

# Metod för verifiering av avfallsskannande system

Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess  
utveckling

---

---



---

**Rapportnummer:** B2500

**I samarbete med:** Tekniska Verken, Vattenfall Värme, Umeå Energi och RoboWaste

**Författare:** Henric Lassesson, Hanna Unsbo och Henrik Fallgren

---

**Medel från:** Avfall Sverige, RoboWaste och Stiftelsen IVL (SIVL).

**Granskare:** Jan-Olov Sundqvist

**Godkännare:** Stefan Pettersson

**ISBN:** 978-91-7883-673-4

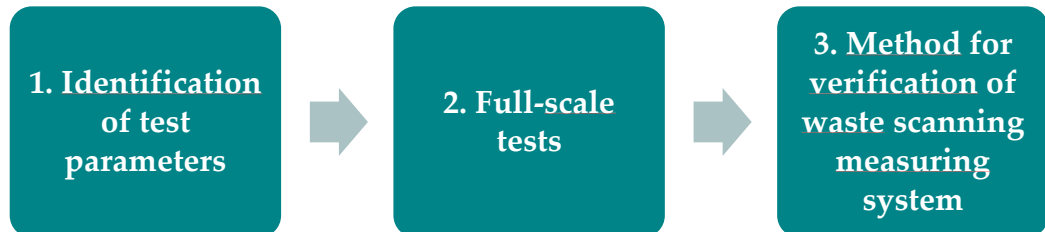
## Summary

---

Greenhouse gas emissions from waste incineration in Sweden were five times higher in 2022 than the corresponding emissions in 1990. In recent decades, the composition of mixed waste has changed and today the waste consists of more fossil-based plastic than in 1990. Fossil-based plastics account for about 90 % of total greenhouse gas emissions generated from waste incineration. One possible measure to reduce the plastic content is to introduce a separate fee linked to the plastic content of the waste. This may lead to economic incentives to increase pre-sorting of combustible waste, which would result in a higher proportion of plastic being sorted out for recycling instead of the plastic being incinerated.

To be able to introduce a separate fee linked to the plastic content, information about the plastic content is required. However, no commercial methods to measure the amount of plastic in waste in a fast and efficient way at waste incineration plants has been available. In the autumn of 2023, "FossilEye" was presented, a waste-scanning measurement system, which enables incoming mixed combustible waste to be scanned and the plastic content to be analyzed. However, for waste-sensing measuring systems to be operational, it is important that such systems can be evaluated, validated and verified via a systematic methodology. This project aims to develop a method to verify the accuracy and limitations of waste-scanning measurement systems intended to estimate the amount of plastic in mixed waste.

To achieve the purpose of the project, three separate sub-steps were carried out, which are presented in Figure S1. The first step was to identify various suitable test parameters when verifying the reliability and accuracy of waste-scanning measurement systems. Subsequently, full-scale tests of the FossilEye measurement system were carried out, which were based on the above-mentioned test parameters. Full-scale tests of the FossilEye measurement system are then carried out, which is based on the aforementioned test parameters. The full-scale tests are carried out with the aim of comparing measurement results from a waste-scanning measurement system with known values, as well as contributing to the understanding of possible limitations of similar measurement systems.



*Figure S1: Schematic diagram of the sub-steps in the project that were carried out.*

The project has had the opportunity to follow FossilEye during its pilot studies and can thus provide an insight into how this measurement system was functioning during its development phase. At the same time, these tests have provided a deeper insight into which tests are important for a future verification of a waste-scanning measurement system, as well as how those tests ought to be set up.

Currently, there is no alternative method to reliably determine exactly how much fossil material is in 5–10 m<sup>3</sup> of mixed waste. This turned out to be one of the most important challenges in the project.

- It turned out to be difficult to assemble a suitable waste from known quantities of known materials because it was then influenced by human judgement, which is not always completely perfect. Furthermore, it was difficult to create a known sample/demonstration waste that actually resembled the waste arriving to the incinerators.
- In addition, it was clearly shown during the project how much variation there can be between different forms of waste. It is not possible to find a single composition that can be seen as representative of all wastes that may be relevant for this type of measurement. It might be possible to find a number of compositions that can be seen as reasonably representative of a number of different categories of waste, but this remains to be proven.
- Carrying out composition analysis of real waste that is also allowed to be measured by the measurement system may work better, but again it is influenced by human judgement. Many items consist of more than one material and many items are contaminated with all sorts of things, which makes it difficult to determine how much fossil material is in such an item.

## METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM

Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

- A dedicated incineration of a larger amount of material in a waste boiler with measurement of the content of biogenic carbon dioxide in the flue gases, via carbon-14, also proved to give uncertain results. It was only possible to see an average value of a large amount of waste, which obscured the variation between different batches. In addition, there were several parameters that were uncertain, which gave a larger range of possible values.

The conclusion and suggestion from this were that a calculation of measurement uncertainty should be based partly on a well-specified comparison, partly on repeatability. The well-specified comparison can, for example, be based on composition analysis of real waste, in combination with combustion with carbon-14 measurement. The composition analysis of real waste should then be well specified to sort out all the materials that the measurement system is expected to include in its result. The combustion, with carbon-14 measurement of flue gases, should take place on the fractions that were taken out in the composition analysis in order to determine the proportion of fossil material in the various fractions. It should take place in a lab dedicated for those types of measurements, not in a boiler adapted for district heating production. The repeatability should only be based on comparison of measurements directly after each other as the waste can be affected by the measurement itself. The more measurements that have passed between repetitions, the more the result can change because the composition actually changes. Measurement number  $N$  is thus compared against measurement number  $N+1$ . Ideally, several measurement uncertainty calculations are made, so that there is a measurement uncertainty calculated for each type of waste that the measurement tool must be able to analyze. There is a big difference between waste and waste.

Key words: Waste incineration, plastic, operational waste, residual waste, test method

## Sammanfattning

---

Växthusgasutsläppen från avfallsförbränningen i Sverige var 2022 fem gånger högre än motsvarande utsläpp 1990. Sammansättningen av avfallet har under de senaste decennierna förändrats och idag består avfallet av en större andel fossilbaserad plast än tidigare. Fossilbaserad plast motsvarar omkring 90 % av de totala växthusgasutsläppen från avfallsförbränningen. En möjlig åtgärd för att minska plastinnehållet är att införa en separat avgift kopplat till plastinnehållet som läggs till i mottagaravgiften. Detta skulle troligen öka de ekonomiska incitamenten att försortera vid källan av avfallet, vilket skulle resultera i att en större andel plast sorteras ut för materialåtervinning i stället för att plasten förbränns.

För att kunna införa en separat avgift kopplad till plastinnehållet krävs information om mängden plast. Det har dock inte funnits några kommersiella metoder för att mäta plastmängden i avfallet på ett snabbt och effektivt sätt vid avfallsförbränningsanläggningarna. Under hösten 2023 presenterades "FossilEye", ett avfallsskannande mätsystem, som möjliggör att inkommande blandat brännbart avfall kan skannas av och plastinnehållet analyseras. För att avfallsskannande mätsystem ska gå att använda är det dock viktigt att sådana system kan utvärderas, valideras och verifieras via en systematisk metod. Detta projekt syftar till att utveckla en testmetod för att verifiera noggrannheten och begränsningarna av avfallsskannande mätsystem avsedda för att uppskatta mängden plast i blandat avfall.

Projektet genomfördes i tre separata delsteg, vilket presenteras i Figur S1. Det första steget var att identifiera olika lämpliga testparametrar vid verifiering av tillförlitligheten och noggrannheten av avfallsskannande mätsystem. Därefter genomfördes fullskaliga tester av mätsystemet FossilEye, vilket baserades på de ovannämnda testparametrarna. De fullskaliga testerna genomfördes i syfte att jämföra mätresultat från ett avfallsskannande mätsystem med kända värden, samt bidra till förståelsen för eventuella begränsningar av liknande mätsystem.



Figur S1: Schematisk bild över de delsteg i projektet som genomfördes.

Projektet har haft möjlighet att följa FossilEye under dess pilotstudier och kan således ge en inblick i hur detta mätsystem fungerade under dess utvecklingsfas. Samtidigt har dessa tester gett en djupare insikt i vilka tester som är viktiga för en framtida verifiering av ett avfallsskannande mätsystem, samt hur de testerna bör ställas upp.

I dagsläget finns det inte någon alternativ metod för att på ett säkert sätt avgöra exakt hur mycket fossilt material som finns i 5–10 m<sup>3</sup> blandat avfall. Detta visade sig bli en av de viktigaste utmaningarna i projektet.

- Det visade sig vara svårt att sätta ihop ett passande avfall av kända mängder av kända material eftersom det då påverkades av den mänskliga bedömningen, som inte alltid är helt perfekt. Dessutom var det svårt att skapa ett känt provavfall/demonstrationsavfall som faktiskt liknade det avfall som kommer in till förbränningsanläggningarna.
- Dessutom visades det tydligt under projektets gång hur stor variation det kan vara mellan olika former av avfall. Det går inte att hitta en enda sammansättning som kan ses som representerbar för allt avfall som kan vara relevant för den här typen av mätningar. Möjligtvis går det att hitta ett flertal sammansättningar som kan ses som någorlunda representerbara för ett flertal olika kategorier av avfall, men det återstår att bevisa.
- Att utföra plockanalyser av verkligt avfall som också får mätas med mätsystemet kan fungera bättre, men återigen påverkas det av den mänskliga bedömningen. Många artiklar innehåller mer än ett material och många artiklar är nedsmutsade av allt möjligt annat, vilket gör det svårt att avgöra hur mycket fossilt material som finns i en sådan artikel.

## METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM

Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

- En dedikerad förbränning av en större mängd material i en avfallspanna med mätning av halten biogen koldioxid i rökgaserna, via kol-14, visade sig också vara osäkert. Det gick bara att se ett medelvärde av en stor mängd avfall, vilket dolde variationen mellan olika batcher. Dessutom var det flera parametrar som var osäkra vilket gav ett större spann av möjliga värden.

Slutsatsen och förslaget från detta blev att en mätosäkerhetsberäkning bör bygga på dels en väl specificerad jämförelse, dels på repeterbarhet. Den väl specificerade jämförelsen kan exempelvis baseras på plockanalys i kombination med förbränning med kol-14-mätning. Plockanalysen bör då vara väl specificerad på att plocka ut alla de material som mätsystemet förväntas ta med i sitt resultat. Förbränningen, med kol-14-mätning av rökgaser, bör ske på de fraktioner som togs ut i plockanalysen för att avgöra andelen fossilt material i de olika fraktionerna. Det bör ske i labbskala, inte i en panna som är anpassad för fjärrvärmeproduktion. Repeterbarheten bör endast baseras på jämförelse av mätningar direkt efter varandra då avfallet kan påverkas av själva mätningen. Ju fler mätningar som har gått mellan repetitionerna desto mer kan resultatet förändras av att sammansättningen faktiskt förändras. Mätning nummer  $N$  jämförs således mot mätning nummer  $N+1$ . Lämpligtvis görs det flera mätosäkerhetsberäkningar, så att det finns en mätosäkerhet beräknad för varje typ av avfall som mätverktyget ska klara av att analysera. Det är stor skillnad mellan avfall och avfall.

Nyckelord: Avfallsförbränning, plast, verksamhetsavfall, restavfall, testmetod



## Innehållsförteckning

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Summary</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Sammanfattning</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1 Inledning</b>   | <b>11</b> |
| 1.1 Syfte och problemställning   | 12        |
| <b>2 Bakgrund</b>  | <b>13</b> |
| 2.1 Mätssystemet FossilEye   | 14        |
| 2.2 SS-EN 14181:2014   | 16        |
| <b>3 Metod</b>   | <b>16</b> |
| 3.1 Identifiering av testparametrar  | 17        |
| 3.2 Fullskaliga tester   | 20        |
| 3.2.1 Tekniska Verken i Linköping  | 20        |
| 3.2.2 Vattenfall Värme i Uppsala   | 28        |
| 3.2.3 Umeå Energi  | 30        |
| <b>4 Resultat och diskussion</b>   | <b>31</b> |
| 4.1 Mätssystemets klassning av olika monofraktioner                                  | 32        |
| 4.2 Mätssystemets resultat vid en förbestämd sammansättning av testmaterial          | 37        |
| 4.3 Mätssystemets repeterbarhet  | 39        |
| 4.4 Mätssystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material  | 41        |
| 4.5 Mätssystemets väderkänslighet (till exempel snö och kyla)                        | 43        |
| 4.6 Mätssystemets resultat vid olika matningshastigheter                             | 49        |
| 4.7 Mätssystemets resultat vid skillnad i förbehandling                              | 49        |
| 4.8 Mätssystemets tillförlitlighet vid förflyttning                                  | 51        |
| 4.9 Mätssystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast | 53        |
| 4.9.1 Dedikerad förbränning med rökgasmätning  | 53        |
| 4.9.2 Plockanalyser  | 56        |
| 4.10 Minsta lämpliga provmängd   | 59        |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>Analys och slutsatser</b>   | <b>61</b> |
| <b>6</b> | <b>Referensförteckning</b>   | <b>66</b> |
|          | <b>Bilaga I: Förslag på monofraktioner att testa vid Tekniska Verken</b>                             | <b>69</b> |
|          | <b>Bilaga II: Bilder av monofraktioner testade vid Tekniska Verken</b>                               | <b>72</b> |
|          | <b>Bilaga III: Beräkningsmetod för avfallssammansättning baserat på dedikerad förbränning</b>        | <b>77</b> |
|          | <b>Bilaga IV: Sammanställning av resultat från plockanalyser</b>                                     | <b>82</b> |
|          | <b>Bilaga V: Bilder av de fraktioner som skickats för plockanalys vid Vattenfall Värme i Uppsala</b> | <b>83</b> |

# 1 Inledning

---

Under 2022 stod växthusgasutsläppen från avfallsförbränning i Sverige för cirka 3,1 miljoner ton koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar 78 % av de totala utsläppen från den svenska el- och fjärrvärmeproduktionen. De senaste decennierna har utsläppen från avfallsförbränningen i Sverige ökat. Exempelvis var växthusgasutsläppen från avfallsförbränningen fem gånger högre 2022 än 1990. En av orsakerna till de ökande utsläppen är förändringen i avfallets sammansättning. Idag består avfallet i högre grad av fossilbaserade material, vilket har en stor inverkan på utsläppen från avfallsförbränningen i Sverige. Fossilbaserad plast uppskattas stå för över 90 % av de totala växthusgasutsläppen från avfallsförbränningen (Naturvårdsverket, 2024; SCB, u.å.).

Sedan 2013 ingår de flesta svenska avfallsförbränningsanläggningarna i handeln om utsläppsrätter (EU ETS), vilket innebär att anläggningarna betalar för att släppa ut växthusgaser (Naturvårdsverket, u.å., 2021). I dag är det i praktiken fjärrvärmekunden som betalar kostnaden för växthusgasutsläppen, även fast deras möjlighet att påverka vad som skickas till avfallsförbränning i Sverige som helhet är liten. För att få en större påverkan på utsläppen från avfallsförbränningen skulle utsläppskostnaden i stället kunna fördelas enligt principen "förorenaren betalar", det vill säga att avfallsproducenter och avfallsleverantörer betalar denna kostnad. De har större potential att kunna påverka avfallets innehåll. För att uppnå att utsläppskostnaden ska gå att fördela utifrån denna princip krävs nya innovativa metoder.

Ett exempel är att mäta mängden plast i inkommande avfall, vilket skulle göra det möjligt att lägga en separat avgift på plasten i mottagningsavgiften. Detta skulle troligen ge ett ekonomiskt incitament att öka försortering av avfallet, vilket skulle resultera i att en större andel plast sorteras ut för materialåtervinning i stället för att förbrännas. Genom att mäta plastinnehållet går det också att identifiera enskilda avfallskällor som bidrar med stora mängder plast till avfallsförbränningen. Detta förutsätter dock att det finns en möjlighet att mäta det fossila innehållet i avfallet från olika avfallsproducenter och avfallsleverantörer.

Vid början av detta projekt, september 2023, fanns det inga kommersiella metoder att bestämma plastmängden i avfallet på ett snabbt och effektivt sätt vid avfallsförbränningsanläggningarna. Under projektets gång har dock ett mätsystem,

kallat "FossilEye", utvecklats för att skanna av och analysera plastinnehållet i inkommande blandat brännbart avfall. Projektet har haft möjligheten att följa och testa mätsystemet när det var redo för fullskaliga tester på några avfallsförbränningsanläggningar.

Om avfallsskannande mätsystem ska gå att använda för att lägga en separat avgift på plastandelen i avfallet, är det viktigt att bygga upp ett förtroende för sådana mätsystem. För att skapa ett förtroende är det nödvändigt att mätsystemen kan utvärderas, valideras och verifieras via en systematisk metod. Någon sådan metod fanns inte vid början av detta projekt.

## 1.1 Syfte och problemställning

Projektet syftade till att utveckla en testmetod för att verifiera noggrannheten och begränsningarna av avfallsskannande mätsystem avsedda för att uppskatta mängden plast i blandat avfall. Ett verifierat mätverktyg som bedömer mängden plast i inkommande avfallsleveranser öppnar upp för en rörlig avgift på plastandelen i en kunds avfall, samt möjliggör återkoppling till kunden av hur plasthalten i kundens avfall förändras över tid. Följande mål har ställts upp i projektet:

1. Utveckla en testmetod för att verifiera noggrannheten och begränsningarna av skannande system avsedda för att uppskatta mängden plast i blandat avfall.
2. Använda metoden på mätsystemet "FossilEye" för att se vilka relevanta slutsatser som kan dras.

Projektet avser i förlängningen att minska mängden plast som går till förbränning och öka mängden plast som går till materialåtervinning.

Det egentliga syftet med projektet har således inte varit att verifiera funktionaliteten av FossilEye, utan att utnyttja pilotstudierna av FossilEye för att utveckla testmetoden. Samtidigt har vi lyckats bidra till en bättre förståelse för hur FossilEye fungerade under pilottesten. Hur FossilEye kommer att se ut och fungera när det väl är redo att levereras till kund får framtiden utvisa.

Att bedöma mängden plast i avfall är en tuff uppgift då avfall tenderar att vara en inhomogen massa där det krävs stora prov för att få ut ett prov som är tillräckligt

representativt för hela mängden som ska bedömas. Vanligtvis används plockanalyser, vilket i sig är en metod där det är svårt att verifiera noggrannheten. Det finns rutiner och manualer för plockanalyser (Avfall Sverige, 2022a; Avfall Sverige, 2022b) vilket ökar säkerheten, men det är likväl svårt att säkerställa att en plockanalys sker exakt likadant varje gång på grund av den mänskliga faktorn. Dessutom är det svårt att bedöma exempelvis graden av kontamination av olika material. Utöver det är plast ett extremt varierande material, med en mängd olika polymertyper och ännu fler tillsatser som kan kombineras i extremt många produkttyper. För att verifiera om ett avfallsskannande mätverktyg kan mäta denna plast gäller det alltså att förstå vad det avfallsskannande mätverktyget verkligen mäter, då mängden plast inte bara är *ett* mått utan *flera* olika mått.

Projektets centrala problemställning handlar således om att ställa upp en *ny testmetod* för verifiering av ett *aldrig tidigare testat* analysverktyg. Analysverktyget ska dessutom kunna mäta ett komplext material som kan variera i oändlighet och det finns inte några tidigare verifierade testverktyg som det kan prövas mot.

## 2 Bakgrund

---

Historiskt har det inte funnits något kommersiellt mätsystem för att uppskatta mängden plast i blandat avfall. Dock finns det kommersiella plastsorteringsanläggningar där en kombination av Near Infra Red (NIR) och Visual Sensing (VIS) används för att identifiera och sortera plast i olika fraktioner för materialåtervinning (Svensk Plaståtervinning, u.å.). Denna teknik är dock inte anpassad för att bedöma vikten av de objekt som identifieras. På marknaden finns dock teknik som kan uppskatta volymen på objekt, vilket kallas digital bildanalys. Vid en kombination av dessa tekniker kan de eventuellt användas för att uppskatta mängden plast i blandat brännbart avfall. Ett mätsystem som kombinerar just dessa tekniker har utvecklats under projektets gång, vilket kallas FossilEye, vilket beskrivs i kapitel 2.1.

För att bidra till ett förtroende för avfallsskannande mätsystem, likt FossilEye, krävs att verifieringsmetoden är pålitlig. Vid avfallsförbränning används idag olika tekniker, exempelvis sensorer för rökgasmätning, där standardiserade metoder för verifiering av mätresultatet utvecklats. I kapitel 2.2 presenteras standarden SS-EN 14181:2014, vilket använts som inspiration vid framtagningen av verifieringsmetoden för avfallsskannande mätsystem som avses att utvecklas inom detta projekt.

## 2.1 Mätssystemet FossilEye

Tekniska Verken i Linköping, Vattenfall Värme i Uppsala samt Umeå Energi har bildat ett konsortium som tillsammans har tagit initiativet att beställa utvecklingen av den mobila utrustningen FossilEye. Mätssystemet avser att snabbt kunna skanna av och analysera plastinnehållet i inkommande blandat brännbart avfall. FossilEye utvecklades tillsammans med företaget RoboWaste. Tekniken bygger på att ett prov på cirka 5 – 10 m<sup>3</sup> tas ur en inkommande avfallsleverans, och med hjälp av en kombination med NIR, VIS och digital bildanalys skattas plastinnehållet i provet. I detta avfallsskannande mätsystem bestäms vikten av den passerande mängden plast genom en kombination av densitetsnyckeltal och objektidentifiering.

Den beskrivning av mätsystemet FossilEye som följer är främst ämnad för att ge en förståelse för mätsystemet. Eventuella modifieringar av mätsystemet innan det släpps för kommersialisering inkluderas inte i denna rapport. Nedan presenteras systemet i korthet:

1. Avfallsprovet lastas i en lastficka som även fungerar som en våg där den totala vikten av avfallet mäts. Lastfickan är anpassad för att ta emot prov på cirka 5 – 10 m<sup>3</sup> av blandat avfall, vilket motsvarar en vikt på ca 500 kg till 900 kg. Provens vikt varierar dels på grund av volymen på provet, dels på grund av densiteten av provet, där fukthalten troligtvis är den största bidragande faktorn till varierande densitet.
2. Från lastfickan transporteras provet långsamt ned på ett transportband med en högre hastighet, vilket transporterar provet vidare till mätstationen. En viktig faktor i detta steg är att avfallet matas ut i en någorlunda jämn ström och fördelas ut över en så stor yta som möjligt på bandet i mätstationen.
3. I mätstationen sker följande:
  - a. När materialet kommer in i mätstationen åker det först förbi en stor värmelampa och en hyperspektralkamera (NIR) som registrerade vilka våglängder som reflekterades från materialet på bandet. Då olika material och framför allt olika plasttyper (polymersorter) absorberar olika våglängder av det infraröda ljuset går det att matcha de registrerade våglängderna mot material som mätsystemet tidigare har tränats på. Den här delen av mätsystemet liknar alltså de NIR-system som används vid kommersiella

plastsorteringsanläggningar. FossilEye har därmed en del liknande svårigheter som dessa anläggningar, exempelvis har mätsystemet svårt att registrera svart plast då den absorberar för mycket av det infraröda ljuset utan att ge något ljus som kan analyseras (NPA, u.å.). För FossilEye är det däremot inte viktigt att plasten registreras som rätt sorts plast som vid plastsorteringsanläggningar, i stället är det viktigt att maskinen lyckas registrera att det är plast. Då ljuset inte kan tränga in på djupet av materialet blir systemet också känsligt för vad som syns på ytan. Om plasten ligger överst registreras objektet som plast, men om plasten ligger under något annat registreras objektet som icke-plast. Just därför är det viktigt att materialet sprids ut ordentligt för att undvika att olika objekt blockerar varandra.

