

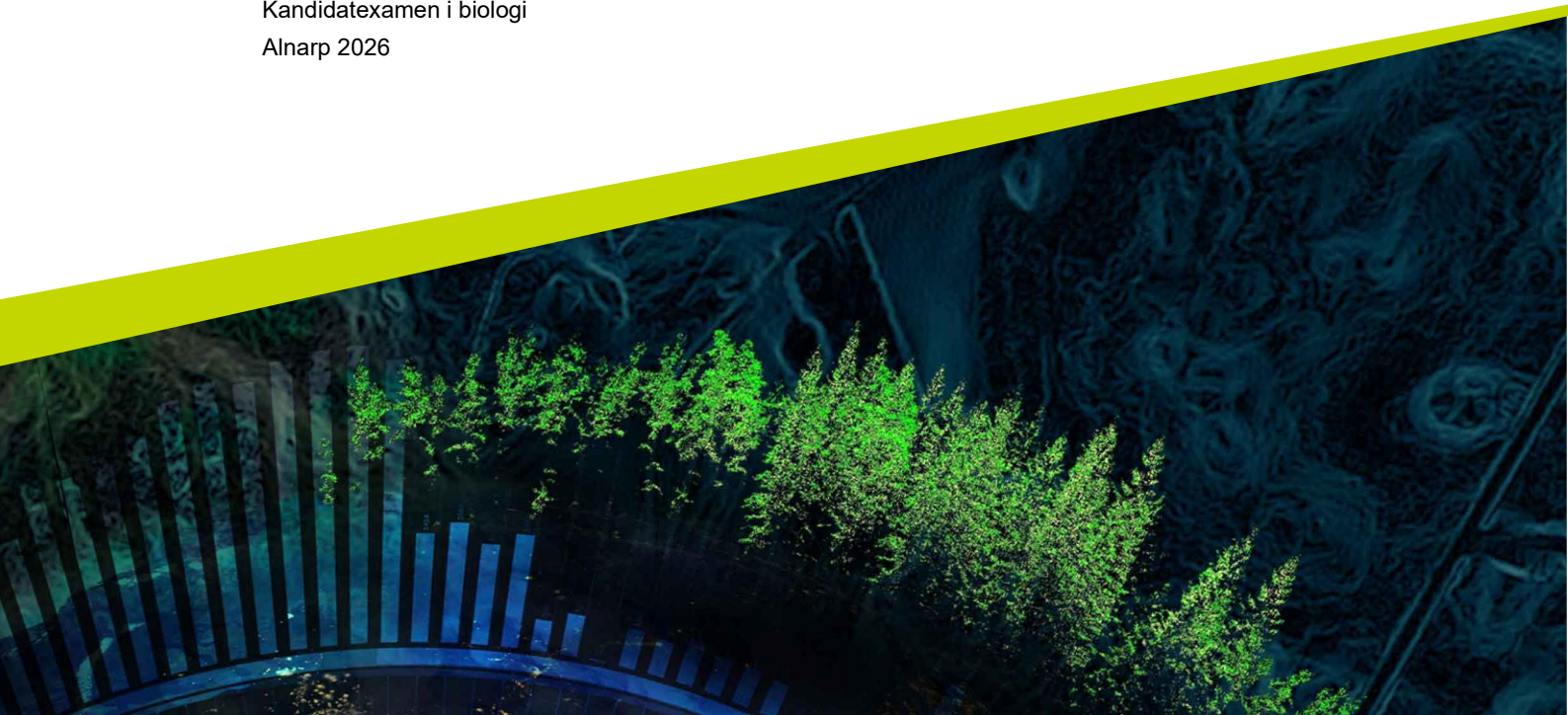


Hyperackumulerande växter

Alyssum murale och *Berkheya coddii* för
utvinning av nickel

Ellen Hägg

Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för biosystem och teknologi
Kandidatexamen i biologi
Alnarp 2026



Hyperackumulerande växter. *Alyssum murale* och *Berkheya coddii* för utvinning av nickel.

Hyperaccumulating plants: *Alyssum murale* and *Berkheya coddii* for nickel extraction.

Handledare:	Ramune Kuktaite, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för växtförädling
Bitr. handledare:	Göran Thor
Examinator:	Helene Larsson Jönsson, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för biosystem och teknologi
Omfattning:	15 hp
Nivå och fördjupning:	Grundnivå, G2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i biologi
Kurskod:	EX0855
Utbildning:	Kandidatexamen i biologi
Kursansvarig inst.:	Institutionen för biosystem och teknologi
Utgivningsort:	Alnarp
Utgivningsår:	2026
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Nyckelord:	<i>Alyssum murale</i> , <i>Berkheya coddii</i> , nickel, hyperackumulatorer, phytomining, agromining, fytoremediering

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap
Institutionen för biosystem och teknologi

Sammanfattning

Two promising species for phytomining (plant-based metal recovery) of nickel are *Alyssum murale* and *Berkheya coddii*. The purpose of this study is to compare and analyze properties of the nickel-hyperaccumulating species *Alyssum murale* and *Berkheya coddii*, with regard to their potential for phytomining. Literature study is based on previous research on the species' nickel uptake, biological mechanisms, cultivation conditions and the possibility of using them for plant-based metal recovery.

Results show that both species can accumulate high concentrations of nickel in above-ground biomass and thus can be harvested for nickel recovery. *A. murale* is well suited to the European Mediterranean climate. The species *B. coddii* shows higher biomass, but still a nickel yield that is comparable to *A. murale*. At the same time, *B. coddii* is more sensitive to climate conditions outside its natural habitat and is therefore considered most suitable for South Africa or similar climate zones.

Several factors affect nickel uptake, including soil pH, nutrient availability, biological interactions in the rhizosphere and climate. Phytomining should be carried out on already degraded soil, nickel-rich soils that are otherwise unusable for agriculture or mining waste sites. However, the method is limited by slow extraction and nickel resources and cannot replace traditional mining.

Summarily, the species are promising for use in complementary nickel recovery methods, but further long-term field trials are needed to evaluate the practicality of the method.

Keywords: *Alyssum murale*, *Berkheya coddii*, nickel, hyperaccumulator, phytomining, agromining, phytoremediation

Abstract

Two prominent species for phytomining (biological extraction) of nickel are *Alyssum murale* and *Berkheya coddii*. The aim of this study is to compile and analyze these two nickel hyperaccumulating species regarding their potential for phytomining. This literature review is based on previous articles regarding the species' nickel accumulation capacity, biological mechanism, environmental factors and further their potential for phytomining.

The results show that both species can accumulate high concentrations of nickel in their aboveground biomass, which can subsequently be harvested for nickel extraction. *A. murale* appears suited to European Mediterranean climates. *B. coddii* produces a higher biomass, however its nickel yield is comparable to that of *A. murale*. At the same time, *B. coddii* appears to be more sensitive to climatic conditions outside its natural habitat and is therefore considered most suitable for South Africa and similar climatic zones.

Several factors were found to influence the nickel uptake, including soil pH, nutrient availability, rhizosphere interactions and climate. Phytomining should be conducted on already degraded land, nickel-rich soils unsuitable for conventional agriculture, or on mine waste sites. However, the method is limited by slow extraction rates and nickel resources and is unlikely to replace traditional mining.

The study concludes that both species show potential for a complementary method for nickel extraction. But further long-term field studies are required to evaluate the practical sustainability of the method.

Keywords: *Alyssum murale*, *Berkheya coddii*, nickel, hyperaccumulators, phytomining, agromining, phytoremediation

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	i
Figurförteckning	ii
Förkortningar	iii
1. Inledning	1
2. Syfte och frågeställningar	2
2.1 Syfte	2
2.2 Frågeställningar	2
3. Teoretisk bakgrund	3
3.1 Nickel i den gröna omställningen	3
3.2 Serpentinjordar	4
3.3 Hyperackumulatörer av nickel	5
3.4 Fytoremediering	6
3.5 Phytomining	6
4. Material och metod	8
4.1 Val av arter	8
4.2 Sökmetod	8
4.3 Datainsamling	9
4.4 Begränsningar	9
5. Resultat	10
5.1 Ursprung	10
5.1.1 <i>A. murale</i>	10
5.1.2 <i>B. coddii</i>	10
5.2 Växternas upptag och lagring av nickel	11
5.3 Studier kring ackumuleringsförmåga	15
6. Diskussion	19
6.1 Ackumuleringsförmåga	19
6.2 Faktorer som påverkar nickelupptag	20
6.3 Hållbarhet och praktisk användning	21
7. Slutsats	24
Referenser	25

Tabellförteckning

Tabell 1. En sammanställning av studier utförda på <i>A. murale</i>	15
Tabell 2. En sammanställning av studier utförda på <i>B. coddii</i>	17

Figurförteckning

Figur 1. Global karta vilken visar förekomsten av större områden serpentinjordar/ultramafiska områden, markerade i gult. Kartan är baserad på Garnica-Díaz et al. (2023) och García Del Real & Vishal (2016).	4
Figur 2. En överblick av processen phytomining. Processtegen som inkluderats är upptag, ackumulering, skörd, förbränning och utvinning. Bilden är AI-genererad med Chat-GPT utefter styckets text och bearbetad av författare (2026).....	7
Figur 3. Vild <i>A. murale</i> . Fotografi till vänster av Jerzy Opiola, Wikipedia commons, CC BY-SA 4.0 och fotografi till höger av Matt Lavin, Wikipedia commons, CC BY- SA 2.0.	10
Figur 4. Illustration av <i>B. coddii</i> . Bilden är AI-genererad med Chat-GPT men följer anatomien av verkliga fotografier av arten. Figuren är bearbetad av författare (2026).....	11
Figur 5. Illustration av tvärsnittet av ett blad. Specifika cellskikt och organeller är namngivna. Bild av Zephyris, Wikipedia commons, CC BY-SA 3.0.	13
Figur 6. Tvärsnitt av en stam för att illustrera cellstruktur. Bilden tillhör Josef Reischig Wikipedia commons, CC BY SA 3.0. Text har lagts till av författaren.	14

Förkortningar

Förkortning	Betydelse
Ni	Nickel
PM	Phytomining

1. Inledning

Efterfrågan på metaller, som nickel, har ökat under de senaste decennierna till följd av den globala omställningen mot mer hållbara och klimatvänliga energisystem (Church & Crawford 2020; Nate et al. 2021; Dilshara et al. 2024; IEA 2025). Industrin genomgår en förändring där fossila energikällor successivt ersätts av förnybara alternativ. Denna omställning är starkt beroende av effektiva energilagringssystem, där batteriteknologi spelar en central roll. Många av dessa tekniska lösningar kräver metaller såsom litium, kobolt och nickel (Macmillen Voskoboynik & Farrugia 2022). En rapport från 2017 uppskattar att efterfrågan på nickel kan bli upp till 12 gånger större år 2050 (Arrobas et al. 2017). Men samtidigt minskar jordens nickelresurser (Olafsdottir & Sverdrup 2021) och behöver behandlas mer cirkulärt och hållbart i alla industrier.

