

Vindkraftens resursanvändning

- Underlag till Nationell strategi för en hållbar vindkraftsutbyggnad. Ett livscykelperspektiv på vindkraftens resursanvändning och växthusgasutsläpp.

Innehåll

Sammanfattning	3
Inledning	5
Vilka material består ett vindkraftverk av?	5
Vilka är de sällsynta jordartsmetallerna och varför används de i vindkraftverk?	7
Hur bryts de sällsynta jordartsmetaller som används i bland annat vindkraftverk?	9
Hur mycket material behövs för vindkraftsutbyggnaden i Sverige?	10
Hur mycket energi går det åt för att producera ett vindkraftverk?	12
Hur stora växthusgasutsläpp har el från vindkraft?	13
Hur är vindkraftverks växthusgasutsläpp i jämförelse med andra kraftslag?	15
Varför används gasen SF ₆ i vindkraftverk och hur påverkar de växthusgasutsläppen?	17
Vad händer med vindkraftverken när det är uttjänta?	18
Vad händer med platsen efter att vindkraftverken har tagits bort?	19

Sammanfattning

Den här skriften har haft till syfte att adressera vanligt förekommande frågor kring vindkraftens resursanvändning. Vår ambition är att ge en bild av nuläget kring dessa frågor. Med en väntad stor vindkraftsutbyggnad kommer frågorna kring resursanvändande och återvinning troligtvis bli allt viktigare. Några av de utmaningar som tas upp handlar specifikt om vindkraft, medan andra inte är unika för vindkraften.

De flesta moderna vindkraftverk består till största del, mellan 80 och 90% av vikten, av stål och järn. Metallerna kan återvinnas om de inte återanvänds när vindkraftverket nedmonteras. Återvinning av rotorblad som är gjorda av glasfiberkomposit är mer osäker, då incitamenten för återvinning varit låga på grund av låga kostnader för nytt material. Det finns dock redan idag flera olika återvinningstekniker, som t ex malning och inblandning som fyllnadsmedel i byggnadsmaterial och andra kompositmaterial. Flera olika kemiska återvinningsprocesser är också under utveckling och det pågår initiativ för att återanvända hela rotorblad i olika applikationer.

Det uppstår i princip inga växthusgasutsläpp vid själva elproduktionen från ett vindkraftverk. I en livscykelanalys är det utsläpp till följd av tillverkning, råmaterial, montering, underhåll, nedmontering och materialåtervinning som ger vindkraftens samlade påverkan per kWh producerad. Vindkraft är bland de kraftslag som har lägst växthusgasutsläpp.

Energiåterbetalningstiden, det vill säga den tid det tar för ett vindkraftverk att producera lika mycket energi som det krävts för att producera det, är idag runt ett halvår för landbaserad vindkraft. Energiåterbetalningstiden blir generellt lägre ju modernare och större vindkraftverk det rör sig om, då elproduktionen från modernare verk är högre. Detta gäller både materialanvändning och växthusgasutsläpp per producerad kWh, då elproduktionen från modernare verk är högre.

Sällsynta jordartsmetaller används i flera olika elektronikapplikationer. Bland annat finns de i permanentmagneter som används för elgeneratorer i många vindkraftverk. Det finns flera fördelar med generatorer som använder permanentmagneter, samtidigt leder brytningen av metallerna till miljöfarligt avfall.

SF6-gas nyttjas som isolations- och brytmedium i flera olika delar av kraftsystemet. Bland annat används gasen i ställverk för vindkraft. Även om gasen i sig är en mycket stark växthusgas är utsläppen så små att klimatpåverkan blir liten.

Det pågår arbete för att minska användningen av sällsynta jordartsmetaller och SF6-gas i vindkraftverk och i andra tillämpningsområden. För jordartsmetaller handlar det om att hitta alternativa tekniklösningar, bättre metoder för återvinning och mer hållbar gruvdrift. När det gäller SF6-gas sker teknikutveckling för att ersätta gasen och för att undvika läckage där den nyttjas.

Vindkraftens resursanvändning

Inledning

Vindkraftens resursanvändning är en fråga som ofta diskuteras i samband med nya vindkraftsetableringar. Det finns många olika uppfattningar om hur stor resursanvändningen egentligen är och även om vilka resurser som vindkraften nyttjar. I den här skriften redovisar vi fakta kring frågor som ofta tas upp i vindkraftsdebatten.

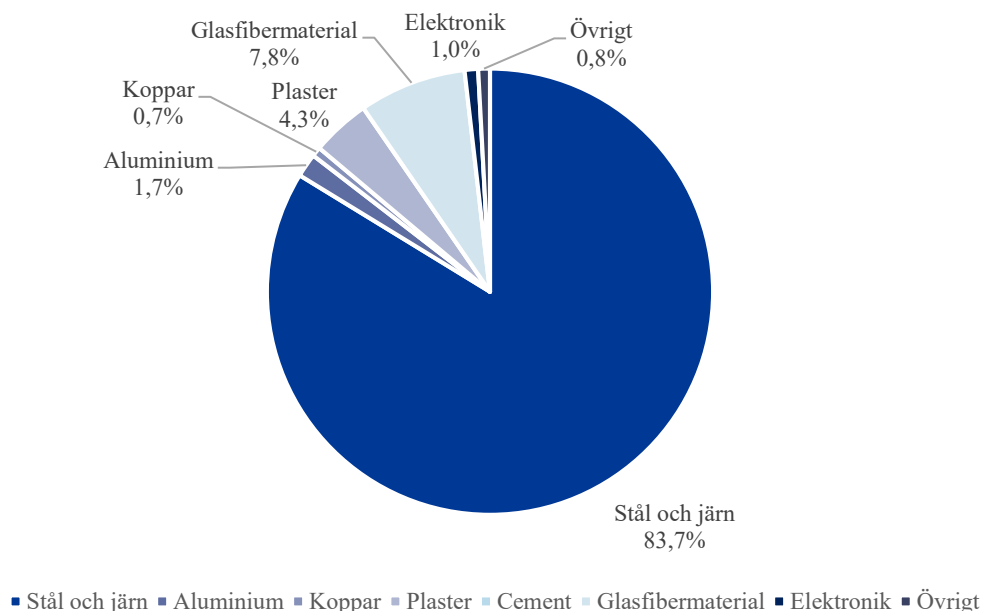
Skriften är en delredovisning inom ramen för Energimyndighetens och Naturvårdsverkets arbete med att ta fram en nationell strategi för en hållbar vindkraftsutbyggnad. Skriften är uppbyggd som frågor och svar baserat på de frågor vi oftast får i arbetet med strategin.

