



---

# Uitloging LD-staalslakken

Overzicht bestaande kennis van de effecten bij toepassing in de Ooster- en Westerschelde

Auteur(s): J.W.M. Wijsman, E.M. Foekema en M.J. van den Heuvel-Greve

Wageningen University &  
Research rapport C025/24

# Uitloging LD-staalslakken

Overzicht bestaande kennis van de effecten bij toepassing in de Ooster- en Westerschelde

Auteur(s) J.W.M. Wijsman, E.M. Foekema en M.J. van den Heuvel-Greve

Wageningen Marine Research, Regiocentrum Yerseke

Wageningen Marine Research  
Yerseke, mei 2024

---

Wageningen Marine Research rapport C025/24

---

J.W.M. Wijsman, E.M. Foekema en M.J. van den Heuvel-Greve, 2024. *Uitloging LD-staalslakken; Overzicht bestaande kennis van de effecten bij toepassing in de Ooster- en Westerschelde*. Wageningen, Wageningen Marine Research, Wageningen Marine Research rapport C025/24.

Keywords: Staalslakken, mesocosms, schelpdieren, mariene milieu, Oosterschelde

Opdrachtgever PO Mosselcultuur  
Postbus 116  
4400 AC Yerseke

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/657884>  
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Edwin Foekema

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research, hierbij vertegenwoordigd door  
Drs.ir. M.T. van Manen, directeur bedrijfsvoering

KvK nr. 09098104,  
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.  
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U  
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen Marine Research. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van aanspraken van derden in verband met deze toepassing.  
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

A\_4\_3\_1 V33 (2023)

---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Aanleiding</b>	<b>5</b>
2.1 Productieproces	6
2.2 De samenstelling van staalslakken	7
2.3 Uitloging	7
<b>3 Effecten van staalslakken in het mariene milieu</b>	<b>9</b>
3.1 Uitloogexperimenten	9
3.2 Zwevend stof	11
3.3 Veldmetingen	12
3.3.1 Metaalgehalten in organismen	12
3.3.2 Rekolonisatie	12
3.4 Mesocosm experimenten	13
3.5 Ontwikkeling pH in de Oosterschelde	15
3.6 Habitat kreeft	17
<b>4 Conclusies</b>	<b>18</b>
<b>5 Kwaliteitsborging</b>	<b>19</b>
<b>Literatuur</b>	<b>20</b>
<b>Verantwoording</b>	<b>22</b>

---

# Samenvatting

Er is veel bezorgdheid over het gebruik van staalslakken in de Oosterschelde en Westerschelde. Staalslakken zijn bijproducten van de staalproductie en worden onder andere toegepast als oever- of bodembekleding in de waterbouw. Dit roept zorg op bij verschillende belanghebbenden, zoals schelpdierkwekers, kreeftenvissers en natuurliefhebbers, vanwege de verstoring van het oorspronkelijke habitat en de mogelijke uitloging van zware metalen en zouten uit de staalslakken. Staalslakken bevatten, net als breuksteen, zware metalen die in potentie kunnen uitlogen naar het water, waarna ze kunnen worden opgenomen door filterende schelpdieren, zoals oesters en mosselen. Ook leidt het toepassen van vooroeververdediging tot tijdelijke vertroebeling van het water vanwege de aanwezigheid van stofdeeltjes in het materiaal, en kan onder specifieke omstandigheden uitloging van staalslakken leiden tot een verhoging van de pH (zuurgraad).

Dit rapport geeft een overzicht van wat er tot dusverre bekend is over eventuele effecten van vooroeververdediging op de natuur in de Oosterschelde en Westerschelde.

## *Uitloging*

Staalslakken zijn rijk aan (zware) metalen die door uitloging kunnen vrijkomen in het water. De uitloging van metalen uit staalslakken is afhankelijk van het productieproces, de samenstelling van de staalslakken, en de omgeving waarin ze worden toegepast. Tijdens een zogenaamde mesocosmstudie met Oosterscheldewater bleken vooral de metalen vanadium en chroom, en in mindere mate, barium, mangaan, ijzer, aluminium, kobalt en molybdeen uit de staalslakken te logen. Bij een realistische verversingssnelheid leidde dit alleen voor vanadium en chroom tot significant verhoogde waterconcentraties in de eerste 4 weken na het aanbrengen van de staalslakken.

## *Zwevend stof*

Tijdens het aanbrengen van staalslakken, maar ook bij stortsteen en zeegrind komt er zwevend stof vrij in het water, dat leidt tot een tijdelijke vertroebeling van het water. Mosselen die het zwevend stof uit het water filteren zouden hier last van kunnen hebben. Op basis van onderzoek kon er geen verband worden gelegd tussen de blootstelling van mosselen aan zwevend stof dat was vrijgekomen bij de toepassing van breukstenen en staalslakken, en de ontwikkeling van een bepaalde stressrespons, granulocytoma's, bij mosselen.

## *pH*

Het in de staalslakken aanwezige vrije kalk kan met CO<sub>2</sub> in het water reageren, wat leidt tot de vorming van calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>). Als gevolg van verwijderen van het CO<sub>2</sub> uit het water zal de pH (zuurgraad) stijgen. Door de hoge verversingsgraad door de getijdenbewegingen in combinatie met grote buffercapaciteit van zeewater, ligt het niet in de lijn der verwachting dat de op dit moment in de Oosterschelde en de Westerschelde aanwezige staalslakken leiden tot een meetbare verhoging van de pH. Dit werd geconstateerd in een mesocosmstudie met realistische verversingssnelheden en bevestigd door een lange-termijn meetreeks van pH waarden in de Oosterschelde.

## *Effecten*

Uit de beschikbare literatuur en onderzoeksrapporten blijkt dat er geen negatieve effecten zijn aangetoond op mosselen als gevolg van de uitloging van zware metalen uit staalslakken die zijn gebruikt bij waterbouwkundige werkzaamheden in de Oosterschelde en Westerschelde. Wel laat onderzoek zien dat het onderwaterleven in de vooroever wordt verstoord tijdens dijkversterkingen, omdat bodemdieren worden bedekt met staalslakken, breuksteen, zeegrind of ander materiaal. Het herstel van het bodemleven hangt af van factoren zoals het type toegepast materiaal (ruwheid van het oppervlak), de sortering (ruimte voor organismen om zich te verschuilen) en de lokale omgevingscondities. Tenslotte zou het leefgebied van kreeften kunnen verminderen door zogenaamde carbonatatie (vorming van calciumcarbonaat), waardoor de holtes tussen de staalslakken dicht raken.

---

# 1 Aanleiding

Staalslakken worden regelmatig gebruikt bij vooroeververdedigingen in de Oosterschelde en Westerschelde. Er worden regelmatig zorgen geuit over het gebruik van staalslakken in vooroeververdedigingen door schelpdierkwekers, kreeftenvissers, duikers en natuurliefhebbers, omdat het oorspronkelijke habitat wordt aangetast en omdat er zware metalen uit de staalslakken kunnen vrijkomen. Staalslakken bevatten namelijk veel metalen en zouten die door uitloging kunnen vrijkomen in het water. De uitloging van stoffen uit staalslakken is afhankelijk van het productieproces, de samenstelling van de staalslakken en de omgeving waarin het wordt toegepast. Het aanbrengen van staalslakken, breuksteen of grind bij dijkverzwaringen in de vooroever heeft gevolgen voor de aanwezige organismen. De aan de oorspronkelijke ondergrond gehechte lokale flora en fauna zal verdwijnen, doordat het wordt afgedekt. Nieuwe organismen zullen zich opnieuw dienen te vestigen op en tussen het harde substraat van de bestortingen. De structuur (vorm, grootte, ruwheid oppervlak) van de nieuwe dijkbekleding is bepalend voor de rekolonisatie en het herstel van de bodemdiergemeenschap.

Mosselkwekers zijn vooral bezorgd dat zware metalen uit de staalslakken kunnen vrijkomen in het zeewater en vervolgens door mosselen worden opgenomen, waardoor de gehalten aan zware metalen in het mosselvlees te hoog worden voor consumptie of de mosselen mogelijk kunnen sterven. Er is in de afgelopen jaren veelvuldig onderzoek gedaan naar uitloging van (zware) metalen uit staalslakken en effecten daarvan op bodemdieren (Dubbeldam, 2011, Schellekens et al., 2014, Jansen et al., 2015, Tangelder et al., 2015a, Foekema et al., 2016, Escaravage en Kamermans, 2018).