- b. Därefter åker materialet förbi en stereokamera, eller rättare sagt flera kameror monterade i olika vinklar. Dessa kameror använder synligt ljus för att identifiera objekten, vilket kan utnyttjas för att uppskatta volymen på objekten. Genom att en del objekt tidigare hade identifierats som plast av NIR-systemet går det att bestämma volymen plast som passerade kamerorna. Då mätsystemet har tränats på kända plasttyper kan det ansätta en densitet för varje plasttyp och på så sätt räkna ut vilken vikt som denna volym borde motsvara. Då volymen kan påverkas kraftigt av hur pass mycket luft, eller annat material, som finns inuti plasten samtidigt som det inte påverkar plastvikten blir mätsystemet känsligt för sådana faktorer. Det har därför, under projektets gång, satts upp kriterier för hur avfallet behöver prepareras för att ge ett bättre mätresultat. Genom att bland annat krossa materialet i förväg kan variationer i densitet minimeras. Mjukplast i form av plastpåsar har också identifierats som ett problem när det kommer till densitet då de kan ta upp stor volym utan att tillföra någon nämnvärd vikt. Mätsystemet har därför tränats på att, genom bildigenkänning, känna igen mjukplast som därmed kan få en rimligare densitet.
4. När materialet har passerat hela mätstationen faller det ut på baksidan där det sedan kan transporteras vidare till sin nästa destination, exempelvis förbränning.

Från mätsystemet får användare ut ett värde på den totala vikten av provet, den beräknade mängden plast och en procentsats om andelen plast i provet. Utöver det redovisas även en del andra parametrar om provtagningen så som starttid, sluttid och eventuella kommentarer som operatören kan lägga in.

## 2.2 SS-EN 14181:2014

Den europeiska standarden SS-EN 14181:2014 är framtagen för kvalitetssäkring av automatiska mätsystem (AMS) för emissionsmätningar i rökgaser från förbränningsanläggningar. Standarden avser att säkerställa att lagstiftningen angående datakvalitet vid mätningarna uppfylls. Denna standard är utarbetad för kalibrering av mätning av rökgaser, men har i projektet använts som inspiration vid utvecklingen av testerna för att verifiera noggrannheten och begränsningarna av avfallsskannande mätsystem. Framst erhöles inspiration från delar ur standarden som avser proceduren (QAL2) som avser kalibrering, variabilitet och validering av mätningarna av AMS.

QAL2 inkluderar följande steg för kalibrering, tester av variabilitet och validering av AMS:

1. Funktionalitetstest
2. Parallelltester
3. Utvärdering av data
4. Framtagningen av kalibreringsfunktion och validering
5. Beräkning av variabilitet
6. Test av variabilitet
7. Rapportering

## 3 Metod

---

För att uppnå syftet med projektet genomfördes tre separata delsteg, vilket presenteras i Figur 1. Det första steget var att identifiera olika lämpliga testparametrar vid verifiering av tillförlitligheten och noggrannheten av avfallsskannande mätsystem. I kapitel 3.1 presenteras de testparametrar som initialt identifierades inom projektet. Därefter genomfördes fullskaliga tester av mätsystemet FossilEye, utgående från ovannämnda testparametrar. De fullskaliga testerna genomfördes i syfte att jämföra mätresultat från ett avfallsskannande mätsystem med kända värden, samt bidra till förståelsen för eventuella



begränsningar av liknande mätsystem. I kapitel 3.2 presenteras de genomförda fullskaliga testerna. Baserat på en analys av resultaten från de fullskaliga testerna utvecklades därefter några förslag på hur testparametrarna och de fullskaliga testerna kan förbättras för att få fram en metod för verifiering av avfallsskannade mätsystem.



Figur 1: Schematisk bild över de delsteg i projektet som genomfördes.

## 3.1 Identifiering av testparametrar

Innan de fullskaliga testerna genomfördes identifierades olika testparametrar som ansågs vara av intresse att testa för att påvisa tillförlitligheten och noggrannheten av avfallsskannande mätsystem. I Tabell 1 presenteras de olika parametrarna samt en kort beskrivning/motivering av syftet.

Tabell 1: Sammanställning av de identifierad parametrarna som projektet bedömer vara relevanta vid verifiering av ett avfallsskannande mätsystem. Dessutom presenteras en kort beskrivning/motivering av testparametrarnas lämplighet vid verifiering av avfallsskannande mätsystem.

| Testparameter   | Beskrivning/motivering  |
|---|---|
| <b>Mätsystemets klassning av olika monofraktioner</b> | Blandat brännbart avfall innehåller många olika typer av material och olika leveranser har olika sammansättningar. För att kunna säkerhetsställa att monofraktioner som bör identifieras som plast av ett avfallsskannande mätsystem samt att material, exempelvis trä och papper, som bör identifieras som icke-plast klassas rätt bör tester genomföras på olika monofraktioner. Se Bilaga I för exempel på monofraktioner som kan vara intressanta att testa i ett avfallsskannande mätsystem. |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Mätsystemets resultat vid en förbestämd sammansättning av testmaterial</b></p>         | <p>Plastandelen i blandat brännbart avfall kan antas variera baserat på exempelvis ursprung och typ av avfall. Genom att ta fram olika fraktioner med en känd approximativ plastandel kan ett resultat från ett avfallsskannande mätsystems resultat jämföras med ett förväntat värde. Förslagsvis bör en fraktion med en relativt hög plastandel och en med en lägre plastandel tas fram.</p>   |
| <p><b>Mätsystemets repeterbarhet</b></p>   | <p>Ett avfallsskannande mätsystem som avser att uppskatta plastinnehållet i blandat brännbart avfall bör ge liknande resultat vid olika körningar av samma testmaterial. En bra repeterbarhet anses bidra till mer tillförlitliga resultat.</p>  |
| <p><b>Mätsystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material</b></p> | <p>Vid tillsats och/eller borttagning av plast bör ett avfallsskannande mätsystem påvisa en förändring i plastinnehåll som motsvarar mängden material som lagts till/tagits bort. Tester där plast har tillsats och/eller tagits bort för att se hur väl resultatet från ett avfallsskannande mätsystem speglar den förändrade sammansättningen är därmed av intresse att utvärdera. På motsvarande sätt bör en tillsats eller borttagning av annat material återspeglas som en förändring i total mängd avfall utan att mängden plast påverkas i mätresultatet.</p> |
| <p><b>Mätsystemets väderkänslighet (till exempel snö och kyla)</b></p>                       | <p>Väderförhållanden i Sverige skiljer sig åt beroende på var i landet man befinner sig eller vid vilken tid på året mätningarna sker. Detta kan ha en inverkan på det blandade brännbara avfallet. Exempel på detta är snöfall och kyla vilket medför till att avfallet fryser och därmed kan bilda klumpar i avfallet. Hur dessa faktorer påverkar ett avfallsskannande mätsystems resultat är därmed av intresse att studera.</p>   |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Mätsystemets resultat vid olika matningshastigheter</b></p>                             | <p>Mätsystemet FossilEye ger möjlighet att mata fram avfallet vid olika hastigheter. Matningshastighetens påverkan på resultatet är därmed av intresse att testa.</p>  |
| <p><b>Mätsystemets resultat vid skillnad i förbehandling</b></p>                              | <p>Blandat brännbart avfall genomgår ofta förbehandling i form av komprimering eller krossning. I och med att förbehandling är vanligt förekommande är det av intresse att testa hur detta påverkar resultatet som erhålls från ett avfallsskannande mätsystem jämfört med när avfallet inte har förbehandlats.</p>  |
| <p><b>Mätsystemets tillförlitlighet vid förflyttning</b></p>                                  | <p>Mobila avfallsskannande mätsystem avses kunna förflyttas mellan olika avfallsförbränningsanläggningar. Sådana system ska därmed gå att monteras ned för transport och monteras upp på en annan anläggning. Genom att testa ett och samma material efter transport av ett mätsystem möjliggörs att tillförlitligheten vid förflyttning kan utvärderas.</p> |
| <p><b>Mätsystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast</b></p> | <p>Resultaten från det avfallsskannande mätsystemet bör korreleras och kalibreras med andra referensmetoder, till exempel plockanalyser. Detta för att bidra till bättre tillförlitlighet för resultaten från mätsystemet.</p>   |
| <p><b>Minsta lämpliga provmängd</b></p>   | <p>Denna testparameter ämnar testa både mätsystemet och avfallet. Hur stora prov behöver tas från ett lass med avfall för att variationen i avfallet ska vara mindre än variationen i resultaten från mätsystemet.</p>   |

## 3.2 Fullskaliga tester

Huvuddelen av projektet innebar att följa och utvärdera de fullskaliga tester som utfördes med det avfallsskannande mätsystemet FossilEye. Både kända monomaterial som hade försorterats samt okända material i form av brännbart avfall som kom in till avfallsförbränningsanläggningarna användes vid testerna. Detta syftade att bidra med underlag för utvecklingen av en metod för verifiering av avfallsskannande mätsystem. Fullskaliga tester genomfördes vid Tekniska verken i Linköping, Vattenfall Värme i Uppsala och Umeå Energi mellan november 2023 till och med januari 2024. Testerna utfördes av respektive energibolag. Testprotokoll och instruktioner av de tester som planerades att genomföras vid respektive anläggning upprättades i samråd mellan IVL Svenska Miljöinstitutet och de berörda energibolagen.

### 3.2.1 Tekniska Verken i Linköping

Vid Tekniska Verken i Linköping genomfördes tester under tre veckor i november 2023, vilket kopplade till följande parametrar som definierats i kapitel 3.1:

- Mätsystemets klassning av olika monofraktioner
- Mätsystemets resultat vid en förbestämd sammansättning av testmaterial
- Mätsystemets repeterbarhet
- Mätsystemets resultat vid olika matningshastigheter
- Mätsystemets resultat vid skillnad i förbehandling
- Mätsystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast

En mer detaljerad genomgång av de genomförda testerna vid Tekniska Verken presenteras i kommande delkapitel.

Testanordningen stod uppställd i en uppvärmd lokal med stor garageport. Porten öppnades stundtals för att tillåta lastmaskiner och liknande att kunna passera obehindrat. Temperaturen vid testanordningen var något högre än lufttemperaturen ute men lägre än det som brukar ses som rumstemperatur (ca 20°C).

#### 3.2.1.1 Genomförda tester på monofraktioner

Ett antal monofraktioner sorterades ut från en närliggande återvinningscentral (ÅVC) i Linköping. Så gott som alla monofraktioner kördes igenom FossilEye vid

minst ett tillfälle under testperioden på anläggningen. Det enda undantaget är Hård PVC som antingen missades att testas eller antecknades som något annat material vid testet. Flera av fraktionerna testades vid två separata tillfällen och under flera separata körningar. En sammanställning av alla monofraktioner som testades vid anläggningen presenteras i Tabell 2. Bilder av monofraktionerna ligger i Bilaga II.

Tabell 2: Sammanställning och beskrivning av de monofraktioner som sorterats ut vid en ÅVC i Linköping och kördes i FossilEye vid Tekniska Verken.

| Monofraktioner              | Beskrivning av utsorterat material   |
|-----------------------------|--|
| Hårdplast från industri     | Exempelvis dunkar, brevkorgar och PEM-slang.                                   |
| Hårdplast från hushåll      | Exempelvis hinkar, leksaker och avloppsrör.                                    |
| Mjukplast från industri     | Exempelvis plastemballage.   |
| Mjukplast från hushåll      | Exempelvis påsar och bubbelplast.  |
| Hård PVC                    | Exempelvis överblivna rördelar från byggnation.                                |
| Mjuk PVC                    | Exempelvis badleksaker och delar av plastgolv                                  |
| Svart plast                 | Olika produkter av svartfärgad plast.  |
| Multilaminat-förpackningar  | Exempelvis chipspåsar, köttfärstråg, påsar för nötter samt kaffeförpackningar. |
| Textil                      | Olika typer av textilier, inklusive syntetisk textil.                          |
| Träflis                     | Flis av krossat träavfall.   |
| Däck och gummi              | Fragment av exempelvis gamla bildäck.  |
| Fiberkomposit och hårdplast | Glasfiberskivor, tennisrack, stavar.   |
| Kartong                     | Olika storlekar av kartongförpackningar.                                       |
| Porslin/keramik             | Exempelvis krukor, muggar och tallrikar.                                       |
| Metall                      | Olika föremål av metall, exempelvis rördelar.                                  |
| Frigolit                    | Exempelvis från isolering och stötdämpande material.                           |
| Skumplast                   | Exempelvis från isolering och möbelstoppning.                                  |

### 3.2.1.2 Känd sammansättning av testmaterial

Vid Tekniska Verken togs fyra avfallsfraktioner fram med en känd sammansättning, vilket baserades på monofraktionerna som testades enligt kapitel 3.2.1.1. En fraktion med hög respektive låg plastandel togs fram genom att delmängder från monofraktionerna blandades samman. Först sorterades två plastmängder ut från de monofraktioner som klassats som plast av FossilEye, vilka vägdes och kördes genom FossilEye separat. Därefter tillsattes material från

monofraktioner som klassats som 'icke-plast' till de två plastmängderna, vilket sedan kördes genom FossilEye minst tre gånger. Vid två av fyra körningar av den framtagna fraktionen med låg plastandel uppstod det fel vid mätningarna. Vid den första körningen tarerades vågen felaktigt vilket orsakade ett felaktigt värde vid invägningen av det ingående materialet. Detta korrigerades manuellt genom att ansätta invägd vikt till samma som vid körningen direkt efter. Det andra felet uppstod i form av ett avbrott vid uppmätningen av plastmängden i den fjärde mätningen. Detta korrigerades manuellt genom att addera den uppmätta mängden plast innan avbrottet med den uppmätta mängden plast efter avbrottet.

En sammanslagen fraktionen togs sedan fram genom att fraktionen med låg plastandel samt fraktionen med hög plastandel blandades. Likt de andra fraktionerna kördes materialet tre gånger genom FossilEye. Sedan krossades materialet och kördes ytterligare en gång genom mätsystemet. Den krossade sammanslagna fraktionen sparades sedan i en IBC-behållare (Intermediate Bulk Container) och skickades vidare som referensmaterial, först till Vattenfall Värme i Uppsala och sedan till Umeå Energi. I Tabell 3 presenteras de olika fraktionerna och det uppskattade plastinnehållet.

Tabell 3: En beskrivning av de avfallsfraktioner som blandades ihop baserat på testade monofraktioner.

| Avfallsfraktion                    | Beskrivning  | Uppskattat plastinnehåll [%]  |
|------------------------------------|--|---|
| <b>Fraktion med låg plastandel</b> | En blandning av mjukplast och hårdplast från industri och hushåll, multilaminat, textil samt hård respektive mjuk PVC blandades ihop motsvarande 10,8 kg. Till detta blandades 77,5 kg 'icke-plast' in i form av kartong, träflis, keramik och några bitar metall.<br><br>Den totala vikten motsvarade 88,3 kg avfall. | Den uppskattade plastandelen beräknades enligt följande:<br>$10,8 / 88,3 = 12,2 \%$ |
| <b>Fraktion med hög plastandel</b> | En blandning av mjukplast och hårdplast från industri och hushåll, multilaminat, textil samt hård respektive mjuk  | Den uppskattade plastandelen beräknades enligt följande:<br>$30,9 / 97,3 = 31,8 \%$ |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
 Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
 Mars 2025

|                                      |   |  |
|--------------------------------------|---|--|
|                                      | <p>PVC blandades ihop motsvarande 30,9 kg. Till detta blandades 66,4 kg 'icke-plast' in i form av kartong, träflis, keramik och några bitar metall.</p> <p>Den totala vikten motsvarade 97,3 kg avfall.</p>   |  |
| <b>Sammanlagren fraktion</b>         | <p>Testmaterialet med låg plastandel blandades med testmaterialet med hög plastandel. Totalt tillsattes därmed cirka 41,7 kg blandad plast samt 143,6 kg 'icke-plast'.</p> <p>Den totala vikten motsvarade cirka 185,3 kg.</p> <p>Vid repetition 2 och 3 hade dock totalvikten minskat med 1-2 kg.</p>  | <p>Den uppskattade plastandelen beräknades enligt följande:<br/> <math>41,7 / 185,3 = 22,5 \%</math></p> |
| <b>Krossad sammanslagen fraktion</b> | <p>Materialet från den sammanslagna fraktionen kördes genom en avfallskross. I samband med detta upptäcktes att en del trä hade tillförts då det låg rester kvar i krossen. Den totala mängden uppmättes till 194 kg.</p> <p>En del material från den sammanslagna fraktionen har troligtvis gått förlorat under testerna och hanteringen av materialet. Det är okänt vilken del av materialet som gått</p> | <p>Den uppskattade plastandelen beräknades enligt följande:<br/> <math>41 / 194 = 21,1 \%</math></p>     |

|   |
|---|
| förlorat och plastvikten antogs vara cirka 41 kg. |
|---|

### 3.2.1.3 Repeterbarheten vid flera körningar av samma avfall

Väl fungerande mätsystem bör uppvisa en hög repeterbarhet, det vill säga ge liknande resultat vid olika körningar av samma testmaterial. För att undersöka den egenskapen genomfördes tester där en och samma avfallsbatch kördes genom det avfallsskannande mätsystemet FossilEye flera gånger. Som minst gjordes två körningar av ett och samma avfall och max fem. I efterhand visade det sig att det vid ett tillfälle uppstod ett fel vid en kalibrering av mätsystemet på grund av smutsig kalibreringsutrustning, vilket påverkade resultatet. De resultat som påverkades av den felaktiga kalibreringen har uteslutits från analysen av repeterbarhet.

### 3.2.1.4 Mätsystemets resultat vid olika matningshastigheter

Under testperioden i Linköping testades tre olika utmatningshastigheter från inlastningsfickan på en till tre hertz (Hz). Tre olika avfallsbatcher kördes igenom Fossil Eye vid olika utmatningshastigheter. Bandet som gick förbi sensorerna gick med samma hastighet vid alla tester, men belastades alltså olika snabbt (sett som massa per tidsenhet).

### 3.2.1.5 Mätsystemets resultat vid skillnad i förbehandling

I kapitel 3.2.1.1 beskrivs hur materialet i den sammanslagna fraktionen kördes genom en avfallskross innan dess att den testades en sista gång. I samband med detta upptäcktes att en del trä hade tillförts till den sammanslagna fraktionen från rester som låg kvar i krossen. Detta möjliggjorde att en jämförelse kunde göras mellan de tre körningar som genomfördes på samma mängd innan avfallet krossades.

Den krossade sammanslagna fraktionen sparades sedan i en IBC-behållare (Intermediate Bulk Container) och skickades vidare som referensmaterial vid Vattenfall Värme i Uppsala och Umeå Energi.



### 3.2.1.6 Insamling av material till dedikerad förbränning

Vid Tekniska Verken kördes cirka 100 olika avfallsbatcher igenom FossilEye, vilket motsvarade totalt cirka 52 ton avfall. Materialet samlades in för att förbrännas under en dedikerad förbränning där prover på rökgasen samlades in för analys.

Den dedikerade förbränningen skedde i en av de mindre pannorna vid Tekniska Verken i Linköping, Panna 3, KV50 på 30 MW. Materialet hade samlats överst i en avfallsbunker, liggandes ovanpå något som enligt bästa bedömning kunde ha ungefär samma sammansättning för att minska risken för påverkan om fel material råkade lyftas in till pannan. Innan den dedikerade förbränningen togs det material från en intilliggande bunker för att hålla pannan igång, men med annat material.

Det togs fyra prov på rökgasen, vilka samlades in i täta plastpåsar med en storlek som ungefär matchar en 3 liters fryspåse. Ett prov samlades in 07:10-08:30, innan den dedikerade förbränningen påbörjades. Nästa prov samlades in 08:30-11:00, i början av den dedikerade förbränningen (när det bedömdes att rostern borde vara fri från tidigare material). Ett tredje prov samlades in 11:00-12:06, i slutet av den dedikerade förbränningen. Det sista provet samlades in 12:00-14:10, efter den dedikerade förbränningen (när det bedömdes att materialet som testats i FossilEye hade tagit slut och avfallet som låg längre ner i bunkern hade påbörjats). Alla fyra prov skickades till ett ackrediterat laboratorium, Beta Analytic Testing Laboratory, Florida, USA, för analys av halten fossil respektive biogen koldioxid (CO<sub>2</sub>) i proven. Andelen fossil/biogen CO<sub>2</sub> kunde beräknas utifrån bestämning av andelen kol-14 i proven. Kol-14 är en instabil isotop av kol som sönderfaller med en halveringstid på 5700 år, vilket innebär att den totalt saknas i fossilt material. Den bildas kontinuerligt i atmosfären och finns därför i små mängder (ca 1 ppt) i biologiskt material.

Samtidigt som rökgasproverna togs mättes även halten CO<sub>2</sub> och fukthalten i rökgasen. Det saknades tyvärr mätning av inmatad mängd bränsle och genererad mängd rökgas vilket därför fick beräknas utifrån kända värden för CO<sub>2</sub> och fukt samt ett flertal antaganden som beskrivs i detalj här nedan och sammanfattas i Tabell 4. Alla antaganden ansattes med ett högt värde, ett lågt värde och ett mittenvärde. Mittenvärdet var ett försök att gissa så nära sanningen som möjligt och de högsta och lägsta värdena var ett försök att hitta ett spann på vad som är rimligt.

- Askhalt: Vanligtvis bildas ca 18 % slagg och 5 % flygaska vid avfallsförbränningar hos Tekniska Verken i medel över ett år, som andel av

det ursprungliga bränslet. Askhalten bedömdes dock i det här fallet vara lägre än normalt. Enligt uppgift från personal vid Tekniska Verken bedömdes materialet innehålla ca 10 % aska totalt (både slagg och flygaska). Det högsta värdet antogs vara 18 % slagg och 5 % flygaska. Det lägsta antogs vara 8 % slagg och 2 % flygaska. Mittenvärdet antogs ligga däremellan på 13 % slagg och 4 % flygaska.