Vilka material består ett vindkraftverk av?

Materialsammansättningen i de olika typer av vindkraftverk som finns på marknaden idag är relativt lika. Stål och järn utgör mellan 80 och 90 procent av vindkraftverkets vikt och finns till största delen i vindkraftverkets torn. Tornhöjden spelar således stor roll för mängden stål och järn som används. Glasfiberkomposit utgör i regel mellan 5 och 8 procent av vikten och används i rotorbladen. Plastmaterial utgör mellan 3 och 4 procent. Utöver det innehåller vindkraftverk framförallt aluminium och elektronik¹. Vissa vindkraftverk består också av mindre mängder sällsynta jordartsmetaller vilket tas upp specifikt i nästa avsnitt. I Figur 1 visas fördelningen för ett Vestas vindkraftverk av modell V90-2.0 MW, som är ett vanligt vindkraftverk i Sverige.²

¹ Vestas, *Material Use - Turbines*

² Siffrorna i detta stycke baseras till stor del på Vestas egna livscykelanalyser. Det för att underlätta jämförelse mellan olika modeller. Livscykelanalyserna är externt granskade och överensstämmer väl med vetenskapligt publicerade artiklar som t ex Scheriber et al, *Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types*, Journal of cleaner production, 2019.



Figur 1. Materialanvändning för ett vindkraftverk på 2 MW med navhöjd 80 m (Modell: V90-2.0 MW, Vestas). Totalt cirka 250 ton material. Kategorierna aluminium, stål och järn samt koppar innehåller också legeringar och föreningar av dessa metaller.³

Beroende på, framförallt, tornhöjd varierar totalvikten för vindkraftverket V90-2.0 MW mellan 240 ton och 303 ton. Utöver själva vindkraftverket tillkommer runt 750 ton betong och 40 ton stål och järn i vindkraftverkets fundament.

I Sverige idag installeras allt större vindkraftverk. Materialsammansättningen är liknande den för Vestas V90, men totalvikten ökar betydligt. T ex väger ett vindkraftverk från Vestas på 4,2 MW och en navhöjd om 155 m runt 700 ton. Samtidigt ökar elproduktionen från ett sådant verk kraftigt vilket innebär att materialanvändningen per producerad el faktiskt minskar i jämförelse med exempelvis modellen V90-2 MW.

Förutom de insatser som görs för att på olika sätt utveckla dagens vindkraftteknik pågår forskning kring andra typer av vindkraftstorn som potentiellt kan kräva mindre, eller andra material. Exempelvis kring hybridtorn, latticetorn och torn i trä. Det svenska företaget Modvion har nyligen fått EU-finansiering för att bygga det första vindkraftstornet i trä i kommersiell skala⁴.

³ Vestas, [Life cycle assessment of electricity production from a V90-2 MW gridstreamer wind plant](#), 2011

⁴ Modvion, [Modvion får EU-miljoner för vindkraftstorn i trä](#), 2020

Vilka är de sällsynta jordartsmetallerna och varför används de i vindkraftverk?

Sällsynta jordartsmetaller – eller rare earth elements (REE) – är en grupp av 17 grundämnen. De används i en stor mängd tillämpningar, bland annat i vardagselektronik, vindkraftverk och fordon. Efterfrågan på många av de här metallerna har ökat kraftigt de senaste tjugo åren. Det har medfört att EU kommissionen klassar jordartsmetallerna som bland de mest kritiska råmaterialen för europeisk industri idag⁵.

De sällsynta jordartsmetallerna används i stor utsträckning i permanentmagneter som används för elmotorer och elgeneratorer. Användningen av sällsynta jordartsmetaller i permanentmagneter möjliggör starkare magneter vilket gör att elmotorer och elgeneratorer kan göras mindre, lättare och effektivare.

Den vanligaste typen av permanentmagneter går under beteckningen NdFeB (neodym-järn-bor). Denna typ av magnet har en rad olika användningsområden, vilka sammanfattas i Tabell 1.

⁵ EU COM, Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>, 2020.

Tabell 1. Användningsområden för permanentmagneter av typ NdFeB globalt. Siffror för år 2015. Tabellen täcker in de största användningsområdena, men är inte fullständig, d v s NdFeB-magneter används inom fler områden än dessa. Exempelvis kan magnetröntgen och optisk utrustning tillsammans utgöra upp till 10 procent av den globala användningen av NdFeB-magneter.⁶

Sektorer	Produkt	Användningsområde	Vikt per enhet	Total vikt (ton/år)
<i>Datorer</i>	Hårddiskar	Elektriska motorer	10 – 20 g	7 500
<i>Hemelektronik</i>	Hemelektronik & vitvaror -AC -Högtalare -Telefoner och musikspelare -Tvättmaskiner -Kyl och frys	Elektriska motorer	Varierar stort, från mindre än 1 gram	8 500
<i>Vindkraftverk</i>	Direktdrivande motorer	Generatorer	400 kg /MW	8 500
<i>Fordon</i>	-Konventionella fordon	-Små motorer och sensorer	250 g	22 000
	-Hybrider och elfordon	-Elektriska motorer	1,25 kg	<7 000
	-Lätta elfordon	-Elektriska motorer	300–350 g	6000

