



Miljöpåverkan från gravitations- och bergsförankrade vindkraftsfundament – en jämförande livscykelanalys

Filip Berglund

Självständigt arbete • 15 hp

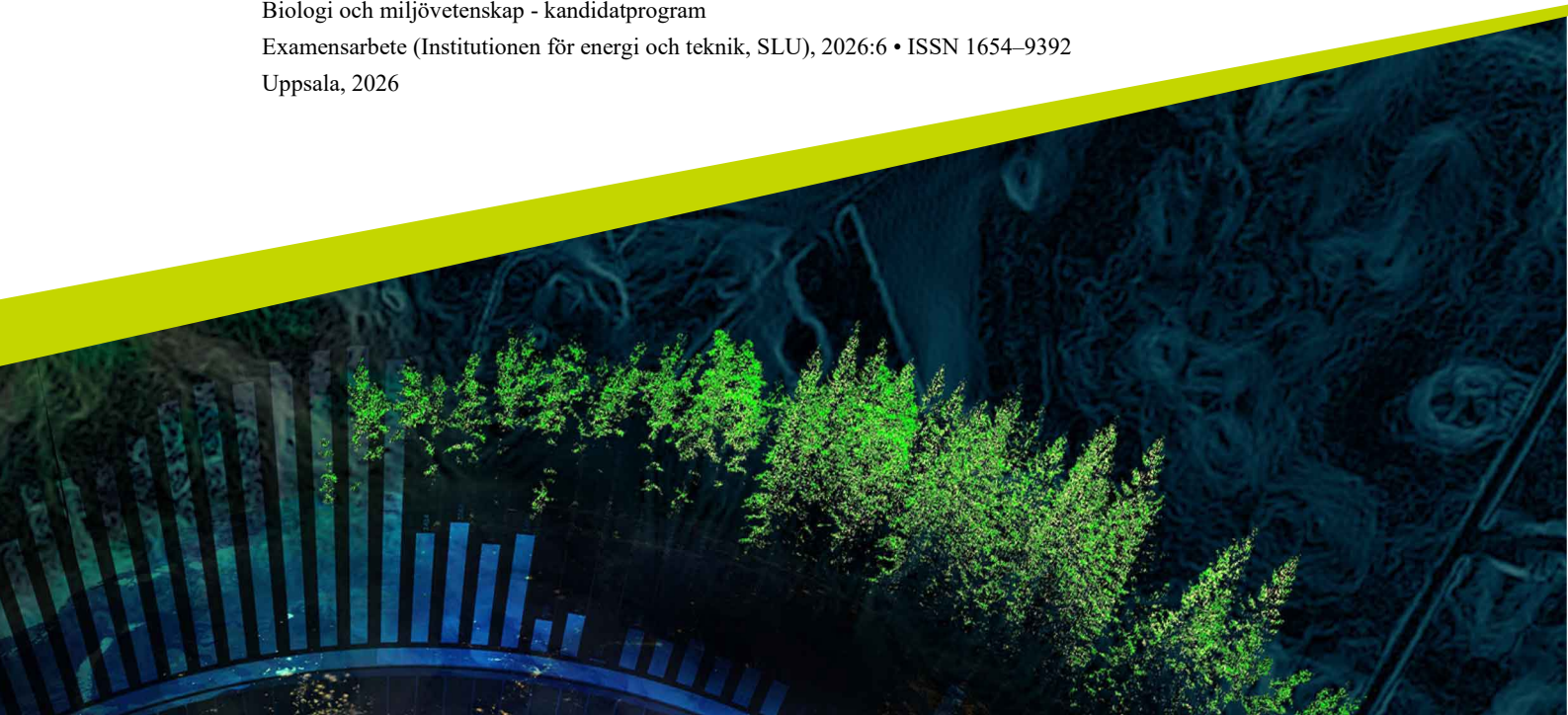
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Fakultet för naturresurser och jordbruksvetenskap, Institutionen för energi och teknik

Biologi och miljövetenskap - kandidatprogram

Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU), 2026:6 • ISSN 1654-9392

Uppsala, 2026



Miljöpåverkan från gravitations- och bergsförankrade vindkraftsfundament – en jämförande livscykelanalys

Environmental impacts of gravity-based and rock-anchored wind turbine foundations – a comparative life cycle assessment

Filip Berglund

Handledare:	Gunnar Larsson, SLU, Energi och Teknik
Examinator:	Mattias Eriksson, SLU, Energi och Teknik
Omfattning:	15 hp
Nivå och fördjupning:	Grundnivå, G2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i Miljövetenskap
Kurskod:	EX0896
Program/utbildning:	Biologi och miljövetenskap - kandidatprogram
Kursansvarig inst.:	Institutionen för vatten och miljö / Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2026
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel:	Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien:	2026:6
ISSN:	1654-9392
Nyckelord:	livscykelanalys, LCA, vindkraft, vindkraftsfundament, gravitationsfundament, bergsförankrade fundament, miljöpåverkan

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för vatten och miljö / Institutionen för energi och teknik

Förord

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Gunnar Larsson för värdefull vägledning under arbetets gång.

Jag vill även tacka Louise Bartek (KTH) för hjälp och rådgivning kring modelleringen gjord i SimaPro.

Slutligen vill jag tacka mina klasskamrater som har gjort dessa veckor lite roligare.

Sammanfattning

Vindkraften spelar en central roll i den gröna omställningen och i jakten på att nå olika miljömål. Vindkraft är ofta ansett som miljövänligt då omvandling av rörelseenergi i vinden till elektricitet sker utan utsläpp som exempelvis växthusgaser. Analyser kopplade till miljöpåverkan är därför mest fokuserad till vindkraftens driftsfas och negligerar ofta miljöpåverkan från komponenter som möjligtvis inte syns lika mycket och i stället främst har sin påverkan i begynnelse- och slutfaserna av vindkraftsverkens livscykel. Därav utfördes en livscykelanalys (LCA) baserat på ISO standarderna 14040 och 14044 där gravitationsfundament och bergsförankrade fundament för landbaserad vindkraft jämfördes i fem utvalda miljöpåverkanskategorier med hjälp av modeller skapade i SimaPro med data hämtad frånecoinvent. Den funktionella enheten bestämdes till ”fundament som möjliggör stabil drift av ett landbaserat vindkraftsverk under en livslängd på 25 år” och systemgränserna klassades som ”cradle-to-grave”. För modellering av fundamenten i SimaPro inventerades data för material och andra processer var för sig med hjälp utav konstruktionsunderlag, vetenskaplig litteratur, tekniska produktblad men även egna beräkningar. Efter modellering och simulering kunde båda fundamenttypernas miljöpåverkan analyseras och jämföras. Det bergsförankrade fundamentet stod för 40 ton utsläppta CO₂-ekvivalenter över sin livstid och gravitationsfundamentet stod motsvarande för 303 ton CO₂-ekvivalenter. En skillnad på 87%. Hotspotanalyser för klimatpåverkan visar att detta främst beror på den stora mängden betong som används i gravitationsfundament. Utöver detta uppvisade gravitationsfundamentet även högre påverkan i kategorierna för övergödning, försurning och markanvändning. Medan det bergsförankrade fundamentet hade något högre resultat när det kom till utsläpp av cancerframkallande ämnen. Troligen på grund av den högre stålanvändningen. Processer kring transporter, installationer och sluthantering hade begränsad påverkan jämfört med materialproduktion. De tre utförda känslighetsanalyserna visade på modellernas robusthet genom att väsentliga parametrar och scenarion förändrades samtidigt som resultaten inte förändrades nämnvärt jämfört med basfallet. Trots beskrivningarna av fundamentens klimatpåverkan visade det sig efter en koldioxidåterbetalningstidanalys att gravitation- och bergsförankrade fundament återbetalar sin klimatskuld efter endast 95 respektive 13 dagar vid användning. Något som stödjer fortsatt utveckling och effektivisering av främst materialrelaterade processer inom ämnet. Resultaten indikerar på att vidare studier som möjligtvis inkluderar ekonomiska och sociala aspekter kan bidra till framtida beslutsunderlag

Nyckelord: livscykelanalys, LCA, Vindkraft, Vindkraftsfundament, Gravitationsfundament, Bergsförankrade fundament, Miljöpåverkan

Abstract

Wind power plays a key role in the green transition and in the pursuit of achieving various environmental goals. Wind power is often regarded as ecofriendly as the transformation of kinetic energy from wind to electricity occurs without any emissions. Particularly greenhouse gases. Analyses and studies connected to environmental impact is therefore mostly focused on wind turbines during their usage phase and not necessarily on components linked with the beginning- and end phases of the lifecycle. Therefore, a life cycle assessment (LCA) study was conducted based on ISO standards 14040 and 14044 where gravity-based foundations were compared with rock-anchored foundations in five chosen environmental impact categories for onshore wind power by building models in SimaPro with data from ecoinvent. The functional unit was defined as “Foundation for onshore wind power that facilitates secure operation of onshore wind turbines with a lifecycle of 25 years” and the system boundaries were classed as “cradle-to-grave”. To model the foundations in SimaPro, materials and process data were inventoried separately in the life cycle inventory (LCI) phase with the help of engineering documentation, academic papers and different calculations. The gravity-based foundation proved to have a higher climate impact than the rock-anchored foundation. Hotspot analyses were concluded and showed that this was mainly due to the large amount of concrete used in the gravity-based foundation. The gravity-based foundation also showed a bigger impact in the categories for terrestrial acidification, eutrophication and land use. However, the rock-anchored foundation demonstrated greater results for human carcinogenic toxicity. Due to the higher use of steel. Transport, installation and disposal processes had a limited impact compared to material production. The three conducted sensitivity analyses indicated that the initial models were relatively robust due to even though crucial parameters and scenarios were changed, the results didn’t differ significantly. A carbon payback time analysis was conducted and the results demonstrated that gravity-based foundations and rock-anchored foundations offset their climate debt after only 95 and 13 days respectively. This supports continued development and optimization of primarily processes related to material production. The results indicate that future studies that possibly also include social and economic aspects can contribute to future basis for decision-making.

Keywords: Life cycle assessment, LCA, Wind power, Wind turbine foundation, Gravity-based foundation (GSF), Rock-anchored foundation (RAF), Environmental impact

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	8
Figurförteckning	9
1. Inledning	10
1.1 Syfte och frågeställningar.....	11
2. Bakgrund	12
2.1 Livscykelanalys (LCA).....	12
2.2 Landbaserade vindkraftsfundament.....	14
2.2.1 Gravitationsfundament.....	14
2.2.2 Bergsförankrade fundament.....	15
2.3 Programvara och databaser.....	16
2.3.1 SimaPro.....	16
2.3.2 Ecoinvent.....	16
2.3.3 NTMcalc.....	16
3. Metod	17
3.1 Metodval och omfattning.....	17
3.2 Funktionell enhet.....	17
3.3 Systemgränser.....	18
3.4 Livscykelinventering (LCI).....	19
3.4.1 Datainsamling och teknisk sammanställning.....	19
3.4.2 Fullständig inventering (material).....	19
3.4.3 Fullständig inventering (processer).....	23
3.4.4 Modellering i SimaPro.....	26
3.4.5 Sluthantering (EoL).....	27
3.5 Miljöpåverkansbedömning (LCIA).....	27
3.5.1 Val av LCIA metod.....	27
3.5.2 Val av miljöpåverkanskategorier.....	28
3.5.3 Klassificering och karaktärisering.....	28
3.5.4 Normalisering och viktning.....	28
3.6 Tolkning av resultat.....	29
3.6.1 Bearbetning av resultat och hot-spot analys.....	29
3.6.2 Koldioxidåterbetalningstid.....	29
3.6.3 Känslighetsanalys.....	30
4. Resultat	31
4.1 Miljöpåverkansbedömning (LCIA).....	31
4.2 Koldioxidåterbetalningstid.....	37
4.3 Känslighetsanalys.....	37
4.3.1 ECO-betong.....	37

4.3.2	Platsspecifik transportmodellering för vindpark Åby-Alebo.....	38
4.3.3	Materialmängder	39
5.	Diskussion.....	41
5.1	Huvudresultat och jämförelse med tidigare kunskap.....	41
5.2	Studiens styrkor och svagheter	43
5.3	Rekommendationer.....	44
5.4	Slutsatser	44
	Referenser.....	45
	Bilaga 1	48

Tabellförteckning

Tabell 1. Sammanställning av parametrar och data kopplade till materialprocesser vid modellering av gravitationsfundament och bergsförankrat fundament i SimaPro. Samtliga dataset hämtades från ecoinvent v.3.	23
Tabell 2. Sammanställning av parametrar och data kopplade till transport, installations och sluthanteringsprocesser vid modellering av gravitationsfundament och bergsförankrat fundament i SimaPro. Samtliga dataset hämtades från ecoinvent v.3.....	26
Tabell 3. Absoluta LCIA-resultat för båda fundamenttyperna inom de studerade miljöpåverkankategorierna.	34
Tabell 4. Sammanställning av koldioxidåterbetalningstiden i år och dagar för båda fundamenttyperna.	37
Tabell 5. Den procentuella förändringen när stål- och betongmängder varierades med $\pm 20\%$ för båda fundamenttyperna.	40

Figurförteckning

Figur 1. Illustration av LCA-processens iterativa faser. Baserad på ISO 14040 (ISO 2006a).....	13
Figur 2. Exempel på ett gravitationsfundament för landbaserad vindkraft. Bildkälla: (www.proplate.se).....	14
Figur 3. Exempel på ett bergsförankrat fundament för landbaserad vindkraft. Bildkälla: (www.proplate.se).....	15
Figur 4. Översikt av studiens systemgränser och de inkluderade livscykelstegen för gravitationsfundament och bergsförankrade fundament.	18
Figur 5. Total klimatpåverkan för gravitationsfundamentet och det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton CO ₂ -ekvivalenter över hela livscykeln.	31
Figur 6. Hotspotanalys av klimatpåverkan för gravitationsfundamentet uttryckt i ton CO ₂ - ekvivalenter för de inkluderande material- och processflödena över hela livscykeln...	32
Figur 7. Hotspotanalys av klimatpåverkan för det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton CO ₂ - ekvivalenter för de inkluderande material- och processflödena över hela livscykeln...	33
Figur 8. Relativ miljöpåverkan för de båda fundamenttyperna inom de studerade miljöpåverkankategorierna där gravitationsfundamentet är normaliserat som 100%. ...	34
Figur 9. Hotspotanalys med fördelning av påverkan inom kategorin för cancerframkallande ämnen för gravitationsfundamentet uttryckt i ton 1,4 DCB ekvivalenter.....	35
Figur 10. Hotspotanalys med fördelning av påverkan inom kategorin för cancerframkallande ämnen för det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton 1,4 DCB ekvivalenter.	36
Figur 11. Jämförelse av klimatpåverkan mellan basfallet och ett scenario där betongen enbart står för hälften av sin typiska påverkan. Uttryckt i ton CO ₂ -ekvivalenter.	38
Figur 12. Jämförelse av klimatpåverkan mellan basfallet och det plats specifika scenariot för båda fundamenttyperna respektivt. Uttryckt i ton CO ₂ -ekvivalenter och framtagen med beräkningar i NTMCalc.	39

1. Inledning

EU har som mål att utsläpp av växthusgaser ska ha minskat med upp till 95% år 2050 jämfört med utgångsvärdet från 1990 samtidigt som till 2030 ska minst 27% av energiförbrukningen komma från förnybara källor (Europeiska Revisionsrätten 2017). Förnybara energikällor anses vara centrala i den nuvarande energiomställningen (Sobczuk et al. 2025). Särskilt vindkraft som bidrar med 15% av Europas energibehov och där förhoppningen är att denna siffra är närmare 50% år 2050 (Masanet et al. 2024). Tack vare den ökade efterfrågan på vindkraft utvecklas idag tekniken i rekordtempo och tiotusentals nya vindkraftsverk etableras varje år (Magnusson & Mathern 2022). Omvandlingen av rörelseenergin i vind till elektricitet i vindturbiner är ofta ansedd som miljövänlig då omvandlingen sker utan utsläpp. Analyser kopplade till miljöpåverkan från vindkraftsverk är därmed främst koncentrerade till påverkan som sker under vindkraftsverkets drift. Till exempel förändring av landskapsbilden, buller, skuggning, och påverkan på fåglar (Sobaszek et al. 2023). Mindre uppmärksamhet är därmed given till effekter rörande start- och slutskedet av vindkraftverkens livscykel vilket innefattar produktionen och installationen men även hur materialet används efter vindkraftsverkets livscykel, och dess slutskede. Exempelvis genom återvinning eller deponering.

