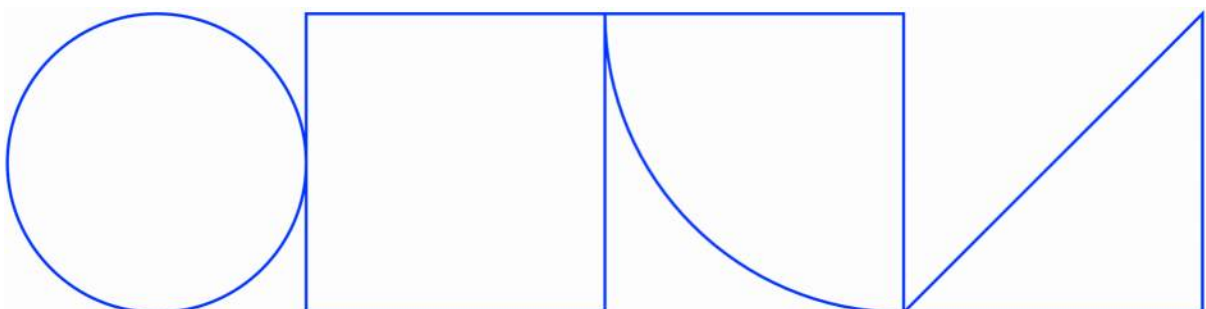


# TIDSOPTIMERAD METODIK FÖR BESTÄMNING AV ÄMNEN I CIRKULÄRA MATERIALFLÖDEN

Jan Englund, Lars Stenlid, Emma Rehnström, Amena Alshaban  
Skanska Sverige AB

2025-01-14

**SKANSKA**



## **Förord**

Projektet är ett första steg och ger underlag till att ta fram en produktionsnära och tidsoptimerad metodik för bestämning av kritiska grundämnen i cirkulära materialflöden för branschgemensam användning genom laborativa försök. Initiativ till projektet kom från Lars Stenlid, som även samlat in material till undersökningarna. Jan Englund och Lars Stenlid har genomfört majoriteten av undersökningarna och Emma Rehnström och Amena Alshaban har analyserat provresultaten.

Ett stort tack riktas till medlemmarna i referensgruppen, som kommit med givande återkopplingar och deltagit i goda diskussioner. Slutligen riktas ett mycket stort tack till SBUF, som varit finansiär av projektet och möjliggjort dess genomförande. Projektets organisation var:

### **Arbetsgrupp:**

Lars Stenlid (geologisk specialist)

Emma Rehnström (geologisk specialist)

Jan Englund (projektledare)

Amena Alshaban (geolog)

### **Referensgrupp:**

Peter Martinsson, Swerock (Teknikspecialist)

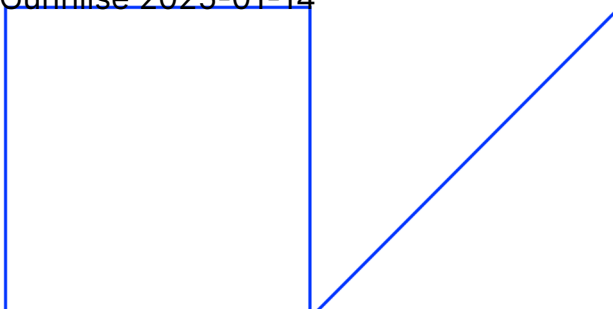
Lotta Liedberg, Svevia (Råvaruansvarig)

Gustav Wändell, NCC (Råvaruhandläggare Återvinning)

Johan Holm, Skanska (Hållbarhetsspecialist)

***Jan Englund, Lars Stenlid, Emma Rehnström, Amena Alshaban***

Gunnilse 2025-01-14



## Sammanfattning

Projektet syftar till att ta fram ett underlag för att utveckla en produktionsnära och tidsoptimerad metodik för bestämning av kritiska grundämnen i cirkulära materialflöden för branschgemensam användning.

För att kunna riskbedöma cirkulära material och hitta lämpligast användningsområden med hänsyn till människors hälsa och miljö, måste den kemiska sammansättningen hos materialet vara känd. I pågående anläggningsprojekt krävs produktionsanpassade och snabba beslutsprocesser över hur olika massor kan användas och vart de ska transporteras. I nästa steg behöver "bearbetningsanläggningarna" ha denna kunskap för att kunna ta riktiga beslut om hur materialet eventuellt kan bearbetas eller om det måste gå till deponi.

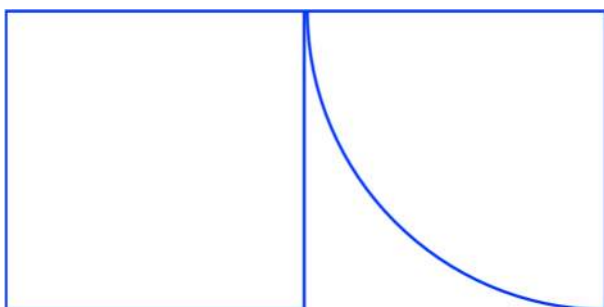
- Det finns metodiker från flera olika branscher som på olika sätt är kopplade till metall- och/eller sulfidförande bergmaterial, t.ex. prospekterings- och gruvbranschen som utgår från röntgenfluorescenssteknik (XRF), som kan innefatta en handhållen enhet att mäta med i fält för snabba provresultat. Det är dock inte självklart att samma metodik är praktiskt användbar vid löpande kontroll av massor och det finns därför ett behov av att ta fram metoder som fungerar praktiskt i produktionsledet. Behovet av att snabbt kunna mäta och få ett resultat av det kemiska innehållet i ett inkommande material på en anläggning eller ute i fält gör det intressant att studera handhållna utrustningar. Följande slutsatser kan dras från studien redovisade i denna rapport:
- Mätningar med handhållen XRF kan vara en bra metodik i vissa fall. Instrumentet mäter med högre precision på tyngre element såsom metaller, ju högre atomnummer på element desto högre precision i mätningarna. I fall där man kan genomföra en lokal kalibrering mot för undersökningen relevanta material, till exempel bergartstyper, kan instrumentet ge kvantitativa data och en god överblick över variationen i halter för specifika ämnen, även för lättare ämnen som svavel.
- Man bör undersöka hur precisionen varierar med olika mätprotokoll för det instrument som används. I den aktuella studien fångade mätprotokoll TestAllGeo upp flest element.
- Vid mätningar med instrumentet bör man göra trippelmätningar på varje delprov för att minska risken för att extrema punktvärden dominerar.
- "Normal" fukthalt (naturfuktigt) har ingen större påverkan på resultatet, det betyder att provet inte behöver torkas, vilket förenklar mätproceduren – litteraturstudien visar dock att vid en vattenkvot större än 30% påverkas mätvärdena.
- Precisionen ökar något med minskad kornstorlek men de uppmätta halterna visar en god överensstämmelse (på prover med maxkornstorlek upp till 4 mm).
- Att använda emballage av plast påverkar inte resultat nämnvärt.
- Det finns inga systematiska skillnader som beror på vilken typ av material, entreprenadberg, schaktmassa, betong eller ÅV, som undersökts.

# Innehåll

1. Bakgrund	5
1.1 Röntgenfluorensens	6
2. Syfte	7
3. Genomförande	8
3.1. Litteraturstudie	8
3.2. Beskrivning av aktuell XRF-utrustning	8
3.3. Geokemiska analyser på kemiskt laboratorium	9
3.3. Mätprocedurer	9
3.4. Materialinsamling, provpreparering och mätning	10
3.4.1 Entreprenadberg	10
3.4.2 Schaktmassor	12
3.4.3 Betongkross	14
3.4.4 Återvunna material	14
4. Resultat	16
4.1 Litteraturstudie	16
4.2 Entreprenadberg	17
4.2.1 Analysmetod - Jämförelse mellan geokemiska data och XRF-mätningar	17
4.2.2 Påverkan på mätresultat som funktion av XRF-instrumentets olika mätprotokoll och provfraktion	19
4.2.3 Fukthaltens betydelse	22
4.2.5 Emballagets påverkan på mätresultat för olika mätprotokoll	23
4.2.6 Effekten av upprepade mätning (trippelmätning)	24
4.2.7 Jämförelse av mätning av svavelhalt mellan XRF och Geokemisk data	25
4.3 Schaktmassa	27
4.3.1 Effekt av fukttinhåll och emballage	28
4.3.2 Effekt av delprov och mättid	29
4.3 Krossad rivningsbetong	30
4.3.1 Effekt av kornstorlek	30
4.4 Återvunnet material	31
4.4.1 Effekt av kornstorlek	32
4.4.2 Effekt av mättid	33
5. Diskussion	35
6. Slutsatser	37

7. Fortsatta studier  
Litteraturförteckning

38  
39



# 1. Bakgrund

Samhällets mål om klimatneutralitet och hushållning av resurser innebär en ökad cirkularitet för material i anläggningsbranschen. Det kan vara material i existerande konstruktioner som används på nytt i nya anläggningar, så som rivnings- eller restbetong, avbaningsmassor och schaktmassor, men även bergmaterial losshållet i samband med anläggningsprojekt, så kallat entreprenadberg. Traditionellt har jungfruligt bergmaterial från bergtäkter använts i anläggningskonstruktioner. Kunskapen om detta bergmaterial och dess kemiska sammansättning har varit känt och förutsägbart. När det gäller cirkulära material är kunskapsläget ofta sämre.

De cirkulära materialen kan användas internt i anläggningsprojekt, alternativt transporteras de mellan olika anläggningsprojekt eller transporteras till en anläggning för lagring eller någon typ av förädling. För att kunna riskbedöma materialet och hitta lämpligast användningsområde med hänsyn till människors hälsa och miljö, måste den kemiska sammansättningen hos materialet vara känd. I pågående anläggningsprojekt krävs produktionsanpassade och snabba beslutsprocesser om hur olika massor kan användas och vart de ska transporteras. I nästa steg behöver "bearbetningsanläggningarna" ha denna kunskap för att kunna ta riktiga beslut om hur materialet eventuellt kan bearbetas eller om det måste gå till deponi.

Det finns en ökad medvetenhet i branschen om problematiken som till exempel sulfid- och metallförande berg innebär och flera studier har undersökt olika aspekter, t ex Miškovský m.fl. (2022). Föreslaget genomförande lånar metodiker från flera olika branscher som på olika sätt är kopplade till metall- och/ eller sulfidförande bergmaterial, t.ex. prospekterings- och gruvbranschen (e.g. Bäckström & Sädbom 2018, Frandsen 2014). Det är dock inte självklart att samma metodik är praktiskt användbar vid löpande kontroll av massor och det finns därför ett behov av att ta fram metoder som fungerar praktiskt i produktionsledet.

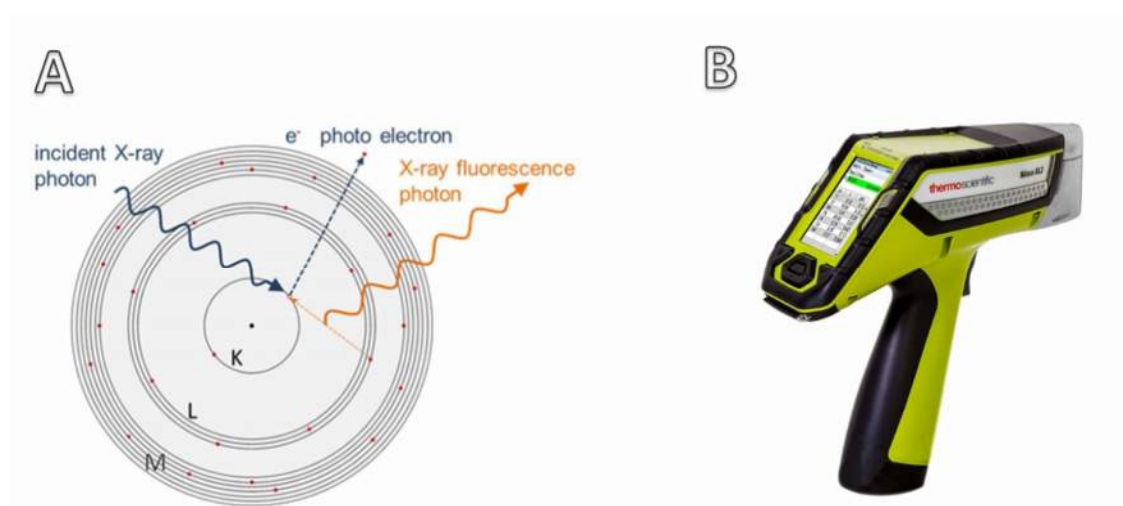
Det behövs därför en gemensam metodik i branschen för provtagning och provning av de cirkulära materialen. Detta för att säkerställa aspekter som ekonomi, konkurrens, miljö och hälsa, samt effektivitet och anpassade efter anläggningsindustrin. I metodiken bör det förtydligas vilka mätförfarande som kan accepteras utifrån kornstorlekar och vatteninnehåll då tidigare studier visar att önskvärt resultat erhålls på analyser av finkornigt och torrt material (Miškovský m.fl. 2022 ).

Behovet av att snabbt kunna mäta och få ett resultat av det kemiska innehållet i ett inkommande material på en anläggning eller ute i fält gör det intressant att studera handhållna utrustningar. Ett exempel på sådan är en handhållen XRF-utrustning, som har en teknik som bygger på röntgenfluorencens.

## 1.1 Röntgenfluorencens

Analysmetodikerna bygger på fenomenet röntgenfluorencens (X-Ray Fluorescence). Processen innebär kort att material utsänder en karakteristisk sekundär strålning, fluorescens, när de bombarderas med högintensiv strålning, i detta fall röntgenstrålning. Den inkommande strålningen exciterar elektroner upp till ett högre elektronskal i det grundämne de träffar. När elektronerna återgår till normaltillstånd utsänds överskottsenergin som strålning (Figur 1a). Energimängden som utstrålas är karakteristisk för varje element och är delvis i det synliga spektrat. Tyngre element har fler elektronskal, vilket innebär att större energier avges och signalen blir därmed starkare och precisionen på mätningen bättre.

Det handhållna XRF-instrumentet (Figur 1b) är en utrustning som är framtagen för att mäta halter av grundämnena i fält och den kallas kort HXRF (handheld XRF) eller FPXRF (Field Portable X-ray Fluorescence). XRF-analysen är i princip en ytanalys, strålningens penetrationsdjup är mycket underordnad, som mest någon millimeter.



Figur 1. Det handhållna XRF-instrumentet är praktiskt och nyttjar samma teknik som stationära XRF-instrument. A) Röntgenstrålning skickas ut av instrumentet, vilken exciterar elektroner i målsubstratet. Den energi som frigörs då elektronen går tillbaka till sitt utgångstillstånd är mätbar som fluorescens. B) Exempel på handhållet XRF-instrument.

