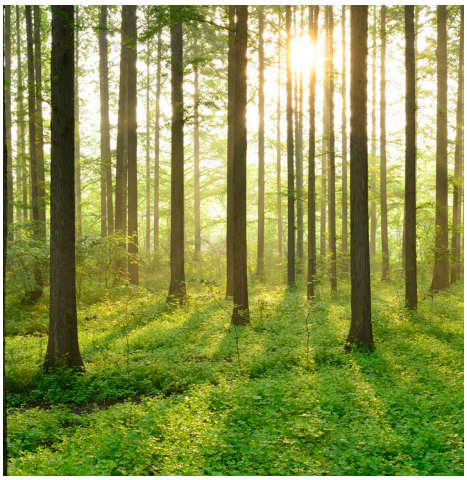
UTVECKLING AV TESTMETOD FÖR SLAGGRUS FÖR FAROKLASSIFICERING AV EKOTOXISKA EGENSKAPER – HP14

RAPPORT 2022:885



ASKPROGRAMMET

Energiforsk

Utveckling av testmetod för slaggrus för faroklassificering av ekotoxiska egenskaper – HP14

MARGARETA WAHLSTRÖM, CHARLOTTA TIBERG,
KARIN KARLFELDT FEDJE, TUOMO MÄKELÄ,
JOHANNES KIKUCHI, AMIR SAEID MOHAMMADI

ISBN 978-91-7673-885-6 | © Energiforsk september 2022 | Omslagsfoto: SYSAV Utveckling AB

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Klassificeringen av avfall påverkar avsevärt behandlingen och användningen av bottenaska från energiåtervinning. För askor är särskilt den farliga egenskapen för ekotoxicitet (HP14) utmanande och en kritisk egenskap för klassificeringen. Bristen på testmetoder för HP14 skapar dock utmaningar.

Utvecklingen av en testmetod för bottenaska baserad på T/D-protokollet i EUs kemikalielagstiftning har tidigare studerats och visat sig olämplig för bottenaskor (Wahlström et al, 2019; Hälldal et al, 2019). Det visade sig bland annat att askans heterogenitet och alkaliska egenskaper orsakade utmaningar och att det fanns ett behov av vägledning vid testning.

Projektets syfte har varit att utveckla och ge specifika rekommendationer för ett robust klassificeringsförfarande för bedömning av HP14 med fokus på bottenaska från energiåtervinning. Utveckling har skett av ett testförfarande som följer avfallslagstiftningen och de delar med hänvisning till kemikalielagstiftningen. Denna procedur har noggrant utvärderas för t.ex. robusthet vid justering av parametrar. Rapporten innehåller även rekommendationer för tolkning av testresultat.

Projektet koordinerades av VTT Ltd i Finland. I projektgruppen ingick följande personer:

Margareta Wahlström, VTT, Finland (projektledare)
Charlotta Tiberg, Sveriges Geotekniska Institut
Karin Karlfeldt Fedje, Renova och Chalmers Tekniska Högskola
Tuomo Mäkelä, VTT, Finland
Johannes Kikuchi, Sveriges Geotekniska Institut
Amir Saeid Mohammadi, Chalmers Tekniska Högskola

Projektet har finansierats av Avfall Sverige, Energiforsks askprogram, Finnish Environmental Pool, AFATEK (DK), Avfall Norge, flertalet anläggningsägare in Sverige och Finland samt Nordiska Ministerrådet/Kemikaliegruppen.

Sammanfattning

Vid klassificering av farligt avfall, särskilt faroegenskapen ”Ekotoxisk” (HP14), saknas en tydlig vägledning för hur testningen av akvatisk toxicitet ska utföras. Eftersom avfallsklassificeringen är gjord för att överensstämma med förordningen om klassificering, märkning och förpackning (CLP-förordningen) är ett alternativ att använda den testmetod som kallas ”Transformation/Dissolution protocol” (T/Dp) dvs “transformering/upplösning protokollet”. Denna metod omnämns i europeiska kemikaliemyndigheternas (ECHAs) vägledning för CLP, som ett sätt att bestämma faroklassningen för vattenlevande organismer dvs ekotoxicitet, och bygger på att materialet som ska klassas lakas i mycket stora mängder vatten för att få kunskap om hur mycket metaller som frigörs. Denna faroklassning ligger som grund för klassning av avfall för faroegenskapen HP14. Den potentiella utlakningen av andra ämnen (t.ex. organiska föroreningar) beaktas inte här, eftersom endast metaller har ansetts vara kritiskt för slaggrus, vilket är det material som denna rapport fokuserar på.

Syftet med denna studie var att bedöma tillämpbarheten av T/Dp för HP14-klassning av metallseparerade och åldrade bottenaskor från avfallsförbränning, s.k. slaggrus, samt att ge specifikationer/kompletterande rekommendationer för ett robust klassificeringsförfarande, som kan användas för bedömning av ekotoxiska egenskaper hos slaggrus.

Inledningsvis genomfördes en litteraturstudie för att för slaggrus identifiera kritiska testparametrar i T/Dp och bedöma behoven av att precisera och modifiera dessa. En viktig del av arbetet var att utreda hur tolkningen av testresultaten för avfallsklassificering ska göras. För en bedömning av akvatisk toxicitet för klassning av slaggrus behövs uppgifter om hur höga metallhalter som detekteras i en lösning efter en 28 dagars lång testning, där en liten provmängd på 1 mg testmaterial (dvs slaggrus) har varit i kontakt med 1 liter testlösning (dvs dosen 1 mg/L). De frigjorda metallhalterna jämförs med det kroniska ekotoxikologiska referensvärdet (ERV) för respektive metall och för de individuella metallerna räknas ett s.k. TU (toxic unit)-värde ut. TU-värdet definieras som utlakad metallkoncentration dividerat med respektive ERV. För bedömningen av HP14-egenskapen behöver även den sammanlagda effekten av alla metaller beaktas, varför de individuella TU-värdena summeras till ett TU-index. Om TU-index är <1 klassificeras det testade avfallet som icke farligt avfall enligt HP14.

Studiens experimentella arbete fokuserade speciellt på systemet för kontroll av pH och valet av kornstorlek på askproven. Baserat på tidigare forskning och de inom projektet utförda försöken föreslås det att testet utförs vid ett mål-pH på 6 genom att använda den buffertlösning som anges i T/Dp samt tillsätta koldioxid till testkärlet vid givna tidpunkter. Askproven, som används för testningen mals ner till en partikelstorlek som är <1mm. Den modifierade metoden föreslås utföras med dosen 100 mg/L eftersom testning av slaggrus med mindre provmängd inte ger tillförlitliga resultat bl.a på grund av heterogeniteten hos slaggrus. För en klassificering av HP14-egenskaper krävs dock uppgifter av frigjorda halter vid dosen 1 mg/L. Därför föreslås för askor att testet utförs med dosen 100 mg/L och

att testresultaten från 100 mg/L extrapoleras till 1 mg/L genom att tillämpa utspädningsfaktorn 100 följt av multiplikation med en säkerhetsfaktor på 5, för att nå en beräknad koncentration för 1 mg/L. Säkerhetsfaktorn används för att säkerställa att metallutlakningen inte underskattas. Den föreslagna säkerhetsfaktorns värde baseras på tillgänglig information och det rekommenderas att denna faktor studeras närmare när mer erfarenhet och bakgrundsinformation finns tillgänglig.

I studien testades nio nordiska slaggrus med den modifierade T/Dp-metoden för en bedömning av ekotoxiska egenskaper hos slaggrus. Alla nio askorna klassificerades som icke farligt avfall med avseende på HP14 enligt resultaten från den modifierade metoden. Ytterligare validering av metoden, där samma provmaterial korstestas i flera laboratorier är önskvärd. Därtill föreslås ytterligare specificeringar för vissa parametrar, t.ex. tidsintervall för koldioxidtillsats, i ett uppföljande projekt. Metoden är i nuläget enbart utvecklad för testning av slaggrus.

Denna rapport är en förkortad version av den fullständiga projektrapporten, som är publicerad inom TemaNord, Nordiska Ministerrådet och fritt tillgänglig för nedladdning (https://pub.norden.org/temanord2022-525/_). För mer detaljerade förklaringar och analyser, som har lett fram till den föreslagna modifierade metoden, hänvisas därför till rapporten TemaNord 2022:525.

Nyckelord

Ekotoxisk, farligt avfall, faroegenskaper, avfallsklassificering, slaggrus

Summary

In the hazardous waste classification, especially the hazard property "Ecotoxic" (HP14), there is a lack of clear guidance on how to perform the testing. As the waste classification is made to align with the chemicals regulation (CLP regulation), an option is to use the test method called Transformation/Dissolution protocol (T/Dp), which is referred to in the ECHA´s (European Chemicals Agency) guidance document for the regulation on classification, labelling and packaging for the determination of the aquatic hazard class. This study aimed to assess the applicability of the T/Dp and to give specifications or complementary recommendations for a robust classification procedure for sorted and aged bottom ash from waste-to-energy incineration based on testing principles presented in the T/Dp for the assessment of HP14.

A literature study was conducted on critical test parameters and the adaptation needs for ashes were assessed. Here also an important part of the work was the approach to the interpretation of test results for waste classification. According to the CLP regulation, for the assessment of the HP14 property, the concentrations of key metals in the test solution with the smallest load of 1 mg/L (28-day testing) need to be compared to the ecotoxicological chronic reference values (ERV) and for the final classification, an additive toxic unit value is to be calculated. If the toxic unit value does not exceed value 1, the tested waste is not classified as hazardous for the aquatic environment. In the experimental work, especially the pH management system and the selection of the grain size were studied with a focus on the ash characteristics. A decision was taken that the adapted method must be based on using the load of 100 mg/L as the testing of bottom ash cannot be conducted with the lowest load (1 mg/L) due to waste heterogeneity. For the classification of the HP14 property, the results from the adapted test method are extrapolated to the load 1 mg/L using a safety factor (besides using a dilution factor of 100 for the test performed at load 100 mg/L instead of 1 mg/L). A safety factor is proposed based on available information and this factor is recommended to be validated when more experience and background information is available. For now, a safety factor of 5 or 10 is suggested.