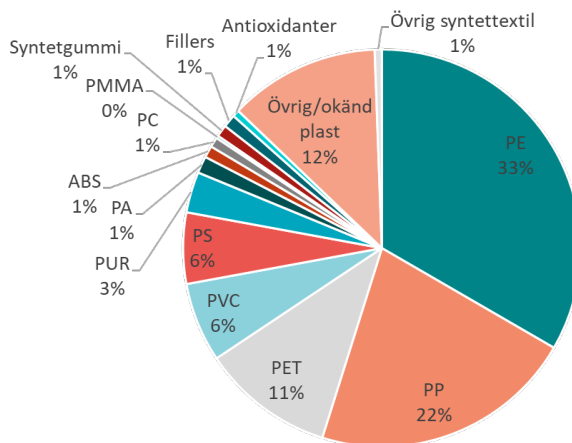
- **Plasttyp:** Kol- och väte-halt beräknades utifrån kemisk sammansättning på polymerer (utan additiv). Högt värde antogs vara PE/PP (86 % C, 14 % H). Lågt värde antogs vara PET (63 % C, 4 % H). Mittenvärde beräknades utifrån en tidigare flödesanalys av plasttyper som går till förbränning (79 % C, 11 % H) där sammansättningen syns i Figur 2 (Lassesson, 2022).
- **Biomassa:** Kol- och väte-halt beräknades för torr, askfri substans (TAS). Data för torkat slam (51 % C, 8 % H), stamved (51 % C, 6 % H) och barkpellets (55 % C, 6 % H) användes som referens för biomassa.
- **Ytterligare fukt:** Asksläckning och urea-injektion bedömdes bidra till fukthalten i rökgaserna. Mängden fukt från asksläckning beräknades utifrån uppgift att askans temperatur sänktes från 500°C till 100°C, där mängden aska motsvarades av mängden slagg utifrån tidigare antagande om askhalt. Enligt uppgift används det, i snitt över ett år, ca 400 liter urea per timme vid avfallsförbränning vid Tekniska Verken. Mängden urea behövde räknas om till mängd per använt bränsle (TAS) utifrån effekt på pannan (32 MW) och ett antaget värmevärde på 21 MJ/kg för en torr askfri substans (TAS) av ingående bränsle. Som lägsta värde antogs 50 % av beräknat värde, som högsta värde antogs 200 % av beräknat värde.

Tabell 4. Antaganden som behövde göras för att beräkna bränslesammansättningen vid den dedikerade förbränningen. Mittenvärdet är det som bedömdes som mest troligt. De högsta och lägsta värdena bedömdes som ett troligt spann på varje parameter.

| Antagande      | Parameter      | Lågt          | Mitten        | Högt            |
|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Slagg-andel    | $c_{slagg}$    | 8 %           | 13 %          | 18 %            |
| Flygaske-andel | $c_{flygaska}$ | 2 %           | 4 %           | 5 %             |
| Plast-typ      | $c_{plastC}$   | PET<br>63 % C | Mix<br>79 % C | PE/PP<br>86 % C |
|                | $c_{plastH}$   | 4 % H         | 11 % H        | 14 % H          |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
 Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
 Mars 2025

| Biomassa-typ     | $C_{bioC}$<br>$C_{bioH}$ | Slam TAS<br>51 % C<br>8 % H | Stamved TAS<br>51 % C<br>6 % H | Bark TAS<br>55 % C<br>6 % H |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Ytterligare fukt | $u_{extraH_2O}$          | 50 %<br>av beräkning        | 100 %<br>av beräkning          | 200 %<br>av beräkning       |



Figur 2. Plasttyper som går till förbränning i Sverige enligt tidigare kartläggning (Lassesson, 2022), där resultaten har förenklats så att exempelvis PET+PBT antogs vara endast PET, ABS+SAN antogs vara endast ABS, akryl antogs vara PA och elastan antogs vara PUR.

Beräkningen utgick från 100 kg CO<sub>2</sub> i rökgaserna och försökte ge en uppskattning av vad som behövde komma med i bränslet för att skapa de rökgaser som hade uppmätts, utifrån kända parametrar och de antaganden som listades här ovan. Bränslesammansättningen beräknades som fyra separata delar; plast, biomassa, fukt och aska. Plasten och biomassan antas alltså vara fria från både aska och fukt (det som kallas TAS), då askan och fukten beräknas som separata delar. Beräkningen förklaras i mer detalj i Bilaga III.

Beräkningen av bränslesammansättning utifrån den dedikerade förbränningen jämfördes med mätvärdena från FossilEye av samma material. Det antogs att sammansättningen inte förändrats mellan FossilEye-mätningen och den dedikerade förbränningen.

## 3.2.2 Vattenfall Värme i Uppsala

Vid Vattenfall Värme i Uppsala genomfördes tester under tre veckor i december 2023, vilket kopplade till följande parametrar som definierats i kapitel 3.1:

- Mätssystemets tillförlitlighet vid förflyttning
- Mätssystemets repeterbarhet
- Mätssystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast
- Minsta lämpliga provmängd

En mer detaljerad genomgång av de genomförda testerna vid Vattenfall Värme i Uppsala presenteras i kommande delkapitel.

Testanordningen stod uppställd i en konstruktion med tak och väggarna längs långsidorna. Vid kortsidorna var byggnaden öppen för att tillåta lastmaskiner och liknande att kunna lasta och hämta upp avfall obehindrat. Temperaturen vid testanordningen var ungefär samma som lufttemperaturen ute, vilket stundtals kunde vara så kallt som  $-20^{\circ}\text{C}$ . Snö kunde till viss del blåsa in i byggnaden från sidorna, men det noterades aldrig någon snö varken på maskinen eller proven.

### 3.2.2.1 Test av referensmaterial från Tekniska Verken

Genom att testa samma material som i Tekniska Verken möjliggörs att tillförlitligheten vid förflyttning för avfallsskannande mätsystem kan utvärderas. Den sammanslagna krossade fraktionen som togs fram enligt kapitel 3.2.1.2, transporterades tillsammans med FossilEye till anläggningen i Uppsala. Vid Vattenfall Värme utfördes tre körningar av materialet i FossilEye som sedan förvarades i en IBC-behållare inför vidare transport till Umeå Energi.

### 3.2.2.2 Repeterbarheten vid flera körningar av samma avfall

Likt de tester som genomfördes vid Tekniska Verken på repeterbarhet (se kapitel 3.2.1.3) genomfördes flera körningar på samma avfallsbatcher även vid Vattenfall Värme i Uppsala.

### 3.2.2.3 Test av material till plockanalys

Vid Vattenfall Värme i Uppsala kördes sju avfallsprov som sedan skickades på plockanalys hos en extern aktör. Dessa testmaterial togs ut från sju olika

avfallsleveranser som kommit in vid anläggningen. Varje avfallsprov bestod av minst 500 kg avfall uppdelat på tre IBC-behållare. Proven delades upp i två delmängder (IBC 1+2 och IBC 3) som kördes igenom FossilEye separat minst två gånger vardera och som mest tre gånger vardera. Delmängderna från samma avfallsleverans förvarades sedan i olika IBC-behållare innan de transporterades till den externa leverantören som genomförde plockanalyserna. I Tabell 5 presenteras en kort beskrivning av de olika provena.

Tabell 5: Beskrivning av de sju avfallsbatcher som skickades för plockanalys hos en extern aktör kopplat till tester hos Vattenfall Värme i Uppsala.

| Nummer | Typ av avfall                       |
|--------|-------------------------------------|
| Prov 1 | Restavfall Eftersorterat            |
| Prov 2 | Restavfall Eftersorterat            |
| Prov 3 | SLF SWE                             |
| Prov 4 | Schredded fraction                  |
| Prov 5 | Industri & Verksamhet (försorterat) |
| Prov 6 | ÅVC & Industri                      |
| Prov 7 | Restavfall Eftersorterat            |

Plockanalyserna utfördes enligt rekommendationer i branschens instruktioner för plockanalys. För testserierna plockades ut sju prover om 500–800 kg vardera. Vid plockanalysen togs prover på mellan 468 och 654 kg ut. Allt material plockades alltså inte igenom, vilket var en miss i beställningen för dessa prov som medför onödig osäkerhet.

Varje plockanalys delade upp materialet i fyra fraktioner; plast/gummi, elektronik, farligt avfall och allt övrigt material. Jämförelsen med FossilEye är inte helt rättvisande då de inte analyserat/sorterat materialen helt likvärdigt. Exempelvis har plockanalyserna och FossilEye inte identifierat skumplast, syntetisk textil och svart plast/gummi på samma sätt, vilket diskuteras mer i kapitel 4.9.2.

### 3.2.2.4 Minsta lämpliga provmängd

Materialet som testades med plockanalys var uppdelat i tre IBC-behållare per prov, där varje prov vägde minst 500 kg vardera. Analyserna av proven delades upp så att de två första IBC-behållarna från varje prov kördes gemensamt och den tredje IBC-behållaren kördes separat. Variationen mellan IBC 1+2 och IBC 3 för varje prov kunde på så vis jämföras mot variationen mellan repetitionerna av exakt samma material.

### 3.2.3 Umeå Energi

Vid Umeå Energi genomfördes tester under tre veckor i januari 2024, vilket kopplade till följande parametrar som definierats i kapitel 3.1:

- Mätssystemets tillförlitlighet vid förflyttning
- Mätssystemets repeterbarhet
- Mätssystemets väderkänslighet (till exempel snö och kyla)
- Mätssystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material

En mer detaljerad genomgång av de genomförda testerna vid Umeå Energi presenteras i kommande delkapitel.

Testanordningen stod uppställd under tak i en byggnad med täta väggar som 4 m upp är öppna och täckta med en nätkonstruktion i tre av fyra sidor. I den fjärde riktningen var det helt öppet där lastmaskiner och liknande kunde passera obehindrat. Temperaturen vid testanordningen var ungefär samma som lufttemperaturen ute och snö kunde lätt blåsa in från sidorna. På grund av de väderförhållanden som rådde var det brist på testmaterial eftersom den avfallskross som var tänkt att användas behövdes för att förbereda bränsle till biobränslepannor i stället. Det material som fanns tillgängligt för att testas var sådant som redan var krossat innan testperioden påbörjades, vilket huvudsakligen bestod av träkross av grovkrossade möbler.

#### 3.2.3.1 Test av referensmaterial från Tekniska Verken

Den sammanslagna krossade fraktionen som togs fram enligt kapitel 3.2.1.2, transporterades tillsammans med FossilEye från anläggningen i Uppsala till Umeå. Vid Umeå Energi utfördes tre körningar av materialet i FossilEye.

#### 3.2.3.2 Repeterbarheten vid flera körningar av samma avfall

Likt de tester som genomfördes vid Tekniska Verken och Vattenfall Värme i Uppsala kopplat till repeterbarhet (se kapitel 3.2.1.3 och 3.2.2.2) genomfördes flera körningar på samma avfallsbatcher även vid Umeå Energi.

### 3.2.3.3 Mätssystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material

Snö tillsattes testmaterialet under kontrollerad form vid ett tillfälle. Snömängden i materialet varierade dessutom naturligt under testperioden, där snömängden kunde beräknas approximativt utifrån hur totalvikten av testmaterialet förändrades mellan mätningarna.

### 3.2.3.4 Test av material under vinterförhållanden

Testerna i Umeå planerades att genomföras under vintern för att kunna testa FossilEye under vinterförhållanden. Utomhustemperaturen under testperioden varierade från omkring  $-30^{\circ}\text{C}$  som kallast till  $+5^{\circ}\text{C}$  som varmast. Det låg snö på marken och vid flera tillfällen under mätperioden föll det mer snö.

Snö tillsattes testmaterialet under kontrollerad form vid ett tillfälle. Snömängden i materialet varierade dessutom naturligt under testperioden, där snömängden kunde beräknas approximativt utifrån hur totalvikten av testmaterialet förändrades mellan mätningarna.

## 4 Resultat och diskussion

---

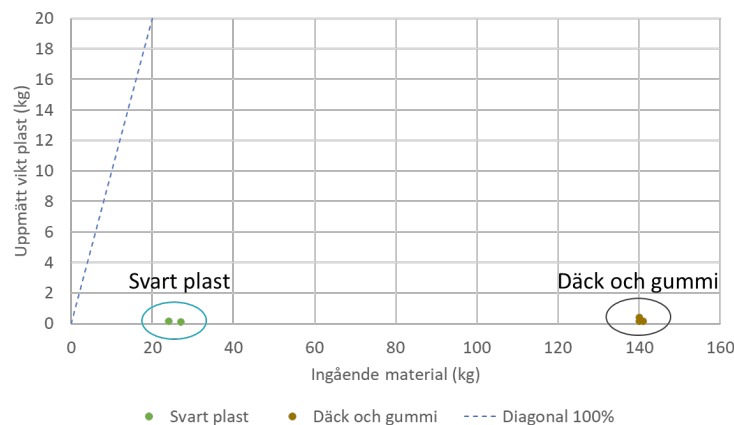
Resultatdelen inkluderar många resultat som visar hur mätverktyget FossilEye fungerar. Dessa resultat belyser dock bara hur mätverktyget fungerade under provperioden mellan november 2023 till och med januari 2024. FossilEye var under provperioden ett mätverktyg som fortfarande var under utveckling. Resultaten belyser därmed inte nödvändigtvis hur mätverktyget fungerar när denna rapport publiceras eller hur det kommer att fungera i framtiden då mätsystemet fortsatt utvecklas. Under testperioden uppdaterades mätalgoritmen i FossilEye vilket kan ha påverkat resultaten. Vid de tillfällen som olika algoritmer har använts beskrivs det i texten och de mätpunkter som står ut jämfört med de andra i och med skillnaden i algoritm markeras med en röd eller svart ring i figurerna.

För att kunna utveckla en verifieringsmetod av avfallsskannande mätsystem var det lärorikt att få testa det på ett konkret avfallsskannande system. Varje avsnitt i resultatdelen avslutas därför med en reflektion om hur de olika testen och resultatet eventuellt kan vara relevant för en sådan verifieringsmetod.

## 4.1 Mätssystemets klassning av olika monofraktioner

Vid testningen av monofraktionerna användes små mängder av sorterat material. Inga av dessa prov kan ses som representativa för något avfall som kan komma att testas i en framtida applikation av FossilEye. De ger däremot en god förståelse för hur mätssystemet fungerar och hur dessa material kan påverka mätssystemet om de uppträder i högre eller lägre koncentration i avfallet som ska testas.

Den svarta hårdplasten testades vid två tillfällena och resulterade i en uppmätt mängd plast som motsvarade mindre än 1 % av den verkliga mängd som testades. Däck och gummi testades tre gånger och gav också resultat som motsvarade mindre än 1 % av den verkliga mängden. Dessa resultat illustreras i Figur 3. Resultaten är förväntade då testmaterialen är svarta och FossilEye var vid testtillfället inte designad för att detektera svart plast.

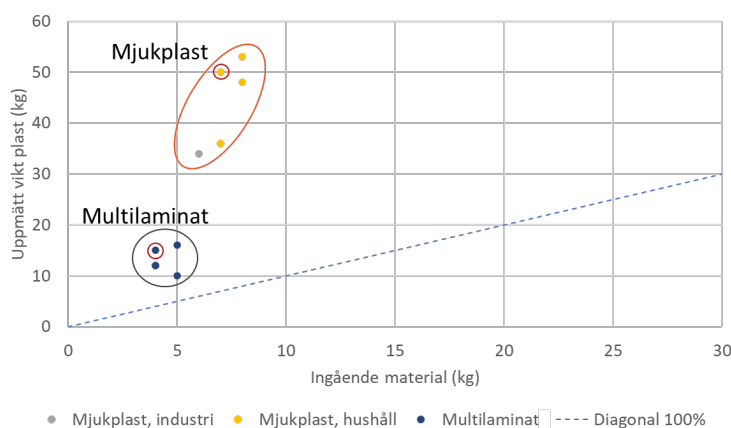


Figur 3. Uppmätt mängd plast, från FossilEye, av monofraktionerna Svart hårdplast och Däck och gummi. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om varje kg ingående material hade detekterats som exakt 1 kg plast.

De tre olika fraktionerna av mjukplast (mjukplast från hushåll, mjukplast från hushåll samt multilaminat) testades separat. Mjukplast från hushåll testades vid fyra tillfällena, en gång för industriell mjukplast och fem tillfällena för multilaminat. I detta inkluderas ej den mjuka PVC:n. Resultaten visar att mängden mjukplast blev kraftigt överskattad, vilket troligtvis är ett resultat av att mjukplast har en stor yta per viktenhet och även mycket volym per viktenhet. Om inte mjukplasten fullt ut går att identifiera som mjukplast (via exempelvis bildigenkänning), kommer den överskattas i ett mätssystem som baserar viktuppskattningen per identifierad yta eller volym. Den industriella mjukplasten ser ut att ha grupperat sig ungefär



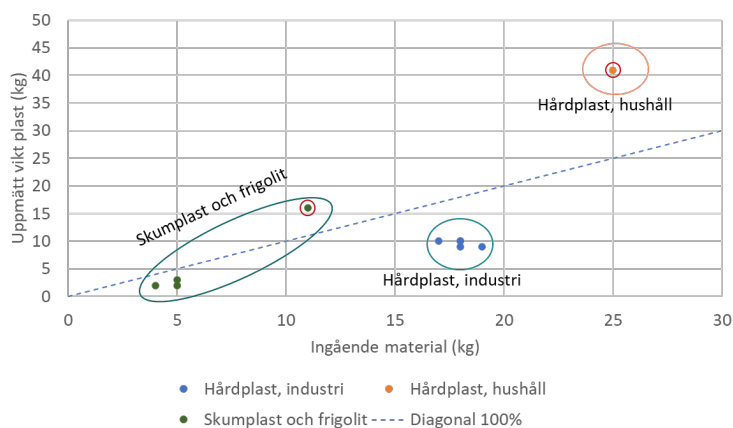
likadant som mjukplasten från hushåll och de båda har därför markerats som en gemensam grupp "Mjukplast" i Figur 4, där varje kg ingående material i snitt har identifierats som cirka sex kg plast. Multilaminatplasten har markerats som en egen grupp, där varje kg ingående material i snitt har identifierats som cirka 3 kg plast. Mätningarna inkluderade två mätningar med den nya algoritmen, vilket har markerats med röda ringar i figuren, vilka ser ut att ligga ganska nära resten av respektive grupp, möjligtvis något i överkant.



Figur 4. Uppmätt mängd plast, från FossilEye, av monofraktionerna Mjukplast industri, Mjukplast hushåll och Multilaminat. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om varje kg ingående material hade detekterats som exakt ett kg plast. De mätvärden som beräknades med den nya algoritmen är markerade med en liten röd ring.

Den industriella hårdplasten testades vid fem tillfällen, där alla mätvärden beräknades med den gamla algoritmen. Hårdplasten från hushåll testades endast en gång, vilket då kördes med den nya algoritmen (markerat med röd ring i Figur 5). Anledningen till att dessa två fraktioner testades separat var för att den industriella hårdplasten generellt sett var tjockare än hårdplasten från hushåll. Det innebär också att hårdplasten från hushåll har en större yta och volym per viktenhet, vilket medför att den förväntas ge en högre beräknad vikt plast per kg ingående material, jämfört med den industriella hårdplasten om inga andra parametrar förändras. Då dessa material testades med olika beräkningsalgoritmer är de inte helt jämförbara, men resultaten tyder ändå på att materialtjockleken kan ha en inverkan. Den industriella hårdplasten identifierades i snitt som 0,5 kg plast per kg ingående material och hårdplasten från hushåll identifierades som 1,6 kg plast per kg ingående material. Dessa två fraktioner har grupperats separat i Figur 5.

Skumplast och frigolit är också kategorier av plast som har stor yta och volym per viktenhet. De testades två gånger som endast skumplast (gammal algoritm), en gång som endast frigolit (gammal algoritm) och en gång som kombinerat skumplast och frigolit (ny algoritm, markerat med röd ring i Figur 5). Skumplast och frigolit uppvisade dock liknande resultat och har därför grupperats gemensamt i Figur 5. När skumplasten och frigoliten testades, var för sig, med den gamla algoritmen identifierades de som ca 0,5 kg plast per kg ingående material. När de sedan testades gemensamt med den nya algoritmen identifierades de som ca 1,5 kg plast per kg ingående material. Det går i detta fall inte utläsa om det var skumplasten, frigoliten eller båda som gav ett ökat värde.

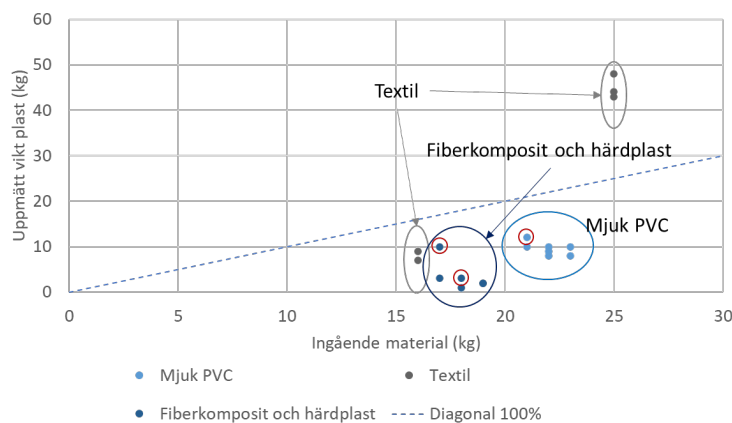


Figur 5. Uppmätt mängd plast, från FossilEye, av monofraktionerna Härdplast industri, Härdplast hushåll och Skumplast och frigolit. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om varje kg ingående material hade detekterats som exakt ett kg. De mätvärden som beräknades med den nya algoritmen är markerade med en liten röd ring.

Fraktionen fiberkomposit och hårdplast innehåller en del glasfiber och kolfiber. Mängden plast i denna fraktion är därmed lägre än ett kg plast per kg material, men det är okänt hur mycket lägre. Fraktionen med textil var utsorterad för att bestå till största delen av syntetisk textil, men även där är andelen plast okänd. Syntetisk textil räknas alltså i det här fallet som plast. Den mjuka och hårda PVC:n innehåller en hög andel kloratomer, vilket innebär att den har en relativt låg andel kol per viktenhet material. PVC (utan tillsatser) innehåller 38 % kol, vilket kan jämföras med 86 % kol i PE och PP eller 63 % kol i PET<sup>1</sup>. Ett mätsystem som ska avgöra mängden fossilt kol i ett blandat avfall bör därmed sätta lägre värde per

<sup>1</sup> Baserat på den kemiska sammansättningen  $(C_2H_3Cl)_n$  för PVC,  $(C_2H_4)_n$  för PE,  $(C_3H_6)_n$  för PP och  $(C_{10}H_8O_4)_n$  för PET.