Traditionell nickelutvinning kan förknippas med betydande miljöpåverkan, inklusive habitatförstörelse, utsläpp av växthusgaser och ibland spridning av hälsofarliga metaller (Begum et al. 2022; Giljum et al. 2025; Herawati et al. 2025; Mervine et al. 2025). Mot denna bakgrund har alternativa utvinningsmetoder samt återvinningsmetoder fått ökad uppmärksamhet. En sådan utvinningsmetod är phytomining, en biologisk metallutvinning med hjälp av växter. Det innebär att särskilda växtarter, så kallade hyperackumulatorer, används för att ta upp och koncentrera metaller från marken i sina vävnader (Brooks et al. 1998). Dessa växter kan därefter skördas och förbrännas, varvid metaller kan extraheras. Metoden skapar en möjlighet att utnyttja metallrika jordar som annars inte är lönsamma att bryta med konventionella metoder.

På grund av den ökande efterfrågan på nickel, metallens relativt höga ekonomiska värde, begränsningar med traditionella utvinningsmetoder och att det dessutom finns god kännedom kring hyperackumulerande arter av just nickel, är det relevant att undersöka och utveckla konceptet phytomining. Denna studie fokuserar på att utvärdera två arters ackumuleringskapacitet och deras potential för phytomining.

2. Syfte och frågeställningar

2.1 Syfte

Syftet med denna studie är att sammanställa och analysera egenskaper hos de nickelhyperackumulerande växtarterna *Alyssum murale* och *Berkheya coddii*, med avseende på deras potential för phytomining. Studien fokuserar på nickelupptag, klimatförutsättningar och arternas praktiska användbarhet i nickelutvinnningssystem.

2.2 Frågeställningar

1. Vilken mängd nickel kan *A. murale* och *B. coddii* ackumulera och inom vilka strukturer lagras metallen?
2. Vilka faktorer påverkar upptaget av nickel?
3. Vilka geografiska förutsättningar krävs för respektive art?

3. Teoretisk bakgrund

3.1 Nickel i den gröna omställningen

De globala klimatmålen i Agenda 2030 och Parisavtalet har präglat samtiden. Miljövänlighet och hållbarhet har blivit viktiga begrepp inom många industrier och förnybar energi är ett tydligt exempel på detta.

Fyra centrala teknologier i denna omställning är vindkraft, solenergi, eldrivna fordon och då även energilagring (Church & Crawford 2020). Alla dessa tekniker och system är starkt beroende av mineraler och metaller. För att sätta nickel i detta sammanhang så är det en av flera metaller som är väsentlig för bland annat solpaneler (Church & Crawford 2020), flera typer av vindkraftverk (Arrobas et al. 2017) och framför allt batterier (Riaz et al. 2021; Salgado et al. 2021). Batterier behövs både för att lagra energi och för elbilproduktion. Enligt International Energy Agency utgjorde elbilar mer än 20 procent av den globala nybilsförsäljningen år 2024 och andelen elbilar förväntas öka under kommande år (IEA 2025). Nickel är en nyckelkomponent i litiumjonbatterier, som dominerar elfordonsmarknaden där nickel-mangan-kobolt (NMC) och nickel-kobolt-aluminium (NCA) komponenter används (Salgado et al. 2021).

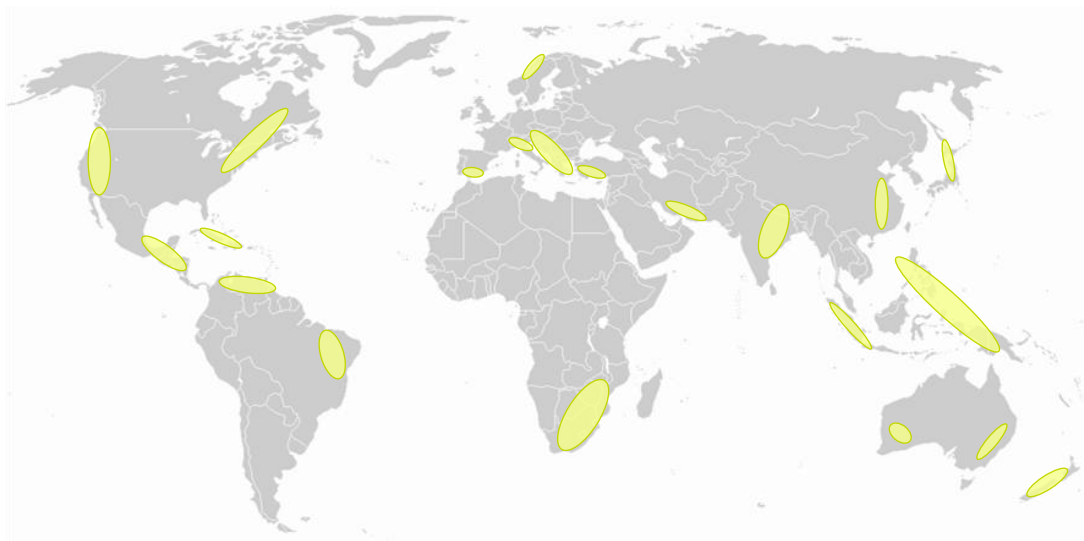
Nickel är även en viktig metall i flera andra industrier tack vare sina fördelaktiga egenskaper, såsom hög hållfasthet, korrosionsbeständighet och förmåga att tåla höga temperaturer (*Nickel institute* u.å.). Nickel används framför allt som en komponent i rostfritt stål, där metallen bidrar till ökad hållbarhet och motståndskraft mot rost (*Nickel institute* u.å.).

Den ökade efterfrågan denna omställning skapat på metaller såsom nickel skapar en oro kring leveranskedjan samt framtagningens negativa miljöpåverkan. Traditionell brytning av metaller kan ha en negativ påverkan på den omgivande miljön. Metaller kan spridas och förorena närliggande vattenkällor, luft och livsmedelsgrödor samt påverka ekosystem och djur (Muimba-Kankolongo et al. 2022; Herawati et al. 2025; Sansone et al. 2026). Utöver de miljömässiga konsekvenserna medför expansionen av nickelgruvor i vissa länder även sociala konflikter, inklusive påverkan på lokalsamhällen, försämrade livsvillkor och bristande hänsyn till ursprungsbefolkningars rättigheter (Karsadi & Aso 2023). Konflikt och korruption kring gruvbrytning är även ett faktum i vissa länder där resurserna finns och utgör en risk för inblandade (Church & Crawford 2020).

3.2 Serpentinjordar

Serpentinjordar består bland annat av nedbrutna ultramafiska bergarter och kännetecknas av höga halter av metaller som magnesium, krom, järn, koppar, kobolt och nickel samtidigt som halten av nödvändiga växtnäringsämnen är låg (Whittaker 1954; Baumeister et al. 2015). Koncentrationen av nickel i dessa jordar är generellt mellan 500 och 8000 mg per kg jord, vilket endast motsvarar 0,05 till 0,8 procent (Ghaderian et al. 2007; Tumi et al. 2012). Det anses fortfarande vara betydande halter i sammanhanget. Jordarna kännetecknas även av en låg vattenhållande kapacitet (Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020). Områdena är därför utmanande för många växter som inte klarar av förhållandena och de toxiska halterna av metaller. Samtidigt har de extrema förhållandena gjort att unika ekosystem av arter med egenskaper anpassade för att hantera miljön skapas (Boyd & Martens 1998).

Serpentinjordar finns utspridd över flera världsdelar och täcker stora delar av flera länder (figur 1). Det största området i Europa finns på Balkan, främst i Bosnien, Serbien, Albanien och Grekland (Stevanovic et al. 2003).



Figur 1. Global karta vilken visar förekomsten av större områden serpentinjordar/ultramafiska områden, markerade i gult. Kartan är baserad på Garnica-Díaz et al. (2023) och García Del Real & Vishal (2016).

3.3 Hyperackumulatorer av nickel

Hyperackumulerande växter kan växa i metallrika miljöer och lagra extremt höga halter av metaller i sina växtdelar utan att ta skada (Rascio & Navari-Izzo 2011). Dessa arter hittas ofta i metallrika serpentinjordar och har därav troligtvis utvecklat strategier för att tolerera metallhalterna (Boyd & Martens 1998; Brooks et al. 1998). För att klassificeras som en hyperackumulerande växt av nickel krävs att växten kan absorbera minst 1000 mg per kg av plantans torrsvikt (Brooks et al. 1977; Sheoran et al. 2009).

Några viktiga funktioner för hyperackumulerande växter är en hög upptagningshastighet hos rötterna, en hög transporthastighet mellan rotcellerna och ovanjordiska växtdelar samt en effektiv avgiftning och lagring av metallen (Krämer 2010). Allt för att nickel inte ska ackumuleras i oönskade vävnader eller skada viktiga processer i växten (Krämer 2010). Hur och vart växten lagrar metaller beror på arten och även vilka transporterproteiner som är involverade (Bhat et al. 2025). Transportproteiner för järn (specifikt Iron-Regulated Transporter 1) tros ha en roll även i nickelupptaget hos flera hyperackumulatorer av nickel, då proteinet transporterar katjoner som liknar järn (van der Pas & Ingle 2019).

Kelatbildning, när en kelat binder till en metalljon, är en annan viktig mekanism som hindrar att metalljoner binder till oönskade ämnen och stör viktiga funktioner (van der Pas & Ingle 2019). Några exempel på ämnen som har visat sig vara viktiga för hyperackumulatorer är histidin och nikotinamid, eftersom de bildar stabila komplex med tvåvärda katjoner, såsom nickel (Rascio & Navari-Izzo 2011).

För fyto Remediering och phytomining (definition av begreppen kommer nedan) beskrivs ofta växtval som en av de viktigaste faktorerna. Arten behöver trivas i miljön, ha en snabb tillväxt och en hög ackumuleringsförmåga (Chaney et al. 2007). Hyperackumulatorer av nickel är relativt väl studerat och fler än 500 arter har identifierats från över 40 olika växtfamiljer (Reeves et al. 2018; Kikis et al. 2024). De mest framträdande är från familjerna Asteraceae, Brassicaceae, Buxaceae, Celastraceae Euphorbiaceae, Phyllanthaceae, Salicaceae, och Rubiaceae (Kikis et al. 2024; Greyling & Pillay 2026). *Alyssum murale* (Brassicaceae) och *Berkheya coddii* (Asteraceae) är två framträdande hyperackumulatorer av nickel, men med ursprung i två olika familjer och geografiska platser.