In this study, nine Nordic aged and metal sorted bottom ashes were tested with the adapted T/Dp for ecotoxicity properties for hazardous waste classification. All nine ashes were classified as non-hazardous for the HP14 property using the modified method and the proposed safety factor. The project was initiated by Avfall Sverige and co-financed by stakeholders in the Nordic countries Consultation and dissemination of the adapted method were performed with funding from the Nordic Working Group for Chemicals, Environment and Health (NKE) under the Nordic Council of Ministers. These detailed results of the study have been reported in the TemaNord report 2020:525 published by the Nordic Council of Minister. This report is a summary of the results.

Innehåll

1 Introduktion 8

1.1 Bakgrund 8

1.2 Syfte 9

1.3 Utmaningar med testning av askor 9

1.4 Avgränsningar 10

2 Principen i T/D-protokollet och modifieringsbehov för slaggrus 11

2.1 Principen i T/DP 11

2.2 Tu index vid utvärdering av resultaten från T/Dp 11

3 Tillvägagångssätt vid klassning enligt HP14 14

4 Utvärdering av kritiska testparametrar i T/Dp 16

4.1 Partikelstorlek 16

4.2 Justering av ph i testlösningarna 16

4.3 Extrapolering av resultat från 100 mg/l i 28-dagarstest 18

5 Utvärdering av 9 nordiska askor 20

5.1 Material och metod 20

5.2 Karaktärisering av askprover 20

5.3 Utvärdering av testresultaten 21

5.3.1 Steg 1: Teoretisk beräkning från totalhalter 21

5.3.2 Steg2: Testning enligt modifierat T/Dp 21

5.3.3 Erfarenheter från testningen 23

6 Slutsatser och förslag på fortsatt arbete 24

6.1 Övergripande slutsatser 24

6.2 Förslag till modifierad testmetod 25

6.2.1 Applikationsområdet för den modifierade T/Dp-metoden 25

6.2.2 Testförhållanden och extrapolering av resultateten från dosen 100 mg/L till 1 mg/L 25

6.3 Nästa steg 27

7 Referenser 28

Bilaga A: Chemical composition of ash samples (replicate analysis) 29

Bilaga B: Adapted T/Dp – method description 34

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Avfallsklassificeringen påverkar i hög grad hela hanterings- och återvinningskedjan av avfall. Ett flertal EU-förordningar ställer särskilda krav på avfall som definieras som farligt avfall. Klassificering av avfall som farligt kan skapa begränsningar kring t.ex. mål för resurseffektivitet (inklusive den cirkulära ekonomin), då hanteringen av farligt avfall är mer komplex än för icke farligt avfall.

Klassificeringen av avfall som icke farligt eller farligt regleras inom ramdirektivet för avfall (Waste Framework Directive) och klassificeringen baseras i första hand på den europeiska avfallslistan (2014/955/EU). I de flesta fall finns en avfallskod som passar för det specifika avfallet, men i andra fall måste avfallet klassas antingen som farligt eller icke farligt beroende på avfallets specifika egenskaper. I dessa fall sker bedömningen av den korrekta klassificeringen utifrån avfallets farliga egenskaper (hazard property – HP1-15) baserat på samtliga 15 farliga egenskaper. Klassningen kan göras både genom beräkningar och tester, där resultat från tester väger tyngre än beräkningar. Både europeiska och nordiska vägledningsdokument om klassificering av farligt avfall har sammanställts, men för den akvatiska toxiciteten (HP14-egenskapen) saknas det tydlig vägledning för hur tester ska utföras och bedömas.

Eftersom avfallsklassificeringen har anpassats till kemikalieförordningen (CLP-förordningen) är ett alternativ för testning av akvatisk toxicitet att använda den testmetoden (dvs. Transformation/Dissolution protocol (T/Dp) eller "Transformering/upplösning protokollet") som omnämns i europeiska kemikaliemyndighetens (European Chemicals Agency - ECHA) vägledningsdokument för förordningen om klassificering, märkning och förpackning för bestämning av faroklassen för vattenlevande organismer (HP14). Projekt om T/Dp för bedömning av faroegenskapen HP14 har tidigare utförts både i Sverige (Hälldahl et al, 2019) och Finland (Wahlström et al, 2019). Baserat på erfarenheterna från tidigare studier fokuserade detta projekt på att utveckla en testmetod för HP14, som är lämplig för slaggrus, samt att ge vägledning över hur resultaten ska tolkas.

Denna rapport är en förkortad version av en mer omfattande TemaNord-publikation (TemaNord 2022: 525[1]). Fokus i denna rapport ligger på resultaten för de testade askorna och vad det betyder för klassningen av askor. I TemaNord-publikationen ges förutom mer detaljerade förklaringar om olika testparametrar även information om klassificeringsförfarandet av kemikalier, som ligger till grund för den modifierade metoden som har utvecklats inom ramen för detta projekt.

[1] https://pub.norden.org/temanord2022-525/

1.2 SYFTE

Det övergripande syftet med projektet var att utveckla och ge specifikationer/ kompletterande rekommendationer för ett robust klassificeringsförfarande för slaggrus baserat på testprinciper föreslagna i CLP för bedömning av HP14 dvs T/Dp. I arbetet ingick även att ge rekommendationer för tolkning av testresultaten.

Specifikt var syftet att föreslå anpassningar av T/Dp så att det kan användas för HP14-klassificering av åldrad (karbonatiserad) och metallsorterad bottenaska från avfallsförbränning, dvs slaggrus, och så att testet kan utföras på laboratorier med god laboratoriepraxis. Dessutom var syftet att ge input till diskussioner på EU-nivå om lämpligheten av att använda T/Dp som en testmetod för askor.

1.3 UTMANINGAR MED TESTNING AV ASKOR

T/Dp-metoden för bedömning av akvatisk toxicitet har utvecklats för kemikalier, som vanligtvis har en välkänd och homogen sammansättning, vilket gör det lämpligt att använda T/Dp för testning. Aska har däremot flera egenskaper som gör det svårt att få reproducerbara resultat t.ex. att den har olika partikelstorlekar med varierande sammansättning och buffrande egenskaper (alkaliskt pH). För en fullständig klassning ska testerna utföras vid olika doser (1, 10 och 100 mg/L), men för att kunna utesluta en klassificering som farligt avfall är endast den lägsta dosen (1 mg/L dvs 1 mg prov i 1 liter buffertlösning) relevant. Tidigare erfarenhet visar dock att det är mycket svårt att testa de lägsta doserna (1 och 10 mg) för slaggrus, bl.a. eftersom det ställer krav på ett mycket finmalet material för att få ett representativt prov (Hälldahl et al 2019, Wahlström et al 2019). Även om den större dosen, 100 mg/L, används är det en mycket liten massa som ska tas ut från ett slaggrusprov och särskild noggrannhet behövs vid provberedningen. Förutom partikelstorleken behöver även andra testparametrar i T/Dp ses över, t.ex. hur pH justeras, för att testet ska kunna utföras på ett laboratoriemässigt rimligt vis.

Följande observationer gjordes under litteraturstudien:

- Det finns endast en liten erfarenhet om testning av askor (slaggrus) med T/Dp.
- I litteraturen finns olika tolkningar om testförhållanden i T/Dp (t.ex. hur man hanterar pH vid testning av olika material).
- Information om testförhållanden, t.ex. partikelstorlek, storlek på testkärl och bakgrundskorrigering, rapporteras med olika detaljnivåer i litteraturen, men av de beskrivna testförhållandena framgår det tydligt att olika testförhållanden har använts.
- De europeiska laboratorier som utför tester tolkar inte resultaten, dvs själva klassningen görs separat.
- Testförhållanden för ett flertal nyckelparametrar så som pH och partikelstorlek beskrivs inte i T/Dp. Inte heller ges det någon bakgrund eller vägledning för olika val i testningen. Dessutom har erfarenheter och potentiella anpassningsbehov vid testning av olika material inte publicerats offentligt eller är svåråtkomliga.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Detta arbete har fokuserats på att utveckla en testmetod för bedömning av akvatisk toxicitet som kan användas för en HP14-klassificering av slaggrus[2]. Följaktligen saknar projektgruppen kunskap om huruvida den föreslagna metoden direkt kan tillämpas på andra avfallsströmmar, såsom andra askfraktioner från energiproduktion, organiskt avfall och metallurgiskt slam eller om justering av metoden krävs. Vid utvärdering av resultaten används en säkerhetsfaktor som baseras på en datakartläggning av publicerade T/Dp-resultat och ECHA-registreringsunderlag. Eftersom fokus i detta projekt låg på slaggrus, begränsades utvärderingen endast till metaller som var potentiellt kritiska i slaggrus. För andra material behövs ytterligare studier om kritiska metaller och en genomgång av testförhållanden (t.ex. val av kornstorlek, pH) göras.

Den beskrivna metoden tar endast hänsyn till att metaller frigörs från slaggruset. Den potentiella frigöringen av andra ämnen (t.ex. organiska föroreningar) i HP14-bedömningen beaktas inte här, eftersom endast metaller har ansetts vara kritiska för slaggrus.

I en slutlig klassning av aska som farligt eller icke farligt avfall ska även en utvärdering av övriga 14 HP-egenskaper ingå.