De producentenorganisatie van de Nederlandse mosselcultuur heeft Wageningen Marine Research gevraagd om de resultaten van deze onderzoeken bij elkaar te brengen in een overzichtelijke briefrapportage (Wijsman, 2023), zodat haar leden beter kunnen worden geïnformeerd. In dit rapport is een overzicht gemaakt van de beschikbare kennis en literatuur over uitloging van zware metalen uit staalslakken en de effecten daarvan op bodemdieren in mariene systemen. Ter vergelijking wordt ook de uitloging van zware metalen uit breuksteen beschreven. Voorliggend rapport is een geactualiseerde versie van een eerdere briefrapportage (Wijsman, 2023). In het voorliggende rapport is o.a. ook een analyse opgenomen van de ontwikkeling van de pH in het water van de Oosterschelde. Dit omdat er aanvullende zorgen zijn omtrent de verhoging van de pH als gevolg van het gebruik van staalslakken.

---

## 2 Staalslakken

Staalslakken zijn restproducten van afvalverwerking (verbrandingsovens) en industrie die worden hergebruikt in de weg- en waterbouw. Staalslakken zijn bijproducten van de productie van staal. LD-slak (Figuur 1, soms ook hoogovenstaalslak genoemd) komt vrij bij de productie van staal uit ruwijzer en schroot volgens het Linz-Donawitz (LD) procedé.



**Figuur 1:** LD-staalslakken geproduceerd volgens het Linz-Donawitz procedé (bron ROXX international).

In Nederland komt jaarlijks circa 500 000 ton staalslak vrij. Daarvan wordt 200 000 à 300 000 ton in de vorm van LD-mengsel toegepast. LD-mengsel bestaat voor 90% uit LD-staalslak, aangevuld met 10% gegraneerde hoogovenslak. Circa 100 000 ton wordt als oever- of bodembekleding in de waterbouw toegepast ([www.bodemrichtlijn.nl](http://www.bodemrichtlijn.nl)). Staalslakken zijn vanwege de hoge soortelijk gewicht en de grillige structuur, wat leidt tot een goede haakweerstand, uitermate geschikt als vooroeververdediging. Het gebruik van LD-staalslakken in de waterbouw wordt gezien als duurzamer alternatief dan bijvoorbeeld het gebruik van breuksteen, omdat er geen (extra) primaire materialen hoeven te worden gewonnen en dus het landschap wordt gespaard. Tevens kost het gebruiksklaar maken van staalslakken minder energie (als de energie voor de staalproductie niet wordt meegerekend) dan het winnen van de primaire grondstof en de transportafstanden zijn korter, waardoor er minder CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. Daarnaast bedragen de kosten van staalslakken slechts 40% van de kosten van breuksteen (Tangelder et al., 2015b).

### 2.1 Productieproces

Staalslakken zijn een bijproduct van de staalindustrie. In hoogovens wordt ijzererts onder toevoeging van warme lucht, een slakvormer (kalksteen) en een reductiemiddel (cokes) bij hoge temperatuur omgezet in hoogovengas, een vloeibare metallische fase (het ruwijzer) en een vloeibare oxidische fase (de hoogovenslak). De vloeibare hoogovenslak, die door de lagere dichtheid op het ruwijzer blijft drijven, wordt afgetapt en afgekoeld en kan worden gebruikt in de betonindustrie. Het vloeibare ruwijzer wordt met kalk, schroot (hergebruikt staal) en zuurstof omgezet in staal en staalslak. Dit proces wordt de methode van Linz-Donawitz (LD) genoemd (ook wel oxystaalproces). Hierbij worden de in het ruwijzer aanwezige verbindingen van elementen zoals silicium, fosfor, vanadium en mangaan als het ware uitgebrand en samen met een gering deel van het ijzer verbonden aan de oxidische fase. Door het gesmolten gesteente (smelt) snel af te koelen ontstaan de LD-staalslakken. De gestolde slak wordt opgebroken en in een breekzeefinstallatie gezeefd tot de gewenste sortering.

## 2.2 De samenstelling van staalslakken

De samenstelling van staalslakken varieert en is afhankelijk van de herkomst van het uitgangsmateriaal en het productieproces (zie hierboven). Tegenwoordig is er steeds meer sprake van een gecontroleerd en homogeen productieproces, waardoor de variatie in kwaliteit en samenstelling van de staalslakken is afgenomen. De staalslak bestaat uit een matrix van Al-silicaten,  $\text{Ca(OH)}_2$ , gereduceerde Fe en Mn fasen en sulfide (voornamelijk in vorm van FeS) (Van der Sloot et al., 1995). De belangrijkste elementen van staalslakken zijn silicium, aluminium, ijzer, calcium en mangaan (Tabel 1), veelal in de vorm van oxides.

**Tabel 1:** Gemiddelde samenstelling staalslakken (Van der Sloot et al., 1995). De samenstelling kan voor bepaalde elementen sterk variëren afhankelijk van het productieproces.

Component	Concentraties (mg kg <sup>-1</sup> )	Component	Concentraties (mg kg <sup>-1</sup> )
Aluminium (Al)	220 000	Kwik (Hg)	0.08
Calcium (Ca)	52 100	Molybdeen (Mo)	13
IJzer (Fe)	101 000	Nikkel (Ni)	150
Kalium (K)	8 700	Lood (Pb)	12
Mangaan (Mn)	32 000	Antimoon (As)	0.28
Natrium (Na)	5 400	Selenium (Se)	0.97
Silicium (Si)	289 000	Tin (Sn)	8.9
Arseen (As)	1.1	Vanadium (V)	2500
Barium (Ba)	134	Zink (Zn)	32
Cadmium (Cd)	0.66	Chloor (Cl)	372
Kobalt (Co)	11	Fluor (F)	222
Chroom (Cr)	1110	Sulfaat (SO <sub>4</sub> )	3620
Koper (Cu)	15		

Een groot deel van de elementen is vastgelegd in inerte verbindingen (stoffen die niet of nauwelijks met andere stoffen reageren) en zal daardoor niet vrijkomen. De hoeveelheid van de elementen die is vastgelegd in meer reactieve verbindingen (beschikbare hoeveelheid) is vaak een fractie van de totale hoeveelheid (Comans et al., 1995). De beschikbare hoeveelheid van calcium, ijzer, mangaan, zwavel, vanadium en barium zijn respectievelijk in orde van grootte 10 000, 5 000, 3 000, 300, 80 en 20 mg kg<sup>-1</sup> (Van der Sloot et al., 1995).

## 2.3 Uitloging

Uitloging is het vrijkomen van stoffen uit de staalslakken in het water. De belangrijkste chemische processen van staalslakken in een waterig milieu zijn het oplossen van  $\text{Ca(OH)}_2$  of vorming van  $\text{CaCO}_3$ , het oplossen van gereduceerde verbindingen waardoor  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  en  $\text{S}^{2-}$  vrijkomen en oxideren met de  $\text{O}_2$  in het water. Het ontstaan van precipitaten (neerslag van  $\text{CaCO}_3$  en Mn/Fe(hydr)oxiden) aan het oppervlak van de staalslak leidt na verloop van tijd tot een verscheidenheid aan kleuren en heeft ook effect op de waterdoorlaatbaarheid van de staalslakken (Van der Sloot et al., 1995). Roodbruine (roest) vlekken ontstaan door oxidatie van ijzer met het zuurstof in het water (Figuur 2). Als het calcium uit staalslakken in contact komt met water zal het reageren met  $\text{CO}_2$  tot calciumcarbonaat wat een witte kleur geeft. Door deze reactie kan tevens de pH in het water toenemen. De emissie van barium leidt tot een reactie met het sulfaat uit het oppervlaktewater, waardoor bariet ( $\text{BaSO}_4$ ) wordt gevormd. Deze reacties verminderen het vrijkomen van deze elementen in het oppervlaktewater en vormen tevens een beschermende laag rond de staalslak.