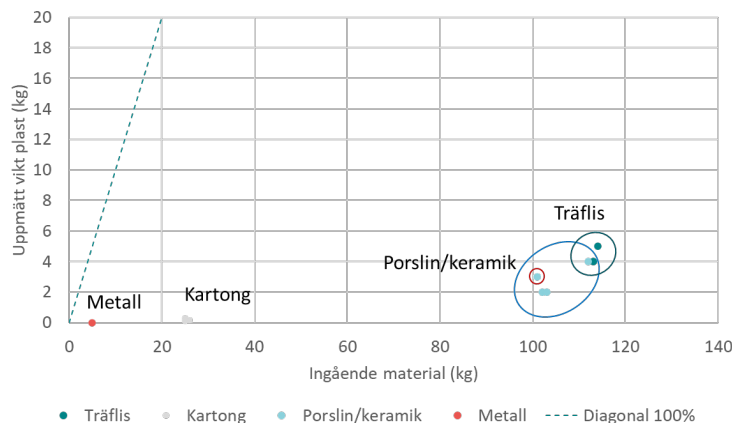
viktenhet för PVC än vad som sätts per viktenhet av exempelvis PE/PP eller PET. Om mätsystemet däremot ska avgöra mängden plast bör det i båda fallen sätta samma värde per viktenhet av alla polymertyper. Fraktionen fiberkomposit och hårdplast testades sex gånger, varav två gånger med ny algoritmen (röd ring i Figur 6), där de i snitt identifierades som 0,2 kg plast per kg ingående material. Den nya algoritmen identifierade en högre andel fiberkomposit och hårdplast som plast än vad den gamla algoritmen gjorde. Fraktionen hård PVC testades aldrig, troligtvis på grund av att den glömdes bort. Den mjuka PVC:n testades sju gånger, varav en gång med ny algoritmen (röd ring i Figur 6), där de i snitt identifierades som 0,4 kg plast per kg ingående material. Den nya algoritmen identifierade en högre andel mjuk PVC som plast än vad den gamla algoritmen gjorde. Fraktionen textil testades sammanlagt fem gånger vilket resulterade i två skilda grupperingar, en som identifierades som ca 0,5 kg plast per kg ingående material och en som identifierades som ca 1,8 kg plast per kg ingående material. Dessa grupperingar skedde vid två separata tillfällen och hade inte identisk sammansättning av material. Det är inte omöjligt att de två tillfällena hade olika sammansättning av polymertyper och eventuellt olika andel biomaterial.



Figur 6. Uppmätt mängd plast, från FossilEye, av monofraktionerna Textil, Mjuk PVC och Fiberkomposit och hårdplast. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om varje kg ingående material hade detekterats som exakt 1 kg. De mätvärden som beräknades med den nya algoritmen är markerade med en liten röd ring.

De monomaterial som valdes ut för att representera material utan plast var träflis, kartong, metall samt porslin och keramik. Metall testades en gång, kartong tre gånger, träflis tre gånger och porslin och keramik testades fyra gånger. Alla dessa mätningar kördes med gamla algoritmen förutom ett av tillfällena med porslin och keramik (som markerats med röd ring i Figur 7). Då keramik och porslin samt träflis testades märktes det att materialet gick sönder och bildade fler men mindre

bitar samt en hel del damm. Bland keramiken fanns dock med ett brunt fat som inte gick sönder på samma sätt som de andra delarna, vilket i slutändan visade sig vara ett blomfat av plast. Även de andra materialen hade bitar som skulle kunna identifieras som plast, till viss del i form av felsorterad plast men också i form av exempelvis tejp och färg som satt på materialet. Resultatet, som illustreras i Figur 7, blev att metallen identifierades som 0,0 % plast, kartongen som i snitt 0,7 % plast, porslinet och keramiken som i snitt 2,5 % plast och träfliset som i snitt 3,5 % plast. Mätvärdet med den nya algoritmen hade en aning högre andel identifierat som plast än medelvärdet för porslin och keramik. Att andelen plast som identifierades inte var riktigt 0 % för alla material är inte förvånande med tanke på att de inte var helt rena monofraktioner.



Figur 7. Uppmätt mängd plast, från FossilEye, av monofraktionerna Träflis, Kartong, Porslin/keramik och Metall. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om varje kg ingående material hade detekterats som exakt 1 kg. Det mätvärde som beräknades med den nya algoritmen är markerat med en liten röd ring.

Testerna med monomaterial har tydligt visat att det är skillnad i resultatet vid körningar av olika plastprodukter. Mätssystemet har uppenbarligen överskattat mängden plast i vissa fraktioner så som mjukplasten och underskattat mängden plast i andra fraktioner så som den svarta plasten. Om dessa fraktioner kan identifieras tydligare, genom exempelvis bildigenkänning eller via information från användaren, så borde beräkningen i framtiden kunna anpassas så att skillnaderna mellan olika plastvarianter blir mindre.

Dessa tester har varit en viktig del i förståelsen för hur just det här mätsystemet har fungerat. Liknande tester kommer troligtvis vara viktiga för att förstå även andra avfallsskannande mätsystem. Då inga av dessa material är representativa för något blandat avfall kan de däremot inte användas för någon kalibrering av systemet.

## 4.2 Mätssystemets resultat vid en förbestämd sammansättning av testmaterial

De monofraktionerna som beskrivs i avsnitt 4.1 användes för att sätta ihop material med känd sammansättning. Vid sammansättningen av det blandade materialet gjordes bedömningen att den svarta hårdplasten skulle exkluderas då det redan var ett känt problem att den inte detekterades av mätssystemet. Dessutom beslutades även att fiberkomposit skulle uteslutas då den har en okänd mängd fossilt material. Textil och PVC inkluderades däremot och räknades då som plast. Det som klassades som icke-plast i blandningarna var träflis, kartong, keramik och porslin samt metall.

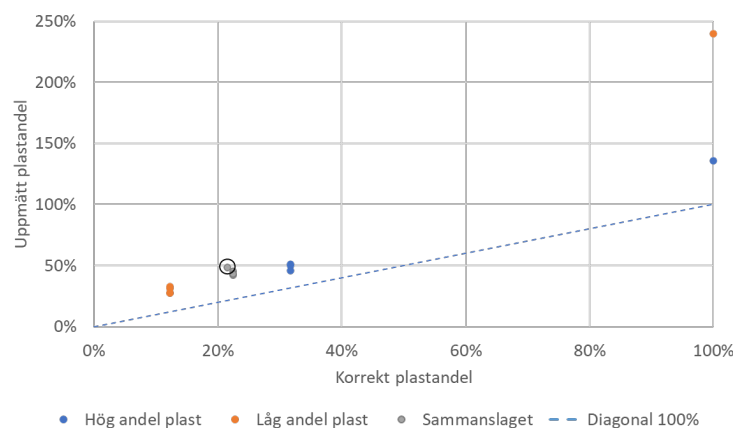
För blandningen med låg andel plast samlades det ihop 10,8 kg plast som testades en gång med FossilEye, vilket då identifierades som 24 kg plast. Tyvärr saknas uppgifter om exakt hur mycket som användes av de olika monofraktionerna som klassades som plast. En viss överskattning av vikten plast var väntad då det ingick en volymmässigt stor andel mjukplast och så gott som ingen svart plast, i och med att ingenting från den utsorterade fraktionen av svart hårdplast inkluderades. När plasten sedan blandades med 77,5 kg icke-plast uppmättes (vid fyra test) 24–29 kg plast, vilket i så fall skulle motsvara i snitt 29,6 % uppmätt mängd plast. Den korrekta andelen plast var 12,2 % (se kapitel 3.2.1.1). Alla test på blandningen med låg andel plast utfördes med den nya algoritmen.

För blandningen med hög andel plast blandades 30,9 kg plast, vilket identifierades av mätssystemet som 42 kg plast. Plastsammansättningen var något annorlunda mot det som användes för blandningen med låg andel plast, men även denna gång ingick en okänd mängd av varje monofraktion klassades som plast. När plasten hade blandats med 66,4 kg icke-plast uppmättes (vid tre test) 44–49 kg plast, vilket i så fall skulle motsvara i snitt 48,9 % uppmätt mängd plast. Den korrekta andelen plast var 31,8 % (se kapitel 3.2.1.1). Alla test på blandningen med hög andel plast utfördes med den nya algoritmen.

När blandningarna med låg andel plast och blandningen med hög andel plast hade testats slogs de samman till en sammanslagen fraktion. Om inget material hade förlorats eller tillkommit innebär det att den sammanslagna fraktionen innehöll 41,7 kg plast och 143,6 kg icke-plast, vilket i så fall motsvarar 22,5 % plast. Vid tre tester uppmättes 78–83 kg plast, vilket motsvarar i snitt 43,5 % uppmätt mängd plast. Dessa tre test utfördes med den nya algoritmen.

Samma material som fanns i den sammanslagna fraktionen krossades i en avfallskross. Det upptäcktes dock att det följde med lite träavfall då det låg kvar som rester i krossen. Efter krossen hade materialet en total vikt på 194 kg. En mindre del material har troligen förlorats under de tidigare testerna och hanteringen av materialet, men vilken typ av material och hur mycket som i så fall förlorats är okänd. Det antogs att den korrekta plastmängden var samma som innan materialet krossades, alltså 41,7 kg. Med en total vikt på 194 kg motsvarar det 21,5 % plast. Materialet testades en gång och uppmätte då 94 kg plast, vilket motsvarar 48,5 % uppmätt mängd plast. Detta test skedde med den gamla algoritmen och markeras därför med en svart ring i Figur 8. Hur krossningen av materialet påverkade resultatet diskuteras ytterligare i kapitel 4.7.

Längst till höger i Figur 8 syns de mätvärden som uppmättes på plasten innan den blandades med icke-plast. Figur 8 illustrerar också att båda blandningarna överskattades, vilket var ett förväntat resultat i och med de monofraktioner som användes samt de resultat som erhöles vid testerna av just dessa monofraktioner. Från blandningen med låg andel plast identifierades varje kg tillsatt plast som ca 2,4 kg plast i snitt. Från blandningen med hög andel plast identifierades varje kg tillsatt plast som ca 1,5 kg plast i snitt. Skillnaden mellan dessa två är troligtvis en effekt av att de inte blandades med samma sammansättning på materialet. När de två fraktionerna slogs samman identifierades varje kg tillsatt plast som ca 2,0 kg plast i snitt. Att den sammanslagna fraktionen fick ett värde som ligger mellan de två andra är ett rimligt resultat med tanke på att den fraktionen hade en sammansättning som var ett medelvärde av de två andra.



Figur 8. Uppmätt andel plast, från FossilEye, av förbestämda sammansättningar. Korrekt andel plast har beräknats utifrån totala vikten av den tillsatta plasten dividerat med totala vikten av allt tillsatt material. Den blåa streckade diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om den uppmätta andelen plast är samma som den beräknade (korrekta) andelen plast. Det mätvärde som beräknades med den gamla algoritmen är markerat med en liten svart ring.

En möjlighet att kontrollera om ett mätsystem ger korrekt mätvärde är genom att kalibrera det med ett, eller flera, prov som har känd sammansättning. Det som går att utläsa ur resultatet från det här försöket, i kombination med resultaten från monofraktionerna, är att det är svårt att ge ett korrekt mätvärde på ett mått som egentligen består av flera komponenter. I det här fallet har det testats att mäta mängden plast, men resultatet beror på vilka plasttyper som har inkluderats i testet. Det skulle vara möjligt att sätta ihop ett referensprov, där förhållandet mellan mjuk plast, hård plast, svart plast och övriga komponenter var sådan att det passade perfekt för mätsystemet. I ett sådant fall är det möjligt att säga att mätsystemet mäter korrekt, förutsatt att avfallet som testas har en sammansättning som liknar referensprovet. På samma sätt är det möjligt att sätta ihop ett referensprov som gör att mätsystemet ser ut att uppmäta plastmängden fel. Problemet ligger alltså i att bestämma i förväg hur det riktiga avfallet bör se ut, utifrån referensprov som sätts samman av vad en människa lyckas identifiera som plast eller icke-plast.

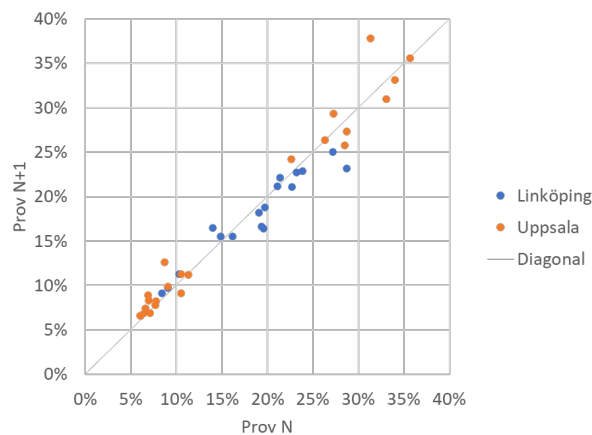
Lärdomen från detta är det är svårt att designa referensproverna på sådant sätt att de faktiskt efterliknar riktigt avfall, samtidigt som de har en känd sammansättning. De test som utfördes i det här steget gav en viss utökad förståelse utöver vad som redan upptäcktes med monomaterialen. Det går inte att, med detta test, avgöra om mätsystemet mäter rätt vid mätning på verkligt avfall. Däremot går det att förstå vilka parametrar som eventuellt kan störa resultatet i en verklig applikation.

### 4.3 Mätsystemets repeterbarhet

Analys av repeterbarhet genomfördes endast för de tester som utfördes mer än en gång på en faktiskt avfallsbatch. Monofraktioner och blandningar med förutbestämd sammansättning ingår inte i analysen då dessa sammansättningar inte var av full storlek och för att dessa inte (i de flesta fallen) var krossade, vilket då inte ingick i vad mätsystemet faktiskt var designad för. Två av testerna på ett av materialen i Linköping exkluderades också från analysen då det hade registrerats att det hade uppstått ett fel vid kalibreringen, vilket innebär att dessa resultat inte kan anses vara tillförlitliga. Testerna från Umeå exkluderades också från analysen av repeterbarhet då det identifierades att de resultaten hade påverkats av något annat, vilket troligtvis är innehållet av snö och diskuteras därför ytterligare i kapitel 4.5.

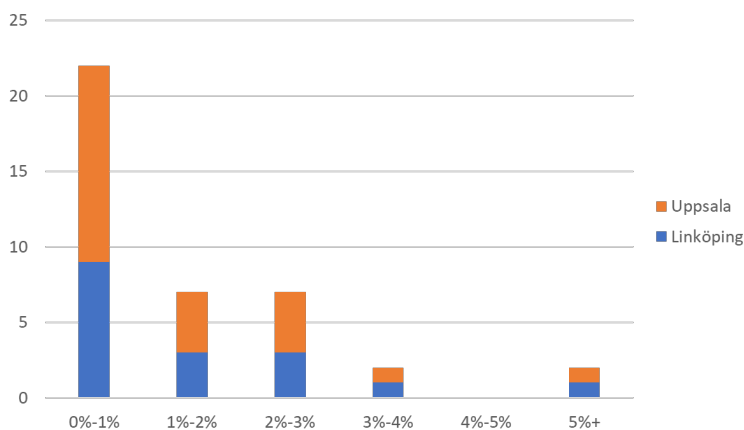
Vid utvärdering av det erhållna resultatet för de olika körningarna beräknades skillnaden enbart med den föregående körningen. Därmed jämfördes det erhållna

resultatet från körning nummer två med körning nummer ett, körning nummer tre jämfördes med körning nummer två och så vidare. Detta för att minska risken att avfallet påverkas i för stor utsträckning mellan körningarna i mätsystemet. Det noterades nämligen att avfallet påverkades bland annat genom att porösa material, så som trä och porslin, föll sönder till mindre bitar och att en mindre andel material förlorades vid varje körning. Därför ansågs det som olämpligt att jämföra exempelvis körning fem med körning ett. I Figur 9 syns värdena från den senare körningen i y-led (Prov N+1) och värdena från körningen innan dess syns i x-led (Prov N). Testerna från Linköping syns som blåa punkter och testerna från Uppsala syns som orangea punkter. Av totalt 40 analyserade repetitioner var det 22 repetitioner som varierade med mindre än 1 procentenhet och 2 varierade med mer än 5 procentenheter, vilket illustreras ytterligare i Figur 10.



Figur 9. Uppmätt andel plast, från FossilEye, av avfallsprov som testades flera gånger. Varje punkt motsvarar en jämförelse av andelen plast uppmätt vid provtillfälle N (x-led) och provtillfälle N+1 (y-led). Diagonalen illustrerar vilket resultat som vore förväntat om den uppmätta andelen plast var exakt samma vid båda provtillfällena.





Figur 10. Avvikelse, i procentenheter, mellan provtillfälle N och provtillfälle N+1.

Det är viktigt att ett mätsystem mäter likadant varje gång så länge alla parametrar är oförändrade, vilket medför att en uppskattning av repeterbarheten är prioriterat. I det här fallet går det inte säga om mätsystemet mäter rätt, men det går åtminstone säga om mätvärdena förändras slumpmässigt eller ej.

## 4.4 Mätsystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material

Tillsats av plast eller annat material skedde vid ett flertal tillfällen, ibland som ett designat experiment och ibland som en effekt av andra faktorer. Borttagning av material skedde inte vid något kontrollerat experiment, eftersom detta varit allt för tidsödande och därmed blockerat andra försökskörningar. Det noterades att det stundtals förlorades material mellan olika körningar, men vid dessa tillfällen var det osäkert vilken typ av material som förlorades vilket gör att resultaten också är osäkra.

Under de resultat som beskrivs i avsnitt 4.2, där blandningar av känd sammansättning testades, framgår det att den identifierade plastmängden ökade då plasten blandades med icke-plast. För blandningen med låg plasthalt uppmättes plastmängden till 24 kg plast innan plasten blandades med icke-plast. Efter blandningen uppmättes plastmängden till 24–29 kg, en snittökning på 2 kg eller 8 %. För blandningen med hög plasthalt uppmättes plastmängden till 42 kg innan plasten blandades med icke-plast. Efter blandningen uppmättes plastmängden till 44–49 kg, en snittökning på 5 kg eller 12 %. När de två blandningarna, med hög

respektive låg plasthalt, hade slagits samman uppmättes plastmängden till 78–83 kg. Det motsvarar en snittökning på 14 kg eller 22 % från den ursprungliga plasten på 66 kg<sup>2</sup>. Det motsvarar även en snittökning på 7 kg eller 10 % från de tidigare blandningarna som uppmättes till 24–29 kg respektive 44–49 kg.

Det uppstod även en tillsats i samband med att den sammanslagna blandningen krossades, i form av att en liten mängd trä. Den tillsatsen skedde dock med ett material som inte var helt säkerställt, samtidigt som materialet ändrade form (krossades) och där mätalgoritmen förändrades mellan mätningarna. Det går alltså inte dra några slutsatser utifrån den tillsatsen men de resultaten diskuteras ytterligare i kapitel 4.7.

Vid testerna i Uppsala testades ett verksamhetsavfall där det senare tillsattes plast. Verksamhetsavfallet testades två gånger där mängden ingående avfall först vägde 418 kg och sedan 414 kg. Ett litet tapp i total vikt mellan första och andra körningen, vilket har observerats vid andra tillfällen. En teori är att det avgår en del fukt mellan körningarna och/eller att damm och andra mindre partiklar faller utanför den mängd som samlas upp inför nästa körning. Vid dessa två körningar uppmättes mängden plast till 79 och 80 kg plast. En separat plastfraktion invägdes till 43–45 kg och identifierades av mätsystemet som 53–60 kg plast. De två materialen blandades med varandra och vid tre tester vägdes det in som 455–457 kg totalt material och identifierades som 142–155 kg plast. Den identifierade mängden plast ökade alltså från 132–140 kg plast till 142–155 kg plast, vilket ger en snittökning på 13 kg eller 10 %.

Vid testerna i Umeå testades att tillsätta snö till verksamhetsavfall, vilket gav resultat som diskuteras ytterligare i kapitel 4.5. Det testades även att blanda ett krossat verksamhetsavfall med den krossade sammanslagna fraktionen. Det testet gav resultat som är svårtolkade bland annat för att den totala vikten av det ingående materialet ser ut att vara betydligt lägre än vad summan av de två materialen är. Det krossade verksamhetsavfallet uppvägdes kl 10:11 den 29/1 till 675 kg. Den krossade sammanslagna fraktionen uppvägdes kl 10:53 den 29/1 till 268 kg. Nästan ett dygn senare, kl 09:15 den 30/1 vägdes de båda tillsammans till 774 kg. Då fattades det alltså 169 kg. Båda proven innehöll en hel del snö och väderdata säger att det var plusgrader (upp till 5,6°C, se Figur 11) i Umeå den 29/1, dessutom brukar dessa avfallshögar generera en del värme själva men frågan är om det har lyckats smälta bort 169 kg snö på ett dygn från en hög med avfall som

---

<sup>2</sup> Summan av 24 kg och 42 kg.

totalt sett borde vägt 943 kg. Då materialet antingen har tappat vikt på grund av att en del material gått förlorat eller på grund av snösmältning, där det har visat sig att snön kan ha en stor inverkan på resultatet (se kapitel 4.5), så går det inte att dra några slutsatser från just det testet vad det gäller tillsats av kända material.

Totalt sett går det att urskilja från dessa resultat att mätresultaten från ett avfallsskannande mätsystem inte nödvändigtvis är linjära. Om vi har en mängd  $A$  och tillsätter en annan mängd  $B$  så är inte nödvändigtvis att den sammanslagna mängden motsvarar summan av  $A$  och  $B$ . Det tillkommer en liten faktor, som i fallet med just FossilEye (vid dessa mättillfällen) verkar vara positiv och ungefär 10 % av  $A+B$ . En teori är att plasten generellt sett har en lägre densitet än övrigt material, vilket kan leda till att plasten i större utsträckning lägger sig ovanpå det andra materialet än under. Om så är fallet kan plasten identifieras som en större volym än vad materialet gjordes när plasten analyserades separat. Med en konstant viktfaktor följer den beräknade vikten linjärt med den identifierade volymen, liknande den klassiska ekvationen där massan ( $m$ ) är produkten av densiteten ( $\rho$ ) och volymen ( $V$ ), enligt ekvation 13.

$$m = \rho \cdot V \quad (13)$$

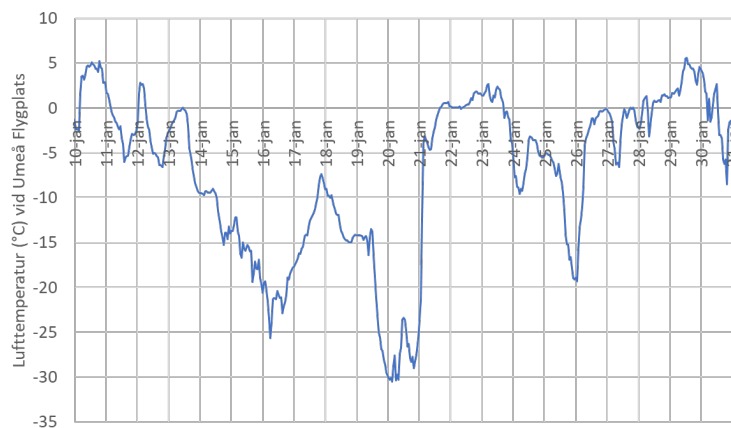
Det är uppenbarligen lämpligt att, vid kalibrering, testa tillsätta eller ta bort material, som har testats i förväg, för att förstå hur mätsystemet beter sig.

