



Uitloging en effecten van metalen uit staalslakken beoordeeld in mesocosms

Auteurs: E.M. Foekema, M. van den Heuvel-Greve, C. Sonneveld, G. Hoornsman & A. Blanco

IMARES Rapport
C063/16

Uitloging en effecten van metalen uit staalslakken beoordeeld in mesocosms

Auteur(s): E.M. Foekema, M. van den Heuvel-Greve, C. Sonneveld, G. Hoornsman & A. Blanco

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Postbus 17
8200 AA Lelystad

Publicatiedatum: 10 juni 2016

IMARES Wageningen UR
Den Helder, juni 2016

IMARES rapport C063/16

© 2015 IMARES Wageningen UR

IMARES, onderdeel van Stichting DLO.
KvK nr. 09098104,
IMARES BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

De Directie van IMARES is niet aansprakelijk voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van IMARES; opdrachtgever vrijwaart IMARES van aanspraken van derden in verband met deze toepassing.

Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever hierboven aangegeven en is zijn eigendom. Niets uit dit rapport mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de opdrachtgever.

A_4_3_1 V21

Inhoud

Management samenvatting	5
Uitgebreide samenvatting	6
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding voor dit onderzoek	9
1.2 Globale opzet van het onderzoek	10
1.3 Onderzoeksdoelen	10
2 Materiaal en methoden	11
2.1 Testduur en periode	11
2.2 Inrichting mesocosms	11
2.2.1 Technische inrichting	11
2.2.2 Biota	12
2.3 Behandelingen	14
2.3.1 Verversingssnelheden	14
2.3.2 Testmaterialen	15
2.4 Analyses en bemonsteringen	16
2.4.1 Algemene waterparameters	16
2.4.2 Biologische parameters	17
2.4.3 Chemische analyses	17
2.4.4 Statistische interpretatie van de data	18
3 Resultaten	19
3.1 Functioneren mesocosms en algemene observaties	19
3.1.1 Technisch functioneren	19
3.1.2 Algemene observaties	19
3.2 Algemene waterparameters	20
3.2.1 Watertemperatuur	20
3.2.2 Saliniteit	20
3.2.3 Zuurstofgehalte	21
3.2.4 pH	21
3.2.5 Troebelheid	22
3.2.6 Nutriënten gehalten	23
3.2.7 Opgelost organisch koolstof	24
3.3 Biologische resultaten	25
3.3.1 Phytoplankton	25
3.3.2 Benthische algen	26
3.3.3 Macro-algen	27
3.3.4 Mosselen	27
3.3.5 Kokkels	28
3.3.6 Sponzen	29
3.3.7 Zee-eik	29
3.3.8 Zakpijpen	30
3.3.9 Benthosgemeenschap op hard substraat en zacht substraat	30
3.4 Resultaten chemische analyses	33
3.4.1 Gehalten in water	33
3.4.2 Gehalten in biota	42

4	Discussie	54
4.1	Testmaterialen	54
4.2	Biologische parameters	55
4.2.1	Algemeen	55
4.2.2	Invloed van de testmaterialen	56
4.2.3	Vergelijking met veldmonitoringsdata 2009-2014	56
4.3	Fysisch - chemische parameters	56
4.3.1	Invloed van de testmaterialen	56
4.3.2	Vergelijking met veldmonitoringsdata 2009-2014	58
5	Conclusies	64
6	Kwaliteitsborging	66
	Literatuur	67
	Verantwoording	68
Bijlage 1	Metaalconcentraties in water	69
Bijlage 2	Metaalconcentraties in mossel	72
Bijlage 3	Metaalconcentraties in zee-eik	77
Bijlage 4	Metaalconcentraties in zakpijp	82
Bijlage 5	Metaalconcentraties in sponzen	87
Bijlage 6	Aanvullende uitloogstudie	91
Bijlage 7	Deltares Modelberekening	98

Management samenvatting

Om erosie van de oevers en geulwanden in de Oosterschelde tegen te gaan, worden vanaf 2009 'bestortingen' uitgevoerd om de vooroevers te beschermen. Als bestortingsmateriaal worden staalslakken, breukstenen en in 2014 ook zeegrind toegepast. Uit de omgeving is bezorgdheid uitgesproken dat het gebruik van vooral staalslakken negatieve effecten op het mariene milieu zou kunnen hebben door uitloging van zware metalen. Om beter inzicht te krijgen in de eventuele effecten van breuksteen en staalslakken op het onderwaterleven in de Oosterschelde loopt een veldmonitoringsprogramma vanaf 2009 op een aantal stortlocaties. Op basis hiervan kon geen eenduidige relatie worden gelegd tussen de aanwezigheid van staalslakken en breukstenen en de metaalgehalten in lokale biota. Daarom is in 2015 door IMARES in opdracht van RWS een studie uitgevoerd in 18 modelecosystemen (mesocosms). Elke mesocosm was op gelijke wijze ingericht met een levensgemeenschap bestaande uit hard-en zachtsubstraat organismen die representatief zijn voor de Oosterschelde. De mesocosms werden continue doorspoeld met Oosterschelde water. In 9 mesocosms werd zo een verversingssnelheid gecreëerd die overeenkomt met de situatie langs een dijkvoet in de Oosterschelde. In de overige 9 mesocosms werd een 35 maal lagere verversingssnelheid gehandhaafd waardoor een extreme worst-case situatie ontstond. Na het, in drievoud, aanbrengen van staalslakken, breuksteen en zeegrind (als referentie) is gedurende 12 weken de uitloging van zware metalen uit het testmateriaal naar de waterkolom en de opname (bioaccumulatie) in biota (i.e. mosselen, zee-eik en sponzen) gevolgd. Voor het vaststellen van biologische effecten is gekeken naar de ontwikkeling van fytoplankton, benthische algen, macro-algen, naar groei en overleving van zee-eik, mosselen, kokkels, sponzen en zakpijpen en naar de biodiversiteit van hard-en zachtsubstraatgemeenschappen.

De studie leverde de volgende resultaten op:

- In de mesocosms met lage verversingssnelheid veroorzaakten de staalslakken een duidelijke verhoging van de zuurgraad (pH) en een verhoging van de gehalten van de metalen vanadium, barium, aluminium, ijzer, chroom en mangaan in de waterkolom). De uitloging is het sterkst gedurende de eerste 6 weken na het storten. Op verschillende bemonsteringstijdstippen werden verhoogde concentraties van vanadium gemeten in zakpijpen, mosselen en zee-eik en van chroom in mosselen. Het enige biologische effect dat kon worden aangetoond in de mesocosms met lage verversingssnelheid betrof de negatieve ontwikkeling van de biomassa van de sponzen.
- In de mesocosms met de hoge verversingssnelheid (realistische situatie voor de Oosterschelde) kon geen effect van staalslakken op het ecosysteem worden aangetoond. Wel werd gedurende een korte periode (14 dagen) een verhoging van de zuurgraad (pH) en van de vanadiumconcentratie in de waterkolom geconstateerd.
- De aanwezigheid van breuksteen leidde ongeacht de verversingssnelheid niet tot biologische effecten. Bij een lage verversingssnelheid werd in de waterkolom alleen voor nikkel een significante verhoging vastgesteld, die ook tot uiting kwam in verhoogde gehalten in mosselen en zakpijpen.
- De ontwikkeling van het ecosysteem in de mesocosms werd op een aantal aspecten beïnvloed door de waterversingsnelheid. Tussen de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen biologische verschillen als gevolg van de gebruikte testmaterialen. In de mesocosms met staalslakken vond bij de lage verversingssnelheid alleen bij sponzen een gewichtsafname plaats. De soortenrijkdom en biodiversiteit van hard-en zachtsubstraatgemeenschappen waren nergens beïnvloed door de testmaterialen, wat overeen komt met de resultaten van de veldmonitoringgegevens tot nu toe (2009-2015).