[2] slaggrus innehåller inte ozonnedbrytande ämnen och dessa behövs inte beaktas för HP14

2 Principen i T/D-protokollet och modifieringsbehov för slaggrus

2.1 PRINCIPEN I T/DP

Testning kan användas för klassificering av farligt avfall. Om en farlig egenskap hos avfall har bedömts i ett test, ska testresultaten gälla framför beräkningsformler med koncentrationsgränser (kommissionens beslut (2014/955/EU). För testning hänvisas till internationella metoder, bl.a. till metoder i den europeiska kemikalielagstiftningen (CLP). Enligt europeiska kemikaliemyndigheternas vägledning (ECHA 2017) för märkning av kemikalier presenteras T/Dp som en möjlig testmetod för faroegenskapen HP14. Principen med T/Dp (UN GHS 2019) är att bestämma hur mycket metaller som frigörs från ett testmaterial, då testmaterialet är i kontakt med en mycket stor vattenmängd (t.ex. ytvatten eller sjövatten). Testmaterialets ”inre” egenskaper anses därmed styra hur mycket metaller som frigörs. Testförhållandena (bl.a. pH, syrehalt och koldioxidhalt i testlösningen) simulerar en möjlig omvandling av metaller bundna i sulfider och oxider i testmaterialet till vattenlösliga former. I testet är det viktigt att materialet som ska undersökas inte förändras utan i möjligaste mån motsvarar det ursprungliga materialet, varför t.ex. kraftig malning för att få ner partikelstorleken inte rekommenderas.

Enligt T/Dp ska en liten mängd (1, 10 eller 100 mg/L) testmaterial t.ex. aska tillsättas en buffertlösning och efter en kontakttid på 7 eller 28 dagar analyseras de metallhalter som frigjorts från testmaterialet till testlösningen. Buffertlösning väljs utifrån det pH-värde som ger maximala halter i testlösningen inom angivet pH-område (pH område 6-8,5). I testet används ett CO2-gasflöde för att hålla testlösningens pH vid önskat pH-värde under testtiden. Provmängden (dosen i testet) och testtiden (7 eller 28 dagar) beror på huruvida akut eller kronisk toxicitet undersöks.

För slaggrus används en buffertlösning på pH 6, då de relevanta metallernas löslighet är högst vid detta pH-värde inom det angivna pH-intervallet. pH-värdet hålls under testtiden nära detta pH värde genom tillsats av 0,5 %-CO2-gas. Gas tillsätts enligt T/Dp antingen genom att tillföra ett CO2-flöde i det slutna testkärlets luftutrymme (headspace) eller genom att ett CO2-flöde bubblas genom testlösningen. Det ska dock noteras att om materialet har buffrande egenskaper (vilket gäller för slaggrus) ska pH-värdet inte tvingas till 6 t.ex. genom tillsats av högre koncentration på CO2-gasen.

2.2 TU INDEX VID UTVÄRDERING AV RESULTATEN FRÅN T/DP

De uppmätta halterna i testlösningen jämförs med så kallat ekotoxikologiska referensvärden (ERV), som finns angivna för vattenorganismer. Vid val av referensvärden används om möjligt värden som publicerats av ECHA (t.ex. i dokument från riskbedömningskommittén eller registrerade dossier-dokument för olika kemikalier; https://echa.europa.eu/home). Vidare ska ERV som motsvarar samma pH-miljö som där testet utförs användas. För att slaggrus inte skall tilldelas

en faroangivelse (och därmed inte klassas som farlig) bör metallhalten ($c_{Me,\ 28\ d}$) från 28-dagarstestet (dos 1 mg/L) underskrida det kroniska ekotoxikologiska värdet för respektive metall ($ERV_{Chronic\ Me}$).

Alla metaller som frigjorts ur askan i 28 dagarstestet och som är relevanta för klassningen ska beaktas vid utvärderingen. Därför används ett så kallat Toxic Unit (TU)-värde (Ekv. 1), där förhållandet mellan de uppmätta metallkoncentrationerna från T/Dp-testet och respektive kroniskt ERV jämförs. Därefter summeras de individuella TU-värdena till ett TU-index, vilket ger en indikation på de additiva effekterna från flera metaller (Ekv. 2):

Det individuella TU-värdet (TU*i*) för varje metall beräknas enligt följande:

För 28-dagarstestet resultat:

$$TUi = \frac{C_{Me,28d}}{ERV_{Chronic,Me}} \qquad \text{ekvation (1)}$$

Det summerande TU-indexet beräknas som summan av enskilda TU:

$$TU\ index = \sum_{i=1}^{n} TU_i \qquad \text{ekvation (2)}$$

Om TU-indexet >1 anses det testade materialet uppvisa akvatiska ekotoxiska egenskaper (dvs askan klassificeras som farligt avfall för HP14-egenskapen). Om summan av TU-värdena är <1 anses askan vara icke farligt avfall med avseende på HP14 egenskapen. I tabell 1 anges exempel på kroniska ERV för de mest kritiska metallerna i slaggrus. Ett exempel på hur TU-index beräknas anges i box 1.

Tabell 1. Kroniska ERV-värden för metaller som är relevanta för slaggrus.

	Kronisk ERV, µg/L	referens
Cr	6,5 (PNEC*)	ECHA dossier 2022 [3]
Cu	8,7 (pH 5,5-6,5)	ECHA dossier 2018 [4]
Ni	2,3	ECHA dossier 2022 [5]
Pb	1,7	ECHA dossier 2017 [6]
Zn	17	ECHA dossier 2015 [7]

*) PNEC = predicted no-effect concentration

Box 1. Exempel på beräkning av TU index.

	Metallhalt i testlösning efter 28 dagars T/Dp, µg/l	Individuella TU-värden (ekvation 1)	Summerad TU-index (ekvation 2)
Cr	0,2	0,03	0,8
Cu	1,4	0,16	
Ni	0,2	0,09	
Pb	0,2	0,12	
Zn	6,1	0,36	

[3] *ECHA dossier for Chromium (III) oxide: https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15477/6/2/1, ECHA dossier for Chromium: https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15551/6/1 (accessed 2022-02-09)*

[4] *ECHA 2018. Committee for Risk Assessment RAC Opinion proposing harmonized classification and labelling at EU level of Granulated copper. Adopted June 8, 2018. https://echa.europa.eu/documents/10162/a24da89e-b62f-a4f4-890b-d88f392c3ec8. Accessed 2018-11-26*

[5] *ECHA dossier for Nickel:* https://echa.europa.eu/fi/registration-dossier/-/registered-dossier/15544/6/1 (accessed *2022-02-09)*

[6] Chemicals Department Danish Environmental Protection Agency. 2017. CLH report - Proposal for Harmonized Classification and Labelling - Lead metal. ECHA. https://echa.europa.eu/documents/10162/64622b48-8e0b-edfa-df73-12c104ee894c Accessed 2018-11-26

[7] Committee for Risk Assessment. 2015. Opinion proposing harmonized classification and labelling at EU level of Silver zinc zeolite. Adopted 4 December 2015. ECHA Committee for Risk Assessment

3 Tillvägagångssätt vid klassning enligt HP14

Föreslaget tillvägagångssätt för klassning sammanfattas i Figur 1, på nästa sida. Totalhalterna utgör den övre gränsen för vad som kan frigöras från slaggruset. För en totalhaltsanalys rekommenderas mikrovågsugnsassisterad syraupplösning (EN 13656: 2020). De metaller som inte löses upp under dessa testförhållanden anses inte kunna frigöras i T/Dp-testet.

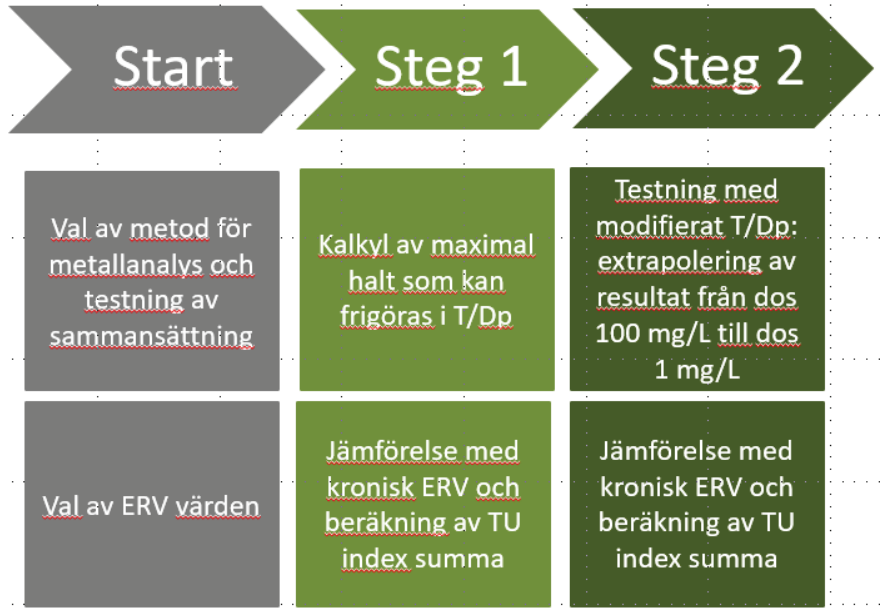
Totalhalterna i slaggruset kan räknas om till teoretiskt möjliga maxhalter i testlösningen vid dosen 1 mg/L genom att anta 100 % löslighet av respektive metall. För flera metaller ger en sådan beräkning låga koncentrationer, vilka ligger långt under de kroniska referensvärdena. Det första steget i en bedömning är därför att jämföra teoretiska maximala halter med ERV och därefter räkna ut TU-index (Steg 1). Box 2 visar ett exempel på en uträkning. I vissa fall kan denna uträkning visa att ingen testning behövs då metallhalterna i askan inte kan resultera i ett TU-index över 1.

Box 2. Exempel på beräkning av TU index på basen av totalhalt.

	Totalhalt, mg/kg	Teoretisk max. metallhalt i testlösningen med dos 1 mg/L (28 dagars T/Dp), µg/l*)	Individuella TU-värden (ekvation 2)	Summerad TU index (ekvation 1)
Cr	520	0,5	0,08	0,9
Cu	2400	2,4	0,28	
Ni	130	0,13	0,06	
Pb	470	0,5	0,28	
Zn	3300	3,3	0,19	

*) totalhalten räknas om till teoretisk maximal halt genom att beakta dosen 1 mg/L (motsvarar L/S 1 000 000).