3.4 Fytoremediering

Fytoremediering innebär att växter används för att ta upp föroreningar i mark eller vatten (Kafle et al. 2022; Tan et al. 2023). Växterna kan använda sig av flera olika metoder för detta och termen anses därför vara övergripande (Pivetz 2001).

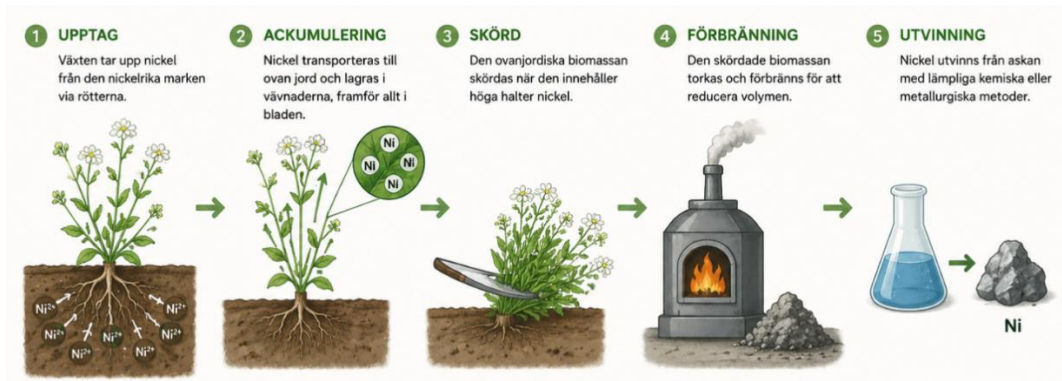
Fytosanering är en typ av fytoremediering, som kännetecknas av att föroreningar tas upp av rötter och lagras i växtdelar över marken (Pivetz 2001). Fytosanering är den typ av fytoremediering som arterna *A. murale* och *B. coddii* använder sig av och är den strategin som diskuteras i detta arbete.

Andra strategier som finns men som inte fungerar för PM är bland annat fytostabilization, då föroreningar absorberas och lagras i växtrötter eller binds till organiskt material i marken med hjälp av växterna (Pivetz 2001). Denna metod kan användas för att minska spridningen av föroreningarna via till exempel vind och vatten (Pivetz 2001). Fytodegradation och fytotransformation är andra exempel där växten antingen utsöndrar enzymer som bryter ner föroreningar i marken eller att nedbrytning sker i växten genom metabolismen (Pivetz 2001).

3.5 Phytomining

Begreppet innebär att växter som ackumulerar värdefulla metaller från marken odlas med målet att skörda växten för att utvinna metallerna (figur 2) (Brooks et al. 1998). I brist på en svensk översättning, förutom fytoremediering, kommer begreppet phytomining användas i detta arbete.

För att utvinna metallerna ur de skördade växterna finns olika metoder. Den mest effektiva processen är att först värmebehandla växtdelarna. Växtdelarna värms upp till mellan 300 och 1000 °C för att förbrännas och effektivt reduceras i volym (figur 2). Efter förbränningen kvarstår en aska med metaller (Kikis et al. 2024). Processen kräver tillförd energin som sedan avges som värme. I ett ideellt system tas värmen till vara på och används till uppvärmning eller annat syfte. Askan som finns kvar efter förbränningen innehåller däremot fortfarande oönskade ämnen och behöver behandlas ytterligare (Kikis et al. 2024). Även här finns flera tillvägagångsätt som fortfarande kan utvecklas för att minimera miljöpåverkan av PM (Kikis et al. 2024).



Figur 2. En överblick av processen phytomining. Processtegen som inkluderats är upptag, ackumulering, skörd, förbränning och utvinning. Bilden är AI-genererad med Chat-GPT utefter styckets text och bearbetad av författaren (2026).

4. Material och metod

Detta arbete är en litteraturstudie baserad på vetenskapliga publikationer om de valda arterna eller inom området PM.

4.1 Val av arter

Arter valdes genom läsning av befintliga artiklar om PM och hyperackumulatörer av nickel. Under förarbetet användes sökorden: phyto* och Ni-hyperackumulatörer i Web of Science. Tillgängligheten av praktiskt utförda försök med arterna samt en hög ackumulerande förmåga var väsentligt. Inom släktet *Alyssum* finns flera intresseväckande hyperackumulatörer av nickel och därför valdes en av de mest framträdande: *A. murale*. Samtidigt uppkom arten *B. coddii* som särskilt intressant inom området på grund av en extremt hög uppmätt nickelkoncentration och relativt höga biomassproduktion. Båda arterna var relativt väl studerade och uppvisade flera lovande egenskaper för PM. De två arterna användes även under skrivande år i pilotförsök av företag, ytterligare en anledning till att de valdes.

4.2 Sökmetod

Litteratursökningen genomfördes i databaserna Web of Science och Google Scholar.

För studien användes sökorden: ("Alyssum murale" OR "Odontarrhena muralis") AND (Nickel OR Ni). Under sökalternativet topic i Web of Science gavs 270 sökresultat som var skrivna på engelska. Samma sökning på Google Scholar utan filtrering gav 3 680 sökresultat.

För sökorden: "Berkheya coddii" AND (Nickel OR Ni) i Web of Science under sökalternativet topic och skrivna på engelska gavs 109 sökresultat. Samma sökning på Google Scholar utan filtrering gav 1880.

Under alla sökningarna bortselekerades resultat publicerade innan år 1995 för ett aktuellt underlag. Sannolikt har både vetenskapliga metoder och konceptet PM utvecklats och därför valdes publikationer efter 1995. Publikationer bortselekerades även på grund av irrelevant titel eller sammanfattning. Ett stort antal publicerade studier bortselekerades även senare efter läsning på grund av att de saknade kvantitativa data kring nickelackumulering, behandlade hydroponiska system utan relevans för praktisk PM eller endast analyserade Ni-koncentration i rötter eller blad.

För resultatavsnittet: 5.3 *Studier kring ackumuleringsförmåga* inkluderades endast 10 praktiska studier som bedömdes bestå av relevant information. För resterande resultatavsnittet inkluderades ytterligare 20 artiklar.

Alla sökningar utfördes under april och maj år 2026.

4.3 Datainsamling

Från de inkluderade studierna extraherades relevant information. Data sammanställdes i text och tabeller för översikt och jämförelser.

En beskrivning av arternas lagring av nickel samt rotupptag sammanställdes i text.

Under resultatavsnitt 5.3 registrerades följande parametrar: Nickel koncentration i ovanjordisk biomassa (mg/kg torrsvikt), total skördbar biomassa per odlad hektar (ton/ha), Nickelutbyte (kg Ni/ha) alltså den mängd nickel som kan utvinnas på ett specifikt område med hjälp av växten. Även experimentella förhållanden, i den grad det funnits beskrivet (exempel pH, näringstillförsel, tillgängligt nickel i marken) och försöksplats samt övriga slutsatser från studierna.

4.4 Begränsningar

På grund av tidsbegränsningen avgränsas studien till två relevanta arter.

Eftersom studien baseras på sekundärdata från publicerade artiklar kan resultaten påverkas av variationer i de experimentella förhållandena mellan studierna och skillnader i mätmetoder.

Alla yttre påverkande faktorer har inte diskuterats eller analyserats, utan fokus hamnar på de mest framträdande och betydande för praktisk PM.

5. Resultat

5.1 Ursprung

5.1.1 *A. murale*

Alyssum murale, synonym *Odontarrhena muralis*, tillhör familjen Brassicaceae (*Plants of the World* u.å.a). Det svenska trivialnamnet är Silverstenört (SLU Artdatabanken u.å.). Arten har sitt ursprung i sydöstra Europa och Iran, men har även introducerats till Belgien, Österrike, Tyskland, södra Kanada och delar av USA (*Plants of the World* u.å.a).

Arten är perenn (*Flora Veg* u.å) och blir ofta runt 50 cm hög (Axmanová 2022). Den växer oftast tuvbildande och upprätt (figur 3). Eftersom arten är naturligt anpassad till serpentinjordar och medelhavsklimat anses den särskilt intressant för PM i torra och näringsfattiga miljöer. Den breda geografiska utbredningen som skapats efter introduktion av arten, tyder dessutom på en relativt god anpassningsförmåga till varierande klimatförhållanden.



Figur 3. Vild *A. murale*. Fotografi till vänster av Jerzy Opiola, Wikipedia commons, CC BY-SA 4.0 och fotografi till höger av Matt Lavin, Wikipedia commons, CC BY-SA 2.0.

5.1.2 *B. coddii*

Berkheya coddii tillhör familjen Asteraceae och har sitt ursprung i Sydafrika (*Plants of the World* u.å.b). Inget trivialnamn har funnits för *B. coddii*.

Arten är perenn och kan bli 130-180 cm hög vilket resulterar i en större biomassa än många andra hyperackumulerande arter (Robinson et al. 1997; Rue et al. 2020). Växtsättet är upprätt och saknar tydlig förgrening (figur 4).

B. coddii är tålig mot torka och tål även lätt frost (South African National Biodiversity Institute 2025). Sydafrikas klimat kännetecknas generellt av varma somrar, milda vintrar och låg nederbörd runt 460 mm per år (Mnguni 2020). Det innebär att arten främst är anpassad till varma och torra miljöer.



Figur 4. Illustration av *B. coddii*. Bilden är AI-genererad med Chat-GPT men följer anatomin av verkliga fotografier av arten. Figuren är bearbetad av författaren (2026).

5.2 Växternas upptag och lagring av nickel

Hyperackumulatorers upptag och lagring av nickel är inte fullständigt kartlagt och exakt hur processerna fungerar är okänt. Däremot finns många studier som kartlagt var i växten nickel förekommer och genom vilka strukturer metallen transporterats.

Flera studier visar att *A. murale* och *B. coddii* absorberar nickel som katjoner via rötterna, som därefter effektivt transporteras upp genom växten till toppbladen via xylemet och sedan omfördelas till lägre skott och blad genom floemet (Mesjasz-Przybyłowicz et al. 2004; Tappero et al. 2007; Sellami et al. 2012; Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020; Rylott & van der Ent 2025).