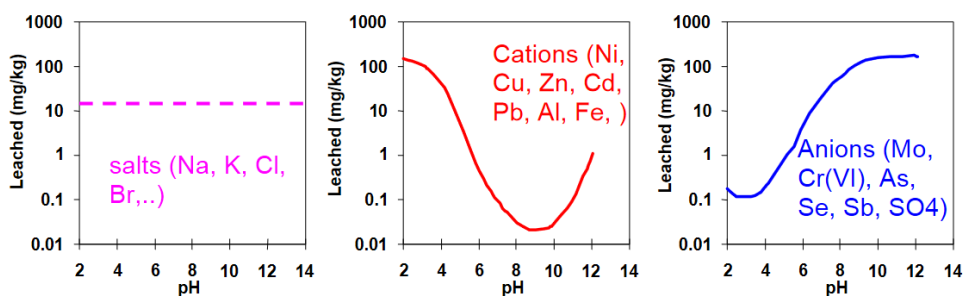




**Figuur 2.** Bovenaanzicht van breuksteen (boven) en staalslak (onder) na enkele dagen in zeewater. Breuksteen laat geen zichtbare interactie met zeewater zien, bij staalslak is duidelijk de beginnende roestvoering te zien (Foto's: L. Kästner in Dubbeldam, 2011).

Vers geproduceerde staalslakken bevatten soms (te) veel vrije kalk wat de staalslakken instabiel maakt. Om het kalkgehalte te verminderen worden daarom verse staalslakken gedurende minimaal zes maanden in de buitenlucht opgeslagen zonder afdekking. In deze periode van 'veroudering' zullen kalkrijke slakken uit elkaar vallen, waarna deze uit de partij kunnen worden gezeefd. Voor waterbouw mogen alleen staalslakken worden gebruikt die bovengenoemde procedure hebben ondergaan (Foekema et al., 2016).

Omgevingscondities zoals pH (Figuur 3), zuurstofcondities, maar ook de leeftijd van de staalslakken spelen een rol bij de uitloging (Van der Sloot et al., 1995, Van der Sloot en Dijkstra, 2004). Vanadium loogt goed uit onder zuurstofrijke condities, terwijl calcium en barium beter uitlogen onder zuurstofarme condities (Comans et al., 1995). Koper en ijzer logen goed uit in een zure omgeving (lage pH), terwijl molybdeen en chroom beter uitlogen in een basisch milieu (hoge pH) (Figuur 3).



**Figuur 3:** Uitloging van verschillende elementen als functie van de pH van zure (lage pH) tot basische milieus (hoge pH) (uit: Van der Sloot en Dijkstra, 2004).

# 3 Effecten van staalslakken in het mariene milieu

Om toegepast te kunnen worden in de waterbouw moeten staalslakken voldoen aan de kwaliteitseisen die zijn gesteld in het besluit bodemkwaliteit. Bouwstoffen moeten voldoen aan maximale emissiewaarden en samenstellingswaarden. Er zijn diverse type onderzoeken uitgevoerd om de effecten van staalslakken in aquatische en mariene milieus te onderzoeken.

## 3.1 Uitloogexperimenten

Door het gebruik van staalslakken en breukstenen kunnen er zware metalen in het water terecht komen die bij te hoge concentraties effect kunnen hebben op aanwezige biota. Voor breuksteen is het bekend dat in potentie de metalen arseen, barium, cadmium, kobalt, molybdeen, fluor, kwik, zwavel, antimoon, seleen, tin en vanadium kunnen uitlogen. De metalen aluminium, barium, cadmium, chroom, ijzer, fluor, mangaan, molybdeen, antimoon, seleen en vanadium kunnen uitlogen uit staalslakken (Van den Heuvel-Greve et al., 2011, Glorius en Van den Heuvel-Greve, 2016). Welke metalen daadwerkelijk uitlogen en in welke mate dat gebeurt is afhankelijk van de samenstelling en de omgevingscondities, zoals eerder beschreven.

Uitloging van bouwstoffen, zoals breukstenen en staalslakken, kan worden bepaald met diffusieproeven en met kolomproeven (Van den Heuvel-Greve et al., 2011). Er wordt onderscheid gemaakt tussen vormgegeven bouwstoffen die uit flinke brokken bestaan (ten minste 50 cm<sup>3</sup>) en niet-vormgegeven bouwstoffen (granulaten, < 50 cm<sup>3</sup>). In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de metalen die uit breuksteen en LD-staalslakken vrijkomen.

**Tabel 2:** Resultaten van de standaardproeven die zijn uitgevoerd volgens de protocollen van het besluit bodemkwaliteit (De Wijs en Cleven, 2007). X geeft aan dat er analyses zijn uitgevoerd waarbij uitloging van betreffend element groter is dan de drempelwaarde (uit: Van den Heuvel-Greve et al., 2011, Tangelder et al., 2015b).

Materiaal	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	F	Zn
Breksteen (niet-vormgegeven) <sup>1</sup>											X							X	
Breksteen (vormgegeven) <sup>1</sup>		X		X					X		X			X	X	X			
Breksteen (kolomproef) <sup>2</sup>			X		X						X			X	X		X	X	
Breksteen (diffusieproef) <sup>2</sup>											X			X	X		X	X	
Breksteen (Vaulx, niet vormgegeven)			X								X			X					
LD-staalslak (niet-vormgegeven) <sup>1</sup>			X														X	X	
LD-staalslak (kolomproef) <sup>2</sup>			X								X			X	X		X	X	
LD-staalslak (diffusieproef) <sup>2</sup>														X			X		
Staalslak (kolom/diffusieproef)			X	X		X					X			X			X		

<sup>1</sup>: (De Wilde et al., 2002)

<sup>2</sup>: (De Wijs en Cleven, 2007)

Voor niet-vormgegeven breukstenen zijn molybdeen en fluor de kritische componenten. Als vormgegeven bouwstof is er bij breuksteen uitloging te zien van antimoon, arseen, cadmium, kwik, molybdeen, seleen en tin (De Wilde et al., 2002). In een kolomproef met breuksteen is vooral uitloging van kobalt en fluor waargenomen en daarnaast antimoon, barium, molybdeen, seleen, vanadium en zwavel (De Wijs en Cleven (2007). In een diffusieproef met breukstenen zijn het vooral seleen en fluor dat wordt aangetroffen en daarnaast antimoon, molybdeen, vanadium en zwavel.

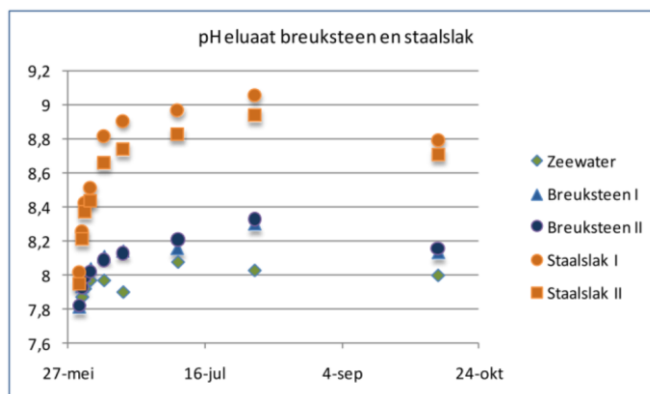
Voor LD-staalslakken blijkt als niet-vormgegeven bouwstof met name uitloging van barium, vanadium en fluor plaats te vinden (De Wilde et al., 2002). Voor LD-staalslakken in de waterbouw is met behulp van de kolomproef met name uitloging van vanadium beschreven en tevens uitloging van antimoon, barium, molybdeen, seleen en fluor (De Wijs en Cleven, 2007). In de diffusieproef is met name uitloging van vanadium geconstateerd en in minder mate antimoon (De Wijs en Cleven, 2007). Uitloogexperimenten met gemalen staalslakken in kunstmatig zeewater lieten zien dat metalen nauwelijks vrijkwamen, waarbij specifiek gelet is op arseen, cadmium, chroom, koper, lood, nikkel, ijzer en zink (Tabel 3) (Anonymous, 1989). Mogelijk was dit mede het effect van de hoge pH (9.9), waarschijnlijk veroorzaakt door calciumcarbonaat vorming in de staalslakken, die tijdens de experimenten is waargenomen.

**Tabel 3:** Gemiddelde uitloogpercentages van gemalen staalslakken ( $\varnothing < 3 \text{ mm}$ ) in kunstmatig zeewater (Anonymous, 1989).