Dagens vindkraftsverk använder en stor mängd material vid produktion som betong, plast och stål och utnyttjar även en hel del energi (Sobaszek et al. 2023). Detta innefattar särskilt landbaserade vindkraftsverksfundament där vikten av betongen och det armerade stålet kan nå upp mot 75% av den totala vikten av vindkraftsverket (Carneiro et al. 2022). Trots att betongen och stålet kan utgöra en stor majoritet av vindkraftsverkets totala massa uppskattas dess bidrag till de totala växthusgasutsläppen enbart vara kring 15% (Carneiro et al. 2022). Detta indikerar att sambandet mellan mängden material och klimatpåverkan inte är ett linjärt sådant. Fundamentet uppfyller en central del i vindkraftsverkets funktion genom att överföra både dynamiska och ständiga laster från tornet ner i marken och står för cirka 10% av den initiala kostnaden av landbaserade vindkraftsverk (Stavridou et al. 2015; Nardelli & Futai 2022). På grund av vindkraftsverkets höjd och smala utformning utsätts verken för stora horisontallaster, främst vind men även egenvikt (Nardelli & Futai 2022). Dessa krafter orsakar ett stort vältmoment inom fundamenten vilket innebär de kräver en säker och robust design. De fem viktigaste variablerna när det kommer till design av fundament är markens ytråhet, jordart, byggmaterial, vindkraftsverkets kapacitet och tornets höjd. Valet av fundamenttyp och dess storlek är baserat på de geotekniska förhållanden/markförhållanden på platsen, effekten på turbinen och typen av torn. Trots fundamentens centrala del i vindkraftverkens funktion väljs plats främst

utifrån energipotential och vindförhållanden vilket kan missgynna installationen av fundamenten (Nardelli & Futai 2022). Eftersom fundamenten endast står för 5-7% av en vindkraftsparks totala kostnad är prioriteringen runt klimat och miljö för de nedvärderad (Masanet et al. 2024).

De två vanligaste fundamentstyperna för landbaserade vindkraftverk är gravitationsfundament, som motverkar lasterna genom sin egen vikt samt bergsförankrade fundament där lasterna överförs via förankringar ner i berggrunden (Lavanya & Kumar 2020). Dessa fundamenttyper skiljer sig en del i både material, materialmängder och installationsmetoder vilket innebär varierad miljöpåverkan. Trots detta är jämförelser mellan de olika fundamenttyperna begränsade, speciellt med avseende på total klimatpåverkan över hela livscykeln. Den begränsningen indikerar på att kunskap kring hur valet av fundamenttyp påverkar landbaserad vindkrafts totala klimatpåverkan, men även påverkan inom andra miljöpåverkankategorier saknas. Därav anses denna studie kunna bidra med den kunskapen.

1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att jämföra miljöpåverkan inom olika miljöpåverkanskategorier för gravitationsfundament och bergsförankrade fundament för landbaserade vindkraftsverk med hjälp av metodiken livscykelanalys (LCA).

Studien avser att besvara dessa frågeställningar:

- Hur skiljer sig den totala miljöpåverkan mellan fundamenttyperna inom studerade miljöpåverkankategorier?
- Vilka livscykelsteg och material bidrar mest till fundamentens miljöpåverkan?
- Hur påverkar olika variationer inom utvalda parametrar resultatet?

2. Bakgrund

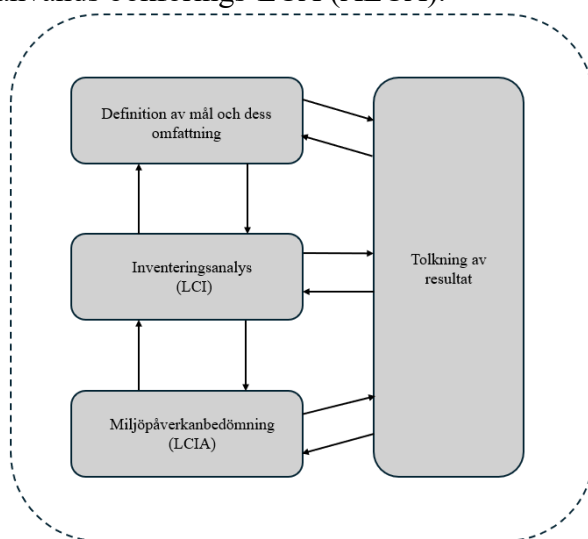
2.1 Livscykelanalys (LCA)

Livscykelanalys (LCA) är en metod som används för att kvantifiera miljöpåverkan från en tjänst eller en produkt över hela dess livscykel (Atescan-Yuksek et al. 2024). Detta innefattar vanligtvis råvaruutvinning, produktion, användning och slutskedesbehandling (End of life, EoL). Detta sammanfattas ofta med det engelska begreppet ”cradle-to-grave”. Genom att utföra livscykelanalyser är det möjligt att förbättra produkter och tjänster miljömässigt. Genom att identifiera betydande områden i livscykeln undviks risken att ett problem enbart förflyttas inom systemet i stället för att faktiskt lösas. Ett problem som kan beskrivas som ”burden shifting”.

FN:s klimatpanel (IPCC) har beskrivit LCA som en användbar metodik för att bestämma olika systems miljöpåverkan vilket kan vara till hjälp för beslutsfattare (Bonou et al. 2016). För att en livscykelanalys ska genomföras på ett så tydligt och transparent sätt som möjligt används vanligen internationellt etablerade standarder. 2006 publicerade International Organization for Standardization (ISO) standarderna ISO 14040 och ISO 14044 som används som den främsta referensramen för hur en livscykelanalys ska planeras, genomföras och tolkas (Atescan-Yuksek et al. 2024). Detta leder till att resultaten blir enklare att jämföra och mer tillförlitliga. Standarderna beskriver fyra faser som ska ingå i livscykelanalysen. Definition av mål och omfattning, inventeringsanalys (LCI), miljöpåverkansbedömning (LCIA) och slutligen tolkning (Faizan & Afgan 2026). Figur 1 visar dessa iterativa faser. Under mål- och omfattningsfasen definieras studiens syfte, systemgränser, antaganden samt den funktionella enheten som analysen baseras på (ISO 2006a). Den funktionella enheten är en central del inom LCA då den möjliggör jämförelse mellan produkter och tjänster och deras resultat. Den ska vara förenlig med målet och syftet för analysen och måste gå att mätas kvantitativt. Under inventeringsanalysen (LCI) identifieras och kvantifieras alla in- och utflöden som anses som relevanta för systemet (ISO 2006b). Detta kan exempelvis vara materialanvändning, energiförbrukning, transporter, sluthanteringsprocesser och utsläpp. Därefter omvandlas denna data till potentiell miljöpåverkan inom olika miljöpåverkanskategorier i miljöpåverkansbedömningen (LCIA) genom användning av karaktäriseringsfaktorer. Till slut analyseras och tolkas resultaten för att identifiera de processer eller komponenter som bidrar mest till systemets totala miljöpåverkan, vanligt benämnda som ”hotspots”. Inom miljöpåverkansbedömningen finns det obligatoriska och frivilliga moment (ISO 2006b). De obligatoriska momenten är klassificering och karaktärisering vilket innebär att specifika utsläpp klassificeras till en specifik

miljöpåverkan, exempelvis försurning. Därefter i karaktäriseringen bestäms det närmare vilka utsläpp som bidrar till denna kategori. Exempelvis att svaveldioxid (SO₂) och kväveoxid (NO_x) utsläpp båda karaktäriseras som SO₂-ekvivalenter och därmed bidrar till försurning. Just SO₂-ekvivalenter är måttstocken för försurning inom den kategorin. I karaktäriseringen multipliceras de olika ämnenas uträknade flöden med respektive karaktäriseringsfaktor inom en utvald LCIA-metod för att ge en korrekt summering av olika utsläpp och dess egentliga miljöpåverkan. Exempelvis enligt GWP₁₀₀ karaktäriseringsfaktorer klassas lustgas (N₂O) ha en 265 gånger större påverkan inom kategorin för klimatpåverkan än koldioxid (CO₂) (Eriksson 2025). De frivilliga momenten som kan ske efter karaktärisering är först normalisering där resultatet sätts i perspektiv gentemot en annan parameter. Exempelvis hur resultaten jämförs med försurningsutsläpp per capita. Till sist kan även resultaten viktas vilket innebär att de olika karaktäriserade värdena sammanvägs som en gemensam indikator (ISO 2006b).

Livscykelanalyser kan genomföras på olika metodologiska sätt. Två vanliga sätt är ”attributional life cycle assessment” (ALCA), även benämnt som bokförings-LCA där miljöpåverkan beskrivs som kvantifieringen av relevanta flöden inom ett visst systems livscykel (Ekvall 2019). Här används medeldata och allokering används för processer med flera funktionella processer. ”Consequential life cycle assessment” (CLCA), även benämnt som konsekvens-LCA innebär att analysera hur miljöpåverkan förändras till följd av ett specifikt beslut eller en förändring och innefattar alltså parametrar utanför själva systemets egna gränser. Här används marginaldata och systemexpansion är vanligt (Ekvall 2019). Då syftet i denna studie är att jämföra den totala miljöpåverkan på två befintliga fundamenttyper utan att analysera konsekvenserna i ett större sammanhang används bokförings-LCA (ALCA).

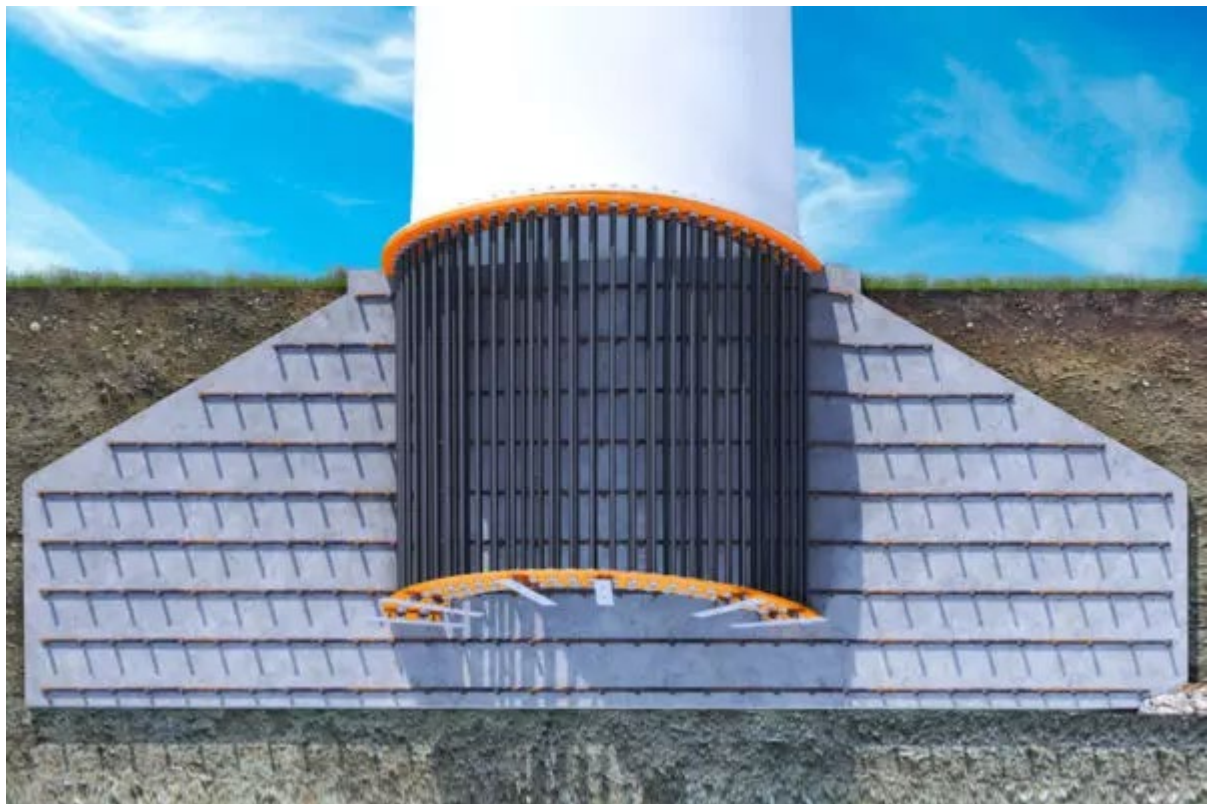


Figur 1. Illustration av LCA-processens iterativa faser. Baserad på ISO 14040 (ISO 2006a).