Om TU-index överskrider 1, behövs en testning enligt T/Dp (Steg 2). Erhållna resultat från T/Dp med dosen 100 mg/L omräknas till dosen 1 mg/L genom att dividera med utspädningsfaktorn 100 och multiplicera med en säkerhetsfaktor (här föreslås 5, vilket diskuteras vidare i kap 4.). De extrapolerade halterna används för beräkning av TU-index vid dosen 1 mg/L. Blir TU-index >1 klassas askan som farligt avfall enligt HP14. Det är viktigt att säkerställa att den extrapolerade halten (efter multiplicering med säkerhetsfaktorn) för varje enskild metall inte överskrider det som är teoretiskt möjligt, dvs maxhalten från steg 1. Om detta inträffar används den uträknade halten från steg 1 istället för den extrapolerade halten i summeringen av TU, eftersom det är teoretiskt omöjligt att frigöra >100%.



Figur 1. Tillvägagångssätt för bedömning av akvatisk toxicitet för HP14 egenskapen för klassning av slaggrus.

4 Utvärdering av kritiska testparametrar i T/Dp

För att identifiera de mest kritiska parametrarna i T/Dp vid testning av slaggrus utvärderades varje parameter noggrant utifrån om den, baserat på slaggrus speciella egenskaper, behövde undersökas närmare och eventuellt specificeras eller modifieras. En genomgång av parametrarna redovisas i Tabell 4. De testförhållanden som i litteraturstudien identifierades som viktigast för att kunna testa slaggrus enligt T/Dp var provets partikelstorlek och justering av pH under testets gång. Variation av parametrar och deras inverkan på metallers löslighet undersöktes därför i laboratorietester. Dessutom studerades specifika testförhållanden relaterade till 28-dagarstestet, i detta fall extrapolering av resultat från 100 mg/L till 1 mg/L, närmare. Slutsatserna från dessa undersökningar har sammanställts i avsnitt 4.1 - 4.3 och mer utförliga diskussioner finns i TemaNord-rapporten.

4.1 PARTIKELSTORLEK

I T/Dp anges inte partikelstorleken för materialet som ska testas förutom att "den minsta representativa partikelstorleken på marknaden" (pulver) eller "partikelstorleken som är representativ för normal hantering och användning" (fasta ämnen) ska användas. Om information saknas, föreslås en standarddiameter på 1 mm.

När det gäller slaggrus finns det av naturliga skäl ingen specifik (minsta) representativ partikelstorlek, eftersom askan består av partiklar av olika storlek. Partikelstorleksfördelningsanalyser visar att cirka 20-40 % av slaggrus vanligtvis är <1 mm. Detsamma gäller för askorna som används i föreliggande projekt (ref TemaNord 2022:525). Innan beslut om vilken partikelstorlek som skulle användas togs, utfördes tester enligt T/Dp med slaggrusprover som krossats till två olika kornstorlekar, <0,25 mm och <1 mm, för att se om partikelstorleken påverkade hur mycket metaller som frigjordes i testet. I dessa tester var pH i testlösningarna vid testens slut mycket lika oavsett partikelstorlek. Det kunde inte fastställas att frisättningen av Cu, Pb eller Zn var högre eller varierade mindre med 0,25 mm än med 1 mm kornstorlek. Utifrån litteraturstudien och genomförda tester rekommenderas därför att använda prover med en maximal kornstorlek på 1 mm, dvs att alla partiklar >1 mm mals till <1 mm, innan testning enligt T/Dp utförs. Detta är en kompromiss mellan att ha en liten kornstorlek för att kunna ta ut delprover med ett representativt innehåll för slaggruset och att inte påverka det ursprungliga materialet mer än nödvändigt.

4.2 JUSTERING AV PH I TESTLÖSNINGARNA

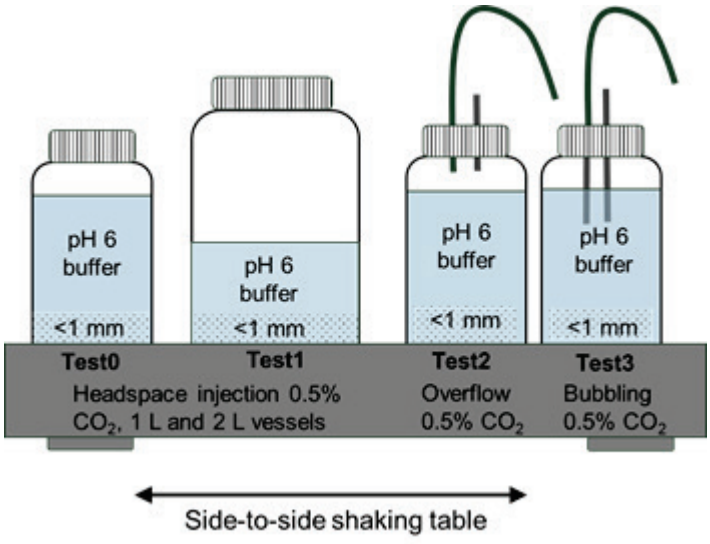
I T/Dp anges att särskilda buffertlösningar tillsammans med ett övertryck av CO_2(g) ska användas för att kontrollera pH i testlösningarna. Exakt hur pH-kontrollen ska utföras är däremot otydligt beskrivet. Litteraturgenomgången visade att olika system för pH-justering har använts i olika studier. Projektgruppen

har också diskuterat pH-justeringen med bl.a. CanmetMINING, som från början utvecklade T/Dp, och ECTX bv, ett laboratorium med lång erfarenhet av att testa kemikalier enligt T/Dp. Utifrån litteraturstudien och dessa diskussioner bestämdes att pH-kriteriet (pH 6 i denna studie) skulle anses uppfyllt om pH i blankproverna låg i intervallet 6±0,2 vid slutet av testet. I testlösningar med askor kommer pH att vara högre på grund av slaggrusens buffrande egenskaper (ofta runt 6,5 för de testade slaggrusen).

Flera olika sätt att tillsätta CO_2 undersöktes i "förtester" för att hitta en enkel och robust metod som uppfyller pH-kriteriet. Dessa beskrivs kort nedan och illustreras i Figur 2.

- Test0: Utfört med 1 L testflaska. En specifik mängd CO2-gas injicerades i det slutna utrymmet ovan vätskeytan så kallat "headspace" med bestämda tidsintervall (i samband med provtagning av testlösningen).
- Test1: Utfört med 2 L flaskor. En specifik mängd CO2-gas injicerades i headspace med bestämda tidsintervall (i samband med provtagning av testlösningen).
- Test2: Utfört med 1 L flaskor med CO2 flöde genom headspace.
- Test3: Utfördes med 1 L flaskor där CO2 bubblades genom testlösningen.

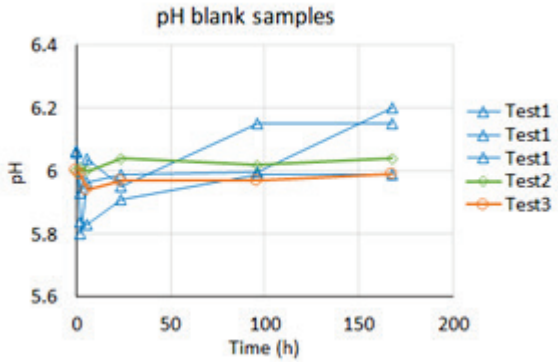
Resultaten visade att Test1 var den mest robusta metoden för att uppfylla blankkriteriet. Följande observationer gjordes under förtesterna för hantering av pH: Ett större utrymme i headspace ger ett mer konstant pH under testet. Test 2 och 3 där CO_2 kontinuerligt flödar in i headspace eller genom testlösningen är svårare att utföra och ställer höga krav på kontroll av att flöde och gaskoncentration är konstanta.



Figur 2. Översikt över de olika systemen för att kontrollera pH som testades i projektet. Figur från TemaNord 2022:525.

Utöver de tester som utfördes av de laboratorier som deltog i projektet utfördes även en testserie med kontinuerliga CO_2-flöden enligt T/Dp för proverna BA2 och BA4 av det belgiska laboratoriet ECTX bv, som har stor vana av denna typ av tester. Resultaten från ECTX bv stämde väl överens med resultaten från Test1. I

Figur 3 visas resultatet av blankprover från tester utförda vid ECTX bv tillsammans med resultat från blankprover i Test1.



Figur 3. Jämförelse av system för att kontrollera pH. Figuren visar resultat för blankprover. Test1: Utfört med 2 L flaskor och injektion av CO2 i headspace när prover tas ut från testlösningen, (resultat från testning hos laboratorier i HP14 projektet). Test2: Utfört med 1 L flaskor med CO2 flöde i headspace (resultat från ECTX). Test3: Utfördes med 1 L flaskor där CO2 bubblades genom testlösningen (resultat from ECTX). Figur från TemaNord 2022:525.

4.3 EXTRAPOLERING AV RESULTAT FRÅN 100 MG/L I 28-DAGARSTEST

Utvärderingskriterierna i T/Dp baseras på att test med 1 mg/L material under 28 dagar jämförs med ERV för kroniska effekter. Testning av slaggrus vid en koncentration på 1 mg/L har inte bedömts möjligt, vilket diskuteras i avsnitt 1.3. Som en lösning på detta föreslås att 100 mg/L testmaterial används i stället för 1 mg/L i 28-dagarstestet. För att resultaten ska motsvara koncentrationen 1 mg/l extrapoleras resultaten med hjälp av en utspädningsfaktor, det vill säga koncentrationerna i 100 mg/L-testet delas med 100. Förhållandet mellan metallkoncentrationerna i en testlösning med 100 mg/L aska och 1 mg/L aska är troligen inte helt linjärt. Det är inte klart om extrapoleringen leder till en över- eller underskattning av metallkoncentrationer i testlösningen, men för att säkerställa att metallkoncentrationerna inte underskattas föreslås att en säkerhetsfaktor introduceras.