I många nya vindkraftverk används permanentmagneter i generatormotorn där rörelseenergin i vinden omvandlas till el. Fördelar med generatorer som använder permanentmagneter är bland annat att de klarar mer varierande vindhastigheter vilket gör att ingen växellåda behövs (så kallad direct drive-vindkraftverk) och att maskinhuset vid navet i vindkraftverket blir lättare. T ex har Siemens och Alstom vindkraftverk på runt 6 MW som använder runt 650 kg permanentmagneter per installerad MW och Vestas har ett vindkraftverk på 8 MW som använder cirka 160 kg permanentmagneter per installerad MW. Senvion och Enercon har däremot vindkraftverk med liknande installerad effekt

⁶ The Danish Environmental Protection Agency, *Designing out waste*, 2018.

utan permanentmagneter. Ungefär en tredjedel av permanentmagnetens vikt utgörs av sällsynta jordartsmetaller.⁷

I vindkraftverkens permanentmagneter används framförallt neodym, men också, i varierande utsträckning, terbium, dysprosium och praseodym. År 2018 användes motsvarande runt tolv procent av världens neodym i vindkraftverk. Denna användning förväntas dubblas till år 2030 och sedan vara relativt konstant fram till år 2050.⁸ År 2015 bedömdes lite mer än en femtedel av alla vindkraftverk ha permanentmagneter (vara direct-drive) och andelen bedöms öka.

Hur bryts de sällsynta jordartsmetaller som används i bland annat vindkraftverk?

Idag sker största delen av världens produktion av sällsynta jordartsmetaller i Kina, mer än 95 procent av den globala utvinningen sker där. Upptäckten av de första sällsynta jordartsmetallerna i världen gjordes dock i slutet av 1700-talet i Stockholms skärgård och i Sverige finns flera typer av REE-fyndigheter som har potential för gruvdrift. De sällsynta jordartsmetallerna förekommer främst i kristallin berggrund. Exempelvis i apatitjärnmalmer, som den i Kiruna, och i skarnmineraliseringar i Bergslagen. Det projekt som enligt SGU kommit längst kommersiellt är Norra Kärr (öster om Vättern). Det andra mest relevanta projektet ligger vid Olserum, i nordöstra Småland. Norra Kärr rankas internationellt som ett av de mest intressanta projekten i Europa, såväl ekonomiskt (höga halter av de mest eftertraktade tunga sällsynta jordartsmetallerna) som miljömässigt (låga uran- och toriumhalter).⁹ Inget av de två projekten har dock tillstånd för gruvdrift idag och i fallet Norra Kärr krävs ett Natura 2000 tillstånd för verksamheten^{10 11}.

Sällsynta jordartsmetaller bryts huvudsakligen som huvudmalm, men i viss utsträckning även som biprodukt till andra metaller som järn och fosfor. Trots att gruppen sällsynta jordartsmetaller består av 17 olika grundämnen benämns de ofta med gruppnamnet då de i princip alltid förekommer tillsammans, men i olika proportioner. Världens största gruva för brytning av sällsynta jordartsmetaller finns i Kina. Malmen i denna gruva innehåller runt fyra procent sällsynta jordartsmetaller och runt 30–35 procent järn. Den består också av en mindre del torium (0,04 procent ThO₂), vilket innebär att det uppstår radioaktivt avfall vid utvinning och bearbetning av malmen. Det finns dokumenterat hur utvinningen och bearbetningen av malmen från denna gruva har lett till att arbetare har utsatts

⁷ Pavel et al, [Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines](#), Resources Policy, 2017.

⁸ Carrara et al, [Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system](#), Joint Research Centre – European Commission, 2020.

⁹ SGU, [Sällsynta jordartsmetaller](#), 2020.

¹⁰ Bergsstaten, [Gruvor](#), 2020

¹¹ Länsstyrelsen i Jönköpings län, [Norra Kärr, 2020](#)

för radioaktivt avfall och hur farligt avfallsvatten har släppts ut till omgivningen och bidragit till miljöförstöring.¹² Det är dock svårt att få information om detta när det gäller brytning och förädling i Kina och det är således svårt att genomföra fullständiga livscykelanalyser med tillförlitlig information härifrån. Vidare har det funnits en stor illegal gruvdrift i Kina som varit en stark orsak till miljöförstöringen i vissa provinser. I perioder beräknas den illegala gruvdriften ha stått för runt 40 procent av den globala produktionen av malm från tunga sällsynta jordartsmetaller, vilket gör det mycket svårt att bedöma miljöpåverkan från dessa. Kina har dock under 2010-talet börjat att, åtminstone officiellt, arbeta aktivt med att stävja denna brottslighet.¹³

Inom forskning och utveckling har det bland annat satsats på metoder för återvinning av metallerna och ersättning av dem med andra metaller, och också brytning i andra länder än Kina. Framsteg har bland annat gjorts när det gäller att gradvis minska användningen av sällsynta jordartsmetaller i permanentmagneter^{14 15}. Flera projekt har också i princip lyckats utesluta sällsynta jordartsmetaller, utan att öka övrig materialanvändning. Detta demonstrerades 2019 i ett EU-finansierat projekt där man använde sig av supraledare i generatoren på ett vindkraftverk på 3,6MW¹⁶. Det finns också flera forskningsprojekt som utvecklar permanentmagneter utan sällsynta jordartsmetaller. EU har även inom sitt forskningsprogram HORIZON 2020 (pågår mellan 2014 och 2020) finansierat flera projekt med fokus på återvinning av sällsynta jordartsmetaller, möjligheterna att byta ut sällsynta jordartsmetaller mot andra metaller och potentialen att bryta dem i Europa, bland annat i projekten EURARE¹⁷ och SCRREEN¹⁸.

Hur mycket material behövs för vindkraftsutbyggnaden i Sverige?

Det finns flera analyser som pekar på möjligheterna att bygga 100 TWh vindkraft i Sverige till 2040-talet.^{19 20 21} Det kan jämföras med total elproduktion i Sverige år 2019 som var 168 TWh och total elproduktion från vindkraft som var 20 TWh (totalt cirka 4000 vindkraftverk). Teknikutvecklingen för vindkraft går snabbt framåt och vindkraftverken blir allt större och producerar mer el. Fortsätter teknikutvecklingen i samma takt som under de senaste åren kan det räcka med

¹² Sprecher et al, *Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets*, 2014.