Ervan uitgaande dat de in de mesocosm geteste staalslakken en breuksteen representatief zijn voor de materialen die in de Oosterschelde zijn gestort, kan op grond van de bevindingen van deze studie in combinatie met de gegevens uit veldmonitoring 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.

1 Uitgebreide samenvatting

Om erosie van de oevers en geulwanden in de Oosterschelde tegen te gaan, worden vanaf 2009 'bestortingen' uitgevoerd om de vooroevers te beschermen. Als bestortingsmateriaal worden staalslakken, breukstenen en in 2014 ook zeegrind toegepast. Uit de omgeving is bezorgdheid uitgesproken dat het gebruik van vooral staalslakken negatieve effecten op het mariene milieu zou kunnen hebben door uitloging van zware metalen. Om meer inzicht hierin te verkrijgen is tussen 2009 en 2014 in opdracht van RWS een monitoringsprogramma rond stortlocaties uitgevoerd. Op basis van veldmonitoring (2009-2015) kon geen eenduidige relatie worden gelegd tussen de aanwezigheid van staalslakken en breukstenen en de metaalgehalten in lokale biota. Ook werden geen aanwijzingen gevonden dat de ontwikkeling van het lokale ecosysteem door uitlogende metalen was beïnvloed. De interpretatie van de gegevens werd echter bemoeilijkt door de variatie die in het veld altijd aanwezig is.

Om goed inzicht te verkrijgen in de eventuele effecten van breuksteen en staalslakken in veldsituatie op de flora en fauna -, is door IMARES in opdracht van RWS een mesocosmstudie uitgevoerd waarin de omstandigheden in de Oosterschelde zoveel mogelijk worden nagebootst. Dit onderzoek is uitgevoerd in 18 mesocosms voorzien van een zandbodem, Oosterschelde water inclusief plankton en micro-organismen en een selectie van voor de Oosterschelde representatieve macro-evertebraten en hogere planten. Na een acclimatisatie periode van 5 weken is de helft van de zandbodem 'bestort' met staalslakken, breuksteen of zeegrind (referentie). Elk type materiaal werd in drievoud getest bij een hoge verversingssnelheid die op basis van modelberekeningen door Deltares als realistisch kan worden beschouwd voor een dijkvoet in de Oosterschelde en een 35 maal lagere verversingssnelheid. Na het aanbrengen van het testmateriaal werd gedurende 12 weken de uitloging van zware metalen uit het testmateriaal naar de waterkolom en de bioaccumulatie in biota (i.e. mosselen, zee-eik en sponzen) gevolgd. Hiervoor werd het verloop gevolgd van de concentraties zware metalen (mangaan, kobalt, kwik, cadmium, molybdeen, lood, antimoon, nikkel, chroom, zink, arseen, seleen, tin, vanadium, koper, ijzer, barium en aluminium). Voor het vaststellen van biologische effecten is gekeken naar de ontwikkeling fytoplankton, benthische algen en macro-algen, naar overleving en groei van zee-eik (*fucus*), mosselen, kokkels, sponzen en zakpijpen en naar de biodiversiteit van hard- en zachtsubstraatlevensgemeenschappen.

De studie leverde de volgende resultaten op:

- In de mesocosms met lage verversingssnelheid veroorzaakten de staalslakken een duidelijke verhoging van de zuurgraad (pH) van het water ten opzichte van de mesocosms met grind en breuksteen. Tijdens de eerste twee weken na het aanbrengen van de staalslakken werd een pH verhoging ook geconstateerd in de mesocosms met hoge verversingssnelheid. Na 14 dagen waren er geen pH-verschillen meer tussen de mesocosms met hoge verversingssnelheid met grind, breuksteen of staalslakken.
- De gehalten van de metalen vanadium, aluminium, ijzer, chroom, mangaan, barium en molybdeen waren op verschillende tijdstippen significant verhoogd in de mesocosm met lage verversingssnelheid en staalslakken. Deze verhoging was het sterkst gedurende de eerste 6 weken na het storten. Bij hoge verversingssnelheid is alleen de vanadiumconcentratie gedurende een korte periode (14 dagen) significant verhoogd. De concentraties van kwik, lood, seleen, tin, antimoon, cadmium, arseen, koper en zink in de waterkolom werden niet beïnvloed door de aanwezigheid van de testmaterialen of door de verversingssnelheid.
- In de mesocosms met staalslakken en een lage verversingssnelheid werden op verschillende bemonsteringstijdstippen verhoogde concentraties van vanadium gemeten in zakpijpen (tot 2x het achtergrondgehalte), mosselen (tot 150x het achtergrondgehalte) en zee-eik (tot 20x het achtergrondgehalte) en van chroom in mosselen (tot 2x het achtergrondgehalte). In de mesocosms met hoge verversingssnelheid en staalslakken werd alleen in de zakpijpen voor vanadium nog een verhoogde concentratie (tot 2x achtergrondgehalte) aangetroffen.
- In de mesocosms met hoge verversingssnelheid werd, met uitzondering van een eenmalige korte piek van het vanadiumgehalte in mosselen in de staalslak mesocosms geen verhoging van metaalconcentraties in biota geconstateerd.

- In de mesocosms met de hoge verversingsnelheid (realistische situatie voor de Oosterschelde) kon geen effect van staalslakken op het ecosysteem worden aangetoond. In de mesocosms met lage verversingssnelheid leidde de aanwezigheid van staalslakken alleen tot een gewichtsafname (op basis van natgewicht) van de sponzen. Er werden geen andere biologische effecten vastgesteld.
- In de mesocosms met breuksteen en lage verversingssnelheid (niet realistisch voor de Oosterschelde) werd voor nikkel een significante verhoging in de waterkolom, in mosselen en zakpijpen (beiden tot 2x het achtergrondgehalte) geconstateerd. Bij hoge verversingssnelheid (realistische situatie voor de Oosterschelde) waren geen verhogingen in water of biota detecteerbaar. De aanwezigheid van breuksteen leidde niet tot biologische effecten ongeacht de verversingssnelheid.
- De ontwikkeling van het ecosysteem in de mesocosms werd op een aantal aspecten beïnvloed door de waterversingsnelheid. Tussen de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen biologische verschillen als gevolg van de gebruikte testmaterialen. In de mesocosms met staalslakken vond bij de lage verversingssnelheid alleen bij sponzen een gewichtsafname plaats. De soortenrijkdom en biodiversiteit van hard-en zachtsubstraatgemeenschappen waren nergens beïnvloed door de testmaterialen, wat overeen komt met de resultaten van de veldmonitoringgegevens tot nu toe (2009-2015).
- Uit het aanvullend uitlogingsexperiment met als doel de representativiteit van de gebruikte staalslakken in het mesocosm te testen blijkt dat de in het mesocosm gebruikte staalslakken goed overeen komen met de langduriger verouderde staalslakken zoals die voor de waterbouw (vooroeverbetorsten) worden toegepast.