Flera studier, till exempel Magomet m. fl. (2021) och Esberg (2005) jämför resultaten från olika modeller av handhållna XRF-instrument och över lag att det inte är så stor skillnad, utan skillnaderna består i högre grad av skillnader i olika mätprotokoll i instrumentet.

## **2. Syfte**

Projektet syftar till att ta fram ett underlag för att utveckla en produktionsnära, tidsoptimerad metodik för bestämning av kritiska grundämnen i cirkulära materialflöden för branschgemensam användning.

Inom ramen för projektet ges generella råd och rekommendationer för kontroll av cirkulära material så som entreprenadberg, schaktmassa, betongkross och återvunna material (ÅV) genom användning av XRF-utrustning.



### **3. Genomförande**

För att ta fram ett underlag för att utveckla en produktionsnära, tidsoptimerad metodik för bestämning av elementhalten för kritiska grundämnen i cirkulära materialflöden har ett handhållet XRF-instrument använts. XRF-utrustningen har använts vid olika mätförhållanden, med olika inställningar och på olika material. XRF-utrustningens mätresultat har jämförts med analys svar från prover inlämnade på kemiskt laboratorium för att studera överensstämmelsen i syfte att hitta lämpliga mätmetodiker som svarar mot projektets syfte. I genomförandet ingår en litteraturstudie, beskrivning av XRF-utrustning, mätprocedurer och materialinsamling inklusive provpreparering.

#### **3.1. Litteraturstudie**

En litteraturstudie har genomförts där erfarenheter av XRF-mätningar samlas och som används som underlag för förslag på mätmetodiker. Utifrån erfarenheterna genomförs verifierande och kompletterande mätningar i det aktuella utvecklingsprojektet.

#### **3.2. Beskrivning av aktuell XRF-utrustning**

I det aktuella projektet har det använts en Thermo Scientific Niton XL3t GOLDD+, som kalibreras en gång per år (Figur 2). Utrustningen har tre olika mätprotokoll: Mining, Soil och TestAll Geo. Beroende på mätprotokoll detekteras olika grundämnen (element) och olika mätprotokoll föreslås beroende på vilken typ av material som ska analyseras. Råder det en osäkerhet om vad för typ av material och vad det innehåller, rekommenderas det att använda TestAll Geo, där ett större antal element kan detekteras. I Bilaga 1 listas de element som detekteras av utrustningen tillsammans med detektionsgränsen.



Figur 2. Det handhållna XRF-instrumentet som använts i projektet är en Thermo Scientific Niton XL3t.

### 3.3. Geokemiska analyser på kemiskt laboratorium

För att verifiera XRF-mätningarna har prover på samma material som mätts med XRF-utrustningen, även skickats in på kemiskt laboratorium (ALS och Eurofins). Olika analysmetoder har olika detektionsgränser och dessa framgår av respektive analyslaboratoriums hemsida.

### 3.3. Mätprocedurer

Projektet syftar till att undersöka hur olika mätbetingelser påverkar XRF-resultaten och hur väl dessa mätningar stämmer överens med halter av olika grundämnen framtagen på kemiskt laboratorium genom totalhaltsbestämning. Utvärdering har skett på materialen Entreprenadberg, Schaktmassa, Betongkross och Återvunna material (ÅV). En särskild utredning kring svavel genomfördes också på entreprenadberg. De undersökta variablerna är:

- Val av mätprotokoll; Mining, Soil och Test AllGeo
- Kornstorlek
- Fuktighet
- Emballage

- Mättid
- Upprepade mätningar
- Delprov/samlingsprov

### 3.4. Materialinsamling, provpreparering och mätning

Materialen som undersöktes i projektet samlades in och preparerades enligt nedanstående beskrivning.

Alla variabler undersöktes inte på alla de undersökta materialen; entreprenadberg av olika ursprung, schaktmassor och återvunna material samt krossad rivningsbetong från olika byggnader och restbetong. En sammanställning över vilka mätningar som genomförts på olika materialslag redovisas i Figur 3. Därefter följer en beskrivning för de olika materialslagen.

Entreprenadberg	Schaktmassa	Betongkross	Återvunna material
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analysmetod</li> <li>• Mätprotokoll Mining, Soil, Test AllGeo</li> <li>• Kornstorlek</li> <li>• Fuktighet</li> <li>• Emballage</li> <li>• Upprepad mätning</li> <li>• Svavel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mätprotokoll Soil</li> <li>• Fuktighet</li> <li>• Emballage</li> <li>• Mättid</li> <li>• Delprov-Samlingsprov</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mätprotokoll Soil</li> <li>• Kornstorlek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mätprotokoll Soil</li> <li>• Kornstorlek</li> <li>• Mättid</li> </ul>

Figur 3. Illustration över de olika mätserier som gjorts i projektet.

#### 3.4.1 Entreprenadberg

Proverna är uttagna i samband med tillverkningskontroll vid krossning av entreprenadberg i Stockholmsområdet. Materialen har inkommit till olika mottagningsanläggningar/mottagningsstationer för bearbetning. Från de tillverkade produkterna provtogs ungefär 10 kg material. Detta material torkades och siktades på en 4 mm sikt. Varje prov delades därefter ned till två analysprover, varav det ena skickades till laboratorium för kemisk analys och det andra analyserades med hjälp av XRF. Proverna förvarades i små provtagningsburkar (Figur 4).



*Figur 4. Provtagningsburk med material. Svensk 2-krona som skala.*

Dessa provburkar var för små för att kunna utföra mätningar på. Därför hölls material från varje provburk i en "mätkruk" i samband med mätning (Figur 5).



*Figur 5. Större plastburk som användes för själva mätningen.*

För materialkategorin entreprenadberg utvärderas följande parametrar:

- Analysmetod  
Övergripande jämförelse av elementhalter uppmätta med XRF och analysvar från kemiskt laboratorium oberoende av andra variabler (kornstorlek, fuktighet et cetera).

- Val av mätprotokoll  
Inverkan av mätprotokoll på XRF-resultat genom att testa Mining, Soil och TestAll Geo
- Kornstorlek  
Inverkan av provfraktion genom mätning på olika framsiktade fraktioner
- Fuktighet  
Inverkan av fukt genom mätning på naturfuktigt material och material som torkats i ugn
- Emballage och utan emballage  
Inverkan av provemballage genom mätning direkt på material och genom plastpåse eller plastkub
- Upprepade mätningar  
Inverkan av antal mätpunkter/delmätningar genom att upprepa mätning på olika ställen på samma prov
- Svavel  
Särskild utredning kring överensstämmelse mellan XRF-mätning och analysvar från kemiskt laboratorium med avseende på svavel.

Alla parametrar undersöktes inte för alla prov, utan olika varianter utfördes på olika prover. Totalt analyserades 150 st prover med XRF.

### 3.4.2 Schaktmassor

Schaktmassor av olika typ provtogs på mottagningsanläggning för schaktmassor. Provtagning utfördes på två olika schaktmassor i upplagshögar. Vid det första provtagningstillfället togs 15 delprover ut som antogs representera hela upplaget (Figur 6) med efterföljande XRF-mätning (mätprotokoll Soil). Antalet delprover är inom intervallet rekommenderade av Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2007) i förhållande till bedömning grad av heterogenitet och upplagets storlek på 50 m<sup>3</sup>. Proverna togs ut med plastskopa. Varje delprov bestod av ca 1 kg material. Därefter skapades ett samlingsprov av de 15 delproven och det lades vikt vid att ta lika mycket material från alla delprover. Hela samlingsprovet skickades in för kemisk analys.



*Figur 6. Uttag av femton dubbla delprov i ett upplag MKM schaktmassor 8 november 2023. I bilden syns 9 av de femton dubbla delproverna.*

Vid det andra provtagningstillfället provtogs ett lerigt och siltigt schaktmaterial genom 20 delprov på upplagshög med efterföljande XRF-mätning (mätprotokoll Soil) på vardera delprov (Figur 7). Antalet delprover är inom intervallet rekommenderade av Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2007) i förhållande till bedömning grad av heterogenitet och upplagets storlek på 50 m<sup>3</sup>. Efter det slogs alla delprover ihop och ett prov skickades in för kemisk analys.



*Figur 7. Schaktmassa med inslag av silt och lera. Provtaget 31 jan 2024 med ett större prov som sedan användes för stickprovsuttag av 4 delprover.*

Enskilda prover togs ut och slogs samman till ett samlingsprov. XRF-mätning utfördes på varje enskilt prov före sammanslagning. Det sammanslagna provet delades ned i två

delar och XRF-mätning utfördes på det ena delprovet och det andra delprovet skickades för kemisk analys till laboratorium. De olika parametrar som undersöktes var:

- Fuktighet  
Effekt från fukt genom mätning i naturfuktigt tillstånd och efter ugnstorkning
- Emballage och utan emballage  
Effekt av provemballage genom mätning direkt på prov och genom plastpåse
- Mättid  
Inverkan av mättid genom mätning olika länge på samma prov
- Delprov/samlingsprov  
Genom mätning på delprover och samlingsprov undersöktes reproducerbarheten

Totalt analyserades 90 st prover med XRF.

### **3.4.3 Betongkross**

Prover togs ut på en mottagningsanläggning för betong. Rivningsbetong och returbetong provtogs var för sig. Varje enskilt prov delades ned till två prov, varav det ena skickades till laboratorium för kemisk analys och det andra analyserades med hjälp av XRF (mätprotokoll Soil).

På den krossade betongen utvärderas följande parametrar:

- Kornstorlek  
Inverkan av fraktion

Emballage och mätförfande var motsvarande det som användes för entreprenadberg enligt Figur 4 och Figur 5.

Totalt analyserades 15 st prover med XRF.

### **3.4.4 Återvunna material**

Två olika varianter av återvunna material (ÅV) undersöktes. Det första var ett blandat material med sortering 0/90 som bestod av i huvudsak bergmaterial med visst inslag av betong. Även ett 0-16 ÅV-material provtogs (Figur 8).



*Figur 8. Upplag ÅV 0-16 Prov uttaget 31 jan 2024 .*

För materialkategorin Återvunna material utvärderades följande parametrar:

- Kornstorlek  
Påverkan av fraktionens kornstorlek
- Delprov/samlingsprov  
Undersöka spridning mellan olika delprov

Ur materialet med sortering 0/90 siktades en provfraktion 0-4 mm fram och delades ned till två analysprov. Det ena skickades till laboratorium för kemisk analys och det andra analyserades med XRF (mätprotokoll Soil). Provet för XRF-analys delades ned till fyra delprover och flera fraktioner siktades fram för att undersöka om det förelåg skillnader mellan olika fraktioner. De framsiktade fraktionerna var: 0-2mm, 0-1 mm, 0-0,5 mm och 0-0,025 mm.

Ur ÅV-materialet i fraktion 0-16 delades ett större prov ned i fyra delprov. Mätningar utfördes först på hela 0-16 delen på varje delprov. Därefter siktades på varje delprov en fraktion 0-8 fram med efterföljande XRF-mätning. Samma procedur användes för att ta fram och mäta på 0-4 och 0-0,5 mm fraktionerna. Fraktionen 0-4 mm skickades även in för analys på kemiskt laboratorium. Totalt analyserades 30 prover med XRF.



## 4. Resultat

Resultaten innefattar en litteraturstudie och mätningar genomförda på materialtyperna entreprenadberg, schaktmassa, betongkross och återvunnet material. Vidare bygger generellt resultaten på jämförelser mellan elementhalter uppmätta med XRF och geokemiska analyser (analyssvar från kemiskt laboratorium). En utmaning i denna jämförelse har varit att de element som uppmäts med XRF inte alltid haft halter över instrumentets detektionsgräns, varför det ibland saknas data att jämföra med. En annan utmaning har varit att det vid beställning av analyser vid kemiskt laboratorium har varit en variation över vilka element som ingått i analysen, då vi nyttjat analyser beställda med annat syfte än det som har varit aktuella utvecklingsprojektets. Därför har det inte varit möjligt att jämföra alla element vid alla variationer av mätningar.

För att element med stor variation i halt enklare skulle kunna jämföras, normaliserades XRF-data mot det kemiska analysvärdet. Normalisering av XRF-data innebär att en kvot tas fram mellan XRF-data och kemiskt analysvärde (normaliserat värde = XRF-mätvärde/geokemiskt mätvärde). Vid en exakt överensstämmelse mellan XRF-data och analysdata, blir det normaliserade värdet 1 (alternativt 100%). Utan denna normalisering blir värdena beroende av mätvärden på element med högre halt vid en regression och därför har normaliserade värden använts i högre grad.

### 4.1 Litteraturstudie

Det har genomförts ett flertal studier kopplade till att undersöka hur väl elementhalter uppmätta med handhållen XRF står sig i jämförelse med traditionella kemiska analyser under svenska förhållanden (t.ex. Häagg 2022, Esberg 2005, Ringström 2011, Robertsson 2020). I de flesta av dessa studier undersöktes jord- och/eller stenmaterial. Utgångspunkten för flertalet av dessa tidigare undersökningar, såväl innevarande projekt, är att det finns en osäkerhet rörande hur väl det handhållna XRF-instrumentets resultat motsvarar kemiska analyser. De genomförda undersökningarna hanterar frågeställningar kring hur trovärdiga och användbara XRF-resultaten är.

Att använda XRF-instrumentet som screeningmetod för att analysera förhöjda metallhalter har undersökts och rekommenderats av bland andra Esberg (2005) för inventering av gruvavfall, Frandsen (2014) för regional prospektering och för inventering av metallföreningar i skrovfärger och i hamnområden (Ytreberg m. fl. 2017), samt undersökning av förhöjda metallhalter i förorenad jord (Robertsson 2020). Robertsson (2020) konstaterar också att vid högt vatteninnehåll blir mätningarna mindre tillförlitliga.

Häagg (2022) konkluderar att användningen av handhållen XRF går utmärkt använda för att evaluera svavelhalter, förutsatt att det gjorts en lokal kalibrering med geokemiska laboratedata i förväg. Hagelia & Fjermesta (2016) kommer till samma slutsats och understryker att XRF-instrumentet kan användas med stor succé som ett screeningverktyg, men att den lokala kalibreringen är viktig för att resultaten ska vara tillförlitliga.

En studie undersökte tillförlitligheten för mätningar på betong (Taylor m. fl. 2012) och konstaterar att värdena vid mätningar på cementpasta, som är finkornig och homogen fungerade utmärkt, medan mätningar på det mer heterogena murbruket inte gav användbara resultat.

Flera studier, till exempel Magomet m. fl. (2021) och Esberg (2005) jämför resultaten från olika modeller av handhållna XRF-instrument. Resultaten visar över lag att det inte är så stor skillnad, utan skillnaderna består i högre grad av skillnader i olika mätprotokoll i instrumentet.