Metaal	Uitloog percentage
Arseen	1.2
Cadmium	n.m
Chroom	0.03
Koper	<1.2
Lood	<1.6
Nikkel	<0.4
IJzer	<0.01
Zink	<1.9

n.m: niet meetbaar

Dubbeldam (2011) heeft gedurende een periode van 128 dagen diffusieproeven uitgevoerd met vormgegeven staalslakken en breuksteen in gefilterd zeewater. Tevens is er gekeken naar het effect op oesterlarven. Er is bij deze experimenten gekozen om de pH niet aan te passen waardoor vooral de pH bij de proeven met staalslakken is toegenomen tot een waarde van ongeveer 9 als gevolg van de vorming van  $\text{CaCO}_3$  (Figuur 4). Bij de staalslakken is een verhoging van de concentraties barium, mangaan en vanadium in het water aangetoond. Breuksteen gaf een verhoging van ijzer en aluminium. De concentratieverhogingen hadden geen toxische effecten op oesterlarven.



**Figuur 4:** Ontwikkeling van de pH in de diffusieproeven met breuksteen en staalslakken (uit: Dubbeldam, 2011).

Jonker (1987) heeft in het laboratorium experimenten uitgevoerd, waarbij de accumulatie van zware metalen uit LD-slakken, fosforslakken, koperslakken en beton in, onder andere, zee-anjelierien (*Metridium senile*) is onderzocht. In de experimenten met LD-slakken zijn in zee-anjelierien (tijdelijk) verhoogde concentraties van ijzer, mangaan, aluminium en chroom aangetroffen in vergelijking met beton, maar toxische effecten konden niet worden aangetoond. Tevens is er gekeken naar de kolonisatie (begroeiing) van staalslakken in het veld. Naast de chemische samenstelling lijkt ook de fysische structuur (ruwheid) van het steenoppervlak een belangrijke rol te spelen voor de kolonisatie.

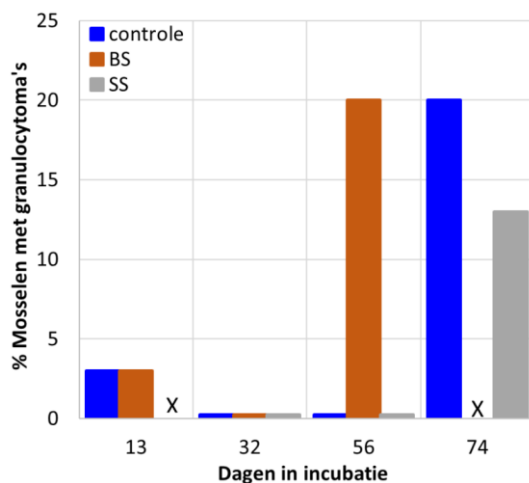
## 3.2 Zwevend stof

Tijdens het aanbrengen van staalslakken, stortsteen en zeegrind komt er ook zwevend stof vrij in het water, dat leidt tot een tijdelijke vertroebeling van het water (Figuur 5). Mosselen die het zwevend stof uit het water filteren zouden hier mogelijk last kunnen hebben.



**Figuur 5:** *Vertroebeling van het water in de Oosterschelde tijdens de stort van zeegrind bij de Schelphoek (Smaal, 2015).*

Escaravage en Kamermans (2018) hebben onderzoek gedaan naar de effecten van zwevend stof van breuksteen en staalslakken op mosselen. Mosselen zijn daarbij gedurende zes weken blootgesteld aan zwevend stof afkomstig van breuksteen en staalslakken. De concentraties varieerde gedurende het experiment tussen de 3 en 19 mg l<sup>-1</sup>. Na 6 weken zijn de mosselen geanalyseerd op de aanwezigheid van granulocytooma's. Granulocytooma's worden vaak in gestreste aquatische organismen gevonden en worden onder andere geassocieerd met blootstelling aan metalen of organische vervuilende stoffen (Capelle et al., 2021). De resultaten zijn vergeleken met een niet-blootgestelde controlegroep.



**Figuur 6:** *Percentage mosselen met granulocytooma's in Controle, Breukstenen (BS) en Staalslakken (SS) experiment als functie van het aantal dagen doorgebracht onder experimentele omstandigheden. X= geen data (Escaravage en Kamermans, 2018).*

De resultaten van het onderzoek (Figuur 6) wijzen niet op een verband tussen de blootstelling aan zwevend stof uit breukstenen en staalslakken en de ontwikkeling van granulocytooma's bij mosselen.

---

## 3.3 Veldmetingen

Tussen 2009 en 2015 is er in de Ooster- en Westerschelde uitgebreid monitoring uitgevoerd om een beter beeld te krijgen van eventuele eco(toxico)logische effecten van het gebruik van staalslakken in vooroevers (Van den Heuvel-Greve, 2009, Van den Heuvel-Greve et al., 2011, Van den Heuvel-Greve et al., 2012, Tangelder et al., 2014, Tangelder et al., 2015a, Tangelder et al., 2015b, Glorius en Van den Heuvel-Greve, 2016, Tangelder et al., 2016a). Er is daarbij zowel gekeken naar de soortendiversiteit van de flora en fauna als naar de gehalten van zware metalen in een aantal organismen (zakpijpen en schelpdieren) op de vooroevers waar staalslakken en breukstenen zijn toegepast.

### 3.3.1 Metaalgehalten in organismen

Metaalgehalten in organismen in de Oosterschelde en Westerschelde verschillen sterk tussen gebieden en soorten. Van de onderzochte soorten zijn de hoogste gehalten aangetroffen in zakpijpen, gevolgd door schelpdieren en kreeften (Tangelder et al., 2015b). In de Westerschelde waren de metaalgehalten over het algemeen hoger dan in de Oosterschelde. Er was een grote variatie te zien tussen de jaren maar ook tussen de replica's. Voor molybdeen is er in de eerste jaren na de vooroeververdediging in 2009 een hoger gehalte aangetroffen in schelpdiervlees (Glorius et al., 2013, Glorius en Van den Heuvel-Greve, 2016), maar de concentraties zijn daarna weer afgenomen. Het is echter niet duidelijk of dit het gevolg is van de toepassing van staalslakken of dat dit het gevolg is van andere, autonome ontwikkelingen (Tangelder et al., 2015b).

Vergelijking met bestaande normen (KRW, OSPAR, EC consumptie) laten enkele normoverschrijdingen zien in 2014 voor lood, kwik en cadmium, maar een directe relatie met de vooroeververdedigingsactiviteiten en het gebruik van staalslakken lijkt hier niet evident (Tangelder et al., 2015b). Op basis van de metingen is er voor de meeste metalen geen significante toename aangetoond in het vlees van mosselen en oesters sinds de toepassingen van staalslakken. Kwik werd relatief vaak in hogere concentraties gemeten in biota op zowel breuksteen als staalslakken ten opzichte van de referentielocaties. Seleen werd relatief vaak aangetroffen in hogere concentraties in biota op breukstenen. Molybdeen en cadmium werden relatief vaak in hogere concentraties gemeten in biota op staalslakken. Barium, kobalt en mangaan waren relatief vaak hoger in biota op referentielocaties (Tangelder et al., 2015b). Er zijn geen soorten of locaties geïdentificeerd met structureel hogere metaalgehalten op de locaties waar vooroeververdediging heeft plaatsgevonden (met breuksteen of staalslak) vergeleken met referentielocaties.

Uit de veldmonitoring blijkt dat de vanadium- en nikkelgehalten in Japanse oesters in de Oosterschelde bemonsterd op een ondergrond van staalslakken en breukstenen niet verschillen van Japanse oesters bemonsterd op een referentielocatie (Zuidbout). De gehalten aan vanadium en nikkel in de veldmonitoring zijn vergelijkbaar met de gehalten van het referentiemateriaal (zeegrind) in het mesocosmexperiment (Foekema et al., 2016); zie sectie 3.4. Ook zijn er geen evidente tijdstrends van vanadium en nikkel in mosselen en oesters bij een monitoringslocatie bij de Zeelandbrug te zien (Glorius en Van den Heuvel-Greve, 2016).

Tangelder en Goudswaard (2015), Tangelder et al. (2015a) hebben ook de gehalten van zware metalen gemeten in kreeften die zijn gevangen in de Oosterschelde op locaties die recentelijk waren verdedigd met staalslakken en breuksteen en hebben deze vergeleken met de gehalten in kreeften die zijn gevangen op locaties waar een oude bestorting aanwezig was. In het onderzoek kon geen relatie worden gelegd tussen het gebruik van staalslakken en verhoogde concentraties van zware metalen in de kreeften.

