmade kärnbränslet som uppkommit från dagens kärnkraft räcka i flera tusen år. Det kommer då inte behöva brytas något nytt uran och därmed behövs inte gruvdriften. Detta beror på att de termiska neutronerna bytts ut mot snabba neutroner i GenIV-kärnkraftsreaktorer vilka har högre sannolikhet att få uran-238 och de andra aktiniderna att fissionera och underlättar då återvinningen av tidigare använt bränsle. Det avfall som uppstår från återvinningen är då endast fissionsprodukterna som inte kan fissionera vilket förkortar halveringstiden på avfallet. Istället för upparbetning används istället återvinning av bränslet i ett GenIV-system och gör det då möjligt att sluta bränslecykeln, som sker på regionala, eller centrala upparbetningsanläggningar. Återvinningen, till skillnad mot upparbetning, extraherar samtliga aktinider genom ganexprocessen för att det ska återanvändas igen som bränsle i reaktorn och i denna process sker ingen extrahering av plutonium för att skapa MOX-bränsle. Ganexprocessen sker, enligt Miguiditchan m.fl (2008), genom att först lösa upp uran och plutonium och separera dem och sedan extraheras aktiniderna och fissionsprodukterna ur lösningen. Efter ganexprocessen skickas ämnena vidare för att tillverka bränsle och MOX-bränsle för att sedan återanvändas i de snabba reaktorerna igen. När bränslet sedan är helt uttjänt kapslas det in och skickas

till slutförvar. Enligt Haas m.fl (2019) innebär extraheringen av samtliga aktinider att det istället för att ha kärnavfall som måste slutförvaras i hundra tusen år så behövs endast ett hundratal år. Det är tack vare den kortare halveringstiden och det i sig ställer betydligt lägre krav på slutförvaret.

En av fördelarna med GenIV-kärnkraft jämfört med dagens kärnkraft är att risken för att skapa kärnvapen och kärnvapenspridning minskar. Haas m.fl (2019) menar att om det finns en GenIV-anläggning så finns det fortfarande en risk att den kan användas till att tillverka kärnvapen, eftersom det finns verktyg på anläggningen för att hantera kärnavfall. På dessa anläggningar finns det kompetent personal som skulle kunna ändra återvinningsprocessen så att det istället skapar material som kan användas till kärnvapen. Det blir farligare när avfallet löses upp, vilket det gör i ganexprocessen som används i GenIV-kärnkraft.

### 2.7.5 Utmaningar med GenIV-kärnkraft

Kostnaden är den största faktorn som motverkar utbyggnaden av GenIV-kärnkraft där den största kostnaden är kapitalkostnaden. (Lake ,2002). Vidare menar Lake att GenIV-reaktor-teknologin måste få lägre kostnader för att kunna vara konkurrenskraftigt mot andra framtida elproducenter. Det finns idag inga exakta data som visar att kapitalkostnaden skulle vara lägre för GenIV-kärnkraft jämfört med dagens kärnkraft, men mycket talar för att det snarare skulle innebära större kapitalkostnad, eftersom GenIV-kärnkraft ännu inte är har kunnat kommersialiseras då tekniken inte är färdigutvecklad.

Haas m.fl (2019) menar att det är dyrare att ha en sluten bränslecykel, och att det kostar ungefär 4 - 5 gånger mer än om bränslet inte återvinns och att det därför inte är realistiskt att nya reaktor- och bränslecykelteknologier samtidigt ska uppfylla kraven för övriga kostnadsproblem, slutförvar och motverka spridning av kärnvapen som tagits fram av GIF.

### 2.7.6 Reaktormodeller

Det finns sex olika modeller av GenIV-reaktorer: natriumkyld snabbreaktor, högtemperaturreaktor, superkritisk vattenreaktor, gaskylda snabbreaktorer, saltmältereatorer samt blykylda snabbreaktorer, varav den sistnämnda anses vara mest lovande (Haas m.fl., 2019). De sex modellerna ska vara säkra, ekonomiskt konkurrenskraftiga, minska spridningen av kärnvapen och medföra låga utsläpp av växthusgaser. För att kunna uppfylla de krav som ställts och för att kunna utveckla dessa reaktorkoncept kan det dröja minst 20 år. De koncept som utvecklas idag är flera årtionden gamla och behandlar ett stort omfång av idéer som diskuterades redan på 1950-talet. Koncepten åsidosattes på grund av höga kostnader, begränsande faktorer med materialegenskaper och svårigheter att kontrollera fissionsprocessen och konkurrerades tidigt ut av lättvattenreaktorerna. De reaktorkoncept som togs fram av GIF i början av 2000-talet var tänkta att kunna implementeras mellan år 2015 och 2025, några av dem, som BN-800, finns idag i drift men några kompletta GenIV-system finns ännu inte.

### 2.7.7 Kostnader GenIV-kärnkraft

I Tabell 2.3 presenteras uppskattade kostnader för GenIV-kärnkraft.

Tabell 2.3 Investeringskostnad och elkostnad för GenIV-kärnkraft.

Investeringskostnad [Mkr/MW]	24 - 273
Elkostnad [öre/kWh]	70 - 85

Den lägre investeringskostnaden för GenIV-kärnkraft är baserad på investeringskostnaden för den Ryska bredreaktorn BN-800 (Rybien & Momot, 2017) och den högre kostnaden är baserad på den uppskattade kostnaden för att driftsätta det Franska GenIV-projektet ASTRID. ASTRID var tänkt att bli en natriumkyld reaktorprototyp, men konstruerades aldrig på grund av den höga beräknade kostnaden (WNA, 2019). Enligt Janne Wallenius uppskattningar (u.å.) kommer elkostnaden för ett GenIV-system i Sverige vara inom intervallet 70 - 85 öre/kWh. Vid jämförelse av de två indiska kärnkraftsreaktorerna, PFBR (Prototype Fast Breeder Reactor) och PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor), uppgår kostnaderna för ett GenIV-system (PFBR) till 80 % mer än motsvarande system av dagens teknik (PHWR) (Suchitra & Ramana, 2011). Den huvudsakliga anledningen till att kostnaderna för PFBR blir högre är att återvinningen av bränslet är en kostsam process, vilket leder till drygt dubbelt så höga bränslekostnader (Suchitra & Ramana, 2011).

### 2.7.8 Antaganden för GenIV-kärnkraft

Eftersom det inte finns några beräkningar på miljöpåverkan från GenIV-kärnkraft följer här några antaganden för att uppskatta miljöpåverkan från GenIV.

I och med att många gånger mer elektricitet kan utvinnas ur bränslet genom ett GenIV-system minskar aktiviteterna i uppströmsprocesserna, till exempel gruvdrift, eftersom inget nytt uran kommer behöva utvinnas så länge det finns tillgång till befintligt kärnavfall i form av uran-238 (Energiforsk, u.å.). Däremot tillkommer andra aktiviteter som till exempel återvinning av bränsle samt anläggningar för detta. Därför skulle miljöpåverkan från uppströmsprocesser minska, men miljöpåverkan från kärnprocesser öka troligtvis på grund av konstruktion av fler anläggningar. Nedströmsprocesserna kommer antagligen inte påverkas signifikant eftersom GenIV-kärnkraft inte kräver helt nya nätanslutningar. Baserat på dessa uppskattningar och på grund av bristfällig data antas att miljöpåverkan från GenIV-kärnkraft inte skulle skilja sig signifikant från dagens kärnkraft. Därmed kommer data för miljöpåverkan från dagens kärnkraft användas i jämförelsen mellan GenIV-kärnkraft och vindkraft.

För att kunna genomföra senare beräkningar har följande antaganden för GenIV-kärnkraft gjorts:

- Eftersom ingen beräknad livslängd för ASTRID-reaktorn kunde identifieras tillämpades 40 år i beräkningarna, vilket är den beräknade livslängden för BN-800 (Lehr, 2011).
- Enligt Analysgruppen (u.å.) är den genomsnittliga kapacitetsfaktorn för de svenska aktiva kärnreaktorerna 80,3 %, vilket antas kunna användas för GenIV-kärnkraft.

## 3. Metod

Studien utfördes med en explorativ metod. Enligt Robert L. Harrison och Timothy M. Reilly (2011) används en explorativ metod genom att först samla in kvalitativ data, som sedan analyseras och används för fortsatt arbete. Studien utfördes specifikt med målet att sammanställa information för att kunna jämföra potentiella framtida GenIV-kärnkraftverk samt vindkraft. Litteraturstudien behandlar hur de olika elproduktionsslagen bidrog till relevanta aspekter inom hållbar utveckling vid utbyggnad. Avsikten med beräkningarna som utfördes var att jämföra de olika elproduktionsslagen. Dessutom gjordes intervjuer för att komplettera litteraturstudien och användes för vidare undersökning och inspiration kring studien.

### 3.1 Litteraturstudie

Den övergripande litteraturen sammanställdes i syfte att ge en överblick och insikt i hur situationen för GenIV-kärnkraft och vindkraft såg ut. Litteraturen gav underlag för att besvara forskningsfrågorna. De aspekter som behandlades var hur nutida teknik för de olika metoderna fungerar, hur eventuella framtida alternativ eller lösningar såg ut, hur forskningsläget såg ut för dessa och hur debatten och åsikter såg ut i samhället. Litteraturstudien var både kvalitativ och kvantitativ och omfattade vetenskapliga rapporter och artiklar.

För att hitta och sortera relevant litteratur användes bland annat följande sökord vid litteratursökningen: Nuclear power, Kärnkraft, GenIV, LCA, Lead-cooled fast reactor och Wind power. Google Scholar och Chalmers lib användes som de huvudsakliga sökmotorerna vid onlinesökningar. Utöver detta har även litteratur lånats från Chalmers bibliotek. Fakta och data har även hämtats från olika typer av myndigheter och företag som har relevans i energifrågor, kärn- och vindkraft. Studien utfördes till stor del baserad på grundad teori då befintliga data och forskning från verkligheten iaktogs, sammanställdes och analyserades. Det gjordes även studier inom forskningsmetodik för att få kunskap om hur intervjustudien skulle läggas upp i projektet. Till detta användes boken *Vetenskapsteori och forskningsmetodik* (2011) av Göran Wallén för att få mer kunskap om hur effektiva intervjuer bör hållas för de olika respondenter som intervjuades i projekt.

### 3.2 Intervjuer

Kvalitativa intervjuerna genomfördes för att få navigering i studien och hämta inspiration till fokusområden. Intervjuerna användes även för att komplettera litteraturstudien och få experters utlåtanden om kärnkraft, vindkraft och framtidsutsikter. Upplägget var semistrukturerat, vilket innebar att öppna frågor ställdes om dagens kärnkraft, vindkraft, det svenska kraftnätet och framtidens elbehov. Även specifika tekniska frågor ställdes om GenIV-kärnkraft och åsikter om GenIV-kärnkraft efterfrågades. Öppna frågor ger enligt Gunilla Eklund (2012) respondenten möjlighet att svara mer ärligt och inte leda hen till ett visst svar. De specifika frågorna användes för att ta tillvara på den intervjuades expertis. Intervjuerna skedde parallellt med litteraturstudien.