## 4.2 Entreprenadberg

Mätningar på Entreprenadberg har genomförts för variabler enligt Figur 9.



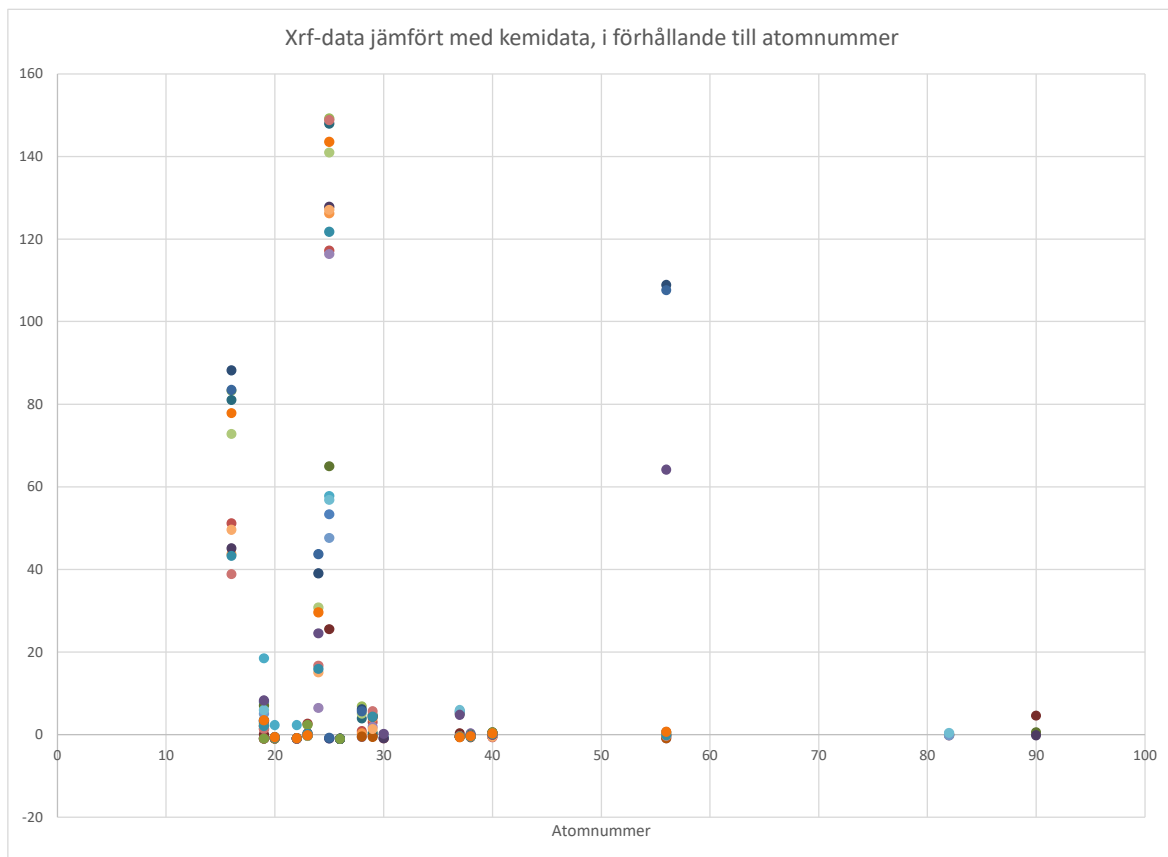
Entreprenadberg
• Analysmetod
• Mätprotokoll Mining, Soil, Test AllGeo
• Kornstorlek
• Fuktighet
• Emballage
• Upprepad mätning
• Svavel

Figur 9. Illustration över de olika mätserier som gjorts på entreprenadberg.

### 4.2.1 Analysmetod - Jämförelse mellan geokemiska data och XRF-mätningar

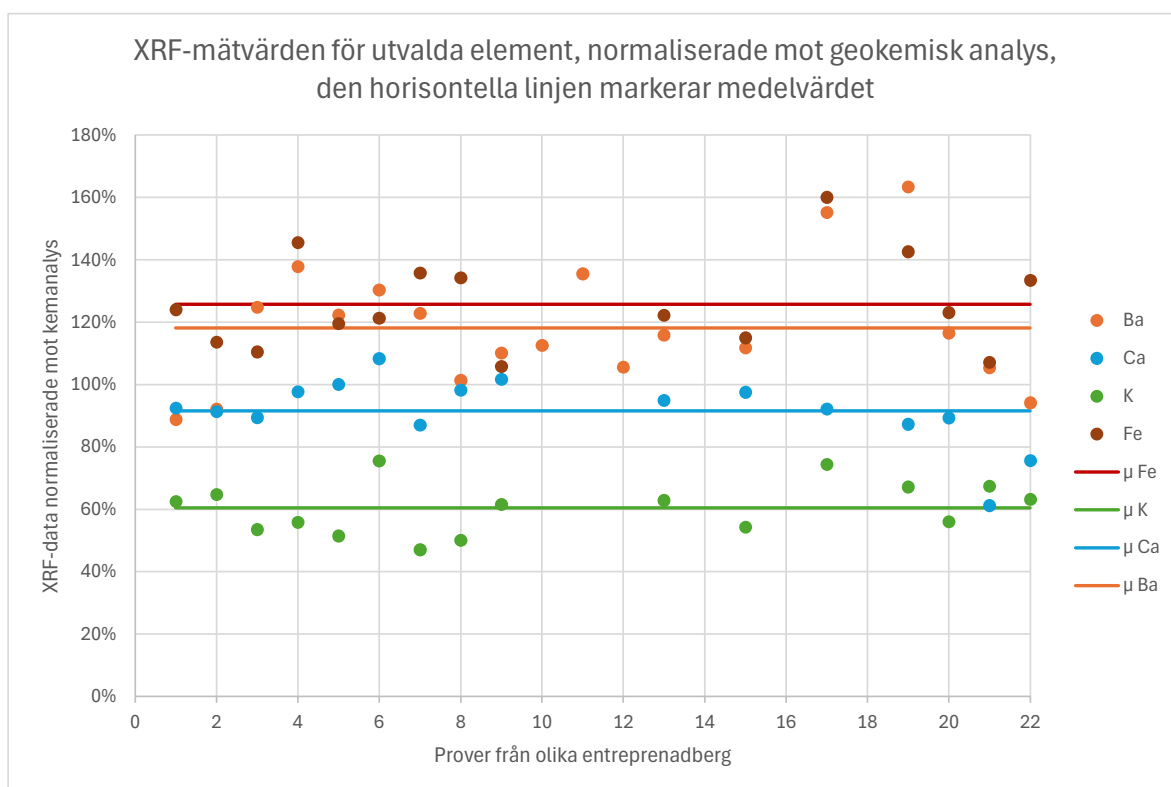
I detta avsnitt redovisas en jämförelse mellan XRF-mätning och geokemisk data (från kemilaboratorium) på de element där data från båda analysmetoderna finns tillgängliga i större mängd.

I figur 10 visas normaliserade XRF-data, plottat som en positiv eller negativ avvikelse gentemot kemidata på y-axeln och atomnummer på x-axeln. Det är tydligt att precisionen generellt är sämre för element med låg atommassa, men data uppvisar variation även för element med högre atomnummer.



Figur 10. Storleken på avvikelsen mellan kemidatavärden och XRF-värden centrerat över noll i relation till atomnummer.

I figur 11 visas exempel på barium, kalcium, kalium och järn från mätningar på entreprenadberg och mätprotokoll Mining. Varje mätpunkt representerar ett prov och XRF-data redovisas normaliserade mot kemidatavärden. Linjen vid 100 % representerar alltså mätvärden som är lika för XRF och kemisk analys. Olika elements XRF-resultat uppvisar ett liknande förhållande i relation till respektive geokemiskt analysresultat. Av Figur 11 framgår att kalcium visar på snarlika XRF-mätvärden jämfört geokemiskt data, kalium konsekvent visar för låga XRF-mätvärden jämfört med geokemiskt data, medan barium och järn visar på högre värden. Som vidare framgår av figur 11, så är de uppmätta värdena för respektive element relativt stabila kring sin respektive medelvärdeslinje.

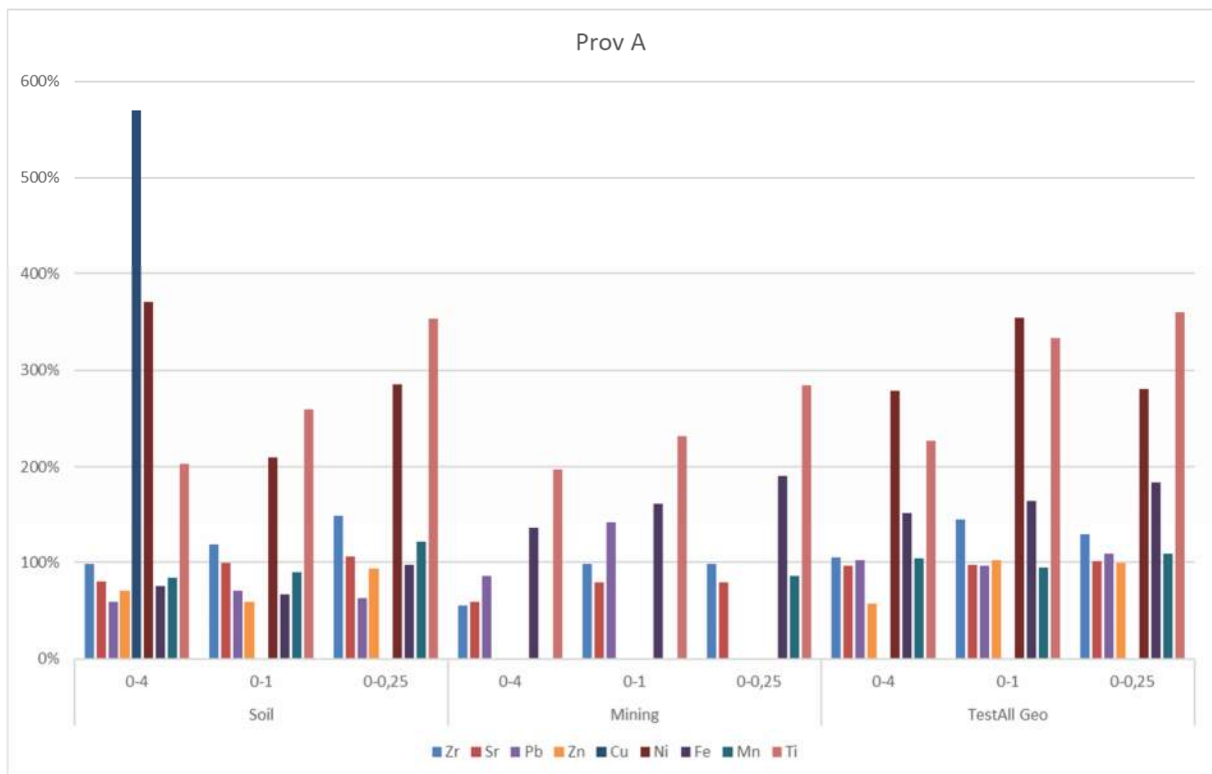


Figur 11. Normaliserad plot av XRF-data och kemidata. De horisontella linjerna representerar medelvärdet för det aktuella elementet. På x-axeln är olika mätningar

#### 4.2.2 Påverkan på mätresultat som funktion av XRF-instrumentets olika mätprotokoll och provfraktion

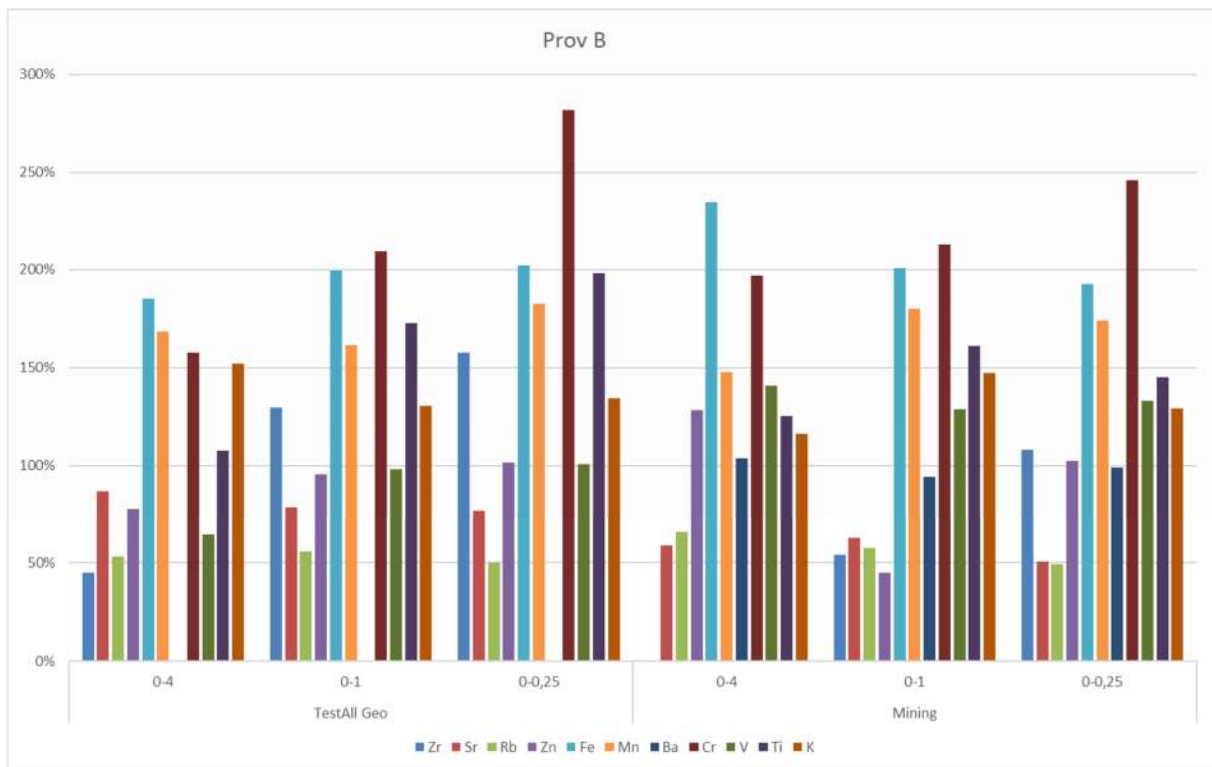
Det XRF-instrument som användes i studien har tre olika mätprotokoll: Mining, Soil och TestAllGeo. Vissa element mäts med högre precision och vid lägre koncentrationer i vissa protokoll än andra. I figur 12 redovisas XRF-mätvärden normaliserade mot geokemidata för olika mätprotokoll och olika materialfraktion. Provet delades i tre olika fraktioner (0-4, 0-1, 0-0,250) och mättes med tre olika inställningar på XRF-instrumentet (Soil, Mining, TestAllGeo).