2.2 Landbaserade vindkraftsfundament

2.2.1 Gravitationsfundament

Den vanligaste fundamentlösningen för landbaserade vindkraftverk är gravitationsfundament (Nardelli & Futai 2022). Principen bygger på att fundamentets egen vikt motverkar vältningsmomentet som sker i vindkraftsverket utifrån lasterna som påverkar det, som vind och egenvikt. Fundamenten fungerar genom att stora mängder armerad betong används med nog vikt och stabilitet för att motstå de horisontala krafterna som påverkar vindkraftsverket (Nardelli & Futai 2022). Gravitationsfundament installeras vanligtvis relativt ytligt i marken och kan användas inom flera olika markförhållanden. Utöver armerad betong används relativt stora mängder stål, bland annat i bultkorgen som är den mest centrala delen av fundamentet och som används för att fästa vindkraftverket till fundamentet. (Proplate u.å.a). Inför installation av fundamenten krävs det vanligtvis omfattande schaktning, transport av material samt annat markförberedande arbete. Den stora materialåtgången av främst betong och armeringsstål innebär att gravitationsfundament ofta förknippas med betydande klimatpåverkan under produktionen samtidigt som det är välbeprövat och en teknisk hållbar lösning. Illustration visas i figur 2



Figur 2. Exempel på ett gravitationsfundament för landbaserad vindkraft. Bildkälla: (www.proplate.se)

2.2.2 Bergsförankrade fundament

Bergsförankrade fundament utgör en alternativ lösning där lasterna från vindkraftverket överförs till berggrunden genom mekaniska förankringar gjorda i stål (Proplate u.å.b). Bergsförankrade fundament används främst i områden där berggrunden finns nära markytan och där de geologiska förhållandena möjliggör att säker förankring sker. Tack vare att lastöverföringen främst sker via förankring i stället för egenvikt som hos gravitationsfundament kan mängden betong reduceras avsevärt. En mindre mängd armerad betong kan användas centralt i fundamentet för att möjliggöra hopkoppling till vindkraftverket genom en ankarring i stål. Runt 12 meter långa stålbultar borrar ner i berggrunden som lasterna överförs genom ner i berget (Proplate u.å.b). Inför installation krävs mindre förarbete då inte lika stor mängd material måste transporteras och mindre markarbete krävs. Bergsförankrade fundament begränsas dock till platser med lämpliga geologiska förutsättningar (Suchorzewski et al. 2024). Tidigare studier visar att bergsförankrade fundament är bland de mest lovande när det kommer till hållbarhet med vissa lösningar rapporterade att minska koldioxidutsläpp med 58% jämfört med gravitationsfundament (Suchorzewski et al. 2024). Illustration av fundamentet visas i figur 3.



Figur 3. Exempel på ett bergsförankrat fundament för landbaserad vindkraft. Bildkälla: (www.proplate.se)

2.3 Programvara och databaser

2.3.1 SimaPro

SimaPro är ett verktyg som används inom livscykelanalys för att modellera omfattande produktsystem för att sedan koppla det till dess möjliga miljöpåverkan över hela livscykeln. Materialmängder, energianvändning, transporter och sluthantering är några av parametrarna som kan användas. SimaPro innehåller en rad olika inventerings dataset som beskriver miljöpåverkan från en viss process eller material. SimaPro är ansett som ett av mest etablerade programmen inom livscykelanalys, det tack vare sin globalt accepterade metodik och beprövade datasets (Hemmati et al. 2023). I denna studie används SimaPro version 10.3.0.4.

2.3.2 Ecoinvent

Ecoinvent är en av de främsta databaserna inom livscykelanalys och innehåller generiska data för tusentals processer kopplade till material, energianvändning, transport och sluthanteringsprocesser (Hemmati et al. 2023). Databasen möjliggör modellering av komplexa system utan några större begränsningar. I denna studie används version 3 med systemmodellen allocation, cut-off by classification.

2.3.3 NTMcalc

NTMcalc är ett verktyg utvecklat av NTM (nätverket för transporter och miljön) som används för att beräkna miljöpåverkan från transporter med ett antal olika variabla parametrar som bränsletyp, fordonstyp och geografiska avstånd (EU 2014). NTMcalc används för att uppskatta utsläpp kopplade till logistiska transporter. I denna studie används NTMCalc 4.0 för att genomföra den platsspecifika känslighetsanalysen beskriven i 4.6.2.

3. Metod

3.1 Metodval och omfattning

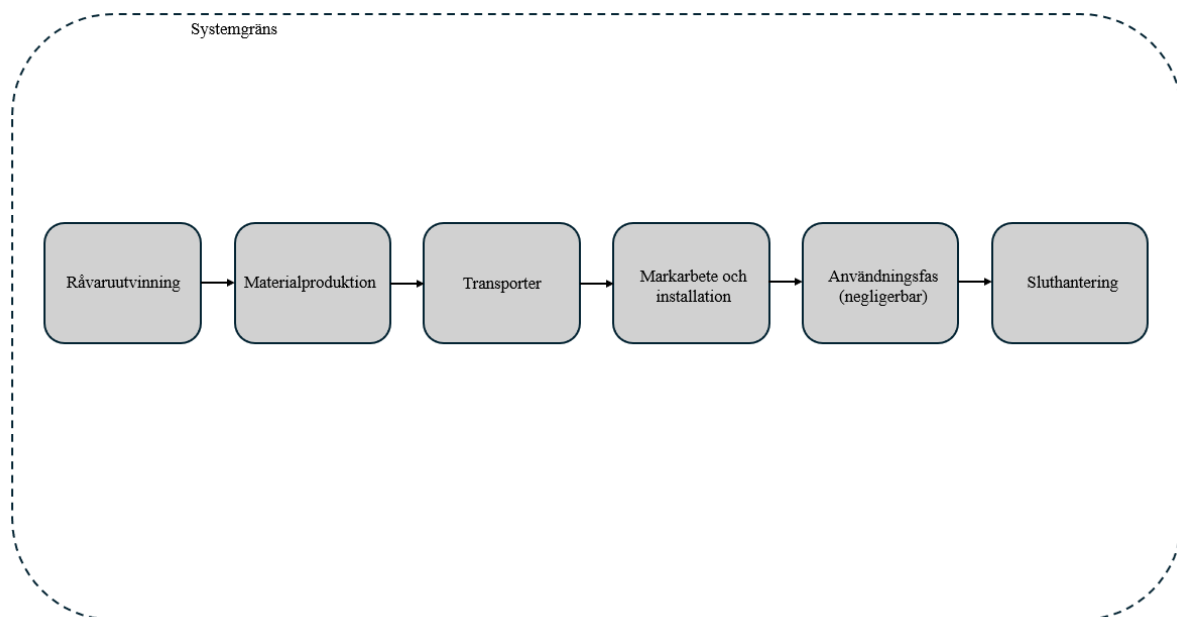
En livscykelanalys (LCA) genomfördes för att kvantifiera och på så sätt jämföra miljöpåverkan inom olika miljöpåverkankategorier för två fundamenttyper för landbaserade vindkraftsverk, gravitationsfundament och bergsförankrade fundament. Analysen syftar till att identifiera skillnader i deras totala miljöpåverkans samt att undersöka vilka livscykelsteg och material som främst bidrar till denna påverkan. LCA som metod valdes då den möjliggör en systematisk analys av fundamentens miljöpåverkan över hela deras livscykel, från materialutvinning till sluthantering (cradle-to-grave). LCA bedömdes som lämpligt inom denna studie då de två fundamenten används för samma syfte, att på ett stabilt och säkert sätt hålla vindkraftsverk fast i marken. Samtidigt skiljer de sig avsevärt när de kommer till materialanvändning, konstruktion och installationsarbete vilket kan påverka den totala miljöpåverkan. Genom att inkludera flera livscykelsteg är det möjligt att identifiera vilka processer och material som bidrar mest till den totala påverkan (hotspots). Denna studie är baserad på generella svenska/europeiska förhållanden och är inte platsspecifik vilket innebär att resultaten speglar typiska landbaserade vindkraftsverk inom dessa områden.

3.2 Funktionell enhet

I denna studie definieras den funktionella enheten enligt fundamentens likvärdiga syfte och funktion, att möjliggöra stabil drift av ett landbaserat vindkraftsverk genom att överföra de horisontala krafterna som vindkraftverket belastas av till marken. Den funktionella enheten definieras därav till ”fundament som möjliggör stabil drift av ett landbaserat vindkraftverk under en livslängd på 25 år”. För att jämförelse mellan de olika fundamenttyperna ska vara möjligt antas båda fundamenten upprätthålla samma vindkraftsverk. Vilket i denna studie är modellen Vestas V136 med en installerad effekt på 4,2 MW då den representerar ett modernt och vanligt förekommande vindkraftverk (Svensk Vindenergi 2025). Koppling till vindkraftverkens elproduktion inkluderas inte i den funktionella enheten då denna studie enskilt tittar på fundamentens egentliga syfte och inte hela vindkraftverkets. En mindre analys där koldioxidåterbetalningstiden beräknas utförs dock med hjälp av en antagen elproduktion. Då den funktionella enheten beskriver ett fundament totala miljöpåverkan är det speglat i alla resultat vilket innebär att jämförelse mellan fundamenttyperna är möjligt. Behovet av en kontinuerlig koppling till den funktionella enheten under studiens gång är därav inte ansedd som nödvändig.

3.3 Systemgränser

I denna studie är systemgränserna definierade som cradle-to-grave, vilket innebär att fundamentens hela livscykel inkluderas, från råmaterialutvinning till sluthantering. I denna studie omfattar det materialutvinning till, och produktion av betong, armeringsstål, konstruktionsstål, fogmassa och övriga material som ingår i produktionen av fundamenten. Vidare inkluderas transporter av material till installationsplatsen, energianvändning vid installation samt sluthantering av material vid livscykelns slut (End-of-Life, EoL), såsom återvinning av stål och deponering av betong. Användningsfasen, alltså efter färdig installation till sluthantering av fundamenten exkluderas från studien då fundamenten i detta stadi inte kräver någon energi och möjlig miljöpåverkan från exempelvis underhåll antas vara försumbart jämfört med de andra livscykelstegen. Systemgränserna är alltså sammanfattningsvis valda för att fånga livscykelstegen som förväntas bidra till störst påverkan samtidigt de minst betydelsefulla delarna exkluderas då de antagningsvis inte påverkar det slutgiltiga resultatet något nämnvärt. Figur 4 visar livscykelstegen och systemgränsen.



Figur 4. Översikt av studiens systemgränser och de inkluderade livscykelstegen för gravitationsfundament och bergsförankrade fundament.

3.4 Livscykelinventering (LCI)

Syftet med livscykelinventeringen var att identifiera och kvantifiera material- och energiåtgångarna som ingick i de två studerade fundamentens livscyklar. För att säkerställa att livscykelinventeringen skedde på ett så ingående sätt som möjligt samtidigt som den är fullständigt utförd genomfördes den i två steg. Först genom inläsning, insamling och sammanställning av tekniska data för de två fundamenttyperna och därefter genom modellering i SimaPro med dataset frånecoinvent.

3.4.1 Datainsamling och teknisk sammanställning

För att slutgiltiga inventeringsdata skulle kunna fastställas genomfördes inledningsvis en sammanställning av de två fundamenttypernas konstruktion och uppbyggnad. Tekniska beskrivningar, vetenskapliga artiklar och olika rapporter användes för att identifiera alla ingående komponenter och olika flöden. Exempelvis betong och dess möjliga volym, mängd armeringsstål kontra vanligt stål, transportsträckor och installationsprocesser. Den insamlade data och informationen sammanställdes i ett kalkylblad i programvaran Excel där alla nödvändiga materialmängder, volymer, densiteter och övriga parametrar fastställdes inför modellering i SimaPro.

3.4.2 Fullständig inventering (material)

Tabell 1 sammanfattar alla materialparametrar som utnyttjades vid modellering av gravitationsfundamentet och det bergsförankrade fundamentet i SimaPro. Inventeringsdata baserades på en kombination av konstruktionsunderlag och vetenskaplig litteratur i de fall där direkta värden och data hittades. För parametrar där fullständiga mass- och volymuppgifter saknades genomfördes även kompletterade beräkningar baserade på exempelvis antaganden kring exempelvis byggnationen och densiteter.

Betongtyp

Båda fundamenttyperna modellerades med betongtypen C35/45 CEM II/B, då denna betongklass identifierades som representativ för moderna landbaserade vindkraftsfundament i en svensk kontext (Magnusson & Mathern 2022). Valet av CEM II/B motiverades även av att den innehåller en mindre mängd klinker än traditionell portlandcement vilket ger bättre representation av dagens klimatförbättrade betong (Sánchez et al. 2021).

Betongvolym

Betongvolymen för gravitationsfundamentet valdes som 550 m³ vilket motsvarar volymen som krävdes till gravitationsfundament enligt Magnusson och Mathern (2022) med en diameter på 21 m och höjd på 2,3 m. För det bergsförankrade fundamentet valdes en betongvolym på 30 m³ baserat på uppgifter från Windtech international-artikeln ”Modelling Rock Adapter Foundations” av Gimeno (2022) där betongvolymen för denna fundamenttyp beskrivs variera mellan 20-40 m³ för större landbaserade vindkraftsverk och geotekniska förhållanden. 30 m³ anses därför representera ett rimligt mellanvärde för denna studie.

Betongdensitet

Betongdensiteten sattes till 2 240 kg/m³ för båda fundamenttyperna. Värdet är baserat på densiteten i det använda betongdatasetet från ecoinvent v.3 och visas i tabell 1. Densiteten används vid omvandling mellan volym och massa.

Armeringsstål

Mängden armeringsstål sattes till 85 kg/m³ betong för båda fundamenttyperna baserat på referensvärden för betongfundament där typiska nivåer för fundament anges som 90-130 kg/m³ betong (One Click LCA 2025). Det något lägre värdet på 85 kg/m³ valdes i denna studie som ett konservativt antagande kring de studerade fundamentkonstruktionerna.

$$m_{\text{armeringsstål}} = V_{\text{betong}} * \rho_{\text{Armeringstål}} \quad (1)$$

För gravitationsfundamentet beräknades detta enligt ekvation (1) som:

$$m_{\text{armeringsstål}} = 550 \text{ m}^3 * 85 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{armeringsstål}} = 46\,750 \text{ kg}$$

På samma sätt beräknades mängden för det bergsförankrade fundamentet:

$$m_{\text{armeringsstål}} = 30 \text{ m}^3 * 85 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{armeringsstål}} = 2\,550 \text{ kg}$$

Konstruktionsstål

För gravitationsfundamentet uppskattades massan av bultkorgen till 12 000 kg baserat på tekniska beskrivningar där en bultkorg beskrivs innehålla flera hundra förankringsbultar med en vikt på 50 kg vardera (Energy Source & Distribution 2022). För denna studie har då 200 bultar valts vilket innebär en vikt på 10 000

kg. Utöver bultarnas massa inkluderades även uppskattad mängd stål i toppringen och bottenringen på 1 000 kg styck för att representera hela bultkorgen.

För det bergsförankrade fundamentet uppskattades konstruktionsstålet till cirka 31 000 kg. Denna uppskattning är baserad på tekniska beskrivningar där bergankare anges vara 12 meter långa (Proplate u.å.b). Ankarnas massa uppskattades genom antagandet att ankarnas stålkonstruktion, diameter och densitet var samma som för förankringsbultarna som användes för gravitationsfundamentet. Eftersom ankarna beskrivs som 3 gånger så långa, 12 meter jämfört med 4 meter, uppskattades även massan till ungefär tre gånger högre per använd komponent. Detta innebär en förenkling då andra eventuella skillnader i dimensioner inte tas i hänsyn till. Samma antal ankare antogs som förankringsbultar för gravitationsfundamentet för att på så sätt representera en liknande cirkulär lastfördelning för tornet. Stålingen antogs på ett liknande sätt som för gravitationsfundamentet väga 1 000 kg vilket därmed innebär den totala vikten på 31 000 kg konstruktionsstål.