In relatie tot de veldmonitoring gegevens kan het volgende worden geconcludeerd:

- Tijdens de veldmonitoring rond stortlocaties zijn geen aanwijzingen gevonden dat de benthos gemeenschappen op de substraten of in/op de nabijgelegen zachte sedimenten op een directe wijze beïnvloed worden door uitlogende stoffen uit staalslakken of breukstenen. Dit komt overeen met de bevindingen in de mesocosmstudie, waar zelfs bij een lage waterversing geen effecten op de benthosgemeenschap werden aangetoond.
- In het veld zijn rond stortlocaties geen verhoogde concentraties in biota aangetroffen van de metalen vanadium, ijzer, chroom en mangaan, die in de mesocosms indicatief voor de aanwezigheid van staalslakken blijken te zijn. Op grond van deze veldmetingen kan dus geen effect van het storten van staalslakken worden aangetoond. Dit komt overeen met de bevindingen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid, die realistisch voor de Oosterschelde kan worden geacht, waar ijzer, chroom en mangaan niet verhoogd in biota werden aangetroffen en vanadium in zeer geringe mate. De mesocosm studie maakt duidelijk dat de tijdens de veldmonitoring wel aangetroffen verhoogde gehalten van kwik, seleen, molybdeen en cadmium in biota niet gerelateerd zijn aan de aanwezigheid van staalslakken of breuksteen.
- Vanadium is het meest geschikte element om de aanwezigheid van (invloed van) staalslakken in het mariene milieu aan te tonen. Het is in lage achtergrondconcentraties aanwezig, loogt relatief lang uit, is relatief goed wateroplosbaar en accumuleert goed in biota.

Ervan uitgaande dat de in de mesocosm geteste staalslakken en breuksteen representatief zijn voor de materialen die in de Oosterschelde zijn gestort, kan op grond van de bevindingen van deze studie in combinatie met de gegevens uit veldmonitoring met zekerheid worden gesteld dat het ecosysteem in de Oosterschelde niet negatief wordt beïnvloed door uitlogende stoffen uit de op dit moment op de stortlocaties aanwezige staalslakken en breuksteen.



Figuur 1 De mesocosmopstelling op het terrein van IMARES Yerseke tijdens de acclimatisatieperiode. De deksels van de mesocosms zijn verwijderd in verband met werkzaamheden.

2 Inleiding

2.1 Aanleiding voor dit onderzoek

Om erosie van de oevers en geulwanden in de Oosterschelde tegen te gaan, is er vanaf 2008 (pilot) en 2009 (structureel) begonnen om 'bestortingen' uit te voeren om de vooroevers te beschermen. Deze bestortingen zijn uitgevoerd met staalslakken, breukstenen en, sinds 2014, zeegrind. Regionaal is bezorgdheid uitgesproken dat het gebruik van deze materialen, en met name van staalslakken, door uitloging van zware metalen leidt tot negatieve effecten op het mariene milieu. In laboratoriumonderzoek (Dubbeldam, 2011) met staalslakken en breuksteen is inderdaad uitloging naar de waterkolom aangetoond van de volgende 8 elementen: aluminium (Al), barium (Ba), ijzer (Fe), mangaan (Mn), molybdeen (Mo), tin (Sn), vanadium (V) en zink (Zn). Voor 10 andere elementen werd in dezelfde test geen uitloging gevonden. Dit betrof antimoon (Sb), arseen (As), cadmium (Cd), kobalt (Co), chroom (Cr), koper (Cu), kwik (Hg), nikkel (Ni), lood (Pb), en seleen (Se).

In 2009 is in opdracht van RWS een monitoringsprogramma gestart om onder andere inzicht te krijgen in gehalten aan zware metalen in biota op/rond de verdedigde vooroevers. Op basis van deze monitoringsdata (trend 2009-2014) kon geen eenduidig effect worden aangetoond van het storten van staalslakken en breukstenen op de metaalgehalten in biota. Dit geldt zowel voor de temporele trend als ruimtelijke analyse (Jansen e.a., 2015).

De situatie, zoals gemeten in genoemd monitoringsprogramma, vertegenwoordigt de actuele situatie in het veld. Het omvat de totale belasting van het systeem, waarbij niet kan worden uitgesloten dat factoren anders dan de ondergrond van staalslakken en breukstenen van invloed zijn op de metaalaccumulatie. Metalen kunnen ook uitlogen uit oude (vervuilde) sedimentlagen en via afstroom van land of vanuit het achterliggende stroomgebied aangevoerd worden. Ook de leeftijd van bemonsterde biota speelt een rol in de metaalaccumulatie, tijdens het verzamelen van biota op de verdedigde vooroevers is een selectie in leeftijd dan wel grootte niet tot nauwelijks praktisch uitvoerbaar. Bovengenoemde factoren resulteren in (grote) variaties in metaalgehalten in biota in deze studie, waardoor het vaststellen van causale relaties tussen uitloging van metalen uit staalslakken en breukstenen en een verhoogde accumulatie (en mogelijk effecten) in biota in het veld moeilijk is.

Om toch goed inzicht te krijgen in de vraag of en hoe de aanwezigheid van breuksteen en staalslakken in een veldsituatie effect kan hebben op het lokale milieu heeft RWS daarom IMARES gevraagd een mesocosm studie uit te voeren waarin de omstandigheden in de Oosterschelde zoveel mogelijk worden nagebootst. Mesocosms (ook wel 'model-ecosystemen' genoemd) lenen zich uitstekend voor het beantwoorden van een dergelijke onderzoeksvraag. De systemen zijn groot genoeg om een mini-ecosysteem te kunnen nabootsen, en tegelijkertijd goed beheersbaar (in termen van bijvoorbeeld grootte en aantallen van blootgestelde soorten, en doorstromingsnelheid).

Het voordeel van een mesocosm experiment boven een laboratoriumtest met één soort is dat complexe interacties tussen soorten onderling in een mesocosm ook een rol spelen. Dit is bijvoorbeeld van belang voor bioaccumulatie onderzoek als sprake is van opname van vervuilende stoffen via de voedselketen of bij het zichtbaar maken van indirecte ecologische effecten van een verstoring. Bovendien zal een vervuilende stof zich in een complexe mesocosmsituatie meer natuurgetrouw gedragen dan in een bekeerglas in een laboratorium.

Ten opzichte van veldonderzoek hebben mesocosms het voordeel dat de omstandigheden in mesocosms gecontroleerd kunnen worden, behandelingen kunnen worden gerepliceerd en er sprake is van echte controlesituaties. Mesocosms vervullen daardoor al jaren een brugfunctie bij de doorvertaling van laboratoriumgegevens naar de veldsituatie en spelen op deze wijze een prominente rol bij het Europese toelatingsbeleid van bestrijdingsmiddelen (de Jong et al., 2008).