Inställningen TestAllGeo verkar ge den bästa precisionen jämfört med geokemidatan. Det framgår också att vissa element avviker konsekvent från geokemidatan för alla mätprotokoll. Zirkon, strontium, bly, zink och mangan ger XRF-värden i nivå med geokemisk data. Titan ger konsekvent för höga. Vissa skillnader finns mellan de olika fraktionerna, där den finaste fraktionen ger minst spridning och därmed bäst överensstämmelse.



Figur 12. XRF-mätvärden normaliserade mot geokemidata för olika mätprotokoll och olika materialfraktion.

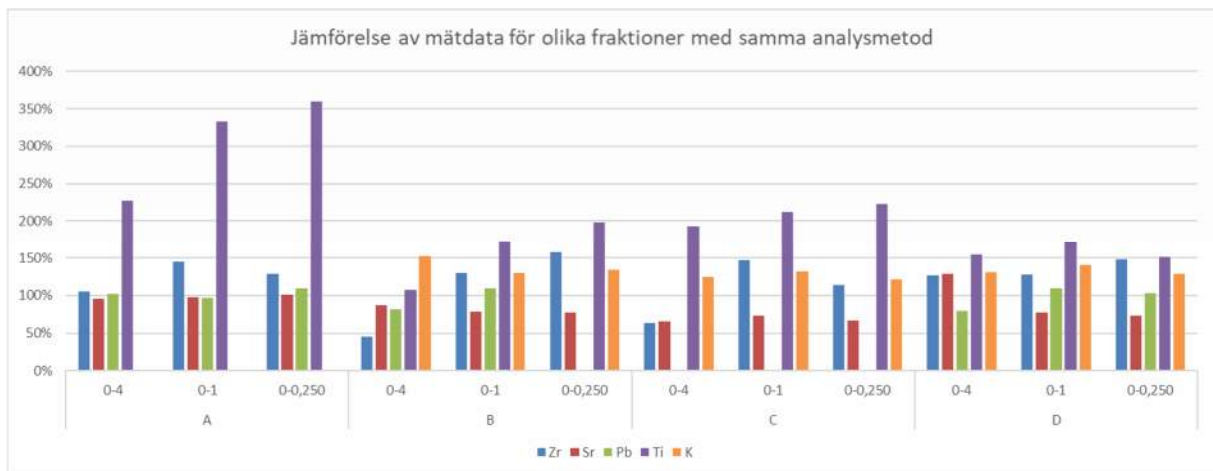
I figur 13 visas mätdata från mätningar på ett annat prov med två olika analysprotokoll; Mining och TestAllGeo. Instrumentet detekterade halter av fler element i detta prov och bilden blir lite tydligare vad gäller zink och vanadin som visar god överensstämmelse med geokemisk data men t.ex. zirkon, strontium och rubidium alla uppvisare konsekvent för låga värden, medan järn, mangan, barium, krom och titan visar för höga värden. Dessa data ser ganska annorlunda ut jämfört med det förra provet, vilket gör det svårt att dra enhetliga slutsatser. Gemensamt är att titan ger flera gånger för höga mätvärden med XRF jämfört med geokemidata. Även här har provfraktionen en viss påverkan med en tendens till tillförlitligare resultat på den finare kornstorleken.



Figur 13. XRF-mätvärden normaliserade mot geokemidata för olika mätprotokoll och olika materialfraktion.

En jämförelse av normaliserade mätvärden med metoden "TestAllGeo" för flera prov visar på variationer både mellan olika element och mellan olika prov (Figur 14). I diagrammet kan ses att strontium och bly ger mätvärden närmast 100%, medan mätvärdena för kalium ger minst spridning. Det skall dock noteras att XRF-mätvärdena för kalium från prov A inte är med i diagrammet då de alla var över 1000 % större än det geokemiska värdet, detta tillskrivs en nuggeteffekt. Avsaknaden av värden för bly från prov B beror på att dessa mätvärden låg under detektionsgränsen för XRF-instrumentets analysprotokoll.

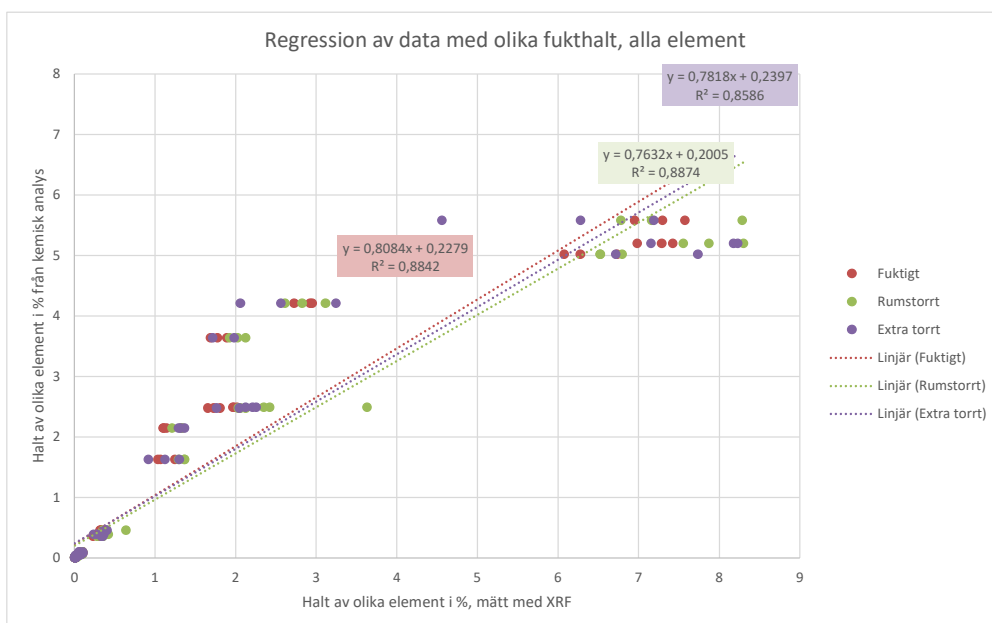
Fraktionsstorlekens inverkan på mätresultaten har analyserats ytterligare genom att olika fraktioner siktades ut ur samma prov och analyserades med mätprotokoll TestAllGeo. För denna jämförelse användes elementen zirkon, strontium, bly, titan och kalium för fyra olika material (A-D). XRF-mätvärdet normaliserades mot kemiska analysdata. I Figur 14 kan det utläsas att mätvärdena mellan de olika fraktionerna skiljer sig något. Skillnaden mellan XRF-data och geokemisk data är minst mellan de två finare fraktionerna och alltså visar den grövre fraktionen störst avvikelse.



Figur 14. Materialfraktionens inverkan på mätvärden från XRF, normaliserade mot geokemidata. A, B, C och D representerar olika prover. Där det finns "tomma" staplar ligger mätvärdet under detektionsgräns på XRF-instrumentet.

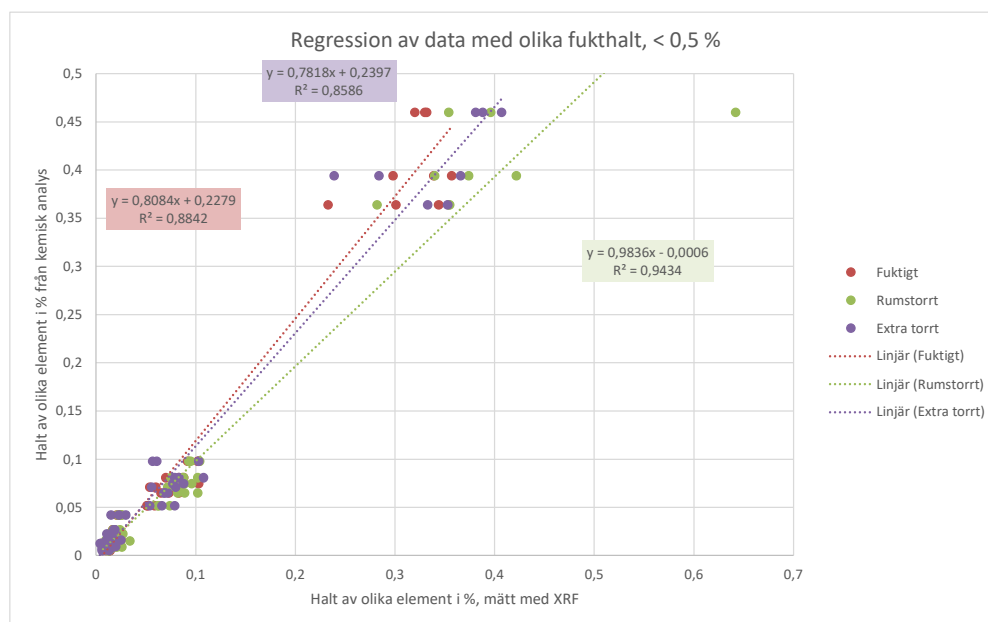
### 4.2.3 Fukthaltens betydelse

För att testa fukthaltens inverkan på mätresultaten undersöktes samma prov vid tre olika fukthalter. Fyra olika prov med vardera tre fraktioner undersöktes. I figur 15 visas tre olika mätserier med olika relativ fukthalt; "fuktigt", "rumstorr", respektive "extra torr", den senare avser prov som torkats i ugn. Regressionsanalysen med kemiskt analysvärde mot värde uppmätt med XRF för de olika elementen visar en viss variation, men  $R^2$ -värdet är mycket likartat mellan serierna och varierar inte systematiskt med avseende på fukthalt.



Figur 15. Regressionsplott för geokemiska versus XRF-data. De olika mätserierna representerar olika fukthalt hos materialet.

En nackdel med detta diagram är att element med högre halt dominerar regressionslinjen mycket. I figur 16 plottas bara element med koncentrationer under 0,5 %. Det framgår då att bilden förändras marginellt och samma slutsatser kan dras som ovan, det vill säga fukthalten verkar inte påverka sambanden mellan geokemiskt analysresultat och XRF-resultat vid det aktuella fukttinnehållet.

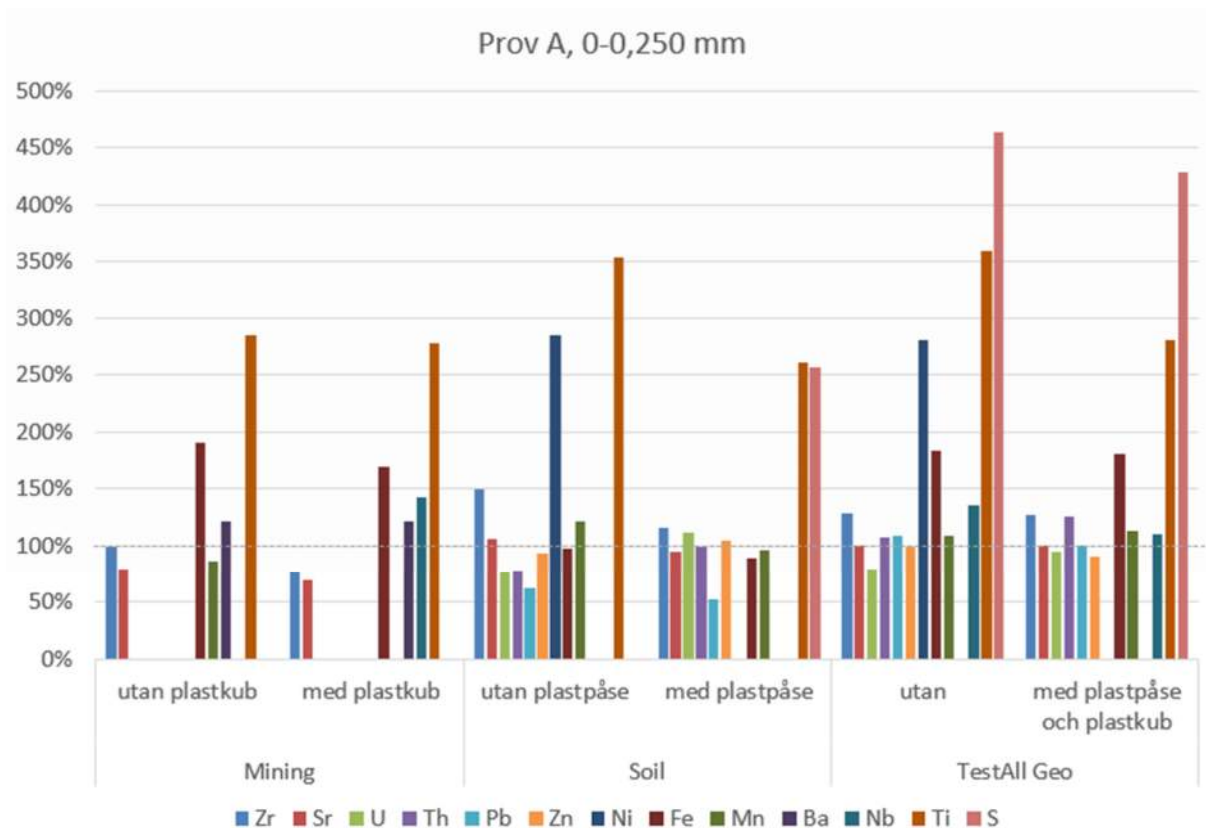


Figur 16. Regressionsplott för element med koncentrationer under 0,5 % för XRF-värden mot kemianalysvärden.

#### 4.2.5 Emballagets påverkan på mätresultat för olika mätprotokoll

Mätningar med XRF-instrumentet gjordes också på prov med olika typer av emballage för att undersöka effekten av detta. Mätdata i figur 17 är på samma prov, samma fraktion och samma fukthalt. De varierande variablerna är mätprotokoll på XRF-instrumentet och typ av emballage. I diagrammet blir det tydligt att mätprotokollet "TestAllGeo" ger analysdata för flest element, samt ger bäst reproducerbarhet i data. Det finns en viss skärmande effekt av emballage, men det är överraskande liten. Vissa mätdata verkar uppvisa en högre halt vid mätningar med emballage, vilket sannolikt är en nuggeteffekt, dvs att det i materialet finns "klumpar" av material med avvikande sammansättning, gärna anrikat på ett visst element, i provmaterialet.