Urvalet av intervjupersoner genomfördes enligt två strategier, dels ett snöbollsurval och dels med utgångspunkt från ledande befattningar på energiområdet. I ett snöbollsurval föreslår en intervjuperson andra lämpliga intervjupersoner. Intervjuerna med personer med ledande befattningar på energiområdet valdes ut baserat på relevanta publikationer och mediauttalanden. Innan varje intervju gjordes en undersökning om intervjupersonens bakgrund genom att läsa individens eventuella vetenskapliga

publikationer för att få en uppfattning om intervjupersonens kunskaper och ställningstaganden inom området. Antingen kunde de ha ett tekniskt perspektiv eller ett beslutsfattande perspektiv. Utifrån detta kunde frågor till intervjun utformas för att kunna få ut så mycket relevant information som möjligt. Varje intervju byggde på specifika frågor framtagna för den aktuella intervjupersonen beroende på intervjuens syfte.

Intervjuer utfördes i största möjliga mån genom personliga möten och vid tillfällen då personliga möten ej var möjligt genomfördes intervjun via telefon eller videointervju. Intervjuerna utfördes i grupper om två eller tre, exklusive intervjupersonen. En person ansvarade för att leda intervjun och ställa frågor medan övriga ansvarade för att anteckna svaren. Vid argumentationer från intervjupersonen gällande information eller påståenden som gruppen inte hade någon förkunskap om så ombads individen att uppge källor på detta för att styrka påståendet. En lista över respondenter, plats för intervju samt längd återfinns i Bilaga 1.

### 3.3 Livscykelperspektiv

Studien utformades genom att jämföra befintliga livscykelanalyser från Vattenfall för vindkraftverk och dagens kärnkraftverk. Med hjälp av dagens kärnkraft och bränslecykel för GenIV var det möjligt att göra en lämplig avgränsning för livscyklerna för GenIV. Ett livscykelräknande användes för att redovisa samtliga kostnader för de olika energikällorna. Sedan tillämpades antaganden om kostnader för GenIV-kärnkraft med utgångspunkt i dagens kärnkraftverk.

#### 3.3.1 Kostnader

De två primära ekonomiska aspekterna för att jämföra GenIV-kärnkraft med vindkraft var investeringskostnad per producerad mängd elektricitet och elkostnaden, d.v.s kostnaden för att producera kWh. I investeringskostnaden är kostnaderna för att få kraftverket i drift inkluderade. De exkluderade kostnaderna är drift och underhåll.

Eftersom kärnkraften och vindkraften har både olika livslängd och kapacitetsfaktor sattes investeringskostnaderna i relation till den producerade mängden elektricitet under teknikens hela livscykel. Med den beräknade livscykelkostnaden kunde kostnaderna för GenIV-kärnkraft och vindkraft jämföras. I beräkningen användes följande formel, där investeringskostnaden uttrycks i öre/kW istället för kr/MW och livslängden i timmar (h) istället för år.

$$\frac{\text{Investeringskostnad}}{\text{Kapacitetsfaktor} \cdot \text{Livslängd}} = \frac{[\text{öre}/\text{kW}]}{[1] \cdot [h]}$$

Enligt Suchitra och Ramana (2011) uppgår kostnaderna för ett GenIV-system till 80 % mer än för ett motsvarande kärnkraftssystem med dagens teknik. För att beräkna elkostnader för GenIV-kärnkraft multiplicerades elkostnaden 43,22 - 152,71 öre/kWh från Bexelius och Diklev (2018) med faktorn 1,80. Resultatet från dessa studier sammanslogs med Janne Wallenius beräkningar (u.å.) för elkostnad på 70 - 85 öre/kWh.

#### 3.3.2 Miljöpåverkan

För vindkraftverk och dagens kärnkraftverk har befintliga miljövarudeklarationer från Vattenfall använts, där den funktionella enheten definieras som 1 kWh netto genererad elektricitet som distribueras

till elnätet. Analysen för GenIV-kärnkraft baserades på miljövarudeklarationen för dagens kärnkraft, där anpassningar gjordes vid skillnader mellan de två systemen. Miljövarudeklarationerna använder en jämförelse av de två elproduktionsslagen där utsläppen för vindkraft ställdes mot utsläppen för kärnkraftverk.

De aspekter som valdes och jämfördes för vind- och kärnkraft är; utsläpp av växthusgaser, försurande substanser, övergödande substanser, partikelutsläpp och marknära ozon. De här är de aspekter som Vattenfall tar upp i sin miljövarudeklaration och är vanliga aspekter att undersöka vid miljöpåverkan. Data från Vattenfalls miljövarudeklaration användes för att göra en kvantitativ jämförelse mellan de olika aspekterna för dagens kärnkraft och vindkraft, där data användes för att se vilken av de två elproduktionsslagen som hade högst miljöpåverkan. För att kunna göra en jämförelse mellan aspekterna uttrycktes varje respektive enhet i relation till mängden producerad elektricitet under elproduktionsslagens livscykel. Partikelutsläpp från konstruktion och nedmontering av kärnkraftverk, anläggningar för radioaktiv avfallshantering och uranbrytning har inte inkluderats i miljövarudeklarationerna. Inte heller i vindkraften hade partikelutsläpp från konstruktion och nedmontering inkluderats, men brytning av sällsynta metaller är inkluderade. I beräkningarna till aspekterna i miljövarudeklarationerna inkluderades följande:

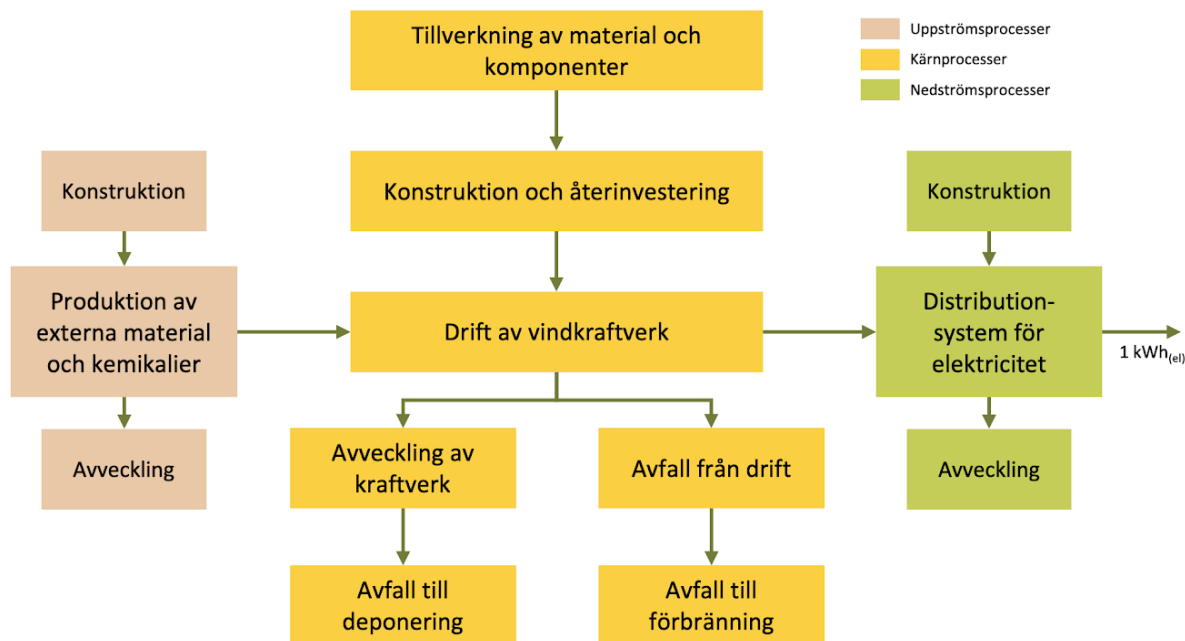
- Större indata och utdata som är nödvändiga för konstruktion, underhåll och nedmontering av infrastrukturen för kärnkraftverken samt anläggningar för hantering av radioaktivt avfall.
- Större indata och utdata som är nödvändiga för konstruktion, underhåll och nedmontering av infrastrukturen för vindkraften.
- Antaganden gällande mängden material är konservativ.
- Produktion av råmaterial till byggnader, maskiner och komponenter.
- Tillverkningsprocesser för större maskiner och komponenter som generatorer, transformatorer och turbiner.
- All känd indata och utdata från underleverantörer av kärnbränsle.

Kärn- och vindkraftens livscyklar delades upp i kärnprocesser, uppströmsprocesser, uppströmsprocesser i infrastruktur, nedströmsprocesser och nedströmsprocesser i infrastruktur för att se var i livscyklerna som de olika formerna av miljöpåverkan uppkom.

Kärnkraftens kärnprocesser inkluderar drift av kärnkraftverk och anläggningar för hantering av radioaktivt avfall, förbränning eller deponering av avfall från drift, konstruktion och avveckling av kärnkraftverk och avfallsanläggningar samt nödvändiga återinvesteringar. Uppströmsprocesser inkluderar brytning och förädling av bränsle till kärnreaktionen, produktion av kemikalier för drift av kärnkraften och kemikalier behandling av radioaktivt avfall. Nedströmsprocesser inkluderar arbete relaterat till elnätet, d.v.s. utsläpp från inspektionsresor, produktion och utsläpp av oljor samt extra alstring av elektricitet i kärnkraftverket för att kompensera för nätförluster. Nedströmsprocesser i infrastruktur inkluderar tillverkning av material för bl.a. ledningar, transformatorer och byggnader. Se Figur 3.1 för kärnkraftens flödesschema. Infrastruktur för leverantörer i kärnbränslekedjan är inte inkluderat. Anläggningarna för extrahering, konvertering och anrikning av uran såväl som produktion av bränsle används av många aktörer förutom Vattenfall. Enligt Vattenfall var det därför svårt att erhålla data från leverantörer, men konstruktion och nedmontering av dessa anläggningar antas ha liten påverkan på det slutgiltiga resultatet angående miljöpåverkan och inkluderas därmed inte i deras bedömning.







Figur 3.2 Förenklat processträd och systemgränser för LCA för ett vindkraftverk där bruna boxar representerar uppströmsprocesser, gula boxar representerar kärnprocesser och gröna boxar representerar nedströmsprocesser. Inspiration från Vattenfall (2019)

### 3.4 Indikatorer

För att ta reda på om GenIV-kärnkraft kan vara ekonomiskt, ekologiskt och socialt hållbar i förhållande till framtidens vindkraft i Sverige användes indikatorer gällande ekonomiska, ekologiska samt till viss del sociala aspekter. Indikatorerna behandlades och presenterades i resultatet där vindkraft och GenIV-kärnkraft jämförs. I Tabell 4.2 under resultat används beteckningarna 1 eller 0 för jämförelsen. En 1:a innebar att tekniken presterade bättre än den andra varpå den sämre tekniken erhöll en 0:a. Efter teknikerna hade jämförts utifrån de tre aspekterna, ekonomi, ekologi och socialt erhålls därefter en totalpoäng för teknikerna. Indikatorerna som jämfördes var;

#### Ekonomiska

- Investeringskostnad
- Elkostnad
- Kostnad för olyckor

#### Ekologiska

- Miljöbelastning
- Markanvändning
- Avfallshantering

#### Sociala

- Elsäkerhet
- Klimatomställning
- Dödstal

När GenIV-kärnkraft och vindkraft jämförts för varje indikator var det möjligt att se inom vilka områden som de två elproduktionsslagen var mest lönsamt. Summan av indikatorer inom aspekterna ekonomisk, ekologisk och social hållbarhet indikerar på vilken av GenIV-kärnkraft och vindkraft som är mest hållbar.

