

Uitloging van metal(loïd)en in staalslakken en gerelateerde toepassingen

Valérie Cappuyns

Centre for Economics and Corporate Sustainability

KU Leuven (Belgium)

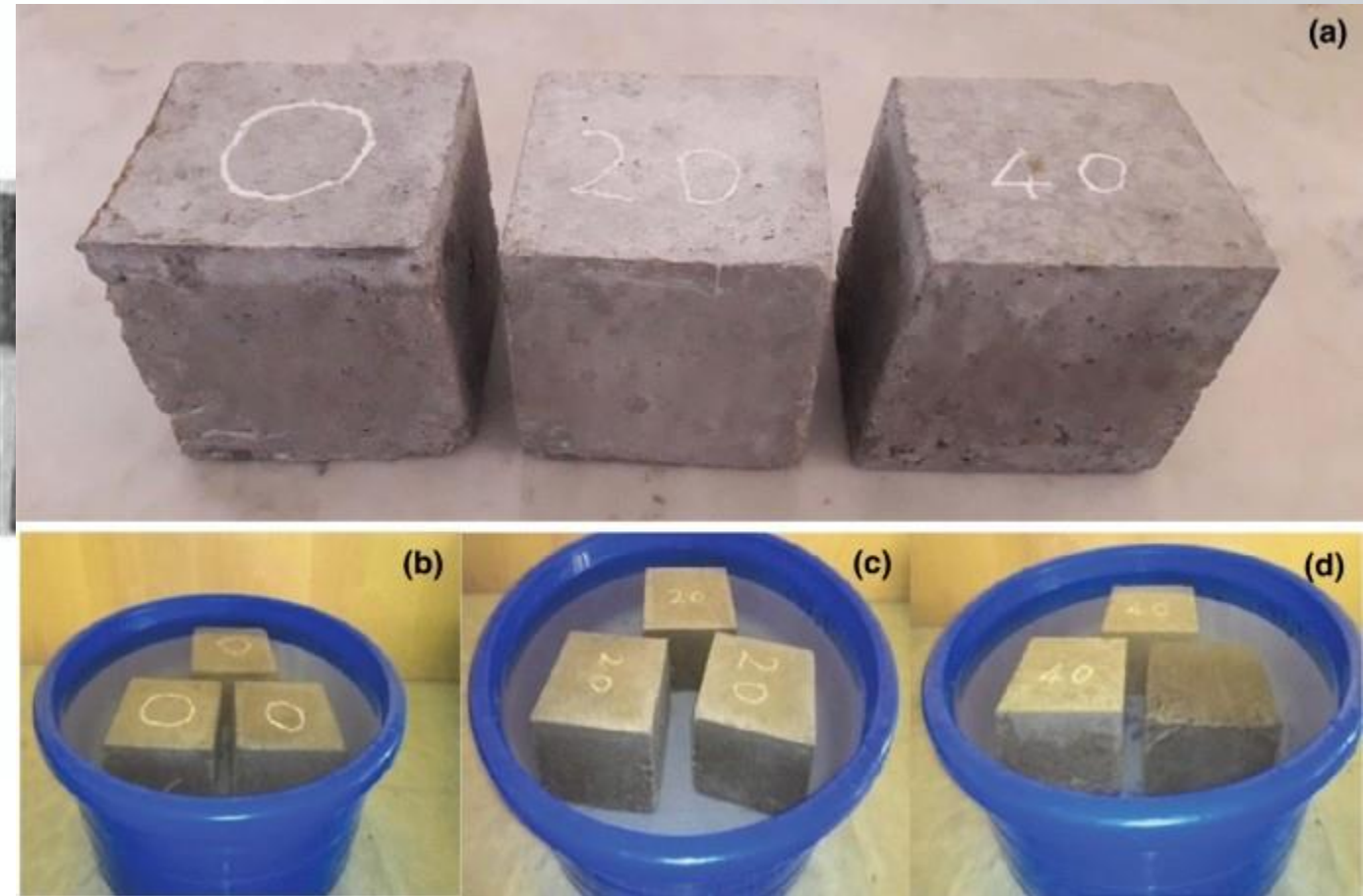
Inhoud

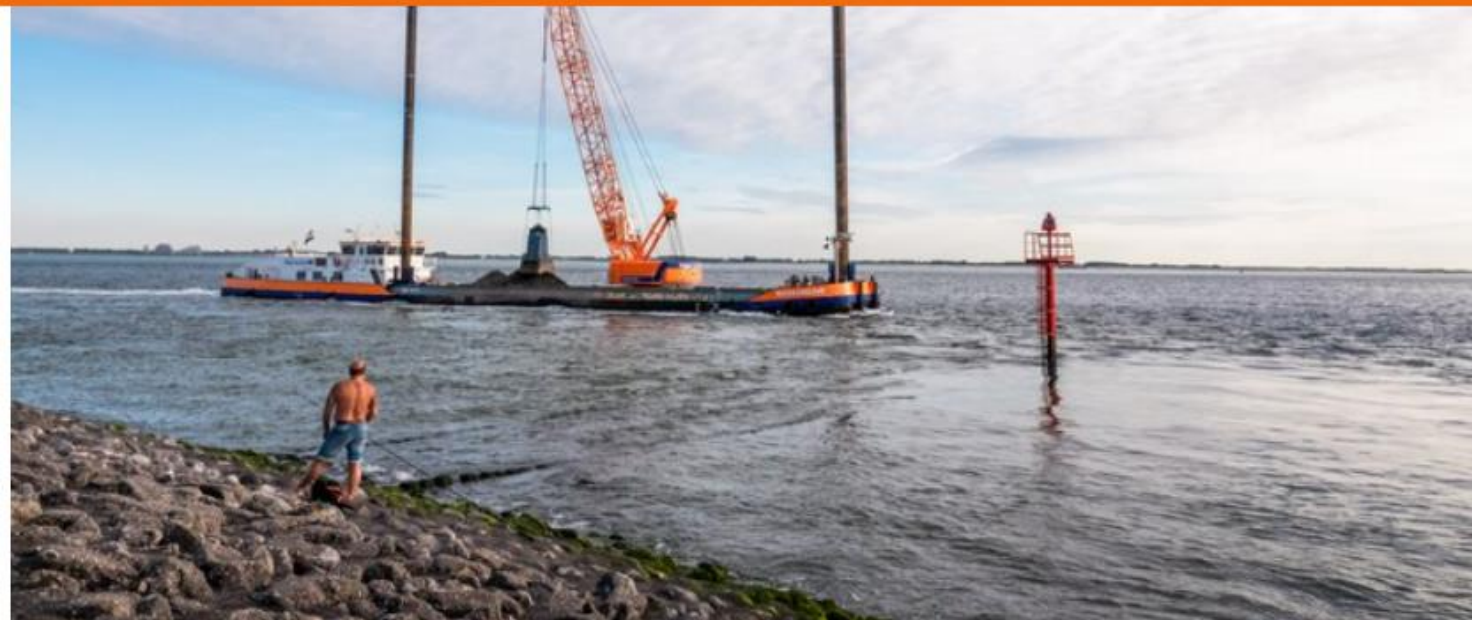
1. Toepassingen van staalslakken
2. Evaluatie van het milieu- en gezondheidsrisico a.h.v. uitloogtesten
 - 2.1 Evaluatie van het uitlooggedrag a.h.v. uitloogtesten
 - 2.2 Langetermijn monitoring van uitloging op het terrein
 - 2.3 In vitro testen: risico voor de mens (opname)
3. Regelgeving en beleid in Vlaanderen
4. Toepassingen van staalslakken in Vlaanderen

1. Toepassingen van staalslakken

- **bouw** (beton, wegenbouw) (Chaurand et al., 2007)
- **cement**productie (als grondstof of aanvullend materiaal) (Ulewicz et al., 2024)
- **landbouw** (meststof, bodemverbeteraar) (Ning et al., 2016)
- **Immobilisatie** van metalen in (zure) bodems (Yang et al., 2021)
- **metaalrecuperatie** (terugwinning van waardevolle elementen) (Ilmaz et al., 2021)
- de productie van hoogwaardige producten zoals **keramische membranen** (Deepti et al., 2020).