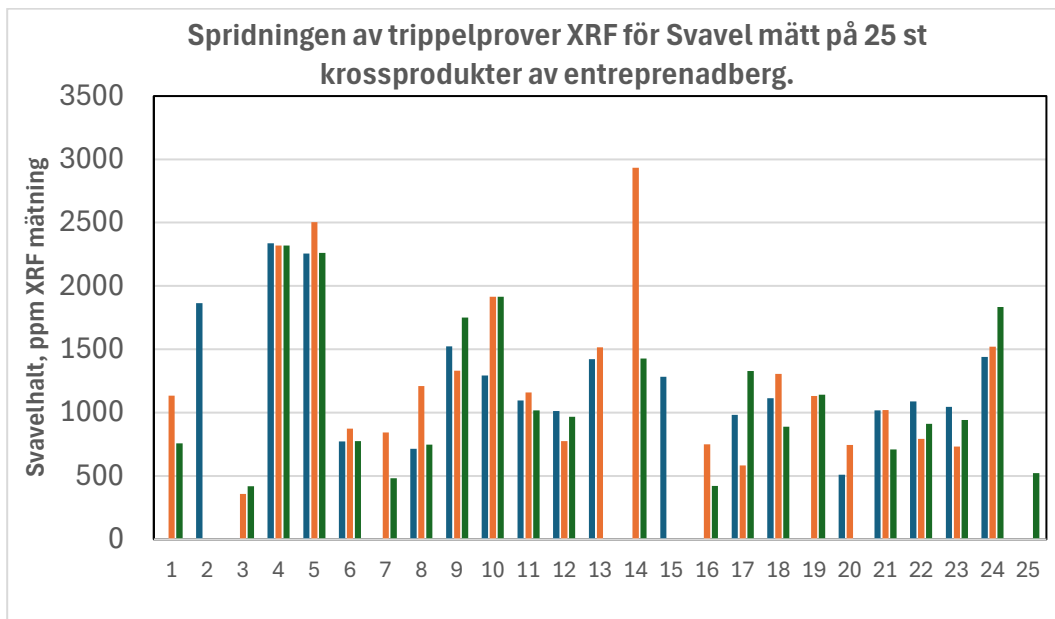


Figur 17. Normaliserade mätvärden som funktion av varierande emballage och mätprotokoll.

#### 4.2.6 Effekten av upprepad mätning (trippelmätning)

För att undersöka reproducerbarheten för XRF-mätning och ett eventuellt behov av att mäta flera gånger på samma prov, genomfördes upprepad mätning (trippelmätningar) i samband med svavelhaltsbestämning genom att använda XRF. Mätningarna utfördes på 25 krossprover av olika ursprung. På varje prov genomfördes en mätning på 90 sekunder. Därefter flyttades utrustningen till en ny punkt med efterföljande mätning i 90 sekunder. Detta upprepades ytterligare en gång tills totalt tre mätning utförts på ett och samma prov. För alla mätningar användes XRF-utrustningens mätprotokoll TestAll Geo.

Trippelmätningarna registrerade tre svavelhalter för 14 av de 25 proverna, två svavelhalter för 8 av 25 prover samt en svavelhalt för tre av proverna. Spridningsbilden för alla de 25 provernas uppmätta svavelhalterna framgår i figur 18 nedan.



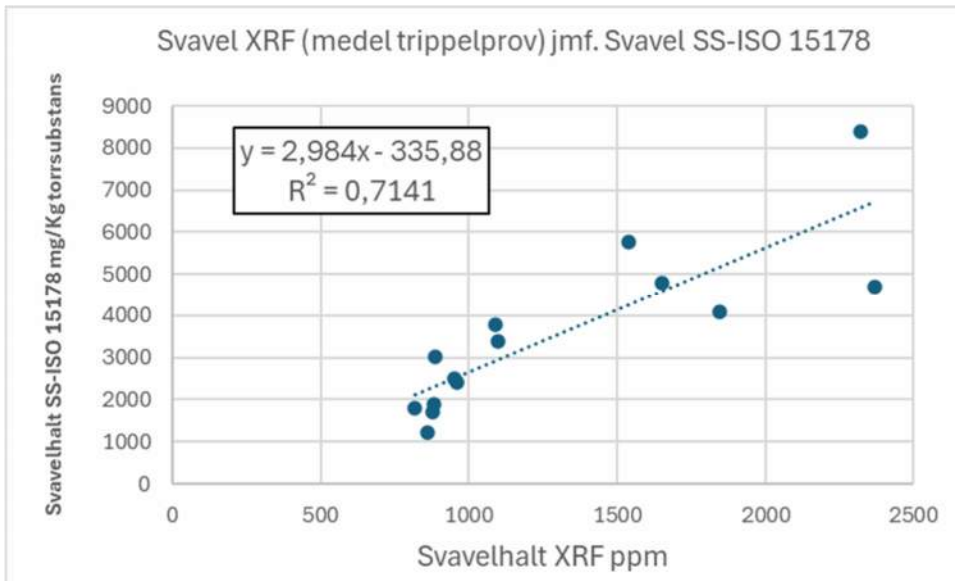
Figur 18. 25 analysprov med XRF mätning med olika antal erhållna delprov med mätvärden

Mätningarna ger liknande nivåer på samma prov. Dock uppvisar prov 14, 16 och 17 stora skillnader mellan delvärdena med dubbla halter för samma prov. Om denna skillnad berodde på bristfällig utrustning, handhavandet eller skillnader inom provet mellan mätstället som mättes kan denna undersökning inte ge svar på. I många fall verkar det räcka med att mäta en gång på ett prov men att upprepade mätning på samma prov ger ett säkrare resultat och att tillfälliga extremvärden kan rensas bort.

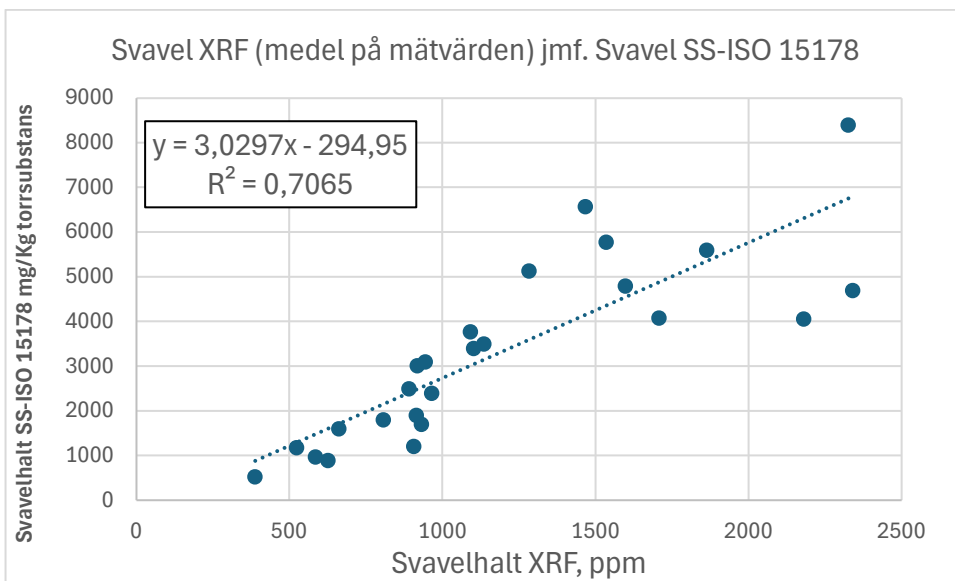
#### 4.2.7 Jämförelse av mätning av svavelhalt mellan XRF och Geokemisk data

En jämförelse gjordes mellan XRF-mätning och geokemisk data på de prover som användes för den upprepade mätningen beskriven i punkt 4.2.6 ovan. Materialen delades ned till två prover, ett prov 0-4 mm för XRF-mätning och ett 0-4 mm prov för geokemisk analys på laboratorium. Där bestämdes svavelhalten med förbränningsmetod enligt SS-1SO 15178.

I figur 19 plottas medelvärdet för de mätningar där tre svavelvärden registrerades mot elementhalten från kemisk analys och i figur 20 samma sorts plott, men med alla de 25 proverna, i 8 fall alltså med medelvärde av endast två mätvärden.



Figur 19. Medelvärde av trippelmätning av svavelhalt med XRF för 14 krossprodukter av entreprenadberg jämfört mot svavelhalt enligt förbränningsmetod SS-ISO 15178.



Figur 20. Medelvärde av trippelmätning av svavelhalt med XRF för 25 krossprodukter av entreprenadberg jämfört mot svavelhalt enligt förbränningsmetod SS-ISO 15178.

Båda jämförelserna ger liknande resultat och den viktigaste observationen är att XRF-instrumentet genomgående registrerar för låg svavelhalt jämfört med en kemiska totalsvavelanalys.

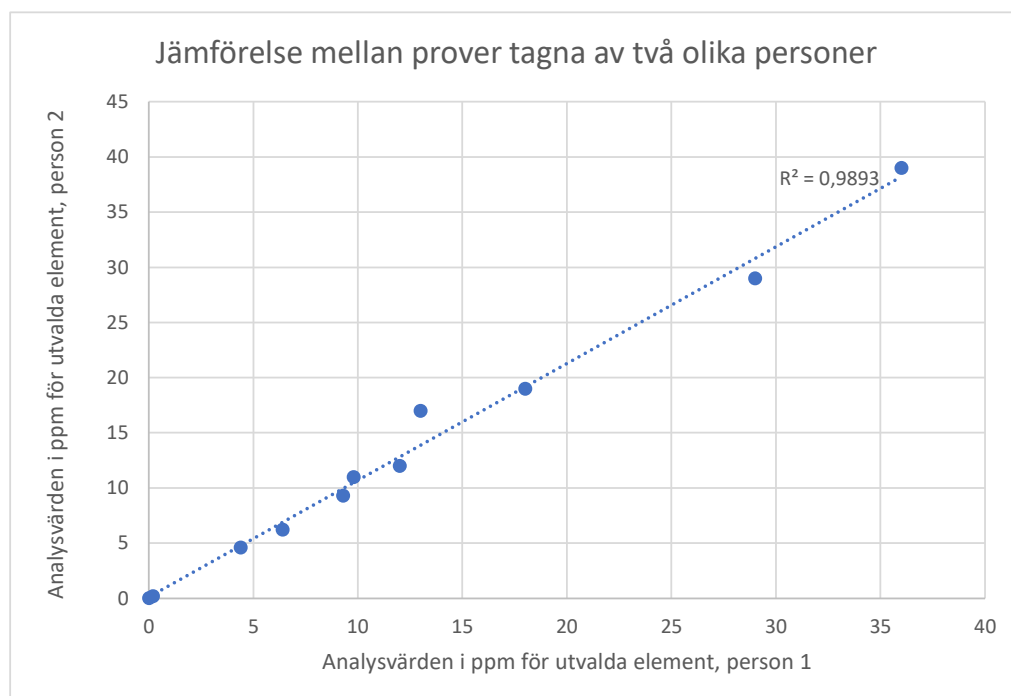
### 4.3 Schaktmassa

Mätningar på Schaktmassa har genomförts för variabler enligt Figur 21.

Schaktmassa
• Mätprotokoll
• Soil
• Fuktighet
• Emballage
• Mättid
• Delprov-Samlingsprov

Figur 21. Illustration över de olika mätserier som gjorts på schaktmassa.

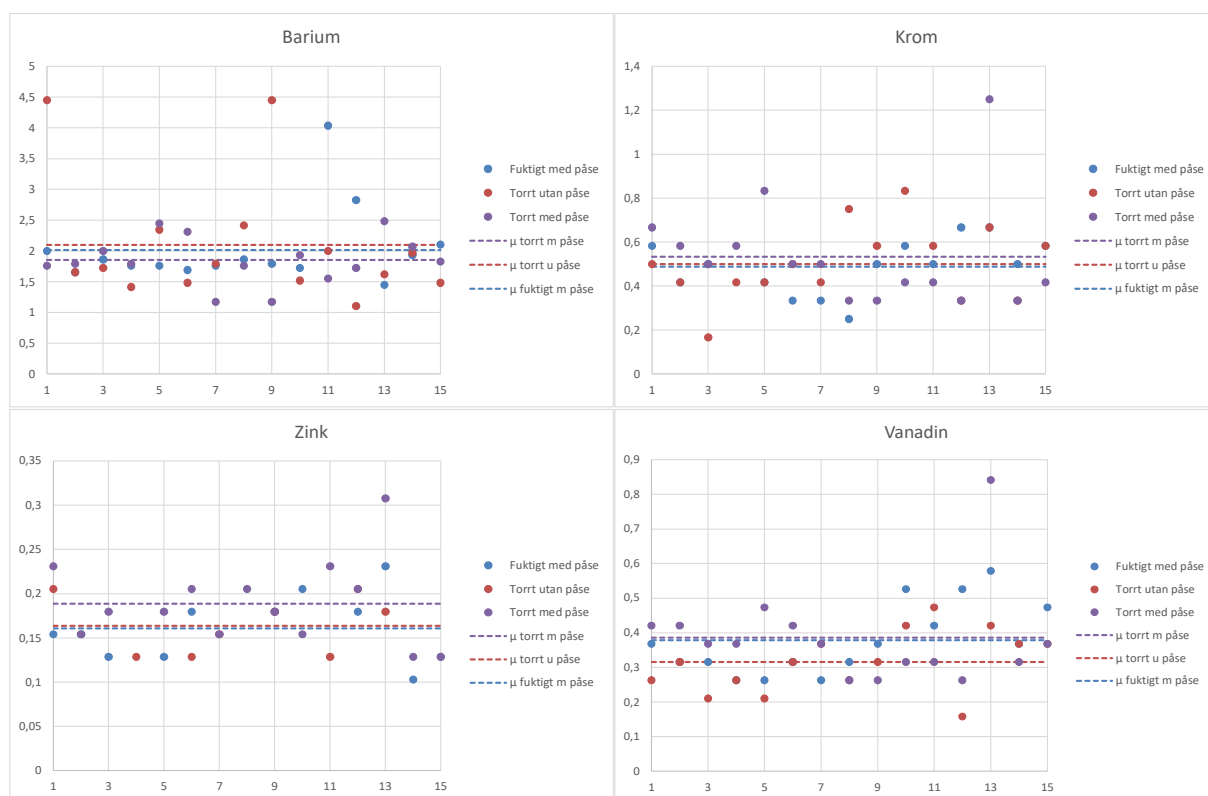
En av undersökningarna för schaktmassor innebar att ett samlingsprov av 15 olika delprov togs av två olika personer och analyserades. Diagrammet i figur 22 visar en regressionsplott mellan de två separata analysresultaten. Korrelationskoefficienten  $R^2$  är mycket hög, 0,99, och slutsatsen är att provtagningsförfarandet beskrivet i kapitel 3.4.2 fungerar väl, även då olika personer gör själva provtagningen.



Figur 22. Regressionsanalys mellan kemidata från samlingsprov tagna av två olika personer.