En studie av rhizosfären, alltså jorden närmst växten som påverkas av rotsystemets kemiska och biologiska aktivitet, hos *B. coddii* visade att nickelupptaget huvudsakligen drivs av passiv transport (Moradi et al. 2010). Studien beskriver även att denna transport påverkas av flera faktorer, såsom växtens transpiration, upptagningshastighet och koncentrationen av nickel i

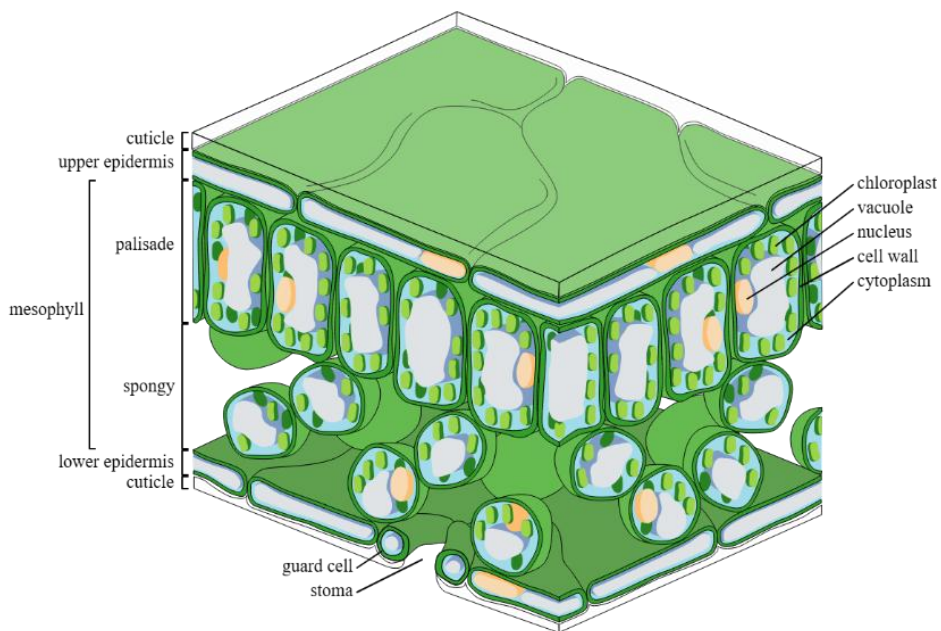
marklösningen. De såg även att nickeljoner, i formen Ni^{2+} , samlades runt rötterna, då koncentrationen var högre där än i marken längre ifrån rötterna.

Prover av naturligt förekommande *B. coddii* i Sydafrika visade även att arbuskulär mykorrhiza fanns i marken och levde i symbios med växten (Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020). Mykorrhizasvampen underlättar upptaget av näringsämnen och vatten, vilket bidrar till ökad stresstålighet hos växten. Andra försöksodlingar av *B. coddii* visar att förekomsten av mykorrhiza ökat biomassan och växtens totala nickelupptag (Turnau & Mesjasz-Przybyłowicz 2003; Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020).

Hos *A. murale* å andra sidan har ingen tydlig koppling till mykorrhizasvampar fastställts i någon av de studier som analyserats. Däremot framhålls betydelsen av rhizosfärbakterier, vilket har visat öka växtens nickelupptag (Abou-Shanab et al. 2003; Abou-Shanab et al. 2006). Detta tyder på att mikrobiella interaktioner i rotzonen spelar en viktig roll hos båda arterna.

I rötternas inre cortex på hyperackumulerande växter har tydliga grupper av specialiserade celler med en cytoplasma rik på organeller och som producerade stora mängder runda strukturer hittats (Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020). Det höga innehållet av organeller tyder på en hög aktivitet och eftersom dessa större grupper av organeller saknas hos växter som inte är hyperackumulerande tyder det på att cellerna kan ha en funktion i metalltransporten (Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020). Viss forskning tyder även på att ett förhöjt uttryck av gener som kodar för växternas transportsystem bidrar till det ökade upptaget av metaller (Rascio & Navari-Izzo 2011).

Nickel finns i flera vävnader, även hos växter med en normal nickeltolerans. Nickel är ett av flera ämnen som krävs för en normal tillväxt hos växter. Vad som utmärker hyperackumulerande växter är att de kan lagra nickel i extremt höga halter i vissa vävnader. Både *A. murale* och *B. coddii* har visat sig ha högst nickelhalt i bladen, följt av skott och därefter stam (Mesjasz-Przybyłowicz et al. 2004; Sellami et al. 2012). En studie kring upptaget hos *B. coddii* observerade att 71 procent av det ackumulerade nicklet fanns i skott och blad (Robinson et al. 2003). Hos båda arterna lagras nickel huvudsakligen i vakuolerna i epidermisceller, som är det yttersta cellskiktet, samt i angränsande mesofyllceller i bladen (Mesjasz-Przybyłowicz et al. 2001; Asemaneh et al. 2006; Chaney et al. 2007; van der Pas & Ingle 2019). Mesofyllcellerna utgör majoriteten av bladet och finns emellan epidermiscellerna, det är även där fotosyntesen utförs (figur 5).



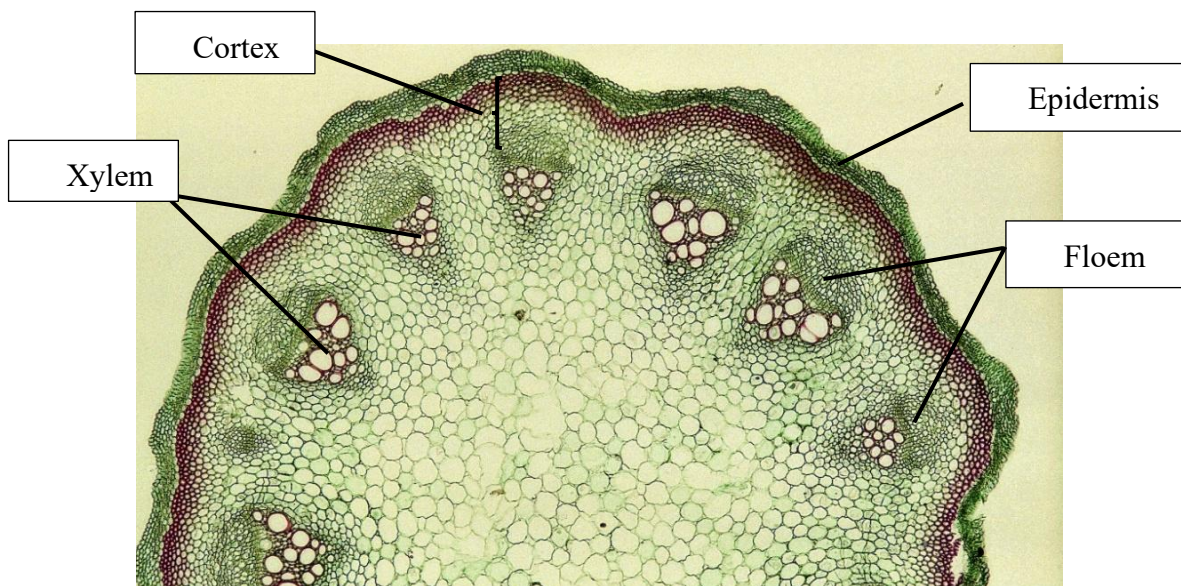
Figur 5. Illustration av tvärsnittet av ett blad. Specifika cellskikt och organeller är namngivna. Bild av Zephyris, Wikipedia commons, CC BY-SA 3.0.

Att metallerna lagras på detta sätt förhindrar att de ackumulerade metallerna stör metaboliska processer i cellerna (Chaney et al. 2007). En annan studie på *A. murale* visade också att nickel inte fanns i epidermiscellernas cellväggar (Asemaneh et al. 2006). Resultaten indikerar att nickel lokaliseras till specifika cellstrukturer för att inte påverka övriga processer, vilket troligtvis utgör en betydande mekanism för metalltoleransen hos serpentinanpassade arter. För att undvika metalltoxicitet måste nickel som transporterats till bladen oskadliggöras. Detta sker bland annat genom komplexbildning med framför allt ämnen som citrat, malat och aminosyran histidin (Krämer 2010; Rascio & Navari-Izzo 2011). Kelatbildning underlättar transporten i xylemet samtidigt som den fria koncentrationen av toxiska metalljoner hålls låg (Krämer 2010; Rascio & Navari-Izzo 2011). Vilka transportvägar eller proteiner som tar nickel från xylemet till andra cellstrukturer är oidentifierat (van der Pas & Ingle 2019). Inga specifika transportörer för nickel har hittats (Rascio & Navari-Izzo 2011). Men troligtvis sker transporten av nickel med hjälp av metalltransporterande proteiner från ZIP familjen, vilket står för Zinc-regulated transporter Iron-regulated transporter Proteins (Rascio & Navari-Izzo 2011; van der Pas & Ingle 2019).

En studie av *A. murale* observerade också en förhöjd ackumulering i bladspetsarna (Tappero et al. 2007). De föreslog att bladspetsar fungerar som ett extra lagringsutrymme när nickelkoncentrationen överstiger vakuolernas lagringskapacitet. Liknande studier på *B. coddii* visade även att de högsta

koncentrationerna återfinns i de yttre vävnaderna, särskilt i epidermis vid bladets mittnerv och bladkanterna (Mesjasz-Przybyłowicz et al. 2001).

För stammen visar en annan studie på *B. coddii* att de högsta koncentrationerna fanns i epidermis, cortex och floemet (Mesjasz-Przybyłowicz & Przybyłowicz 2020). Se figur 6 nedan, observera att det inte är specifikt *B. coddii* men att bilden fortfarande är representativ för de beskrivna strukturerna.



Figur 6. Tvärsnitt av en stam för att illustrera cellstruktur. Bilden tillhör Josef Reischig Wikipedia commons, CC BY SA 3.0. Text har lagts till av författaren.

Arterna har med största sannolikhet liknande strategier för upptag, transport och lagring av nickel. Men skiljer sig i samspelet med markens mikroorganismer.

5.3 Studier kring ackumuleringsförmåga

Nedan finns en tabell för vardera art som inkluderar en sammanställning av flera försök som utförts på arten.

Tabell 1. En sammanställning av studier utförda på *A. murale*.