En lämplig storlek på säkerhetsfaktorn har uppskattats utifrån tillgängliga publicerade studier där försök har gjorts både med dosen 100 mg/L och dosen 1 mg/L. Underlaget är begränsat och det finns inga studier på slaggrus eller andra askor. Alla data finns tillgängliga i TemaNordrapporten 2022:525, se Tabell 4.2. Säkerhetsfaktorns storlek begränsas också av totalhalterna i askan eftersom halterna i testlösningarna inte kan vara högre än om hela metallinnehållet i slaggrusen frigörs (se även kapitel 3).

En säkerhetsfaktor föreslås här baserat på följande:

Användning av en gemensam säkerhetsfaktor för alla relevanta metaller är enkelt och transparent.

Publicerade data från testresultat från T/Dp med olika material ger information om storleken på säkerhetsfaktorn som behövs för att undvika en underskattning av den egentliga utlakningen av metaller vid en provmängd på 1 mg/L.

Det totala metallinnehållet utgör övre gräns för utlakade halter och behöver beaktas vid valet av säkerhetsfaktor.

Projektgruppen rekommenderar en säkerhetsfaktor på 5, vilken senare eventuellt kan modifieras när mer data finns tillgängligt. Totalinnehållet av respektive metall i slaggrusen indikerar den övre gränsen för säkerhetsfaktorn (vanligtvis 5 för Zn och 10 för Cu).

5 Utvärdering av 9 nordiska askor

Den modifierade T/Dp-metoden (Steg 2) utvärderades genom att testa den på 9 nordiska slaggrus från fullskaliga avfallsförbränningsanläggningar. Utöver det rent praktiska förfarandet gjordes också en tolkning av testresultaten relaterade till HP14-klassificeringen, för att bedöma om slaggrus bör klassas som farligt eller icke farligt avfall. I tillägg till detta gjordes också en utvärdering enligt Steg 1 (beräkning baserad på totalhalter). En mer detaljerad redovisning av testningen av askorna återfinns i TemaNord-publikationen.

5.1 MATERIAL OCH METOD

Naturligt karbonatiserade och metallseparerade slaggrus från 9 avfallsförbränningsanläggningar samlades in och användes i projektet. Representativa prover från respektive aska togs ut genom samlingsprover á 3 kg, vilka sedan i olika steg delades ner till 1 g. Askproven maldes också för att erhålla en maximal partikelstorlek på 1 mm. Slutligen togs prover om 100 mg ut, vilka användes i respektive test. Varje test utfördes i replikat (3 eller 5 stycken). Vid varje askförsök genomfördes också ett blanktest (test utan provmaterial). En liten provmängd på 100 mg tillsattes till 1 liter buffertlösning med pH 6 och pH i testlösningarna justerades därefter genom att vid flera tillfällen tillsätta CO_2(g). Samma volymer CO_2-gas tillsattes blank- och testlösning. Testet utfördes med 2-liters testkärl, då det visat sig ge de mest robusta resultaten (se avsnitt 4.2). Ett 7-dagarstest utfördes med samtliga 9 askor. Dessutom testades 3 av askorna i det fullständiga 28-dagarstestet. Detta användes för att göra en bedömning av om och i så fall hur utlakningen skiljer sig efter 7 resp. 28 dagar. Prover på blank- och testlösningar togs regelbundet ut under testets gång och analyserades med avseende på metallhalter av för klassningen viktiga metaller (Cu, Pb och Zn samt Cr, Ni, Fe, Al och Si).

5.2 KARAKTÄRISERING AV ASKPROVER

Totalhalterna av olika grundämnen är relativt lika mellan askproverna och för de flesta metallerna, som är relevanta för HP14-klassning t.ex. As, Co, Cd och W, är halterna <100 mg/kg. Det innebär att även om 100 % av respektive grundämne hade lakats ut är bidraget till TU-index försumbart. Därför fokuserades analyserna av testlösningarna på de metaller som förekommer i högre halter och som kan vara av stor betydelse för klassningen enligt HP14. De metallerna är Cr, Cu, Ni, Pb och Zn, där framförallt Cu och Zn förekommer i halter över 1 000 mg/kg. En av askorna (BA5) hade högre innehåll av Pb än övriga askor. Totalhalter för samtliga askprover (dubbelprover) återfinns i appendix.

5.3 UTVÄRDERING AV TESTRESULTATEN

5.3.1 Steg 1: Teoretisk beräkning från totalhalter

Det enklaste tillvägagångssättet för att klassa en aska är att använda totalhalterna för beräkningen av TU-index. I dessa beräkningar antas det att de aktuella metallerna frigörs till 100 %. Detta är orealistiskt, men är ett enkelt sätt att förutsäga de teoretiskt sett maximala koncentrationerna vid dosen 1 mg/L. För de aktuella askproven innebar denna beräkning för 2 av de 9 askorna ett TU-index < 1, vilket indikerar att de kan klassas som icke farligt avfall enligt HP14 utan vidare testning, Tabell 2. Om utlakningen antas vara 50 % för samtliga undersökta metaller underskrider 8 av 9 slaggrus TU 1.

Tabell 2. Teoretisk beräkning av TU-index för 9 nordiska slaggrus, om 100% resp. 50% utlakning sker. Enbart de metaller som har stor påverkan på TU-index visas i tabellen. Referenser för ERV-värdena anges i **Tabell 1**.

	Individuella TU-värden					**TU index (antas att 100 % av det total innehållet frigörs)**	**TU index (antas att 50 % det totala innehållet frigörs)**
	Cr	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**Zn**		
Kronisk ERV, µg/l	PNEC 6.5 (	8.7	2.3	1.7	17		
BA1	0,17	0,49	0,32	0,55	0,20	1,7	0,9
BA2	0,10	0,36	0,07	0,54	0,18	1,3	0,6
BA3	0,09	0,30	0,08	0,45	0,31	1,2	0,6
BA4	0,13	0,67*)	0,14	0,50	0,34	1,8	0,9
BA5	0,14	0,40	0,19	1,03	0,27	2,0	1,02
BA6	0,08	0,56	0,12	0,39	0,22	1,4	0,7
BA7	0,11	0,24	0,09	0,32	0,17	0,9	0,5
BA8	0,16	0,54*)	0,10	0,51	0,24	1,6	0,8
BA9	0,08	0,28	0,06	0,28	0,19	0,9	0,4

*) stor skillnad mellan replikaten

5.3.2 Steg2: Testning enligt modifierat T/Dp

Av de analyserade metallerna var det framför allt Cu och Zn som lakades ut från slaggrusen, vilket innebär att de har störst påverkan på klassningsresultaten. I några fall lakades även Pb ut, medan övriga metaller oftast var nära detektionsgränsen. Andelen utlakad Cu (jämfört med totalinnehållet) låg mellan 1 och 12 % (7-dagarstestet), medan motsvarande spann för Zn var 14-39% (7-dagarstestet). Detta tyder speciellt för Cu på att endast en liten andel av totalhalterna lakas ut. Repeterbarheten (5 replikat) för både Cu och Zn låg på

mellan 7 och 26%. Det kan också noteras att repeterbarheten var tillfredsställande, vilket betyder att de beredda askproven var tillräckligt homogena för uttagande av små delprover och att en partikelstorlek på <1 mm är tillräckligt liten. I asktesten hölls pH-värdet i testlösningarna genom tillsats av CO_2(g) till 6,3-6,6, medan blanktesterna var 6,0±0,2. De högre pH-värdena i asktesten beror på askornas buffrande egenskaper. Mer ingående diskussion kring utlakade halter, repeterbarhet och variation i pH finns i TemaNord-rapporten.

Beräknade TU-index för de extrapolerade 28-dagarstesten (BA2, BA7 och BA9) var alla <1, oavsett om en säkerhetsfaktor på 5, 10 eller 15 användes. Det summerande TU-indexet var maximalt 0,7 (BA2) med en säkerhetsfaktor på 15, Tabell 3. Det innebär att slaggrusen i samtliga fall klassas som icke farligt avfall enligt HP14. Samtliga 9 slaggrusprover testades också enligt 7-dagarstestet och resulterade i TU < 1 för alla prover när en säkerhetsfaktor på 10 användes. Det ska noteras att i flera fall, speciellt när de högre säkerhetsfaktorerna används, överskrider de beräknade 1 mg/L-halterna vad som teoretiskt finns tillgängligt utifrån totalhaltsinnehållet. Detta är speciellt tydligt för Zn, men även för Cu och Ni i vissa fall. Det är alltså viktigt att inte använda en för hög säkerhetsfaktor, då det ger orealistiska resultat.

Tabell 3. Beräkning av TU-index för BA2, BA7 och BA9 baserat på 28-dagarstest med dosen 100 mg/L, omräknat till dosen 1 mg/L och med säkerhetsfaktorer på 5, 10 och 15. Gulmarkering innebär att totalhalt har använts i beräkningen, dvs 100% utlakning är antaget pga att beräkning med aktuell säkerhetsfaktor skulle resultera i utlakning >100%.