## 4.5 Mätsystemets väderkänslighet (till exempel snö och kyla)

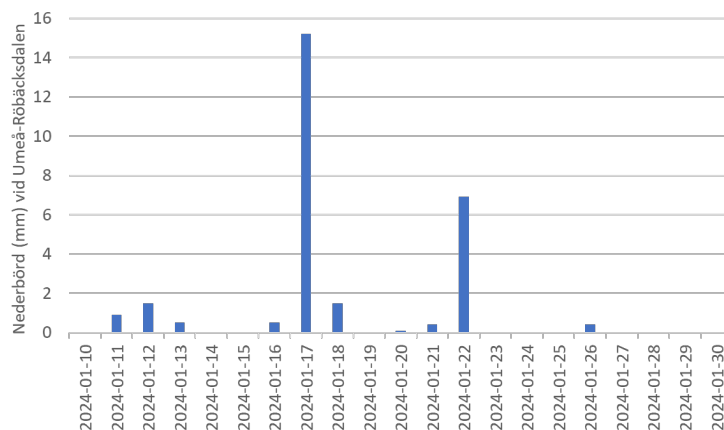
Mätsystemet testades under höst- och vintermånader, vilket innebär att det aldrig testades vid några förhöjda temperaturer (över normal rumstemperatur på ca 20°C). Låga temperaturer däremot uppträdde både i Uppsala och Umeå. Snön uppträdde i Umeå, i form av fallande nederbörd men också i form av snö som redan låg på marken. Snön hamnade i testmaterialet både med hjälp av vinden och när avfallet skopades upp från marken när avfallet hanterades.

Från testerna i Uppsala går det inte se något temperaturberoende i resultaten. Exempelvis syns ingen märkbar skillnad i repeterbarhet (avsnitt 4.3) mellan Linköping och Uppsala. Temperaturen var stundtals lägre i Umeå, som lägst omkring -30°C. Det är dock svårt att avgöra om temperaturen har haft någon inverkan på resultaten från Umeå då det troligtvis är snön som har haft den största

inverkan. Temperaturen under mätperioden i Umeå illustreras i Figur 11 med väderdata från mätstation Umeå Flygplats (SMHI, u.å.-a). Nederbörden illustreras i Figur 12 med väderdata från Umeå-Röbäcksdalen (SMHI, u.å.-b).



Figur 11. Lufttemperatur (°C) vid Umeå Flygplats under mätperioden i Umeå (SMHI, u.å.-a).



Figur 12. Nederbörd (mm) vid mätstationen Umeå-Röbäcksdalen under mätperioden i Umeå (SMHI, u.å.-b).

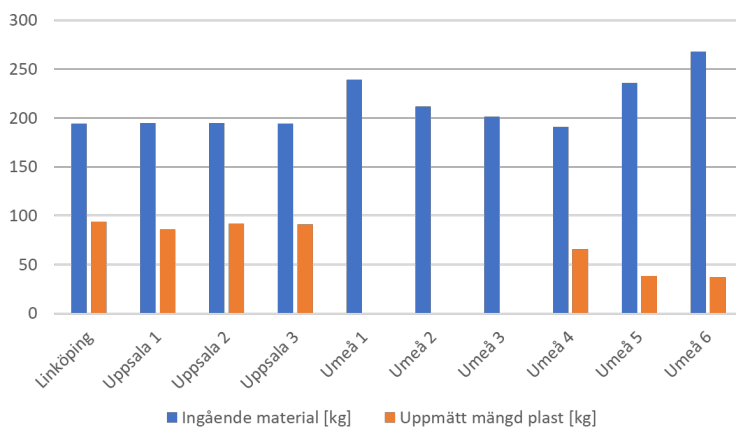
Mängden snö i proverna har delvis gått att utläsa från den invägda mängden material. Vid flera repetitioner av samma material gick det att utläsa att den invägda mängden material ibland ökade, vilket skedde vid följande situationer:

- a) I samband med att en kommentar i testprotokollet från personal som genomförde testerna uppgett att en del snö hade kommit med vid körningen (okontrollerat).
- b) I samband att snö avsiktligt tillsattes (kontrollerad)

- c) I samband med en längre tid mellan två körningar av samma material vilket troligtvis resulterade att det tillkom snö via nederbörd eller att det blåste in från intilliggande mark

När två mätningar utfördes direkt efter varandra, utan att det tillsattes någon (kontrollerad eller okontrollerad) mängd snö, avtog vanligtvis den invägda vikten något mellan körningarna. Det observerades bland annat att snön hade en tendens att fastna på transportbandet i mätstationen vilket ledde till att det inte föll ut från FossilEye i samma hög som resten av materialet. Det skrapades i stället av från bandet lite senare och hamnade då i en separat hög som inte togs tillbaka till inmatningsfickan inför nästa körning. Resultatet var att totalvikten på proven varierade kraftigt mellan olika körningar av samma material, vilket troligtvis i stor utsträckning är en effekt av snön. Resultatet blev också att den identifierade mängden plast varierade mellan olika körningar. Tyvärr går det inte säga på vilket sätt snön har påverkat då det ibland gav en ökad mängd identifierad plast i kombination med mer snö och ibland gav det en minskad mängd identifierad plast i kombination med mer snö.

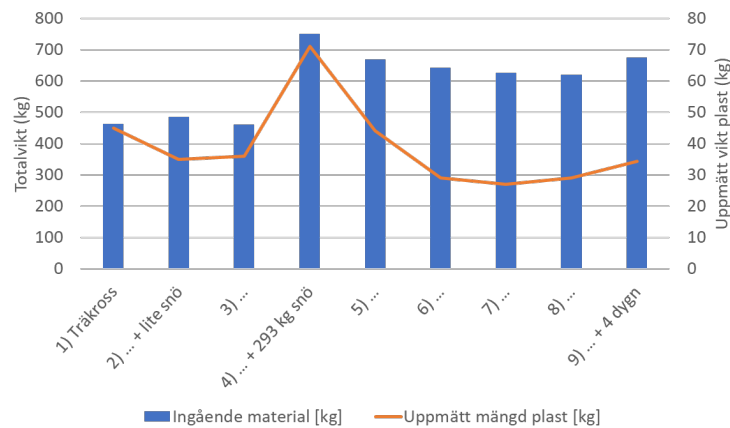
Ett exempel där den identifierade mängden plast minskade då det tillkom snö är referensmaterialet som följde med från Linköping och Uppsala, alltså den krossade sammanslagna blandningen med en totalvikt på 194 kg och en kontrollerad mängd plast på ungefär 41 kg. Figur 13 visar hur vikten av ingående material samt den identifierade mängden plast för denna fraktion förändrades från det att materialet testades en gång i Linköping, tre gånger i Uppsala och sedan sex gånger i Umeå. De första fyra testen i Umeå skedde 15–17 januari där den totala viktförändringen går att se, men tyvärr kom inte detektionssystemet i gång förrän vid fjärde mätningen. Det var antagligen för låg omgivningstemperatur för detektionssystemet vid de tre första försöken. Efter uppvärmning fungerade mätningen igen. Vid den fjärde mätningen var totalvikten tillbaka på ungefär samma som i Linköping och Uppsala, 191 kg, men den identifierade mängden plast var märkbart lägre, 66 kg i stället för 86–94 kg. Mellan fjärde och femte mätningen i Umeå passerade det två dygn då det föll snö vilket syns som en viktökning för provet. Mellan femte och sjätte mätningen passerade det ytterligare tio dygn vilket också inkluderade en del nederbörd vilket syns som ytterligare viktökning av provet.



Figur 13. Ingående mängd material och identifierad (uppmätt) mängd plast i referensmaterialet "Krossad sammanslagen fraktion". Från mätningarna 1–3 i Umeå saknas data för identifierad mängd plast.

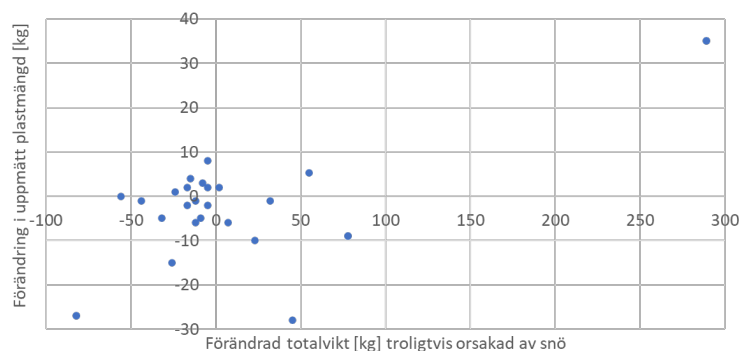
Ett exempel där den identifierade mängden plast ökade då det tillkom snö är vid det tillfälle som benämns som mätning 4 här nedan, då det testades att tillsättas 293 kg snö till ett material som var huvudsakligen träkross, i form av grovkrossade möbler, med låg andel plast. Figur 14 visar hur vikten av ingående material samt den identifierade mängden plast för denna fraktion förändrades mellan de olika mätningarna. Observera att den uppmätta mängden plast följer skalan till höger i figuren, som är 1/10 av den vänstra skalan för totalvikten. Vid mätning 2 identifierades det att en liten mängd snö hade kommit med vid omlastningen, vilket resulterade i lite högre totalvikt och en lägre uppmätt mängd plast. Vid mätning 4 valdes att lägga på en skopa med snö ovanpå testmaterialet i inlastningsfickan, vilket då vägdes in som 293 kg snö. Träkross och snö föll sedan ut gemensamt på nästa transportband och blandades ytterligare innan det passerade sensorerna. Den uppmätta mängden plast ökade då från 36 kg (mätning 3) till 71 kg (mätning 4) utan att någon plast hade tillsatts. Från mätning 4 till mätning 8 syns att vikten på det ingående materialet sjunker efter hand som en effekt av att en del av snön föll av bandet i en separat hög bredvid resterande material. Samtidigt syns en nedgång i uppmätt mängd plast till 29, 27 och 29 kg vid mätningarna 6, 7 och 8, vilket då är lägre än vad som uppmättes vid mätningarna 1–3 innan snön tillsattes. Mellan mätning 8 och mätning 9 passerade nästan fyra dygn vilket troligtvis resulterade i att det tillkom snö under tiden som materialet mellanlagrades. Den totala vikten ökade med 55 kg och den uppmätta mängden plast ökade med 5 kg.

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



Figur 14. Ingående mängd material och identifierad (uppmätt) mängd plast i materialet med träkross, huvudsakligen från krossade möbler. Observera att uppmätt mängd plast följer skalan till höger.

För att försöka få lite mer klarhet i snöns påverkan på den uppmätta mängden plast jämfördes alla repetitioner med varandra. Varje tillfällen då något material hade körts mer än en gång i Umeå syns som en prick i Figur 15, där skillnaden i ingående mängd material (totalvikt) mellan körning N och körning N+1 syns längs x-axeln och skillnaden i uppmätt mängd plast mellan körning N och körning N+1 syns längs y-axeln. Längst upp till höger syns mätningen då det hade lagts på 293 kg snö och längst ner till vänster syns mätningen direkt efter det, då det försvann 82 kg snö i första körningen genom att snön lade sig i en separat hög. De flesta variationer i uppmätt mängd plast ligger inom rimliga variationer liknande vad som kom fram från resultaten i Linköping och Uppsala (se Figur 10) men det är flera tillfällen som sticker ut som tydligt visar att snön har haft en påverkan.



Figur 15. Förändring i uppmätt mängd plast i relation till förändrad totalvikt på provet, troligtvis orsakad av snö. Jämförelsen är mellan en körning (nummer N) i relation till nästgående körning (nummer N+1) av samma material, där enda skillnaden borde vara mängden snö som tillkommit eller fallit ifrån. Endast test från Umeå är med i denna jämförelse.

Det är tydligt att snön har påverkat resultatet på mer än ett sätt. Det kommer krävas fler tester för att få riktig klarhet i vad det är med snön som påverkar resultatet. Några teorier som har kommit fram är:

- Den vita snön kanske lurar NIR-detektorn som ser en reflektion av i stort sett alla våglängder, vilket då även inkluderar de våglängder som ska identifieras som plast. På så sätt kan snön identifieras som plast och den uppmätta mängden plast ökar med mer snö.
- Om den tillsatta snön har hög densitet, mer likt isklumpar, riskerar plasten med låg densitet att lägga sig ovanpå snön och ser därmed ut att få större volym. Det skulle i så fall bidra till att den uppmätta mängden plast ökar med mer snö.
- Om den tillsatta snön är lätt och fluffig med låg densitet, samtidigt som den är smutsig, riskerar plasten att hamna under snön som i så fall blockerar plasten från att identifieras. Det skulle i så fall resultera i att den uppmätta mängden plast minskar med mer snö.
- Det finns en risk att snö och is fryser fast på ytan av plastbitar, vilket då riskerar att blockera plasten från att identifieras. Det skulle i så fall resultera i att den uppmätta mängden plast minskar med mer snö.
- Det observerades bland annat att spridningen på bandet, förbi sensorerna, förändrades. Vid några körningar med mycket snö låg materialet mer centrerat på bandet, med en mindre mängd ut mot sidorna, vilket också kan ha påverkat mätresultaten. Troligtvis har det i så fall skett i kombination med någon eller några av de ovanstående punkterna.

För att få klarhet i hur systemet påverkas kan det därmed vara lämpligt att testa flera sorters snö, exempelvis ren snö, smutsig snö, pudersnö, isklumpar och eventuellt ännu fler.

Resultaten från det här testet var oväntat, men det visar tydligt vikten av att testa mätverktyget under verkliga förhållanden för att se om det klarar de krav som ställs. Det är dock tveksamt om en tillsats av nästan 300 kg snö (64 % ökning av vikten) till ett prov som vägde drygt 450 kg kan räknas som "verkliga förhållanden". Däremot syntes andra tillfällen där exempelvis referensmaterialet ökade i vikt från 191 kg till 268 kg, en ökning med 40 %, mellan mätning 4 och mätning 6 bara genom att högen fick ligga några dagar i de väderförhållanden som



rådde i Umeå under mätperioden. Dessa mätningar får alltså ses som viktiga för att säkerställa kvaliteten på mätinstrumentet och för att sätta ramarna för vilka förhållanden, eller eventuellt förbehandlingssteg, som krävs för att mätinstrumentet ska fungera tillförlitligt.

## 4.6 Mätsystemets resultat vid olika matningshastigheter

Vid mätningarna i Linköping testades det att mata ut materialet i olika hastighet från inlastningsfickan. Inställningarna för bandet som matade ut materialet ställdes in i Hz och hastigheten varierades mellan 1, 2 och 3 Hz. Vid 3 Hz kördes bandet 3 gånger så snabbt som vid 1 Hz. På de test som kördes gick det inte att se någon trend i resultaten. Det som däremot upptäcktes var att vid för höga hastigheter var det större sannolikhet att materialet matades ut i partier som riskerade att staplas på varandra och de riskerade även att fastna senare i matningen eller riskerade att falla utanför mätverktyget. Dessa problem syntes inte i mätresultaten utan var bara något som upplevdes av den/de som utförde testen. Dessa problem varierade dessutom beroende på materialets egenskaper, där fint fördelat material var lättare att mata ut medan långa och krokiga bitar hade större tendens att fastna i varandra.

Trots att det inte syntes någon skillnad i resultat får det här testet ändå ses som en viktig kvalitetskontroll. Om mätverktyget har inställningar som säger att det går att köra det med olika hastighet (eller där andra parametrar går att förändra) så är det viktigt att kontrollera att resultatet ändå stannar inom de gränser som mätosäkerhetsbudgeten tillåter. Det får också ses som viktigt att kontrollera att mätverktyget har den kapacitet som utlovas.

## 4.7 Mätsystemets resultat vid skillnad i förbehandling

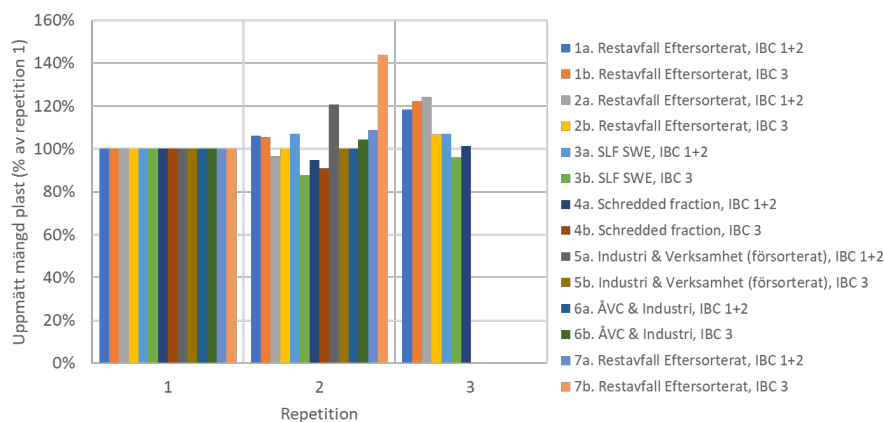
De olika typer av förbehandling som bedömdes som lämpliga att testa innan testerna påbörjades var att krossa materialet, så att det sönderdelas till mindre bitar, samt att kompaktera materialet så att flexibla bitar eventuellt får en lägre volym utan att förändra bitarnas vikt. Under testperiodens gång framkom även att det skulle kunna vara lämpligt att sikta materialet för att få bort de mindre partiklar som mätsystemet inte var designad för att identifiera samt eventuellt

även minska påverkan från snö. Att sikta materialet var dock inget som testades i det här projektet.

Krossning av materialet testades en gång i Linköping. Där testades referensmaterialet som kallades "sammanslagen fraktion" tre gånger innan det krossades och en gång efter att det krossades. Materialet testades dessutom tre gånger, efter kross, i Uppsala. Tyvärr användes den nya algoritmen innan materialet krossades och det valdes sedan att gå tillbaka till den gamla algoritmen efter krossen. Dessutom tillfördes det oavsiktligt lite material vid krossningen, vilket troligtvis var huvudsakligen icke-plast. Resultaten är av dessa anledningar svåra att jämföra. Det som syns i Figur 8 och även i Figur 17 är att den uppmätta andelen plast (%) och den uppmätta mängden plast (kg) är aningen högre i det krossade materialet än i det icke-krossade. Om det resultatet beror på behandlingen (krossningen) av materialet eller förändringen med algoritmen går inte säga säkert. Från resultaten med monomaterialen (4.1) ser det ut som att den nya algoritmen ger högre mätvärden än den gamla. Det finns dock även resultat från Uppsala där provet bestående av 414–418 kg verksamhetsavfall och 43–45 kg tillsatt plast (som nämns i avsnitt 4.4) testades med både nya och gamla algoritmen, vilket då resulterade i lägre mätvärden från den nya algoritmen än den gamla. Resultaten från krossningen är därmed svårtolkade men utifrån hur mätverktyget är designat så står det klart att ett krossat material kan ge andra resultat än om samma material körs icke-krossat. Rekommendationen är därför att sätta upp kriterier för hur pass krossat materialet bör vara innan testerna genomförs, eller att mätverktyget kan variera viktcoeffcienten utifrån hur stora plastbitar som identifieras.

Under mätperioderna gick det inte att få tillgång till någon komprimator. Däremot observerades det att proven från Uppsala som var ämnade för att även testas via plockanalys var väl sammanpackade i tre IBC-behållare vardera innan de testades med FossilEye. Efter två till tre mätningar av varje prov var de inte lika sammanpackade längre och var därför svåra att få ner i behållarna igen. Figur 16 illustrerar hur den uppmätta mängden plast förändrades då dessa prov analyserades första, andra och ibland även tredje gången, där alla mängder har normaliserats till första mätningen. Proven delades upp så att materialet från två IBC-behållare kördes som en mätning (listade som 1a, 2a, 3a osv) och materialet från den tredje behållaren kördes som en annan mätning (listade som 1b, 2b, 3b osv). Proven från de två första IBC-behållarna (a-proven) var således ungefär dubbelt så stora mot proven från den tredje IBC-behållaren (b-proven), där a-proven vägde 371–542 kg och b-proven 182–274 kg. Det är inte alla prov som får ett

högre mätvärde vid andra och tredje mätningen, men det är över lag fler prov som har ett ökande än minskande mätvärde. Det stämmer bra med teorin att ett prov med högre volym kommer identifieras som mer plast om viktcoefficienten är konstant. Rekommendationen är därför att sätta upp kriterier för hur komprimerat materialet bör (eller inte bör) vara innan mätningarna genomförs, eller att det sätts upp ett förbehandlingssteg som skakar om avfallet så att det luftas upp.



Figur 16. Uppmätt mängd plast, beräknat som procentandel av första mätningen av varje prov, för de sju prov som senare analyserades med plockanalys. Proven delades upp i två delar, där del a bestod av (371–542 kg) material från de två första IBC-behållarna av varje prov och del b bestod av (182–274 kg) material från den tredje IBC-behållaren.

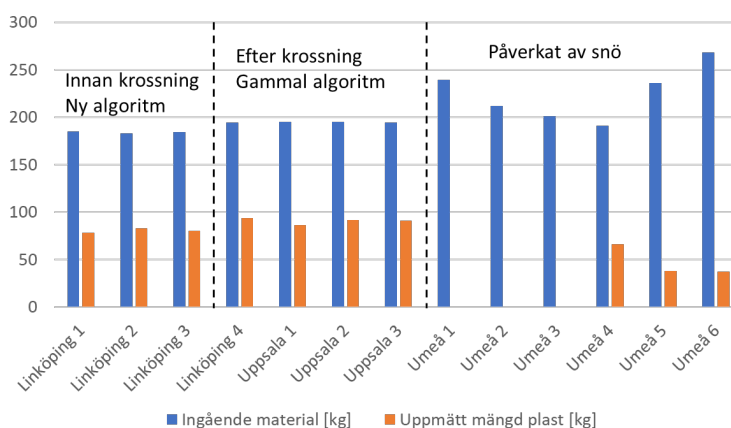
Från ovanstående går det att se att det bör sättas upp kriterier för hur ett avfall bör hanteras innan det analyseras med ett avfallsskannande mätverktyg. Om sådana kriterier inte har satts upp är det lämpligt att testa några realistiska hanteringar för att se hur pass det påverkar resultatet.