### 3.3.2 Rekolonisatie

Het type materiaal en de sortering van bestortingen is van groot belang voor het herstel van de hardsubstraat bodemdiergemeenschap. Tangelder et al. (2017) hebben de rekolonisatie van de bodemdiergemeenschap onderzocht bij een dijkversterking die in 2014 is uitgevoerd met zeegrind op de locatie de Schelphoek in de Oosterschelde. Boven op het zeegrind (sortering 16-64 mm, Wijsman en Brummelhuis, 2015) was op verschillende locaties een "rif" aangelegd met kalksteen en zandsteen (sortering 10-300 kg). Het onderzoek liet zien dat de hardsubstraat bodemdiergemeenschap zich beter en sneller herstelt op de riffen van kalksteen en zandsteen dan op het zeegrind dat niet bedekt was met riffen van

---

kalksteen en zandsteen. De fysische structuur (ruwheid) van het steenoppervlak kan een belangrijke rol spelen bij de begroeiing van het harde substraat door benthische mariene organismen (Jonker, 1987).

Bij de locaties Zeelandbrug en Lokersnol in de Oosterschelde, die zijn bestort met staalslakken en breuksteen is gekeken naar de rekolonisatie van de hardsubstraat- en zachtsubstraatsoorten (Tangelder et al., 2016b, Van den Heuvel-Greve et al., 2016). Binnen een half jaar tot een jaar was er sprake van ontwikkeling van eerste pioniersgemeenschappen op het hard substraat bij zowel breuksteen als staalslak. Vijf jaar na aanleg was er geen verschil in hardsubstraatgemeenschap tussen locaties waar breuksteen was toegepast en de locaties waar staalslakken waren toegepast. Op het zachtsubstraat werden binnen een half jaar tot een jaar de eerste soorten bodemdieren aangetroffen. Na anderhalf tot twee jaar is op sommige plekken (vooral in de diepere zone) een eerste herstel opgetreden van bodemdiergemeenschappen, zowel in het sediment op staalslakken als op breuksteen. Na vijf jaar is op beide locaties een zachtsubstraat infauna gemeenschap gevonden die vergelijkbaar was met de gemeenschap die vóór de vooroeverbetastingen werd aangetroffen (Tangelder et al., 2016b, Van den Heuvel-Greve et al., 2016).

### 3.4 Mesocosm experimenten

Omdat veldmonitoring afhankelijk is van lokale omstandigheden en autonome ontwikkelingen is er besloten om in 2015 uitloogexperimenten uit te voeren onder in zogenaamde mesocosms van 2 m<sup>3</sup> (Foekema et al., 2016, Foekema et al., 2021). Een mesocosm is een experimentele vijveropstelling met water en verschillende biota die uitermate geschikt zijn om effecten op het ecosysteem in semi-gecontroleerde condities te onderzoeken. Op de bodem van de tanks is een laag zand aangebracht en de mesocosms zijn geënt met slib en water uit de Oosterschelde waarna verschillende soorten biota zijn aangebracht (slijkgarnalen, zeepieren, kokkels en alikruiken). Voor het volgen van de opname van stoffen zijn blaaswier, mosselen, doorschijnende zakpijpen en broodsponzen apart in de mesocosms geplaatst zodat deze eenvoudig tussentijds konden worden bemonsterd. De mesocosms zijn continue doorstroomd met water uit de Oosterschelde met een verversing representatief voor de Oosterschelde (350 liter h<sup>-1</sup>), (Foekema et al., 2016) en 35 maal lagere verversing (10 liter h<sup>-1</sup>). Na acclimatisatie is de helft van de zandbodem in de mesocosms afgedekt met LD-staalslakken (45-180 mm), breukstenen (90-150 mm) of grind. Concentraties van 18 elementen in het water en in de aangebrachte organismen (blaaswier, mosselen, doorschijnende zakpijpen en broodsponzen) zijn gedurende een periode van 84 dagen gemeten.

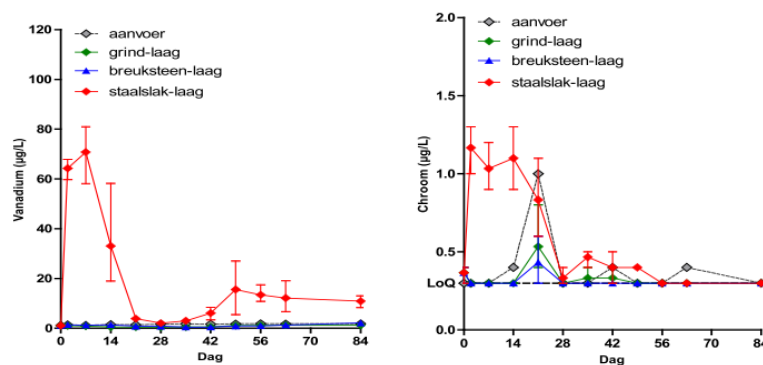
In de studie is geen enkele aanwijzing gevonden voor uitloging van kwik, lood, antimoon, nikkel, zink, arseen, seleen, tin en koper uit de staalslakken. Op bepaalde momenten waren er significant hogere concentraties van de metalen vanadium (Figuur 8), barium, chroom (Figuur 8), mangaan, ijzer, aluminium, kobalt en molybdeen gemeten in het water van de mesocosms en staalslakken bij de lage verversingssnelheid (Figuur 7). Deze metalen kunnen op basis hiervan in verband gebracht worden met staalslakken. In de mesocosms met voor de Oosterschelde representatieve (hoge) waterverversingssnelheden leidde de uitloging alleen tot verhoogde waterconcentraties van vanadium en chroom. De effecten van de uitloging op de concentraties in de waterkolom zijn vooral zichtbaar gedurende de eerste 4 weken na de stort. Bij de experimenten met lage verversing is vanadium, barium en chroom in verhoogde concentraties waargenomen in biota. Bij de experimenten met realistische verversing zijn geen verhoogde concentraties in de biota waargenomen.

Vanadium kwam in de mesocosmstudie naar voren als het metaal dat het sterkst bij staalslakken uitloogt en het best wordt opgenomen door biota (Figuur 9). In het geval van breukstenen was dat nikkel. In combinatie met lage achtergrondgehalten van vanadium in de Oosterschelde vormt vanadium dus een goede tracer voor de invloed van staalslakken (Foekema et al., 2021). Het is van belang te weten dat er bij de experimenten gebruik is gemaakt van "verse" staalslakken die niet vooraf zijn verweerd en dus veel calcium bevatten (Foekema et al., 2016).

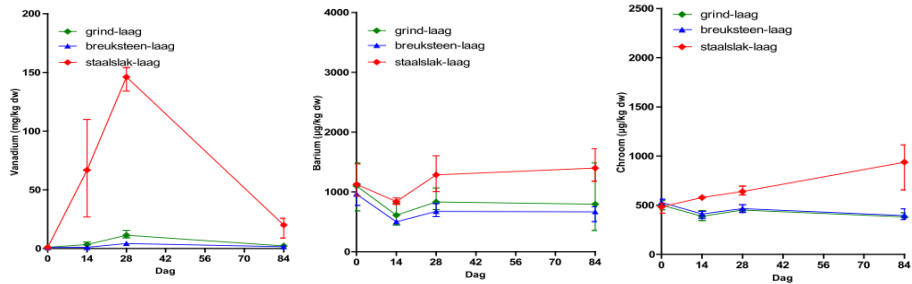
Staalslak vs grind		Water	Zakpijp	Mossel	Zee-eik	Spons
Vanadium	V	↑↑	↑	↑	↑	-
Barium	Ba	↑		↑	↑	
Chroom	Cr	↑↑		↑	-	-
Mangaan	Mn	↑		-	-	-
IJzer	Fe	↑		-	-	-
Aluminium	Al	↑	-	-	-	-
Kobalt	Co	↑	-	-	-	-
Molybdeen	Mo	↑	-	↓	-	-
Lood	Pb	-	-	↓	-	-
Arseen	As	-	↓	-	↓	-

Breuksteen vs grind		Water	Zakpijp	Mossel	Zee-eik	Spons
Kobalt	Co	↑	-	-	-	-
Nikkel	Ni	↑	↑	-	-	-

**Figuur 7:** Overzicht van statistische significante verschillen in concentraties van zware metalen in water en biota in de mesocosms met staalslakken (boven) en breuksteen (onder) ten opzichte van grind. '↑': concentratie bij tenminste één bemonstering significant hoger dan in de grind mesocosm met lage verversingssnelheid; '↓': idem maar dan voor significant lagere concentratie. Dubbele pijlen geven aan dat de verschillen zowel bij lage als bij hoge verversingssnelheid aanwezig waren (uit: Foekema et al., 2016).