### 3.5 Globala målen

GenIV-kärnkraft och vindkraft jämfördes för de relevanta målen med utgångspunkt i vilken av de två teknikerna som bidrog mest till respektive mål. Jämförelsen utfördes med hjälp av resultatet från teknikernas påverkan på ekologisk, ekonomisk och social hållbarhet samt med hjälp av studiens bakgrundsavsnitt. Resultatet presenterades med hjälp av en tabell där den teknik som bidrog mest till det undersökta globala målet erhöll 1 poäng och det andra 0. Poängen summerades sedan för att presentera vilken av de två teknikerna som totalt sett bidrar mest till att uppfylla målen.

### 3.6 Analysstrategi

I följande avsnitt presenteras studiens analysstrategi i förhållande till de tre forskningsfrågorna där respektive elproduktionsslags utfall gentemot den andra analyseras.

#### 3.6.1 Ekonomisk och ekologisk hållbarhet

Utgångspunkt i analysen kommer vara resultatet av indikator Tabellen med en jämförelse av respektive indikator.

#### 3.6.2 Teknikernas bidrag till de globala målen

Bidragen till de globala målen analyserades ur tre olika perspektiv; teknikutveckling, klimatförändringar samt fred och globalt partnerskap.

#### 3.6.3 GenIV-kärnkrafts och vindkrafts funktion ur ett samhällsperspektiv

Elproduktionsslagens funktioner ur ett samhällsperspektiv analyserades utifrån bakgrunden med avseende på funktioner utöver elproduktion.

## 4. Resultat

I följande avsnitt presenteras studiens resultat med avseende på kostnader, miljöpåverkan och samhälle som baseras sammanfogning av data som har presenterats tidigare i rapporten, se avsnitt 2. Bakgrund. Resultaten sammanställs senare i två tabeller, en för de valda indikatorerna och en för FN:s globala mål för hållbar utveckling.

### 4.1 Kostnader

I följande avsnitt presenteras investeringskostnad och elkostnad för vindkraft respektive GenIV-kärnkraft. Tabell 4.1 är en sammanslagning av data från flera olika studier, som tidigare har presenterats i 2.4.8 (Kostnader dagens kärnkraft), 2.5.8 (Kostnader vindkraft) och 2.7.7 (Kostnader GenIV-kärnkraft), samt beräkningar som presenteras i 3.3.1 (Kostnader). Baserat på de tre studierna från Bexleius och Diklev, Suchitra och Ramana samt Wallenius fastställs ett kostnadsintervall för producerad elektricitet på 70 - 275 öre/kWh för GenIV-kärnkraft.

Tabell 4.1 Kostnaden per genererad kilowattimme el för vindkraft och GenIV-kärnkraft.

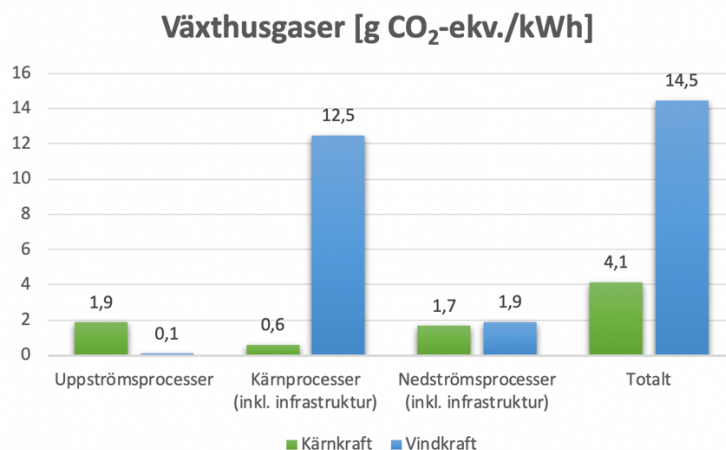
Kostnad \ Teknik	Vindkraft	GenIV-kärnkraft
Investeringskostnad [Mkr/MW]	10 - 12	24 - 273
Normerad investeringskostnad [öre/kWh]	15 - 18	8,6 - 96,9
Elkostnad [öre/kWh]	40 - 63	70 - 275

### 4.2 Miljöpåverkan

I följande avsnitt presenteras miljöpåverkan från dagens kärnkraft och vindkraft, i form av utsläpp av växthusgaser, försurande substanser, övergödande substanser, partiklar, skapande av marknära ozon samt påverkan på biologisk mångfald vid markanvändning. Miljöpåverkan delas upp i uppströms-, kärn- och nedströmsprocesser för respektive teknik.

## 4.2.1 Växthusgaser

I Figur 4.1 nedan presenteras att utsläppen av växthusgaser från kärnkraft och vindkraft uppgår till totalt 4,1 respektive 14,5 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh (koldioxidekvivalent/kWh).



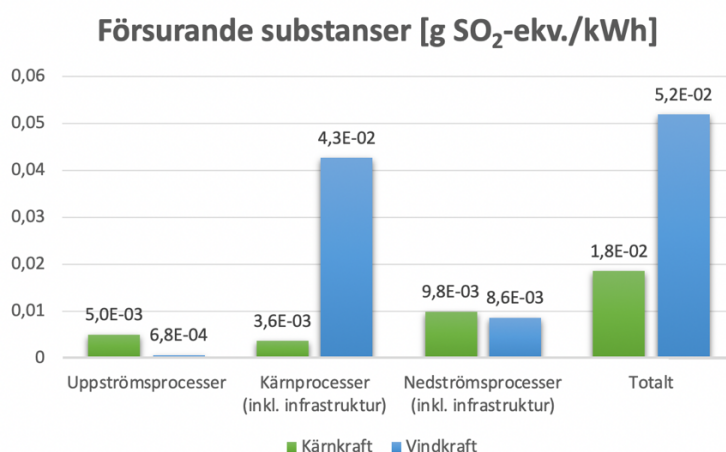
Figur 4.1 Utsläpp av växthusgaser, räknat i g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh, från kärnkraft och vindkraft

Enligt Vattenfall (2019) kommer miljöbelastningen i form av utsläpp av växthusgaser från de nya vindkraftsparkerna Blakliden/Fäbodberget halveras till 6 - 7 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh. Det beror dels på att turbinerna är större och kommer generera mer elektricitet, dels på att tornen konstrueras med lättare men starkare material vilket leder till mindre utsläpp genom bland annat enklare transporter.

## 4.2.2 Försurning

I Figur 4.2. presenteras utsläpp av försurande substanser, vilket påverkar levande organismer negativt och bidrar till korrosion av exempelvis nedgrävda rörledningar (Naturvårdsverket, 2020).

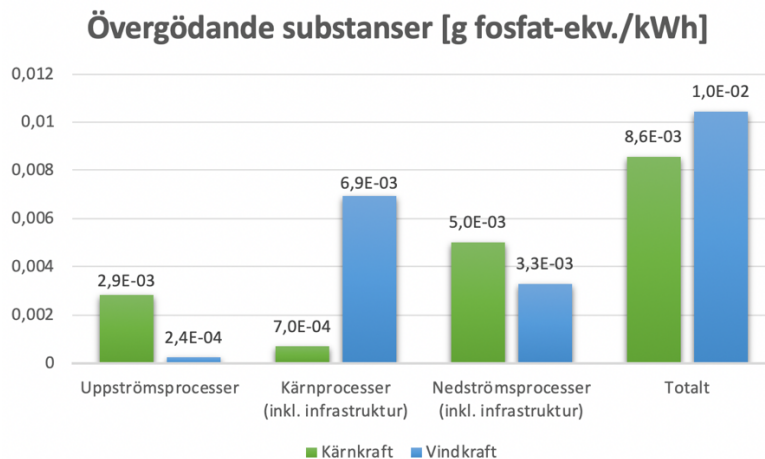
Utsläppen uppgår till totalt 0,018 respektive 0,052 g SO<sub>2</sub>-ekv./kWh (svaveldioxidekvivalent) för kärnkraft och vindkraft.



Figur 4.2 Utsläpp, räknat i g SO<sub>2</sub>-ekv./kWh, av försurande substanser från kärnkraft och vindkraft

### 4.2.3 Övergödning

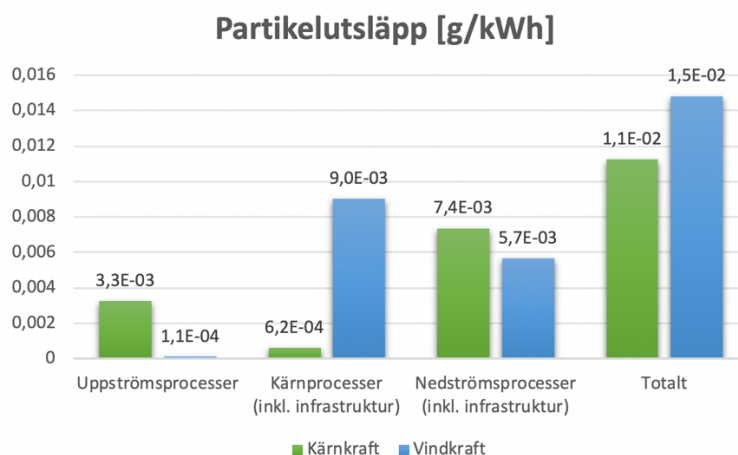
I Figur 4.3 presenteras utsläpp av övergödande substanser, vilket leder till obalans i ekosystem (Naturvårdsverket, 2003). Dessa utsläpp uppgår till totalt 0,0086 respektive 0,010 g fosfat-ekv./kWh (fosfatekvivalent/kWh) för kärnkraft och vindkraft.



Figur 4.3 Utsläpp, räknat i g fosfat-ekv./kWh, av övergödande substanser från kärnkraft och vindkraft

### 4.2.4 Partikelutsläpp

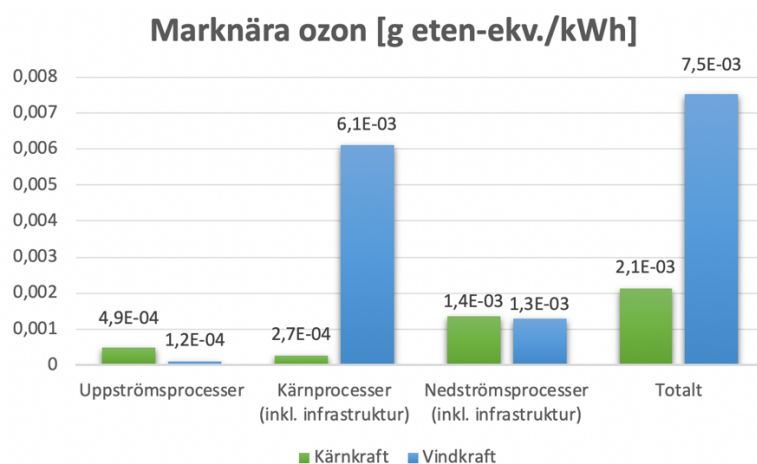
I Figur 4.4 presenteras utsläpp av partiklar, vilket är skadligt för levande organismer (Naturvårdsverket, 2019). Dessa utsläpp uppgår till totalt 0,011 respektive 0,015 g/kWh för kärnkraft och vindkraft.