2.2 Globale opzet van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd in 18 modelecosystemen, ook wel aangeduid als 'mesocosms'. Mesocosms zijn grote tanks waarin een deel van het ecosysteem wordt nagebootst. Voor deze studie zijn tanks met een diameter van 2 m en een volume van ruim 2 m³ voorzien van een zandbodem en Oosterschelde water, inclusief plankton en micro-organismen en is een selectie van voor de Oosterschelde representatieve macro-evertebraten en hogere planten toegevoegd. Na een acclimatisatie periode van ruim 4 weken is de helft van de zandbodem 'bestort' met de testmaterialen (staalslakken, breuksteen of zeegrind). Gedurende de daarop volgende 12 weken zijn de uitloging van stoffen uit het testmateriaal naar de waterkolom, de bioaccumulatie in biota en de ontwikkeling van het ecosysteem in de mesocosms gevolgd.

Het water in alle mesocosms werd continue ververs met Oosterschelde water. Bij de helft van de mesocosms was de verversingssnelheid realistisch voor een dijkvoet in de Oosterschelde, voor de andere helft van de mesocosms werd een 35 maal lagere verversingssnelheid gehanteerd, om een extreme worst-case situatie na te bootsen.

Details over inrichting, onderhoud en bemonstering van de mesocosms zijn beschreven in hoofdstuk 3.

2.3 Onderzoeksdoelen

Het doel van dit project was vast te stellen in welke mate zware metalen uit in zee gebrachte staalslakken bij een voor de Oosterschelde realistische en een worst-case waterverversingssnelheid:

- uitloggen naar de waterkolom
- opgenomen worden door schelpdieren (mossel), wieren (Zee-eik), zakpijpen en sponzen
- negatieve effecten veroorzaken bij bovengenoemde organismen en op het mesocosm ecosysteem

De resultaten van de staalslakken zijn vergeleken met breuksteen, het materiaal dat traditioneel voor dijkverzwaring gebruikt wordt en maasgrind als referentiemateriaal met naar verwachting weinig of geen uitloging.

3 Materiaal en methoden

3.1 Testduur en periode

Omdat de biologische productie in het voorjaar maximaal is, is dit de meest gevoelige periode om effecten aan te tonen in mesocosm studies. De studie werd daarom uitgevoerd in de periode 8 april tot 4 augustus (2015).

Twaalf weken na het begin van de blootstelling wordt de studie beëindigd. In het RWS mosselmeetnet werd een blootstellingsperiode van 6 weken toegepast en genoeg bevonden om in mosselen een evenwichtskoncentratie van onder andere zware metalen met het water te bereiken (Heesen, 1995). Veel van de kleinere soorten zullen tijdens de studie voor één of meerdere volgende generaties zorgen. Hierdoor wordt de gevoeligheid voor het aantonen van effect vergroot omdat jonge ontwikkelingsstadia vrijwel altijd gevoeliger zijn voor blootstelling aan toxische stoffen dan adulten. Het moge duidelijk zijn dat binnen een tijdsbestek van 12 weken niet alle soorten reproduceren.

3.2 Inrichting mesocosms

3.2.1 Technische inrichting

De mesocosms zijn voor deze studie ingericht in polyester tanks met een diameter van ca. 2 meter en een totaal volume van ruim 2 m³ opgesteld op het buitenterrein van IMARES Yerseke (*Figuur 2*). Bij aanvang van de studie worden alle mesocosms op exact dezelfde wijze ingericht.

Op de bodem van elke tank is op 8 april een 15 cm dikke laag fijn zand aangebracht waarna de tanks werden gevuld met ongefiltreerd Oosterschelde zeewater tot een waterdiepte van ca. 1 meter was bereikt. Diagonaal in noord-zuid richting werd in elke mesocosm een polycarbonaat strip in de zandbodem geplaatst die ca 3 cm boven het sediment uitstak. Op deze wijze was de zandbodem in twee gelijke delen verdeeld. De zeepieren en kokkels die in de mesocosms werden geïntroduceerd werden aan de oostzijde van deze strip op het sediment geplaatst. De testmaterialen (grind, breuksteen of staalslakken) werden aan de andere zijde gestort zodat geen zeepieren of kokkels hieronder begraven werden. De testmaterialen bleven in direct contact met het bovenstaande water en werden niet afgedekt met slib of zand.

Alle mesocosms werden continue doorstroomd met vers Oosterschelde water. Oorspronkelijk was het plan om hiervoor ongefiltreerd zeewater te gebruiken. Al snel bleek echter dat het ongefilterde water periodiek veel slib bevatte dat in de mesocosms bezonk. Bovendien werden stukken wier aangevoerd wat het goed functioneren van de in het systeem aanwezige membraanpompen in gevaar bracht. Om deze redenen is vanaf dag -19 het Oosterschelde water eerst door een zandfilter geleid alvorens naar de mesocosms te voeren. Het doorstroom-regime (de verversingssnelheid) is onderdeel van de proefopzet en wordt verder toegelicht in sectie 3.3.

De waterkolom in de mesocosms werd gedurende de gehele studie continue belucht vanuit het centrum. Deze wijze van beluchten leidt tot een continue homogene menging van de waterkolom. Om verstoring van het systeem door regenval, vogelpoep of andere factoren van buitenaf zoveel mogelijk te voorkomen was elke mesocosm voorzien van een transparante (polycarbonaat) deksel. Deze deksels laten wel 90% van het zonlicht door.

De echte studie startte met het afdekken van de helft van de zandbodem met een laag van één van de testmaterialen (grind, breuksteen of staalslakken). Dit vond plaats op 12 mei 2015 ('dag 0'), 35 dagen na het aanbrengen van de zandbodem en de start van de watercirculatie ('dag -35'). In de tussenliggende periode werden de mesocosms verder ingericht en kon het systeem acclimatiseren.



Figuur 2 De mesocosms waren afgedekt met polycarbonaat platen om de invloed van regen op de waterkwaliteit te beperken.

3.2.2 Biota

In de mesocosms wordt een deel van het ecosysteem nagebootst, waarin de organismen elkaar op natuurlijke wijze beïnvloeden en van elkaar afhankelijk zijn. Met uitzondering van nutriënten die met het verversingswater worden aangevoerd, wordt geen voedsel toegevoegd zodat de aanwezige organismen de beschikbare natuurlijke bronnen moeten delen. Soorten die een te grote impact hebben op een dergelijk systeem, zoals vissen en grotere predatoren (zeesterren, kreeften) worden daarom in mesocosmonderzoek in principe vermeden, tenzij er een specifieke reden is dergelijke soorten wel mee te nemen. Dat zou dan echter ten koste gaan van de informatie die over andere soorten kan worden verzameld.

Bij het vullen van de mesocosms met ongefilterd vers Oosterschelde water werden de systemen automatisch ge-ent met een natuurlijke planktongemeenschap. Om de benthische levensgemeenschap te enten werd ca 40 liter slib verzameld in de Oosterput in de Oosterschelde. Na te zijn gezeefd door een 5 mm zeef om grof materiaal en grotere organismen te verwijderen is het slib goed gemengd en in gelijke delen verdeeld over de 18 mesocosms. Per mesocosm was dit iets meer dan 2 liter, voldoende voor het enten van kleine organismen, maar te gering om van invloed te zijn op de sedimentsamenstelling in de mesocosms.