Avjämningsbetong

Under gravitationsfundamentet modellerades ett lager avjämningsbetong för att skapa en stabil yta för gjutning av huvudfundamentet. Inga exakta mängduppgifter identifierades och därmed uppskattades volymen genom geometriska antaganden baserade på fundamentets dimensioner. Enligt Magnusson & Mathern (2022) gjuts fundamentet ovanpå ett lager på cirka 500 mm krossad sten och ett lager av avjämningsbetong. I denna studie antogs en lagertjocklek på 0,1 m. Då fundamentets fullständiga geometri inte var specificerad i detalj antogs fundamentet ha en cirkulär planform för denna parameter. Fundamentets radie uppskattades utifrån fundamentvolymen på 550 m³ och dess höjd på 2,3 m enligt ekvation (2). Samma betongdataset antogs som för den tidigare beskrivna betongen som hittas i tabell 1.

$$r = \sqrt{\frac{550 \text{ m}^3}{\pi * 2,3 \text{ m}}} \quad (2)$$

$$r \approx 8,7 \text{ m}$$

Volymen avjämningsbetong uppskattades därefter enligt ekvation (3)

$$V_{\text{avjämningsbetong}} = \pi * (8,7 \text{ m})^2 * 0,1 \text{ m} \quad (3)$$

$$V_{\text{avjämningsbetong}} = 24,2 \text{ m}^3$$

Med en densitet på $2\,240\text{ kg/m}^3$ innebar detta totalt cirka $54\,200\text{ kg}$ avjämningsbetong i modelleringen för gravitationsfundamentet enligt ekvation (4)

$$m_{\text{avjämningsbetong}} = 2\,240\text{ kg/m}^3 * 24,2\text{ m}^3 \quad (4)$$

$$m_{\text{avjämningsbetong}} = 54\,208\text{ kg}$$

Krossad sten

Utöver avjämningsbetongen är ett lager på 500 mm ($0,5\text{ m}$) krossad sten inkluderat under fundamentet baserat på beskrivningar i Magnusson & Mathern (2022). Volymen för den krossade stenen uppskattades utifrån samma fundamentradie som användes för avjämningsbetongen enligt ekvation (5).

$$V_{\text{Krossad sten}} = \pi * (8,7\text{ m})^2 * 0,5\text{ m} \quad (5)$$

$$V_{\text{Krossad sten}} = 120,8\text{ m}^3$$

Massan beräknades därefter enligt ekvation (6) med hjälp av en antagen densitet på krossad sten på $1\,700\text{ kg/m}^3$ baserat på specifikationer från SSAB (u.å.).

$$m_{\text{Krossad sten}} = 1\,700\text{ kg/m}^3 * 120,8\text{ m}^3 \quad (6)$$

$$m_{\text{Krossad sten}} = 205\,360\text{ kg}$$

Fogmassa

För det bergsförankrade fundament inkluderades även 10 m^3 cementbaserad fogmassa för stabilisering av bergankarna i marken. Eftersom uppgifter om rimlig mängd hittades inte uppskattades volymen utifrån antalet bergankare. Materialet modellerades med samma betongdataset som för huvudfundamentet då det också är cementbaserat material och då med liknande antagna produktionsprocesser.

Tabell 1. Sammanställning av parametrar och data kopplade till materialprocesser vid modellering av gravitationsfundament och bergsförankrat fundament i SimaPro. Samtliga dataset hämtades från ecoinvent v.3.

Parameter	Gravitations fundament	Bergsförankrat fundament	Dataset från ecoinvent v.3
Betongtyp	C35/45 CEM II/B	C35/45 CEM II/B	Concrete, 35MPa {GLO} concrete production, 35MPa, with cement, CEM II/B Cut-off, U
Betongvolym (m ³)	550	30	Concrete, 35MPa {GLO} concrete production, 35MPa, with cement, CEM II/B Cut-off, U
Betongdensitet (kg/m ³)	2 240	2 240	Concrete, 35MPa {GLO} concrete production, 35MPa, with cement, CEM II/B Cut-off, U
Armeringsstål (kg/m ³)	85	85	Reinforcing steel {Europe without Austria} reinforcing steel production Cut-off, U
Armeringsstål (kg)	46 750	2 550	Reinforcing steel {Europe without Austria} reinforcing steel production Cut-off, U
Konstruktionsstål (kg)	12 000	31 000	Steel, low-alloyed {Europe without Switzerland and Austria} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U
Avjämningsbetong (kg)	54 432	-	Concrete, 35MPa {GLO} concrete production, 35MPa, with cement, CEM II/B Cut-off, U
Krossad sten (kg)	205 360	-	Gravel, crushed {RoW} market for gravel, crushed Cut-off, U
Fogmassa (m ³)	-	10	Concrete, 35MPa {GLO} concrete production, 35MPa, with cement, CEM II/B Cut-off, U

3.4.3 Fullständig inventering (processer)

Tabell 2 innehåller de processrelaterade parametrar som inkluderades i modellerna för fundamenten. Detta inkluderar processer som transporter, arbete innan och under installation och sluthantering (EoL). Använd data är baserad på en kombination av beskrivande texter, dataset från ecoinvent samt uppskattningar och antaganden.

Transport

För samtliga transporter användes datasetet för en lastbil på 16-32 ton i generella europeiska förhållanden, vilket visas i tabell 2. Datasetet ansågs som representativt för tung last inom Europa för byggmaterial.

Transportavstånden uppskattades utifrån antagna produktionsplatser för respektive material: Betong, krossad sten och stål. Betong och den krossade stenen antogs produceras relativt nära den generiska installationsplatsen och därav

tilldelades ett transportavstånd 25 km. Detta bedömdes vara rimligt då betong ofta produceras i lokala anläggningar. Tidigare studier har även använt liknande schablonavstånd, exempelvis 30 km för betongtransporter (Cai et al. 2025).

Stål antogs transporteras längre avstånd eftersom produktionen är mindre utspridd än produktionen av ballastmaterial. Avståndet sattes därför till 200 km. Detta ligger i samma storleksordning som tidigare studier där transportavstånd på 150 km använts (Cai et al. 2025). Transporten beräknades genom att multiplicera materialets massa med transportavståndet då dataseten är beskrivna med enheten kgkm.

Installation och markarbete

Inom denna kategori ingår schaktning, förberedande arbete, hantering av krossad sten och avjämningsbetong, installation av armering, bultkorg och bergankare men även gjutning. Enligt JIITEE TYÖT (2025) kan konstruktionstiden för fundamenten variera från 2-4 veckor för standardfundament till 6-8 veckor för komplexa förankrade lösningar.

Då detaljerade uppgifter om maskin användning och energiförbrukning saknades uppskattades allt arbete förutom utgrävningen som energi kopplat till den uppskattade dieselåtgången utifrån generella bränsleförbrukningsvärden hos byggmaskiner. Tidigare studier anger exempelvis bränsleförbrukning för byggmaskiner till 14-15 L diesel per timme (Maar & Seifermann 2023). Därför antogs en total dieselåtgång på 1 500 L för gravitationsfundamentet och 1 000 L för det bergsförankrade fundamentet. Detta motsvarar ungefär 100 arbetstimmar för gravitationsfundamentet och runt 70 timmar för det bergsförankrade exklusive väntetider osv. Det högre värdet hos gravitationsfundamentet motiverades av den större schaktvolymen, större betongvolymen samt den mer omfattande installationsprocessen. Schaktvolymen och utgrävningsarbetet för gravitationsfundamentet uppskattades till 960 m³ baserat på fundamentens geometri och användningen av krossad sten och avjämningsbetong enligt ekvation (7):

$$V_{Schakt} = \pi(r + 1,5 m)^2 * (h + 0,5 m + 0,1 m) \quad (7)$$

Där R uppskattas som 8,7 m enligt tidigare beräkningar, H som 2,3 m som tidigare beskrivet, antagen arbetsmån runt fundamentet på 1,5 m, ett lager krossad sten på 0,5 m och ett lager avjämningsbetong på 0,1 m

$$V_{Schakt} = 960 m^3$$

Denna uppskattning modellerades enligt datasetet som användes för utgrävning, visat i tabell 2.

Sluthantering (EoL)

För sluthantering modellerades slutscenarion för både stål och betong. För stålet antogs 95% materialåtervinning vid fundamentens slutskede medan resterande 5% antogs deponeras. Detta baseras på tidigare studier där återvinningsgrader för stål ligger på 95% vid End-of-Life (Walker et al. 2018).

För betongen antogs ingen materialåtervinning till ny betongprodukt efter sluthantering då betong är svårt att återvinna till produkter av motsvarande kvalitet (Walker et al. 2018). Betong deponeras i de flesta fallen. I praktiken kan betong användas som exempelvis ballastmaterial osv. Något som inte inkluderades i denna studie.

Sluthantering modellerades i SimaPro med avfalls- och återvinningsdataset från ecoinvent. Då ecoinvent i detta fall använder cut-off-metoden tilldelas inte fundamentmodellerna några krediter för sin återvinning.

Tabell 2. Sammanställning av parametrar och data kopplade till transport, installations och sluthanteringsprocesser vid modellering av gravitationsfundament och bergsförankrat fundament i SimaPro. Samtliga dataset hämtades från ecoinvent v.3.

Parameter	Gravitations fundament	Bergsförankrat fundament	Dataset från ecoinvent v.3
Lastbilstyp	EURO 6, diesel, 16-32 metriska ton	EURO 6, diesel, 16-32 metriska ton	Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 {RER} transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 Cut-off, U
Transport stål (km)	200	200	Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 {RER} transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 Cut-off, U
Transport betong (km)	25	25	Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 {RER} transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 Cut-off, U
Transport krossad sten (km)	25	25	Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 {RER} transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 Cut-off, U
Utgrävning (m ³)	960	-	Excavation, hydraulic digger {RER} excavation, hydraulic digger Cut-off, U
Resterande installationsarbete i form av energi från använd diesel (liter)	1500	1000	Diesel, burned in building machine {GLO} diesel, burned in building machine Cut-off, U
EoL betong (%)	0	0	Studiespecifikt skapade processer
EoL Stål (%)	95	95	Studiespecifikt skapade processer

3.4.4 Modellering i SimaPro

Efter att inventeringsdata var fastställt för material-, transport-, installations- och sluthanteringsprocesser implementerades de två fundamentmodellerna i SimaPro. Två separata modeller skapades, en för gravitationsfundament, och en för bergsförankrade fundament. Båda fundamenten modellerades som en sammansatt process där det mest representativa datasetet inom ecoinvent för de olika parametrarna valdes och där data från inventeringsunderlaget som visas i tabell 1 och 2 överfördes till respektive modell med de enheter som användes eller beskrevs i inventeringsunderlaget, exempelvis volymbaserade inflöden för betong

och fogmassa men massbaserade för stålkomponenterna och annat material. För varje material och process valdes det dataset i ecoinvent som bedömdes bäst representera de verkliga materialen och processerna inom respektive fundament. De viktigaste faktorerna som togs i akt vid val av dataset var dess lokalisering, utbredning och uppbyggnad. Efter modellerna var kompletta med samtliga material- och processflöden kunde de analyseras inför den efterföljande miljöpåverkanbedömningen.

3.4.5 Sluthantering (EoL)

Sluthanteringen för fundamenten behövde modelleras separat i SimaPro då lämpliga End-of-Life (EoL) processer inte gick att implementera med volymbaserade inflöden då dessa inte räknades med i sluthanteringen för den initiala modellen. Separata End-of-Life processer skapades med en funktionell enhet på 1 kg för de berörda materialflödena. För betong skapades en process där 1 kg betong kopplades till deponering som inert material och för stålkomponenterna skapades separata processer för återvinning respektive slutdeponering. Inom de nya skapade processerna är dataset som beskriver slutgiltig transport för materialet också med. Stålkomponenterna modellerades med antagandet att 95% av materialet återvinns medan resterande 5% slutdeponeras. De framtagna processerna skalades därefter upp till de faktiska materielmängderna från inventeringsunderlaget. Då systemmodellen för ecoinvent var allocation, cut-off innebär det att potentiella miljövinster från sluthanteringen tilldelas efterföljande produkt och räknas därmed inte som positivt för dessa fundament.

3.5 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)

Efter livscykelinventeringen (LCI) var slutförd genomfördes miljöpåverkansbedömningen (life cycle impact assessment, LCIA) för att omvandla inventeringsdata till potentiell miljöpåverkan inom valda miljöpåverkanskategorier. Analysen skedde i SimaPro, där samtliga flöden från de två modellerade fundamenten klassificerades och karaktäriserades automatiskt enligt vald LCIA metod. Framtagna resultat användes sedan för att jämföra fundamentens miljöpåverkan samt identifiera de dominerade processerna som stod för högst påverkan.

3.5.1 Val av LCIA metod

LCIA metoden som användes för att beräkna fundamentens totala miljöpåverkan utifrån deras utsläpp under deras livscykel var ReCiPe 2016 mid-point (H). ReCiPe 2016 anses som en av de främsta och mest etablerade LCIA metoderna tack vare sitt breda användningsområde, inkluderingen av karaktäriseringsfaktorer

för både mid- och endpoint indikatorer samt inom kategorin för klimatpåverkan ingår alla växthusgaser beskrivna i Kyoto protokollet (Atescan-Yukse et al. 2024). I studien används midpoint-indikatorer då de generellt sett anses innebära lägre osäkerhet än endpoint-indikatorer då mindre antaganden hinner göras i orsakskedjan fram till slutgiltig bedömning (SimaPro u.å.). Hierarkistperspektivet (H) används då detta representerar de främsta riktlinjerna när det rör tidsperspektiv och andra problem (SimaPro 2025).

3.5.2 Val av miljöpåverkankategorier

För att beskriva fundamentens potentiella miljöpåverkan valdes fem miljöpåverkanskategorier ut inom ReCiPe 2016 midpoint (H). Klimatpåverkan (global warming), försurning (terrestrial acidification), övergödning (freshwater eutrophication), cancerframkallande ämnen (human carcinogenic toxicity) och markanvändning (land use).

Klimatpåverkan valdes då utsläpp av växthusgaser ofta är en väsentlig del i analyser av byggmaterial och energisystem. Speciellt för material som betong och stål som båda fundamenttyperna innehåller mycket av. Försurning och övergödning inkluderades då utsläpp av exempelvis svaveldioxid (SO₂), kväveföreningar (NO_x) och ammoniak (NH₃) från produktion och transporter kan bidra till miljöpåverkan av denna typ.

Markanvändning inkluderades för att fånga indirekta effekter kopplade till materialutvinning, markarbeten och resursanvändning under fundamentens livscykel. Cancerframkallande ämnen inkluderades för att identifiera potentiella målkonflikter mellan fundamenttyperna. Tillsammans bedömdes dessa kategorier ge en representativ och bred bild av fundamentens miljöpåverkan.

3.5.3 Klassificering och karaktärisering

Efter fundamentens livscyklar var modellerade i SimaPro genomfördes de obligatoriska LCIA momenten, klassificering och karaktärisering med hjälp av metoden ReCiPe 2016. Inom klassificeringen kopplade fundamentens inventerade data och flöden automatiskt till de relevanta miljöpåverkankategorierna inom ReCiPe 2016.

3.5.4 Normalisering och viktning

De frivilliga momenten inom LCIA delen av en LCA analys, normalisering och viktning, genomfördes inte i denna studie. Fokus låg på de karaktäriserade midpoint resultaten enligt ReCiPe 2016 i SimaPro vilket möjliggjorde att en direkt jämförelse mellan fundamenten kunde ske utan behov av dessa frivilliga moment. Normalisering hade möjligtvis kunnat användas för att sätta resultaten i relation

och i större perspektiv men då studiens syfte inte kräver någon sådan typ av analys bedömdes det som inte nödvändigt.