## 4.8 Mätsystemets tillförlitlighet vid förflyttning

Det material som blandades till i Linköping, kallat Sammanslagen fraktion, testades tre gånger i Linköping. Efter det krossades materialet och benämndes efteråt som Krossad sammanslagen fraktion, vilket testades en gång i Linköping och syns då som mätning Linköping 4 i Figur 17 där vikten av ingående material syns som blåa staplar och den uppmätta mängden plast syns som orangea staplar. Materialets sammansättningar beskrivs närmare i Tabell 3. Det uppmärksammades att mätvärdena påverkades mellan dessa tillfällen, då det inte användes samma mätalgoritm innan och efter materialet krossades, det tillfördes oavsiktligt lite material vid krossen (troligtvis huvudsakligen trä) och partikelstorleken på

materialet förändrades vilket också kan ha påverkat mätresultaten. De tre första mätningarna i Linköping har därför lagts i en separat sektion i Figur 17. När mätperioden i Linköping var över paketerades referensmaterialet, Krossad sammanslagen fraktion, ner i IBC-behållare och transporterades till Uppsala där de testades tre gånger. Den fjärde mätningen i Linköping är således jämförbar med de tre mätningarna i Uppsala och ligger som en egen sektion i Figur 17. Efter mätningarna i Uppsala paketerades materialet återigen i IBC-behållare och skickades till Umeå där det testades sex gånger. Resultaten från Umeå ser dock ut att ha påverkats av snö, vilket diskuteras i avsnitt 4.5 och ligger därför som en egen sektion i Figur 17.

Första mätningen i Uppsala stämmer inte helt överens med de övriga två mätningarna i Uppsala och inte heller med den mätning som utfördes i Linköping. En teori här är att materialet har komprimerats något då det stoppades ner i IBC-behållarna, på ett liknande sätt som observerades i avsnitt 4.7 där en liknande effekt syntes på annat material som packats i IBC-behållare. Mätning 2 och 3 i Uppsala ser ut att stämma väl överens med mätning 4 från Linköping som är den enda mätning från Linköping som är jämförbar med mätningarna från Uppsala. Den av systemet uppmätta mängden plast vid mätning 4 i Linköping var 94 kg (48,5 %) och blev vid mätning 2 och 3 i Uppsala 92 kg (47,2 %) respektive 93 kg (47,1 %). Det motsvarar en förändring på mindre än 2 procentenheter i plastinnehåll vilket är ungefär vad de flesta mätningarna visade i variation utifrån det som syns i mätsystemets repeterbarhet i övrigt (se avsnitt 4.3).



Figur 17. Ingående mängd material och identifierad (uppmätt) mängd plast i referensmaterialet "Sammanslagen fraktion" samt "Krossad sammanslagen fraktion" från de tre mätplatserna. Figuren är uppdelad i tre sektioner där mätvärdena inom sektionen bör vara jämförbara med varandra, men mätvärdena är inte jämförbara mellan två sektioner då flera andra parametrar har påverkats. Utöver det kan mätningen Uppsala 1 ha påverkats av en lätt komprimering av materialet inför och under transport.

Att kontrollera hur mätsystemet påverkas av transport är endast relevant om mätsystemet är tänkt att vara mobilt. Det här testet kan till stor del ses som en del av testet med en förbestämd sammansättning av testmaterial, avsnitt 4.2, vilket kan fungera som en form av kalibrering av mätsystemet förutsatt att testmaterialet och mätsystemet är anpassat för en sådan kalibrering.

## 4.9 Mätsystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast

Försök gjordes att jämföra mätvärden från FossilEye med andra mätmetoder. Det testades att sätta ihop blandade material med känd sammansättning, vilket diskuterades i avsnitt 4.2. Det testades också att samla ihop en större mängd avfall som först testades med FossilEye och därefter förbrändes i en mindre panna i Linköping där fossilhalten kunde bestämmas med hjälp av mätning av halten kol-14 i rökgaserna, vilket diskuteras här nedan i detta avsnitt. Det testades även att analysera sju olika avfall som även analyserades med hjälp av plockanalys, vilket också diskuteras lite längre ner i detta avsnitt.

### 4.9.1 Dedikerad förbränning med rökgasmätning

Inför den dedikerade förbränningen testades sammanlagt cirka 52 ton avfall i cirka 100 avfallsbatcher med FossilEye. Halten plast i dessa batcher varierade från 6 % till 33 % enligt resultaten från FossilEye, vilket illustreras i Figur 18. Varje testad avfallsbatch representeras av en punkt i den gråa kurvan, med uppmätt andel plast i y-led och ackumulerad mängd avfall i x-led. De avfallsbatcher som testades mer än en gång illustreras som ett högsta värde och ett lägsta värde från de mätningar som gjordes på samma batch. Det beräknades ett medelvärde från varje avfallsbatch, vilket i sin tur användes för att beräkna ett totalt medelvärde på hela mängden (52 ton). Det totala medelvärdet beräknades utifrån vikten av varje batch, där de tyngre batcherna alltså bidrog mer än de lättare batcherna. Det totala medelvärdet blev 18,9 % uppmätt mängd plast, som markerats som en rak blå linje genom Figur 18. Ett motsvarande medelvärde för alla minimivärden per batch beräknades till 18,8 %, som markerats som en streckad blå linje i Figur 18 vilket knappt syns då det ligger väldigt nära medelvärdet på 18,9 %.

Mätningarna som ligger från 4442 kg till 8048 kg ackumulerad mängd avfall påverkades av ett misstag vid kalibrering av instrumentet, vilket också har

markerats i Figur 18. Den mätning som gjordes vid just 4442 kg utfördes en gång innan och två gånger efter den osäkra kalibreringen, där värdet innan var 12,2 % plast och värdena efter var 7,4 % och 8,1 % plast. Det bedömdes därför att mätvärdena efter 4442 kg och fram till och med 8048 kg kunde vara som högst 6 procentenheter högre än de mätvärden som rapporterades av FossilEye under den osäkra perioden. Med detta antagande om eventuellt högsta värde på grund av osäker kalibrering samt de högsta värden som erhöles per avfallsbatch beräknades ett totalt högsta medelvärde till 19,5 % uppmätt mängd plast. Detta högsta värde är markerat som en streckad blå linje i Figur 18. Uppskattningen är därmed att FossilEye gav ett medelvärde mellan 18,8 % och 19,5 % för allt material, med ett troligaste värde på 18,9 % uppmätt mängd plast.

Innan den dedikerade förbränningen påbörjades var avfallet tvunget att mellanlagras, vilket medförde att det inte går att avgöra i vilken ordning materialet förbrändes. Den ordning som framgår i Figur 18 är endast i vilken ordning materialet gick igenom FossilEye.

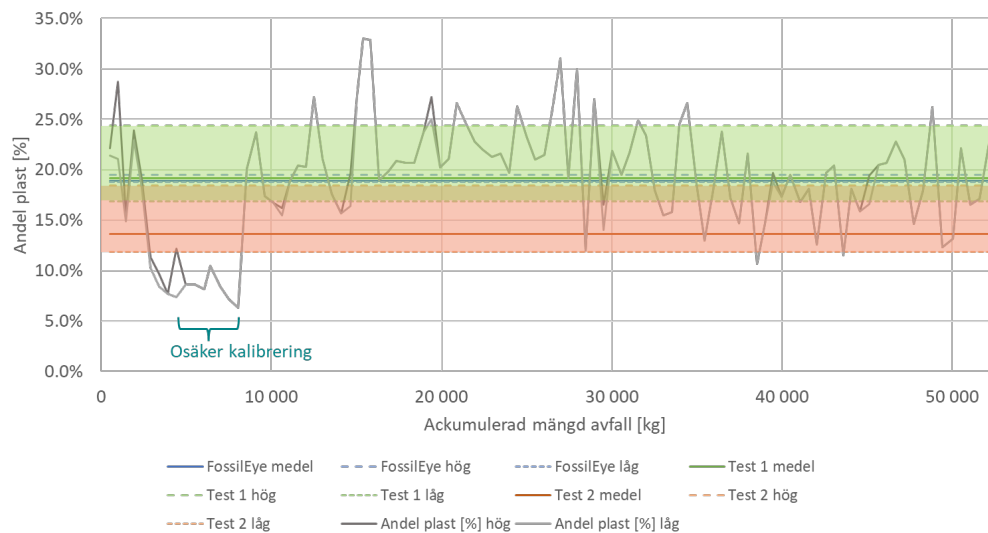
Det togs fyra prov av rökgaser i samband med den dedikerade förbränningen. Ett prov togs innan det insamlade materialet skulle testas, vilket benämns som "Innan". Ett prov togs i början av den dedikerade förbränningen, vilket benämns som "Test 1". Ett annat prov togs i slutet av den dedikerade förbränningen, vilket benämns som "Test 2". Det sista provet togs efter den dedikerade förbränningen, när det insamlade materialet bedömdes vara slut, vilket benämns som "Efter". Mätvärdena från dessa prov är listade i Tabell 6. Ytterligare detaljer om förbränningen är beskrivna i avsnittet om metoden, 3.2.1.6. För att beräkna andelen plast i avfallet utifrån rökgasproverna krävdes några antaganden som är närmare beskrivna, ihop med själva metoden för beräkningen, i Bilaga III. Utifrån de data som fanns tillgängligt och de antaganden som behövde göras bedöms avfallet vid Test 1 bestått av 16,9–24,4 % plast, vilket markerats med ett ljusgrönt fält i Figur 18. Det troligaste värdet för Test 1 är beräknat till 19,1 % plast i avfallet, vilket markerats som en grön linje i Figur 18. Den gröna linjen är dock svår att se på grund av att den ligger alldeles intill den blå som visar det troligaste värdet från mätningarna med FossilEye. Beräkningen av bränslet vid Test 2 gav att det bestod av 11,8–18,5 % plast, vilket syns som ett ljust fält med röd/orange färgton i Figur 18. Det troligaste värdet för Test 2 är beräknat till 13,6 % plast i avfallet, vilket markerats med en röd/orange linje i Figur 18. Om båda testen slås samman, med beaktande att Test 1 var längre än Test 2, bedöms den totala mängden avfall bestått av 14,9–22,0 % plast, med ett troligaste värde på 16,9 % plast. Dessa sammanslagna värden är dock inte markerade i Figur 18. För provet Innan beräknas avfallet bestå

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
 Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
 Mars 2025

av 25,0–32,4 % plast och för provet Efter beräknas avfallet bestå av 14,3–21,3 % plast.

Tabell 6. Data från rökgasmätningar tagna innan, under och efter den dedikerade förbränningen av cirka 52 ton analyserat avfall. Test 1 togs i början av den dedikerade förbränningen och Test 2 togs i slutet av den dedikerade förbränningen.

|                               | Innan       | Test 1      | Test 2      | Efter       |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tid                           | 07:10-08:30 | 08:30-11:00 | 11:00-12:06 | 12:00-14:10 |
| Bio-CO <sub>2</sub>           | 30 %        | 49 %        | 63 %        | 55 %        |
| Fossil-CO <sub>2</sub>        | 70 %        | 51 %        | 37 %        | 45 %        |
| CO <sub>2</sub> -halt (vol-%) | 9.43        | 9.69        | 10.21       | 9.79        |
| Fukt-halt (vol-%)             | 16.36       | 16.68       | 17.14       | 17.18       |



Figur 18. Andel plast uppmätt av FossilEye (gråa linjer) med högsta (mörkgrå) och lägsta (ljusgrå) värden om mer än en mätning utfördes av samma prov, vid sammanlagt 52 ton blandat avfall. Blå linjer indikerar högsta (långa streck), lägsta (korta streck) och mest troliga (heldragen) medelvärde för hela mängden avfall, uppmätt av FossilEye. Gröna linjer och grönt fält visar beräknade värden för avfallsets plastinnehåll vid Test 1 utifrån rökgasmätning. Röda/orangea linjer och fält visar beräknade värden för Test 2. Testerna vid 4442–8048 kg ackumulerad mängd avfall påverkades av en osäker kalibrering.

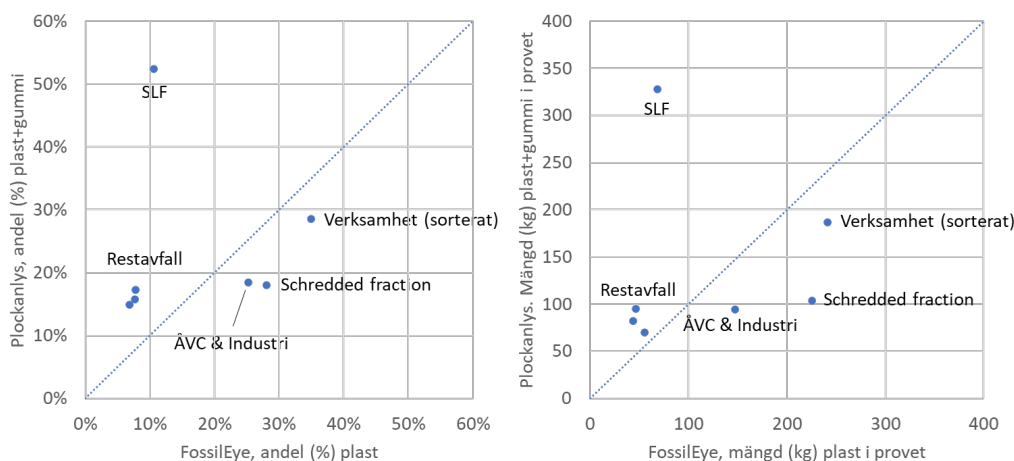


Resultaten från den dedikerade förbränningen av 52 ton avfall som testats med FossilEye visar att medelvärdet från FossilEye (18,8–19,5 %) ligger inom det område (14,4–20,3 %) som beräknades från rökgasmätningarna. Det ligger också inom det område (13,9–20,2 %) som beräknades från rökgasmätningen efter den dedikerade förbränningen, men utanför det område (24,3–30,7 %) som beräknades från rökgasmätningen innan den dedikerade förbränningen. Beräkningarna från rökgasmätningarna är dock osäkra, vilket reflekteras i ett spann på cirka 6 procentenheter mellan högsta och lägsta värdet utifrån vad som bedöms vara rimliga antaganden. Utifrån mätningarna med FossilEye syns det en stor variation mellan olika batcher med avfall, vilket inte reflekteras i mätvärdena från rökgaserna då det krävdes så stora mängder avfall för att utföra den dedikerade förbränningen. För att kunna verifiera resultaten från FossilEye, eller ett annat avfallsskannande system, skulle det krävas betydligt mindre prov i storleksordningen av vad som går in i en batch vid testerna i det avfallsskannande systemet. Alternativt kan en längre testperiod köras, där materialet sorteras i till flera omgångar med dedikerad förbränning, där batcher med låg halt uppmätt plast (enligt mätverktyget) sorteras till en förbränning och batcher med hög halt uppmätt plast sorteras till en annan. Ett sådant test kan fortfarande inte säga om varje mätning är korrekt, men det kan säga om mätverktyget i genomsnitt kan avgöra skillnad mellan hög och låg andel plast i avfallet.

## 4.9.2 Plockanalyser

Under testperioden i Uppsala testades sju avfallsbatcher från fem avfallsleverantörer, där avfallsproven testades två till tre gånger i FossilEye och skickades senare till en extern aktör för plockanalys. Vid plockanalysen sorterades avfallet i fyra fraktioner, varav en var plast och gummi, en annan var el-avfall, en tredje var farligt avfall och resterande var allt annat. Resultat från plockanalyserna (se Bilaga IV) jämfördes med resultaten från FossilEye, vilket illustreras i Figur 19, där resultaten har delats upp i andel (%) plast i provet till vänster i figuren samt mängd (kg) plast till höger i figuren.





Figur 19. Resultat från plockanalyserna (y-axeln) och från FossilEye (x-axeln), med andel (%) plast och gummi i vänstra diagrammet samt mängd (kg) plast och gummi i högra diagrammet. De blåa streckade linjerna representerar resultat där plockanalysen visar exakt samma som FossilEye.

Resultaten visar att det i vissa fall är stor skillnad mellan plockanalyserna och FossilEye. Sammansättningen av avfallet och sammansättningen av de fraktioner som sorterades via plockanalysen kan troligtvis förklara en stor del av varför denna skillnad uppstår.

De tre proven med restavfall (6,8–7,8 % plast enligt FossilEye och 14,9–17,2 % plast och gummi enligt plockanalys) är en form av restavfall som har eftersorterats. De har levererats från en anläggning där metall och plast sorteras bort från restavfall innan avfallet går vidare till förbränning. Plastsorteringen sker med hjälp av NIR-detektorer. Det innebär att det är huvudsakligen den typ av plast som FossilEye kan detektera som har sorterats bort, då även FossilEye använder en NIR-detektor för att identifiera plast. De människor som utförde plockanalysen har inga problem att upptäcka den plast som missades av både eftersorteringen och FossilEye. Det här förklarar varför FossilEye fick lägre resultat än plockanalysen. På bilderna av avfallet (se Bilaga V) syns också ett flertal öppnade plastpåsar. Det är osäkert hur dessa påsar har påverkat resultatet.

Provet med SLF är väldigt mörkt (se Bilaga V). Det innehåller en hög andel svart plast och svart gummi, vilket är svårt för FossilEye att detektera. Resultatet från FossilEye (10,6 %) är därför betydligt lägre än resultatet från plockanalysen (52,4 %). Om resultatet ska reflektera andelen fossilt material, vilket var grundtanken med FossilEye, så borde det tas hänsyn till att gummit troligtvis innehåller en del biomassa från naturgummi och slutresultatet borde därför

antagligen vara lägre än de 52,4 % som plockanalysen gav, men betydligt högre än de 10,6 % som FossilEye gav.

De fraktioner som i Figur 19 kallas Shredded fraction och Verksamhet (sorterat) är två fraktioner som har sorterats för att få ut återvinningsbara delar som har ett ekonomiskt värde. Från bilderna (se Bilaga V) ser det ut som att de har en hög andel mjukplast, vilket är troligt då hårdplasten har ett betydligt högre ekonomiskt värde än mjukplasten om det ska säljas för återvinning. Det visades vid analyserna av monofraktioner (se avsnitt 4.1) att FossilEye övertolkade mjukplast vilket kan innebära att de värden som kom ut från FossilEye (28,0 % och 34,9 %) troligtvis är högre än vad som är korrekt. Plockanalysernas resultat (18,1 % och 28,6 %) ligger troligtvis närmare korrekt värde. Dessa prov är finfördelade och har betydligt mindre partiklar än de flesta andra prov som testats genom FossilEye. Det går i dagsläget inte säga hur denna partikelstorlek har påverkat resultatet (se avsnitt 4.7).

Den fraktion som i Figur 19 kallas ÅVC & Industri är ett krossat avfall som består av industriellt avfall och brännbart avfall som har samlats in via återvinningscentral (ÅVC). Från bilder (se Bilaga V) och beskrivningar av avfallet går det utläsa att det innehöll relativt mycket skumplast och syntetisk textil. Som exempel uppmärksammades att det låg med en sovsäck i materialet. Under plockanalysen klassades dock inte skumplast och syntetisk textil som plast. Vi vet däremot från testerna med monofraktionerna (se avsnitt 4.1) att FossilEye identifierar det som plast. Om dessa material hade tagits med i plockanalysen hade den fått ett högre resultat än de 18,4 % som plockades ut och hade kanske kommit närmare de 25,3 % som FossilEye uppmätte.

Resultaten från dessa plockanalyser visar hur sammansättningen av olika typer av avfall kan variera, där förhållandet mellan exempelvis mjukplast, hårdplast och svart plast varierar kraftigt. Dessa avfallsprov valdes just för att skapa en stor variation i sammansättningen, just för att testa gränserna för FossilEye. Då FossilEye gav klart olika resultat från exempelvis mjukplast, hårdplast och svart plast är det inte konstigt om FossilEye gav annorlunda resultat mot plockanalyserna. Det visade sig också att plockanalyserna inte försökte identifiera riktigt samma material som FossilEye då det bland annat missades att ta med skumplast och syntetisk textil, vilket borde ha tagits med om mätsystemet ska testas. En annan fråga som dykt upp är hur smuts och eventuella blandmaterial hanteras av de olika mätmetoderna, vilket orsakar ytterligare osäkerhet i jämförelsen. Erfarenheten från dessa tester är att plockanalys kan fungera som en lämplig

metod för jämförelse av resultaten, men i så fall är det viktigt att sätta upp ordentliga riktlinjer så att plockanalysen sorterar ut samma typ av material som är tänkt att identifiera med det avfallsskannande systemet. Allra bäst blir det troligtvis om plockanalyser kombineras med en kontrollerad förbränning med analys av halten kol-14 i rökgaserna. Om dessa två metoder sätts upp på ett sätt så att de har färre och mindre osäkerheter än vad som identifierats i denna studie bör de gå att använda för att jämföra resultaten från ett avfallsskannande system.

## 4.10 Minsta lämpliga provmängd

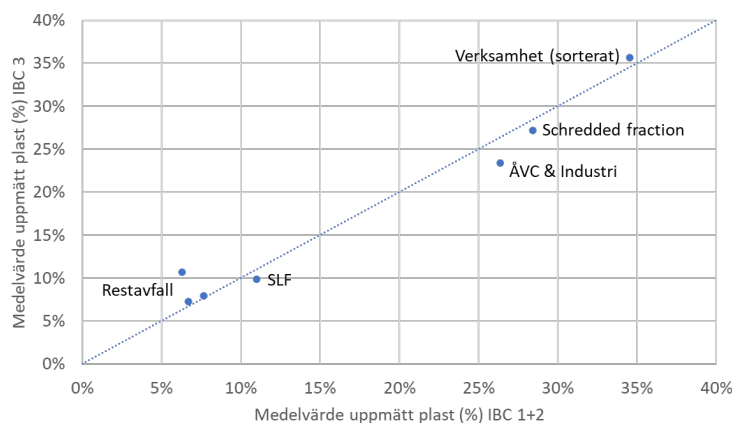
De prov som testades i Linköping och illustreras längs en tidslinje i Figur 18 kommer från krossat verksamhetsavfall som krossats inne på anläggningen. Flera av dessa prov kommer från samma leveranser, men det går inte att urskilja vilka prov som kommer från samma leverans eller när det går över till en ny leverans. Det som går att utläsa ur Figur 18 är att andelen uppmätt plast, alltså mätvärdet från FossilEye, varierar kraftigt från ett prov till ett annat. Ungefär 38 % av proverna varierar med mer än 5 procentenheter från ett prov till ett annat. En del av variationen kan bero på att proven kom från olika leveranser, men det är också troligt att variationen uppstår på grund av att avfallsleveranserna har varit inhomogena. Dessa test var inte uppställda för att testa minsta lämpliga provmängd, men det går ändå säga att det troligtvis inte var en tillräcklig provstorlek (ca 500 kg) i det här fallet.