Figur 4.4 Utsläpp, räknat i g/kWh, av partiklar från kärnkraft och vindkraft

### 4.2.5 Marknära ozon

I Figur 4.5 presenteras utsläpp av substanser som bidrar till skapande av marknära ozon, vilket är skadligt för levande organismer (Naturvårdsverket, 2019). Dessa utsläpp uppgår till totalt 0,0021 respektive 0,0075 g eten-ekv./kWh (etenekvivalent/kWh) för kärnkraft och vindkraft.



Figur 4.5 Utsläpp, räknat i g eten-ekv./kWh, som bidrar till skapande av marknära ozon från kärnkraft och vindkraft

#### 4.2.6 Markanvändning

Utöver ovan nämnda utsläpp påverkar även kärnkraften och vindkraften biologisk mångfald genom markanvändning. I Vattenfalls miljövarudeklaration för Ringhals och Forsmark kärnkraftverk (2019) inkluderas 21 anläggningar till analysen av markanvändning. Sex av 21 anläggningar uppvisar kvalitetsnivå A, en uppvisar kvalitetsnivå B och 14 uppvisar kvalitetsnivå C, vilket ger övergripande kvalitetsnivå C. Till vindkraftens miljövarudeklaration (2019) inkluderar Vattenfall tre svenska vindkraftsparker som samtliga uppvisar kvalitetsnivå A.

### 4.3 Sammanställning indikatorer

I Tabell 4.2 nedan sammanställs studiens indikatorer vilka baseras på ekonomi, ekologi och social.

Tabell 4.2 Sammanställning och jämförelse av indikatorer. I jämförelsen representerar en "1" att tekniken presterar bäst av de två teknikerna. Sista raden summerar antalet indikatorer där respektive teknik presterar bäst i jämförelsen

Indikator \ Teknik	Vindkraft	GenIV-kärnkraft
<b>Kostnader</b>		
Investeringskostnad	1	0
Elkostnad	1	0
Kostnad för olyckor	1	0
<b>Miljöpåverkan</b>		
Miljöbelastning	0	1
Markpåverkan	1	0
Avfallshantering	0	1
<b>Samhälle</b>		
Elsäkerhet	0	1
Klimatomställning	1	0
Dödstal	0	1
<b>Summering</b>	<b>5</b>	<b>4</b>

Från Tabell 4.2. framkommer att GenIV-kärnkraft baserat på de indikatorer studien studerat är att föredra före vindkraft med avseende på miljöpåverkan, men inte inom samhälle och kostnader. Totalt är landbaserad vindkraft ett bättre alternativ än GenIV-kärnkraft med avseende på 6 av 9 undersökta indikatorer.



## 4.4 Jämförelse utifrån de globala målen

I Tabell 4.3 redovisas vilket elproduktionsslag av vindkraft och GenIV-kärnkraft som bidrar mest till respektive mål.

Tabell 4.3 I följande tabell presenteras hur vindkraft och GenIV-kärnkraft ställs mot varandra utefter teknikernas koppling till de globala målen och dess delmål. Teknikerna erhåller 1 poäng eller 0 poäng där 1 poäng betyder att tekniken presterar bättre än den andra och 0 poäng betyder att tekniken presterar sämre än den andra.

Teknikernas koppling till de globala målen och dess delmål	Vindkraft	GenIV-kärnkraft
Mål 7 - Hållbar energi för alla	1	0
Mål 9 - Hållbar industri, innovationer och infrastruktur	1	0
Mål 13 - Bekämpa klimatförändringar	1	0
Mål 16 - Fredliga och inkluderande samhällen	1	0
Mål 17 - Genomförande och globalt partnerskap	0	1
<b>Summering</b>	<b>4</b>	<b>1</b>

Från Tabell 4.3 framkommer att vindkraft är att föredra framför GenIV-kärnkraft inom fyra av de fem berörda målen. Resultatet presenteras mer i detalj nedan:

- **Mål 7 - Hållbar energi för alla:** På grund av GenIV-kärnkrafts höga investeringskostnader samt elkostnader är den inte ekonomiskt hållbar. Vindkraft bidrar även till delmål 7.2 - Öka andelen förnybar energi i världen vilket GenIV-kärnkraft inte gör. Därmed bidrar vindkraft mer till mål 7.
- **Mål 9 - Hållbar industri, innovationer och infrastruktur:** Eftersom GenIV-kärnkraft inte är ekonomiskt hållbart i jämförelse med vindkraft bidrar vindkraften mer till mål 9 samt delmål 9.4 - Uppgradera all industri och infrastruktur för ökad hållbarhet.
- **Mål 13 - Bekämpa klimatförändringar:** GenIV-kärnkraft är inte en mogen teknik och eftersom det behövs akuta åtgärder för att bekämpa klimatförändringar kan vindkraft potentiellt bidra mer till mål 13, trots att GenIV-kärnkraft bidrar med mindre utsläpp av koldioxidkvivalenter. Båda teknikerna bidrar till delmål 13.2 - Integrera åtgärder mot klimatförändringar i politik och planering.

- **Mål 16 - Fredliga och inkluderande samhällen:** Med GenIV-kärnkrafts stängda bränslecykel antas risken för kärnvapen minska jämfört med dagens kärnkraft, men den kan inte elimineras helt. Vindkraft anses därför som en säkrare elproducent vilken bidrar mer till mål 16 samt delmål 16.4 - Bekämpa organiserad brottslighet och olaga finans- och vapenflöden.
- **Mål 17 - Genomförande och globalt partnerskap:** GenIV-kärnkraft anses bidra mer till mål 17 och i synnerhet till delmål 17.6 - Samarbeta och dela kunskap kring vetenskap, teknik och innovation. Exempel på svensk innovation som främjar globalt partnerskap är det svenska företaget Blykalla vilka potentiellt kommer producera hållbar elektricitet i de arktiska delarna av Kanada med hjälp av en blykyld snabbreaktor (Blykalla, 2019).

## 5. Analys

I följande avsnitt analyseras resultatet och i synnerhet tabellerna för indikatorerna, *Tabell 4.2* och jämförelse utifrån de globala målen, *Tabell 4.3*, utifrån forskningsfrågorna för att kunna besvara studiens syfte.

### 5.1 Ekonomisk och ekologisk hållbarhet

I avsnitt 5.1 analyseras de ekonomiska och ekologiska aspekterna av resultatet.

#### 5.1.1 Ekonomi

Kostnaderna för de två studerade GenIV-reaktorerna skiljer sig markant. Den lägsta kostnaden för ett GenIV-kärnkraftverk på 24 Mkr/MW är för BN-800 och den högre kostnaden på 273 Mkr/MW är för ASTRID-projektet. I relation till Energikommissionens beräkning att investeringskostnaden för en reaktor baserad på dagens teknik som uppgår till 37 Mkr/MW i Sverige verkar det osannolikt att det i svenska förhållanden är möjligt att bygga en GenIV-reaktor till samma kostnad som BN-800. De höga investeringskostnaderna för GenIV-kärnkraft medför en större finansiell risk vid investering än för vindkraft.

På grund av längre livslängd och större kapacitetsfaktor producerar GenIV-kärnkraft mer elektricitet under sin livstid. När investeringskostnaden för respektive elproduktionslag sätts i relation till den förväntade mängd producerad elektricitet under livstiden är det mer sannolikt att GenIV-kärnkraft kan vara ekonomiskt konkurrenskraftigt mot vindkraft. Eftersom den normerade investeringskostnaden för BN-800 är lägre än den lägsta normerade investeringskostnaden för vindkraft, samtidigt som samma kostnad för ASTRID är klart högre än den högsta normerade investeringskostnaden för vindkraft. Dock finns det en nackdel med de större finansiella riskerna GenIV-kärnkraft medför, dels på grund av den längre återbetalningstiden för investerare, dels på grund av att tekniken måste vara ekonomiskt konkurrenskraftig under en lång period. Under denna period fortsätter utvecklingen av konkurrerande tekniker såsom till exempel vindkraften, vilket försvagar den ekonomiska konkurrenskraften för GenIV-kärnkraft ytterligare. För att investera i ett GenIV-system behövs det dessutom väldigt stort startkapital som många aktörer inte har, medan en vindkraftspark kan delas upp i mindre delar där inte alla vindkraftverk införskaffas samtidigt. En fördel med vindkraftens kortare livslängd är större omsättning av vindkraftverk vilket möjliggör kontinuerlig implementering av ny teknik. I kombination med att elproduktionen är fördelad över många olika kraftverk som byggs vid olika tidpunkter innebär det att vindkraften som helhet potentiellt löper mindre risk att förlora ekonomisk konkurrenskraft under sin livstid. Ytterligare en risk vid investering av nya elproduktionslag är att de bygger på prognoser av framtida elbehov. Om prognoserna visar sig vara felaktiga kan det leda till att systemet som helhet har en överkapacitet som kan resultera i att alla producerade kWh inte säljs till förväntat pris. Det är en problematik som existerar för både vindkraft och kärnkraft, men eftersom kärnkraften har längre livstid blir osäkerheterna större.

För vindkraft tillkommer ytterligare investeringar kring till exempel ombyggnad av elnätet, reservkapacitet, lagring för att hantera vindkraftens intermittens och dessutom eventuell artificiell svängmassa. Kärnkraften bidrar med svängmassa vilket är en tjänst som kärnkraften inte får betalt för, men vid avveckling av kärnkraft skulle det krävas att svängmassa tillförs till systemet på annat sätt vilket skulle innebära stora kostnader. På samma sätt tillkommer kostnader vid uppbyggnadsanläggningar för GenIV, vilka är kostnader som inte har tagits med i jämförelsen.

Enligt studiens beräkningar ligger elkostnaden för GenIV-kärnkraft mellan 77,80 - 275 öre/kWh jämfört med Janne Wallenius beräkningar på mellan 70 - 85 öre/kWh. Den lägre elkostnaden från Wallenius beräkningar är inte tillräckligt låg för att kunna vara ekonomiskt konkurrenskraftigt mot vindkraft. Dessutom krävs det stora forskningsframsteg inom området för att uppnå långsiktig ekonomisk konkurrenskraft eftersom vindkraftens elkostnad förväntas avta avsevärt till 2030. Det är ännu osäkert huruvida GenIV-kärnkraft kommer kunna vara ekonomiskt lönsamt i framtiden, men det kan konstateras att det inte skulle vara ekonomiskt lönsamt i dagsläget.

### 5.1.2 Ekologi

Kärnkraften har lägre utsläpp än vindkraften och presterar därmed bättre än vindkraften i samtliga undersökta kategorier, med undantag för markanvändning. En bidragande faktor är att kärnkraften producerar avsevärt mer elektricitet under sin livstid än vad vindkraften gör. Båda elproduktionslagen presterar dock väldigt väl inom samtliga undersökta ekologiska indikatorer, och ur ett hållbart ekologiskt perspektiv antas båda vara ett bra val.

En av fördelarna med att bygga vindkraft jämfört med kärnkraft är att eftersom vindkraftverken har kortare livslängd blir omsättningen av vindkraftverk högre än för GenIV-kraftverk varpå ny teknik kan implementeras mer frekvent. Jämfört med de vindkraftverk som finns i Sverige idag och inkluderats i resultat presterar GenIV-kärnkraft väl, men det är svårt att säga vilken ekologisk påverkan framtida vindkraftverk kommer ha. Till exempel beräknas vindkraftverk i den nya vindkraftsparken i Blakliden/Fäboberget halvera koldioxidutsläppen jämfört med tidigare vindkraftverk i Sverige.