3.6 Tolkning av resultat

Efter miljöpåverkansbedömningen var genomförd tolkades resultaten i enlighet med ISO 14040 och ISO 14044 för att identifiera de största miljöpåverkanfaktorerna i systemen, bedöma modellens robusthet med hjälp av känslighetsanalyser och för att till slut kunna besvara studiens frågeställningar.

3.6.1 Bearbetning av resultat och hot-spot analys

Resultaten analyserades genom jämförelse och genom enskild analys av de två fundamenttypernas totala miljöpåverkan inom de utvalda miljöpåverkankategorierna. För identifikation av de största bidragande faktorerna till den potentiella miljöpåverkan genomfördes hot-spot analyser med den beräknade data från SimaPro där enskilda material och processer relativa påverkan analyserades.

3.6.2 Koldioxidåterbetalningstid

För att sätta fundamentens klimatpåverkan i perspektiv utfördes en kompletterande analys av deras koldioxidåterbetalningstid. Vindkraftverket antas installeras på de modellerade fundamenten och har en kapacitetsfaktor på 35% baserat på info från Vattenfall (Vattenfall u.å.). I denna analys ersätter den producerade elektriciteten från turbinen el från den nordiska elmixen som har en klimatpåverkan på 90 g CO₂-ekvivalenter/KWh (Sandgren & Nilsson 2021) Ekvation 8-9 visar de använda uträkningarna.

Den årliga elproduktionen för vindkraftverket beräknas enligt ekvation (8):

$$\begin{aligned} 4,2 \text{ MW} * 8\,760 \text{ h} * 0,35 &= 12\,877,2 \text{ MWh/år} \\ &= 12\,877\,200 \text{ KWh/år} \end{aligned} \quad (8)$$

Den undvikna klimatpåverkan som vindkraftverket ersätter från den nordiska elmixen beräknas enligt ekvation (9):

$$12\,877\,200 \text{ Kwh/år} * 0,09 \text{ kg CO}_2\text{e/år} = 1\,158\,948 \text{ kg CO}_2\text{e/år} \quad (9)$$

Där till sist koldioxidåterbetalningstiden beräknas enligt ekvation (10)

$$\text{Koldioxidåterbetalningstid} = \frac{\text{Koldioxidutsläpp}}{\text{Årlig nettominskning av koldioxid}} \quad (10)$$

3.6.3 Känslighetsanalys

Tre separata känslighetsanalyser genomfördes för att analysera hur känsliga resultatet var för olika förändringar från basfallet

I den första analysen var fokus på materialval där den använda C35/45-betongen ersattes med klimatförbättrad ECO-betong från Swerock som ska ha hälften så stor klimatpåverkan jämfört med den tidigare använda betongen (SWEROCK u.å.). Analysen syftade till att undersöka kring hur resultaten förändrades av minskad påverkan från betongproduktionen.

Den andra känslighetsanalysen fokuserade på transportmodelleringen där basfallets transportprocesser från ecoinvent i SimaPro ersattes med nya, platspecifika transportprocesser, framtagna i NTMcalc. Scenariot baserades på uppskattade materialleverantörer och geografiska avstånd kopplat till information i magasinet vindkraft med information om vindpark Åby-Alebo (Stena Renewable 2020). I detta scenario antogs det att båda fundamenttyperna installerades på platsen.

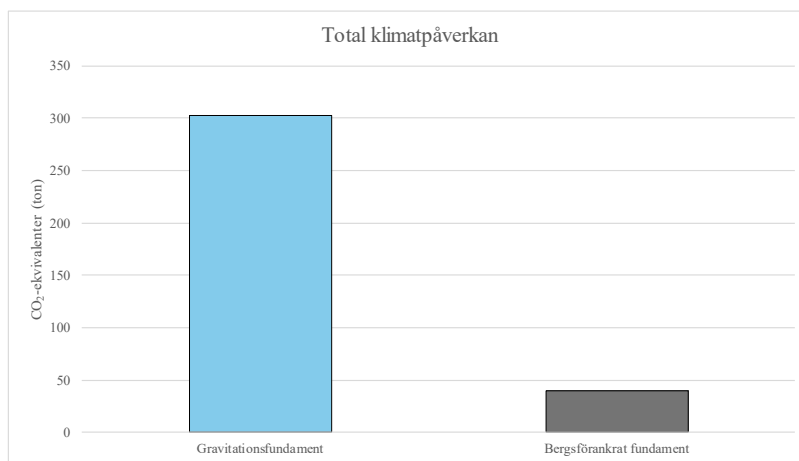
I den tredje och sista känslighetsanalysen undersöktes hur variationer i de inventerade materialmängderna påverkade resultaten. I analysen varierades mängden betong och stål med $\pm 20\%$ för båda fundamenttyperna. Detta inkluderade då även tillhörande transport- och sluthanteringsprocesser.

4. Resultat

Efter att modellerna simulerades i SimaPro och slutgiltig miljöpåverkan beräknades för båda fundamenttyperna sammanställdes dessa resultat för vidare analys i detta kapitel. Först presenteras den totala klimatpåverkan för de olika fundamenten. Därefter följer en jämförelse i övriga utvalda miljöpåverkankategorier. Utöver detta presenteras hotspotanalyser för att identifiera vilka material och processer som bidrog mest till den totala påverkan och därigenom öppna möjligheten för att besvara studiens frågeställningar. Slutligen redovisas även kategorier där resultaten avvek från det övergripande mönstret, vilket är att gravitationsfundament har en högre påverkan, för att på så sätt identifiera eventuella målkonflikter mellan fundamenttyperna.

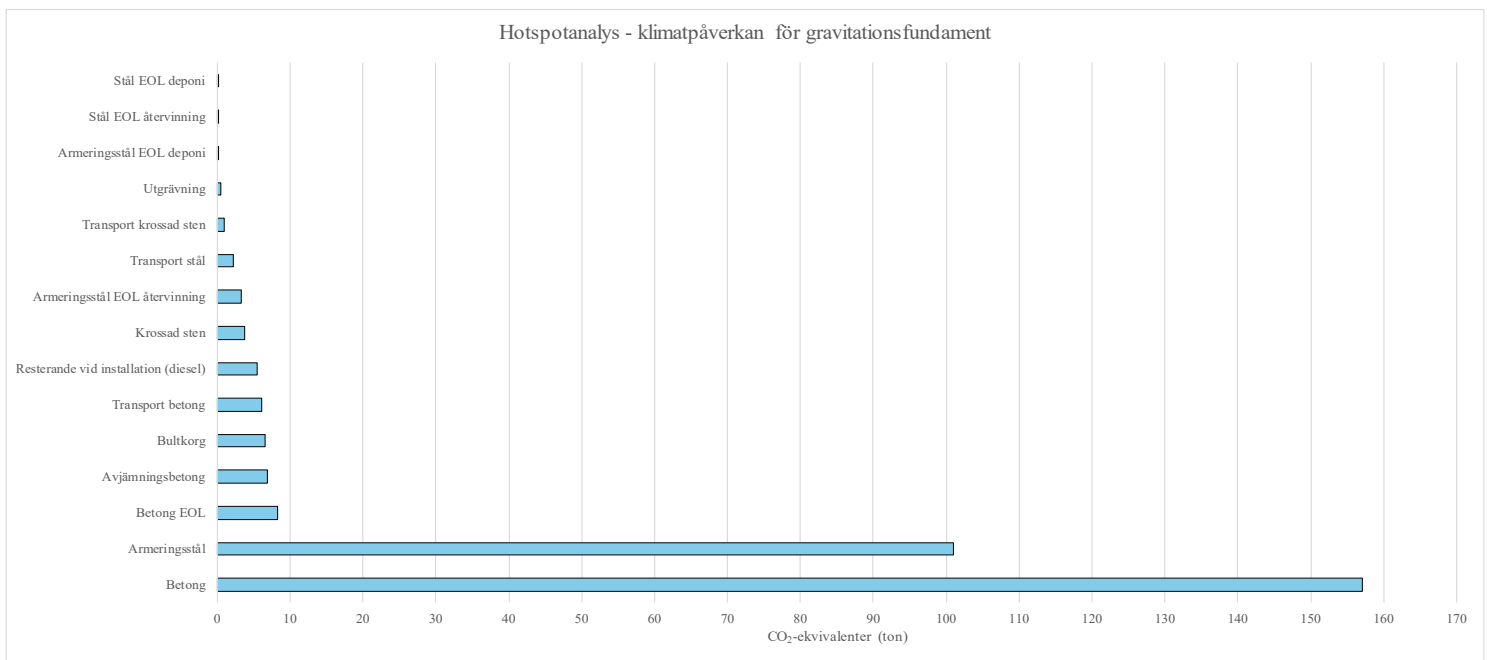
4.1 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)

Figur 5 visar den totala klimatpåverkan för de två analyserade fundamenttyperna. Gravitationsfundamentet uppvisade en total klimatpåverkan enligt ReCiPe 2016 midpoint (H) på cirka 303 ton CO₂-ekvivalenter medan för det motsvarande bergsförankrade fundamentet på cirka 40 ton CO₂-ekvivalenter, en skillnad på 87%. Hela nätverksträd med total klimatpåverkan visas i bilaga 1.



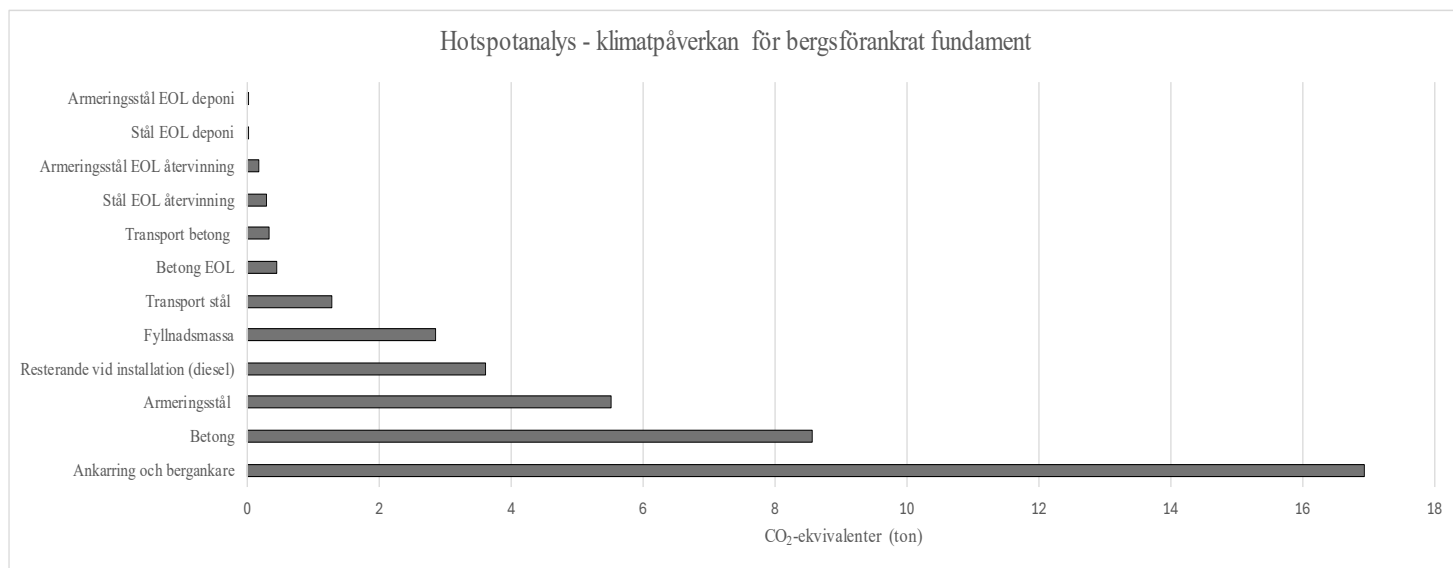
Figur 5. Total klimatpåverkan för gravitationsfundamentet och det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter över hela livscykeln.

Figur 6 visar hotspotanalysen för gravitationsfundamentets klimatpåverkan uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter. Resultaten visar att betongproduktionen utgjorde det enskilt största bidraget med cirka 157 ton CO₂-ekvivalenter, därefter armeringsstål med cirka 101 ton CO₂-ekvivalenter. Tillsammans stod dessa material för huvuddelen av fundamentets totala klimatpåverkan med andelar på cirka 52% och 33% vardera av den totala klimatpåverkan på cirka 303 ton CO₂-ekvivalenter. Tillsammans alltså 85% av gravitationsfundamentets totala klimatpåverkan.



Figur 6. Hotspotanalys av klimatpåverkan för gravitationsfundamentet uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter för de inkluderande material- och processflödena över hela livsrymden.

Figur 7 visar hotspotanalysen för det bergsförankrade fundamentets klimatpåverkan. Figuren visar på att stålkomponenterna använda i ankarringen och bergankare utgör det enskilt största bidraget till utsläpp med närmare 17 ton CO₂-ekvivalenter. En andel på runt 42% av den totala klimatpåverkan. Därefter kommer betong med cirka 8 ton CO₂-ekvivalenter och armeringsstålet med cirka 5 ton CO₂-ekvivalenter. Transporter, installationsprocesser och sluthanteringsprocesser bidrog i betydligt mindre omfattning.



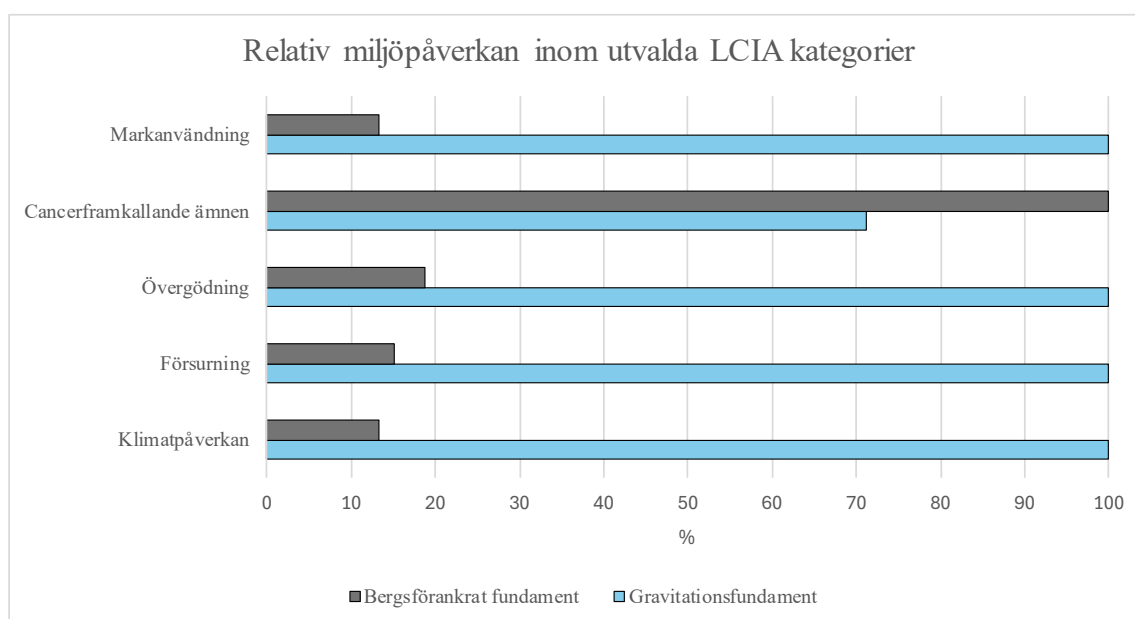
Figur 7. Hotspotanalys av klimatpåverkan för det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter för de inkluderande material- och processflödena över hela livsrymden.