¹³ Bailey et al, [Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite](#), 2020.

¹⁴ The Danish Environmental Protection Agency, *Designing out waste*, s.112, 2018.

¹⁵ Hernández et al, *JRC Wind Energy Status Report 2016 Edition*, 2017.

¹⁶ Europeiska Kommissionen, [EcoSwing - Energy Cost Optimization using Superconducting Wind Generators - World's First Demonstration of a 3.6 MW Low-Cost Lightweight DD Superconducting Generator on a Wind Turbine](#), 2020.

¹⁷ EURARE, 2017.

¹⁸ SCRREEN, [The SCRREEN project](#), 2020.

¹⁹ *100 procent förnybar el – Delrapport 2*, Energimyndigheten, ER 2019:6 (2019)

²⁰ *Långsiktig marknadsanalys 2018*. Svenska kraftnät, SVK 2018/2260 (2019)

²¹ *Kortsiktsprognos sommaren 2019*, Energimyndigheten, ER 2019:16 (2019)

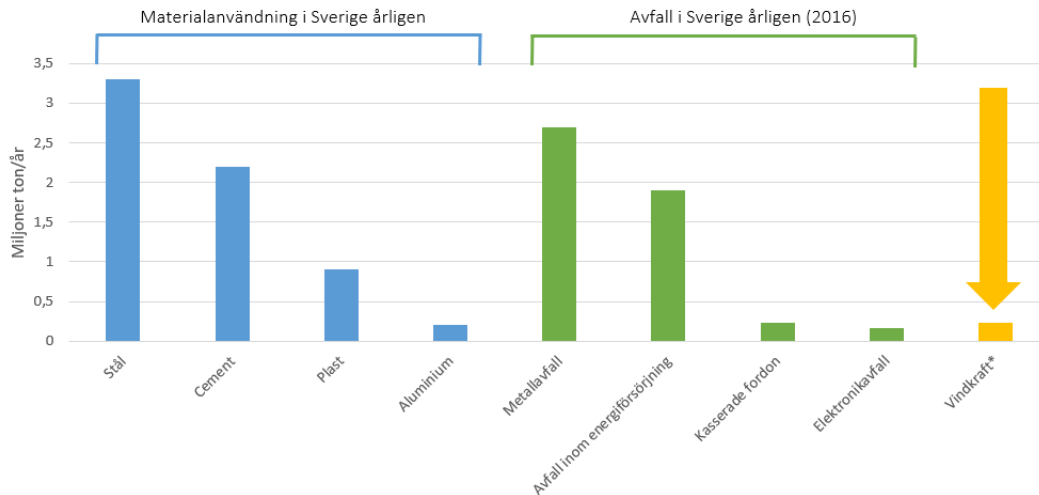
mellan 2000 och 4500 vindkraftverk år 2040 för att producera 100 TWh enligt Energimyndighetens bedömning. Alltså ungefär samma antal eller till och med betydligt färre verk än som finns idag.

Om man räknar konservativt och utgår från ett vindkraftverk på 4,2 MW, som är en vanlig turbinstorlek på de verk som uppförs idag, så skulle det behövas runt 7 400 vindkraftverk för att producera 100 TWh vindkraftsel. Det motsvarar en total materialanvändning om cirka 5 miljoner ton stål och järn, 300 000 ton glasfibermaterial, 140 000 ton plaster, 50 000 ton aluminium och 28 000 ton koppar. Dessutom går det åt 28 000 ton elektronik till vindkraftverk, fundament, kablar och annan elinfrastruktur som behövs i vindkraftsparkerna²². En utbyggnad av 100 TWh vindkraft fram till 2040-talet ger då en materialanvändning per år på i snitt ungefär 200 000 ton per år. Observera att det här är ett räkneexempel där vi inte räknat med någon teknikutveckling mot större och effektivare turbiner. Den faktiska materialanvändningen blir förmodligen betydligt mindre då det redan idag finns större och kraftfullare vindkraftverk som kan producera mer el i relation till materialanvändningen. Flera av dagens vindkraftverk kommer troligen finnas kvar in på 2040-talet och fortfarande producera el då, det har inte tagits med i beräkningen.

För att sätta materialanvändningen i perspektiv går det att jämföra med olika mängd avfall som uppkommer i Sverige per år. År 2016 uppkom totalt 2,7 miljoner ton metallavfall, 233 000 ton kasserade fordon och 163 000 ton elavfall. Inom byggverksamhet uppkom totalt 9,8 miljoner ton avfall och inom energiförsörjning uppkom detta år totalt 1,9 miljoner ton avfall (främst från askor, slagg och mineralavfall från avfallsbehandling).²³ Det går också att jämföra med Sveriges årliga materialanvändning. Årligen används närmre 3,5 miljoner ton stål och 1 miljon ton plast i Sverige. Se Figur 2 för ytterligare jämförelse.

²² Materialanvändningen för en Vestas V150-4,2m med en navhöjd om 155 m används vid beräkningen (Vestas, *Material Use – Turbines*).

²³ Naturvårdsverket, *Avfall i Sverige 2016*, 2018.



Figur 2. Materialanvändningen som kommer att krävas årligen för utbyggnaden av 100 TWh vindkraft mellan 2020 och 2045 i jämförelse med annan materialanvändning och avfall i Sverige. Observera att materialanvändningen för vindkraft är räknad utifrån materialanvändningen för vindkraftverk som används idag, förmodligen kommer materialbehovet i relation till producerad el minska kommande decennier och mindre material kommer då behövas.^{24 25}

Hur mycket energi går det åt för att producera ett vindkraftverk?