	Föreslagen säkerhets-faktor	Individualla TU index					Sum TU index
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
Resultat från 28-dagars test							
BA2:2-28 d	5	<0,01	0,24	0,07	0,02	0,18	0,5
BA2:2-28 d	10	<0,01	0,36	0,07	0,03	0,18	0,7
BA2:2-28 d	15	<0,01	0,36	0,07	0,05	0,18	0,7
BA7-28 d	5	< 0,01	0,04	0,05	<0,01	0,17	0,3
BA7-28 d	10	< 0,01	0,08	0,09	0,01	0,17	0,4
BA7-28 d	15	< 0,01	0,13	0,09	0,01	0,17	0,4
BA9- 28 d	5	<0,01	0,05	0,01	0,07	0,19	0,3
BA9- 28 d	10	<0,01	0,10	0,03	0,15	0,19	0,5
BA9- 28 d	15	<0,01	0,15	0,04	0,20	0,19	0,6

5.3.3 Erfarenheter från testningen

Följande praktiska iakttagelser och noteringar gjordes under testningen:

- Den modifierade T/Dp-metoden är ganska enkel, men tidskrävande att utföra. Dock ställer den, liksom det ursprungliga T/Dp, höga krav på renhet och kvalitet på all utrustning och allt material som används i försöken, då mycket låga koncentrationer analyseras (t.ex. krav på detektionsgräns för 0,2 µg/l för Pb och Cu).
- Analyser av metaller i blankprov är viktiga. Vid beredningen av buffertmediet upptäcktes i vissa fall låga nivåer av Zn. Detta kan bero på föroreningar i de salter som tillsätts vid beredning av buffertmediet. Samma observationer har rapporterats tidigare, t.ex. av Lillicrap (2014). Låga koncentrationer av grundämnen som Zn kan också vara ett resultat av kontaminering från filtermembranet (se Hedberg et al 2011).
- Det är viktigt att ett blanktest utförs före 28-dagarstestet startar för att kontrollera lämpliga intervaller för tillsats av CO_2(g), då t.ex. läckage genom rörkopplingar på testflaskan kan ge behov av ytterligare gasinjektioner för att säkerställa rätt pH under försöket.
- En detaljerad vägledning om provberedning är viktig, då ett stort prov ska delas ner och representeras i en mycket liten provvolym. Här behövs materialspecifika riktlinjer.

6 Slutsatser och förslag på fortsatt arbete

6.1 ÖVERGRIPANDE SLUTSATSER

I utvärderingen av HP14-egenskapen hos slaggrus ligger fokus på den akvatiska toxiciteten, vilken i detta fall styrs av metallernas egenskaper[8]. För en klassningsbedömning av akvatisk toxicitet baserad på T/Dp för slaggrus, behövs uppgifter på metallhalter i en testlösning, som varit i kontakt med en mycket liten provmängd (dosen 1 mg/L) under 28 dagar. Metallhalterna jämförs med det kroniska ekotoxikologiska referensvärdet (ERV) för respektive metall. För varje metall räknas ett "toxic unit (TU)"-värde ut genom att dividera metallkoncentration med ERV för respektive metall. Även den sammanlagda effekten från alla metaller måste iakttas, varför de olika metallernas TU-värden summeras till ett TU-index. Om TU-indexet är <1 klassificeras det testade avfallet som icke farligt avfall enligt HP14.

Tillförlitliga resultat av ett heterogent testmaterial, så som slaggrus, kan inte erhållas med den mycket låga dos (1 mg/L) som T/Dp förordar och därför har en modifierad T/Dp-metod utarbetats, där en dos på 100 mg/L i stället används. För att erhålla uppgifter om frigjorda halter vid dosen 1 mg/L görs en extrapolering med hjälp av en utspädningsfaktor (division med 100). De erhållna metallhalterna multipliceras med en säkerhetsfaktor för att säkerställa att de inte underskattas.

För analys av totalhalter rekommenderas en mikrovågsugnsassisterad syraupplösning (EN 13656: 2020). Totalhalterna kan användas för beräkning av de maximala halter som kan erhållas i en T/Dp-testlösning (antaget 100 % frigörelse av metaller vid testning med dosen 1 mg/L) och de uträknade halterna jämförs med kroniska ERV. I vissa fall kan slaggrus direkt klassas som icke farligt avfall enbart på basen av totalhalter, eftersom TU-index <1 även om 100% av de relevanta metallerna frigörs. Så var fallet för två av de slaggrus som ingick i denna studie. När korrigering av beräknade halter vid dosen 1 mg/L görs med hjälp av säkerhetsfaktorn är det viktigt att beakta att totalhalterna ger den övre gränsen för vad som är teoretiskt möjligt att frigöra vid testning, så att inte felaktiga halter används i klassningsbedömningen. Speciellt för Zn noterades att uträkningar även vid en säkerhetsfaktor på 5 kan resultera i en överskattning av hur höga halter som kan frigöras.

I kapitel 5 presenteras resultat från testning av 9 nordiska slaggrus med den modifierade T/Dp-metoden. Hos två av slaggrusproverna kunde en klassificering som icke farligt avfall göras enbart utifrån totalhalten, dvs testning enligt T/Dp var inte nödvändigt för klassning. Tre slaggrusprover analyserades med ett 28 dagarstest. Beräknat TU-index för detta test var <<1 också vid användning av högre säkerhetsfaktorer än 5. En indikativ klassning kunde också göras för de övriga 6 slaggrusproven baserat på 7-dagarstestet. Även dessa test resulterade i att det uträknade TU-indexet låg väl under 1, trots att en säkerhetsfaktor på 10

[8] slaggrus innehåller inte ozonnedbrytande ämnen och inte heller organiska ämnen som behövs beakttas vid bedömning av HP14 egenskapen

användes. Sammanfattningsvis tyder samtliga resultat från denna studie på att slaggrus ska klassas som icke farligt avfall med avseende på HP14.

6.2 FÖRSLAG TILL MODIFIERAD TESTMETOD

En modifierad T/Dp-testmetod har utvecklats som ett verktyg för bedömning av slaggrus som icke farligt eller farligt avfall enligt HP14 (akvatisk toxicitet).

6.2.1 Applikationsområdet för den modifierade T/Dp-metoden

Testmetoden har utvecklats för metallsorterad och åldrad slagg, dvs slaggrus. För andra material behövs ytterligare laboratoriestudier för att bedöma metodens tillämpbarhet.

6.2.2 Testförhållanden och extrapolering av resultateten från dosen 100 mg/L till 1 mg/L

Den modifierade T/Dp-metoden bygger på att testet utförs med dosen 100 mg/L. I projektet gicks alla testparametrar kritiskt igenom. De testparametrar som identifierades som mest avgörande för att kunna anpassa T/Dp till slaggrus var den maximala kornstorleken hos slaggrusprovet och tillvägagångssättet för att upprätthålla önskat pH-värde under testets gång. Dessa parametrar undersöktes experimentellt för 2 askor.

En sammanfattning av testförhållandena presenteras i Tabell 4 och en fullständig beskrivning av det modifierade T/Dp-testet presenteras i bilaga 4.

Tabell 4. Testförhållandena i det modifierade T/Dp.

Testförhållande	Modifierat T/Dp	Motivering till val av testförhållande
Kornstorlek	1 mm	En max. kornstorlek på 1 mm ger mera representativa slaggrusprover än mer finmalda prover. Större andel av okrossbara metaller kan inkluderas i testmaterialet.
Mål pH i testlösningen	pH 6	Maximal utlakning av metaller vid pH 6.
Provmängd i testet (dos)	100 mg/L	En testning på lägre doser är inte lämplig för heterogena testmaterial som slaggrus. Resultaten från testningen med dosen 100 mg/L omräknas till dosen 1 mg/L genom att dividera den uppmätta halten i det modiferade T/Dp med en utspädningsfaktor på 100 och sedan multiplicera med en säkerhetsfaktor på 5.
Testtid	7 eller 28 dagar	28 dagar relateras till kravet för att eliminera alla faroangivelser för akvatisk toxicitet, vilka som är förknippade med dosen 1 mg/L och 28 dagars testning.

Testförhållande	Modifierat T/Dp	Motivering till val av testförhållande
		Korrelationen mellan 7 och 28 dagars testning kan undersökas vidare för en eventuell förkortning av testtiden
Testkärl	2 L (volymen på testkärlet)	Användning av ett testkärl med den större volymen ger stabilare testförhållanden jämfört med 1 L testkärl.
Temperatur	19-25 ^{o}C	Samma temperaturområde som vid avfallstestning. Frigörelse av metaller genom diffusion är inte avgörande i detta fall.
Testmedium (buffertlösning)	Buffertlösning på pH 6 med tillsats av CO_2 till testkärlets utrymme ovan vätskeytan (headspace) vid specifika tider under testets gång	CO_2-tillsatser vid start av testet och vid uttag av eluat efter 2 h, 6 h, 1 d, 4 d, 7 d, 14 d, 21 d. Eventuellt extra CO_2-tillsatser ifall pH-värdet i blanktesterna överstiger stipulerat område (t.ex. CO_2-tillsatser vid 11, 17 och 24 d efter start av testet och eventuellt en eller två ytterligare tillsatser vid behov)
Syrehalt i testlösningen	Min 6 mg/L	> 6 mg/L uppmättes i VTT´s tidigare FINETOX studie (Wahlström et al 2019)
Löst organiskt kol (DOC - dissolved organic carbon) i buffertlösningen	Max 2 mg/L	Inte relevant, pro analysis kemikalier används vid beredningen av buffertlösningarna.
Omrörning	Mild	Agglomeration/abrasion bör undvikas. I det experimentella arbetet användes en orbital omrörare, sk skakbord (100 rpm)
Provtagning av eluat	12 ml/gång totalt 4 gånger (7 dagars test) eller 7 gånger (28-dagars test)	Ingen kompensering av uttagna eluatmängder. pH uppmäts i alla eluat som uttages. Metallhalter analyseras i alla eluat uttagna efter 7 eller 28 dagars testning. Det rekommenderas att analysera de viktigaste metallerna för samtliga replikat för ett av eluaten som tas ut under testets gång.
Replikat	5 replikat	Antalet replikat kan reduceras till t.ex. 3 då mera data är tillgänglig.

Testförhållande	Modifierat T/Dp	Motivering till val av testförhållande
Blanktester (nolltester)	1 /test set	pH uppmäts i blankprover vid samma tidpunkter som eluatprover tas för att säkerställa att en tillräcklig CO_2-tillsats har gjorts till testkärlets headspace. Blankprover används också för att undersöka eventuell kontaminering. Den acceptabla variationen i pH-värde i blankproverna vid testets slut är satt till pH 6±0,2.