Hotspotanalyserna visar att klimatpåverkan i både de studerade fundamenttyperna huvudsakligen dominerades av materialproduktion snarare än transporter och andra dylika processer. För gravitationsfundament dominerar främst betong och armeringsstål, medan stålkomponenterna dominerade i högre grad för det bergsförankrade fundamentet.

Tabell 3 och figur 8 visar resultaten för gravitationsfundamentet och det bergsförankrade fundamentet inom de fem utvalda miljöpåverkanskategorierna med absoluta värden i tabell 8 och relativa värden i figur 3 enligt ReCiPe 2016 midpoint (H). Resultaten visar på att det bergsförankrade fundamentet uppvisade lägre påverkan än gravitationsfundamentet inom fyra av de fem analyserade kategorierna. De största relativa skillnaderna observerades inom kategorierna för klimatpåverkan, förurning, övergödning och markanvändning, där det bergsförankrade fundamentet enbart uppvisade mellan 13-19% relativ påverkan av gravitationsfundamentets totala påverkan.

Tabell 3. Absoluta LCIA-resultat för båda fundamenttyperna inom de studerade miljöpåverkankategorierna.

Miljöpåverkankategori	Enhet	Gravitationsfundament	Bergsförankrat fundament
Klimatpåverkan	Kg CO ₂ -ekv	302 761,8	40 022,1
Försurning	Kg SO ₂ -ekv	714,8	108,3
Övergödning	Kg P-ekv	85,9	16
Cancerframkallande ämnen	Kg 1,4-DCB	723 798,9	1 017 529
Markanvändning	M _{2a} crop ekv	9 521,4	1 272,8



Figur 8. Relativ miljöpåverkan för de båda fundamenttyperna inom de studerade miljöpåverkankategorierna där gravitationsfundamentet är normaliserat som 100%.

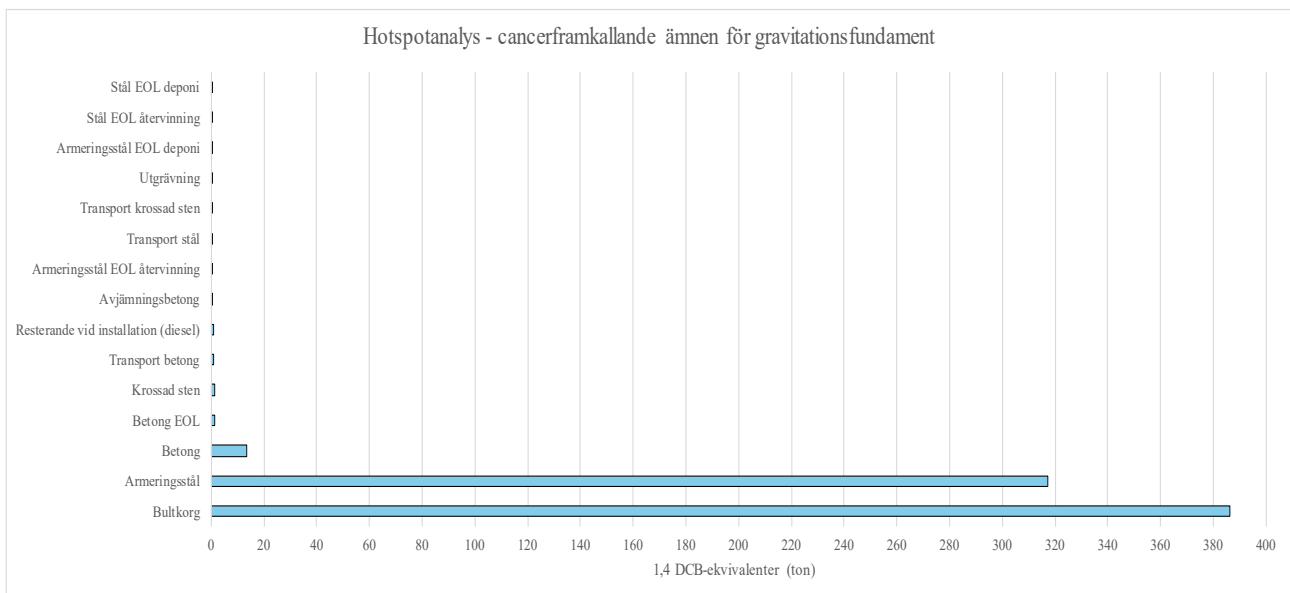
Utöver den tidigare beskrivna klimatpåverkan uppvisade gravitationsfundamentet en total försurningspåverkan på cirka 715 kg SO₂-ekvivalenter jämfört med endast 109 kg SO₂-ekvivalenter för det bergsförankrade fundamentet, en skillnad på cirka 85%. Liknande mönster gick att observera inom kategorierna för övergödning och markanvändning med värden för gravitationsfundamentet på 85,9 kg P-ekvivalenter samt en markanvändningspåverkan som motsvarar cirka 9 521 kvadratmeter/år i odlingsmarkekvivalenter. För det bergsförankrade

fundamentet låg dessa siffror på 16 kg P-ekvivalenter och 1 273 kvadratmeter/år i odlingsmarkekvivalenter. här på cirka 81% och 87%.

Ett avvikande resultat är det inom kategorin för cancerframkallande ämnen, där det bergsförankrade fundamentet uppvisade högre miljöpåverkan än gravitationsfundamentet. Resultatet uppgick till $1,02 \cdot 10^6$ kg 1,4 DCB-ekvivalenter för det bergsförankrade fundamentet jämfört med cirka $7,24 \cdot 10^5$ kg 1,4 DCB-ekvivalenter för gravitationsfundamentet.

Då det bergsförankrade fundamentet uppvisade högre miljöpåverkan inom kategorin för cancerframkallande toxicitet genomfördes en fördjupad hotspotanalys för båda fundamenttyperna inom denna kategori.

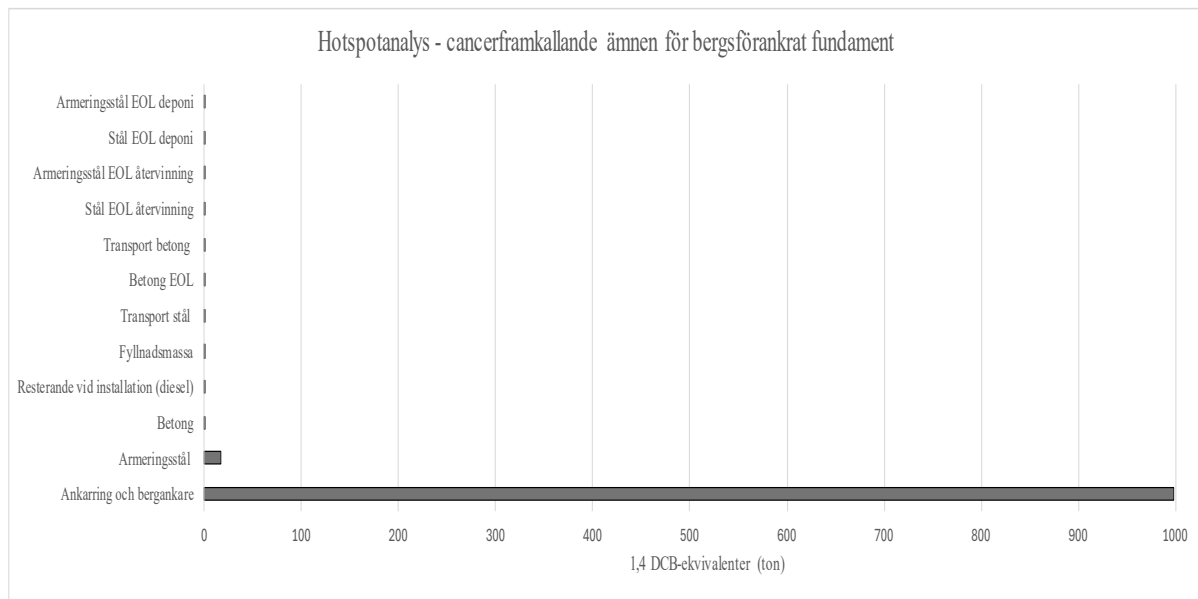
Figur 9 visar hotspotanalysen gjord för gravitationsfundamentet inom kategorin för utsläpp av cancerframkallande ämnen. Resultat visar på att påverkan dominerades nästan uteslutande av stålkomponenterna med bultkorgen som det största bidraget följt av armeringsstålet. Övriga material och andra processer bidrog endast marginellt.



Figur 9. Hotspotanalys med fördelning av påverkan inom kategorin för cancerframkallande ämnen för gravitationsfundamentet uttryckt i ton 1,4 DCB ekvivalenter.

Figur 10 visar den motsvarande hotspotanalysen inom kategorin för utsläpp av cancerframkallande ämnen men för det bergsförankrade fundamentet. Resultaten visar på att påverkan inom kategorin domineras i princip enbart av stålet kopplat

till ankarringen och bergankarna med värden på närmare 1 000 ton 1,4 DCB-ekvivalenter.



Figur 10. Hotspotanalys med fördelning av påverkan inom kategorin för cancerframkallande ämnen för det bergsförankrade fundamentet uttryckt i ton 1,4 DCB ekvivalenter.

Sammanfattningsvis visar resultaten att gravitationsfundamentet uppvisade högre miljöpåverkan än det bergsförankrade fundamentet i fyra av de fem analyserade miljöpåverkankategorierna. De största relativa skillnaderna gick att observera inom kategorierna för klimatpåverkan, försurning, övergödning och markanvändning med reduktioner på 13-19%. Det tydligt avvikande resultatet uppvisades dock inom kategorin för cancerframkallande ämnen där det bergsförankrade fundamentet i stället visade en större påverkan. Analys av hela flödet visar att de högre utsläppen av dessa ämnen är kopplat till stålproduktionen och främst processer relaterade till ljusbågsugnar.

4.2 Koldioxidåterbetalningstid

Koldioxidåterbetalningstiden beräknades för båda fundamenttyperna visas i tabell 4 och räknades ut enligt ekvation (10) med den klimatpåverkan vindkraftsverket ersätter i ekvation (9) och total klimatpåverkan beräknat i SimaPro. Värdena i täljarna är de simulerade värdena för klimatpåverkan, tidigare visat i tabell 3.

$$Koldioxidåterbetalningstid_{Gravitation} = \frac{302\,761\text{ kg CO}_2e}{1\,158\,948\text{ kg CO}_2e/\text{år}}$$

$$Koldioxidåterbetalningstid_{Gravitation} = 0,26\text{ år} = 95\text{ dagar}$$

$$Koldioxidåterbetalningstid_{Bergsförankrat} = \frac{40\,022\text{ kg CO}_2e}{1\,158\,948\text{ kg CO}_2e/\text{år}}$$

$$Koldioxidåterbetalningstid_{Bergsförankrat} = 0,035\text{ år} = 13\text{ dagar}$$

Tabell 4. Sammanställning av koldioxidåterbetalningstiden i år och dagar för båda fundamenttyperna.

Fundament	Koldioxidåterbetalningstid
Gravitationsfundament	0,26 år = 95 dagar
Bergsförankrat fundament	0,035 år = 13 dagar

Utsläpp kopplade till fundamentens livcyklar är återbetalda klimatomkostnader efter 95 respektive 13 dagar.

4.3 Känslighetsanalys

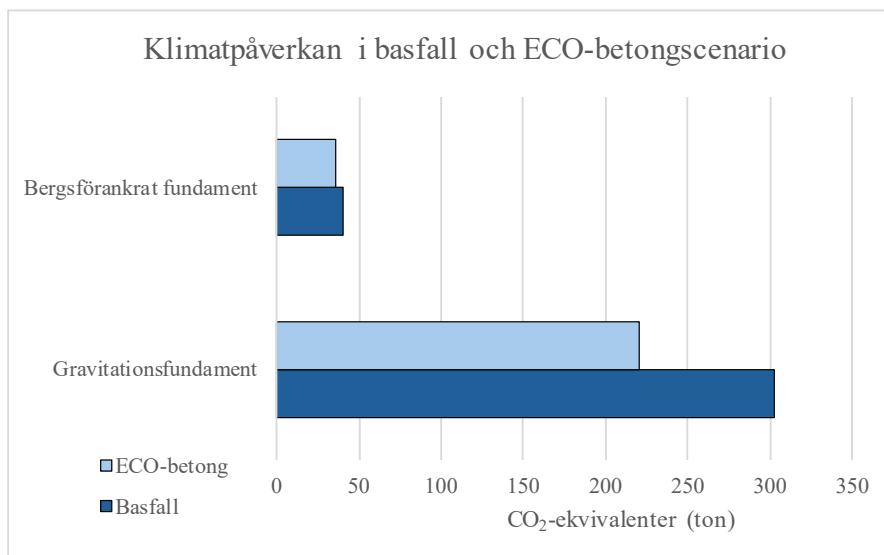
För att undersöka resultatens robusthet och studiens antaganden genomfördes ett par känslighetsanalyser för utvalda parametrar inom specifika kategorier där det fanns potential för stor förändring inom resultaten. Känslighetsanalyserna i denna studie fokuserade på materialval, transportmodellering och osäkerheter i inventerade materielmängder. Syftet var att undersöka hur förändringar i dessa centrala parametrar påverkade fundamentens påverkan och om det blev någon förändring i de huvudsakliga resultaten.

4.3.1 ECO-betong

Då resultaten visade på att betong är en dominerande hotspot, särskilt för gravitationsfundament, genomfördes därför en känslighetsanalys där modellen uppdaterades för båda fundamenttyperna med ett nytt scenario där klimatförbättrad betong användes. Scenariot är baserat på uppgifterna från Swerock som menar på att deras ECO-betong reducerar klimatpåverkan med upp till 50% samtidigt som det funkar för alla betongklasser. Detta är egna uppgifter från företaget och måste därför beaktas som något osäkra. För att implementera

detta reducerades klimatpåverkan från betongproduktionen i modellerna genom att multiplicera materialmängderna med en faktor på 0,5 för att på så sätt simulera denna minskad påverkan på klimatet. Övriga processer och hanteringsscenarion lämnades oförändrade.

Figur 11 visar resultaten från känslighetsanalysen. Ersättandet av den vanliga C35/45 betongen till ECO-betongen med mindre klimatpåverkan reducerade klimatpåverkan för båda fundamenttyperna. För gravitationsfundamentet minskade den totala påverkan från cirka 303 ton CO₂-ekvivalenter till närmare 221 ton CO₂-ekvivalenter, vilket motsvarar en minskning på 27%. För det bergsförankrade fundamentet minskade den totala påverkan från cirka 40 ton CO₂-ekvivalenter till 35,7 ton CO₂-ekvivalenter. Vilket ger en minskning på 11%. Trots den större mängden betong som används i gravitationsfundamentet kvarstod det bergsförankrade fundamentet som alternativet med lägst klimatpåverkan.