**Figuur 8:** Concentraties vanadium (links) en chroom (rechts) in het water van de mesocosms met de lage doorstroom (uit: Foekema et al., 2016).



**Figuur 9:** Concentraties vanadium (links), barium (midden) en chroom (rechts) in de mosselen uit de mesocosms met de lage doorstroom (uit: Foekema et al., 2016).

In de mesocosms met lage verversingsnelheid leidde de aanwezigheid van staalslakken tot een verhoogde pH waarde. Een geringe pH verhoging werd ook gezien in de mesocosms met hoge verversingsnelheid kort na het aanbrengen van de staalslakken maar verdween binnen 14 dagen.

Het enige negatieve biologische effect dat na 56 dagen in de mesocosms met staalslakken werd gevonden betrof een verminderde groei van sponzen in de mesocosms met een lage verversingsnelheid. Bij een voor de Oosterschelde realistische verversing werden geen biologische effecten aangetoond.

Foekema et al. (2016) concluderen, op grond van de bevindingen van de mesocosmstudie, in combinatie met de gegevens uit veldmonitoring, dat met zekerheid worden gesteld dat het ecosysteem in de Oosterschelde niet negatief wordt beïnvloed door uitlopende stoffen uit de op dit moment op de stortlocaties aanwezige staalslakken en breuksteen. Ze gaan er daarbij van uit dat de in de mesocosm geteste staalslakken en breuksteen representatief zijn voor de materialen die in de Oosterschelde zijn gestort.

### 3.5 Ontwikkeling pH in de Oosterschelde

In Broekman (2023), pagina 53, is een uitgebreid overzicht gegeven van de beschikbare kennis van de milieu hygiënische kwaliteit van LD staalslakken, die worden toegepast op het land. In dat rapport wordt geconcludeerd dat *“de milieu hygiënische kwaliteit van de LD-staalslakken volgens de huidige Europese en Nederlandse wetgeving en normstelling geen onacceptabele milieurisico’s zouden moeten geven op grond van de geteste materiaaleigenschappen. Echter, een belangrijk aandachtspunt waarvoor de wetgeving onvoldoende bescherming biedt, is de extreem hoge pH uitloging van de LD-staalslakken in open toepassingen van Grond-, Weg- en Waterbouw (GWW) projecten. In gevoelige bodems met onvoldoende pH bufferend vermogen zijn milieueffecten te verwachten door de verstoring van de evenwichten in bodemprocessen. Dit betreft abiotische processen van nutriënten, essentiële metalen en hun verbindingen en biotische processen waarin toxische en ecotoxicologische effecten op planten en organismen in de bodem plaats kunnen vinden. Vooral de grootschaligheid van talrijke toepassingen in infrastructurele GWW projecten en de zeer ruime tijdschaal (zo’n vijftig tot honderd jaar) waarin er hoge pH uitloging mogelijk is, is een bedreiging. Over dezelfde tijdschaal zullen ook zware metalen de onderliggende bodem decennialang tot wel tachtig jaar verontreinigen ondanks hun lage concentraties in het uitloogwater vergeleken met die van de maximale emissiegrenswaarden.”*

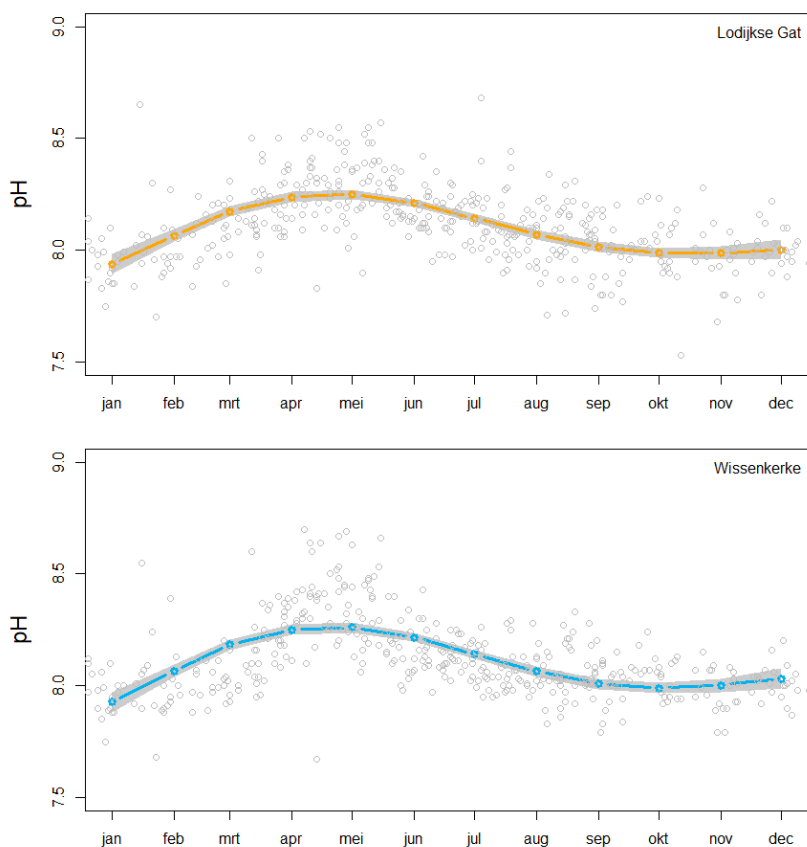
Op basis van deze passage is het begrijpelijk dat er zorg is omtrent een mogelijke stijging van de pH (zuurgraad) bij toepassing van staalslakken in de ontgrondingskuilen in de Oosterschelde en als vooroververdediging in de Oosterschelde en Westerschelde. Deze toepassingen zijn echter niet wat in het RIVM rapport (Broekman, 2023) onder GWW projecten bedoeld wordt. Het RIVM rapport richt zich op open toepassing van staalslakken op landbodems, terwijl het bij de Oosterschelde en Westerschelde gaat om toepassing in zeewater. Bij toepassing op het land kan door uitspoeling van kalk de pH in de onderliggende bodem en grondwater toenemen. Het RIVM (Broekman, 2023) benoemt dit specifiek: *“Tegelijkertijd is duidelijk dat de LD-staalslakken bij open toepassingen op landbodems tot extreem hoge pH kunnen leiden,*



maar ook tot uitloging van (zware) metalen in de bodem. De uitloging kan over een zeer lange periode van enkele decennia voortduren. Dit is mogelijk als hemelwater of grondwater in contact komt met de LD-staalslakken of bij toepassingen van LD-staalslakken in waterlichamen. In waterlichamen kunnen de concentraties van uitgeloopte stoffen toenemen als een waterlichaam zich onvoldoende kan verversen.”

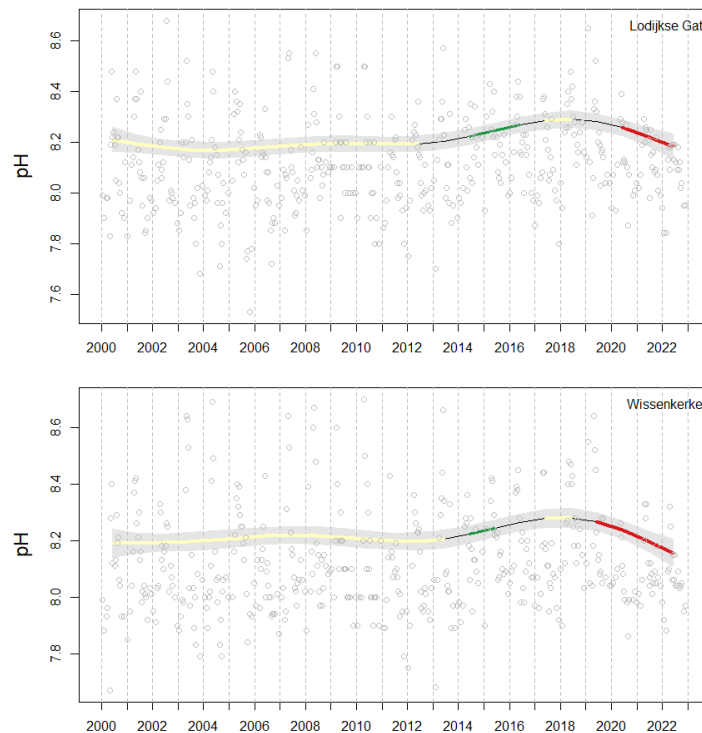
Zeewater heeft in vergelijking tot zoetwater een veel grotere buffercapaciteit, door de aanwezigheid van grote hoeveelheden bicarbonaat,  $\text{HCO}_3^-$  en carbonaat,  $\text{CO}_3^{2-}$ , waardoor veranderingen in  $\text{CO}_2$  makkelijker kunnen worden opgevangen. Tevens is er in de getijdenwateren zoals de Oosterschelde en Westerschelde continue verversing door getijdenbewegingen en, in het geval van de Westerschelde, de instroom van zoet water vanuit het bovenstroomse gebied, waardoor vrijkomende stoffen snel worden verdund en afgevoerd.