Baalamurugan et al. (2022)





Een kraanschip stort slakken en stenen om de vooroever bij Vlissingen te verstevigen. © ANP

Omstreden staalslakken mogen nog steeds in Zeeuwse wateren worden gestort: ‘Hou daar alsjeblieft mee op’

Vanwege de mogelijke gezondheidsrisico's komt er een tijdelijk verbod op staalslakken. Maar in de Oosterschelde en Westerschelde mag het omstreden steenachtige spul nog steeds worden gestort. Onbegrijpelijk, vinden natuur- en milieuorganisaties. „Als we onze natuurgebieden zo behandelen, is dat wel heel zorgelijk.”

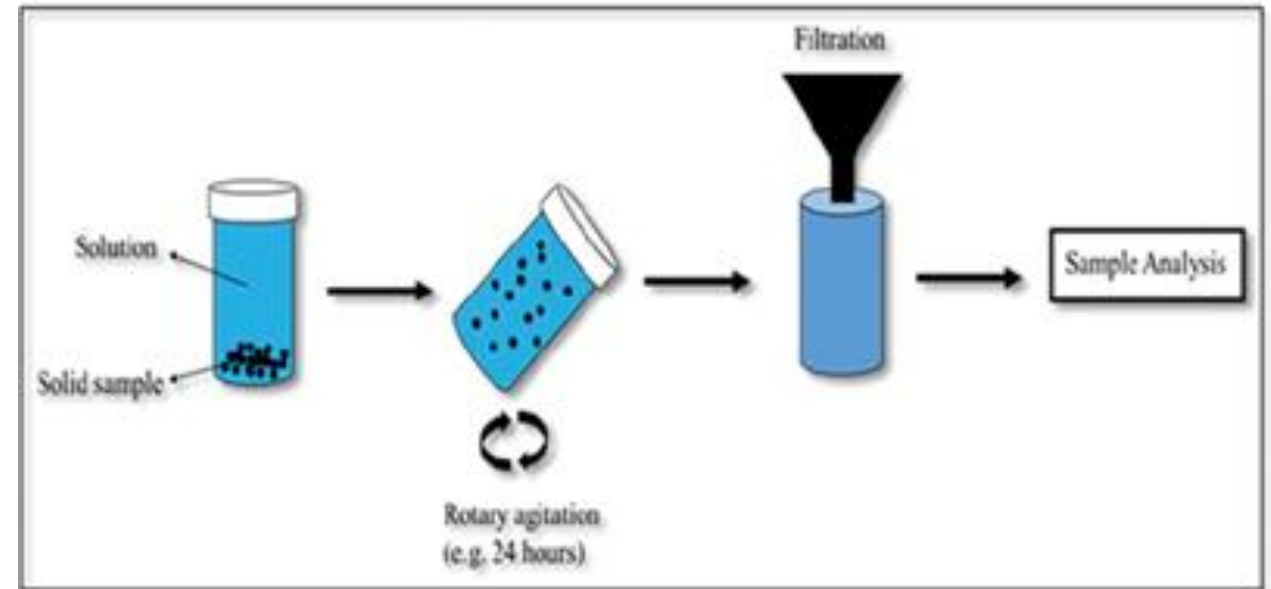
Rolf Bosboom 23-07-25, 09:00

<https://www.hln.be/>

2. Evaluatie van het milieu- en gezondheidsrisico a.h.v. uitloogtesten

Verschillende types uitloogtesten voor afvalstoffen/secundaire grondstoffen:

- Batch uitloogtesten, kolomtesten, diffusieproeven
- Uitloogtesten die **conformiteit met regelgeving** nagaan versus uitloogtesten ter **karakterisering** van materialen



2.1 Evaluatie van het uitlooggedrag a.h.v uitloogtesten

Totale gehalte aan gevaarlijke stoffen

- Assumptie dat alles vrijkomt => niet realistisch

Uitloogtesten die conformiteit met regelgeving nagaan

- Simuleert uitloging voor een vooraf gedefinieerde situatie.
- Geeft één enkel gegevenspunt (concentratie)

Uitloogtesten ter karakterisering van materialen

- Range van omgevingsomstandigheden
- Simuleert verschillende veldomstandigheden

Totaal gehalte aan contaminanten

- X stralen fluorescence (XRF)
- Element-analysis na zure destructie
- Element-analysis na litiumboraat fusie
-

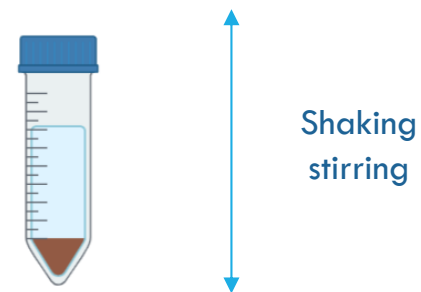
Uitloogtesten - conformiteit met regelgeving.

- TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)
- EN 12457-2
-

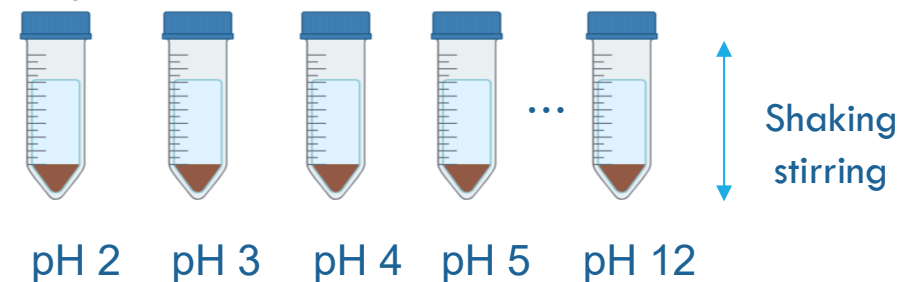
Uitloogtesten ter karakterisering.