### 4.3.1 Effekt av fuktinnehåll och emballage

I detta experiment undersöktes hur fukthalten och eventuellt emballage påverkar mätvärdena från XRF-instrumentet. Det togs ut 15 delprover från en schaktmassa som sedan mättes i fuktigt och torrt tillstånd, samt med och utan plastpåse. I figur 23 visas diagram för fyra olika element; barium, krom, zink och vanadin där XRF-värdena normaliserats på samma sätt som för entreprenadberg beskrivet ovan. Det som bör noteras är att de normaliserade värdena varierar signifikant, således uppmäts ungefär dubbelt så mycket barium i proverna än vad kemianalysen indikerar, medan kromhalten är ungefär hälften av kemianalysens halt. Dock, inom varje element är mätvärdena mer överensstämmande, således är medelvärdet för de olika mätserierna nästan samma. Det verkar därmed inte finnas någon systematisk påverkan avseende på fukthalt eller emballage på mätresultatet. Diagram för fler element finns i Bilaga 2.

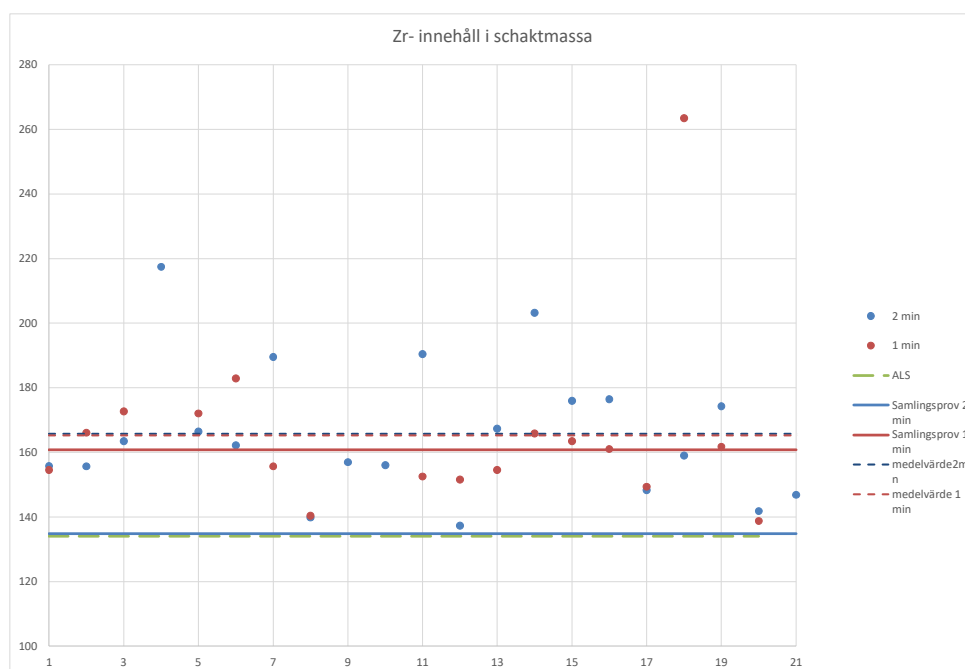


Figur 23. Mätvärden från XRF, normaliserade mot kemianalysdata. De fyra olika diagrammen avser olika element, barium, krom, zink och vanadin och illustrerar mätningar på 15 olika delprov från en schaktmassa med olika fukthalt och med eller utan plastpåse.

### 4.3.2 Effekt av delprov och mättid

För att studera möjligheten att mäta på ett samlingsprov bestående av 20 st delprover istället för att mäta på varje enskilt delprov utfördes mätningar med båda varianterna. Alla mätningar jämfördes med geokemisk data från samlingsprovet. Samtidigt undersöktes effekten av mättid, där XRF-mätning med 1 min respektive 2 min utfördes.

Diagrammet i figur 24 visar mätvärden för elementet zirkonium i två mätserier (blå respektive röda punkter) med mätningar gjorda på 20 delprover från en schaktmassa. Blå punkter representerar en mättid på 2 minuter och röda punkter en mättid på 1 minut. Medelvärdena för dessa mätserier är 166 ppm respektive 165 ppm (blå respektive röd streckad linje), det vill säga i princip identiska. Detta kan jämföras med mätningar i 1 respektive 2 minuter på ett samlingsprov av alla 20 delprov. Värdet som erhöles vid mätning i 2 minuter (blå heldragen linje) sammanfaller med värdet från den geokemiska analysen på samlingsprovet (grön streckad linje), medan värdet för mätning i 1 minut (röd heldragen linje) ligger närmare medelvärdet för mätningarna för respektive delprov. I Bilaga 3 finns fler element redovisade.



Figur 24. Jämförelse mellan mätningar på delprov, mätning på samlingsprov och geokemisk analys för elementet zirkonium.

Det visar sig dock att olika element beter sig olika och det är svårt att dra några långtgående slutsatser. En preliminär slutsats kan vara att ett provtagningsförfarande med ett samlingsprov av 20 delprov från en schaktmassa och mättid på 2 minuter ger en god approximation av det kemiska innehållet.

### 4.3 Krossad rivningsbetong

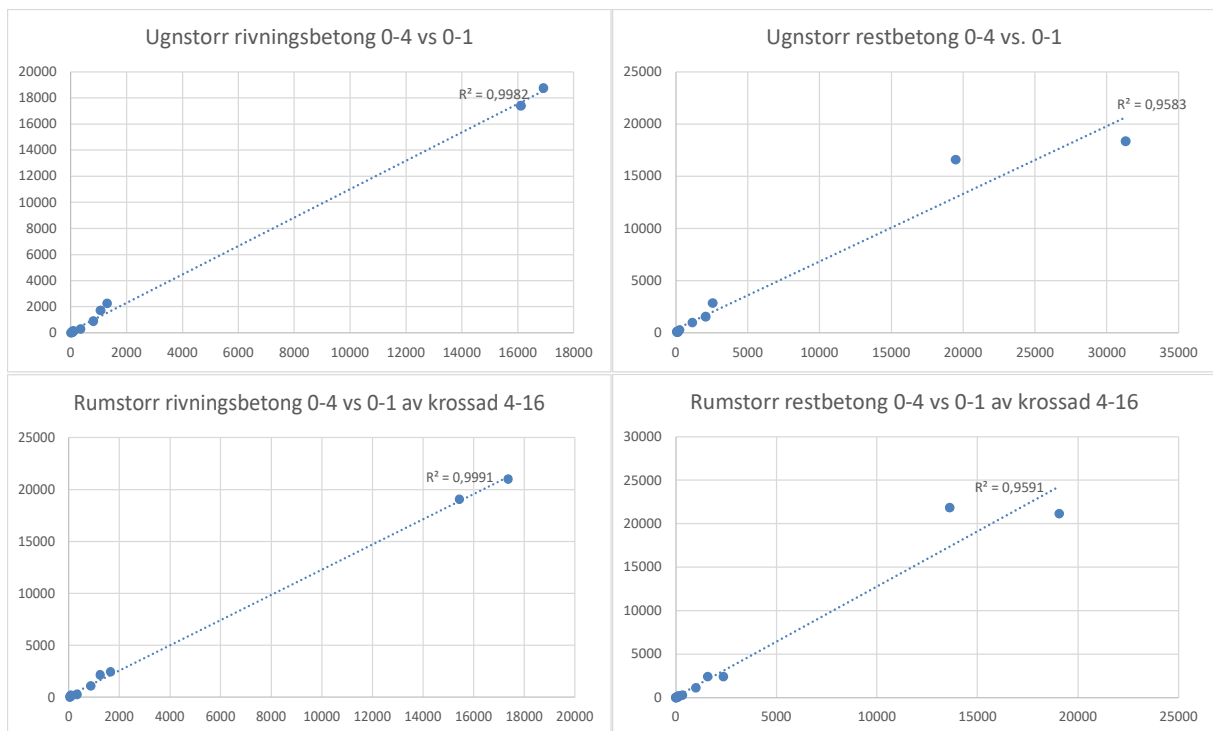
Mätningar på Betongkross har genomförts för variabler enligt Figur 25.



Figur 25. Illustration över de olika mätserier som gjorts på schaktmassa.

#### 4.3.1 Effekt av kornstorlek

Effekten av materialets kornstorlek undersöktes. Figur 26 visar fyra separata regressionsdiagram med mätningar på rivningsbetong (till vänster) respektive restbetong (till höger). I den övre raden jämförs mätningar på ugnstorkat material, med mätning direkt på 0-4mm-fraktionen på x-axeln och mätning på framsiktad 0-1mm-fraktionen på y-axeln. De nedre diagrammen visar på samma sätt mätvärden från 0-4 mm på abscissan och 0-1 mm på ordinatan. Mätvärdena avser rumstorrt material som är nedkrossat från en 4-16 mm fraktion. I alla diagrammen har värdet för kalcium tagits bort då detta är över 100 000 ppm (från cementens kalkinnehåll) och därför blir extremt ledande för korrelationskoefficienten. För dessa material verkar det alltså inte ha någon stor effekt på mätvärdet, vare sig vilken kornstorlek man väljer att mäta på eller om materialet torkats eller ej. Dock är det tydligt att restbetongen sprider mer i halter än rivningsbetong, vilket avspeglas som en korrelationskoefficient  $R^2=0,99$  för rivningsbetong och  $R^2=0,95$  för restbetong.



Figur 26. Regressionsdiagram för mätningar på rumstortt och ugnstorkad rest- respektive rivningsbetong i olika fraktioner.

## 4.4 Återvunnet material

Mätningar på Återvunnet material har genomförts för variabler enligt Figur 27.

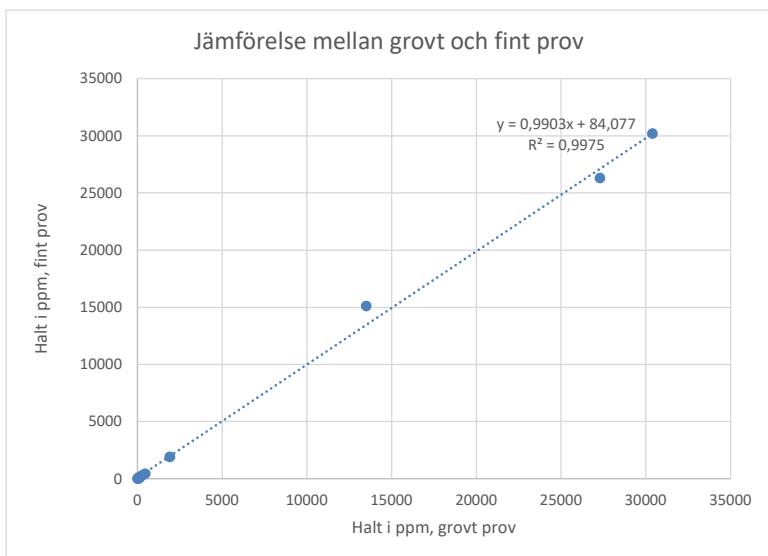


Figur 27. Illustration över de olika mätserier som gjorts på schaktmassa.



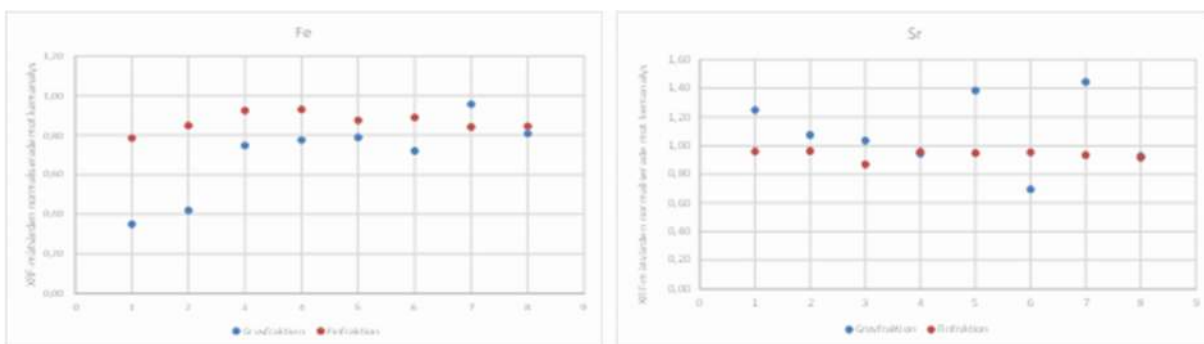
#### 4.4.1 Effekt av kornstorlek

För det återvunna materialet undersöktes effekten av mättid och kornstorlek. Två separata kemianalyser gjordes för att se om det var någon signifikant skillnad i kemiskt innehåll i en grövre fraktion 0-16 mm respektive en finare 0-4mm. Resultatet som visas i diagrammet i figur 28 visar att det är mycket lite skillnad mellan de två fraktionerna och ett  $R^2$ -värde=0,9975 indikerar att det inte finns någon signifikant skillnad.



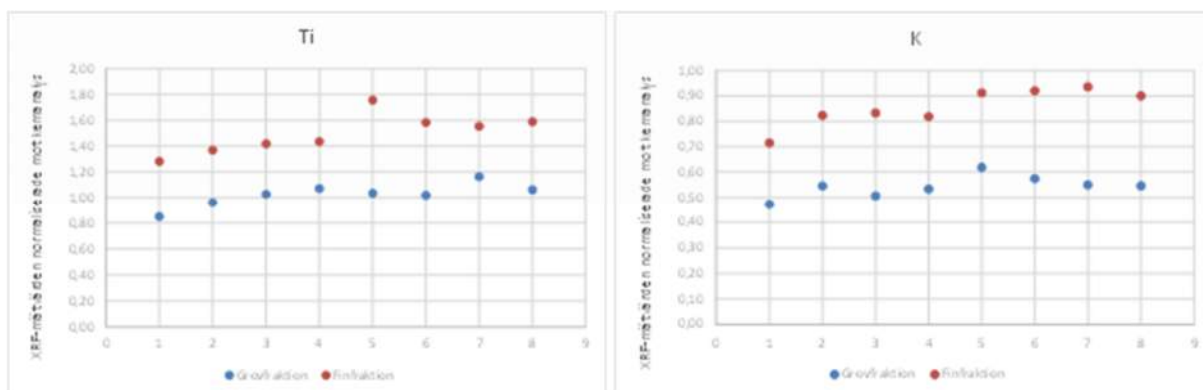
Figur 28. Jämförelse mellan kemisk analys på 0-16 fraktion på x-axeln och 0-4 mm-fraktion på y-axeln.

Om man i stället jämför XRF-mätvärden (normaliserade mot geokemiskt analysresultat) för olika fraktioner träder ett lite annat mönster fram. Generellt verkar mätningarna på finfraktionen ge en något mindre spridning, som exemplifierat med diagram för järn och strontium, som visat i figur 29.