Om de effecten het gebruik van staalslakken in de Oosterschelde op de pH te onderzoeken is een analyse uitgevoerd naar de ontwikkeling van de pH in het zeewater voor de locatie Lodijkse Gat in het oostelijk deelgebied en de locatie Wissenkerke in het westelijk deelgebied van de Oosterschelde. De meetgegevens voor de periode 2000 tot en met 2022 zijn hiervoor opgevraagd bij waterinfo.rws.nl. In de Oosterschelde schommelt de pH tussen 7.5 en 8.7 (Figuur 10). Er is een duidelijk seizoen patroon zichtbaar met de hoogste pH in het voorjaar (april, mei) en het laagste in het najaar. Dit is het gevolg van de opname van  $\text{CO}_2$  door het fytoplankton tijdens de voorjaarsbloei.



**Figuur 10:** Seizoensdynamiek van de pH in de Oosterschelde (2000-2022). De bolletjes geven de individuele metingen en de lijnen geven de gemiddelde trend. Bovenste figuur: Lodijkse gat, oostelijk deel van de Oosterschelde. Onderste figuur: Wissenkerke, westelijk deel van de Oosterschelde.

Als er gekeken wordt naar de ontwikkeling van de pH in de gehele monitoringsperiode, dan geven beide locaties vergelijkbare resultaten (Figuur 11). De pH is tot 2013 constant, vervolgens is er rond 2015 een lichte toename, die na 2019 weer naar beneden afbuigt tot onder het niveau van 2013. Er is in deze modellen gecorrigeerd voor de maandelijkse variatie.



**Figuur 11:** Ontwikkeling van de pH in de Oosterschelde (2000-2022). De bolletjes geven de individuele metingen. Regressielijnen geven de trend. Geel is stabiel, groen is toename en rood is afname. Bovenste figuur: Lodijkse gat, oostelijk deel van de Oosterschelde. Onderste figuur: Wissenkerke, westelijk deel van de Oosterschelde.

Tijdens de mesocosmstudie (paragraaf 3.4) bleek dat een pH toename door uitloging uit staalslakken bij realistische verversingsnelheid slechts kort na toepassing zichtbaar is. Als er een invloed van het gebruik van staalslakken is op de pH, dan zou dat dus te zien moeten zijn als een toename van de pH in de periode van de toepassing van de staalslakken. In de Oosterschelde zijn staalslakken vooral toegepast in 2010, 2012-2015, en 2019-2020, waarbij de meerderheid van het materiaal is toegepast in de ontgrondingskuilen bij de Oosterscheldekering, aan de westzijde van de Oosterschelde. Alleen in 2015 is er een toename van de pH zichtbaar in de grafieken. In de periode 2019-2022 is er juist sprake van een afname. Een directe koppeling van de jaren waarin staalslakken zijn toegepast aan de pH data in de Oosterschelde is niet zichtbaar in de grafieken.

## 3.6 Habitat kreeft

In een onderzoek waarin de kennis en percepties van vissers over de biologie, het bestand en het beheer van de Oosterscheldekreeft in kaart is gebracht, noemden vissers habitatverlies door staalslakken als een van de bedreiging (Verschuur et al., 2023). Vissers ervaren dat door staalslakken minder holen voor de kreeft overblijven. Het is plausibel dat door het optreden van carbonatatie de holtes tussen de slakken met calciumcarbonaat gevuld worden. Carbonatatie is een chemische reactie waarbij koolstofdioxide reageert met calciumhydroxide waarbij onoplosbaar calciumcarbonaat wordt gevormd. Bij gebruik van breuksteen blijven de holtes tussen de stenen open. Of carbonatatie bij staalslakken in de Oosterschelde inderdaad tot verlies aan leefgebied van kreeft leidt en in welke mate, is niet specifiek onderzocht (Verschuur et al., 2023).

---

## 4 Conclusies

Staalslakken zijn een bijproduct van de staalindustrie en worden gezien als een duurzaam alternatief voor het gebruik van breuksteen bij dijkversterkingen omdat er geen (extra) natuurlijke materialen gewonnen hoeven worden. Staalslakken bevatten, net als breuksteen, zware metalen die in potentie kunnen uitloggen en vervolgens kunnen worden opgenomen door organismen waaronder schelpdieren zoals oesters en mosselen. De uitloging van metalen uit staalslakken is afhankelijk van het productieproces en de samenstelling van de staalslakken alsook de omgeving waarin ze worden toegepast. Er is in de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan naar de uitloging van metalen uit staalslakken en de effecten op bodemdieren, waaronder oesters en mosselen. Uit de beschikbare literatuur en onderzoeksrapporten kan worden opgemaakt dat het niet aannemelijk is dat er negatieve effecten zijn op schelpdieren als gevolg van uitloging van zware metalen uit staalslakken die zijn toegepast bij vooroeververdediging in de Oosterschelde en Westerschelde. Wel laat het onderzoek zien dat het onderwaterleven in de vooroever wordt verstoord tijdens dijkverzwaringen, doordat het wordt bedekt door staalslakken, breuksteen, zeegrond of ander materiaal. Het herstel van het bodemleven is afhankelijk van het type materiaal (ruwheid oppervlak), de sortering (ruimte voor organismen om zich in te verschuilen) en de lokale omgevingscondities.

Tijdens het aanbrengen van staalslakken, maar ook bij stortsteen en zeegrond komt er zwevend stof vrij in het water, dat leidt tot een tijdelijke vertroebeling van het water. Mosselen die het zwevend stof uit het water filteren zouden hier last van kunnen hebben. Op basis van onderzoek kon er geen verband worden gelegd tussen de blootstelling van mosselen aan zwevend stof dat was vrijgekomen bij de toepassing van breukstenen en staalslakken, en de ontwikkeling van een bepaalde stressrespons, granulocytoma's (Capelle et al., 2021), bij mosselen.

Naar aanleiding van een recent rapport van RIVM (Broekman, 2023) zijn er zorgen met betrekking tot een verhoging van de pH in de Ooster- en Westerschelde als gevolg van het gebruik van staalslakken op grote schaal. Dit rapport had betrekking op zoet water in relatief gesloten systemen. In het mariene milieu van de Ooster- en Westerschelde is er sprake van een hoge waterverversingsgraad. In combinatie met de buffercapaciteit van zeewater, voorkomt dit dat de pH zichtbaar wordt beïnvloed. Dit wordt ook bevestigd door monitoringsdata in de Oosterschelde.

Tenslotte is het mogelijk dat gebruik van staalslakken door het proces van carbonatatie leidt tot vermindering van het leefgebied van kreeft (Verschuur et al., 2023). Dit zou nader dienen te worden onderzocht.