Vid tillverkningen av ett vindkraftverk, utvinning av de metaller och material som används i vindkraftverket, installation och transport går det åt energi. Det går också åt energi vid nedmontering och avfallshantering/återvinning. Denna insatsenergi brukar jämföras med hur mycket energi som produceras under vindkraftverkets livslängd. För landbaserad vindkraft tar det runt ett halvår att producera den mängd energi som krävs för att tillverka, uppföra och nedmontera vindkraftverket²⁶. Motsvarande siffra för havsbaserad vindkraft bedöms vara något längre runt 8 månader²⁷. Eftersom ett vindkraftverks livslängd är mellan 20 och 25 år innebär det att vindkraftverket kommer att producera el motsvarande mellan 20 och 100 gånger mer än insatsenergin.

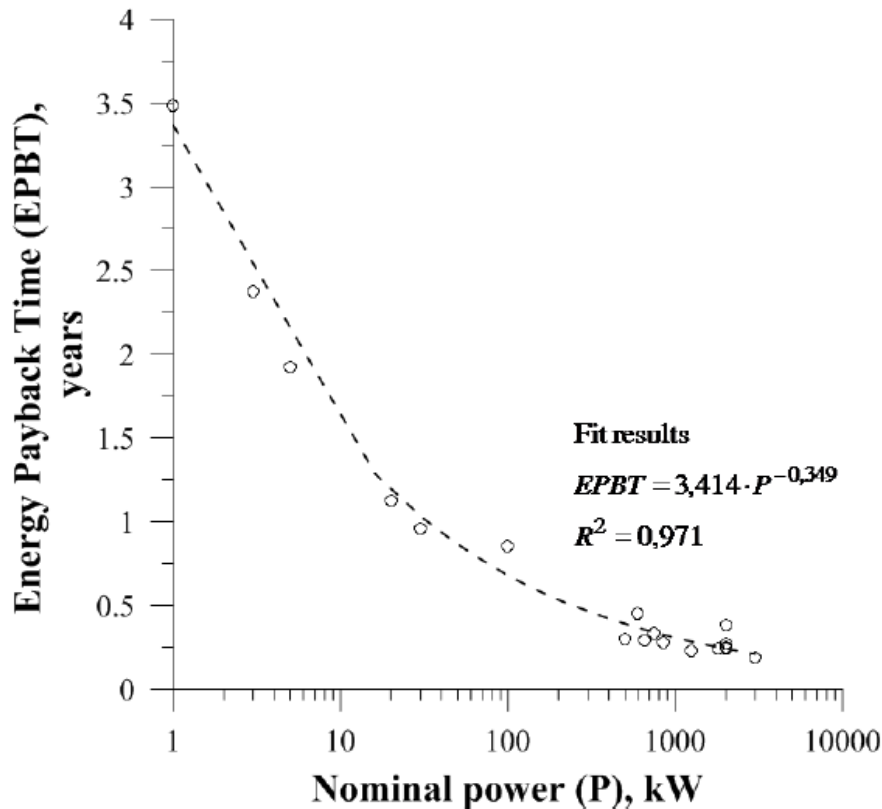
Större vindkraftverk (större installerad effekt) är mer effektiva ur detta perspektiv och det tar då kortare tid för dem att producera lika mycket energi som insatsenergin. Detta illustreras i Figur 3. Vindkraftverken som byggs i Sverige idag är i stor utsträckning på över 4 000 kW, dvs att de producerar el motsvarande sin insatsenergi på runt 3 månader.

²⁴ Material Economics, *Ett värdebeständigt svenskt materialsystem*, 2018.

²⁵ Naturvårdsverket, *Avfall i Sverige 2016*, 2018.

²⁶ Kaldellis & Apostolou, *Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart*, Energy reports, 2017.

²⁷ Ibid.



Figur 3. Energiåterbetalningstid (här EPBT) för ett vindkraftverk utifrån vindkraftverkets effekt (här P). Återbetalningstiden i år visas på y-axeln och installerad effekt i kW visas på x-axeln. Vindkraftverk med större effekt återbetalar snabbare insatsenergin.²⁸

Hur stora växthusgasutsläpp har el från vindkraft?

Ett vindkraftverk omvandlar rörelseenergin som finns i vind till elektricitet. I den processen uppstår i princip inga växthusgasutsläpp. Det uppkommer dock utsläpp vid tillverkning där råmaterialen bryts och förädlas, i fabriken där vindkraftverket produceras, när de sätts upp, vid underhåll och reparationer och vid nedmontering och materialåtervinning. I en livscykelanalys kan vindkraftens samlade påverkan per kWh producerad el beräknas och då jämföras med andra elproduktionsslag.

I den internationella klimatpanelens (IPCC) syntesrapport (AR5) finns en sammanställning av livscykelutsläpp för olika elproduktionsslag²⁹.

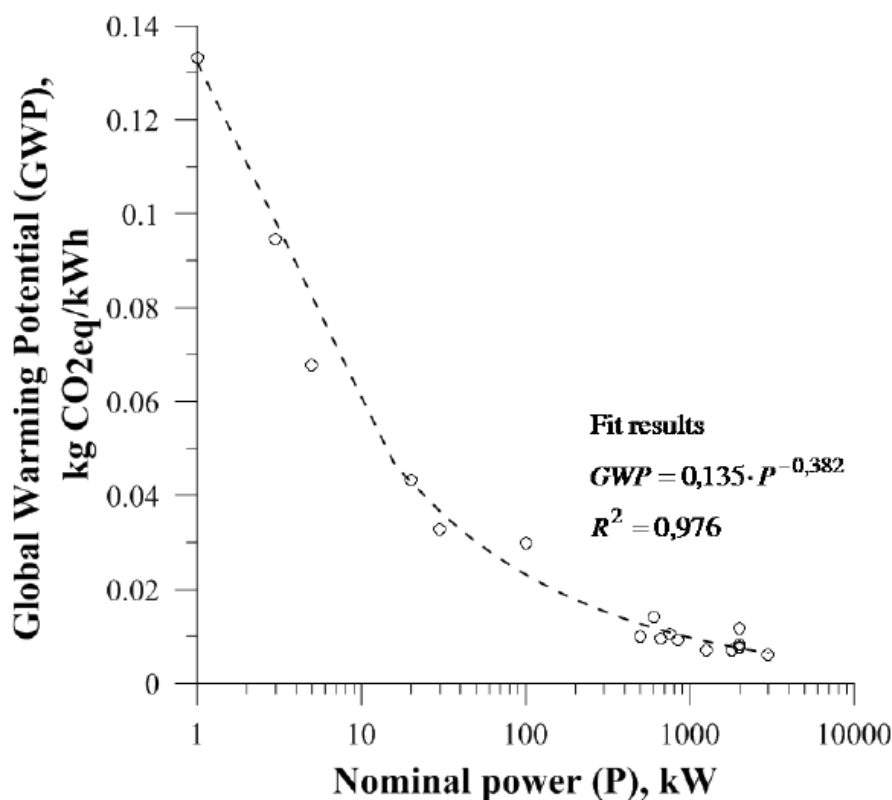
Växthusgasutsläppen räknas i form av gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme (g CO₂e/kWh). För vindkraft är utsläppet runt 11 g CO₂e/kWh