Figur 29. XRF-mätningar av järn respektive strontium på grov- respektive finfraktion, normaliserade mot kemianalyser på grov- respektive finfraktion.

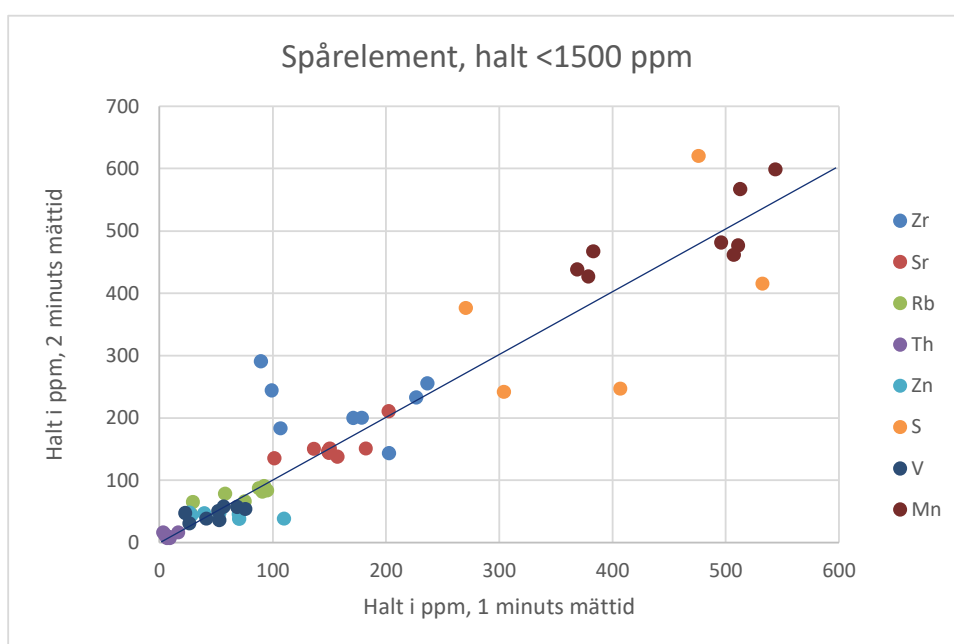
För andra element (titan och kalium) verkar finfraktionen ge ett systematiskt högre värde än grovfraktionen (Figur 30).



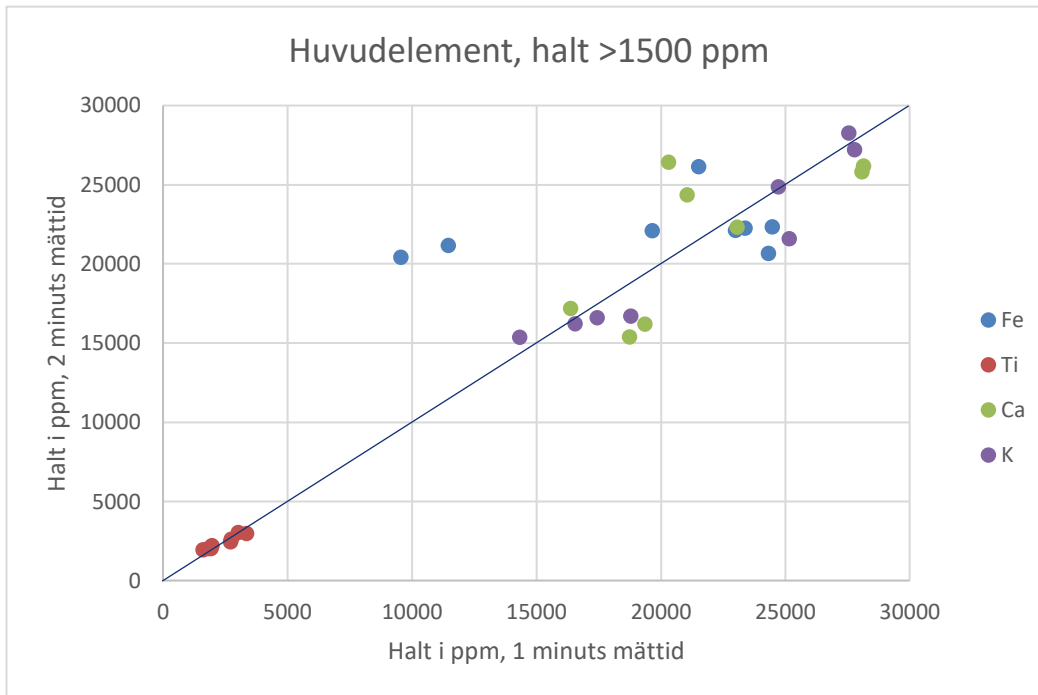
Figur 30. XRF-mätningar av titan respektive kalium på grov- respektive finfraktion, normaliserade mot kemanalyser på grov- respektive finfraktion.

#### 4.4.2 Effekt av mättid

Det gjordes också en undersökning av vilken effekt mättiden hade för mätning på ÅV-material. Generellt finns en god överensstämmelse mellan resultaten av 1 och 2 minuters mätning, vilket illustreras i figurerna 31 och 32, där element med halter över respektive under 1500 ppm plottas var för sig. Linjen i plottarna representerar full överensstämmelse.



Figur 31. Diagram med jämförelse mellan 1 respektive 2 minuters mättid för återvunna massor. I diagrammet visas element med halter under 1500 ppm.



Figur 32. Diagram med jämförelse mellan 1 respektive 2 minuters mättid för återvunna massor. I diagrammet visas element med halter över 1500 ppm.

## 5. Diskussion

De analyserade materialen spänner över ett stort ursprungsområde, entreprenadberg med olika berggrundsgeologi, schaktmassor, betongkross och andra återvunna material. Mätningen med XRF-utrustning ska anpassas efter vilket material som mäts (användning av olika mätprotokoll). De resultat som erhålls påverkas i hög grad av provtagning, både när det gäller XRF-mätning och de prover som skickas för geokemisk analys på laboratorium. Vid XRF-mätning är det ett litet område som mäts medan ett geokemiskt prov sannolikt representerar ett större urval av materialet i och med att större prov tas ut för att därefter homogeniseras och delas ned på ett standardiserat sätt till ett representativt analysprov. Med andra ord påverkas XRF-resultatet av var och hur man riktar utrustningen. Sammantaget påverkar detta överensstämmelsen mellan XRF-data och analysresultat från kemiskt laboratorium.

Tidigare studier (t.ex. Häägg 2022) och även detta projekt visar på att grundämnen med högre atomnummer ger tillförlitligare resultat, dvs bättre överensstämmelse med geokemisk data och detta framkommer även i det aktuella projektets resultat.

I och med att det inte alltid finns en exakt överensstämmelse mellan XRF-resultat och geokemisk data (speciellt inte för element med lägre atomnummer) behöver en lokal kalibrering göras (Häägg (2022) samt Hagelia & Fjermesta (2016)) och det visar även resultaten som redovisas i denna rapport. Med lokal kalibrering avses att denna får göras på en specifik plats och för ett specifikt material, det vill säga att det inte går att använda några generella omräkningsfaktorer. I de fall där det räcker med kvalitativa data kan utrustningen användas som "screening-metod". Undersökningen med avseende på svavel visade att det är möjligt att upptäcka svavel med XRF-utrustningen och att det gick att hitta ett samband med geokemisk analys, men att det behövs en omräkningsfaktor som tas fram på samma sätt som den lokala kalibreringen beskriven ovan.

De olika mätprotokoll som kan användas för XRF-mätning är anpassade efter vilken typ av material som ska undersökas (solitt material, partikulärt et cetera). Studien beskriven i denna rapport pekar på att mätprotokollet TestAll Geo var bäst på att fånga upp flest element och har bättre överensstämmelse med geokemiska data, baserat på de material som undersökts.

Inverkan av kornstorlek på mätresultaten var inte så signifikant, men det finns tendenser att finkornigare material ger bättre och "jämnare" överensstämmelse med geokemisk data. Detta är logiskt då inverkan av hur enskilda mineraler sitter i ett bergartsfragment eller cementpasta på enskilda partiklar blir mindre ju finkornigare materialet är då XRF-instrumentet kan fånga upp en mer slumpmässig mer homogen sammansättning på sin avgränsade mätyta. Att skillnaden inte var signifikant i denna studie beror sannolikt på att kornstorleksvariationen var liten (partikelstorleken var som mest 4 mm) samt att det sannolikt var så att mätning instinktivt riktades mot finkornigare partier av ett prov.

Studien visar att fukttinnehållet i provet visar sig ha liten eller ingen betydelse för det uppmätta resultatet, upp till en viss gräns. Detta har också undersökts av Robertsson (2020), som visade att ett gränsvärde uppstår vid ca. 30% vattenkvot, sannolikt för att

materialmatrisen här förändras signifikant. I denna studie var vattenkvoten lägre än 30%.

Emballage runt materialet i form av plastpåse används för att inte förorena XRF-utrustningens "mätlin". Resultaten som redovisas i denna rapport påvisar inte någon större effekt av att mäta med eller utan emballage.

Med tanke på den begränsade ytan som mäts vid XRF-mätning är det en fördel att upprepa mätningen en till två gånger genom att flytta instrumentet något mellan varje mätning. Studien som presenteras i denna rapport visar att detta inte alltid är nödvändigt men det ger mer tillförlitliga resultat och reducerar risken att få med extrempunkter i resultatet. Det rekommenderas starkt att göra upprepade mätningar för att undvika att felaktiga 0-registreringar.

Mättiden har en inverkan på resultatet, men i denna studie är det inte så tydligt. Dock gäller att ju längre mättid desto större precision, i vart fall upp till 2 minuters mättid. Längre mättider än så undersöktes inte inom projektet.

Skillnaderna är små mellan XRF-värden från mätning på delprov respektive samlingsprov och slutsatsen är att det går bra att antingen ta ett samlingsprov och göra XRF-mätning på det eller att göra XRF-mätning i samband med att delproverna för samlingsprovet tas ut. I det senare fallet får man i tillägg en bra indikation på om materialet som provet tas ut på är homogent eller inte och om det kan rekommenderas att ta ut fler prover för att fånga upp de representativa innehållet.

## 6. Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från studien redovisade i denna rapport:

- Mätningar med handhållen XRF kan vara en bra metodik i vissa fall. Instrumentet mäter med högre precision på tyngre element såsom metaller, ju högre atomnummer på element desto högre precision i mätningarna. I fall där man kan genomföra en lokal kalibrering mot det för undersökningen relevanta material, till exempel bergartstyper, kan instrumentet ge kvantitativa data och en god överblick över variationen i halter för specifika ämnen.
- Instrumentet kan också mäta lättare ämnen, som svavel, men för att få direkt användbara värden bör det genomföras en inledande kalibrering av instrumentet mot den lokala geologin. Om detta inte kan göras bör mätvärden från XRF-instrumentet användas med försiktighet och på sin höjd som en indikation.
- Man bör undersöka hur precisionen varierar med olika mätprotokoll för det instrument man använder. I den aktuella studien fångade mätprotokoll TestAllGeo upp flest element.
- Vid mätningar med instrumentet bör man göra trippelmätningar på varje delprov för att minska risken för att extrema punktvärden dominerar. Samlingsprov från schaktmassa visade inte någon systematisk variation mellan delprov, medelvärden och samlingsprov, men ger en någorlunda bild av innehållet, i alla fall för vissa element.
- "Normal" fukthalt (naturfuktigt) har ingen större påverkan på resultatet, det betyder att provet inte behöver torkas, vilket förenklar mätproceduren – litteraturstudien visar dock att vid en vattenkvot större än 30% påverkas mätvärdena.
- Precisionen ökar något med minskad kornstorlek men de uppmätta halterna visar en god överensstämmelse (på prover med maxkornstorlek upp till 4 mm).
- Att använda emballage av plast påverkar inte resultat nämnvärt.
- Vissa element visar konsekvent högre värden och andra lägre jämfört med kemianalyser, men det verkar också finnas en effekt som beror på material och mätprotokoll. Kalium, järn, barium och titan ligger ofta högt i förhållande till kemianalys, medan zink, krom, svavel och strontium ligger ofta lågt. En lokal kalibrering kan eventuellt nå fram till en konstant omräkningsfaktor för olika element.
- Det finns inga systematiska skillnader som beror på vilken typ av material, entreprenadberg, schaktmassa, betong eller ÅV, som undersökts.

## 7. Fortsatta studier

Följande delar kan vara intressanta att studera vidare:

- Testa att mäta längre tid för att reda ut när resultatet är "good enough" i förhållande till arbetsinsats.
- Medelvärde av 15-20 mätningar gav tillförlitligast resultat, men det är intressant att utvärdera var gränsen går i tillförlitlighet, det vill säga hur många delprover är "good enough" i förhållande till arbetsinsats.
- Undersöka ytterligare påverkan av utrustningsfabrikat på mätresultaten samt inverkan av olika mätprotokoll. Även påverkan av mättid för olika våglängdsintervall är av intresse att studera noggrannare.