- pH afhankelijke uitloogtest
- enkelvoudige extracties
-

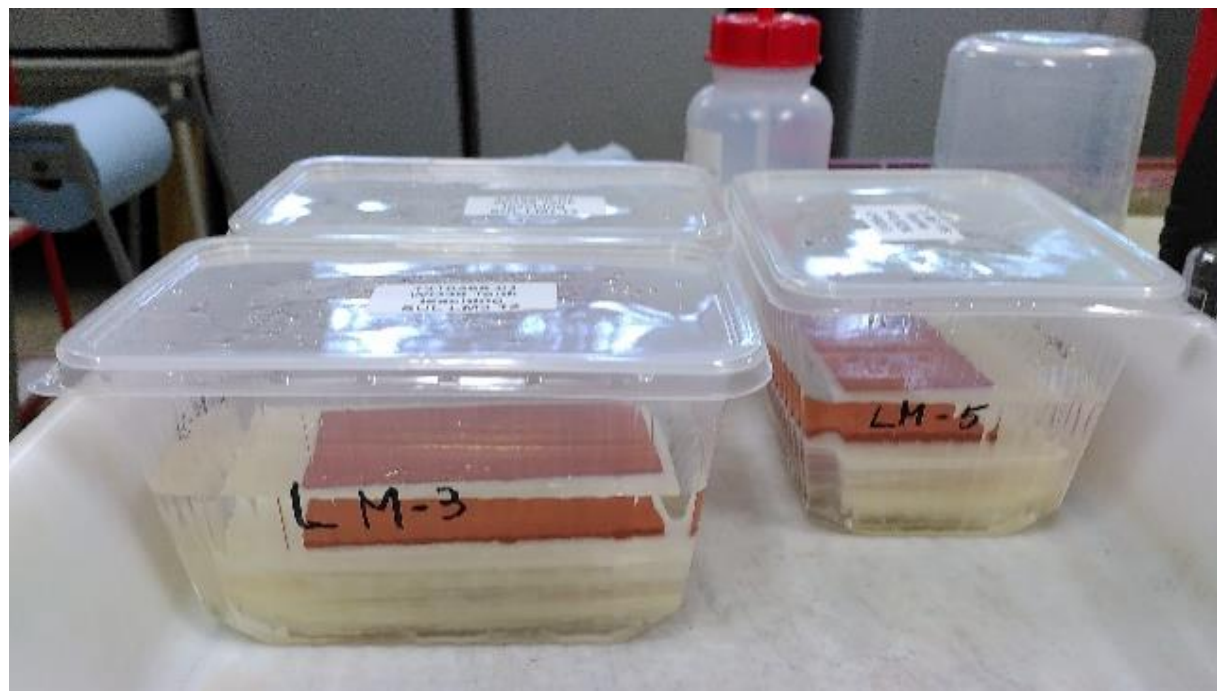
Enkelvoudige batch uitloogtest



pH-dependent batch leaching test



Testen die conformiteit met regelgeving nagaan



Diffusie/Tank-uitloogtest

$L/A = 80 \text{ l/m}^2$, 8 fracties, 64 dagen

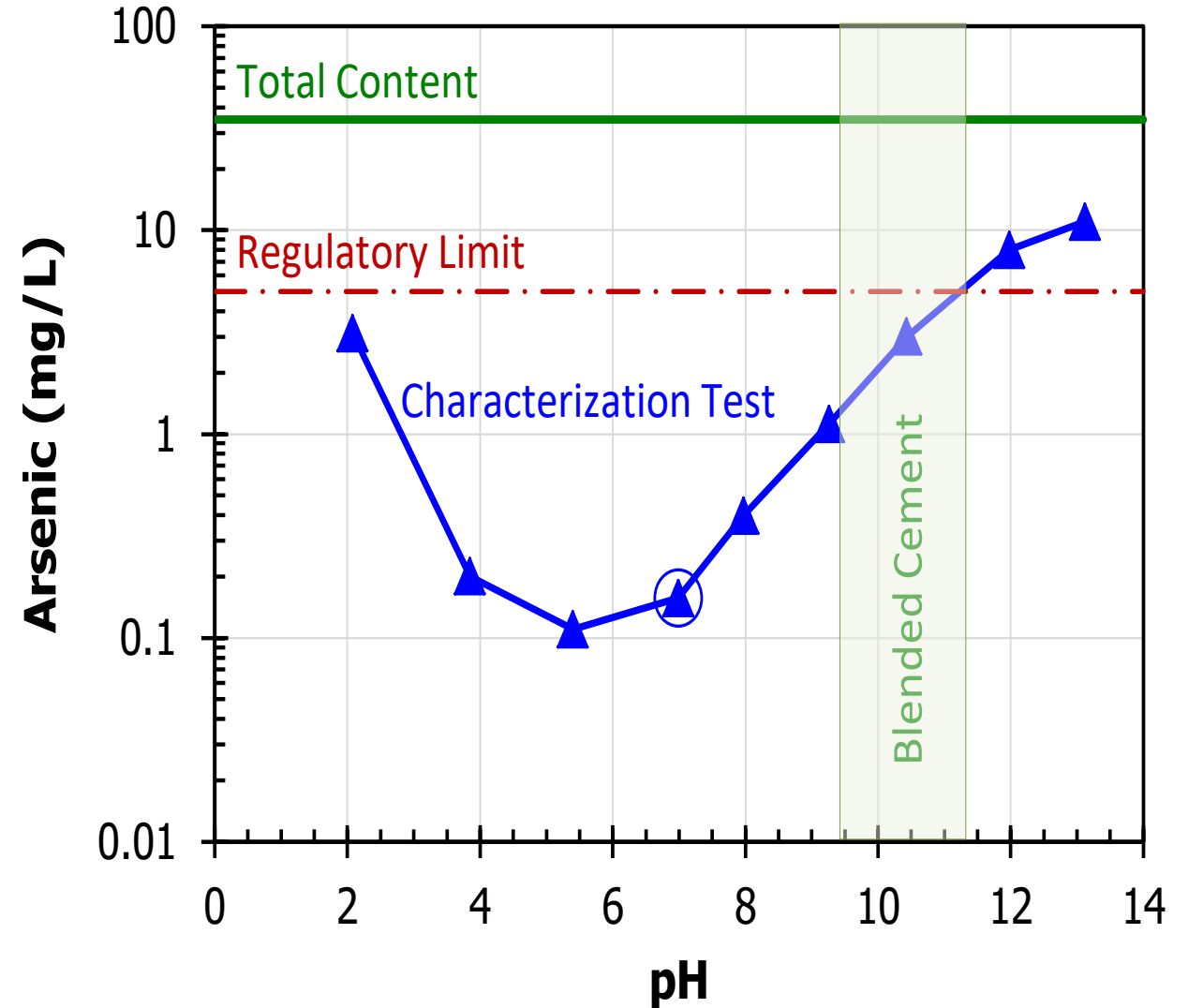
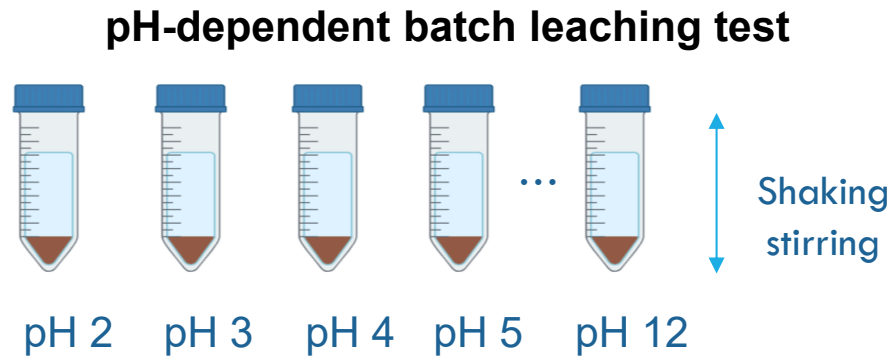
Kolom-uitloogtest

$L/S = 10 \text{ l/kg}$, 7 fracties, 21 dagen



Uitloogtesten voor karakterisering van materialen

Vb. pH-afhankelijk uitlooggedrag



pH-afhankelijke uitloging

Dayioglu (2024)

- **Batch- en kolomuitloogtesten** het uitlooggedrag van sporenmetalen uit zuivere of behandelde **staalslakken in wegbermen** naar oppervlaktewateren te beoordelen.
- numeriek model gebruikt om de metaalconcentraties in het oppervlaktewater te bepalen in relatie tot de afstand tot de berm.
- Door kleiachtige dijkgrond rond zuivere of behandelde staalslakken aan te brengen, worden de metaalconcentraties in het percolaat aanzienlijk verminderd.