6.3 NÄSTA STEG

Nästa steg är att validera den anpassade metoden genom att korstesta samma aska vid flera laboratorier för att få information om potentiella avvikelser i testprestanda och vid behov inkludera ytterligare specifikationer i testproceduren. Utifrån resultaten och erfarenheterna från valideringsstudien kan testförhållandena i metoden preciseras ytterligare. Exempelvis bör det potentiella läckaget av CO_2 från testflaskorna, vilket tros ha orsakat variationer i pH-värdena i blanktesten mellan laboratorierna, studeras. Dessutom är det önskvärt med några ytterligare beräkningar för att bekräfta att ingen övermättning av frigjorda metaller ur slaggruset sker i testet. Detta är viktigt för att säkerställa att en extrapolering från dosen 100 mg/L till 1 mg/L kan göras. Sådana beräkningar bör om möjligt inkludera ytterligare mineraler utöver de som kontrollerats i denna studie.

Laboratorieresultat för metallhalter i testlösningarna efter 7 och 28 dagar från fler askor behövs för att kunna utvärdera ifall testtiden kan förkortas. Ytterligare diskussioner behövs också om hur ofta testningen behöver utföras liksom behovet av utveckling av enklare metoder.

Avfall transporteras ofta över landsgränser för behandling eller återvinning, varför det kan vara värdefullt att jämföra denna metod med metoder utvecklade i andra länder för att förstå vilken information som erhålls för klassificering.

Avslutningsvis är det inte bara själva testmetoden som är av vikt för att få representativa och tillförlitliga resultat, utan även provtagningsprocedurer och provberedning behöver uppmärksammas.

Testmetodens tillämplighet för annat avfall än slaggrus behöver studeras.

7 Referenser

ECHA 2017. Guidance on the Application of the CLP Criteria

EN 13656:2020. Soil, treated biowaste, sludge and waste. Digestion with a hydrochloric (HCl), nitric (HNO3) and tetrafluoroboric (HBF4) or hydrofluoric (HF) acid mixture for subsequent determination of elements

Hedberg, Y & Odnevall Wallinder; I. 2012.Transformation/dissolution studies on the release of iron and chromium from particles of alloys compared with their pure metals and selected metal oxides. Materials and Corrosion 2012, 63, No. 6. DOI: 10.1002/maco.201005943

Hälldahl et al. 2019, Development of a test method for evaluation of ecotoxicity (HP14) in municipal solid waste incineration bottom ashes, Avfall Sverige rapport 2019:31

Lillicrap, A., Friede, B., Garmoa, Ø., Macken, A. 2014. Is the transformation/dissolution protocol suitable for ecotoxicity assessments of inorganic substances such as silica fume? Science of the Total Environment 468–469 (2014) 358–367

Margareta Wahlström, Tommi Kaartinen, Suvi Jokinen, Jutta Laine-Ylijoki. 2019. Hazardous waste classification - Assessment of hazardous property “ecotoxic” with focus on ashes. Finnish Environmental Pool 2019

Wahlström, M., Tiberg, C., Karlfeldt Fedje, K., Mäkelä, T., Kikuchi, J., Mohammadi, A.S 2022. Ecotoxic properties of ashes in hazardous waste classification. The adaption of transformation/dissolution (T/D) protocol for the assessment of ecotoxic properties of waste ashes. Nordic Council of Ministers. TemaNord 2022:525.https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1676039&dswid=-7876

UN GHS (2019) Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals, Annex 10 Guidance on Transformation/Dissolution of Metals and Metal Compounds in Aqueous Media (GHS, Rev.8, 2019) https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev08/ST-SG-AC10-30-Rev8e.pdfl

Bilaga A: Chemical composition of ash samples (replicate analysis)

Major elements (in %):

ELEMENT	SAMPLE	BA1-1	BA1-2	BA2-1	BA2-2	BA3-1	BA3-2	BA4-1	BA4-2	BA5-1	BA5-2	BA6-1	BA6-2	BA7-1	BA7-2	BA8-1	BA8-2	BA9-1	BA9-2
Dry matter	%	99.1	99.1	98.8	98.8	94.5	94.2	88.8	88.6	98.1	98.2	98.7	98.7	97.4	97.6	92.5	92.3	89.3	89.2
SiO_2	% DM*)	43.8	44.8	41.7	41.1	36.2	35.7	36.8	34	39.6	40	39.5	41.1	47.6	43.8	46.4	44.7	35.3	39
Al_2O_3	% DM	10.5	10.8	8.65	8.86	11	10.8	11.7	11	8.98	9.26	9.65	10.3	7.47	6.88	10.5	10.2	9.12	10.1
CaO	% DM	10.9	10.3	17.7	17	17	15.8	14.9	14.1	14.7	14.2	14.3	15.1	15.8	14.3	17	16.6	14.4	15.9
Fe_2O_3	% DM	16.4	15.4	14.3	13.2	10.4	10.6	15.2	14.6	15.5	15.1	12.6	13.1	14.5	13.6	16	15.5	15.8	17
K_2O	% DM	1.47	1.46	0.831	0.907	1.45	1.34	1.35	1.32	1.06	1.04	1.44	1.54	1.08	1.03	1.32	1.27	1.34	1.38
MgO	% DM	1.86	1.88	1.93	1.89	2.02	1.93	1.71	1.59	2.29	2.3	1.83	1.95	1.63	1.49	2.13	2.09	1.63	1.82

MnO	% DM	0.147	0.171	0.151	0.153	0.158	0.157	0.17	0.187	0.271	0.245	0.151	0.146	0.141	0.144	0.196	0.182	0.169	0.189
Na_2O	% DM	2.74	2.81	2.7	2.71	2.36	2.29	2.43	2.28	4.25	4.24	2.52	2.67	2.3	2.12	3.48	3.68	3.28	3.62
P_2O_5	% DM	0.904	0.957	0.811	0.824	1.37	1.4	1.15	1.28	0.886	0.891	0.981	1.02	0.716	0.756	0.94	0.874	1.21	1.27
TiO_2	% DM	1.69	1.63	1.29	1.22	1.5	1.44	1.19	1.12	1.23	1.24	1.17	1.24	1.05	0.922	1.92	1.86	1.17	1.22
Sum	% DM	90.4	90.2	90.1	87.9	83.5	81.5	86.6	81.5	88.8	88.5	84.1	88.2	92.3	85	99.9	97	83.4	91.5
LOI 1000°C **)	% DM	2.5	2.6	3	3.1	8.3	8.4	7.5	7.4	2.8	2.7	5	5	5.3	5.3	4.6	4.7	6.2	6.3

*) DM = dry matter, **) LOI = Loss of ignition

Appendix 1, cont.

Minor elements (mg/kg)

ELEMENT	SAMPLE	BA1-1	BA1-2	BA2-1	BA2-2	BA3-1	BA3-2	BA4-1	BA4-2	BA5-1	BA5-2	BA6-1	BA6-2	BA7-1	BA7-2	BA8-1	BA8-2	BA9-1	BA9-2
As	mg/kg DM	23.5	21.4	29.4	29.2	14.5	17.3	17.8	17	22.3	29	31.6	30.7	26.5	26.8	38.6	39.4	18.8	20
Ba	mg/kg DM	3200	3240	1680	1580	2170	2120	2130	1940	2290	2350	1620	1770	1800	1620	2880	2490	1420	1620
Be	mg/kg DM	2.21	1.7	4.26	2.8	2.3	1.83	5.33	2.03	0.833	<0.5	1.15	1.68	1.29	1.41	<0.5	2.05	1.75	1.5
Cd	mg/kg DM	3..02	2..15	3.68	4.44	8.4	3.99	10.6	9.55	5.4	4.54	5.95	2.79	9.08	2.87	6.12	5.14	2.84	2.15
Co	mg/kg DM	325	268	33.5	53.5	396	91.6	134	87.5	99.3	107	46.4	63.5	45.1	38.8	72.5	57.5	96.2	68.6
Cr	mg/kg DM	977	1170	637	723	580	533	928	751	987	831	517	553	720	679	890	1130	465	578
Cu	mg/kg DM	3960	4490	3700	2580	2560	2610	3410	8230	3670	3240	5520	4150	1960	2150	7290	3370	2720	2120
Hg	mg/kg DM	<0.05	0.132	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.0845	<0.05	0.0938	<0.05	<0.05	0.0651	<0.05
Mo	mg/kg DM	45.4	177	14.7	13.3	15.8	14	18.9	20.9	53.9	35.6	27.7	33.7	18.9	17.1	23.1	25.2	11.2	12.3

Nb	mg/kg DM	14.2	14.1	9.74	9.48	19.3	11.9	17.9	10.4	11.2	10.8	13.3	13.9	11.1	10.4	16.1	14.6	12.1	13.1
Ni	mg/kg DM	470	988	175	137	166	187	351	310	440	441	390	173	196	226	242	254	116	141
Pb	mg/kg DM	934	928	931	910	769	755	864	831	1860	1650	848	484	544	558	842	901	537	411
S	mg/kg DM	2560	2710	5510	5180	8060	8580	3940	4180	4070	3980	2640	2780	6520	6390	5210	5170	5240	5030
Sb	mg/kg DM	98	95.2	76.1	70.9	87.6	100	81.2	79.9	113	123	62.6	58.1	59.2	54.3	104	94.6	65.5	62.7
Sc	mg/kg DM	3.78	4.56	2.58	2.94	4.53	3.66	3.14	3.31	5.47	5.09	4.94	4.52	3.51	2.91	3.81	4.19	4.61	4.12
Se	mg/kg DM	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Sn	mg/kg DM	140	134	144	195	163	185	196	220	147	176	158	117	67.2	67.8	141	141	177	169
Sr	mg/kg DM	310	315	536	490	353	357	340	315	398	420	308	326	342	318	409	370	311	348
Tl	mg/kg DM	0.183	0.185	0.0945	0.0898	0.182	0.162	0.203	0.174	0.155	0.135	0.172	0.176	0.131	0.124	0.124	0.145	0.194	0.191

U	mg/kg DM	2.86	2.9	1.66	1.6	1.78	1.91	2	1.83	1.53	1.22	1.92	2.12	1.86	1.64	2.17	2.43	1.89	2.07
V	mg/kg DM	59.3	61.3	61.2	61.3	45.3	39.8	40	37.5	53.3	53.6	55.8	57.3	50.7	47.4	65.4	59.6	40.9	45.9
W	mg/kg DM	113	115	40.5	38.7	24.1	18.7	20.2	22.4	38.1	37.1	60	64.9	66	69	74.6	87.6	91.2	94.3
Y	mg/kg DM	15.8	15.7	10.8	11.3	11.8	12.7	11.4	11.7	14.9	14	24.9	28.3	10.7	9.92	14	15.2	11.2	11.2
Zn	mg/kg DM	3100	3620	3270	2950	5410	5120	5420	6090	4540	4740	3650	3900	2950	2890	4380	3690	3330	3220
Zr	mg/kg DM	282	274	241	237	240	322	173	162	194	197	148	205	175	193	339	265	200	220

Bilaga B: Adapted T/Dp – method description

The base of the adapted method is the test description in UN GHS Annex 10. The testing principles of the adapted T/Dp are briefly described below with references to conditions described in Annex 10.