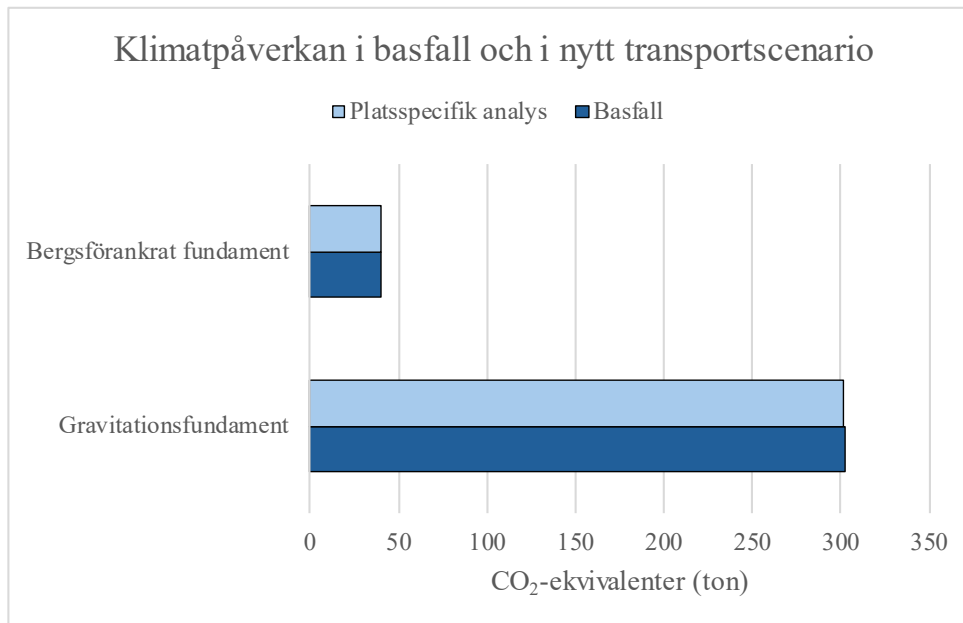
Figur 11. Jämförelse av klimatpåverkan mellan basfallet och ett scenario där betongen enbart står för hälften av sin typiska påverkan. Uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter.

4.3.2 Platsspecifik transportmodellering för vindpark Åby-Alebo

Den andra känslighetsanalysen fokuserades på transportmodelleringen, där generiska transportprocesser från SimaPro och ecoinvent ersattes med platsspecifika transportberäkningar framtagna i NTMcalc.

Figur 12 visar resultaten för klimatpåverkan från simulering av den platsspecifika känslighetsanalysen där befintliga transportprocesser i basfallet ersattes med transportberäkningar som är baserade på verkliga materialproducenter och geografiska avstånd. Den totala klimatpåverkan påverkades enbart marginellt för

de båda fundamenttyperna. För gravitationsfundamentet minskade den från 302,8 ton till 301 016 kg CO₂-ekvivalenter och för det bergsförankrade fundamentet minskade den från 40 022 till 39 962 kg CO₂-ekvivalenter. Minskningar på enbart 0,6 respektive 0,2%. Resultaten påpekar därmed alltså att modellens transportantagande kan anses som robusta och att resultaten skiljde sig minimalt jämfört med basfallet. Detta visar på att transporter styr resultatet avsevärt mycket mindre än exempelvis materialproduktion.



Figur 12. Jämförelse av klimatpåverkan mellan basfallet och det platsspecifika scenariot för båda fundamenttyperna respektivt. Uttryckt i ton CO₂-ekvivalenter och framtagen med beräkningar i NTMCalc.

4.3.3 Materialmängder

För att undersöka hur känsliga resultaten var för osäkerheter i inventeringsdata genomfördes denna känslighetsanalys där mängden betong och stål varierades var för sig med $\pm 20\%$ för båda fundamenttyperna. För betong inkluderades tillhörande transport- och sluthanteringsprocesser, motsvarande processer inkluderades för alla stålkomponenter, både armeringsstål och konstruktionsstål.

Tabell 5 visar hur en förändring på $\pm 20\%$ i mängden betong och stål påverkade resultaten inom de fem analyserade miljöpåverkankategorierna relativt till basfallet. Generellt uppvisade gravitationsfundamentet störst känslighet för variationer i betongmängd inom kategorierna för klimatpåverkan, försurning och markanvändning, med förändringar på $\pm 11,8\%$, $\pm 10,7\%$ respektive $\pm 13,2\%$. Variationer i stålmängd gav däremot störst förändring i resultat inom kategorierna för övergödning och särskilt cancerframkallande ämnen, med förändringar på $\pm 13,6\%$ och $\pm 19,5\%$.

För det bergsförankrade fundamentet observerades ett annat mönster där variationerna i stålmängd genomgående gav ett större utslag än de motsvarande variationerna i betongmängd. De största känsligheterna fanns inom kategorierna för cancerframkallande ämnen, övergödning och markanvändning med variationer på $\pm 20,0\%$, $\pm 17,6\%$ samt $\pm 12,7\%$. Även relativt stora variationer för klimatpåverkan och försurning med resultat på $\pm 12,1\%$ respektive $\pm 12,2\%$. Variationer i betongmängd gav mindre förändringar i resultat som påvisas med förändringar mellan 0-7% inom alla kategorier.

Tabell 5. Den procentuella förändringen när stål- och betongmängder varierades med $\pm 20\%$ för båda fundamenttyperna.

LCIA-kategori	Gravitation	Gravitation	Bergsförankrat	Bergsförankrat
	betong	stål	betong	stål
Klimatpåverkan	$\pm 11,8\%$	$\pm 7,5\%$	$\pm 6,1\%$	$\pm 12,1\%$
Försurning	$\pm 10,7\%$	$\pm 8,1\%$	$\pm 4,8\%$	$\pm 12,2\%$
Övergödning	$\pm 6,0\%$	$\pm 13,6\%$	$\pm 2,2\%$	$\pm 17,6\%$
Cancerframkallande ämnen	$\pm 0,5\%$	$\pm 19,5\%$	$\pm 0,02\%$	$\pm 20,0\%$
Markanvändning	$\pm 13,2\%$	$\pm 5,7\%$	$\pm 6,9\%$	$\pm 12,7\%$

Dessa resultat indikerar återigen att gravitationsfundamentets miljöpåverkan i större utsträckning är kopplat till material som betong medan det bergsförankrade fundamentets miljöpåverkan tydligare är kopplat till komponenter gjorda av stål. Det överensstämmer tydligt med hotspotanalyser tidigare presenterade i resultatkapitlet.

5. Diskussion

5.1 Huvudresultat och jämförelse med tidigare kunskap

Med sina 40 ton utsläppta CO₂-ekvivalenter över sin livscykel uppvisar det bergsförankrade fundamentet en avsevärt lägre klimatpåverkan jämfört med gravitationsfundamentet med utsläpp på 303 ton CO₂-ekvivalenter, vilket är en skillnad på 87%. En siffra som främst förklaras av den betydligt mindre mängden betong som krävs i byggnationen av det bergsförankrade fundamentet. En indikation på att det är det bättre alternativet ur ett klimatomfattigt perspektiv, särskilt i områden med de geologiska förutsättningarna för det.

Resultaten är i linje med tidigare studier som pekar på att material som betong är högst bidragande faktorer till antropogena växthusgasutsläpp i koppling till produktionen av vindkraftsfundament (Verma et al. 2022; Jones & Li 2024). Minskningen av CO₂ utsläpp i tidigare studier har uppgetts som 58% procent då bergsförankrade fundament jämförs med traditionella gravitationsfundament (Suchorzewski et al. 2024). Möjliga faktorer till den procentuella skillnaden skulle kunna vara en större mängd betong i modelleringen av gravitationsfundament i denna studie, andra systemgränser men även att beskrivningen av CO₂ utsläpp inte helt överensstämmer med användandet av CO₂-ekvivalenter i denna studie och att andra växthusgaser möjligtvis negligerades i de tidigare studierna.

Hotspotanalyserna i figur 6 och 7 understryker att klimatpåverkan i båda fundamenttyperna dominerades av materialproduktion och inte processer kopplade till transporter, installation- och sluthanteringsprocesser vilket stöds av tidigare studier (Stavridou et al. 2015). För gravitationsfundamentet stod betong och armeringsstålet tillsammans för 85% av den totala klimatpåverkan, medan för det bergsförankrade fundamentet utgjorde stålkomponenterna i ankarringarna och stålankarna 42%. Detta pekar mot att i första hand kräver utvecklingen främst förändringar i produktionsfasen av fundamenten för mer hållbara vindkraftsverk snarare än exempelvis logistiska förändringar inom transporten som på förhand gick att anta skulle ha en större påverkan. ECO-betongen som har utvecklats av Swerock visar på att utvecklingen går åt rätt håll.

I tre av de fyra resterande studerade miljöpåverkankategorierna, övergödning, försurning och markanvändning, uppvisade gravitationsfundamentet en betydligt relativ ökning gentemot det bergsförankrade. Detta är en indikation på att den större mängden material, främst betong, som krävs i gravitationsfundamentet utöver klimatpåverkan också har en koppling till andra typer av utsläpp som leder

till andra slutgiltiga miljöproblem. Liknande resultat går att observera i liknande LCA-studier där råmaterialutvinning och materialproduktion går att tyda som en dominerande faktor i flera olika miljöpåverkanskategorier (Wang & Sinha 2021).

Den tydligaste målkonflikten som uppkom var i kategorin för utsläpp av cancerframkallande ämnen där det bergsförankrade fundamentet visade på 28% större utsläpp gentemot gravitationsfundamentet. Detta beror sannolikt på den högre användningen av konstruktionsstål som används inom dessa fundamentalalternativ.

De tre utförda känslighetsanalyserna visade på att förändringar i viktiga parametrar som materialmängder, materialval och transportscenarier inte förändrade det övergripande resultaten jämfört med basfallet särskilt mycket. Detta tyder på ett relativt robust system och att skillnaden mellan fundamenten främst är kopplad till materialanvändning. ECO-betongscenariot gav den största relativa skillnaden jämfört med basfallet med reduktioner på 27% samt 11% för fundamenttyperna. Den platsspecifika känslighetsanalysen visade på att de generaliserade transportavstånden är rimligt antagna då analysen enbart visade skillnader på 0,2-0,6%. Detta pekar åter igen på att intensiteten av material påverkar resultaten i mycket större utsträckning än de efterföljande delarna i livscyklerna. Den tredje och sista känslighetsanalysen där betong- och stålmängderna ändrades med ± 20 visade därav en större förändring i resultaten men förändrade inte resultatens helhetsbild.

Den beräknade koldioxidåterbetalningstiden visar på att fundamentens klimatpåverkan återbetalas relativt snabbt i relation till den elproduktion de möjliggör för turbinerna. Endast 13 respektive 95 dagar. I relation till den antagna livslängden på 25 år för fundamenten innebär detta att fundamenten enbart står i klimatskuld i 0,1-1% av sitt aktiva användande. Detta resultat indikerar att även om fundamentkonstruktioner medför betydande växthusgasutsläpp, speciellt under produktionsfasen, kan det sättas i relation till den betydande produktionen av fossilfri elektricitet och på så sätt strida emot några av de negativa konnotationerna kopplade till produktionen. Samtidigt visar denna studie på att valet av fundament fortfarande har betydelse, speciellt vid storskalig utbyggnad av landbaserad vindkraft, exempelvis vid vindkraftsparker, där användande av alternativ med högre miljöpåverkan där mindre skillnader kan leda till större kumulativa effekter över tid. Som beskrivet i inledningen tas beslut kring vindkraftens geografiska plats ofta främst hänsyn till energipotential och vindförhållanden. Möjligheter för olika typer av fundament borde möjligtvis även då få vara en större bidragande faktor i beslutet för att ytterligare minska fundamentens och därmed vindkrafts totala miljöpåverkan. Fortsatt stödjer denna

studie utvecklingen av effektivare materiallösningar för vindkraftsfundament. Såsom PROWIND konceptet som används för bergsförankrade alternativ som beskrivs i Suchorzewski et al. (2024) eller ECO-betong utvecklad av Swerock (u.å).

5.2 Studiens styrkor och svagheter

Styrkor

Tydliga styrkor i denna studie är den transparenta och tydliga metodiken där antaganden, använda materialmängder, systemgränser, dataset och utnyttjandet av olika scenarion är beskrivet på ett sådant sätt som främjar reproducerbarhet och kritisk granskning.

Känslighetsanalyserna visade på en bred och varierad scenariobeskrivning där en rad väsentliga parametrar förändrades. Trots förändringarna skiftades inte de övergripande resultaten jämfört med basfallet vilket indikerar robusthet i de preliminära modellerna.

Utöver detta uppvisar studien ett tydligt jämförande syfte mellan olika fundamentalternativ som även har praktiskt relevans. Detta motiveras av att det är en LCA med ett cradle-to-grave perspektiv med EoL scenarion vilket på så sätt ger ett heltäckande perspektiv kring livscyklerna.

Svagheter

Den största svagheten är troligen mängden uppskattningar och antaganden beskrivna i metodiken och att de är modellerade enligt dessa i stället för möjligtvis primärdata från den berörda industrin. Förenklade installationsprocesser samt uppskattade materialmängder och transporter är parametrar som exempelvis skulle kunna utvecklas. Även dataset som används i ecoinvent går att beskriva som generiska och ibland inte exakt motsvarar de beskrivna processerna i europeiska förhållanden. Utöver detta är studien generaliserbar vilket innebär att den ska tolkas som ett övergripande koncept baserat på verkliga data och inte en ren beskrivning av olika fundament i europeiska/svenska förhållanden. Exempelvis de bergsförankrade fundamenten som är platsberoende på grund av deras geotekniska förutsättningar kan inte vanligtvis generaliseras på ett sätt som denna studie gör. I stället måste det analyseras fall till fall vilket alternativ som är lämpligast. Trots de beskrivna osäkerheterna bedöms de tydligt övergripande skillnaderna mellan fundamenten vara godtyckliga, särskilt då resultaten i flera olika scenarion dominerades av skillnader i materialanvändning, främst mängden betong.

5.3 Rekommendationer

För vidare analys inom ämnet och framtida studier kan projektspecifika data användas i större utsträckning för att minska mängden osäkerheter men även ge ett mer konkret resultat inom de utvalda förhållandena. Fler analyserade fundamenttyper och mer avancerade känslighetsanalyser, exempelvis Monte Carlo simuleringar hade bidragit till vidare forskning. Utöver miljömässiga analyser hade andra analyser såsom ekonomiska och sociala funkat i kombination som bättre beslutsunderlag för vindkraft i framtiden då besluttande kring omfattning och plats inte bara rör frågor kring miljö och klimat.

Resultaten i denna studie indikerar främst på att effektivisering av material, och särskilt kanske användandet av betong, kan vara nästa steg i utvecklingen av att göra landbaserad vindkraft så miljömässigt attraktiv som möjligt. Bergsförankrade fundament framstår som ett potentiellt mer hållbart alternativ gentemot gravitationsfundament men begränsas tydligt av dess geotekniska förutsättningar.