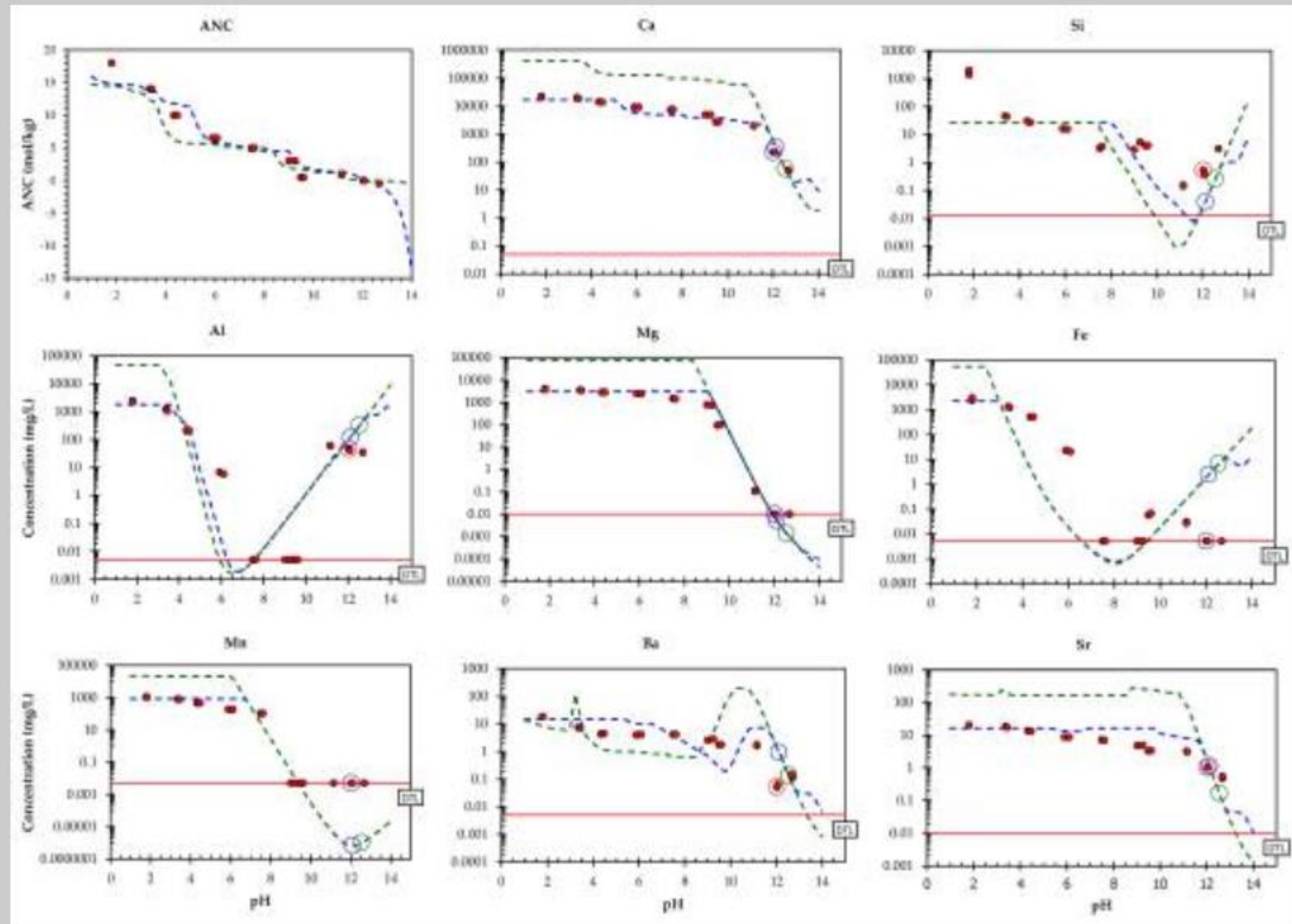
pH-afhankelijke uitloging

Locnar et al. (2022)

- In de hele **stortplaats** (staalslakken) bepalen dezelfde mineralen en fasen (sorptie) de uitloging van elementen, ondanks variaties in de chemische samenstelling.
- Er werd ook vastgesteld dat uitloging uit de stortplaats een beperkt effect heeft op de kwaliteit van het grondwater
- In de grondwatermonsters (met een pH van ongeveer 7,9), lagen de concentraties van de meeste elementen (Cr, Ni en Pb) zelfs onder de detectielimieten.
- Bovendien bleken er geen merkbare verschillen waren tussen de grondwaterconcentraties stroomopwaarts en stroomafwaarts van de stortplaats.

Loncnar M, Mladenovič A, Zalar Serjun V, Zupančič M, van der Sloot HA (2022). **Leaching and Geochemical Modelling of an Electric Arc Furnace (EAF) and Ladle Slag Heap**. Toxics. 2022 Jan 1;10(1):10. doi: 10.3390/toxics10010010. PMID: 35051052; PMCID: PMC8778747.

pH afhankelijk uitloosgedrag



Evaluatie van uitlooggedrag van slakken in aggregaten, asfalt, cement

Nguyen et al. (2022)

- Kwaliteitscontrole van Vietnamese staalslakken voor **aggregaten voor wegenbouw** en evaluatie van de milieu-impact daarvan
- Twee verschillende batch uitloogtesten werden uitgevoerd
- Uitgeloogde concentraties beneden de norm voor industrieel afvalwater
- De zure omstandigheden die in EPA 1311 werden gebruikt, waren niet representatief voor de omstandigheden die tijdens het hergebruik van slakken in de wegenbouw worden verwacht

Nguyen, .H., Nguyen, T.D., Tran, T.V.N. et al. (2022). **Steel slag quality control for road construction aggregates and its environmental impact: case study of Vietnamese steel industry—leaching of heavy metals from steel-making slag**. Environ Sci Pollut Res 29, 41983–41991. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16438-1>

Evaluatie van uitlooggedrag van slakken in aggregaten, asfalt, cement

Gan et al. (2022)

- Evaluatie van het type asfalt, het type grind, het asfaltgehalte en de temperatuur op de uitloogconcentratie van zware metalen in **asfalmengsels met staalslakken**
- Het risico op uitspoeling (**TCLP uitloogtest**) van staalslakken werd aanzienlijk verminderd nadat deze waren verwerkt in asfalmengsels.

Salas et al. (2025)

- De studie evalueerde het gedeeltelijk vervangen van natuurlijke aggregaten in beton en poreuze **asfalmengsels** door **hoogovenslakken**
- De cumulatieve uitloging (**diffusietest**) van Cr en V, was ver beneden de limieten die zijn vastgesteld in het Nederlandse Besluit bodemkwaliteit (BBK)

Gan Y. ,Li, C. Zou J., et al.(2022). **Evaluation of the impact factors on the leaching risk of steel slag and its asphalt mixture**. Case Stud. Constr. Mater., 16 (2022), Article e01067