Naast deze enten van kleinere soorten, zijn specifieke grotere soorten in bekende aantallen in de mesocosms ingezet. Al deze organismen werden kort daarvoor in de Oosterschelde verzameld. Slijkgarnalen (ca. 150 per mesocosm), zeepieren (10 per mesocosm) en kokkels (20 per mesocosm) zijn dominante soorten van een zachte (zand)bodem in een getijdengebied als de Oosterschelde en hebben door middel van bioturbatie een belangrijke rol bij het structureren van de bodem en de ontwikkeling van de benthische levensgemeenschap.

Alikruiken (25 per mesocosm) zijn de belangrijkste begrazers van harde substraten en werden ingezet om de aangroei van macroalgen op de wanden van de mesocosms en de testmaterialen onder controle te houden. Al deze organismen werden voor dag -25 in de mesocosms gebracht.

Voor het volgen van opname van stoffen werden blaasjeswier (*Fucus vesiculosus*), mosselen (*Mytilus edulis*), doorschijnende zakpijpen (*Ciona intestinalis*) en broodspunzen (*Halichondria panicea*) in de mesocosms ingezet. Om tussentijdse bemonstering mogelijk te maken werden deze soorten in *enclosures* in de mesocosms geplaatst.

Blaasjeswier werd verzameld bij laag water op de dijk langs de Korringaweg in Yerseke op dag -25 en direct in de mesocosms aangebracht. Hierbij werden jonge onbeschadigde stekken en vervolgens met 'ty-raps' met de voet aan een dwars over de mesocosm gespannen nylon koord bevestigd. In elke mesocosm werden zo 8 stekken blaasjeswier aangebracht. Van elke stek werd vooraf het natgewicht bepaald, zodat bij terugbemonsteren een indruk van de biomassaontwikkeling kon worden verkregen. Het koord waaraan de wieren werden bevestigd, was voorzien van een constructie waardoor het eenvoudig mogelijk was om de wieren boven water te tillen. Elke werkdag, globaal tussen 10:00 en 16:00 uur, werden de wieren op deze wijze drooggelegd, om zo het droogvallen door getijden werking te simuleren wat voor de conditie van deze soort essentieel is.

De jonge mosselen die in de studie zijn gebruikt waren afkomstig van een mosselperceel. Uit de verzamelde partij werden onbeschadigde exemplaren van rond 3 cm lengte geselecteerd die vervolgens ad random zijn verdeeld in groepjes van 15 exemplaren. Deze groepjes mosselen werden verpakt in kunststof netjes. Op dag -19 zijn in elke mesocosm 10 van deze netjes met in totaal dus 150 mosseltjes aangebracht. De netjes werden aan een over de mesocosms gespannen koord op circa halve waterdiepte vrij in de waterkolom opgehangen.

De ingezette sponzen waren ook afkomstig van de mosselpercelen in de Oosterschelde. Grote gezonde exemplaren werden in stukken gesneden van zoveel mogelijk gelijke grootte. Na weging werden deze stukken spons in netjes verpakt en in de waterkolom van de mesocosms gehangen. Elke mesocosm 'ontving' 2 stukjes spons van ca 30 gram op dag -1.

De zakpijpen voor dit project werden door duikers van Stichting Zeeschelp verzameld in de Grevelingen. Na een korte acclimatisatieperiode bij Stichting Zeeschelp zijn onbeschadigde exemplaren verzameld. Omdat onduidelijk was waar en hoe voldoende zakpijpen konden worden verzameld, waren deze dieren pas laat beschikbaar. Op dag 20 werden uiteindelijk per mesocosm zes individuele zakpijpen op/tussen het gestorte materiaal ingezet. Om de amorfe zakpijpen enige ondersteuning te geven werden zij geplaatst in pvc-ringen. De diameter van de zakpijpen varieerde tussen 3 en 6 cm, de lengte tussen ca 4 en 8 cm. Het formaat en gewicht van deze dieren wordt in belangrijke mate bepaald door de hoeveelheid ingesloten water, waardoor er geen goede manier is om het werkelijk formaat van een levend organisme vast te stellen.

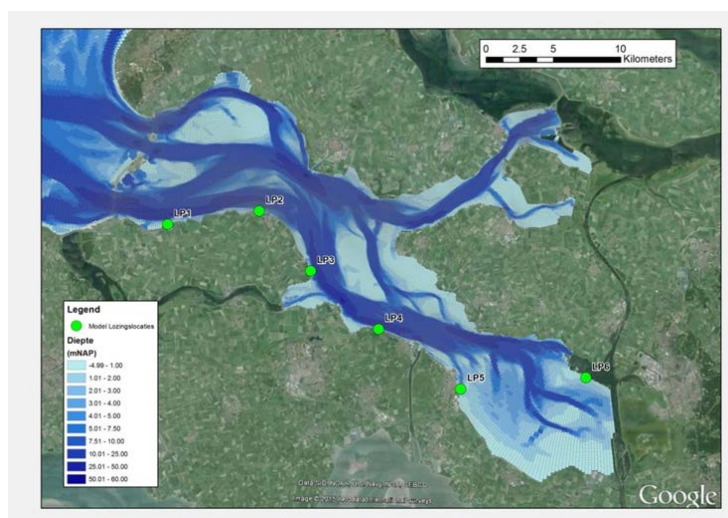
3.3 Behandelingen

3.3.1 Verversingssnelheden

Om de realistische verversingssnelheid te bepalen heeft Deltares als onderdeel van deze studie berekeningen uitgevoerd met een bestaand model van de Oosterschelde waarbij de verversingssnelheid van het water langs een dijk werd geschat. Hiervoor is gebruik gemaakt van het 2-dimensionale hydrodynamische model Scalooost dat het deeltjesmodel Delft3D-PART aanstuurt. PART berekent de verspreiding van een geloosde stof. Uit de afname van de concentratie bij het lozingspunt kan een inschatting gemaakt worden van de lokale verblijftijd dat in dit geval gedefinieerd is als een gebied van ongeveer 5 meter waarbinnen het lozingspunt zich bevindt. De instantane lozingen zijn ingebracht op een viertal momenten in een getij: laagwater, vloed, hoogwater en eb. Alle lozingen zijn verdeeld over de gehele lokale waterdiepte.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de zes locaties die zijn weergegeven in *Figuur 3*.

Voor een meer uitgebreide beschrijving van de berekeningen (en de resultaten) wordt verwezen naar de Deltares rapportage dat als Bijlage 7 is opgenomen.



Figuur 3 Bathymetrie van het Scalooost model en locaties waarvoor de lokale verversingssnelheden zijn berekend.

De modelberekeningen geven aan dat 24 uur na een lozing op alle locaties minder dan 1% van de concentratie nog aanwezig is (Tabel 1). De laagste verdunningsfactor wordt berekend voor locatie LP5. In de situatie met de laagste verversingssnelheid, wanneer de lozing tijdens afgaand tij (Eb) geschiedt, bedraagt de waterconcentratie na 24 uur iets minder dan 0.5% van de oorspronkelijke concentratie.