5.4 Slutsatser

- Gravitationsfundament uppvisar högre miljöpåverkan än bergsförankrade fundament i fyra av fem studerade miljöpåverkankategorierna. Klimatpåverkan, övergödning, försurning och markanvändning
- Det bergsförankrade fundamentet visar däremot på ett högre utsläpp av cancerframkallande ämnen, som bedöms bero på den högre användningen av stål.
- Hotspotanalyser indikerar på att materialproduktion leder till den största miljöpåverkan med andra processer såsom transporter, installation och sluthantering inte lika betydande i det slutgiltiga resultatet.
- Gjorda känslighetsanalyser visar på modellernas robusthet och medför bedömning av resultaten som trovärda.
- Studien stödjer utveckling av materialrelaterade processer som en viktig del i framtida landbaserad vindkraft för att minska miljöpåverkan.

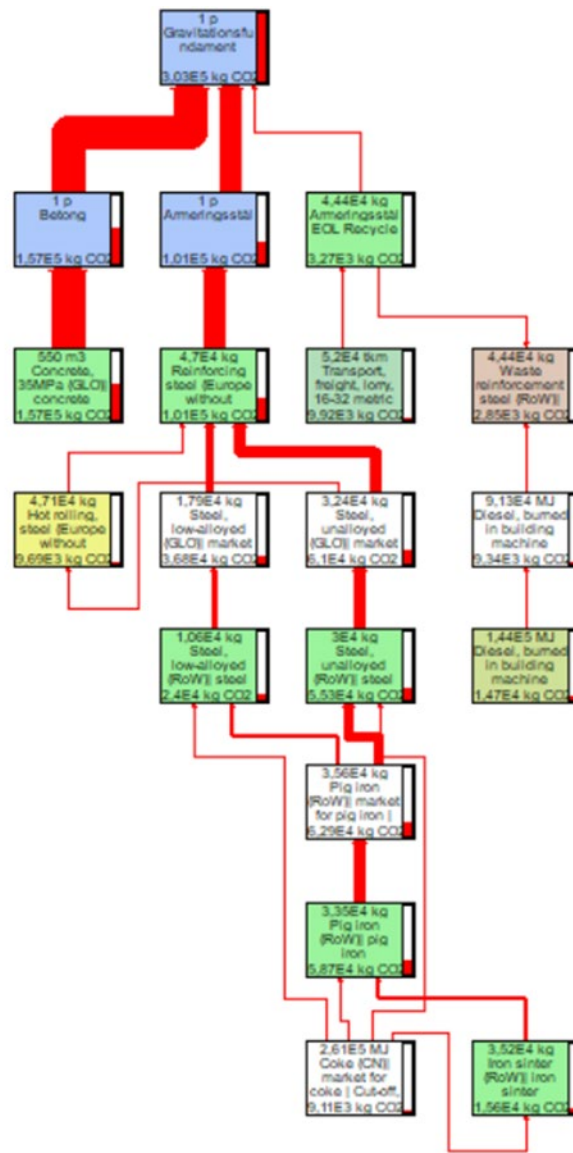
Referenser

- Atescan-Yuksekk, Y., Mills, A., Ayre, D., Koziol, K. & Salonitis, K. (2024). Comparative life cycle assessment of aluminium and CFRP composites: the case of aerospace manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131 (7), 4345–4357. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13241-3>
- Bonou, A., Laurent, A. & Olsen, S.I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*, 180, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>
- Cai, G., Guo, X. & Sun, Y. (2025). Prefabricated building construction in materialization phase as catalysts for hotel low-carbon transitions via hybrid computational visualization algorithms. *Scientific Reports*, 15 (1), 7734. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92200-8>
- Carneiro, E., Mathern, A. & Olsson, N. (2022). Potential improvements in the life-cycle performance of support structures for onshore wind turbines – an interview study in Sweden. *Proceedings of XXIV Nordic Concrete Research Symposium*,. <https://research.chalmers.se/en/publication/532015>
- Ekvall, T. (2019). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. I: *Sustainability Assessment at the 21st century*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89202>
- Energy Source & Distribution (2022). Specialist anchor cages slash wind turbine installation time. *Energy Source & Distribution*. <https://esdnews.com.au/specialist-anchor-cages-slash-wind-turbine-installation-time/> [2026-05-26]
- Eriksson, M. (2025). Miljöpåverkansbedömning (LCIA). MX0132 period 1 HT-2025. ([internt kursmaterial]) Uppsala: Institutionen för energi och teknik. SLU
- EU (2014). Fact-finding studies in support of the development of an. <https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/2014-12-introduction-of-a-standardised-carbon-footprint-methodology.pdf>
- Europeiska Revisionsrätten (2017). *Översiktlig analys - EU:s åtgärder på området energi och klimatförändringar*. Europeiska Revisionsrätten. <https://doi.org/10.2865/033860>
- Faizan, M. & Afgan, I. (2026). Life cycle assessment of wind turbine systems: A statistical synthesis approach to address greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116429. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116429>
- Gimeno, D. (2022). Windtech International - Modelling Rock Adapter Foundations. <https://www.windtech-international.com/editorial-features/modelling-rock-adapter-foundations> [2026-05-26]
- Hemmati, M., Messadi, T. & Gu, H. (2023). Life Cycle Assessment of the Construction Process in a Mass Timber Structure. *Sustainability*, 16 (1), 262. <https://doi.org/10.3390/su16010262>
- ISO (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:37456:en> [2026-06-17]
- ISO (2006b). ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en> [2026-06-17]
- JIIITEE TYÖT (2025). *How are wind turbine foundations built?* <https://jiiteetyot.com/2025/10/29/how-are-wind-turbine-foundations-built/> [2026-05-26]

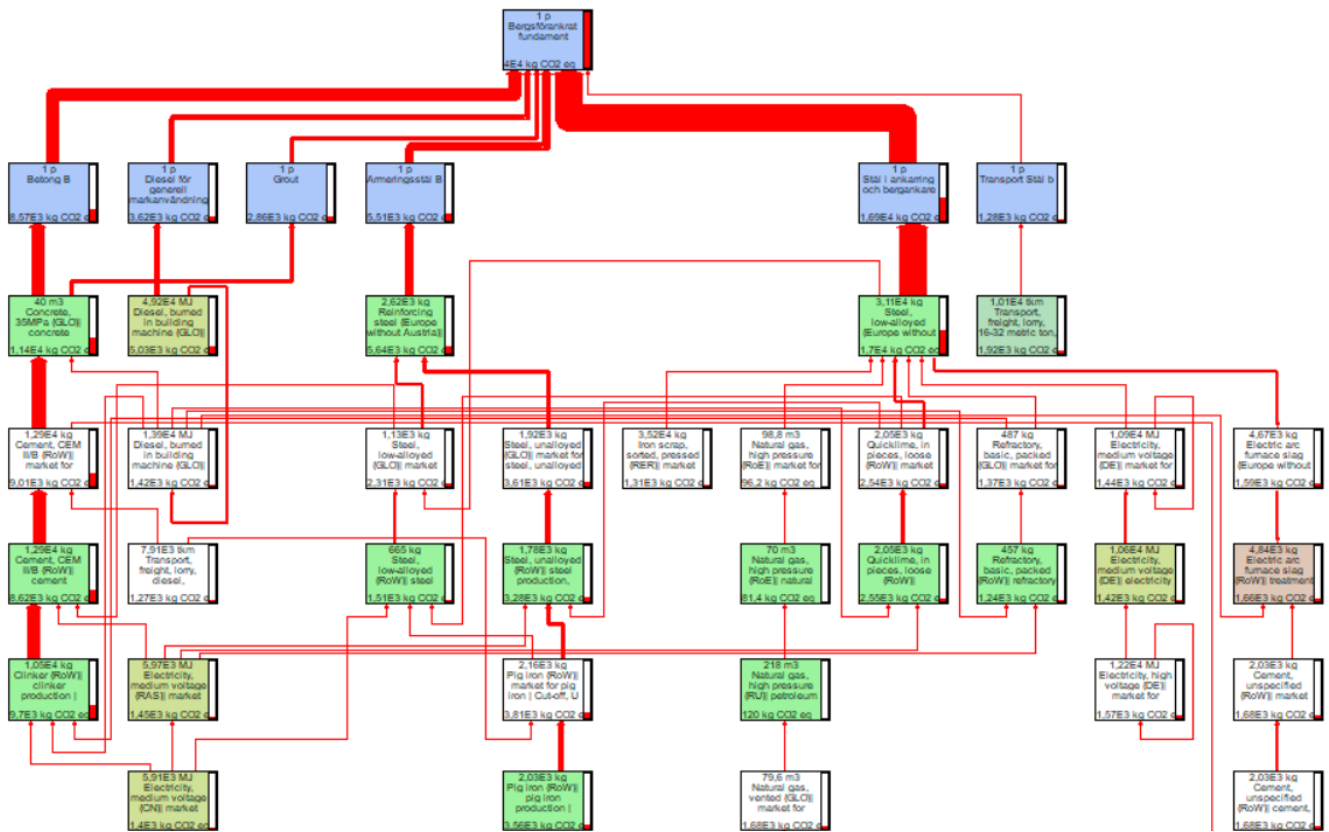
- Jones, K.E.S. & Li, M. (2024). Life Cycle Assessment of Additively Manufactured Foundations for Ultratall Wind Turbine Towers. *Wind Energy*, 27 (11), 1427–1449. <https://doi.org/10.1002/we.2947>
- Lavanya, C. & Kumar, N.D. (2020). Foundation Types for Land and Offshore Sustainable Wind Energy Turbine Towers. Tummala, S., Kosaraju, S., Bobba, P., & Singh, S. (red.) (Tummala, S., Kosaraju, S., Bobba, P., & Singh, S., red.) *E3S Web of Conferences*, 184, 01094. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401094>
- Maar, L. & Seifermann, S. (2023). Assessing the Environmental Sustainability of Deep Geothermal Heat Plants. *Energies*, 16 (19), 6774. <https://doi.org/10.3390/en16196774>
- Magnusson, J. & Mathern, A. (2022). Lessons Learned from the Construction, Inspection, and Defect Assessment of Reinforced Concrete Foundations for Wind Turbines. *Applied Sciences*, 12 (3), 1443. <https://doi.org/10.3390/app12031443>
- Masanet, C., Navarro, I., Collado, M. & Yepes, V. (2024). Sustainable Design of Onshore Wind Turbine Foundations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2745 (1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2745/1/012005>
- Nardelli, A. & Futai, M.M. (2022). Assessment of Brazilian onshore wind turbines foundations. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 15 (5), e15508. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952022000500008>
- One Click LCA (2025). *Average Quantities of Reinforcement in Concrete*. <https://help.oneclicklca.com/en/articles/275888-average-quantities-of-reinforcement-in-concrete> [2026-05-26]
- Proplate (u.å.a). *Gravity Foundations. Proplate manufactures large, complex heavy plate components, custom-built for some of the world's leading companies*. <https://proplate.se/en/products/gravity-foundations/> [2026-05-25]
- Proplate (u.å.b). *Wind Turbine Bedrock Anchoring. Proplate manufactures large, complex heavy plate components, custom-built for some of the world's leading companies*. <https://proplate.se/en/products/bedrock-anchoring/> [2026-05-25]
- Sánchez, A.R., Ramos, V.C., Polo, M.S., Ramón, M.V.L. & Utrilla, J.R. (2021). Life Cycle Assessment of Cement Production with Marble Waste Sludges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (20), 10968. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010968>
- Sandgren, A. & Nilsson, J. (2021). Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1606369/FULLTEXT01.pdf>
- SimaPro (2025). *Perspectives and weighing approach in ReCiPe method | SimaPro Help Center*. <https://support.simapro.com/en/articles/504393-perspectives-and-weighing-approach-in-recipe-method> [2026-05-26]
- SimaPro (u.å.). *Making LCA results count*. <https://simapro.com/insights/making-lca-results-count/> [2026-05-26]
- Sobaszek, Ł., Piasecka, I., Flizikowski, J., Tomporowski, A., Sokolovskij, E. & Bałdowska-Witos, P. (2023). Environmentally Oriented Analysis of Benefits and Expenditures in the Life Cycle of a Wind Power Plant. *Materials*, 16 (2), 538. <https://doi.org/10.3390/ma16020538>
- Sobczuk, S., Jaroń, A., Mazur, M. & Borucka, A. (2025). Renewable Energy and CO2 Emissions: Analysis of the Life Cycle and Impact on the Ecosystem in the Context of Energy Mix Changes. *Energies*, 18 (13), 3332. <https://doi.org/10.3390/en18133332>

- SSAB (u.å.). *Rock weight. Rock weight*. <https://www.ssab.com/en/support/how-to-design/tipper-design/dent-resistance-in-tipper-bodies/rock-weight> [2026-05-26]
- Stavridou, N., Efthymiou, E. & Baniotopoulos, C.C. (2015). Verification of Anchoring in Foundations of Wind Turbine Towers. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8 (4), 717–729. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2015.717.729>
- Stena Renewable (2020). *Magasinet Vindkraft*. <https://srenergy.se/app/uploads/2019/09/Magasinet-Vindkraft-Aby-Alebo-2.pdf>
- Suchorzewski, J., Flansbjerg, M., Chaudhari, O. & Williams Portal, N. (2024). Experimental Development and Field Validation of Rock Anchors for Sustainable Onshore Foundations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2745 (1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2745/1/012011>
- Svensk Vindenergi (2025). *Jämförelse av klimatpåverkan från gammal respektive ny vindkraft*. Svensk Vindenergi. <https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2025/01/Jamforelse-av-klimatpaverkan-fran-gammal-respektive-ny-vindkraft.pdf>
- SWEROCK (u.å.). *Att tänka på vid gjutning av ECO-Betong*. SWEROCK.
- Vattenfall (u.å.). *Vindkraftens roll i elsystemet*. Vattenfall. <https://projekt.vattenfall.se/vindprojekt/om-vindkraft/vindkraftens-roll-i-elsystemet/> [2026-05-26]
- Verma, S., Paul, A.R. & Haque, N. (2022). Selected Environmental Impact Indicators Assessment of Wind Energy in India Using a Life Cycle Assessment. *Energies*, 15 (11), 3944. <https://doi.org/10.3390/en15113944>
- Walker, S., Coleman, N., Hodgson, P., Collins, N. & Brimacombe, L. (2018). Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. *Sustainability*, 10 (3), 666. <https://doi.org/10.3390/su10030666>
- Wang, S. & Sinha, R. (2021). Life Cycle Assessment of Different Prefabricated Rates for Building Construction. *Buildings*, 11 (11), 552. <https://doi.org/10.3390/buildings11110552>

Bilaga 1



Figur B1. Nätverksträd genererat i SimaPro för gravitationsfundamentets klimatpåverkan. Endast processer som bidrar med minst 3% av den totala klimatpåverkan visas. Uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter



Figur B2. Nätverksträd genererat i SimaPro för det bergsförankrade fundamentets totala klimatpåverkan. Endast processer som bidrar med minst 3% av den totala klimatpåverkan visas. Uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>

JA, jag, Filip Berglund har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse till att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.