## Litteraturförteckning

- Esberg, C. 2005: Inventering av förorenad mark på LKAB's industriområden i Kiruna, Svappavaara och Malmberget. Examensarbete 20 p, Institutionen för markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala, 89 s.
- Hagelia, P., & Fjermestad, H. 2016: Bruk av XRF på bergarter för vurdering av miljörisiko- Exempel från Rv4 Gran og E18 Grimstad-Kristiansand. Statens vegvesens rapportar 516, 46 s.
- Häägg, M. 2022: Evaluating a method using pXRF for measuring sulphur along Ostlänken. Master of Science thesis B1206, Göteborg University. 39 s.
- Magomet, R., Zhikharev, S., Maltsev, S. & Norina, N. 2021: Method of rapid assessment of sulfide sulfur content in host rocks. E3S Web of Conferences 244, 04009 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124404009>, 8 s.
- Naturvårdsverket, 2007: Mottagningskriterier för avfall till deponi. Handbok 2007:1 med allmänna råd till Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall (2004:10).
- Ringström, E. 2011: En jämförelse av två Röntgenfluorescensdetektorer (XRF). Institutionen för Samhällsbyggnad och naturresurser, Luleå tekniska universitet, 36 s.
- Robertsson, C. 2020: Metallhalter i jord – Undersökning med en portabel XRF. Examensarbete 15 hp, Kandidatprogrammet i Miljö- och hälsoskydd, Umeå Universitet, 29 s.
- Taylor, P.C, Yurdakul, E. & Ceylan, H. 2012: Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA): Application of a Portable X-Ray Fluorescence Technique to Assess Concrete Mix Proportions. Technical report, Part of InTrans Project 09-353, 33 s.
- Ytreberg, E., Lagerström, M., Holmqvist, A., Eklund, B., Elwing, H., Dahlström, M., Dahl, P. & Dahlström, M. 2017: A novel XRF method to measure environmental release of copper and zinc from antifouling paints. Environmental Pollution. Vol. 225, p. 490-496



Bilaga 1

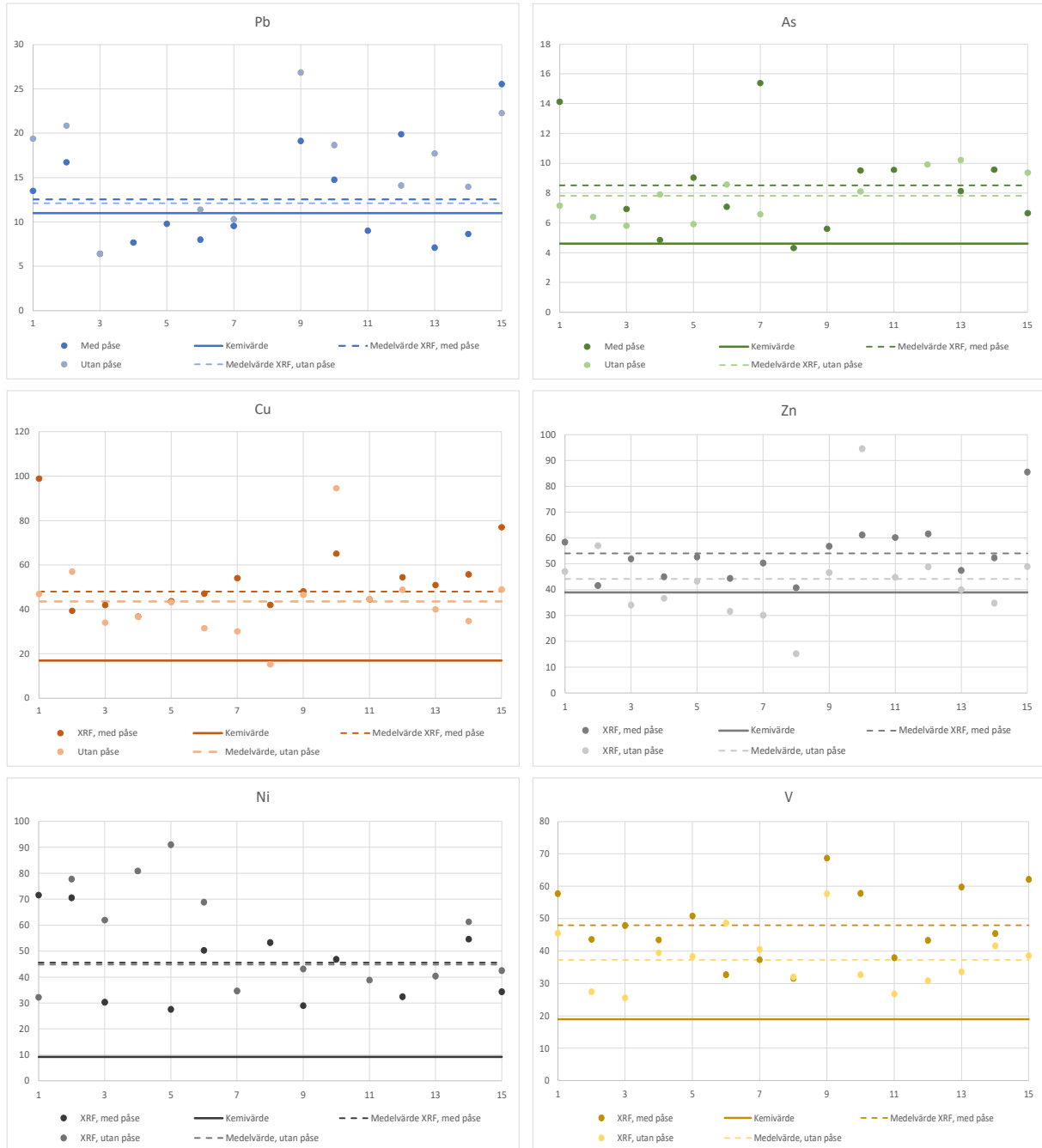
XRF-utrustningens detektionsgräns för respektive element som mäts.

Limits of Detection in ppm (mg/kg)							
	Time	60s per filter w/out He					
	Matrix	SiO <sub>2</sub>		SiO <sub>2</sub> +Fe+Ca		SRM	
Elements	Ba	35		40		45	
	Sb	12		15		15	
	Sn	15		18		20	
	Cd	8		10		10	
	Pd	5		5		5	
	Ag	A/S		A/S		A/S	
	Mo	3		3		3	
	Nb	3		3		3	
	Zr	3		3		5	
	Sr	3		3		5	
	Rb	3		3		3	
	Bi	3		5		5	
	As	3		5		5	
	Se	3		3		3	
	Au	16		20		20	
	Pb	5		10		10	
	W	40		60		60	
	Zn	8		15		15	
	Cu	12		15		15	
	Ni	25		30		30	
	Co	20		100		100	
	Fe	35		N/A		N/A	
	Mn	60		65		85	
	Cr	20		30		35	
	V	10		20		35	
	Ti	10		20		60	
	Ca	50		N/A		N/A	
	K	40		N/A		N/A	
Cl	60	50*	80	65*	75	65*	
S	70	55*	90	75*	125	90*	
P	250	200*	400	330*	300	230*	
Si	N/A	N/A*	N/A	N/A*	N/A	N/A*	
Al	500	220*	1000	500*	2500	1000*	
Mg	3500	750*	6000	1500*	6500	2000*	

Limits of Detection in ppm (mg/kg)				
	Time	60s per filter		
	Matrix	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> +Fe+Ca	SRM
Elements	Mo	3	3	3
	Zr	3	4	7
	Sr	3	3	7
	U	5	4	7
	Rb	3	3	5
	Th	4	4	5
	Pb	5	8	8
	Se	3	4	4
	As	4	7	7
	Hg	6	9	9
	Au	7	9	9
	Zn	7	10	12
	W	20	30	30
	Cu	10	13	15
	Ni	25	30	30
	Co	20	90	90
	Fe	25	N/A	N/A
	Mn	35	50	65
	Cr	10	22	30
	V	10	25	60
	Ti	20	60	150
	Sc	10	75	80
	Ca	40	N/A	N/A
	K	45	150	N/A
	S	75	275	350
	Ba	35	45	45
	Cs	30	35	35
	Te	30	35	35
Sb	15	20	20	
Sn	15	20	20	
Cd	10	12	12	
Ag	A/S	A/S	A/S	
Pd	10	12	12	

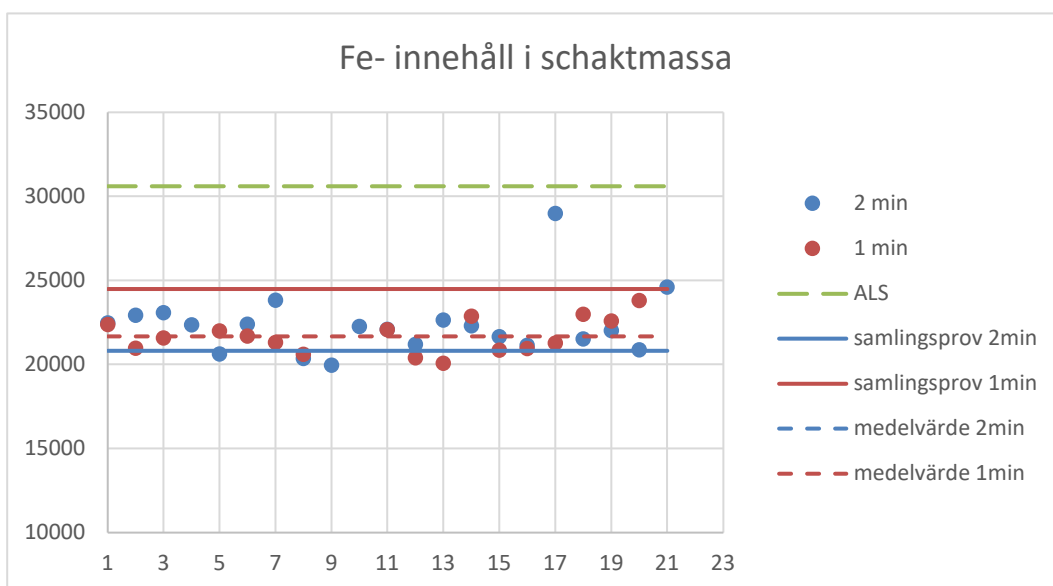
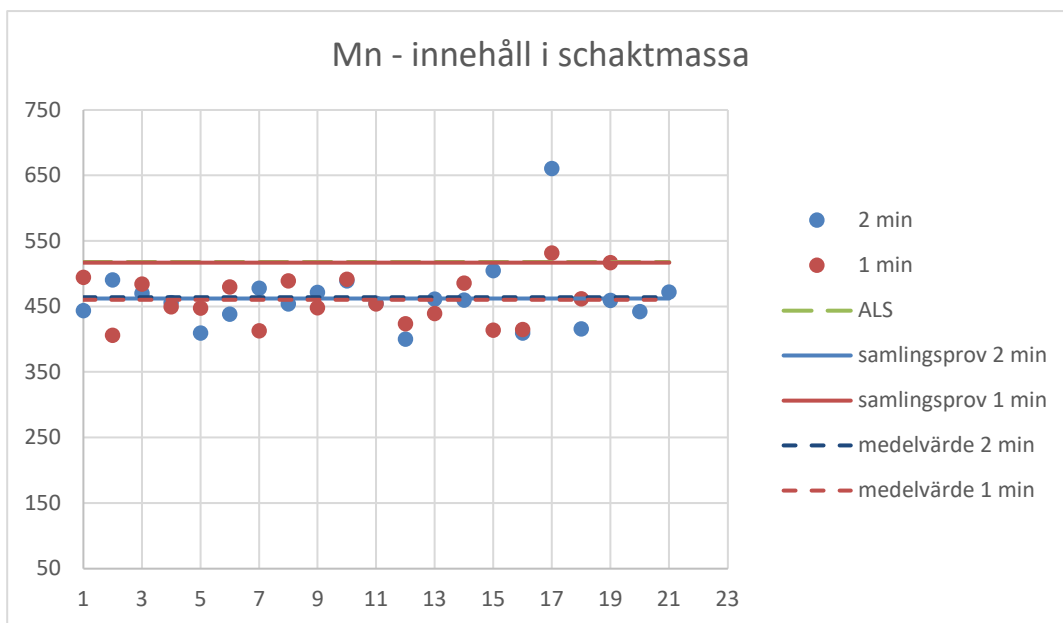
## Bilaga 2

### Schaktmassa- Effekt av emballage och fukttinhåll

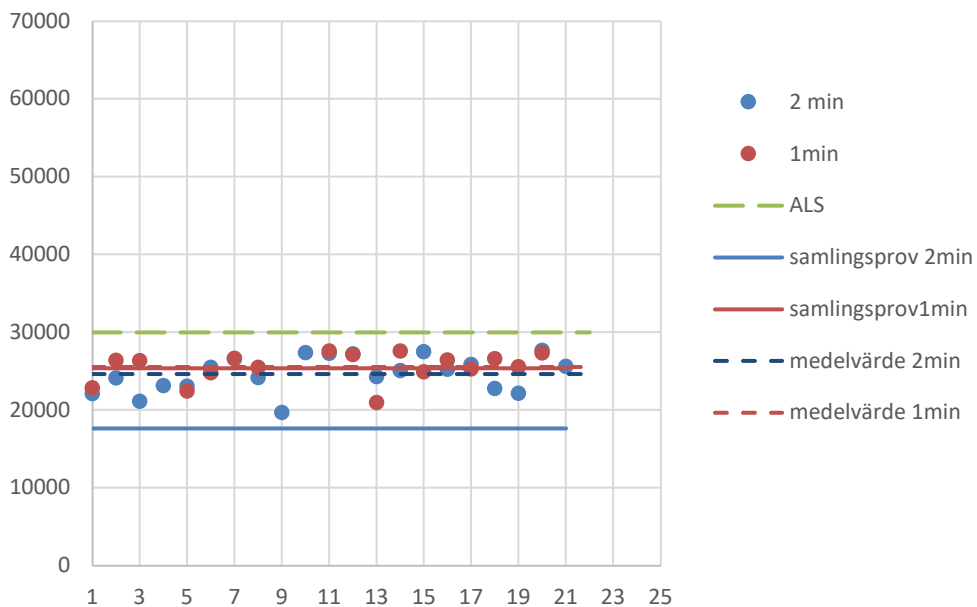


### Bilaga 3

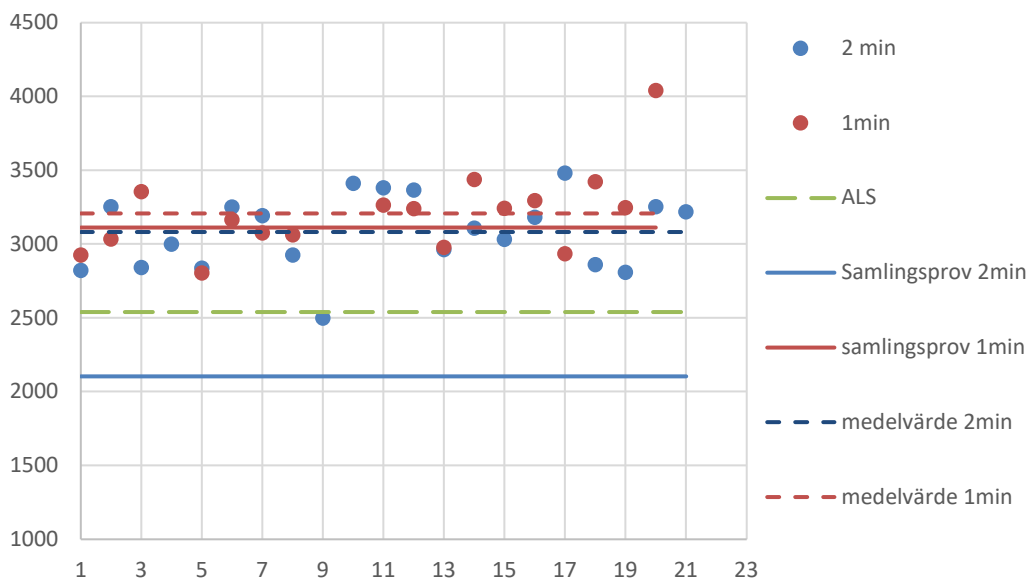
#### Mättid och samlingsprov



### K-innehåll i schaktmassa



### Ti-innehåll i schaktmassa



### Ca-innehåll i schaktmassa