Ni-koncentration (mg/kg torrsvikt)	Biomassa (ton/ha)	Ni-utbyte (kg Ni/ha)	Experimentella förhållanden	Plats	Kommentar/ övriga slutsatser	Referenser
9 129	2,6	22,6	Gödsblad mark pH 6,9-7,3 Ni i marken: 3440 mg/kg	Fältförsök Albanien	Gödsling av marken ökade biomassan.	(Bani et al. 2007)
8 483	0,2	1,7	Ogödsblad mark pH 6,9 -7,3 Ni i marken: 3440 mg/kg			
	2,4	2,3	Gödsblad med komposterad avloppsslam pH 6,6	Fältförsök i Spanien	Låga resultat kan bero på platsen. (Kompost gav något högre biomassa än NPK)	(Cerqueira-Pérez et al. 2019)
16 000	5,93–7,6	94,3	Gödsblad mark pH 5,9-6,4	Fältförsök Österrike	Ytterligare försök över 3 år visade att Ni-koncentrationen inte minskade & upptaget fortsatte konstant.	(Hipfinger et al. 2022)
1 586 - 7 564			Vilda exemplar Inga tillsatser pH 6,8-8,6 Ni i marken: 872-3340 mg/kg	Prover från 10 platser i Kosovo (Serbien)		(Salihaj et al. 2018)
12 600 - 17 800 (24 300 i endast blad)			Torvbaserad planteringsjord + vattenlöslig näring + tillsatt Ni Varierande Ni-koncentration: 590-4700 mg/kg	Inomhus-odling med artificiell belysning och bevattning	Ni-koncentrationen varierar mellan individer under samma förhållanden. Ni-upptaget ökade med koncentrationen i marken men hade ett övre tak runt 16 000 i hela plantan.	(Smoak & Schnoor 2022)
11 300			Jord från Ni raffinaderi i Kanada pH 5,5-6 Ni i marken: 1720-2570 mg/kg	Växthus i USA	Testade olika pH-värden de mest optimala resultatet är inkluderade i tabellen (5-5,6).	(Li et al. 2003)
	10	77-112	Undersökte plantdensitet	Fältförsök Albanien	4–6 plantor/m ² optimalt.	(Bani et al. 2015)

Inkluderade studier visar att *A. murale* ackumulerar mellan 8 483 och 17 800 mg nickel per kg ovanjordisk biomassa i torrsvikt (tabell 1). Då exkluderas studien med prover från vilda exemplar av *A. murale* som visade koncentrationer mellan 1 586 och 7 564 mg/kg. Fyra studier inkluderade mängden biomassa som producerades i ton per hektar som var följande: 10; 7,6; 2,4; 0,2 och 2,6. De sistnämnda siffrorna ingår i samma studie och visade skillnaden mellan ogödslad respektive gödslad mark (tabell 1). Nickelutbytet, alltså mängden nickel som kan extraheras per hektar mark korrelerar med båda de tidigare nämnda parametrarna och kan därför beräknas genom koncentrationen multiplicerat med biomassan. Detta angavs vara upp till 112; 94,3; 2,3 (lågt utbyte för biomassan på 2,4 ton/ha som angetts); 1,7 (ogödslad) och 22,6 kg nickel per hektar (tabell 1).

Majoriteten av försöken i tabell 1 (5 av 7) har utförts i fält, vilket ger ett resultat som är jämförbara med förhållandena i praktisk PM. Försök där arten gav högst nickelutbyte har utförts i Albanien och Österrike, vilket är länder där arten förekommer naturligt. Ett fältförsök utfört i Spanien gav lägst resultat för nickelutbyte (tabell 1), vilket kan indikera att *A. murale* inte är lika lämpad för den miljön eller jordtypen.

Fem studier i tabell 1 har angett mark pH mellan 5,5 och 8,6 varav majoriteten var runt 6–7. Nickelkoncentrationen i marken eller substratet vid försöken var mellan 590 och 4700 mg/kg.

Övriga slutsatser som dras i studierna i tabell 1 är att gödsling av marken eller annan näringstillförsel drastiskt ökar biomassan och är därmed positivt för det totala nickelutbytet (tabell 1). Studien utförd i USA konstaterade att ett pH mellan 5,5-6 var optimalt för att maximera koncentrationen av nickel (tabell 1). En studie i labbmiljö inomhus konstaterar att upptaget och koncentrationen av nickel i växten korrelerar med koncentrationen i marken, men att det finns ett övre tak för vad växten kan ta upp. Koncentrationen planade ut runt 16 000 mg/kg, även om mängden nickel i substratet ökade (tabell 1). Antagligen begränsas det av ackumulationsmöjligheten i plantan eller potentiellt av markens förmåga att binda nickel. Växten absorberar alltså inte all nickel som finns tillgängligt i marken om mängden är tillräckligt stor. Det tyder på att det är fördelaktigt om arten producerar hög biomassa för att absorbera mer nickel och att extraktion i PM kommer kräva flera skördar i nickel-rik mark. Vidare visade fältförsöket som utförts under tre år i Österrike att nickelkoncentrationen i *A. murale* inte minskade märkbart allteftersom nickel extraherades, utan att upptaget fortsatte konstant i växten över tid (tabell 1). Studien av Bani et al. (2015) konstaterade även att en

plantdensitet på 4–6 plantor per kvadratmeter var optimalt, vilket var den studie som uppvisa högst resultat gällande nickel-utbytet.

Tabell 2. En sammanställning av studier utförda på *B. coddii*.

Ni-koncentration (mg/kg)	Biomassa (ton/ha)	Ni-utbyte (kg Ni/ha)	Experimentella förhållanden	Plats	Kommentar/ övriga slutsatser	Referenser
7 880	22	100	Gödslad Varierande substat-blandningar pH 6,2-8,3 Ni i marken: 0-10000 mg/kg	Växthus och fältförsök Nya Zeeland	Ni-upptag ökade med kvävetillgången. Biomassa & Ni-utbyte har uppskattats med studiens resultat.	(Robinson et al. 1997)
13 979*			Vilda exemplar Inga tillsatser pH 6,6 Ni i marken: 1040 mg/kg	10 prover i Sydafrika	*Medelvärde av de 10 proverna.	(Nemutandani et al. 2006)
7 940	1,08	8,54	Gödslad mark pH 5,9-6,4	Fältförsök Österrike	Ej växtens naturliga habitat.	(Hipfinger et al. 2022)
13 204 (med mykorrhiza) 4 953 (utan)			Jord från Agnes Mine i Sydafrika & lera Mykorrhiza Ni i marken: 1070 mg/kg pH 4.2–7.2 6,5	Krukförsök Sydafrika	Mykorrhiza ökade biomassa och Ni-koncentrationen.	(Turnau & Mesjasz-Przybylowicz 2003)

Inkluderade studier i tabell 2 visar att *B. coddii* kan ackumulera mellan 7 880 och 13 979 mg nickel per kg ovanjordisk biomassa i torrsvikt. Få studier finns på *B. coddii* i ett PM sammanhang, då endast två studier hittades som inkluderade biomassan i ton per hektar: 1,08 och 22 samt nickelutbytet: 8,54 och 100 kg nickel per hektar (tabell 2). Resultaten skiljer sig kraftigt, detta beror på att de lägre värdena kommer från ett fältförsök i Österrike. *B. coddii* som är inhemsk för Sydafrika presterade alltså inte väl under förutsättningarna och klimatet i Österrike. Däremot var det andra försöket utfört i Nya Zeeland, vilket tyder på att arten klarar andra liknande klimat som Sydafrika.

Markens pH uppmättes i alla studier i tabell 2 och hade en stor variation mellan 4,2–8,3. Nickelhalten i marken vid försöken var runt 1 000 mg/kg jord. Övriga slutsatser som drogs i studierna var att växtens upptag av nickel ökade med kväveinnehållet i marken (tabell 2), vilket tyder på att NPK gödsling är fördelaktigt för att öka utbytet av nickel. Turnau & Mesjasz-Przybylowicz (2003) kom även fram till att mykorrhiza ökar koncentrationen av nickel och biomassan hos *B. coddii* (tabell 2).

I jämförelse med *A. murale* har *B. coddii* betydligt högre biomassa, om studien från Österrike exkluderas. Arterna kan skilja sig 1 meter i höjd vilket resulterar i denna stora skillnad. En hög biomassa anses vara fördelaktigt, då växten kan extrahera en större mängd nickel även om nickelkoncentrationen i vävnaden är begränsad.

För *B. coddii* hittas endast siffran 100 kg nickel per hektar samt 8,54 kg per hektar (i Österrike) för nickelutbytet (tabell 2). Medan fler försök utförts för *A. murale* som estimerats ge 22,6; 94,3 och 77–112 kg nickel per hektar (tabell 1). Denna aspekt är högst relevant för PM då en effektiv nickelutvinning är konceptets grund.

6. Diskussion

6.1 Ackumulationsförmåga

Resultaten i denna litteraturstudie visar att både *A. murale* och *B. coddii* har en hög ackumulationsförmåga av nickel under gynnsamma förhållanden. Som etablerats i tidigare forskning är båda arterna hyperackumulatörer av nickel, med en förmåga att ackumulera nivåer långt över gränsvärdet på 1000 mg/kg biomassa. *A. murale* ackumulerade upp till 16 gånger mer och *B. coddii* upp till 14 gånger mer än gränsvärdet (tabell 1 & 2).

En av anledningarna till att växterna är lämpade för PM är att nickel lagras i de ovanjordiska växtdelarna. Den högsta koncentrationen hittades i bladens epidermis och mesofyllceller. Dessutom är arterna anpassade till nickelrika serpentinjordar och har god tillväxt under dessa förhållanden. Eftersom båda arterna är perenna kan de ovanjordiska växtdelarna skördas för nickelextraktion medan rötter och nedre växtdelar lämnas kvar i marken. Växten producerar då ny biomassa och ytterligare nickelupptag. Detta innebär att en stabil extrahering av nickel kan etableras över tid, vilket även är ekonomiskt fördelaktigt.

Resultaten från tabell 1 och 2 visar dock stora variationer mellan studierna. Variationerna gäller både koncentrationen av nickel i växten, den biomassa som kan produceras och det totala nickelutbytet. Detta kan delvis bero på de experimentella förhållandena. Varierande variabler var till exempel tillgängligt nickel i marken, temperatur, transpirationshastighet, närings- och vattentillgång, som alla är faktorer som påverkar upptaget.

De värden som inkluderats under Ni-koncentration i tabell 1 och 2 är koncentrationen för alla ovanjordiska växtdelar och kan därför verka låg i jämförelse med andra siffror. Ofta refereras till Mesjasz-Przybyłowicz et al. (2004) för den högsta uppmätta koncentrationen av nickel till 76 000 mg/kg hos *B. coddii*. Denna höga siffra beror på att provet endast är från bladvävnad. Som etablerat lagras majoriteten av nickel i bladen och i betydligt lägre koncentration i stam och skott. Det har alltså stor betydelse vilka växtdelar som analyserats. I vissa studier har det inte heller tydligt framgått hur stor del av plantan som inkluderats i mätvärdena och detta kan också bidra till variationen i resultaten. För stor vikt bör därför inte läggas enbart vid nickelkoncentrationen och det försvårar en korrekt beräkning av nickelutbytet utan att utföra större fältförsök. Endast ett fåtal studier hittades för nickelutbytet, speciellt för arten *B. coddii* och de som finns uppvisar variation.