²⁸ Lobardi et al, *Analysis of environmental impact of wind turbines at increasing size*, Proceedings of ecos 2016, 2016.

²⁹ IPCC, *Climate change 2014 mitigation of climate change – Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, chapter 7.8.1, 2014.

(median). Utsläppen ligger i ett intervall mellan 7 och 56 g CO₂e/kWh beroende på olika förhållande där, den högre delen av intervallet gäller för små vindkraftverk (<100 kW).

Generellt gäller att större vindkraftverk (större effekt) genererar betydligt mer el än små verk och att utsläpp av växthusgaser per kilowattimme därmed är lägre för dem.^{30 31} Detta illustreras i Figur 4. Den pågående trenden mot större vindkraftverk innebär att växthusgasutsläppen sannolikt kommer att minska per producerad kilowattimme.



Figur 4. Växthusgasutsläpp i kilogram koldioxidekvivalenter per kilowattimme (kg CO₂eq/kWh) som funktion av vindkraftverkens installerade effekt (kW). Vindkraftverk med högre installerad effekt har generellt lägre växthusgasutsläpp per kilowattimme.³²

³⁰ Mendecka & Lombardi, *Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.

³¹ Gibon et al, *Life cycle assessment demonstrates environmental co-benefits and trade-offs of low-carbon electricity supply options*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

³² Lobardi et al, *Analysis of environmental impact of wind turbines at increasing size*, Proceedings of ecos 2016, 2016.

Sammanställningen från IPCC bygger på studier genomförda över hela världen. I ett nordeuropeiskt perspektiv har energibolaget Vattenfall genomfört flera certifierade livscykelanalyser för sin vindkraft. Det genomsnittliga livscykelutsläppet för Vattenfalls vindkraft beräknades till 13 g CO₂e/kWh i en livscykelanalys från 2019³³. Livscykelanalyser som Vattenfall utfört för enskilda nya projekt med relativt större vindkraftverk pekar, i enlighet med vad som illustreras i Figur 4, på lägre växthusgasutsläpp. Preliminära resultat för vindkraftsparken Blaiken/Fäbodberget är 6–7 g CO₂e/kWh³⁴.

Hur är vindkraftverks växthusgasutsläpp i jämförelse med andra kraftslag?

För att kunna jämföra växthusgasutsläpp mellan olika kraftslag är det vanligt att räkna utsläpp per kilowattimme (kWh) producerad el. Växthusgasutsläpp räknas då i form av gram koldioxidekvivalenter per kilowattimme (g CO₂e/kWh). I livscykelanalyser ingår utsläppen från produktion av själva kraftverket (t ex produktionen av en solcellspanel) och transporter, utsläpp som uppstår vid framtagande av bränsle (t ex brytning och förädling av uran), utsläpp som uppstår när kraftverket i sig producerar el (t ex förbränning av kol) och utsläpp som uppstår när kraftverket nedmonteras och avfallet behandlas. Även transporter för bränsle, kraftverk och komponenter i kraftverket ingår. Utgångspunkten för en livscykelanalys är att alla utsläpp som uppstår under livscykeln ska räknas in. Se svar på föregående fråga angående hur teknikutveckling kan påverka växthusgasutsläppen.

I den internationella klimatpanelens (IPCC) syntesrapport (AR5) finns en sammanställning av livscykelutsläpp från elproduktionsslag, se Figur 5³⁵. Störst utsläpp per kWh har fossil elproduktion. Elproduktion från kol har utsläpp på mellan 740 och 1689 g CO₂e/kWh, olja 510–1170 g CO₂e/kWh och naturgas 290–930 g CO₂e/kWh. De stora variationerna beror bland annat på hur bränslet utvinns och hur effektivt kraftverket är.

Förnybar elproduktion och kärnkraftsel har runt hundra gånger lägre utsläpp per kilowattimme än fossil elproduktion. De leder i princip inte till några utsläpp vid själva elproduktionen, vilket fossila bränslen gör, utan orsakar framförallt utsläpp vid produktionen av solcellerna, vindkraftverket eller kärnkraftverket.

Kärnkraftsel har även utsläpp vid brytning och förädling av uran (bränslet i kärnkraftverk). En stor del av den förnybara elens utsläpp sker vid produktion av själva solcellerna/vindkraftverket. Alltså spelar det en stor roll vilka energikällor som används i produktionen. Exempelvis får solceller som

³³ EPD & Vattenfall, *Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms*, 2019.

³⁴ Vattenfall, *Nya vindkraftverk ger lägre klimatavtryck*, 2020-12-01

³⁵ IPCC, *Climate change 2014 mitigation of climate change – Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, kapitel 7.8.1 (s.539), 2014.

produceras i Kina högre utsläpp än de som produceras i vissa delar av Europa eftersom Kina har mycket el från kolkraft. Enligt IPCC's sammanställning har elproduktion från solceller utsläpp på runt 41 g CO₂e/kWh. Motsvarande siffror för kärnkraft och vindkraft är på runt 12 g CO₂e/kWh respektive 11 g CO₂e/kWh (medianvärden av växthusgasutsläppen i sammanställningen). Energibolaget Vattenfalls livscykelanalyser med nordeuropeiskt fokus som nämns i föregående fråga beräknar 2019 det genomsnittliga livscykelutsläppet för kärnkraft till runt 4 g CO₂e/kWh^{36,37}.