Om dagens kärnkraft ska ersättas med endast vindkraft behöver vindkraften byggas ut med tre gånger sin aktuella storlek för att möta nettoproduktionen. För att möta årsproduktionen kommer det behövas lösningar i form av lagringsmöjligheter och distribution då vindkraft inte kan leverera den efterfrågade mängden elektricitet dagligen, även om de kan ersätta en nettoproduktion under ett år. Utbyggnaden skulle även leda till ytterligare miljöbelastning. Om kärnkraften istället ersätts med GenIV-kärnkraft krävs troligtvis mindre arbete relaterat till nätanslutning. Det innebär att utsläppen från byggnation av kraftledningar, det vill säga nedströmsprocesser, troligtvis kommer vara högre för vindkraft än för GenIV-kärnkraft, förutsatt att GenIV-kärnkraft kan förläggas i anslutning till befintliga kärnkraftverk.

Enligt Vattenfalls miljövarudeklaration är vindkraft, som uppnår nivå A, bättre än kärnkraft utifrån markanvändningens påverkan på biologisk mångfald. För kärnkraften är det främst uppströmsprocesser som ger låg kvalitetsnivå, medan kärnprocesserna uppvisar höga kvalitetsnivå, A eller B, varpå kärnkraften totalt sett erhåller kvalitetsnivå C. I och med att aktiviteterna i uppströmsprocesserna minskar för ett GenIV-system i förhållande till dagens kärnkraftssystem kommer de negativa effekterna på biologisk mångfald sannolikt minska. Det är svårt att avgöra hur mycket det kan förändras och om det kommer bli bättre än vindkraft eller ej. Att vindkraftverk är bättre än GenIV-kärnkraftverk vid markanvändning går därför avgöra med självklarhet. Det är även intressant att resonera kring hur stor yta som används. En stor yta med en bra kvalitetsnivå kan tillsammans försämra påverkan på marken även om vindkraftverken var för sig har liten påverkan, medan ett sämre betyg på en mindre yta, som för kärnkraften, potentiellt skulle kunna vara bättre. Studien har inte utvärderat hur stor yta som går åt för vindkraftverk respektive kärnkraftverk med en likvärdig elproduktion. Vindkraftverk skulle kunna visa sig vara mycket bättre då marken runt omkring tornet fortfarande kan brukas och det bara är själva ytan som vindkraftverket står på och den lagda vägen som inte kan utnyttjas till annat. En vindkraftspark använder en betydligt större yta och även om det skulle kunna samverka med annat utnyttjande av

marken så krävs det att den totala ytan finns tillgänglig. Ett kärnkraftverk använder en relativt liten yta i förhållande till producerad el och skulle på så sätt totalt kunna vara bättre utifrån markanvändning än om flertalet vindkraftverk skulle byggas.

Att elproduktionsslagen är förnybara kan anses som viktigt men ur ett miljöperspektiv är det inte säkert att de är det mest relevanta. Vindkraft är per definition förnybart och kärnkraft är inte det. Med GenIV skulle bränslet räcka i tusentals år vilket är så långt in i framtiden att det kan diskuteras om att det ska räknas som förnybart.

## 5.2 Teknikernas bidrag till de globala målen

Från *Tabell 4.3 Jämförelse utifrån de globala målen* i resultatet framkommer att vindkraften är ett bättre alternativ än GenIV-kärnkraft utifrån fyra av de fem studerade globala målen. Det innebär att vindkraft är mer lämpad för hållbar utveckling i Sverige än GenIV-kärnkraft utifrån FN:s globala mål. I följande avsnitt diskuteras de båda elproduktionsslagen utifrån de globala målen utifrån två perspektiv; teknikutveckling och globalt partnerskap.

### 5.2.1 Teknikutveckling

Baserat på utfallet från *Tabell 4.3 Jämförelse utifrån de globala målen* kan GenIV-kärnkraft inte konkurrera mot vindkraft med avseende på FN:s globala mål för hållbar utveckling. Anledningen är att det kompletta GenIV-systemet ännu inte kan implementeras på marknadsmässiga villkor och därmed inte bidra till de globala målen. Vidare forskning kring GenIV-kärnkraft kommer dock troligtvis leda till effektivisering av ingående komponenter och därmed sänka kostnaderna för tekniken. När kostnaderna är tillräckligt låga kan det implementeras på marknadsmässiga villkor och bidra till fortsatt hållbar elproduktion.

Innan GenIV-kärnkraft kan implementeras på marknadsmässiga villkor kommer andra alternativa elproduktionsslag sannolikt utvecklas till att bli än mer ekonomiskt och ekologiskt hållbara. Det innebär att andra funktioner som GenIV-kärnkraft bidrar med till elnätet måste värderas tillräckligt högt för att kunna konkurrera om elproduktionen i Sverige. Dessutom kommer antagligen möjligheterna till lagring av elektricitet utökas i och med utveckling av exempelvis batterier och bränsleceller. Möjlighet till att lagra elektricitet kan bidra till en lösning på problemet kring vindkraftens intermittens, vilket skulle kunna göra samhället mindre beroende av kärnkraftens höga tillgänglighet. För att möta det eventuellt ökade elbehovet krävs stora framsteg kring lagring av elektricitet. En eventuell elektrifiering av transportsektorn och industrin skulle kunna vara en anledning till det ökade elbehovet. Om alla förbränningsmotorer ska bytas ut mot elmotorer och batterier ökar risken för nationell effektbrist i samhället. För att undvika bristande elproduktion under långa perioder med svag vind behöver vindkraften kompletteras med något annat stabilt elproduktionsslag, exempelvis GenIV-kärnkraft.

Ett komplett GenIV-system, med total återvinning av bränslet, är i dagsläget inte ekonomiskt lönsamt och därmed inte implementerat, men det finns ett antal GenIV-reaktorer i världen som drivs utan helt slutna bränslecykler. Utifrån de redovisade utsläppen av växthusgaser skulle en GenIV-reaktor kunna bidra med hållbar elproduktion med befintlig teknik. Som nämns i avsnitt 2.4.5 (Miljöbelastning från kärnkraften) kommer tillgångarna på uran att räcka i ca 100 år framöver om de förbrukas i samma takt som idag. Om GenIV-reaktorer kan vara en del av lösningen på klimatkrisen bör eventuellt fokus föras från debatten om huruvida elproduktionsslagen är förnybara eller ej till att minska utsläppen. Om den globala uppvärmningen ska avta innan år 2030 skulle GenIV-reaktorer, utan helt slutna bränslecykler,

tillsammans med ny vindkraft kunna bidra till hållbar utveckling. Oavsett om de globala målen uppfylls till år 2030 eller ej kommer behovet av klimatneutral elproduktion kvarstå.

Sammanfattningsvis kan inte GenIV-kärnkraft i dagsläget bidra till FN:s globala mål 7, 9 och 13 lika bra som vindkraft. Däremot har tekniken potential till att på längre sikt bidra med hållbar elproduktion.

### 5.2.3 Globalt partnerskap

Minskade utsläpp från Sveriges elproduktion påverkar inte märkbart de globala klimatförändringarna, eftersom utsläppen redan är mycket låga. Frågan är då om fokus verkligen bör ligga på att minska utsläppen från Sveriges elproduktion. Det skulle möjligtvis göra större skillnad om Sverige kunde influera andra länder till mer hållbar elproduktion. Enligt Climate Change Performance Index (CCPI) där Sverige rankas ett av de mest klimatneutrala länderna, rankas bland annat USA, Kina och Kanada mycket lågt. I exempelvis Kanada baseras stora delar av elproduktionen på förbränning av diesel (Blykalla 2019), vilket svensk innovation skulle kunna bidra med lösning på. Janne Wallenius och Blykalla har som avsikt att erbjuda Kanada en GenIV-reaktor, utan helt slutna bränslecykler, för att främja de globala målen genom att minska andelen fossil elproduktion (Blykalla, 2019). Med sådana typer av innovationer och globalt partnerskap skulle Sverige kunna bidra med mer hållbar elproduktion i världen och därmed arbeta mot klimatförändringar där det gör skillnad. Det finns fler länder som enligt CCPI rankas lika lågt som Kanada vilket öppnar upp för många potentiella marknader för exempelvis Blykalla. En nackdel med global utveckling av GenIV-kärnkraft är potentiellt ökade risker för spridning av kärnvapen, risken antas minska jämfört dagens bränslecykel men kan inte uteslutas helt.

## 5.3 GenIV-kärnkraft och vindkraft ur ett samhällsperspektiv

I och med att GenIV-kärnkraft bidrar med svängmassa samt stabil elproduktion kan det vara att föredra framför vindkraft ur ett samhällsperspektiv. Eftersom avveckling av dagens kärnkraft skulle leda till brist på svängmassa, behöver ny svängmassa tillföras i framtiden för att säkerställa ett stabilt kraftnät. Nybyggnation av GenIV-reaktorer kan tillföra svängmassa, vilket vindkraften inte gör. Att elbehovet prognostiseras att öka markant till 2045 ställer dessutom krav på en större mängd svängmassa i framtiden. Det finns delar av samhället, såsom sjukvård, reningsverk samt tele- och datakommunikation, som antagligen är extra känsliga mot effektbrist. För att sådana samhällsbärande funktioner inte ska sluta fungera behöver de tillförlitlig elproduktion, vilket GenIV-kärnkraft skulle kunna bidra med.

Ur ett samhällsperspektiv är det väsentligt med elproduktion som kan planeras utefter det faktiska behovet. Vindkraften erbjuder inte den möjligheten vilket betyder att ett kraftnät som till stor grad är beroende av vindkraft löper risk för över- eller underproduktion. Ett sådant system skulle troligtvis vara beroende av att elektricitet går att lagra exempelvis i batterier eller bränsleceller, vars lagringspotential i dagsläget är mycket begränsad. Ytterligare en konsekvens skulle troligtvis bli att Sverige tvingas importera el från andra länder i stor utsträckning. För Sverige skulle ett kraftnät som löper stor risk för återkommande effektbrist troligtvis få allvarliga samhällskonsekvenser. Studien har dock inte undersökt vilka konsekvenser det skulle kunna medföra.

Hanteringen av det radioaktiva avfallet från dagens kärnkraft är problematisk och ett eventuellt slutförvar måste med hög säkerhet kunna lagra avfallet i 100 000-tals år. Det skapar en problematik kring utformningen av ett slutförvar, som ännu inte finns i Sverige. Denna problematik kan minska med hjälp av GenIV-kärnkraft som kan använda det radioaktiva avfallet till att producera en stor mängd

elektricitet. Avfallet från GenIV-kärnkraft behöver endast slutförvaras i 100-tals år. Troligtvis leder denna förändring till lägre kostnader för avfallshantering, samt att det potentiellt förenklar utvecklingen av ett fungerande slutförvar.

Kärnkraften möter stort motstånd på grund av historiska olyckor, men vad som sällan uppmärksammas är olyckorna som sker i samband med underhåll av vindkraftverk. Normerat till producerad mängd elektricitet uppgår dödsfallen till 150 och 90 personer per biljon kWh för vindkraft respektive kärnkraft. Studien har inte identifierat några dödsfall i Sverige, vilket kan bero på striktare säkerhetsrutiner både för vindkraft och kärnkraft jämfört med övriga världen. Eftersom vindkraft globalt sett står för en väldigt liten andel av den producerade elektriciteten får också varje enskilt dödsfall större utslag. Det är möjligt och troligt att allt eftersom tekniken och säkerhetsrutinerna utvecklas kommer dödsfallen avta.