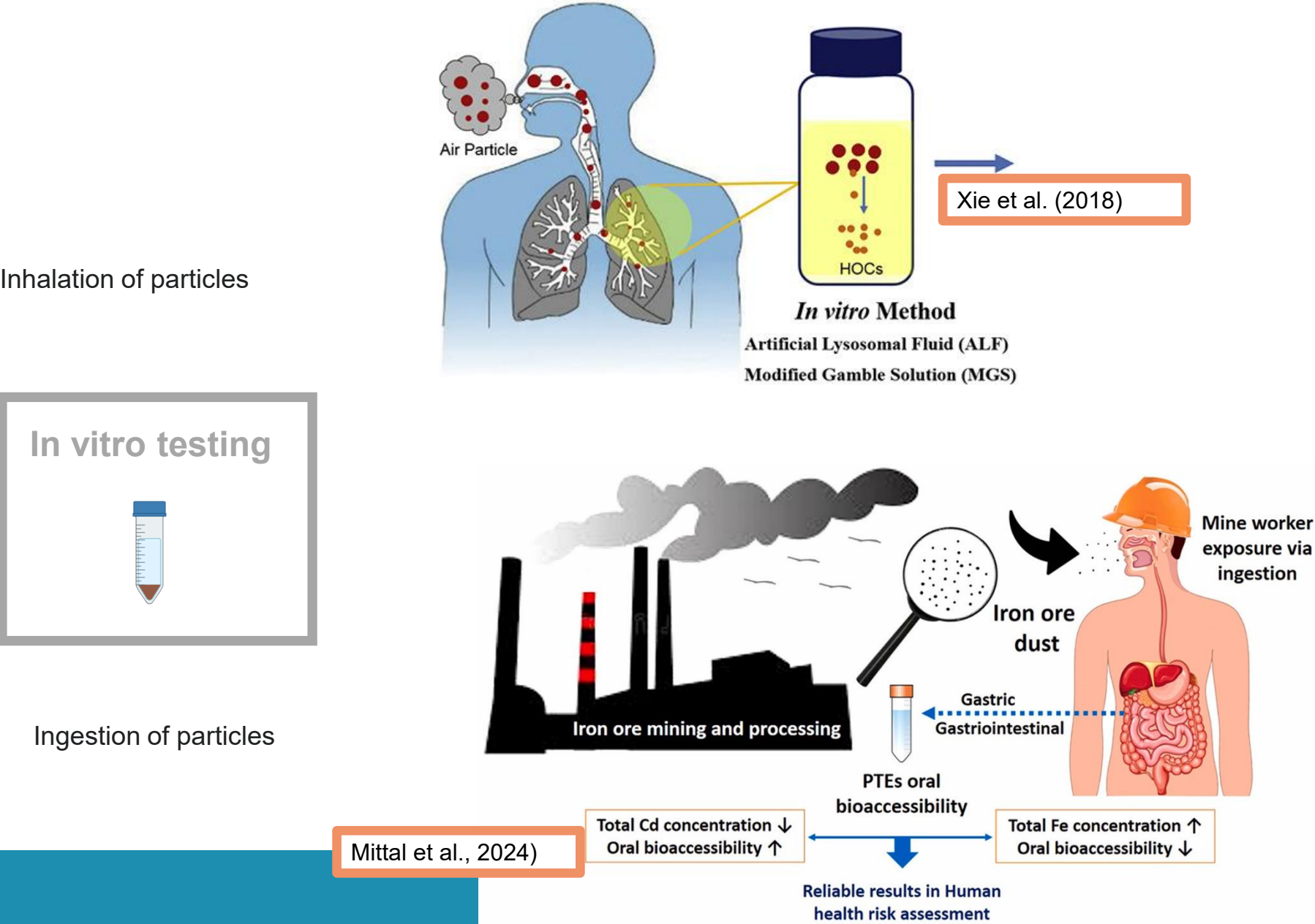
Salas, I., Cifrian, E., Lastra-González, P., Castro-Fresno, D., & Andrés, A. (2025). **Assessment of Dynamic Surface Leaching of Asphalt Mixtures Incorporating Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate for Sustainable Road Construction**. *Sustainability*. 17(8), 3737. <https://doi.org/10.3390/su17083737>

2.2 Langetermijn monitoring van uitloging op het terrein

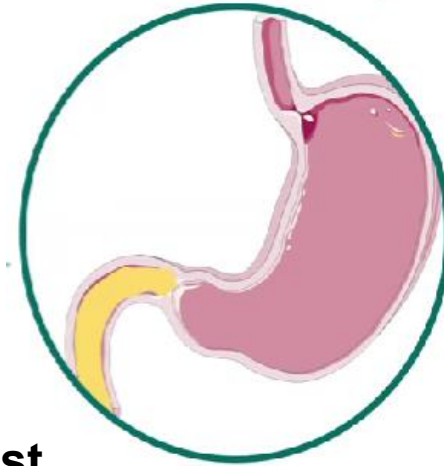
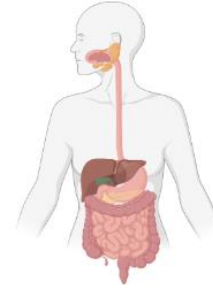
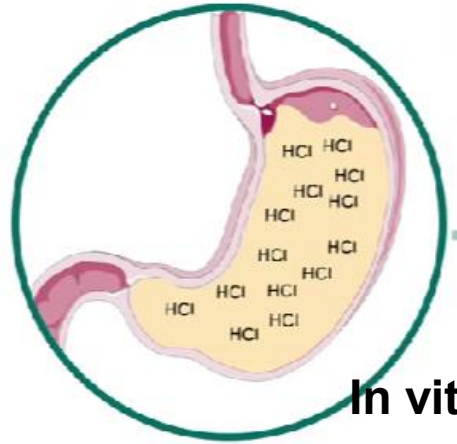
Riley & Mayes (2015)

- 36 jaar durende monitoring van fysisch-chemische parameters en elementconcentraties in waterlopen in Noord-Engeland die verontreinigd zijn door uitlogen van staalslakken
- Het water werd gekenmerkt door een **verhoogde pH-waarde (>10)**, een hoge alkaliteit en een **hoog gehalte aan opgeloste metalen (Ca, Al, Zn)**.
- **langdurige vervuiling** als gevolg van het storten en vervolgens uitlogen van staalslakken.
- De afname van calcium en alkaliteit was tijdens de meetperiode bescheiden en ging niet gepaard met een significante daling van de pH-waarde van het water.

2.3 In vitro testen: risico voor de mens (opname)



Orale biobeschikbaarheid



In vitro biobeschikbaarheidstest

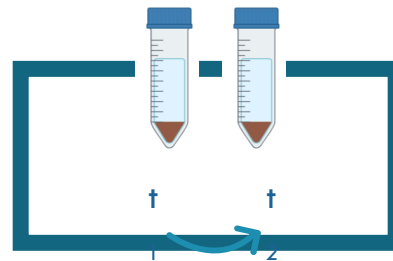
Maag-fase

pH 1.5

Duur: 1 h

Temp: 37°C

L/S ratio: 50 or 100 l/kg



Warmwater bad op
horizontale
schudmachine

Darm-fase

pH 7

Duur: 3 h

Temp: 37°C

L/S ratio: 50 or 100 l/kg

Orale biobeschikbaarheid

In vitro biobeschikbaarheidstest

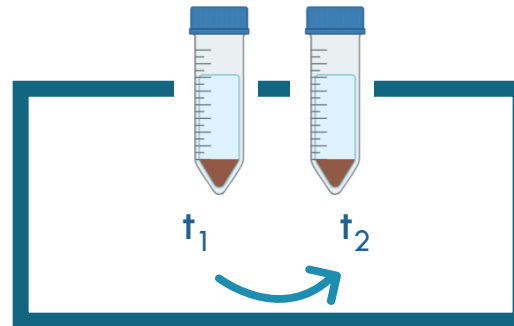
Maag-fase

pH 1.5

Duur: 1 h

Temp: 37°C

L/S ratio: 50 or 100 l/kg



Warmwater bad
met horizontale
schudmachine



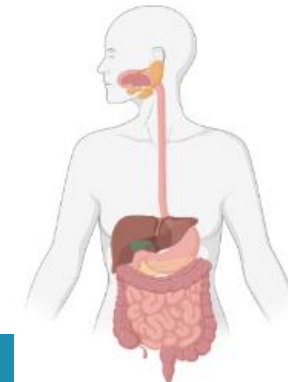
Darm-fase

pH 7

Duur: 3 h

Temp: 37°C

L/S ratio: 50 or 100 l/kg



In vitro biobeschikbaarheid en risico voor de gezondheid (kanker)

Mittal et al. (2024)

- Over het algemeen bleek, op basis van biobeschikbaarheidstesten en modellering dat het gebruik van EAF-slakken in woonwijken waarschijnlijk geen gevaar voor de gezondheid of een verhoogd risico op kanker met zich meebrengt.