Figur 5 Livscykelutsläpp från elproduktionsslag per producerad kWh (g CO₂e/kWh). De stora variationerna inom varje kraftslag beror bland annat på hur bränslet utvinns och hur effektivt kraftverket är.³⁸

³⁶ EDP & Vattenfall, *Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall Nordic Nuclear Power Plants*, 2019.

³⁷ Notera att de här siffrorna rör Vattenfalls produktion specifikt och alltså baseras på den faktiska värdekedjan så långt det är möjligt till skillnad från en mer generell LCA-bedömning. Att denna understiger medianen för IPCC:s bedömningar kan alltså delvis förklaras av metodik, men även av att leverantörskedjan för bränslet och elmix vid drift och underhåll ger lågt bidrag av växthusgasutsläpp i Vattenfalls fall.

³⁸ IPCC, *Climate change 2014 mitigation of climate change – Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, kapitel Technical Summary (s.89), 2014.

Varför används gasen SF₆ i vindkraftverk och hur påverkar de växthusgasutsläppen?

Svavelhexafluorid (SF₆) är en gas som har en betydande växthuseffekt. De främsta användningsområdena är som isolations- och brytmedium inom elektronisk industri, till exempel i ställverk. Gasen används även vid magnesiumgjutning och som test- och kalibreringsgas, syntesgas och för laboratoriebruk. Tidigare har den också använts som ljudisoleringsgas i fönster och som stötdämpande gas i sportskor³⁹.

Utsläppen av SF₆ i Sverige sammanställs av Naturvårdsverket och har minskat med 54 procent mellan 1990 och 2017. Totalt står det för cirka 0,1 procent av Sveriges totala växthusgasutsläpp. Även om gasen i sig är en mycket stark växthusgas släpps det ut så små mängder av den att klimatpåverkan blir liten.

Ungefär 70 procent av utsläppen av SF₆ kommer från produktion av ställverk (elektronisk utrustning) och från gas som används som isolations- och brytmedium i kraftsystemet. Då ställverk används för vindkraft (i verken och i anslutningen till nätet), liksom i flera andra delar av kraftsystemet, används alltså gasen i vindkraftverk. Naturvårdsverket räknar med att runt 20 procent av den SF₆ som sätts in i en komponent i kraftsystemet läcker ut under komponentens livstid. Denna statistik finns inte uppdelad mellan olika elproduktionslag eller elnät så det går inte att säga exakt hur stor del av dessa utsläpp som kan kopplas till vindkraftverk och om dessa siffror även gäller för vindkraftverk.⁴⁰

I Vestas livscykelanalyser för vindkraftverk räknas det med ett totalt läckage av SF₆ om fem procent.⁴¹ Detta innebär ett växthusgasutsläpp från SF₆ om runt 0,08 g CO₂e/kWh för vindkraftverk, vilket utgör knappt en procent av det totala livscykelutsläppet för ett vindkraftverk. Även om all SF₆ som finns i en vindkraftspark skulle släppas ut på grund av en extraordinär händelse skulle utsläppen öka med mellan 1 och 2 g CO₂e/kWh. Det vill säga, vindkraft skulle fortfarande vara bland de kraftslagen med lägst växthusgasutsläpp.

Det pågår på flera håll initiativ för att hitta ekonomiskt gångbara alternativ för att ersätta SF₆-gas som isolations- och brytmedium inom exempelvis ställverk. Exempel finns med vakuum, luft, och andra gaser.⁴² Ställverk utan SF₆-gaser har bland annat nyttjats vid vindkraftsinstallationer i Danmark.⁴³

³⁹ Naturvårdsverket, *Svavelhexafluorid (SF₆)*, 2017.

⁴⁰ Naturvårdsverket och SCB, *Totala utsläpp och upptag av växthusgaser efter växthusgas och sektor 1990–2018*, 2020.

⁴¹ Vestas, *Life Cycle Assessment Of electricity production from an Onshore V150-4.2MW wind plant*, 2019.

⁴² Norwegian SciTech News, *SF₆: The Truths and Myths of this Greenhouse Gas*, 2020

⁴³ Siemens, *Siemens supplies SF₆-free high-voltage switchgear for English wind farm*, 2018

Vad händer med vindkraftverken när det är uttjänta?

Det finns flera anledningar till att vindkraftverk plockas ned. Det kan t ex bero på att de nått slutet av sin livslängd, så att det inte längre är ekonomiskt att underhålla och reparera vindkraftverken eller att det är mer lönsamt att sätta upp helt nya och bättre vindkraftverk på samma plats eller att tillståndets giltighetstid har löpt ut.

Vindkraftverk som plockas ned i förtid kan säljas vidare i sin helhet eller plockas isär och säljas komponentvis (återanvändning). För mindre verk från 225 kW upp till cirka 1 MW finns idag en andrahandsmarknad där verken efter renovering säljs vidare och monteras upp på andra platser, ofta i andra länder. Hur marknaden kommer att se ut för större verk är svårt att säga. Det har förekommit att större verk flyttats från en plats till en annan, bland annat i Tyskland och Spanien. Detta skulle kunna vara en möjlighet även för stora verk i Sverige i framtiden⁴⁴.

Många komponenter i ett vindkraftverk kan renoveras och säljas vidare. Det finns möjligheter att återanvända rotorblad, girmekanism, växellåda, generator, maskinhus, bromsar och torn efter renovering. En andrahandsmarknad finns idag och flera bolag erbjuder också ombyggnadsservice av komponenter⁴⁵.