För att forskningen kring GenIV-kärnkraft ska fortgå krävs troligtvis politiskt stöd från riksdagen. I dagsläget har kärnkraften stöd från endast 44 % av riksdagen, vilket skulle kunna bero på de ekonomiska och sociala aspekterna. För att GenIV-kärnkraft ska erhålla större politiskt stöd behöver det bli mer ekonomiskt lönsamt, men den politiska debatten kommer sannolikt fortsatt vara delad bland annat på grund av ideologiska principer.

## 6. Diskussion

I följande avsnitt presenteras en diskussion kring den valda metoden och källornas trovärdighet för att undersöka lämpligheten i tillvägagångssättet för att besvara studiens syfte.

### 6.1 Metodkritik

Studien har utgått från en explorativ metod och undersökt GenIV-kärnkraft och vindkraft ur ett livscykelperspektiv för att jämföra dem i dess helhet. Nedan diskuteras för- och nackdelar med metoden.

#### 6.1.1 Litteraturstudie

I kartläggningens inledande fas utfördes en omfattande litteraturstudie kring det aktuella ämnet. Studien utfördes i brett perspektiv vilket ansågs nödvändigt för att få god uppfattning om området, men en tidigare begränsning hade potentiellt kunna resultera i djupare förståelse inom vissa specifika områden.

Vidare behandlade litteraturstudien GenIV-kärnkraft, vindkraft samt det svenska kraftnätet utifrån befintlig litteratur, forskning, vetenskaplig tidskrift samt rapporter från myndigheter och företag. Det finns mycket information om samtliga områden men det var problematiskt att hitta information om kostnader och miljöpåverkan för GenIV-kärnkraft eftersom att det finns väldigt få reaktorer i drift. Det berörda ämnet väcker starka känslor hos många vilket kan leda att data och information presenteras för att styrka en viss ståndpunkt, därför ansågs det viktiga att söka information från en stor mängd källor.

Fördelen med litteraturstudien är att det finns möjlighet för en bred och nyanserad informationsinsamling, men en nackdel blir att det är svårt att hantera mängden information samt bristen på viss typ av data.

#### 6.1.2 Intervjuer

Syftet med intervjuerna var att skapa en överblick kring ämnet och hur personer med olika positioner inom branschen, eller närliggande branscher, ställer sig till frågan kring kärnkraft, GenIV-kärnkraft samt vindkraft. Intervjuerna ägde rum under en tidig fas i studien och skedde främst med utgångspunkten att personernas åsikter skulle kunna bidra till vägledning för vidare litteraturstudie. Intervjuobjekten bidrog med olika perspektiv på ämnet samt värdefull vägledning i litteraturstudien.

Ett annat tillvägagångssätt angående intervjuerna hade potentiellt kunna varit fördelaktigt. Vid en senareläggning av intervjuerna hade mer specifika frågeställningar kunnat behandlas och intervjurespondenterna hade potentiellt kunnat bidra tydligare till studiens resultat genom att komplettera med information som inte var möjlig att finna genom litteraturstudien.

#### 6.1.3 Livscykelperspektiv

Ett livscykelperspektiv var utgångspunkten för att göra jämförelsen mellan de två elproduktionsslagen så rättvisande som möjligt inom ramen för studien. Fördelen med att använda en LCA är att det är en standardiserad metod som gör det möjligt att jämföra olika produkters miljöpåverkan inom olika branscher. Det är mycket data som används och det kan vara problematiskt att få en konkret bild av miljöpåverkan ur en LCA och om en produkts utsläpp faktiskt är skadliga för miljön. Det är även svårt att avgöra om det är rätt avgränsningar, systemgränser och antaganden som gjorts och om något



uteslutits som bör inkluderas kan det leda till en felaktig syn av produktens miljöpåverkan. Studiens ekologiska aspekter baseras på Vattenfalls miljövarudeklarationer vars systemgränser var något otydliga.

I och med att det inte finns några fullständiga GenIV-system går det i dagsläget inte att fastställa teknikens exakta miljöbelastningar. Miljöbelastningarna för GenIV-kärnkraft baseras på en spekulativ jämförelse, mellan aktiviteter för dagens kärnkraft och GenIV-kärnkraft, vilket är en enkel uppskattning som bygger på hur livscykeln för GenIV-kärnkraft teoretiskt sett skulle se ut i förhållande till den dagens kärnkraft.

Data för miljöbelastning från dagens kärnkraft och vindkraft är hämtat från Vattenfalls miljövarudeklaration vilket endast inkluderar Ringhals, Forsmark samt tio vindkraftsparker i norra Europa, varav tre svenska som studien avgränsades till. Det är möjligt att dessa studier är för snävt inriktade och därmed bidrar med bristfällig indata. Det kan dessutom vara komplicerat att utföra en ordentlig jämförelse mellan kärnkraften och vindkraftens miljöpåverkan utifrån dessa miljövarudeklarationer eftersom de inkluderar olika steg av livscykeln för respektive elproduktionssystem.

Inga standardiserade dokument har använts för att beräkna kostnaderna för vind och GenIV-kärnkraft. En risk med detta är att några av elproduktionsslagens kostnader förbisets, eller inte kunnat vara med i beräkningarna, eftersom information om en specifik kostnad i vind- eller kärnkraftens livscyklar inte hittats och därmed kunde inte alla kostnader kartläggas. Det kunde då ha varit lämpligt att använda en annan metod för att ta reda på alla kostnader, till exempel livscykelkostnadsanalys (LCC), men hade sannolikt blivit alltför omfattande. Den metod för kostnader som använts ansågs tillräcklig för att få ett utförligt resultat för att jämföra elproduktionsslagen.

## 6.2 Etiska dilemma

Vikten av att vara objektiv kring omdiskuterade ämnen, såsom energifrågan, är betydande under studier som denna. Komplikationer kan uppstå på grund av författarnas initiala åsikter baserat på tidigare erfarenheter. Det finns även en viss risk för att studien vinklas och den fakta som stämmer överens med författarnas åsikter väljs att presenteras. Studien har i det här fallet skrivits ur ett helt objektivt perspektiv utan avsikter att förespråka det ena elproduktionsslaget framför det andra.

## 6.3 Resultatvaliditet

Studiens resultat bygger på antaganden kring GenIV-kärnkrafts ekologiska och ekonomiska aspekter i relation till dagens kärnkraft. Antagandena är gjorda utifrån bedömningar kring förändringen i bränslecykeln samt uppskattningar i förändring av kostnader. Investeringskostnaderna som studiens resultat bygger på avser kostnader för GenIV-reaktorer som alla är konstruerade utanför Sverige och det är osäkert om kostnaderna kan vara representativa för ett eventuellt system i Sverige.

Mycket data som ligger till grund för resultatet baseras på olika undersökningar utförda av svenska myndigheter, bland annat Energimyndigheten och Strålsäkerhetsmyndigheten. Fördelen med att basera resultatet på data från svenska myndigheter är att de har bra insikt i svenska förhållanden.

En annan aktör som haft stort inflytande på studiens resultat kring miljöpåverkan var Vattenfall. Vattenfall är den största aktören inom elproduktionsslag i Sverige och har lång erfarenhet av vind- och kärnkraft. I och med detta ansågs datan vara trovärdig och användbar.

## 6.4 Vidare studier

Ämnen som studien har berört men inte fördjupats i är infrastrukturen runt omkring elproduktionen, alltså vad för arbete de olika elproduktionsslagen medför till kraftnätet, lagring av elektricitet som lösning på problemet med intermittens samt kostnader för att importera svängmassa till ett elsystem utan kärnkraft. Dessa ämnen kan vara intressanta för vidare studier om ytterligare jämförelse mellan GenIV-kärnkraft och vindkraft.

## 7. Slutsats

Det råder stora osäkerheter angående kostnaderna för GenIV-kärnkraft men baserat på den beräknade elkostnaden kan det fastställas att GenIV-kärnkraft i dagsläget inte är ekonomiskt konkurrenskraftigt mot vindkraft. Dessutom prognostiseras elkostnaden för vindkraften att minska markant till år 2030. Utöver elkostnaden utgör den höga investeringskostnaden, i relation till installerad effekt, en nackdel för kärnkraften. Även i resultatet om GenIV-kärnkrafts ekologiska påverkan råder det stora osäkerheter, men baserat på relevanta antaganden anses GenIV-kärnkraft vara ekologiskt hållbart och konkurrenskraftigt mot dagens vindkraft.

GenIV-kärnkraft kommer troligtvis inte att få en kommersiell tillämpning i Sverige före år 2030, vilket betyder att vindkraft har större potential att bidra till att uppnå de globala målen. Förutsatt att forskning kring GenIV-kärnkraft fortsätter och att kostnaderna sjunker kan det vara aktuellt som ett hållbart elproduktionsslag i Sverige i framtiden. Däremot skulle svensk innovation inom GenIV-kärnkrafts eventuellt kunna bidra med hållbar elproduktion i andra delar av världen inom en snar framtid.

GenIV-kärnkraft kan bidra med svängmassa och stabilitet till det svenska kraftnätet, vilket vindkraften inte kan. GenIV-kärnkraft kan även användas som ett sätt att hantera det radioaktiva avfallet från dagens kärnkraft och kraftigt förkorta tiden för slutförvar av det slutgiltiga avfallet.

# Källförteckning

Abrahamson, H. (2016). *Notan för röjning i Fukushima 350 miljarder*. Hämtad från <https://www.nyteknik.se/energi/notan-for-rojning-i-fukushima-350-miljarder-6779920>

Agarwal, T. Verma, S. Gaurh, A. (2016). *Issues and Challenges of Wind Energy*. Hämtad från <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032106001250?token=F787A158320A7385DC88A6359AC213A5562437E6623A0FB80AE8BD9FA2DB27077AB5B528C4596941B6E34F08E31E5F87>

Asprey, L.B., Morss, L. (2013). *Actinoid element*. Hämtad från <https://www.britannica.com/science/actinoid-element/Physiological-properties-of-the-actinoids>

Azar, C. (2007). *Kort väg från kärnkraft till kärnvapen*. Hämtad från <https://www.nyteknik.se/opinion/kort-vag-fran-karnkraft-till-karnvapen-6458761>

Baumann, H., Tillman, A.M. (2004). *The hitch hikers guide to LCA*. Hämtad från [http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/198075/local\\_198075.pdf](http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/198075/local_198075.pdf)

Bexelius, E., Diklev, J. (2018). *Framtidsutsikter för kärnkraft och vindkraft i Sverige*. (Kandidatarbete, Kungliga tekniska högskolan, Energiteknik). Hämtad från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1235574/FULLTEXT01.pdf>

Breeze, P. (2014). *Power Generation Technologies Second edition*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier Ltd. Hämtad från [https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpPGTE0001/cid:kt00U848R1/viewerType:khtml/root\\_slug:power-generation-technologies/url\\_slug:front-matter?&kpromoter=federation&page=last&view=collapsed&zoom=1](https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpPGTE0001/cid:kt00U848R1/viewerType:khtml/root_slug:power-generation-technologies/url_slug:front-matter?&kpromoter=federation&page=last&view=collapsed&zoom=1)

Cameco. (2020). *Uranium Price*. Hämtad från <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>