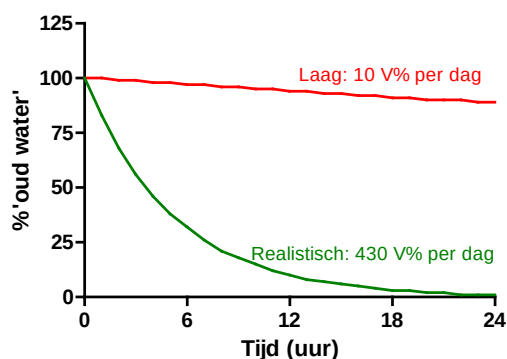
Tabel 1 Percentage van de initiële concentratie van een opgeloste stof 24 uur na lozing op de locaties uit figuur 1 (LP 1 tm 6). Gebaseerd op modelberekeningen met het Scalooost model waarbij een lozing op vier verschillende momenten tijdens de getijdencyclus werd gesimuleerd.

	Eb	Vloed	Laag water	Hoog water
LP 1	<0.001%	<0.001%	0.001%	0.001%
LP 2	0.002%	<0.001%	<0.001%	0.117%
LP 3	0.004%	<0.001%	<0.001%	0.138%
LP 4	<0.001%	<0.001%	<0.001%	0.015%
LP 5	0.446%	0.007%	0.004%	0.220%
LP 6	0.001%	0.002%	0.001%	0.172%

Conform de berekeningen voor locatie LP5, zou dus in het realistische verversingsscenario na 24 uur nog maximaal 0.5% van het oorspronkelijke water in de mesocosm aanwezig mogen zijn. Het uitgangspunt van de mesocosmstudie was te werken met een verversingssnelheid die de helft lager

ligt, zodat na 24 uur nog 1% van het oorspronkelijke water aanwezig is (realistische verversingssnelheid). Uitgaande van continue volledige menging van de waterkolom in de mesocosms is hiervoor een verversingssnelheid nodig van 350 L per uur, of 430% van het watervolume per dag (Figuur 4).

Voor de extreme worst case situatie (lage verversingssnelheid) moet per dag 10% van het watervolume in de mesocosms worden verversd (10 L per uur), zodat na 24 uur nog 90% van het oorspronkelijke water aanwezig is.



Figuur 4 Theoretische vervangingssnelheid van het water in een mesocosm gedurende 24 uur bij de lage en realistische verversingssnelheden. Bij de berekening is uitgegaan van volledige menging van de waterkolom.

In de mesocosm studie zijn dus de volgende twee verversingssnelheden gehanteerd:

- 1) Realistische verversing: Doorstroomdebiet 350 L per uur/430 volume% per dag. Deze verversingssnelheid mag minimaal op een werkelijke stortlocatie in de Oosterschelde verwacht worden.
- 2) Lage verversing: Doorstroomdebiet van 10 L per uur/ 10 volume% per dag. Deze situatie is niet representatief voor de veldsituatie in de Oosterschelde.

3.3.2 Testmaterialen

Op verzoek van Rijkswaterstaat werden door De Hoop Bouwgrondstoffen BV te Terneuzen de testmaterialen, staalslakken, breuksteen en grind, bij IMARES Yerseke afgeleverd.

Het breuksteen in grootteklasse 90-150 mm, was volgens opgave van de leverancier afkomstig uit de omgeving van Doornik (België). Het zeegrind was gewonnen voor de kust van Engeland, grofweg tussen Brighton en Le Havre. De staalslakken met grootteklasse van 45–180 mm waren afkomstig van staalproducent ArcelorMittal te Gent. Van elk testmateriaal werd 1 m³ geleverd.

Op 12 mei 2015 (dag 0) werden elk testmateriaal gelijk verdeeld over 6 mesocosms. Elke mesocosm ontving dus een volume van circa 170 liter testmateriaal. Afgaande op de opgegeven gewichten van de geleverd partijen werd er circa 250 kg breuksteen en circa 450 kg staalslakken in een mesocosm gestort. Van de partij grind was geen totaal gewicht bekend.

Het testmateriaal werd aan één zijde in de mesocosm gestort, waarbij het zo gelijk mogelijk over het oppervlak werd verdeeld. Zodoende werd de helft van de zandbodem met een laag van ca. 10 cm testmateriaal bedekt. Van de 6 mesocosms met hetzelfde testmateriaal werden er 3 met een lage en 3 met een realistische snelheid verversd. Zo werden de 6 behandelingen gecreëerd die in dit rapport als volgt zullen worden aangeduid:

1. Grind-laag
2. Grind-hoog
3. Breuksteen-laag
4. Breuksteen-hoog
5. Staalslak-laag
6. Staalslak-hoog

De 18 mesocosms stonden opgesteld in 3 rijen van 6. Volgens het principe van een 'random block design' werden de verschillende behandelingen *ad-random* per rij verdeeld.

3.4 Analyses en bemonsteringen

Een overzicht van de uitgevoerde analyses en bemonsteringen is gegeven in *Tabel 2*. In de volgende paragrafen worden de handelingen toegelicht.

Tabel 2 Overzicht van de uitgevoerde bemonsteringen tijdens de acclimatisatie periode van 8 april (dag -35) tot en met 11 mei (dag -1)

	dag nr	Water basis	Nutr & DOC	Plankton	B. algen	Benthos	Water chemie	Zee-eik chemie	Mossel chemie	Spons chemie	Zakpijp chemie
17-apr	-25							in			
20-apr	-22	X									
23-apr	-19								in		
28-apr	-14	X									
7-mei	-5	X									
11-mei	-1									in	

Tabel 3 Overzicht van de uitgevoerde bemonsteringen tijdens de bloostellingsperiode van 12 mei (dag 0) tot en met 4 augustus (dag 84)

	dag nr	Water basis	Nutr & DOC	Plankton	B.algen	Benthos	Water chemie	Zee-eik chemie	Mossel chemie	Spons chemie	Zakpijp chemie
12-mei	0	X	X	X	in		X	X	X		
14-mei	2	X					X				
21-mei	9	X					X				
28-mei	16	X	X	X			X	X	X		
1-jun	20										in
4-jun	23	X					X				
11-jun	30	X	X	X	X		X	X	X		
18-jun	37	X					X				
25-jun	44	X	X				X				
2-jul	51	X					X				
9-jul	58	X	X	X	X		X	X	X	X	X
16-jul	65	X					X				
23-jul	72	X	X								
30-jul	79	X									
4-aug	84	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Afronding eindbemonstering op dag 85/86 (5/6 aug)</i>											

Water basis = Temperatuur, saliniteit, Troebelheid, zuurstofgehalte, pH, chlorofyl

Nutr & DOC = Gehalten NO₃, NH₄, PO₄ Si en Opgelost organisch koolstof (DOC) in water

Plankton = Fytoplankton dominante soorten

B.algen = Benthische algen biomassa

Benthos = Benthos levensgemeenschap (alleen bij eindbemonstering)

.... chemie = Analyse van gehalten in water of biota. Bij biota tevens groei en overleving

'in' = organismen/substraat in mesocosms aangebracht

3.4.1 Algemene waterparameters

Standaard waterparameters als temperatuur, saliniteit, pH en zuurstofgehalte en troebelheid zijn wekelijks bepaald op halve waterdiepte in de mesocosms met behulp van Hach-Lange electrodes (HQ40D voor pH en zuurstof; HQ30D voor saliniteit en Hanna thermometer voor temperatuur).