De prov som testades i Uppsala och senare även skickades till plockanalys (se avsnitt 4.9.2) var uppdelade i tre IBC-behållare vardera. Dessa prov delades upp så att de två första IBC-behållarna (IBC 1+2) testades gemensamt och den tredje IBC-behållaren (IBC 3) testades separat. Vid en jämförelse mellan de uppdelade proven, IBC 1+2 mot IBC 3, kan ses att variationen ser ut att vara liten i de flesta av fallen men ändå märkbar i några fall. Figur 20 visar längs x-axeln den uppmätta andelen plast från IBC 1+2 jämfört med den uppmätta andelen plast från IBC 3 längs y-axeln. Två prov av eftersorterat restavfall har en skillnad på mindre än 1 procentenhet mellan IBC 1+2 och IBC 3. Tre prov med SLF, Shredded fraction och Industri (sorterat) har en skillnad på strax över 1 procentenhet mellan IBC 1+2 och IBC 3. Provet med krossat avfall från ÅVC & Industri hade en skillnad på 3 procentenheter mellan IBC 1+2 och IBC 3. Det tredje provet med eftersorterat restavfall hade en skillnad på 4,4 procentenheter mellan IBC 1+2 och IBC 3. Utifrån denna lilla uppsättning med test går det att säga att en IBC-behållare med avfall (182–274 kg) troligtvis inte är tillräckligt för att, med säkert resultat, bedöma andelen plast i en leverans av avfall.

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**

 Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
 Mars 2025

Då de flesta av proven som syns i Figur 20 kommer från skilda typer av avfall och därmed också skilda leveranser och leverantörer är det svårt att säga vilken storlek på prov som är tillräcklig. De tre proven med sorterat restavfall kommer från samma leverantör och samma förbehandling. Troligtvis kommer de dock inte från samma leveranser. Om dessa tre prov kan anses vara jämförbara går det att säga att i just det här fallet är variationen relativt liten. Alla tre prov, med en sammanlagd vikt på 1969 kg, fick i snitt ett mätvärde på 7,4 % uppmätt mängd plast. När de tre proven togs i sin helhet, alltså alla tre IBC-behållarna med en totalvikt på över 500 kg, varierade deras mätvärde mellan 6,8 % och 7,8 %. Det är visserligen bara tre prov vilket gör det svårt att säga om det bara är ett sammanträffande, men från dessa data ser det ut som att ett prov på 500 kg kanske räcker för att bedöma andelen plast i en leverans av avfall.



Figur 20. Jämförelse av andel uppmätt plast (%) från separata delar av samma prov. Längs x-axeln anges den del av proven som kom från de två första IBC-behållarna och längs y-axeln anges den del av proven som kom från den tredje IBC-behållaren. Varje värde i diagrammet motsvaras av ett medelvärde från 2–3 mätningar av samma material. Den blåa streckade linjen motsvarar de resultat som förväntas om delproven gav samma resultat.

Från Avfall Sveriges manualer för plockanalys av grovavfall (Avfall Sverige, 2022a) och plockanalys av hushållens mat- och restavfall (Avfall Sverige, 2022b) går det att utläsa att lämplig provstorlek för restavfall är 500 kg men för ett grövre avfall krävs en större provmängd, där 1500 kg ses som lämpligt för exempelvis brännbart avfall från ÅVC. Dessa manualer syftar på provtagning av betydligt fler fraktioner än bara andelen plast i avfallet, vilket gör att det inte går att säga att dessa rekommenderade provstorlekar även gäller om det bara är andelen plast som ska bedömas. Däremot belyser det att ett grövre avfall kräver en större provstorlek, vilket antagligen är vad som syns i skillnaden mellan Linköpingsproven och Uppsalaproven i den här studien. Linköpingsproven bestod av grövre avfall som gick igenom en kross, men då det troligtvis inte blandades efter krossen är det

fortfarande lämpligt med en större provstorlek. Om ett krossat prov blandas innan det tas ut ett prov kan man klara sig med en mindre provstorlek. De prover som testades i Uppsala är troligtvis närmare ett restavfall i grovlek, eller i vissa fall ännu finkornigare, vilket därför medför att det rimligtvis räcker med en mindre provstorlek.

Rekommendationen från den här studien blir därmed att det är lämpligt att fortsätta studera minsta lämpliga provmängd. Mer data behövs för att göra en säker bedömning. Med de data som har framkommit i denna studie ser det ut som att manualerna för plockanalys har gjort en rimlig bedömning. Troligtvis är det därför lämpligt med minst 500 kg av ett väl mixat material, som har krossats innan det mixades. Om materialet däremot inte har mixats efter det krossades så kommer det troligtvis krävas minst 1500 kg.

## 5 Analys och slutsatser

---

Mätssystemet FossilEye är designat för att mäta en sak, andelen plast (eller egentligen fossilt material) i ett blandat avfall. Från testerna med monomaterial går det däremot tydligt att se att plasten är inte endast ett material. Det är skillnad på polymertyp, färg, form, struktur, densitet och ett flertal andra parametrar som kan påverka resultatet. Om förhållandet mellan tunn plast, tjock plast, svart plast och övrig plast hålls konstant skulle det kunna räcka med att bara identifiera vad som är plast och vilken volym dessa bitar har för att ge ett rimligt värde på den totala andelen plast i det blandade materialet. Om det däremot ska kunna ge ett trovärdigt resultat från avfall som kommer från varierande källor kommer det krävas att materialet identifieras mer än så. Den identifieringen skulle exempelvis kunna ske genom bildigenkänning, såsom redan påbörjats med mjukplasten för FossilEye, eller med hjälp av ytterligare information från användaren av mätsystemet.

Vad som kan sägas om mätsystemet FossilEye, så som det fungerade under testerna i det här projektet, är att det inte mäter korrekt för alla typer av avfall. Det kan dock ändå fylla en mycket viktig funktion i hanteringen av blandat avfall. Ett mål med att påbörja utvecklingen av FossilEye har varit att kunna sätta differentierade kostnader för avfall som lämnas till förbränning, baserat på avfallets innehåll av plast och fossilt material. Det målet går fortfarande att nå, i det utförande som har testats. Om det tillsätts mer plast till ett avfall, samtidigt som avfallets sammansättning i övrigt hålls konstant, kommer resultatet från FossilEye

visa att mängden plast har ökat. Det gäller dock inte om all den tillsatta plasten är svart. Troligtvis kommer den uppmätta mängden plast minska om plast tas bort från materialet. Det har inte testats men resultaten tyder på att så kommer ske. Det innebär att en kund (avfallslämnare) som lämnar in ett likartat avfall varje gång skulle kunna få ett mätvärde som visar om halten plast har ökat eller minskat i avfallet från ett tillfälle till ett annat. Troligtvis borde mätvärdena också gå att använda för att avgöra om en kund har hög eller låg halt plast i sitt avfall jämfört med andra kunder som lämnar in liknande typer av avfall. Det kommer i så fall krävas att avfallet går att typbestämmas så att det bara jämförs inom sin egen typ. Med en enkel justering av hur FossilEye kalibreras är det också fullt möjligt att alltid få ett mätvärde som är mindre än (eller samma som) det egentliga plastinnehållet i avfallet. Det skulle exempelvis kunna användas för att reagera om en leverans innehåller klart mer plast än vad som har avtalats med mottagaren. Med allt detta i beaktande och med en viss komplettering där stickprov även analyseras med andra metoder för att avgöra halten plast eller fossilt material kan FossilEye vara ett väl användbart verktyg för att sätta differentierade kostnader baserat på avfallens plastinnehåll.

Med tanke på att dessa test utfördes tidigt i utvecklingen av FossilEye finns det fortsatt god utvecklingspotential av systemet. Det har under projektets gång identifierats att en förbehandling av avfallet i form av kross och siktning kan resultera i säkrare analyser som i mindre utsträckning påverkas av stora bulkiga plastartiklar som innehåller mycket luft (eller annan icke-plast), samt snö och andra mindre partiklar som kan störa detektorn eller vara svåra att identifiera. Det har också identifierats att bildigenkänning kan tillföra mycket genom att lättare kunna särskilja mellan olika typer av plast och plastobjekt med olika densitet. Bildigenkänning kan också underlätta möjligheten att ge en uppskattning av hur mycket svart material som finns med i avfallet, vilket i förlängningen kan utnyttjas för att ansätta hur mycket svart plast som finns med eller för att ge en signal om osäkerheter i analyserna. Det finns också annan hårdvara som går att utnyttja där vissa NIR-detektorer klarar av att detektera svart plast. Bildigenkänning kan eventuellt också hjälpa till att avgöra vilken avfallsklass ett visst avfall bör kategoriseras som, vilket kan underlätta prissättningen eller även kvantifieringen av plast då de olika avfallsklasserna troligtvis bör ha olika viktkoefficienter vid analysen. Storleken på partiklarna kan också spela roll, vilket systemet borde kunna anpassas till. Det sågs också att viktkoefficienten eventuellt inte ska vara samma vid låga koncentrationer av plast som vid höga koncentrationer av plast. Allt utom ett eventuellt hårdvaruskifte av NIR-detektorn är saker som borde gå att utveckla mer och mer ju längre systemet används och ju mer information som går

att samla in. Allt det borde dessutom gå att uppdatera via mjukvaruuppdateringar. Systemet är alltså användbart i dagsläget och har god potential att förbättras även för den som väljer att skaffa ett redan idag, givet att det kompletteras med en förbehandling som säkerställer att avfallets storleksfördelning faller inom systemets ramar.

Vad det gäller metoden för att verifiera ett avfallsskannande system kan det sägas att alla de testparametrar som ställdes upp i avsnitt 3.1 har varit relevanta vid testningen av FossilEye och kan även vara relevanta vid en verifiering av andra avfallsskannande system. Vissa testparametrar får ändå sägas vara mer relevanta i ett tidigt stadium av utvecklingen av mätsystemet och andra testparametrar är mer relevanta i ett senare skede, eventuellt när mätsystemet ska verifieras eller kalibreras på plats ute hos en slutanvändare.

**Mätsystemets klassning av olika monofraktioner** har visat sig vara en relevant testparameter för att förstå om systemet fungerar för olika material och hur det i så fall tolkar dessa material. Denna testparameter kan liknas vid det första steget av QAL2-proceduren i SS-EN 1481:2014, ett funktionalitetstest. Då varje monofraktion kan ses som en typ av material som ska detekteras av det avfallsskannande systemet är det viktigt att testa dem separat. Det är också viktigt att testa någon form av nollfraktion, där resultatet bör bli noll förutsatt att fraktionen faktiskt är fri från fossilt material (eller annat material om mätsystemet används för att detektera något annat). Mätsystemet ska visa noll om nollfraktionen är ren, men mätsystemet behöver inte nödvändigtvis visa rätt på övriga monofraktioner då mätsystemet troligtvis inte är designat för att mäta på just monofraktioner. Huvudsaken är att mätsystemet visar rätt på den typen av avfall som ska testas, vilket testas med andra testparametrar som beskrivs nedan.

**Mätsystemets resultat vid en förbestämd sammansättning av testmaterial** visade sig vara svårare att utföra än förväntat och eventuellt är det inte relevant för att verifiera ett avfallsskannande system. Det visade sig påverkas av den mänskliga faktorn i form av att en människa var tvungen att först identifiera vad som var plast eller inte. Det innebar också att det var svårt att ta med material som består av plast blandat med något annat, om det inte i förväg går att avgöra hur stor del som var plast. Det är viktigt att kunna skapa en blandning som faktiskt liknar ett riktigt avfall, vilket också visade sig vara svårt att utföra i praktiken. Testparametern kan eventuellt vara relevant i ett tidigt stadium av utvecklingen av ett mätsystem. Om denna testparameter används kan det vara lämpligt att notera tydligare exakt



mängd av olika monofraktioner som tas med, inte bara hur mycket som var plast eller icke-plast.

**Mätsystemets repeterbarhet** är en viktig testparameter. Det är dock en testparameter som lätt kan testas samtidigt som andra testparametrar. Materialet bör testas mer än en gång. Det noterades att materialet påverkas av mätningarna vilket medför att det är svårt att jämföra en tidig mätning av ett enskilt avfallsprov med en senare mätning av samma prov om det har passerat flera mätningar däremellan. Lämpligt är att endast jämföra mätningar på samma prov direkt efter varandra, så som i denna rapport har betecknats som att mätning  $N$  jämförs med mätning  $N+1$ .

**Mätsystemets känslighet vid tillsats/borttagning av plast eller annat material** visade sig vara relevant för att återigen förstå hur både mätsystemet och avfallet beter sig. En teori som framkommit under projektets gång är att resultaten kan påverkas av hur avfallet faller ner på transportbandet vid detektorn. Om ett avfallsskannande system kan påverkas av hur ett specifikt material beter sig vid mätningen så är det lämpligt att testa just detta. Det kan vara lämpligt att tillföra och/eller ta bort flera sorters plast och flera sorters icke-plast, där partikelstorlek och densitet på de tillförda/borttagna materialen varierar för att se en tydligare effekt. Denna testparameter kan även vara lämplig att utnyttja för att få en längre kalibreringsfunktion så att det tillkommer mätpunkter med hög koncentration, låg koncentration och gärna även någon koncentration däremellan. Det är viktigt att inte förutsätta att kalibreringsfunktionen är linjär.

**Mätsystemets väderkänslighet (till exempel snö och kyla), mätsystemets resultat vid olika matningshastigheter och mätsystemets resultat vid skillnad i förbehandling** är alla tre relevanta testparametrar för att kontrollera att mätsystemet klarar av de förhållanden som det utlovar. Om specifikationen för mätsystemet säger att det ska klara snö och kyla så är det lämpligt att testa mätsystemet vid snö och kyla. Samma sak gäller vid olika matningshastighet att testa samma material vid både låg och hög hastighet, om specifikationen säger att mätsystemet ska klara det. Likadant bör samma material testas mer än en gång vid olika former av förbehandling, så länge dessa former av förbehandling ligger inom gränsen för vad mätsystemet ska klara av. Det kan tillkomma andra parametrar som också är lämpliga att testa för att se så att mätsystemet klarar det som specificerats. Dessa tre parametrar är vad som ansågs relevanta under detta projekt.



**Mätsystemets tillförlitlighet vid förflyttning** är endast relevant för ett mobilt system. Verifiering och kalibrering bör ske på den plats där mätsystemet ska användas. Efter en förflyttning är det relevant att göra en ny kontroll.

**Mätsystemets resultat jämfört med andra metoder för att uppskatta mängden plast** är den helt klart viktigaste testparametern. Det har dessutom visat sig vara den svåraste testparametern att utveckla i det här projektet då det visade sig vara svårt att hitta en annan metod som mätte exakt samma sak på ett tillförlitligt sätt. Att blanda ihop ett material med känd sammansättning påverkas av att det endast blandas material som en människa lyckas identifiera som antingen plast eller icke-plast. Det var svårt att avgöra om det var en representativ blandning för ett verkligt avfall. Att mäta halten kol-14 i rökgaserna från en dedikerad förbränning visade sig i det här fallet vara osäkert på grund av att många parametrar saknade kända värden. Samtidigt gav det endast en uppskattning av medelvärdet från en stor mängd avfall, inte ett korrekt värde för en specifik batch med avfall. Att analysera materialet med hjälp av plockanalys påverkades igen av den mänskliga faktorn där en människa var tvungen att identifiera vad som var plast eller icke-plast, samt hur mycket plast eller icke-plast som fanns med i kontaminerade eller blandade material. Det som i slutändan ser ut att vara en relevant mätmetod som kan användas som jämförelse får ändå anses vara en plockanalys i kombination med förbränning med kol-14-mätning. Då är det viktigt att plockanalysen är inriktad på att identifiera samma material som det avfallsskannande systemet ska identifiera, vilket i det här fallet inkluderade även skumplast från möbelstoppning och syntetisk textil. Förbränningen med kol-14-mätning bör sedan ske på de sorterade fraktionerna från plockanalysen, där förbränningen sker på ett prov i taget där alla relevanta parametrar analyseras, så som exempelvis askhalt, för att minska osäkerheten.

**Minsta lämpliga provmängd** har analyserats men det är svårt att dra några säkra slutsatser från de mätresultat som framkommit från denna studie. Det som går att säga säkert är att ett finfördelat material, som har mixats efter det att provet finfördelades, kommer kräva en mindre provmängd. Ett grovt material kommer kräva en större provmängd, vilket även gäller om det grova materialet har finfördelats utan att mixas efter finfördelningen. Tills mer data har framkommit får manualerna för plockanalys fungera som en fingervisning om minsta lämpliga provmängd, där exempelvis 500 kg är ett minimum för restavfall och 1500 kg är ett minimum för grovt brännbart avfall från ÅVC.

Ska vi i framtiden formulera en mätosäkerhetsberäkning, så föreslås den bygga på dels en väl specificerad jämförelse, dels på repeterbarhet. Den väl specificerade jämförelsen kan exempelvis baseras på plockanalys i kombination med förbränning med kol-14-mätning, som diskuterades här ovan. Repeterbarheten bör endast baseras på jämförelse av mätningar direkt efter varandra,  $N$  mot  $N+1$ , som också diskuterades här ovan. Lämpligtvis görs det flera mätosäkerhetsberäkningar, så att det finns en mätosäkerhet beräknad för varje typ av avfall som mätverktyget ska klara av att analysera. Som det syntes i den här rapporten var det nämligen stor skillnad mellan avfall och avfall.

## 6 Referensförteckning

---

Avfall Sverige. (2022a). *Manual för plockanalys av grovavfall* (2016:30). Avfall Sverige.

<https://www.avfallsverige.se/rapporter-utveckling/rapporter/2016-30-manual-for-plockanalys-av-grovavfall/?tab=summary>

Avfall Sverige. (2022b). *Manual för plockanalys av hushållens mat- och restavfall*

(2017:31). <https://www.avfallsverige.se/rapporter-utveckling/rapporter/2017-31-manual-for-plockanalys-av-hushallens-mat-och-restavfall/>

Dahlbom, M., Johansson, I. A., & Billstein, T. (2023). *Sustainable clothing futures:*

*Mapping of textile actors in sorting and recycling of textiles in Europe* (C736; s. 54). IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://ivl.diva-portal.org/smash/get/diva2:1733211/FULLTEXT02.pdf>

Lassesson, H. (2022, november 15). *Var finns plasten? En sammanställning av*

*tillgängliga avfallsströmmar av plast, syntetgummi och syntetisk textil.*

Klimatledande Processindustri.

Naturvårdsverket. (u.å.). *Vad är utslappshandel?* Hämtad 04 april 2024, från

<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/utslappshandel/vad-ar-utslappshandel/>

Naturvårdsverket. (2021). *Avfallsförbränning i EU ETS* (PM NV-00052-20; s. 12).

Naturvårdsverket.

<https://www.naturvardsverket.se/contentassets/f1821fc959934673bbc1f2578f9f2325/avfall-ets-tillrk.pdf>

Naturvårdsverket. (2024, januari 12). *El och fjärrvärme, utsläpp av växthusgaser*.

<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-el-och-fjarrvarme/>

NPA. (u.å.). *Designriktlinjer för återvinning och cirkularitet – En manual från*

*Näringslivets Producentansvar*. Näringslivets producentansvar (NPA).

SCB. (u.å.). *Utsläpp av växthusgaser från el och fjärrvärme typ av växthusgas och*

*bränsletyp. År 1990 – 2022* [SCB Statistikdatabasen]. Hämtad 03 april 2024, från

[https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START\\_\\_MI\\_\\_MI0107/MI0107ELoFjarrNN/](https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0107/MI0107ELoFjarrNN/)

SMHI. (u.å.-a). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Lufttemperatur (h): SMHIs

stationsnät. Hämtad 24 april 2024, från

<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=airtemperatureInstant,stations=core,stationid=140480>

SMHI. (u.å.-b). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Nederbördsmängd (dygn):

SMHIs stationsnät. [https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-](https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=precipitation24HourSum,stations=core,stationid=140490)

[observationer/#param=precipitation24HourSum,stations=core,stationid=140490](https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=precipitation24HourSum,stations=core,stationid=140490)

Svensk Plaståtervinning. (u.å.). *Site Zero – störst och mest avancerade*. Site Zero –  
störst och mest avancerade. Hämtad 02 april 2024, från  
<https://www.svenskplastatervinning.se/site-zero/>

## Bilaga I: Förslag på monofraktioner att testa vid Tekniska Verken

För att kunna utvärdera och verifiera hur väl FossilEye kan mäta mängden plast samt hur materialet kategoriseras i olika typer av avfallslag genomfördes tester på olika monofraktioner. Både ett antal sorterade plastmaterial som kan förekomma i kommunalt avfall samt fraktioner som ej innehåller plast, så kallad 'icke-plast', testades. I Tabell 7 presenteras de fraktioner som identifierades vara av intresse.