Centerpartiet. (u.å.). *Kärnkraft*. Hämtad från <https://www.centerpartiet.se/var-politik/politik-a-o/energi/karnkraft>

Centerpartiet. (u.å.). *Vindkraft*. Hämtad från <https://www.centerpartiet.se/var-politik/politik-a-o/energi/vindkraft>

Cheng, J.K.M., Hammond, G.P. (2017). *Life-cycle energy densities and land-take requirements of various power generators: A UK perspective*. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967115300921>

Climate Change Performance Index (2020). *Category Results*. Hämtad från <https://www.climate-change-performance-index.org/category-results>

Conca, J. (2012) *How Deadly Is Your Kilowatt? We Rank The Killer Energy Sources*. Hämtad från <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#4dcebdee709b>

Eklund, G. (2012). Intervju som datainsamlingsmetod. Hämtad från <https://www.vasa.abo.fi/users/geklund/PDF/Intervjuer.pdf>

Ekonomifakta. (2020). *Elproduktion*. Hämtad från <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/elproduktion/>

Energiforsk. (u.å.). *Fourth generation fuel cycle*. Hämtad från <https://energiforsk.se/media/27045/folder-fourth-generation-nuclear-power.pdf>

Energiföretagen. (2018). *Kärnkraft* Hämtad från <https://www.energiforetagen.se/sa-fungerar-det/elsystemet/produktion/karnkraft/>

Energikommissionen. (2016). *Promemoria om kostnaderna för nya elproduktionsanläggningar i Sverige*. Hämtad från <http://www.energikommissionen.se/app/uploads/2016/05/promemoria-om-kostnaderna-fr-nya-elproduktionsanlggningar-i-sverige.pdf>

Energimyndigheten. (2020). *Kortsiktsprognos- Våren 2020*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/statistik/prognoser-och-scenarier/kortsiktiga-prognoser-2019-2022.pdf>

Energimyndigheten. (2017). *Havsbaserad vindkraft: En analys av samhällsekonomi och marknadspotential: ER 2017:3*. Hämtad från <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/framjande-av-vindkraft/havsbaserad-vindkraft-er-20173.pdf>

Energimyndigheten. (2013). *Nedmontering av vindkraftverk och efterbehandling av platsen*. Hämtad från <https://www.energimyndigheten.se/contentassets/0d29277f212b450d8892b76458172e33/nedmonterin-g-av-vindkraftverk-och-efterbehandling-av-platsen.pdf>

Energimyndigheten. (2016). *Produktionskostnader för vindkraft i Sverige: ER 2016:17*. Hämtad från [https://www.energimyndigheten.se/contentassets/9f658fbcc1d24014bbe6fbeb70f80cba/er-2016\\_17-produktionskostnader-for-vindkraft-i-sverige.pdf](https://www.energimyndigheten.se/contentassets/9f658fbcc1d24014bbe6fbeb70f80cba/er-2016_17-produktionskostnader-for-vindkraft-i-sverige.pdf)

Energimyndigheten. (2020). *Vattenkraft*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/vattenkraft/>

Energimyndigheten. (2018). *Vindkraft i Sverige*. Hämtad från <http://www.energimyndigheten.se/fornybart/vindkraft/marknadsstatistik/ny-sida/>

Energimyndigheten. (2016). *Återbruk och återvinning av vindkraftverk*. Hämtad från [https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/framjande-av-vindkraft/aterbruk-och-atervinning-av-vindkraftverk\\_webb-final.pdf](https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/framjande-av-vindkraft/aterbruk-och-atervinning-av-vindkraftverk_webb-final.pdf)

Europaparlamentet. (2012). *Konsoliderad version av fördraget om upprättande av europeiska atomenergigemenskapen*. Hämtad från <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/?uri=CELEX:12012A/TXT>

EWEA. (u.å.) *Wind energy's frequently asked questions (FAQ): The basics*. Hämtad från [https://www.ewea.org/wind-energy-basics/faq/?fbclid=IwAR2pr\\_6uIGvBgy4kwtXc\\_f386LjEG6hMJuRhODbDCt8sXdFe4VfLxQpK66Y](https://www.ewea.org/wind-energy-basics/faq/?fbclid=IwAR2pr_6uIGvBgy4kwtXc_f386LjEG6hMJuRhODbDCt8sXdFe4VfLxQpK66Y)

Globala Målen. (2020). *Globala målen*. Hämtad från <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>

Haas, R., Metz, L., & Ajanovic, A. (2019). *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*. Wiesbaden: Springer VS.

Hammar, M. (2017). *Strategier vid avveckling av vindkraftverk – en livscykelanalys*. Hämtad från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1139152/FULLTEXT01.pdf>

Harrison, R.L., Reilly, T.M. (2011). *Mixed methods designs in marketing research*. Hämtad från <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13522751111099300/full/pdf?title=mixed-methods-designs-in-marketing-research>

Höglund, L.O. (2010). *Kunskapsläge om miljökonsekvenser av prospektering, utvinning och bearbetning av mineraltillgångar av uran*. Hämtad från <http://www.swedishepa.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/gruvor/uranbrytning/kunskapslage-uranbrytning.pdf>

International Atomic Energy Agency. (1986). *Nytt inom kärnkraften nr 38*. Stockholm: Nuclear Safety Board of Swedish Utilities. Hämtad från [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/18/051/18051168.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/051/18051168.pdf?r=1&r=1)

IVA. (2016). *Vägval framtidens elanvändning: En delrapport*. Hämtad från <https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagvalel-framtidens-elanvandning-delrapport.pdf>

Jacobsen, K.J. (1993). *Intervju*. Lund: Studentlitteratur

Krisinformation. (2018). *Elstörningar*. Hämtad från <https://www.krisinformation.se/detta-kan-handa/elstorningar>

Kristdemokraterna. (2015). *KD Principprogram*. Hämtad från <http://www.kd.nu/principprogram.pdf>

Kristdemokraterna. (u.å.). *Vindkraft*. Hämtad från <https://kristdemokraterna.se/politik-a-o/vindkraft/>

Kärnavfallsrådet. (u.å.). *Kärnavfall och slutförvaring*. Hämtad från <https://www.karnavfallsradet.se/karnavfall-och-slutforvaring>

Lake, J.A. (2020). *The Fourth Generation of Nuclear power*. Hämtad från <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0149197002000239?token=CD65AC5342824B5749CDD618846924799764B7FBC329B59C8B1C186866AE43B36054D3A8E7B79CDB1868931D004779>

LeadCold. (2019). *Markets*. Hämtad från <https://www.leadcold.com/markets.html>

Lehr, J.H. (2011) *Nuclear energy encyclopedia: Science, Technology, and Applications*. Hämtad från [https://books.google.se/books?id=ayNYEqxsi\\_YC&pg=PT434&lpg=PT434&dq=expected+lifetime+of+bn+800&source=bl&ots=Y3be-wC\\_\\_X&sig=ACfU3U2TIEhdVzCMupOpKiKSCNWSFrQfFg&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwj6wu7qm7pAhWLjKQKHfosALYQ6AEwAnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.se/books?id=ayNYEqxsi_YC&pg=PT434&lpg=PT434&dq=expected+lifetime+of+bn+800&source=bl&ots=Y3be-wC__X&sig=ACfU3U2TIEhdVzCMupOpKiKSCNWSFrQfFg&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwj6wu7qm7pAhWLjKQKHfosALYQ6AEwAnoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false)

Liberalerna. (u.å.). *Förnybar energi*. Hämtad från <https://www.liberalerna.se/politik/fornybar-energi/>

Miguirditchian, M., Chareyre, L., Sorel, C., Bisel, I., Baron, P. , Masson, M. (2008). *Development of the GANEX process for the reprocessing of Gen IV spent nuclear fuels*. Hämtad från [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/034/40034666.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/034/40034666.pdf)

Miljöpartiet. (2013). *Partiprogram*. Hämtad från [https://www.mp.se/sites/default/files/miljopartiets\\_partiprogram\\_lagupplost\\_2013.pdf](https://www.mp.se/sites/default/files/miljopartiets_partiprogram_lagupplost_2013.pdf)

Miljöpartiet. (u.å.). *Hundra procent förnybart*. Hämtad från <https://www.mp.se/politik/energi>

Moderaterna. (u.å.). *Trygg energiförsörjning*. Hämtad från <https://moderaterna.se/trygg-energiforsorjning>

Naturvårdsverket. (2020). *Bara naturlig försurning*. Hämtad från <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Bara-naturlig-forsurning/>

Naturvårdsverket. (2003). *Ingen övergödning: Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet*. Hämtad från <http://guides.lib.chalmers.se/c.php?g=402047&p=2735517>

Naturvårdsverket. (2019). *Luftstatistik-Utsläpp av små partiklar*. Hämtad från <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Partiklar-PM25-utslapp-till-luft/>

Naturvårdsverket. (2019). *Marknära ozon*. Hämtad från <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeningar/Marknara-ozon/>

Naturvårdsverket. ( u.å.). *Vindens kraft: 15 frågor och svar om vindkraft*. Hämtad från <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8274-4.pdf>

Naturvårdsverket. (2019). *Växthuseffekten förstärks*. Hämtad från <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Darfor-blir-det-varmare/Vaxthuseffekten-forstarks/>

North European Energy Perspectives Project. (2019). *Färdplan fossilfri el-analysunderlag*. Hämtad från

<https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/sa-tycker-vi/fardplaner-fossilfritt-sverige/fardplan-el-20190802.pdf>

Ny teknik. (2012). *100 miljoner till framtidens kärnbränsle*. Hämtad från

<https://www.nyteknik.se/energi/100-miljoner-till-framtidens-karnbransle-6417336>

Proto, M. (2010). *Ecolabeling*. Berkshire: Berkshire Essentials

Radioactivity.eu. (u.å.). *Spent fuel composition*. Hämtad från

[https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Spent\\_Fuel\\_Composition.htm](https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Spent_Fuel_Composition.htm)

Ramanujam, A. (1998). *An Introduction to the Purex Process*. Hämtad från

<http://www.igcar.gov.in/rpg/articles/Ramanujam%20-%20Intro%20to%20reporcessing.pdf>

Regeringen (2016). *Ramöverenskommelse mellan Socialdemokraterna, Moderaterna, Miljöpartiet de gröna, Centerpartiet och Kristdemokraterna*. Hämtad från

<https://www.regeringen.se/49cc5b/contentassets/b88f0d28eb0e48e39eb4411de2aabe76/energioverenskommelse-20160610.pdf>

Regeringskansliet. (2018). *Ökat skadeståndsansvar och skärpta försäkringskrav för reaktorinnehavare*. Hämtad från

<https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/lagratsremiss/2018/03/okat-skadestandsansvar-och-skarpta-forsakringskrav-for-reaktorinnehavare/>

Reuters. (2019). *France drops plans to build sodium-cooled nuclear reactor*. Hämtad från

<https://www.reuters.com/article/us-france-nuclearpower-astrid/france-drops-plans-to-build-sodium-cooled-nuclear-reactor-idUSKCN1VK0MC>

Riksdagen. (2018). *Den nya riksdagen efter valet*. Hämtad från

<https://www.riksdagen.se/sv/valet-2018/den-nya-riksdagen-efter-valet/>

Rybin, A.A., Mormot, O.A. (2017). *Radioactive waste from decommissioning of fast reactors (through the example of BN-800)*. Hämtad från