6.2 Faktorer som påverkar nickelupptag

Resultaten visar även att nickelupptaget påverkas av flera biologiska och miljömässiga faktorer. Arternas praktiska användbarhet i PM varierar stort beroende på odlingsförhållanden och geografiskt område. Generellt presterar arten som bäst i sitt ursprungsland eller i klimat med liknande förhållanden, vilket bör tas i beaktning inför val av art i ett verkligt PM system. Introduktion av en art till ett nytt geografiskt område kan dessutom innebära en risk att arten sprids, vilket i sådana fall bör bevakas noga. Eftersom kunskap om hur *A. murale* och *B. coddii* interagerar med arter utanför deras naturliga habitat saknas, finns en risk att arterna blir invasiva och skapar problem i nya ekosystemen. Det finns också en risk att arter som introducerats uppvisar låg tillväxt eller begränsad biomassa under nya klimatförhållanden. Vilket i så fall påverkar metallutvinningen negativt och kan innebära att fler kostsamma och onödiga åtgärder krävs. Användning av inhemska arter bör därför prioriteras i PM system och valet av hyperackumulerande art bör i första hand baseras på lokala anpassningar. *A. murale* verkar vara en stabil art för PM i medelhavsklimat. *A. murale* som ursprungligen är från sydöstra Europa är därför mest relevant för utvinning i det området. Arten har testats framgångsrikt i fältförsök i både Albanien och Österrike, där biologisk nickelutvinning skulle vara möjlig (tabell 1).

Samtidigt framstår *B. coddii* som en mycket intressant art på grund av sin höga biomassa och snabba tillväxt. Det finns inte tillräckligt med försök för att fastställa hur stor mängd nickel som skulle kunna extraheras, men ett framgångsrikt försök visar att arten har stor potential (tabell 2). Däremot verkar den vara mer känslig för klimat utanför sitt naturliga habitat, som är Sydafrika. Det låga nickelutbytet som uppmättes i ett fältförsök i Österrike (tabell 2) tyder på att arten inte är lika anpassningsbar till andra klimat. *B. coddii* är antagligen inte relevant för utvinning i Europa, både på grund av artens begränsade tillväxt i klimatet (tabell 2) och spridningsrisken.

En annan viktig aspekt är betydelsen av biologiska interaktioner i rhizosfären. Hos *B. coddii* verkar symbios med arbuskulära mykorrhizasvampar vara viktig för att maximera biomassan och nickelupptaget. Hos *A. murale* har i stället nickel-toleranta bakterier i rhizosfären kopplats till en ökad ackumulering av nickel (tabell 1 & 2).

Tillgängligheten av nickel i marken påverkar upptaget. Tidigare forskning visar att pH-värdet påverkar metallers löslighet och därmed tillgängligheten för växter (Chaney et al. 2007; Kikis et al. 2024). En studie av *A. murale* visade att arten ackumulerade mest nickel i neutrala till svagt basiska serpentinjordar vilket är det vanligaste pH-värdet i artens naturliga habitat i Balkanregionen (Kukier et al.

2004). Jordprover från Kosovo där *A. murale* växte naturligt uppmättes neutralt till svagt basiskt pH-värde mellan 6,8–8,6 (tabell 1). Däremot uppvisade växtproverna från dessa platser en lägre nickelkoncentration än andra fält och krukförsök (tabell 1). Annan forskning visar att låga pH-värden ökar lösligheten av nickel i marken, specifikt katjoner (Li et al. 2003; Chaney et al. 2007). Studien i USA av Li et al. (2003) kom fram till att pH 5,5–6 gav den högsta koncentrationen av nickel i *A. murale*. En studie på *B. coddii* uppgav liknande resultat där ett surt pH-värde runt 5,5 ökade plantornas upptag av nickel medan basiska värden runt 8,7 minskade upptaget (Robinson et al. 1999). Försurning av marken tenderar att bryta ned metallkomplex och omvandla dem till jonformer som är tillgängliga för växter, främst Ni²⁺. Teoretiskt sett påverkas även tillgängligheten av näringsämnen och metaller av mängden organiskt material i marken samt delvis av växtens egna fysiologiska mekanismer. Organiskt material kan bilda starka komplex med nickel, och ju högre halt organiskt material ju mer nickel kan bindas. Vid ett lägre pH-värde kan däremot lösligheten hos dessa komplex öka, vilket leder till ökad tillgänglighet av nickel för växter (Rinklebe & Shaheen 2017).

En annan viktig aspekt är näringstillförsel, som visat sig ha stor betydelse för upptaget och PM systemens effektivitet. Flera försök visar att kvävegödsling och högre näringstillgång ökar biomassan och därmed det totala nickelutbytet (tabell 1 & 2). Detta är särskilt betydelsefullt eftersom många serpentinjordar är mycket näringsfattiga. Resultaten tyder därför på att effektiv PM kräver åtgärder före och under odlingen, snarare än att växterna enbart odlas under naturliga förhållanden.

6.3 Hållbarhet och praktisk användning

Ur ett hållbarhetsperspektiv har PM vissa potentiella fördelar jämfört med traditionell gruvbrytning. Inhemska arter som odlats med den omgivande miljön i åtanke har generellt mindre påverkan på ekosystem och landskap än gruvbrytning. En livscykelanalys (LCA) av PM system med *A. murale* inklusive utvinningsprocessen fastställde att miljöpåverkan var likvärdig med traditionellt jordbruk (Richardson & Mirkouei 2026). Artikeln inkluderade även ytterligare åtgärder för att minska metodens miljöpåverkan. De inkluderade att använda överbliven biomassa från utvinningen för näring, förhindra erosion av marken och att värmen som avges i förbränningsprocessen tas till vara på (Richardson & Mirkouei 2026). Även effektivare metoder för att separera nickel från biomassa bidrar till att minska processens resursförbrukning (Richardson & Mirkouei 2026).

En annan fördel är att serpentinjordar, som ofta är oanvändbara för konventionellt jordbruk, kan användas för metallproduktion. Ytterligare en möjlig plats för PM är gruvbrytningens avfallsplatser, som fortfarande innehåller betydande halter av metaller (Akinbile & Mbohwa 2025). Detta innebär att PM kan skapa ett ekonomiskt värde i områden där marken annars har begränsad användning. För att en metod ska vara möjlig på större skala krävs en ekonomisk lönsamhet, vilket PM av nickel anses vara av flera källor (Chaney et al. 2007; Bani et al. 2015; Kafle et al. 2022; Tan et al. 2023). Men den ekonomiska lönsamheten är även starkt beroende av framtida nickelpriiser, markkostnader och hur effektivt nickel kan utvinnas ur biomassan.

I dagsläget finns endast enstaka aktörer som arbetar kommersiellt med PM, exempel på företag är Genomines, som i partnerskap med biltillverkare förbereder för större odlingar i Sydafrika (*Genomines* u.å.). Metalplant som också är under uppstart av PM av nickel i norra Albanien (*Metalplant* u.å.). Ett annat exempel är Botanickel, ett samarbete mellan ett stålföretag och forskningsbolag som främst utför pilotförsök (*Botanickel* u.å.). Trots detta befinner sig PM fortfarande i ett tidigt utvecklingsstadium och fler investeringar och aktörer krävs för att tekniken ska närma sig storskaligt kommersiellt bruk.

Samtidigt finns flera begränsningar och utmaningar. PM är en tidskrävande process som kräver flera odlings- och skördeår innan en större mängd nickel har extraherats. Även om konceptet och odlingsprocessen har fördelar i jämförelse med traditionell utvinning kräver PM insatser som också har en miljöpåverkan. Tillförsel av näring, eventuell bevattning, maskiner i odlingen samt förbränningen av biomassa och extraktionsprocessen för rent nickel kräver resurser, energi och kemikalier (Richardson & Mirkouei 2026). Odlingsprocessen är också beroende av klimat, markegenskaper och biologiska faktorer som kan vara svåra att kontrollera i stor skala. Dessutom är den globala efterfrågan på nickel stor och det är inte möjligt att fullständigt ersätta konventionell nickelutvinning med PM.

Ingen utvinningsmetod är långsiktigt hållbar eftersom nickel är en ändlig resurs som kommer att ta slut med båda metoderna. Nkrumah et al. (2016) uppskattade att PM av områden med ungefär 2 000 mg nickel/kg mark kan utföras lönsamt under 27–54 år, alternativt 15–30 år med en intensiv produktion. En annan artikel av van der Ent et al. (2026) uppskattade liknande att utvinning är möjlig under 30–60 år under samma förhållanden. Därför är även återvinning av nickel inom industrier mycket viktigt.

Metoden har alltså potential att bli ett komplement till traditionell brytning men är inte en lösning på den ökade nickelefterfrågan. Eftersom forskningen som finns

för arterna i liten utsträckning är överförbar till andra geografiska platser, krävs specifika försök i potentiella utvinningsområden för att fastställa vilket nickelutbyte och lönsamhet som är möjlig för PM på specifika platser. Det krävs att platsen har en hög nickelhalt, inte används för annan verksamhet, har förutsättningar för maskinarbete och inte stör omgivande miljö, både ekosystem och människor. Hur stora ytor som skulle kunna användas för PM är fortfarande oklart.

Vissa serpentinjordar är dessutom skyddade områden på grund av den unika biodiversiteten och kan såklart inte användas (van der Ent et al. 2026). För att minimera påverkan på biodiversiteten på nickelrika jordar skulle PM fokuseras till redan degraderad mark eller tidigare gruvmarker. Dessutom kan en utspridd utvinning gynna biodiversiteten. En sådan strategi skulle dessvärre även innebära mer transporter och anläggningar för extraktionsprocessen av nickel ur biomassan.

Antalet fältförsök är fortfarande begränsat, särskilt för *B. coddii*. Vissa utav studierna har genomförts under kontrollerade växthusförhållanden, vilket inte fullt ut motsvarar praktiska PM system. Framtida forskning bör därför fokusera på långsiktiga fältförsök och hur den växtbaserade nickelextraktionen kan optimeras. Även möjligheten att optimera arternas tillväxt och ackumulation av nickel med hjälp av tekniker såsom CRISPR och Cas9 bör utforskas.

7. Slutsats

A. murale och *B. coddii* är två hyperackumulerande växter med liknande ackumulationsförmåga i sina ovanjordiska delar. Båda arterna är lämpliga för phytomining av nickel. Deras effektivitet och användbarhet skiljer sig beroende på miljöförhållanden och biologiska egenskaper. *A. murale* är mest lämpad för Europa där arten har sitt ursprung och *B. coddii* är lämpad för Sydafrika men har även visat god tillväxt i Nya Zeeland.