Om inte komponenterna kan återanvändas är de flesta delar i ett vindkraftverk återvinningsbara. Vindkraftverk består framförallt av stål och järn samt mindre delar aluminium och koppar. Dessa material kan återvinnas. Fundamenten utgörs framförallt av betong, den kan krossas och användas som fyllnadsmassor.

Vindkraftverkens rotorblad består i stor utsträckning av glasfiberkomposit (glasfiber och härdplast). Det finns idag flera olika återvinningstekniker utvecklade för glasfiberkomposit. T ex malning och inblandning som fyllnadsmedel i byggnadsmaterial och andra kompositmaterial. Olika kemiska återvinningsprocesser är också under utveckling idag. Ny glasfiber är dock mycket billig och det behövs idag således andra drivkrafter eller incitament för att företag ska börja implementera dessa återvunna strömmar i sina produkter.

Projektet *Kemisk återvinning av glasfiberkomposit från vindturbinblad – Rekovind* finansierat inom Energimyndighetens forskningsprogram har demonstrerat en möjlig kemisk metod för att återvinna kompositen i vindturbinbladen. Härdplasten omvandlas till kemiska byggblock som kan användas till t ex plaster, kemikalier och fordonsbränslen. Samtidigt fås en ren glasfiberfraktion som kan återanvändas till nya kompositmaterial. Projektet har även

⁴⁴ Energimyndigheten och Naturvårdsverket, *Vägledning om nedmontering av vindkraft*, 2016.

⁴⁵ L. Aldén et al, *Nedmontering av vindkraft och efterbehandling av platsen*, Uppsala universitet Campus Gotland, 2014.

undersökt återvinningshantering av vindturbinblad och gjort en prognos för framtida strömmar av uttjänta vindturbinblad i Sverige. Initialt under en 5-årsperiod är prognosen 740 ton glasfiberkomposit per år, men efter 2025 väntas en 5-faldig ökning ske. Man konstaterar även att det är svårt att hitta ekonomi i att utveckla återvinningstekniker, men att intresset och viljan hos alla aktörer i vindkraftsvärdekedjan är stort för att samverka mot mer cirkulära lösningar. I takt med att avfallsströmmarna väntas öka kommande år blir det här en allt viktigare fråga⁴⁶. Det finns även forskningsprojekt som syftar till att återanvända rotorblad i sin helhet, exempelvis som broar.⁴⁷

Ett annat projekt finansierat av Vinnova arbetar med återvinning av glasfiberkomposit tar ett större grepp och täcker in uttjänta glasfiberkomposit från vind-, båt-, fordons- och byggnadsindustrin⁴⁸. Flödena av komposit från de andra sektorerna bedöms på en europeisk nivå vara högre än från vindkraftverk. År 2025 bedöms avfall av komposit från byggindustrin vara 195 000 ton, elektronik och elektrisk utrustning 112 000 ton, transportsektorn 88 000 ton, båtindustrin 70 000 ton och vindkraft 66 000 ton⁴⁹.

Hittills har inte så många vindkraftverk tagits ur bruk i Sverige och en stor del av nedmonterade verk har gått vidare till andrahandsmarknader för vidare bruk. Det går dock inte att utesluta att en del hamnat på deponi eller gått till energiåtervinning i fall då nedtagningen kontrakteras via entreprenörer i Europa. I Tyskland där många vindkraftverk väntas tas ur bruk kommande år har förutsättningarna för nedmontering och återvinning av vindkraftverk undersökts av miljömyndigheten. Studien bedömer att infrastruktur finns på plats för att hantera avfallsströmmar av betong, stål och andra metaller, men att kapaciteten att återvinna glasfibermaterial riskerar att bli en flaskhals. I studien lämnas även rekommendationer på förbättringar, bland annat att det bör övervägas ett specifikt produktansvar för rotorblad.⁵⁰

Vad händer med platsen efter att vindkraftverken har tagits bort?

Om verksamheten upphör ansvarar verksamhetsutövaren (vindkraftsägaren) för nedmontering av verk och efterbehandling av platsen. Verksamhetsutövaren ska avsätta en ekonomisk säkerhet innan anläggningsarbeten för respektive verk påbörjas som täcker kostnaderna för nedmontering av vindkraftverken och

⁴⁶ RISE, *Rekovind – kemisk återvinning av glasfiberkomposit från vindturbinblad*, 2019.

⁴⁷ Se exempelvis, *Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications*, *Re-wind*, <https://www.mdpi.com/2313-4321/3/1/3/html>, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5af53410-1be0-43e0-9a6d-2e438b1865f9> och <https://www.windpowermonthly.com/article/1672913/sharpening-up-blade-recycling>.

⁴⁸ RISE, *ReComp – Cirkulära strömmar från glasfiberkomposit*, 2019.

⁴⁹ European Technology & Innovation Platform on wind energy (ETIP WIND), *How wind is going circular*, 2019.

⁵⁰ Umwelt Bundesamt, *Insufficient recycling capacities for dismantling wind-powered installations*, 2019

efterbehandling av platsen. Detta går det att läsa mer om i Energimyndigheten och Naturvårdsverkets gemensamma vägledning för nedmontering av vindkraft⁵¹. I vägledningen rekommenderas olika typer av efterbehandling beroende på typ av område.

I vägledningen beskrivs att vägar många gånger kan lämnas att användas till annan verksamhet som skogsbruk och friluftsliv. Vägar och material från vägar kan även komma att återanvändas vid ett eventuellt generationsskifte då ny vindkraft etableras inom samma område. Vägar i vissa känsliga naturmiljöer kan medföra att landskapet fragmenteras och att spridning av oönskade arter underlättas. För att förhindra detta kan vägarna behöva tas bort. Lagstiftningen kräver normalt inte återställning, men det kan vara reglerat i villkor för verksamheten.

För mer detaljer kring nedmontering rekommenderas Energimyndighetens och Naturvårdsverkets vägledning på området.

⁵¹ Energimyndigheten och Naturvårdsverket, *Vägledning om nedmontering av vindkraft*, 2016.