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/781/1/012013/pdf>

Science Notes. (u.å.). *Free Printable Periodic Tables [PDF and PNG]*. Hämtad från

<https://sciencenotes.org/printable-periodic-table/>

SKB. (2017). *SKB och fjärde generationens kärnkraft*. Hämtad från <https://www.skb.se/nyheter/skb-och-fjarde-generationens-karnkraft/>

Socialdemokraterna. (2013). *Ett program för förändring*. Hämtad från

[https://www.socialdemokraterna.se/download/18.12ce554f16be946d04640b87/1568881590520/ett-program-for-forandring\\_2013.pdf](https://www.socialdemokraterna.se/download/18.12ce554f16be946d04640b87/1568881590520/ett-program-for-forandring_2013.pdf)



Strålsäkerhetsmyndigheten. (2018). *Hantering av radioaktivt avfall från kärntekniska anläggningar*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutförvar/hantering-av-radioaktivt-avfall-fran-karntekniska-anlaggningar/>

Strålsäkerhetsmyndigheten. (u.å.). *Kärnkraft*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/>

Strålsäkerhetsmyndigheten. (u.å.). *Kärnbränsle*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/sa-fungerar-ett-karnkraftverk/karnbransle>

Strålsäkerhetsmyndigheten. (u.å.). *Kärnkraftsolyckor i världen*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/karnkraftsolyckor-i-varlden/>

Strålsäkerhetsmyndigheten. (2019). *Slutförvar för använt kärnbränsle*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutförvar/slutförvar-for-anvant-karnbransle/>

Strålsäkerhetsmyndigheten. (2020). *Strålsäkerhetsvärdering 2020: acceptabel strålsäkerhet på Forsmark*. Hämtad från <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/press/nyheter/2020/stralsakerhetsvardering-2020-acceptabel-stralsakerhet-pa-forsmark/>

Suchitra, J.Y., Ramana, M.V. (2011). The costs of power: plutonium and the economics of India's prototype fast breeder reactor. *Int. J. Global Energy Issues, Volym(35)*. Hämtad från <https://ideas.repec.org/a/ids/ijgeni/v35y2011i1p1-23.html>

SvD Näringsliv. (2017). *Svensk blykyld reaktor -kärnkraftens kinderägg*. Hämtad från <https://www.svd.se/svensk-karnkraft-liten-blykyld-reaktor-redo-for-test>

Svensk vindenergi. (u.å.). *Frågor om vindkraft och svar från oss*. Hämtad från [https://svenskvindenergi.org/vindkraft/fragor-och-svar-om-vindkraft#\\_Toc486413095](https://svenskvindenergi.org/vindkraft/fragor-och-svar-om-vindkraft#_Toc486413095)

Svensk vindenergi. (2013). *Socialdemokraterna om energipolitiken*. Hämtad från <https://svenskvindenergi.org/externa-nyheter/socialdemokraterna-om-energipolitiken>

Svenska kraftnät. (2016). *Balansansvar*. Hämtad från <https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/balansansvar/>

Svenska kraftnät. (2019). *Drift och elmarknad*. Hämtad från <https://www.svk.se/drift-av-transmissionsnatet/drift-och-elmarknad/>

Svenska kraftnät. (2020). *Elstatistik*. Hämtad från <https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/kraftsystemdata/elstatistik/>

Svenska kraftnät. (2017). *Vinterns utmaningar*. Hämtad från <https://www.svk.se/drift-av-transmissionsnatet/drift-och-elmarknad/vinterns-utmaningar/>

- Svenska kraftnät. (2020). *Effektreserv*. Hämtad från <https://www.svk.se/drift-av-transmissionsnätet/drift-och-elmarknad/effektreserv/>
- Svenska kraftnät. (u.å.). *Kärnkraftens roll i kraftsystemet*. Hämtad från [https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2019/karnkraftens-roll-i-kraftsystemet\\_2019\\_02\\_15.pdf](https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2019/karnkraftens-roll-i-kraftsystemet_2019_02_15.pdf)
- Svenskt näringsliv. (2019). *Högre elanvändning år 2045: Samhällsutvecklingen och klimatomställningen kräver mer el*. Hämtad från [https://www.svensktnaringsliv.se/bilder\\_och\\_dokument/hogre-elanvandning-2045pdf\\_746597.html/BINARY/H%C3%B6gre%20elanv%C3%A4ndning%202045.pdf](https://www.svensktnaringsliv.se/bilder_och_dokument/hogre-elanvandning-2045pdf_746597.html/BINARY/H%C3%B6gre%20elanv%C3%A4ndning%202045.pdf)
- Sverigedemokraterna. (u.å.). *Valmanifest- Sverigedemokraternas valmanifest 2018*. Hämtad från <https://sd.se/wp-content/uploads/2018/08/Valmanifest-2018-1.pdf>
- Sverigedemokraterna. (2020). *Sol- och vindkraft*. Hämtad från <https://sd.se/our-politics/sol-och-vindkraft/>
- Sveriges Radio. (2019). *M vill premiera kärnkraft före vindkraft*. Hämtad från <https://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=83&artikel=7201159>
- SVT. (2018). *Kärnkraften framtid i Sverige osäker*. Hämtad från <https://www.svt.se/nyheter/inrikes/karnkraftens-framtid-i-sverige-osaker>
- SWECO. (2016). *Stabilitet i det nordiska kraftsystemet: Kärnkraftens bidrag till mekanisk svängmassa och frekvenstabilitet- En rapport till Uniper*. Hämtad från <http://www.mynewsdesk.com/se/uniper/documents/rapport-stabilitet-i-det-nordiska-kraftsystemet-59621>
- Trafikverket. (2010). *Transporter till vindkraftsparker - en handbok*. Hämtad från [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/12172/RelatedFiles/2010\\_033\\_transporter\\_till\\_vindkraftsparker\\_en\\_handbok.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/12172/RelatedFiles/2010_033_transporter_till_vindkraftsparker_en_handbok.pdf)
- UNDP. (2015). *Globala målen*. Hämtad från <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>
- Uniper. (2019). *Reglerkraft- El i rätt tid och mängd*. Hämtad från <https://www.uniper.energy/sverige/vattenkraft/reglerkraften>
- Uniper. (2018). *Svängmassa*. Hämtad från <https://www.uniper.energy/sverige/go-electric/svaengmassa>
- Uniper. (2019). *Kärnkraft*. Hämtad från <https://www.uniper.energy/sverige/karnkraft>
- United States Department of Energy's the Generation IV International Forum. (2002). *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System*. Hämtad från [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_40481/technology-roadmap](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40481/technology-roadmap)

United States Department of Energy's the Generation IV International Forum. (2013). *Gen IV Reactor design*. Hämtad från [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_40275/gen-iv-reactor-design#c\\_40715](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40275/gen-iv-reactor-design#c_40715)

Vattenfall. (u.å.). *Förnybar energi är nyckeln till en fossilfri framtid*  
<https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/vara-energislag/vindkraft>

Vattenfall. (u.å.). *EPD gör jämförelsen möjlig*. Hämtad från  
<https://www.vattenfall.se/foretag/miljo/epd/>

Vattenfall. (2015). *The Biotope Method*. Hämtad från  
[https://group.vattenfall.com/uk/siteassets/images/vatt\\_3238\\_broschyr\\_biopometoden\\_eng\\_h.pdf](https://group.vattenfall.com/uk/siteassets/images/vatt_3238_broschyr_biopometoden_eng_h.pdf)

Vattenfall. (2019). *Nya vindkraftverk ger lägre klimatavtryck*. Hämtad från  
[https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och-press/nyheter-pressmeddelanden/nyheter/2019/nya-vindkraftverk-ger-lagre-klimatavtryck?fbclid=IwAR1ntjVUb98iYmvv-y3HjaTQTgq75VhcmVWVMt8sLJhDoIPbbG\\_jbqIqwPQ](https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och-press/nyheter-pressmeddelanden/nyheter/2019/nya-vindkraftverk-ger-lagre-klimatavtryck?fbclid=IwAR1ntjVUb98iYmvv-y3HjaTQTgq75VhcmVWVMt8sLJhDoIPbbG_jbqIqwPQ)

Vattenfall. (2019). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms Version 2.0 2019-05-15. Hämtad från  
<https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/15230/S-P-01435%20EPD%20Electricity%20from%20Vattenfall%20wind%20farms.pdf?fbclid=IwAR3bE9exd176zba30C0z-MEeupZIBE2FaJwhJtkm8i1rkVojBXLXc4YOOcY>

Vattenfall. (2019). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall Nordic Nuclear Power Plants. Hämtad från  
<https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/17371/S-P-00923%20EPD%20Electricity%20from%20Vattenfall%20Nordic%20Nuclear%20Power%20Plants%202019.pdf>

Vattenfall. (2019). *EPD® Wind Power: Summary of certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms*. Hämtad från  
<https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/15231/S-P-01435%20EPD%20Summary.pdf>

Vindkraft.se. (u.å.). *Energiinnehållet i vinden*. Hämtad från  
<http://vindkraften.se/sample-page/39-2/>

Vänsterpartiet. (2018). *Mer förnybar energi*. Hämtad från  
<https://www.vansterpartiet.se/politik/energi/>

Wallenius, Janne. (u.å.). *Fjärde generationens reaktorer*. Hämtad från  
[http://www.energikommissionen.se/app/uploads/2015/10/1-Janne-Wallenius\\_Gen-IV.pdf](http://www.energikommissionen.se/app/uploads/2015/10/1-Janne-Wallenius_Gen-IV.pdf)

Wikdahl, C.E. (2009). Hämtad från  
<https://www.analys.se/publikationer/bakgrund/uran-bakgrund/>

Wizelius. T. (2015). *Vindkraft i teori och praktik*. Stockholm: Studentlitteratur AB.

WNA. (2020). *Advanced Nuclear Power Reactors*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>

WNA. (2019). *Generation IV Nuclear Reactors*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

WNA. (2019). *How can nuclear combat climate change?* Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>

WNA. (2018). *Physics of Uranium and Nuclear Energy*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/physics-of-nuclear-energy.aspx>

WNA. (2020). *Storage and Disposal of Radioactive Waste*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx>

WNA. (2020). *Fast Neutron Reactors*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>

WNA. (2017). *The Nuclear Fuel Cycle*. Hämtad från <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>

# Bilaga 1

Tabell över utförda intervjuer.

*Lista över respondenter*

Respondenter	Befattning	Datum	Plats	Längd	Typ av samtal	Urvalsmetod
Tomas Kåberger	F.d generalsekreterare på energimyndigheten	18/2	Chalmers: Veras gräsmatta	53 minuter	Möte	Rekommendation av handledare
Johan Svenningsson	VD på Uniper Sverige	6/3	Chalmers: Maskinhuset	1 tim 17 minuter	Möte	Egna efterforskningar och rekommendationer
Janne Wallenius	Prof. i reaktorfysik. VD på Blykalla	19/3	Chalmers: Maskinhuset	25 minuter	Skypesamtal	Egna efterforskningar
Rickard Nordin	Riksdagsledamot. Centerpartiets talesperson i klimat- och energifrågor	23/3	Chalmers bibliotek	25 minuter	Zoomsamtal	Egna efterforskningar
Johan Swahn	Kanslichef på MKG	3/4	Distans	1 tim 26 minuter	Zoomsamtal	Snöbollsurval



**CHALMERS**