Det är svårt att fastställa exakt hur mycket nickel respektive art kan extrahera eftersom resultaten skiljer sig. Det högsta resultatet för *A. murale* var 112 kg nickel per hektar och 100 kg nickel per hektar för *B. coddii*. *A. murale* uppvisade generellt höga och stabila nickelkoncentrationer i flera olika försök, medan *B. coddii* producerar betydligt större biomassa, vilket under optimala förhållanden kan ge ett högt nickelutbyte.

Flera faktorer påverkar växtens upptag av nickel, de mest framstående var markens pH, växttillgängligt nickel, näringstillgång, transpirationshastighet, klimat och förekomst av mikroorganismer i form av mykorrhizasvampar eller bakterier. Effektiv utvinning uppnås med kunskap kring artens optimala förhållanden gällande ovannämnda faktorer samt genom optimalt antal planter per ytenhet, näringsform och bevattning.

Sammantaget visar resultatet att båda arterna har potential för phytomining, men att effektiviteten är starkt beroende av geografiska och biologiska förhållanden. En storskalig kommersiell utvinning är fortfarande avlägset. Framtida tillämpning av *A. murale* och *B. coddii* bör fokuseras till artens naturliga klimatförhållande med näringstillförsel. Långsiktiga fältförsök krävs för att minska osäkerheter kring nickelutbyte och systemens effektivitet.

Referenser

- Abou-Shanab, R., Angle, J., Delorme, T., Chaney, R., Van Berkum, P., Moawad, H., Ghanem, K. & Ghazlan, H. (2003). Rhizobacterial effects on nickel extraction from soil and uptake by *Alyssum murale*. *New Phytologist*, 158 (1), 219–224. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00721.x>
- Abou-Shanab, R.A.I., Angle, J.S. & Chaney, R.L. (2006). Bacterial inoculants affecting nickel uptake by *Alyssum murale* from low, moderate and high Ni soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (9), 2882–2889. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.045>
- Akinbile, B.J. & Mbohwa, C. (2025). Incorporating hyperaccumulating plants in phytomining, remediation and resource recovery: recent trends in the African region – a review. *RSC Sustainability*, 3 (4), 1652–1671. <https://doi.org/10.1039/D5SU00021A>
- Arrobas, D., Hund, K., McCormick, M., Ningthoujam, J. & Drexhage, J. (2017). The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/207371500386458722> [2026-04-06]
- Asemaneh, T., Ghaderian, S.M., Crawford, S.A., Marshall, A.T. & Baker, A.J.M. (2006). Cellular and subcellular compartmentation of Ni in the Eurasian serpentine plants *Alyssum bracteatum*, *Alyssum murale* (Brassicaceae) and *Cleome heratensis* (Capparaceae). *Planta*, 225 (1), 193–202. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0340-y>
- Axmanová, I. (2022). www.FloraN.Veg.EU [2026-04-27]
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S. & Morel, J.L. (2015). Improving the Agronomy of *Alyssum murale* for Extensive Phytomining: A Five-Year Field Study. *International Journal of Phytoremediation*, 17 (2), 117–127. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.862204>
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S., Morel, J.L. & Mullai, A. (2007). In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania). *Plant and Soil*, 293 (1–2), 79–89. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9245-1>
- Baumeister, J.L., Hausrath, E.M., Olsen, A.A., Tschauer, O., Adcock, C.T. & Metcalf, R.V. (2015). Biogeochemical weathering of serpentinites: An examination of incipient dissolution affecting serpentine soil formation. *Applied Geochemistry*, 54, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.002>
- Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M.H., Bhattarai, A. & Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC Advances*, 12 (15), 9139–9153. <https://doi.org/10.1039/d2ra00378c>
- Bhat, B.A., Rather, M.A., Bilal, T., Nazir, R., Qadir, R.U. & Mir, R.A. (2025). Plant hyperaccumulators: a state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1631378. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1631378>
- Botanickel (u.å.). <https://www.botanickel.com/> [2026-05-12]
- Boyd, R.S. & Martens, S.N. (1998). The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions. *CHEMOECOLOGY*, 8 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s000490050002>
- Brooks, R.R., Chambers, M.F., Nicks, L.J. & Robinson, B.H. (1998). Phytomining. *Trends in Plant Science*, 3 (9), 359–362. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01283-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01283-7)
- Brooks, R.R., Lee, J., Reeves, R.D. & Jaffre, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of*

- Geochemical Exploration*, 7, 49–57. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90074-7)
- Cerdeira-Pérez, A., Monterroso, C., Rodríguez-Garrido, B., Machinet, G., Echevarria, G., Prieto-Fernández, A. & Kidd, P.S. (2019). Implementing nickel phytomining in a serpentine quarry in NW Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.001>
- Chaney, R.L., Angle, J.S., Broadhurst, C.L., Peters, C.A., Tappero, R.V. & Sparks, D.L. (2007). Improved Understanding of Hyperaccumulation Yields Commercial Phytoextraction and Phytomining Technologies. *Journal of Environmental Quality*, 36 (5), 1429–1443. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0514>
- Church, C. & Crawford, A. (2020). Minerals and the Metals for the Energy Transition: Exploring the Conflict Implications for Mineral-Rich, Fragile States. I: Hafner, M. & Tagliapietra, S. (red.) *The Geopolitics of the Global Energy Transition*. Springer International Publishing. 279–304. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_12
- Dilshara, P., Abeysinghe, B., Premasiri, R., Dushyantha, N., Ratnayake, N., Senarath, S., Sandaruwan Ratnayake, A. & Batapola, N. (2024). The role of nickel (Ni) as a critical metal in clean energy transition: applications, global distribution and occurrences, production-demand and phytomining. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259, 105912. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105912>
- van der Ent, A., Aarts, M.G.M., Morel, J.L., Chaney, R.L., Baker, A.J.M., Simonnot, M.-O., Laubie, B., Pollard, A.J., Tang, Y.-T., Qiu, R.-L. & Echevarria, G. (2026). Agromining of Nickel: Finally Becoming a Reality at Commercial Scale. *Environmental Science & Technology*, 60 (9), 6852–6861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c08259>
- Flora Veg* (u.å.). (*Odontarrhena muralis*). <https://floraveg.eu/taxon/overview/Odontarrhena%20muralis> [2026-05-04]
- García Del Real, P. & Vishal, V. (2016). Mineral Carbonation in Ultramafic and Basaltic Rocks. *Geologic Carbon Sequestration*. Springer International Publishing. 213–229. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27019-7_11
- Garnica-Díaz, C., Berazaín Iturralde, R., Cabrera, B., Calderón-Morales, E., Felipe, F.L., García, R., Hechavarría, J.L.G., Guimarães, A.F., Medina, E., Paul, A.L.D., Rajakaruna, N., Restrepo, C., Siebert, S.J., van den Berg, E., van der Ent, A., Velasquez, G. & M. Hulshof, C. (2023). Global Plant Ecology of Tropical Ultramafic Ecosystems. *The Botanical Review*, 89 (2), 115–157. <https://doi.org/10.1007/s12229-022-09278-2>
- Genomines (u.å.). <https://www.genomines.com/> [2026-05-12]
- Ghaderian, S.M., Mohtadi, A., Rahiminejad, M.R. & Baker, A.J.M. (2007). Nickel and other metal uptake and accumulation by species of *Alyssum* (Brassicaceae) from the ultramafics of Iran. *Environmental Pollution*, 145 (1), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.016>
- Giljum, S., Maus, V., Sonter, L., Luckeneder, S., Werner, T., Lutter, S., Gershenzon, J., Cole, M.J., Siqueira-Gay, J. & Bebbington, A. (2025). Metal mining is a global driver of environmental change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6 (7), 441–455. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00683-w>
- Greyling, S.-A. & Pillay, L. (2026). Nickel hyperaccumulators: A review of progress in plant uptake. *Journal of Environmental Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2026.05.018>
- Herawati, H., Mallongi, A., Daud, A., Syam, A., Amiruddin, R., Erniyasih, E. & Tryanda, S. (2025). Ecological and Human Health Risks of Nickel

- Mining: A Systematic Review. *Journal of Public Health and Pharmacy*, 5, 678–695. <https://doi.org/10.56338/jphp.v5i3.7283>
- Hipfinger, C., Laux, M. & Puschenreiter, M. (2022). Comparison of four nickel hyperaccumulator species in the temperate climate zone of Central Europe. *Journal of Geochemical Exploration*, 234, 106933. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106933>
- IEA (2025). Global EV Outlook 2025. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> [2026-04-15]
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A. & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Karsadi, K. & Aso, L. (2023). Multidimensional Impacts of Nickel Mining Exploitation towards the Lives of the Local Community. *Jurnal Ilmu Sosial dan Humaniora*, 12 (2), 222–227. <https://doi.org/10.23887/jish.v12i2.58881>
- Kikis, C., Thalassinou, G. & Antoniadis, V. (2024). Soil Phytomining: Recent Developments—A Review. *Soil Systems*, 8 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010008>
- Krämer, U. (2010). Metal Hyperaccumulation in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61 (1), 517–534. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112156>
- Kukier, U., Peters, C.A., Chaney, R.L., Angle, J.S. & Roseberg, R.J. (2004). The Effect of pH on Metal Accumulation in Two *Alyssum* Species. *Journal of Environmental Quality*, 33 (6), 2090–2102. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.2090>
- Li, Y.-M., Chaney, R.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. & Nelkin, J. (2003). Phytoextraction of Nickel and Cobalt by Hyperaccumulator *Alyssum* Species Grown on Nickel-Contaminated Soils. *Environmental Science & Technology*, 37 (7), 1463–1468. <https://doi.org/10.1021/es0208963>
- Macmillan Voskoboynik, D. & Farrugia, J.D. (2022). Nickel and the frontiers of carbon neutrality. Universitat Pompeu Fabra. <https://doi.org/10.31009/jhu.upf.ppc.2022.pb01>
- Mervine, E.M., Valenta, R.K., Paterson, J.S., Mudd, G.M., Werner, T.T., Nursamsi, I. & Sonter, L.J. (2025). Biomass carbon emissions from nickel mining have significant implications for climate action. *Nature Communications*, 16 (1), 481. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55703-y>
- Mesjasz-Przybyłowicz, J., Nakonieczny, M., Migula, P., Augustyniak, M., Tarnawska, M., Reimold, W., Koerbe, C., Przybyłowicz, W. & Głowacka, E. (2004). Uptake of cadmium, lead, nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii*. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica* 46: 75–85.,
- Mesjasz-Przybyłowicz, J., Przybyłowicz, W. & Pineda, C. (2001). Nuclear microprobe studies of elemental distribution in apical leaves of the Ni hyperaccumulator *Berkheya coddii*. *South African Journal of Science*, 97 (11–12), 591–593
- Mesjasz-Przybyłowicz, J. & Przybyłowicz, W.J. (2020). Ecophysiology of nickel hyperaccumulating plants from South Africa – from ultramafic soil and mycorrhiza to plants and insects. *Metallomics*, 12 (7), 1018–1035. <https://doi.org/10.1039/c9mt00282k>
- Metalplant (u.å.). <https://metalplant.com/press/> [2026-05-12]
- Mnguni, E.S. (2020). Review of water resources and management in South africa. *Proceedings of SDP 2020*, november 18 2020. 197–206. <https://doi.org/10.2495/SDP200161> [2026-05-12]