Deze studie zegt niets over de (zeer) korte termijn gevolgen van rechtstreeks contact met de slakken (vb. irritatie van de huid)

Mittal, L., Perry, C. S., Blanchette, A. D., & Proctor, D. M. (2024). Probabilistic risk assessment of residential exposure to electric arc furnace steel slag using Bayesian model of relative bioavailability and PBPK modeling of manganese. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis, 44(9), 2169–2186.
<https://doi.org/10.1111/risa.14309>

3. Regelgeving en beleid in Vlaanderen

VLAREMA : Vlaams Reglement betreffende het duurzaam beheer van
Materiaalkringlopen en Afvalstoffen
Grondstoffenregeling metallurgie



Ministerieel besluit over de vaststelling van de lijst met materialen, afkomstig van en bestemd voor metallurgische productieprocessen voor non-ferrometalen, en de lijst met materialen, afkomstig van metallurgische productieprocessen voor ferrometalen, die als grondstoffen worden gebruikt

Bijlage 2. bij het ministerieel besluit over de vaststelling van de lijst met materialen, afkomstig van metallurgische productieprocessen voor ferrometalen, die als grondstoffen worden gebruikt

benaming materiaal	herkomst metallurgisch productieproces voor ferrometalen	samenstelling	vaste stof (V) vloeistof (VI)	bestemming	bijkomende informatie Einecs-nummer
convertorslakken ArcelorMittal Belgium (Gent)	productie van staal in een convertor	Samenstelling in gewichtspersent: 36,2-55% CaO, 5,7-20,4% SiO ₂ , 0,5-5,2% Al ₂ O ₃ , 11,2-36,4% FeO, 0,5-10,8 MgO, 2,1-7,5% MnO, 0-0,3% S, 0-0,035% MoO ₃ , 1-3,6% P ₂ O ₅ , 0-1,3% V ₂ O ₅ Zware metalen in mg/kg ds: <267 mg/kg ds As, <30 mg/kg ds Cd, <3000 mg/kg ds Cr, <500 mg/kg ds Cu, <11 mg/kg ds Hg, <530 mg/kg ds Ni, <1250 mg/kg ds Pb, <1250 mg/kg ds Zn	V	gebruik als waterbouwstenen in grootschalige geïnventariseerde werken (> 1000 m³ slak)	294-409-3
convertorslakken ArcelorMittal Belgium (Gent)	productie van staal in een convertor	Samenstelling in gewichtspersent: 36,2-55% CaO, 5,7-20,4% SiO ₂ , 0,5-5,2% Al ₂ O ₃ , 11,2-36,4% FeO, 0,5-10,8 MgO, 2,1-7,5% MnO, 0-0,3% S, 0-0,035% MoO ₃ , 1-3,6% P ₂ O ₅ , 0-1,3% V ₂ O ₅ Zware metalen in mg/kg ds: <267 mg/kg ds As, <30 mg/kg ds Cd, <3000 mg/kg ds Cr, <500 mg/kg ds Cu, <11 mg/kg ds Hg, <530 mg/kg ds Ni, <1250 mg/kg ds Pb, <1250 mg/kg ds Zn	V	als waterdoorlatende fundering, open verharding gebruik beperkt tot grootschalige geïnventariseerde werken (> 1000 m³ slak)	294-409-3
convertorslakken ArcelorMittal Belgium (Gent)	productie van staal in een convertor	Samenstelling in gewichtspersent: 36,2-55% CaO, 5,7-20,4% SiO ₂ , 0,5-5,2% Al ₂ O ₃ , 11,2-36,4% FeO, 0,5-10,8 MgO, 2,1-7,5% MnO, 0-0,3% S, 0-0,035% MoO ₃ , 1-3,6% P ₂ O ₅ , 0-1,3% V ₂ O ₅ Zware metalen in mg/kg ds: <267 mg/kg ds As, <30 mg/kg ds Cd, <3000 mg/kg ds Cr, <500 mg/kg ds Cu, <11 mg/kg ds Hg, <530 mg/kg ds Ni, <1250 mg/kg ds Pb, <1250 mg/kg ds Zn	V	In dijken gebruik beperkt tot grootschalige geïnventariseerde werken (> 1000 m³ slak)	294-409-3
convertorslakken ArcelorMittal Belgium (Gent)	productie van staal in een convertor	Samenstelling in gewichtspersent: 36,2-55% CaO, 5,7-20,4% SiO ₂ , 0,5-5,2% Al ₂ O ₃ , 11,2-36,4% FeO, 0,5-10,8 MgO, 2,1-7,5% MnO, 0-0,3% S, 0-0,035% MoO ₃ , 1-3,6% P ₂ O ₅ , 0-1,3% V ₂ O ₅ Zware metalen in mg/kg ds: <267 mg/kg ds As, <30 mg/kg ds Cd, <3000 mg/kg ds Cr, <500 mg/kg ds Cu, <11 mg/kg ds Hg, <530 mg/kg ds Ni, <1250 mg/kg ds Pb, <1250 mg/kg ds Zn	V	in de echte stortinfrastructuur van stortplaatsen overeenkomstig VLAREM II afdeling 5.2.4	294-409-3
convertorslakken ArcelorMittal Belgium (Gent)	productie van staal in een convertor	Samenstelling in gewichtspersent: 36,2-55% CaO, 5,7-20,4% SiO ₂ , 0,5-5,2% Al ₂ O ₃ , 11,2-36,4% FeO, 0,5-10,8 MgO, 2,1-7,5% MnO, 0-0,3% S, 0-0,035% MoO ₃ , 1-3,6% P ₂ O ₅ , 0-1,3% V ₂ O ₅ Zware metalen in mg/kg ds: <267 mg/kg ds As, <30 mg/kg ds Cd, <3000 mg/kg ds Cr, <500 mg/kg ds Cu, <11 mg/kg ds Hg, <530 mg/kg ds Ni, <1250 mg/kg ds Pb, <1250 mg/kg ds Zn	V	In een door de OVAM conform verklaard bodemsaneringsproject	294-409-3