Tabell 7: Sammanställning över monofraktioner som ansågs vara av intresse att testa samt en motivering varför monofraktionen identifierades som intressant.

| Avfallsfraktion                         | Motivering   |
|---|--|
| <b>Hårdplast från industri</b>          | Det identifierades tidigt i projektet att industriell plast och plast från hushåll skiljer sig åt i sin utformning, exempelvis storlek och form. Skillnaden är ännu större om hårdplast jämförs med mjukplast. Då mätningen till viss del baseras på just storleken och densiteten av materialet kan det vara väl värt att testa hur mätningen påverkas. |
| <b>Hårdplast från hushåll</b>           | Samma motivering som ovan.   |
| <b>Mjukplast från industri</b>          | Samma motivering som ovan.   |
| <b>Mjukplast från hushåll</b>           | Samma motivering som ovan.   |
| <b>Hård PVC (exempelvis rör)</b>        | PVC har betydligt högre densitet än de vanligaste övriga termoplasterna och har även en klart annorlunda kemisk sammansättning, vilket kan påverka mätningen.  |
| <b>Mjuk PVC (exempelvis uppblåsbara</b> | Liksom för övrig plast kan det vara värt att se om det är skillnad mellan mjuk plast och hård plast.   |

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

|  |  |
|--|--|
| <p><b>badleksaker,<br/>plastgolv)</b></p>  |  |
| <p><b>Svart plast</b></p>  | <p>Svart plast är ett välkänt problem inom kommersiell plastsortering. En del pigmenten som används både i svarta men även mörka förpackningar, exempelvis kimrök, medför att NIR-läsarna inte kan identifiera materialet (NPA, u.å.). Då samma teknik används för att identifiera platen i FossilEye anses denna fraktion vara av intresse att testa. Detta för att fastställa om mätsystemet identifierar svart plast likt annan kommersiell teknologi.</p>  |
| <p><b>Flexibla multilaminat förpackningar (exempelvis förpackningar som används för kaffe, ost, bacon eller snacks som nötter och chips)</b></p> | <p>Flexibla multilaminat avser förpackningar med en flerskiktade filmstrukturer med olika polymerer i de separata skikten. Flerskiktade flexibla multilaminat finns i ett stort antal kombinationer med olika tjocklekar, antal skikt och barriärmaterial vilket används för komplexa förpackningar som används för till exempel kaffe, olika mejeriprodukter och snacks. De olika skikten avser att ge önskvärda egenskaper som effektiva barriärfunktioner och slitstyrka. Vid etablerade kommersiella plastsorteringsanläggningar har dessa identifierats som problematiska vid sorteringen av plastförpackningar (NPA, u.å.) vilket gör att fraktionen är av intresse att testa i detta projekt. Förpackningarna bör identifieras som plast av ett avfallsskannande mätsystem.</p> |
| <p><b>Textil, huvudsakligen syntetisk textil</b></p>   | <p>Idag finns stora mängder syntetiska fibrer på marknaden, exempelvis polyester och polyamid. Syntetisk textil tas fram, likt fossilbaserad plast, från olja. Under 2021 stod polyester för 54 % av den totala marknadsandelen globalt (Dahlbom m.fl., 2023). En betydande del av den textil som hamnar i avfallsförbränningen kan därmed antas vara syntetiska. Detta bidrar till ett behov att potentiellt</p>  |

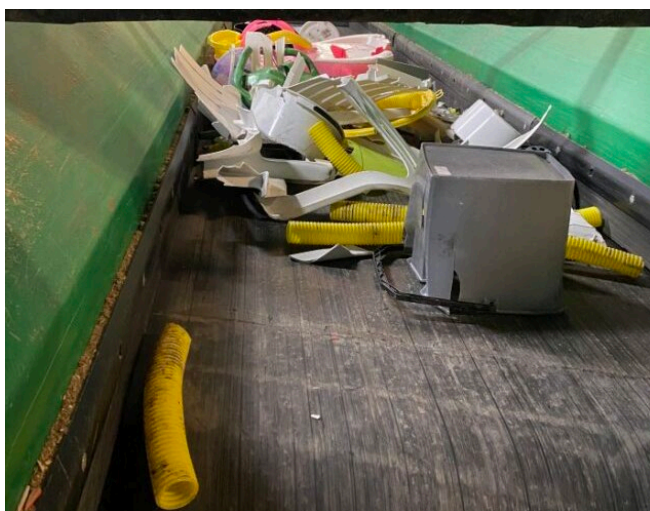
**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025

|  |  |
|--|--|
|  | inkludera textil som en källa till plast vid mätningar av ett avfallsskannande mätsystem.  |
| <b>Fiberkomposit</b>                                       | Glasfiber eller kolfiber inkaplat i ett plastmaterial, oftast hårdplast, är material som är svåra att återvinna. Hårdplasten går inte att smälta ner så som de vanliga termoplasterna gör. Sammansättningen gör att det inte är endast plast eller fossilt material, men det bör till viss grad inkluderas som plast vid mätningar av ett avfallsskannande mätsystem.  |
| <b>Skumplast (exempelvis frigolit och möbelstoppning)</b>  | Skumplast kan exempelvis vara frigolit, bestående av expanderad polystyren (XPS, EPS), eller skum av polyuretan (PUR) som exempelvis kan hittas i möbelstoppning och tvättsvampar. Även andra typer av polymerer kan bilda skumplast. En gemensam egenskap för alla dessa plaster är att de har stor volym och låg vikt, alltså låg densitet, vilket gör dem extra relevanta att testa med ett avfallsskannande mätsystem som mäter volymen på plastobjekt för att skatta den totala vikten plast. |
| <b>Icke-plast (i princip sådant som inte listats ovan)</b> | Ett avfallsskannande mätsystem bör vara tillförlitligt även vid tester av material som ej bör klassas som plast. Genom att testa mätsystem för dess klassificering av monofraktioner av 'icke plast' kan noggrannheten och eventuella brister utvärderas.  |

## Bilaga II: Bilder av monofraktioner testade vid Tekniska Verken

---

Nedan presenteras bilder på några av de monofraktioner som testades vid Tekniska Verken under november 2023. Bilderna togs av anställda vid Tekniska Verken i samband med testerna som presenteras i kapitel 3.2.1.1.



Figur 21: Bild av hårdplast från hushåll som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.



Figur 22: Bild av mjukplast från industri som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.



**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



*Figur 23: Bild av mjukplast från hushåll som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.*



*Figur 24: Bild av mjuk PVC som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.*

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



Figur 25: Bild av svart hårdplast som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.



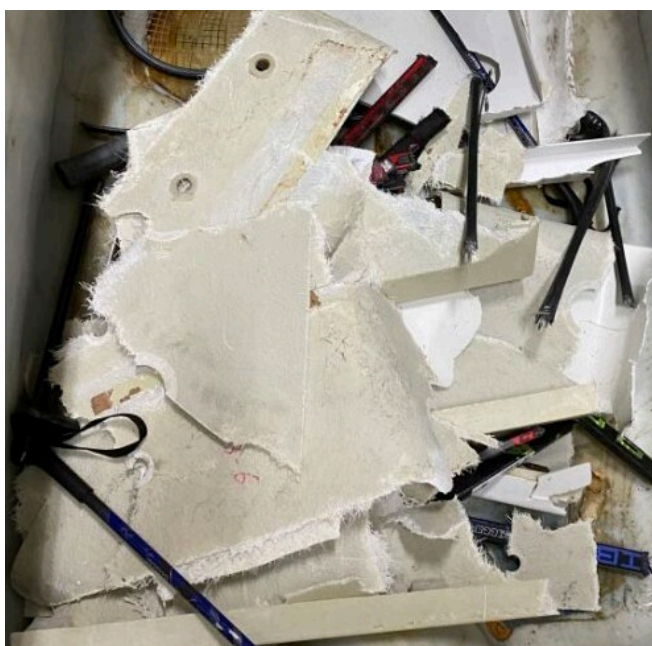
Figur 26: Bild av multilaminatförpackningar från hushåll som sorterats ut från avfall från ÅVC i Linköping.



**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



*Figur 27: Bild av textil som samlats in vid ÅVC i Linköping.*



*Figur 28: Bild av hårdplast och fiberkomposit som sorteras ut vid ÅVC i Linköping.*

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



Figur 29: Bild av kartong som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.



Figur 30: Bild på keramik som sorterats ut vid ÅVC i Linköping.

## Bilaga III: Beräkningsmetod för avfallssammansättning baserat på dedikerad förbränning

Efter den dedikerade förbränning som beskrivs i mer detalj i avsnitt 3.2.1.6 kunde avfallssammansättningen beräknas utifrån rökgasanalysen och olika antaganden om bränslet. Då inte all information fanns tillgängligt för det specifika tillfället krävdes det ett flertal antaganden, vilka också beskrivs i avsnitt 3.2.1.6.

Beräkningen utgick från 100 kg CO<sub>2</sub> i rökgaserna och försökte ge en uppskattning av vad som behövde komma med i bränslet för att skapa de rökgaser som hade analyserats, utifrån kända parametrar och de antaganden som listades här ovan. Bränslesammansättningen beräknades som fyra separata delar; plast, biomassa, fukt och aska. Plasten och biomassan antas alltså vara fria från både aska och fukt (det som kallas TAS), då askan och fukten beräknas som separata delar.

$$m_{\text{bränsle}} = m_{\text{plast}} + m_{\text{bio}} + m_{\text{fukt}} + m_{\text{aska}} \quad (1)$$

Som första steg beräknades mängden (massan) fossil CO<sub>2</sub> ( $m_{\text{fossilCO}_2}$ ) och mängden biogen CO<sub>2</sub> ( $m_{\text{bioCO}_2}$ ) utifrån analysen av halten kol-14 i rökgaserna. Den totala massan av CO<sub>2</sub> ( $m_{\text{CO}_2}$ ) sattes, som sagt, till 100 kg. De båda koncentrationerna  $c_{\text{bioCO}_2}$  och  $c_{\text{fossilCO}_2}$  var kända parametrar från de fyra rökgasproverna.

$$m_{\text{fossilCO}_2} = m_{\text{CO}_2} \cdot c_{\text{fossilCO}_2} \quad (2)$$

$$m_{\text{bioCO}_2} = m_{\text{CO}_2} \cdot c_{\text{bioCO}_2} \quad (3)$$

Mängden plast ( $m_{\text{plast}}$ ) och biomassa ( $m_{\text{bio}}$ ) kunde beräknas utifrån kolhalten i respektive material ( $c_{\text{plastC}}$  och  $c_{\text{bioC}}$  enligt antaganden ovan). De beräknade mängderna fossil och biogen CO<sub>2</sub> från ekvationerna (2) och (3) samt atommassan för kol ( $M_C$ ) och molmassan för CO<sub>2</sub> ( $M_{\text{CO}_2}$ ) användes också.

$$m_{\text{plast}} = \frac{m_{\text{fossilCO}_2} \cdot M_C}{c_{\text{plastC}} \cdot M_{\text{CO}_2}} \quad (4)$$

$$m_{\text{bio}} = \frac{m_{\text{bioCO}_2} \cdot M_C}{c_{\text{bioC}} \cdot M_{\text{CO}_2}} \quad (5)$$



För den mixade plasten (antaget mittenvärde för plasttyp) användes en tidigare kartläggning av vilka plasttyper som går till förbränning, illustrerat i Figur 2. Vid beräkningen av halten kol ( $c_{plastC}$ ) och halten väte ( $c_{plastH}$ ) i plasterna användes den kemiska sammansättningen av respektive polymertyp (vilket var enbart PET för det värde som ansattes som "lågt" samt PE och PP för det värde som ansattes som "högt"). För att få ihop beräkningarna för den mixade plasten var några ytterligare antaganden tvungna att göras, vilket bland annat innebar att fraktionen övrig/okänd plast antogs vara en mix av PE och PP. Andra antaganden om plasternas kemiska sammansättning inkluderade bland annat att de polymertyper eller tillsatser som kan finnas i flera varianter (PUR, PA, PC, syntetgummi, fillers och antioxidanter) antogs vara endast ett exempel på varje sådan polymer eller tillsats. Exempelvis kan PA bland annat hittas som flera sorters nylon eller aramid, där halten kol och väte varierar beroende på variant. För enkelhets skull har all PA antagits vara nylon 6 (PA 6), med 64 % kol och 10 % väte. Liknande antaganden har gjorts med övriga polymerer.

För biomassan kunde halten kol ( $c_{bioC}$ ) och halten väte ( $c_{bioH}$ ) beräknas från kemiska analyser av tre olika biobränslen. Alla analyser har utförts av externa laboratorier men de är inte nödvändigtvis relaterade till det här projektet och det avfall som testats i FossilEye. Dessa tre bränslen är endast exempel på hur kol- och vätehalten kan variera i biobränslen. För att få fram kol- och vätehalten för ett torrt och askfritt bränsle var det tvunget att räkna om de kemiska analyserna så att de inte inkluderade någon fukt eller aska. I den här beräkningen antogs att klor och svavel inte hade inkluderats i den askhalt som angavs i protokollen från analyserna, då klor, svavel och aska redovisades som separata parametrar i protokollen. Dessa grundämnen räknades bort från bränslesammansättningen då de troligtvis kommer fångas in som någon form av aska om de förbränns i en avfallsförbränning och borde således inkluderas i askfraktionen som benämns  $m_{aska}$  i ekvation (1).

Den totala mängden fukt i rökgaserna ( $m_{H_2O}$ ) beräknades utifrån CO<sub>2</sub>-halten ( $c_{rökCO_2}$ ) och fukthalten ( $c_{rökH_2O}$ ) samt molmassan för CO<sub>2</sub> ( $M_{CO_2}$ ) respektive H<sub>2</sub>O ( $M_{H_2O}$ ).

$$m_{H_2O} = m_{CO_2} \cdot \frac{c_{rökH_2O} \cdot M_{H_2O}}{c_{rökCO_2} \cdot M_{CO_2}} \quad (6)$$

Den totala mängden fukt i rökgaserna ( $m_{H_2O}$ ) delades sedan upp på fem olika komponenter, beroende på dess ursprung; fukt från plast ( $m_{plastH_2O}$ ), fukt från biomassa ( $m_{bioH_2O}$ ), fukt från urea ( $m_{ureaH_2O}$ ), fukt från asksläckning ( $m_{askH_2O}$ ) och

fukt från fukthalten i bränslet ( $m_{fuktH_2O}$ ). De två första komponenterna beräknades utifrån de mängder av plast och biomassa som beräknades i ekvationerna (4) och (5) samt halten av väte i respektive material ( $c_{bioH}$  och  $c_{plastH}$  enligt de antaganden som sammanfattas i Tabell 4). Med i beräkningarna är också atommassan för väte ( $M_H$ ) och molmassan för  $H_2O$  ( $M_{H_2O}$ ).

$$m_{bioH_2O} = m_{bio} \cdot c_{bioH} \cdot \frac{M_{H_2O}}{2 \cdot M_H} \quad (7)$$

$$m_{plastH_2O} = m_{plast} \cdot c_{plastH} \cdot \frac{M_{H_2O}}{2 \cdot M_H} \quad (8)$$

Det saknades uppgift om hur mycket urea som hade sprutats in i pannan under försöket. Mängden fukt från ureainsprutningen fick därför beräknas utifrån uppgift om att det i snitt används ca 400 liter urealösning per timme, där lösningen består till 10–15 % av urea och resten vatten, vilket i beräkningen antogs vara 12,5 %. I själva verket varierar ureainsprutningen över tid beroende på flera faktorer, bland annat bränslesammansättningen, men det är dock den bästa uppskattning som finns tillgänglig i det här försöket. Med en ungefärlig densitet på 1,03 g/cm<sup>3</sup> för lösningen motsvarar volymen 400 liter en vikt på 412 kg. Utifrån lösningens kemiska sammansättning fås då fram att det i så fall produceras 391 kg  $H_2O$  från urealösningen varje timme. För att få fram vad det motsvarar för 100 kg producerad  $CO_2$  i rökgaserna kan det sättas i relation till hur mycket bränsle som går åt per timme. Hastigheten på bränsleinmatningen varierar också över tid men kunde approximeras utifrån pannans effekt (32 MW) och ett antagande om att bränslet har ett värmevärde på 25 MJ/kg baserat på TAS, torrt askfritt bränsle. Som jämförelse hade de biobränslen som det fanns data för ett genomsnittligt värmevärde på ca 21 MJ/kg TAS. Plasten har dock ett högre värmevärde på omkring 30–40 MJ/kg. Ett antaget värde på 25 MJ/kg motsvarar då ungefär två tredjedelar biobränsle, baserat på TAS, vilket ungefär motsvarar de halter biogent  $CO_2$  som kol-14 mätningen gav (om även halten kol i bränslet tas i beaktande). Utifrån effekten på pannan och antagandet om värmevärdet på TAS bränsle gick det att beräkna fram en bränsleförbrukning (TAS) på ca 4600 kg/h. Det innebär att fuktmängden som producerades från ureainsprutningen var ca 0,085 kg  $H_2O$  per kg TAS bränsle, vilket benämns som  $r_{ureaH_2O}$  i beräkningen nedan. Då beräkningen för mängden fukt från urea per kg bränsle är fylld av osäkerheter har vi lagt in en osäkerhetsfaktor  $u_{extraH_2O}$  som säger att det skulle kunna vara som mest dubbelt så mycket eller som minst hälften så mycket, där  $u_{extraH_2O}$  alltså är sista raden i Tabell 4. Med dessa beräkningar kunde mängden fukt från urea beräknas enligt följande.

$$m_{ureaH_2O} = r_{ureaH_2O} \cdot (m_{bio} + m_{plast}) \cdot u_{extraH_2O} \quad (9)$$

Ytterligare fukt tillfördes rökgaserna från det att bottenaskan (som även kallas slagg) släcks, vilket sker i ett vattenbad under rostern. Här blir det lite besvärligt då fukten från asksläckningen alltså beror på hur mycket aska som ska släckas, men mängden aska som ska släckas beror både på askhalten i bränslet (antagande enligt Tabell 4) och mängden bränsle som har tillförts. Mängden tillfört bränsle som beräknas i ekvation (1) kommer bland annat att vara beroende av vilken fukthalt som bränslet har, vilket i sin tur kan beräknas utifrån mängden fukt i rökgaserna och mängden fukt från olika komponenter enligt ekvation (11) lite längre ner, vilket bland annat inkluderar asksläckningen. Det ger alltså en rundgång i beräkningarna. Dessbättre är fuktmängden från asksläckningen relativt liten i förhållande till övriga bidrag vilket gör att det går att approximera exempelvis bränslemängden. Efter ett par iterationer av alla beräkningar framkommer det att, i normalfallet där alla antaganden är satta till "mitten", används i snitt 93 kg bränsle (inklusive fukt och aska) vid de fyra mätningarna för att producera de 100 kg CO<sub>2</sub> i rökgaserna som var utgångspunkten för beräkningarna. Dessa 93 kg bränsle benämns som  $m_{snittbränsle}$  i ekvationen nedan. Halten slagg i bränslet benämns som  $c_{slag}$  som är ett antagande från Tabell 4. Den energi som krävs för att omvandla vatten till ånga, vid en konstant temperatur, kallas för ångbildningsvärmens och benämns här som  $H_{vap}$  och ansätts som 2257 kJ/kg. Det antas att askan har en temperatur på 500°C när den träffar vattnet och att askans temperatur sänks till 100°C i vattenbadet, vilket medför en temperaturförändring  $\Delta T_{aska}$  på 400°C (eller 400 K). Askans värmekapacitet  $c_p$  ansätts som 0,85 kJ/(kg·K). Även här tas det med en osäkerhetsfaktor i beräkningen  $u_{extraH_2O}$  som alltså varierar ihop med ureaberäkningen. Mängden fukt från asksläckningen beräknades sedan enligt följande.

$$m_{askH_2O} = m_{snittbränsle} \cdot c_{slag} \cdot \frac{c_p \cdot \Delta T_{aska}}{H_{vap}} \cdot u_{extraH_2O} \quad (10)$$

Mängden fukt som tillfördes förbränningen genom fukt i bränslet beräknades genom att dra ifrån all fukt som bildas inne i pannan ( $m_{bioH_2O}$ ,  $m_{plastH_2O}$ ,  $m_{ureaH_2O}$  och  $m_{askH_2O}$ ) från den fukt som uppmättes i rökgaserna ( $m_{H_2O}$ ).

$$m_{fuktH_2O} = m_{H_2O} - m_{bioH_2O} - m_{plastH_2O} - m_{ureaH_2O} - m_{askH_2O} \quad (11)$$

I och med detta är tre av bränslets fyra komponenter beräknade. Den sista komponenten är askan, bestående av slagg och flygaska. Enligt Tabell 4 har det antagits ett värde för halten slagg ( $c_{slag}$ ) och ett värde för halten flygaska ( $c_{flygaska}$ ) i bränslet. Den totala mängden aska i bränslet beräknas enligt följande.



**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**

Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling

Mars 2025

$$m_{aska} = (m_{bio} + m_{plast} + m_{fuktH_2O}) \cdot \frac{(c_{slag} + c_{flygaska})}{(1 - c_{slag} - c_{flygaska})} \quad (12)$$

Beräkningen av bränslesammansättning utifrån den dedikerade förbränningen jämfördes med mätvärdena från FossilEye av samma material. Det antogs att sammansättningen inte förändrats mellan FossilEye-mätningen och den dedikerade förbränningen.

## Bilaga IV: Sammanställning av resultat från plockanalyser

I Tabell 8 presenteras en sammanställning av resultatet från plockanalyserna som genomfördes av en extern aktör. Sammanlagt var det prov från sju olika avfallsleveranser som skickades till plockanalys efter att de hade testats i FossilEye vid Vattenfall Värme i Uppsala.

Tabell 8: Sammanställning av resultat från plockanalyser av prover från sju avfallsleveranser vid Vattenfall Värme i Uppsala.

| Prov   | Plast, gummi, kg | Plast, gummi, vikt-% | El-avfall kg | El-avfall, vikt-% | Farligt avfall kg | Farligt avfall, vikt-% | Allt annat, kg | Allt annat, vikt-% | Totalt, kg |
|--------|------------------|----------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------------|----------------|--------------------|------------|
| Prov 1 | 69,8             | 14,9                 | 1,04         | 0,2               | 0,14              | 0,03                   | 396,8          | 84,8               | 467,8      |
| Prov 2 | 95               | 17,2                 | 1,3          | 0,2               | 0,11              | 0,02                   | 455,2          | 82,5               | 551,6      |
| Prov 3 | 328,2            | 52,4                 | 23,2         | 3,7               | 0                 | 0,00                   | 274,9          | 43,9               | 626,4      |
| Prov 4 | 103,8            | 18,1                 | 0,3          | 0,1               | 0                 | 0,00                   | 470,5          | 81,9               | 574,5      |
| Prov 5 | 187              | 28,6                 | 0,9          | 0,1               | 0                 | 0,00                   | 466,2          | 71,3               | 654,1      |
| Prov 6 | 94,2             | 18,4                 | 0,1          | 0,02              | 0                 | 0,00                   | 417,4          | 81,6               | 511,7      |
| Prov 7 | 81,9             | 15,8                 | 0,9          | 0,2               | 0,12              | 0,02                   | 436,2          | 84,0               | 519,1      |

## Bilaga V: Bilder av de fraktioner som skickats för plockanalys vid Vattenfall Värme i Uppsala

---



*Figur 31: Bild på prov 1 (eftersorterat restavfall) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*

**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



*Figur 32: Bild på prov 2 (eftersorterat restavfall) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



*Figur 33: Bild på prov 3 (SLF SWE) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



*Figur 34: Bild på prov 4 (shredded fraction) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



*Figur 35: Bild på prov 5 (försortat industri och verksamhetsavfall) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



**METOD FÖR VERIFIERING AV AVFALLSSKANNANDE SYSTEM**  
Med en inblick i hur FossilEye fungerade under dess utveckling  
Mars 2025



*Figur 36: Bild på prov 6 (ÅVC och industri) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



*Figur 37: Bild på prov 7 (eftersorterat restavfall) som senare skickats till en extern aktör för plockanalys från Vattenfall Värme i Uppsala.*



**STOCKHOLM**

Box 21060, 100 31 Stockholm

**GÖTEBORG**

Box 53021, 400 14 Göteborg

**MALMÖ**

Nordenskiöldsgatan 24  
211 19 Malmö

**KRISTINEBERG**

**(Center för marin forskning  
och innovation)**

Kristineberg 566  
451 78 Fiskebäckskil

**SKELLEFTEÅ**

Kanalgatan 59  
931 32 Skellefteå

**BEIJING, CHINA**

Room 612A  
InterChina Commercial Building No.33  
Dengshikou Dajie  
Dongcheng District  
Beijing 100006  
China

© IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB | Tel: 010-788 65 00 | [www.ivl.se](http://www.ivl.se)