---

## 5 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV.

---

# Literatuur

- Anonymous (1989). Onderzoek samenstelling en uitloggedrag van staalslakken. TAUW Infra Consult bv. Rapport nummer: 3119858.
- Broekman, M.H. (2023). Milieuhygiënische kwaliteit LD-staalslakken. Literatuurstudie. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Rapport nummer: RIVM-rapport 2022-0180. 92 pagina's.
- Capelle, J.J., A. Blanco-Garcia, P. Kamermans, M.Y. Engelsma en H.M. Jansen (2021). Observations on recent mass mortality events of marine mussels in the Oosterschelde, the Netherlands. *Aquaculture International* 29:1737-1751.
- Comans, R.N.J., H.A. Van der Sloot, D. Hoede en P. Bonouvrie (1995). Milieuchemische effecten bij het gebruik van staalslak in oeverbescherming: Laboratorium voorspellingen en praktijkwaarnemingen. ECN Petten. 87 pagina's.
- De Wijs, J.W.M. en R.F.M.J. Cleven (2007). Monitoring kwaliteit bouwstoffen 2006. Een vergelijking met de monitoringdata 2003/2004 en 2005. 771402028/2002. Rapport nummer: RIVM-rapport 711701062/2007. INTRON-rapport A825210/R20070220. 253 pagina's.
- De Wilde, P.G.M., A.F. Peekel en S.E.J. Buykx (2002). Monitoring milieuhygiënische kwaliteit van bouwstoffen. RIVM. Rapport nummer: 771402028/2002. 260 pagina's.
- Dubbeldam, M.C. (2011). Uitloging van metalen uit breuksteen en staalslakken in zeewater en de bepaling van de toxiciteit met oesterlarven. 24 pagina's.
- Escaravage, V. en P. Kamermans (2018). Mosselen in troebel water. Onderzoek naar een mogelijk effect van stof van breuksteen en staalslakken op mosselen. Wageningen Marine Research, Yerseke. Rapport nummer: C077/18. 24 pagina's.
- Foekema, E.M., J.E. Tamis, A. Blanco-Garcia, B. Van der Weide, C. Sonneveld, F.M. Kleissen en M.J. Van den Heuvel-Greve (2021). Leaching of metals from steel slag and their ecological effects on a marine ecosystem: Validating field data with mesocosm observations. *Environmental toxicology* 40:2499-2509.
- Foekema, E.M., M.J. Van den Heuvel-Greve, C. Sonneveld, G. Hoornman en A. Blanco (2016). Uitloging en effecten van metalen uit staalslakken beoordeeld in mesocosms. IMARES, Den Helder. Rapport nummer: C063/16. 102 pagina's.
- Glorius, S.T. en M.J. Van den Heuvel-Greve (2016). Gehalte aan zware metalen in biota op stort en referentielocaties in de Oosterschelde. IMARES. Rapport nummer: C081/16. 32 pagina's.
- Glorius, S.T., M.J. Van den Heuvel-Greve en E.M. Foekema (2013). Variatie gehalte zware metalen op locatie Zeelandbrug en toxiciteit molybdeen - data rapport. IMARES. Rapport nummer: C105/13. 24 pagina's.
- Jansen, H.M., S. Glorius, M. Tangelder en M.J. Van den Heuvel-Greve (2015). Gehaltes aan zware metalen in biota op stort- en referentielocaties in de Oosterschelde & Westerschelde. Data rapport 2014. IMARES. Rapport nummer: C079/15. 91 pagina's.
- Jonker, D.A. (1987). Opname van zware metalen uit een kolonisatie van ovenslakken en beton door benthische mariene organismen. 78 pagina's.
- Schellekens, T., S. Glorius en M.J. Van den Heuvel-Greve (2014). Variatie en trend van de gehalten zware metalen op locatie Zeelandbrug Data rapport 2013. IMARES, Yerseke. Rapport nummer: C055/14. 26 pagina's.
- Smaal, A.C. (2015). Mogelijk verband tussen het storten van zeegrind en sterfte van mosselen op nabij gelegen percelen Hammen 62, 63 en 64. IMARES, Yerseke. Rapport nummer: C105/15. 24 pagina's.
- Tangelder, M., M.J. De Kluijver, E.B.M. Brummelhuis en M.J. Van den Heuvel-Greve (2016a). Effect van vooroeververdediging op bodemorganismen in Oosterschelde en Westerschelde in 2014. Wageningen Marine REsearch. Rapport nummer: C116/15. 81 pagina's.
- Tangelder, M. en K. Goudswaard (2015). Inventarisatie van dichtheden van kreeften op zowel bestorte als niet recentelijk bestorte vooroevers in de Oosterschelde. IMARES. 3 pagina's.
- Tangelder, M., K. Goudswaard en Y. Van Es (2015a). Bepaling zware metalen in kreeften op nieuwe vooroevers in de Oosterschelde. IMARES. Rapport nummer: C039/15. 32 pagina's.
- Tangelder, M., T. Schellekens, M.J. De Kluijver en M.J. Van den Heuvel-Greve (2014). Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde 2013. IMARES. Rapport nummer: C102/14. 62 pagina's.
- Tangelder, M., M.J. Van den Heuvel-Greve en M.J. De Kluijver (2016b). Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde 2015. Locaties: Zeelandbrug en Lokkersnol. Wageningen Marine Research. Rapport nummer: C089/16. 86 pagina's.
- Tangelder, M., M.J. Van den Heuvel-Greve, M.J. De Kluijver, S. Glorius en H. Jansen (2015b). Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde en Westerschelde 2014. IMARES. Rapport nummer: C102/15. 141 pagina's.

- 
- Tangelder, M., T. Van Oijen, M.J. De Kluijver en T. Ysebaert (2017). Ontwikkeling epifauna, infauna en kreeften (T0, T1, T2) op een ecologisch aantrekkelijke vooroeverbesteding (Schelphoek, Oosterschelde). Monitoring Building for Nature proefvak Schelphoek. Wageningen Marine Research. Rapport nummer: C039/17. 69 paginas.
- Van den Heuvel-Greve, M.J. (2009). T0 monitoring vooroeververdediging Oosterschelde; cluster 1 2009. Wageningen IMARES. Rapport nummer: C137/09. 35 paginas.
- Van den Heuvel-Greve, M.J., M. Tangelder, T. Ysebaert en M.J. De Kluijver (2016). Notitie kolonisatie van bodemgemeenschappen van zacht substraat in de Oosterschelde en Westerschelde na vooroeververdediging. IMARES Wageningen UR. 31 paginas.
- Van den Heuvel-Greve, M.J., A. Van den Brink, S. Glorius, C. Schipper, M.J. De Kluijver en M. Dubbeldam (2011). Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde 2010: T<sub>1</sub> Cluster 1 / T<sub>0</sub> Cluster 2. Wageningen IMARES. Rapport nummer: C029/11. 69 paginas.
- Van den Heuvel-Greve, M.J., A. Van den Brink, S. Glorius, C. Schipper, A. Gittenberger, M.J. De Kluijver en M. Dubbeldam (2012). Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde en Westerschelde 2011: T<sub>2</sub> Cluster 1. Wageningen IMARES. Rapport nummer: C081/12. 69 paginas.
- Van der Sloot, H.A. en J.J. Dijkstra (2004). Development of horizontally standardized leaching tests for construction materials: A material based or release based approach? Identical leaching mechanisms for different materials. ECNClean Fossil Fuels. Rapport nummer: ECN-C--04-060. 56 paginas.
- Van der Sloot, H.A., H.L.A. Sonneveldt, N.M. De Rooij, D. Hoede en M. Geusebroek (1995). Staalslakuitloging bij toepassing als oeverbescherming. Laboratorium-, veld- en modelleringsgegevens. Waterloopkundig Laboratorium. 124 paginas.
- Verschuur, X., J. Bleijenberg en N.A. Steins (2023). Kennis en percepties van kreeftenvissers over Europese zeekeeft, het bestand en het beheer in de Oosterschelde. Wageningen Marine Research. Rapport nummer: C026/23. 92 paginas.
- Wijsman, J.W.M. (2023). Uitloging LD-staalslakken. Wageningen Marine Research. Rapport nummer: 2301334.JW.fh. 15 paginas.
- Wijsman, J.W.M. en E. Brummelhuis (2015). Effect van vooroever-suppletie met zeegrind op groei en ontwikkeling van mosselen in Oosterschelde. IMARES. Rapport nummer: C063/15. 32 paginas.

---

# Verantwoording

Rapport C025/24

Projectnummer: 4313200017

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research.

Akkoord: Dr. Ir. Nathalie Steins  
Senior Onderzoeker

Handtekening: 

Datum: 6 mei 2024

Akkoord: Dr. Tammo Bult  
Director

Handtekening: 

Datum: 6 mei 2024

---

Wageningen Marine Research  
T +31 (0)317 48 70 00  
E [marine-research@wur.nl](mailto:marine-research@wur.nl)  
[www.wur.nl/marine-research](http://www.wur.nl/marine-research)

Bezoekersadres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden



---

**Wageningen Marine Research** levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.