Voor de bepaling van nutriëntengehalten (stikstof, fosfaat en silicaat) en het gehalte opgelost organisch koolstof (DOC) zijn elke 14 dagen watermonsters verzameld op halve waterdiepte in de

mesocosms. Deze monsters werden dezelfde dag afgeleverd bij Het Waterlaboratorium (Haarlem) waar de analyses zijn uitgevoerd.

3.4.2 Biologische parameters

De ontwikkeling van de algenbiomassa in de waterkolom is wekelijks bepaald aan de hand van het chlorofyl-a gehalte in watermonsters die op halve water diepte in de mesocosm werden verzameld. het chlorofyl-a gehalte werd direct in het monster bepaald met behulp van een *BBE Moldaenke algae on-line analyser* (BBE, Duitsland). Elke 14 dagen werden monsters verzameld om de dominante soorten in fytoplanktongemeenschap te bepalen. Deze monsters werden ook op halve waterdiepte verzameld en na conservering 1% lugol opgeslagen voor microscopische analyse op een later tijdstip.

Om de ontwikkeling van benthische algen te kunnen volgen werd elke 4 weken in elke mesocosm een houder met daarin 4 schone glasplaatjes (lxb) geplaatst. De houders werden op ca 10 cm onder het wateroppervlak gehangen met de glasplaatjes gericht op het zuiden. Na 4 weken blootstelling werd met *microtiter plate reader BioteK FLx800* de hoeveelheid chlorofyl op de glasplaatjes fluorometrisch bepaald. Dit vormt een maat voor de biomassa aan benthische algen die zich gedurende de blootstellingsperiode op de glasplaatjes heeft ontwikkeld.

Bij de bemonsteringen van biota ten bate van chemische analyses werden ook enkele basale biologische parameters bepaald.

Van de mosselen werd bij elke bemonstering overleving, schelpenlengte en vleesgewicht bepaald. Het blaasjeswier en de sponzen werden gewogen bij de bemonstering om de verandering in biomassa te bepalen.

Bij zakpijpen is het formaat en gewicht in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid ingesloten water. Hierdoor is er geen goede manier om het werkelijk formaat van een levende zakpijp vast te stellen. Bij de bemonsteringen werd daarom alleen de conditie (levend, zwak, dood) bepaald.

Tijdens de eindbemonstering werd de gehele mesocosm bemonsterd, werden zeepieren, kokkels en alikruiken verzameld en zijn alle de op het oog zichtbare aanwezige soorten genoteerd. Hierbij werden ook de testmaterialen op aangegroeide organismen onderzocht.

De benthos gemeenschap in de zandbodem is gekarakteriseerd aan de hand van een sub-monster dat werd verzameld door een buis van 30 cm diameter tot op de bodem door de zandlaag te drukken op het moment dat er nog enkele cm water in de mesocosm stond. De binnenzijde van de buis werd vervolgens leeggescapt en over een 500 µm zeef geleid om de aanwezige organismen te verzamelen. Deze organismen zijn geconserveerd op formaline en op een later tijdstip geteld en gedetermineerd.

3.4.3 Chemische analyses

Water

Voordat het watermonster werd verzameld werd de daarbij gebruikte kunststof injectiespuit eerst 3 maal gespoeld met het mesocosm water. Voor het werkelijke watermonster werd vervolgens op halve water diepte 60 ml water verzameld met deze injectiespuit. Hierna werd de injectiespuit voorzien van een passend cellulose acetaat membraan 0.45 µm filter (25 mm, Whatman). De eerste 10 ml van het zeewater dat door het filter werd geperst werd weggegooid. De volgende 40 ml werd verzameld in een polyethyleen (LDPE) flesje en aangezuurd met een druppel geconcentreerd zoutzuur (Merck, suprapur) tot pH 2. Deze monsters werden gekoeld opgeslagen tot de chemische analyses. Voor de waterbemonstering werden slechts kunststof materialen gebruikt. Voorafgaand aan elke bemonstering werd al het materiaal grondig gespoeld met een 10% salpeterzuur (Baker, Instra Analysed) oplossing en *supra pure* (milli-Q) water. Om de kans op cross-contaminatie te minimaliseren was voor elke behandeling per bemonsteringstijdstip een eigen injectiespuit beschikbaar. Voor elke monsternamen per mesocosm werd een nieuw (disposable) filter gebruikt.

De chemische analyses zijn uitgevoerd door TNO Triskelion te Zeist. Hiertoe werden de monsters in een laminaire flow kast verdund met verdund salpeterzuur, waarna een submonster werd geïnjecteerd in een HR-ICP-MS. In totaal werden 18 elementen geanalyseerd zoals weergegeven in *Tabel 4*.

Ter kwaliteitscontrole is bij elke monsterserie een blanco zeewatermonster geanalyseerd uit een batch die aan het begin van de studie eenmalig was verzameld.

Biota

Net als bij de opwerking van de watermonsters is ook al het materiaal dat bij de verwerking van de biotamonsters werd gebruikt vooraf grondig gereinigd met 10% salpeterzuur en *supra pure* (milli-Q) water. Voor snijden en homogeniseren is gebruik gemaakt van titanium materialen.

Chemische analyses zijn uitgevoerd aan mosselvlees, zee-eik, spons en zakpijp. Na bemonstering werden al deze materialen verpakt in zuurgespoelde potten en ingevroren bij -18°C.

Voor verdere verwerking zijn de mosselmonsters ontdooid. Het aantal lege schelpen werd bepaald als maat voor de sterfte en van de gevulde schelpen werd de schelpenlengte bepaald met een elektronische schuifmaat. Vervolgens is met een titanium mesje het vlees uit de schelpen gesneden en verzameld in een zuurgespoelde glazen pot. Nadat het totaal vleesgewicht van de partij mosselen was vastgelegd is het mosselvlees met een titanium homogenisator vernalen. Het aldus ontstane monster is vervolgens weer ingevroren bij -18°C tot transport naar het laboratorium van TNO Triskelion waar de chemische analyses werden uitgevoerd en het drooggewicht van het monster werd bepaald.

Ook de sponsmonsters werden gehomogeniseerd en opnieuw ingevroren tot de analyse.

Het blaasjeswier en de zakpijpen waren zo stug dat homogeniseren met een titanium (of kunststof) homogenisator niet goed mogelijk was. Het gebruik van een andere materiaal(metaal)soort zou waarschijnlijk tot contaminatie van de monsters leiden. Daarom werd besloten deze monsters niet te homogeniseren voorafgaan aan de analyse maar om in plaats daarvan een zo groot mogelijke hoeveelheid materiaal in zijn geheel te destrueren.

Destructie van de monsters vond plaats in salpeterzuur onder reflux condities. Het destruaat werd vervolgen geïnjecteerd in een HR-ICP-MS voor de analyse van de 18 elementen genoemd in Tabel 4. De analytische methodes zijn gevalideerd voor de elementen As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mo, Sb, Se en Zn.

Tabel 4 Overzicht van de elementen die onderdeel waren van de chemische analyses (in willekeurige volgorde).