NB The main difference in the adapted T/Dp relates to the use of CO_2 injections in test vessel headspace instead of continuous CO_2 flow in test vessels, which is the reference procedure.

1. SCOPE OF METHOD

The test determines the release of sparingly soluble metals from waste material in test conditions simulating infinite contact with water and where an excess of oxygen enables the transformation of oxides and sulphides into a soluble form and then dissolution to the water phase. The metal concentrations in the test solution are measured at the end of the test time. From the released concentrations, values can be extrapolated and compared to ecological reference values for waste classification.

2. APPLICATION

The test method is suitable for determination of release of metals which may appear as compounds with the hazard statement codes H400, H410-H413 in a bottom ash.

The test method is not applicable for organic pollutants.

NB The applicability of the test method for other wastes (mineral and organic waste) has not been assessed and probably sets a requirement for different pretreatment methods.

3. REFERENCES

UN GHS (2019) Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals, Annex 10 Guidance on Transformation/Dissolution of Metals and Metal Compounds in Aqueous Media (GHS, Rev.8, 2019) (https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev08/ST-SG-AC10-30-Rev8e.pdf)

EN15002:2015. Characterization of waste - Preparation of test portions from the laboratory sample

4. PRINCIPLES OF ADAPTED METHOD

In the T/Dp, the test substance is gently agitated in a pH-buffered aqueous transformation/ dissolution leaching medium.

The adapted test procedure is conducted with the load 100 mg/l using a test portion with a grain size of less than 1 mm. The target pH is 6 using a buffer leachant and the test time is 28 days. A test time of 7 days is sufficient in case of steady-state release, or if it can be demonstrated that sufficient information is achieved for waste classification. A short test time of 7 days can also be used for indicative information of release.

NB Steady-state release in the T/Dp is described in Annex 10. Test duration can also be reduced to 7 days if sufficient correlation between a test time of 7 days and 28 days can be demonstrated, or the level of release is very low compared to ERV to which the metals are compared.

5. APPARATUS AND REAGENT

Glass bottles of 2 L are used. The tight caps of the bottles should have inlet holes for gas injections. The bottles should be sealed as well as possible to minimize leakage of CO_2.

The leachant pH 6 is used in the test and prepared as described in Annex 10. The quality of the ultra-pure water needs to be analyzed for background concentrations, as very low concentrations are to be measured.

Pure CO_2 gas is used instead of a gas mixture containing 0.5 % CO_2 prescribed in Annex 10.

Important: all equipment and test bottles need to be rinsed with acids to minimize potential contaminations (alternatively new glass bottles should be used for each test). Only pro-analysis reagents are to be used.

6. SAMPLE PREPARATION

Special attention is needed in sample preparation of a very small subportion. General guidance for sample preparation is given in EN 15002 by using coning/quartering/ homogenization and applying sieving and crushing of oversized materials. An appropriate way to reduce the subsample size further into representative subsample portions is by dividing it with a centrifugal divider. Centrifugal division can be performed successively until appropriate subsample portions are obtained.

It is important that the weight of oversized materials (> 1 mm) that are removed before crushing is recorded and assessed in the test interpretation.

The test material should be divided down to such a small size that the final sample portion taken for the test constitutes about 10 % of the split sample. This means that, for the test performance with 5 replicates, the test sample amount of 1 g is prepared using a sample divider enabling 5 subsamples of 100 mg to be obtained.

Note 1 If the subsample cannot be subjected to sample size reduction, sample particle size reduction or sieving because of its moisture content, the subsample should be dried at room temperature (EN 15002). The subsample

should only be dried to such an extent that will allow for subsequent sample treatment (i.e. sample size reduction, particle size reduction, sieving etc).

7. PROCEDURE

The test is performed with a few deviations to Annex 10:

7.1

Test is carried out at a temperature of 22 °C ± 3 °C.

NB This temperature range is prescribed in the CEN test methods for testing of release from waste material (e.g. surface related release in, e.g. CEN/TS 16637-2:2014 from construction products).

7.2

Prior to start of the test, the headspace of the test bottle is measured (taking into account the leachant solution used in the test). This information is used to calculate the quantity of pure CO_2 to be added to the headspace.

7.3

Instead of using a 0.5 % CO_2 gas constantly flowing to the bottle headspace or to the test solution, as described in OECD document no 98, a predetermined amount of CO_2 is added to the headspace at certain time intervals during the test duration. The predetermined quantity of pure gas is injected into the head space of the test bottle through the gas inlet using a syringe and resulting in a CO_2 gas concentration of 0.5 %. The buffered pH 6 leachant is also preferably the day before start of the test saturated with CO_2 using this procedure in order to achieve the target pH in Annex 10 (multiple additions may be needed).

NB For injections of CO_2 gas, a Tedlar bag is, e.g. half-filled with pure CO_2. (overpressure needs to be avoided). From the gas phase, a predetermined volume is withdrawn with a syringe and injected into the headspace of the test vessel.

7.4

Addition of test sample and agitation are performed as described in Annex 10.

The pH of the blank tests is followed to ensure that sufficient CO_2 amounts have been added and to keep the pH near the range 5.8-6.2 during the test performance. At the end of the test, the pH of the blank needs to be within the range of 5.8-6.2.

NB It is recommended that first a blank test series is performed to check that sufficient CO_2 injections are added. Leakages through the cap of the test bottle may lead to pH values slightly exceeding pH 6.2 after a few days.

7.5

Sampling from test solution is done according to Table 1 by withdrawing a small volume of 20 ml. No fresh leachant is added. The addition of CO_2 is done at the same time.

Tabell 5. Eluate sampling during testing time and addition of CO2 amount in headspace (Table includes proposals for acceptable deviation in timing of CO2 addition).

Test	Steps	CO_2 injections in headspace of bottle from start of test, hours*)	Remarks
7-day test	1	2 ± 15 min	
	2	6 ± 15 min	
	3	24 + 45 min	
	4	96 + 75 min	
	5	168 + 30 min	7-day test stopped
Additional steps for 28-day test	6	264 ± 24 hours)	pH measurement only
	7	336 ± 24 hours	
	8	432 ± 24 hours	pH measurement only
	9	504 ± 24 hours	
	10	576± 24 hours	pH measurement only
	11	672 ± 1 hours	28 days test stopped

*) if the pH of the blank slightly exceeds pH 6.2 (e.g. pH 6.2-6.3) after 7 days during the test performance, a few extra additions can be made, e.g. 1-2 days before the planned subsequent CO_2 injections. If the pH is significantly exceeded, then actions need to be taken to hinder gas leakage or assess influence of the ultra-pure water quality used.

8. ANALYSIS OF ELUATES

The eluates and blanks are sent to an analytical laboratory with reliable test methods for metals of interest.

Metal concentrations in test eluates are not corrected for metal concentrations in blanks.

NB Background correction can be considered in case of very low concentrations near background (e.g. for Pb), especially if the ERV is considerably lower.

Guidance for interpretation of test results is presented in Annex 10.

UTVECKLING AV TESTMETOD FÖR SLAGGRUS FÖR FAROKLASSIFICERING AV EKOTOXISKA EGENSKAPER – HP14

Vid klassificering av farligt avfall, särskilt faroegenskapen ”Ekotoxisk” (HP14), saknas en tydlig vägledning för hur testningen av akvatisk toxicitet ska utföras. Eftersom avfallsklassificeringen är gjord för att överensstämma med förordningen om klassificering, märkning och förpackning (CLP-förordningen) är ett alternativ att använda den testmetod som kallas ”Transformation/Dissolution protocol” (T/Dp) dvs “transformering/upplösning protokollet”. Den metoden omnämns i europeiska kemikaliemyndigheternas (ECHAs) vägledning för CLP, som ett sätt att bestämma faroklassningen för vattenlevande organismer dvs ekotoxicitet, och bygger på att materialet som ska klassas lakas i mycket stora mängder vatten för att få kunskap om hur mycket metaller som frigörs. Denna faroklassning ligger som grund för klassning av avfall för faroegenskapen HP14. Den potentiella utlakningen av andra ämnen (t.ex. organiska föroreningar) beaktas inte här, eftersom endast metaller har ansetts vara kritiskt för slaggrus, vilket är det material som denna rapport fokuserar på.

Syftet med den här studien har varit att bedöma tillämpbarheten av T/Dp för HP14-klassning av metallseparerade och åldrade bottenaskor från avfallsförbränning, s.k. slaggrus, samt att ge specifikationer/kompletterande rekommendationer för ett robust klassificeringsförfarande, som kan användas för bedömning av ekotoxiska egenskaper hos slaggrus.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se

Energiforsk