29 maart 2024

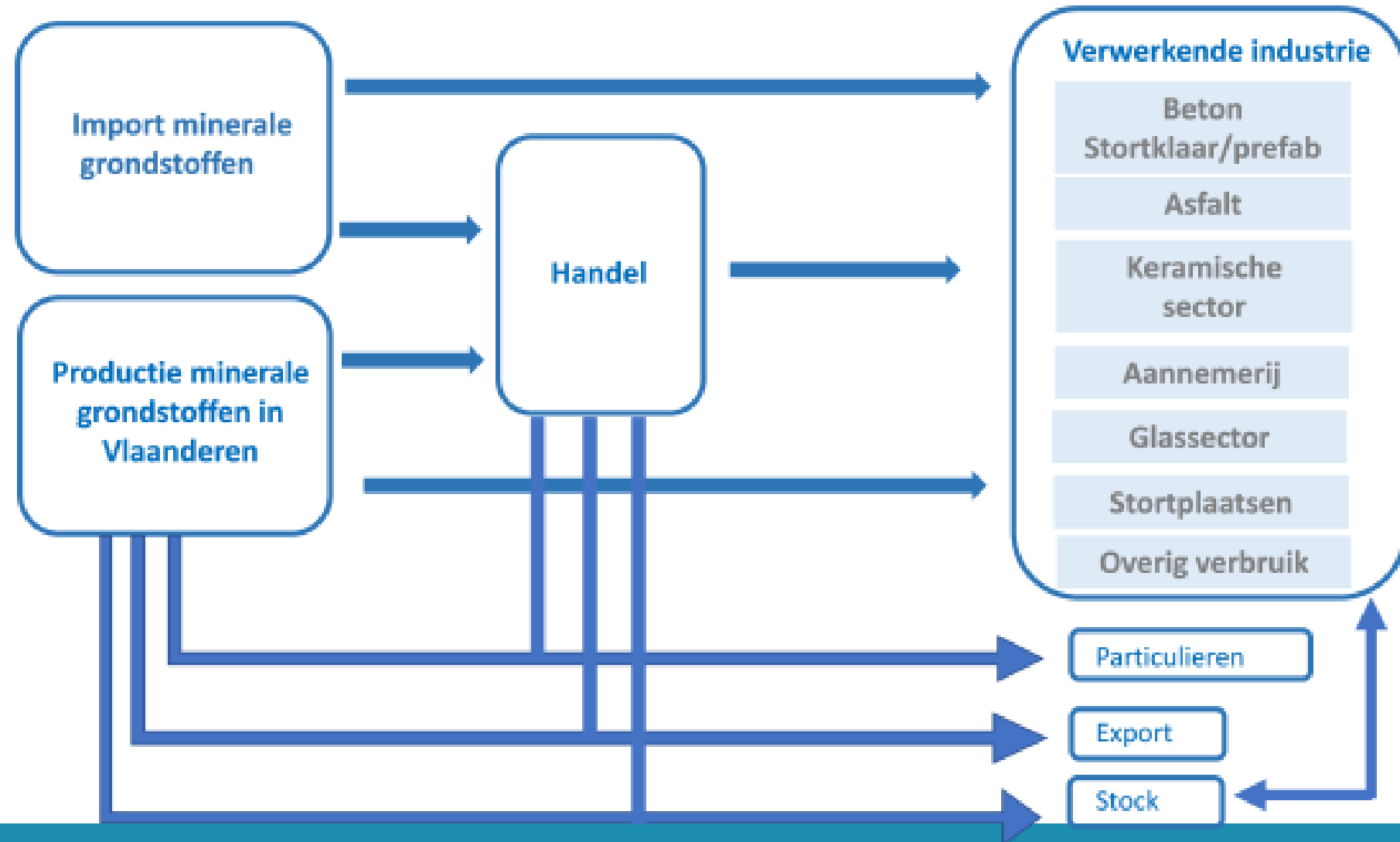
////////////////////////////////////
Titel: gebruik van convertorslakken (ook LD-slakken genoemd) van
de staalindustrie als bouwstof

Contact: metallurgie@ovam.be
////////////////////////////////////

De convertorslakken (ook LD-slakken genoemd) geproduceerd door ArcelorMittal Belgium, John Kennedylaan 51 te 9042 Gent (Zelzate) kunnen gebruikt worden voor de **toepassingen die vermeld zijn in bijlage 2 van het ministerieel besluit** van 9 februari 2024 (raadpleegbaar op de webpagina [Grondstoffenregeling metallurgie \(vlaanderen.be\)](https://www.vlaanderen.be/grondstoffenregeling-metallurgie)). Zoals bepaald in bijlage 2 van het ministerieel besluit moet het gebruik van convertorslakken als waterbouwstenen, waterdoorlatende fundering, open verharding, of in dijken, gebeuren in **grootschalige werken** met een omvang **groter dan 1000 m³**. Het werk heeft bij voorkeur een lange levensduur en moet door ArcelorMittal Belgium geregistreerd worden in het **webloket geïnventariseerde werken** beschikbaar op de OVAM website

MDO: Monitoringsysteem Duurzaam Oppervlakedelfstoffenbeleid

- data over primaire delfstoffen en alternatieve grondstoffen in Vlaanderen.
- kwantificeert en volgt de evolutie van de minerale grondstoffen stromen in Vlaanderen



Inzet	Hoeveelheid	
	kton	%
Primaire delfstoffen	27.022	41%
Alternatieve grondstoffen	38.220	59%
Gerecycleerde granulaten van bouw- en sloopafval	17.269	26%
Uitgegraven bodem en specie	18.395	28%
Overige alternatieve grondstoffen	2.557	4%
Bodemassen	78	<1%
Vliegassen	103	<1%
Slakken van de ferro-industrie	1.459	2%
Slakken van de non-ferro-industrie	319	<1%
Vlakglas	100	<1%
Holglas	8	<1%
Gieterijzand	21	<1%
Zinkassen	18	<1%
Gemalen baksteen	13	<1%
Mijnsteen	147	<1%
Papiervezel	78	<1%
Slib van natuursteenbewerking	64	<1%
Andere**	149	<1%
Totale inzet in vlaanderen in 2018	65.242	100%

2018

Definities MDO

Alternatieve grondstoffen

Slakken van de ferro-industrie of ferroslakken

“ontstaan bij de productie (smelten) of het gieten van ferrometalen. In de oven worden ertsen en/of metaalhoudende afvalstoffen (voornamelijk schroot) gesmolten, en toeslagstoffen (zoals zand, kalk) toegevoegd. Tijdens het smeltproces wordt in de oven naast de metaalfase een slakkenfase gevormd. De slakkenfase wordt in vloeibare vorm afgetapt uit de oven. De vloeibare slakken worden gegraneerd door middel van een waterstraal, of koelen aan de lucht. Na afkoeling worden de slakken meestal nog gebroken, gezeefd en/of gedemetalliseerd.”

4. Toepassingen van LD-slakken in Vlaanderen

ArcelorMittal

Vloeibare slakken

- Omgevormd tot LD-grind: gebruikt in wegenbouw als alternatieve grondstof voor porfier
- Andere (niet-LD-grind):
 - verharding van bijvoorbeeld wegen en opritten
 - voor waterbouwkundige werken, zoals de oeeverversteving van de Westerschelde.