- Moradi, A.B., Oswald, S.E., Nordmeyer-Massner, J.A., Pruessmann, K.P., Robinson, B.H. & Schulin, R. (2010). Analysis of nickel concentration profiles around the roots of the hyperaccumulator plant *Berkheya coddii* using MRI and numerical simulations. *Plant and Soil*, 328 (1–2), 291–302. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0109-8>
- Muimba-Kankolongo, A., Banza Lubaba Nkulu, C., Mwitwa, J., Kampemba, F.M. & Mulele Nabuyanda, M. (2022). Impacts of Trace Metals Pollution of Water, Food Crops, and Ambient Air on Population Health in Zambia and the DR Congo. Senapathi, V. (red.) (Senapathi, V., red.) *Journal of Environmental and Public Health*, 2022 (1), 4515115. <https://doi.org/10.1155/2022/4515115>
- Nate, S., Bilan, Y., Kurylo, M., Lyashenko, O., Napieralski, P. & Kharlamova, G. (2021). Mineral Policy within the Framework of Limited Critical Resources and a Green Energy Transition. *Energies*, 14 (9), 2688. <https://doi.org/10.3390/en14092688>
- Nemutandani, T., Dutertre, D., Chimuka, L., Cukrowska, E. & Tutu, H. (2006). The potential of *Berkheya coddii* for phytoextraction of nickel, platinum, and palladium contaminated sites. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 88 (2), 175–185. <https://doi.org/10.1080/02772240600585842>
- Nickel institute (u.å.). <https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/#01-nickel-properties> [2026-05-11]
- Nkrumah, P.N., Baker, A.J.M., Chaney, R.L., Erskine, P.D., Echevarria, G., Morel, J.L. & Van Der Ent, A. (2016). Current status and challenges in developing nickel phytomining: an agronomic perspective. *Plant and Soil*, 406 (1–2), 55–69. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2859-4>
- Olafsdottir, A.H. & Sverdrup, H.U. (2021). Modelling Global Nickel Mining, Supply, Recycling, Stocks-in-Use and Price Under Different Resources and Demand Assumptions for 1850–2200. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38 (2), 819–840. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00370-y>
- van der Pas, L. & Ingle, R.A. (2019). Towards an Understanding of the Molecular Basis of Nickel Hyperaccumulation in Plants. *Plants*, 8 (1), 11. <https://doi.org/10.3390/plants8010011>
- Pivetz, B., E. (2001). Ground Water Issue: Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. (EPA/540/S-01/500). United States Environmental Protection Agency.
- Plants of the World (u.å.a). *Odontarrhena muralis*. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:941572-1> [2026-04-22]
- Plants of the World (u.å.b). *Berkheya coddii*. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:184533-1/general-information> [2026-04-22]
- Rascio, N. & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180 (2), 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Jaffré, T., Erskine, P.D., Echevarria, G. & van der Ent, A. (2018). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloids trace elements. *New Phytologist*, 218 (2), 407–411. <https://doi.org/10.1111/nph.14907>
- Riaz, A., Sarker, M.R., Saad, M.H.M. & Mohamed, R. (2021). Review on Comparison of Different Energy Storage Technologies Used in Micro-Energy Harvesting, WSNs, Low-Cost Microelectronic Devices: Challenges and Recommendations. *Sensors*, 21 (15), 5041. <https://doi.org/10.3390/s21155041>

- Richardson, K. & Mirkouei, A. (2026). Plant-based mineral extraction: A review of phytomining as a nature-inspired solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 236, 116989. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116989>
- Rinklebe, J. & Shaheen, S.M. (2017). Redox chemistry of nickel in soils and sediments: A review. *Chemosphere*, 179, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.153>
- Robinson, B.H., Brooks, R.R. & Clothier, B.E. (1999). Soil Amendments Affecting Nickel and Cobalt Uptake by *Berkheya coddii*: Potential Use for Phytomining and Phytoremediation. *Annals of Botany*, 84 (6), 689–694. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0970>
- Robinson, B.H., Brooks, R.R., Howes, A.W., Kirkman, J.H. & Gregg, P.E.H. (1997). The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining. *Journal of Geochemical Exploration*, 60 (2), 115–126. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00036-8)
- Robinson, B.H., Lombi, E., Zhao, F.J. & McGrath, S.P. (2003). Uptake and distribution of nickel and other metals in the hyperaccumulator *Berkheya coddii*. *New Phytologist*, 158 (2), 279–285. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00743.x>
- Rue, M., Paul, A.L.D., Echevarria, G., van der Ent, A., Simonnot, M.O. & Morel, J.L. (2020). Uptake, translocation and accumulation of nickel and cobalt in *Berkheya coddii*, a ‘metal crop’ from South Africa. *Metallomics*, 12 (8), 1278–1289. <https://doi.org/10.1039/D0MT00099J>
- Rylott, E.L. & van der Ent, A. (2025). Harnessing hyperaccumulator plants to recover technology-critical metals: where are we at? *New Phytologist*, 246 (3), 859–866. <https://doi.org/10.1111/nph.20449>
- Salgado, R.M., Danzi, F., Oliveira, J.E., El-Azab, A., Camanho, P.P. & Braga, M.H. (2021). The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules*, 26 (11), 3188. <https://doi.org/10.3390/molecules26113188>
- Salihaj, M., Bani, A., Shahu, E., Benizri, E. & Echevarria, G. (2018). Metal accumulation by the ultramafic flora of Kosovo. *Ecological Research*, 33 (4), 687–703. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1635-8>
- Sansone, N.M.S., Mello, L.S., Marques, L.F.A. & Marson, F.A.L. (2026). Mining Activities Have Exposed Individuals of an Indigenous Tribe in Brazil to Toxic and Potentially Toxic Elements. *Journal of Racial and Ethnic Health Disparities*, 13 (3), 1611–1627. <https://doi.org/10.1007/s40615-026-02918-y>
- Sellami, R., Gharbi, F., Rejeb, S., Rejeb, M.N., Henchi, B., Echevarria, G. & Morel, J.-L. (2012). Effects of Nickel Hyperaccumulation on Physiological Characteristics of *Alyssum Murale* Grown on Metal Contaminated Waste Amended Soil. *International Journal of Phytoremediation*, 14 (6), 609–620. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.619225>
- Sheoran, V., Sheoran, A.S. & Poonia, P. (2009). Phytomining: A review. *Minerals Engineering*, 22 (12), 1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>
- SLU Artdatabanken (u.å.). *Artfakta: Taxonomi*. <https://artfakta.se/taxa/220413/taxonomi> [2026-06-05]
- Smoak, R.A. & Schnoor, J.L. (2022). Nickel Hyperaccumulator Biochar as a Ni-Adsorbent and Enhanced Bio-ore. *ACS Environmental Au*, 2 (1), 65–73. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00018>
- South African National Biodiversity Institute, (SANBI) (2025). *Berkheya coddii* Roessler. <https://pza.sanbi.org/berkheya-coddii>
- Stevanovic, V., Tan, K. & Iatrou, G. (2003). Distribution of the endemic Balkan flora on serpentine I. - obligate serpentine endemics. *Plant Systematics*

- and Evolution*, 242 (1–4), 149–170. <https://doi.org/10.1007/s00606-003-0044-8>
- Tan, H.W., Pang, Y.L., Lim, S. & Chong, W.C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103043. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>
- Tappero, R., Peltier, E., Gräfe, M., Heidel, K., Ginder-Vogel, M., Livi, K.J.T., Rivers, M.L., Marcus, M.A., Chaney, R.L. & Sparks, D.L. (2007). Hyperaccumulator *Alyssum murale* relies on a different metal storage mechanism for cobalt than for nickel. *New Phytologist*, 175 (4), 641–654. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02134.x>
- Tumi, A., Mihailović, N., Gajić, M., Niketić, M. & Tomović, G. (2012). Comparative Study of Hyperaccumulation of Nickel by *Alyssum murale* s.l. Populations from the Ultramafics of Serbia. *Pol. J. Environ. Stud.*, 21 (6), 1855–1866
- Turnau, K. & Mesjasz-Przybylowicz, J. (2003). Arbuscular mycorrhiza of *Berkheya coddii* and other Ni-hyperaccumulating members of Asteraceae from ultramafic soils in South Africa. 13 (4), 185–190. <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0213-6>
- Whittaker, R.H. (1954). The Ecology of Serpentine Soils. *Ecology*, 35 (2), 258–288. <https://doi.org/10.2307/1931126>

Publicering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) deponeras och publiceras i SLU:s elektroniska publiceringsverktyg (Epsilon) i enlighet med utbildningshandbokens kapitel 9 (internt.slu.se/utbildningshandboken). Deponering innebär att registrera arbetet och ladda upp fulltextfilen.

Som student och författare äger du upphovsrätten till ditt arbete. Publiceringen av ditt arbete kan därför inte ske utan ditt godkännande. Du kan godkänna kommande publicering genom att underteckna här nedan. Du kan också ge ditt godkännande till publicering i samband med inlämningen. I bibliotekets nya mall för studentarbeten finns möjlighet att välja om arbetet ska publiceras eller inte.

- Om du kryssar i Ja kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata att bli synliga, sökbara och möjliga att läsa och ladda ned för alla på internet. Om ni är fler än en person som skriver arbetet behöver ni vara överens.
Läs om [SLU:s publiceringsavtal](http://slu.se/publiceringsavtal) hos biblioteket (slu.se/publiceringsavtal).
- Om du kryssar i Nej kommer endast metadata och abstract att bli synliga och sökbara. Arbetet ska oavsett detta deponeras i Epsilon så att fulltexten (pdf-filen) kan arkiveras elektroniskt, i enlighet med arkivlagen.

Underskrift – publicering

- JA, jag ger härmed min tillåtelse till att mitt kommande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.
- NEJ, jag ger inte min tillåtelse att publicera fulltexten av mitt kommande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering. Metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Datum

Namnsteckning

Namnförtydligande

Signature page

This document has been electronically signed
using eduSign.

eduSign