Bron: <https://belgium.arcelormittal.com/verantwoordelijkheid/milieu/natuurlijke-rijdommen/>

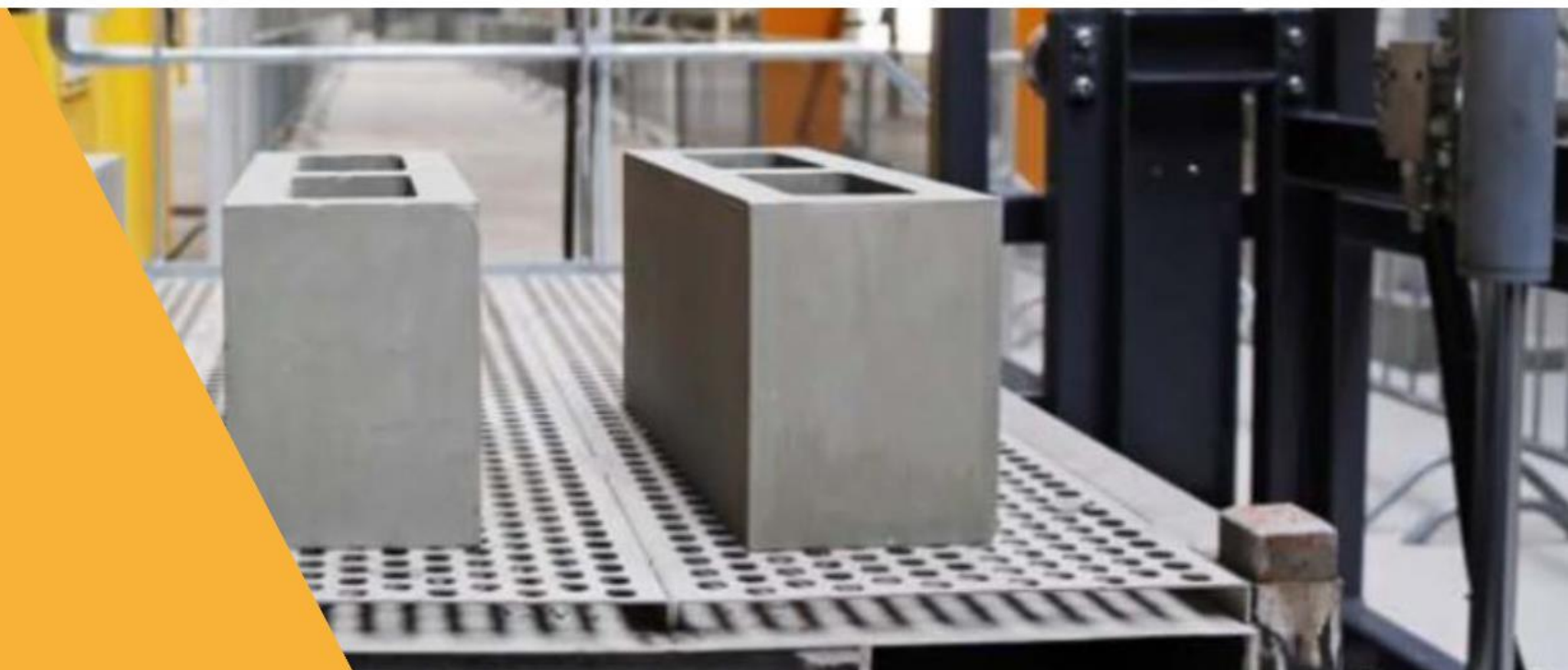
Carbstone: van CO₂ tot bouw materiaal

Bij VITO ontwikkelden we een technologie om tegels, dakpannen, klinkers, boordstenen en bouwblokken te maken van het calciumrijke staalslakpoeder. Daarbij gebruiken we CO₂ als bindmiddel. Cement is niet meer nodig. Dat proces heet **carbonatatie**.

De Vlaamse staalindustrie produceert jaarlijks ruim 700 000 ton staalslakken als bijproduct. Wereldwijd gaat het zelfs over 200 miljoen ton. Die staalslakken werden vroeger gestort. Door toevoeging van CO₂ worden ze nu een grondstof voor duurzame bouwmaterialen.



Stapsteen naar een circulaire stad



11 RELEASE OF DANGEROUS SUBSTANCES TO INDOOR AIR, SOIL AND WATER DURING THE USE STAGE



11.1 Indoor air

Not applicable.

Niet van toepassing.

11.2 Soil and water

Not applicable.

Niet van toepassing.

ct – van
eclaration
product
ntieel om
unormen.

Dank voor jullie aandacht!

valerie.cappuyns@kuleuven.be

Prof. Dr. Valérie Cappuyns

KU Leuven, Campus Brussels
Warrmoesberg 26
1000 Brussels
Belgium



Referenties

- Baalamurugan, J., Ganesh Kumar, V., Naveen Prasad, B.S.N. et al. Recycling of induction furnace steel slag in concrete for marine environmental applications towards ocean acidification studies. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 5039–5048 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03362-7>
- Chaurand, P., Rose, J., Briois, V., Olivi, L., Hazemann, J. L., Proux, O., Domas, J., & Bottero, J. Y. (2007). Environmental impacts of steel slag reused in road construction: a crystallographic and molecular (XANES) approach. *Journal of hazardous materials*, 139(3), 537–542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.060>
- Dayioglu A.Y. (2024) pH-Dependent Leaching Characteristics of Steel Slag Mitigated with Water Treatment Residual. *Geotech. Test. J.* 47 (1): 294–313. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220288>
- Deepti, Sinha, A., Biswas, P., Sarkar, S., Bora, U., & Purkait, M. K. (2020). Utilization of LD slag from steel industry for the preparation of MF membrane. *Journal of environmental management*, 259, 110060. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110060>
- Di Maria, A., Salman, M., Dubois, M. et al. Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. *Int J Life Cycle Assess* 23, 2091–2109 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1440-1>
- Gan Y. ,Li, C. Zou J., et al.(2022). Evaluation of the impact factors on the leaching risk of steel slag and its asphalt mixture. *Case Stud. Constr. Mater.*, 16 (2022), Article e01067
- Loncnar M, Mladenovič A, Zalar Serjun V, Zupančič M, van der Sloot HA (2022). Leaching and Geochemical Modelling of an Electric Arc Furnace (EAF) and Ladle Slag Heap. *Toxics*. 2022 Jan 1;10(1):10. doi: 10.3390/toxics10010010. PMID: 35051052; PMCID: PMC8778747.

- Mittal, L., Perry, C. S., Blanchette, A. D., & Proctor, D. M. (2024). Probabilistic risk assessment of residential exposure to electric arc furnace steel slag using Bayesian model of relative bioavailability and PBPK modeling of manganese. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis, 44(9), 2169–2186. <https://doi.org/10.1111/risa.14309>
- Nguyen, .H., Nguyen, T.D., Tran, T.V.N. et al. (2022). Steel slag quality control for road construction aggregates and its environmental impact: case study of Vietnamese steel industry—leaching of heavy metals from steel-making slag. Environ Sci Pollut Res 29, 41983–41991. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16438-1>
- Ning, D., Liang, Y., Liu, Z., Xiao, J., & Duan, A. (2016). Impacts of Steel-Slag-Based Silicate Fertilizer on Soil Acidity and Silicon Availability and Metals-Immobilization in a Paddy Soil. PloS one, 11(12), e0168163. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168163>
- Riley, A.L., Mayes, W.M. Long-term evolution of highly alkaline steel slag drainage waters. Environ Monit Assess 187, 463 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4693-1>
- Salas, I., Cifrian, E., Lastra-González, P., Castro-Fresno, D., & Andrés, A. (2025). Assessment of Dynamic Surface Leaching of Asphalt Mixtures Incorporating Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate for Sustainable Road Construction. Sustainability, 17(8), 3737. <https://doi.org/10.3390/su17083737>
- Ulewicz, M., Jura, J., Zieliński, A., & Pietraszek, J. (2024). The Application of Converter Sludge and Slag to Produce Ecological Cement Mortars. Materials, 17(17), 4295. <https://doi.org/10.3390/ma17174295>
- Cunha Soares Veiga Simão, F., Chambart, H., Vandemeulebroeke, L., Nielsen, P., Raka Adrianto, L., Pfister, S., Cappuyns, V. (2022). Mine waste as a sustainable resource for facing bricks. Journal Of Cleaner Production, 368, Art.No. 133118. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133118
- Yılmaz, D. (2021). Vanadium recovery from steel converter slag utilised as an oxygen carrier in oxygen carrier aided combustion (OCAC). Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126159>