Element	Symbool	Element	Symbool
Mangaan	Mn	Zink	Zn
Kobalt	Co	Arseen	As
Kwik	Hg	Seleen	Se
Cadmium	Cd	Tin	Sn
Molybdeen	Mo	Vanadium	V
Lood	Pb	Koper	Cu
Antimoon	Sb	IJzer	Fe
Nikkel	Ni	Barium	Ba
Chroom	Cr	Aluminium	Al

3.4.4 Statistische interpretatie van de data

De significantie van de verschillen tussen de behandelingen zijn statistisch getoetst met behulp van het software pakket GraphPad PRISM v5. Met uitzondering van de pH, die al logaritmisch wordt uitgedrukt zijn alle numerieke meetdata hiervoor log-getransformeerd. Vervolgens is de significantie van de verschillen tussen de behandelingen op de verschillende meettijdstippen getoetst met een two-way-ANOVA test gevolgd door een *Bonferroni multiple comparison test*. Verschillen worden statistisch significant beschouwd bij $p < 0.05$.

4 Resultaten

4.1 Functioneren mesocosms en algemene observaties

4.1.1 Technisch functioneren

Zoals eerder aangegeven werden de mesocosms ververst met gefilterd Oosterschelde water, om vervuiling van het systeem met slib en macroalgen te voorkomen. In de aanvoerslangen ontwikkelde zich echter snel algen waardoor de doorstroming beperkt werd, door de aanvoerslangen regelmatig met hoge druk schoon te spuiten werd goede doorstroming gegarandeerd.

Tussen het moment van het aanbrengen van de testmaterialen (dag 0) en de eindbemonstering (dag 84) bedroeg het verversingsdebiet voor mesocosms met de realistische doorstroming 328 ± 44.5 L/uur. Voor de mesocosms met lage verversingssnelheid was dit 14.9 ± 5.5 L/uur. Wegens technische problemen (kortsluiting, pomp defect) is tijdens de proef de aanvoer van water een aantal malen gedurende maximaal een dagdeel afgesloten geweest. Omdat alle 9 mesocosm met dezelfde verversingssnelheid met één pomp werden bediend hadden de technische problemen met de pompen gelijke consequenties voor al deze mesocosms.

Tijdens één van de stormen eind juli sloegen de deksels van mesocosms Y06 (breuksteen-realistisch) en Y14 (staalslak-laag) aan één zijde los. Dit kon de volgende dag (30 juli) eenvoudig worden gerepareerd en heeft waarschijnlijk geen invloed gehad op de onderzoeksresultaten.

4.1.2 Algemene observaties

Vooraf in de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontwikkelden zich op grote schaal macro-algen. Deze moesten periodiek worden verwijderd om volledig dichtgroeien en zuurstofloosheid onder de algenmat te voorkomen. Ook moesten met regelmaat algen worden verwijderd van de netjes die gebruikt werden om de sponzen en mosselen in te exposeren, om een goede wateruitwisseling te behouden. De totale hoeveelheid macroalgen die werd verwijderd werd per mesocosm genoteerd (zie 4.3.3).

Afgezien van aangroeiende organismen onderging het grind en het breuksteen geen zichtbare veranderingen tijdens het verblijf in de mesocosms (*Figuur 5*). Bij de staalslakken waren wel veranderingen zichtbaar. Als snel na het aanbrengen ontstonden roestkleurige plekken op enkele slakken. Enkele weken later ontwikkelden zich op sommige slakken lichtgekleurde aders, al dan niet uitgroeiend tot uitwendige structuren. Tijdens de eindbemonstering viel het op dat deze dooraderde staalslakken onder lichte druk uit elkaar vielen waarbij het water melkachtig vertroebelde. Naar schatting was dit het geval bij circa 20% van de slakken.

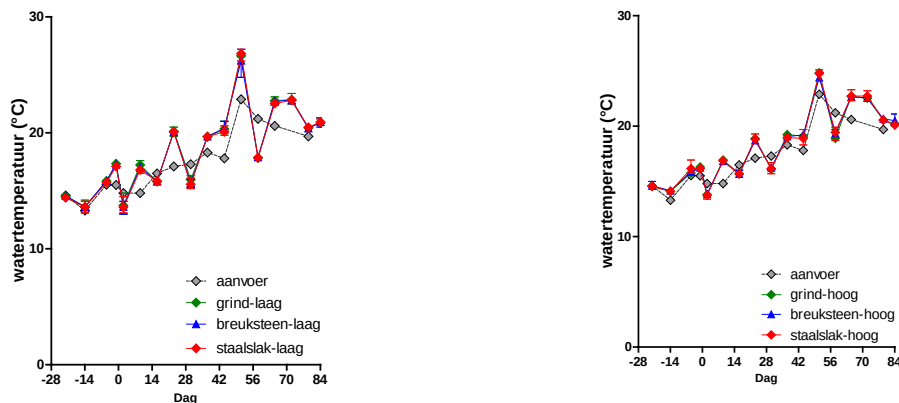


Figuur 5 Van links naar rechts: grind, breuksteen en staalslakken bij de eindbemonstering van de mesocosms na 12 weken blootstelling.

4.2 Algemene waterparameters

4.2.1 Watertemperatuur

De watertemperatuur in de mesocosms steeg gedurende de studie ruwweg van ca 14 tot 20°C (Figuur 3). Op dag 0 bedroeg de watertemperatuur ca 17°C. De hoogste temperatuur werd gemeten op dag 51 en lag rond 24°C in de mesocosms met de hoge verversingssnelheid en rond 27° in de mesocosm met de lage verversingssnelheid. De watertemperatuur in de mesocosms lopen globaal parallel met de temperatuur van het aangevoerde water. Doordat de temperatuur in de mesocosms ook door de buitentemperatuur worden beïnvloed zijn de fluctuaties wat groter in de mesocosms met de lage verversingssnelheid. Tussen mesocosms met gelijke verversingssnelheid bestaan geen relevante temperatuurverschillen.



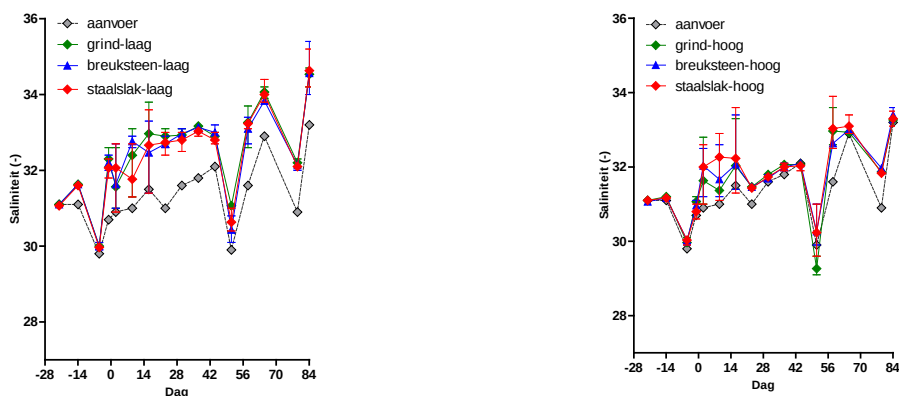
Figuur 6 Watertemperatuur in de mesocosms en van het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.2.2 Saliniteit

De saliniteit van het aangevoerde Oosterschelde water lag doorgaans tussen 31 en 32 en vertoonde een lichte stijging in de tijd. Op dagen -5, 51 en 84 was de saliniteit plotseling lager, maar nooit onder de 29.

De saliniteit in de mesocosms met hoge verversingssnelheid wijkt slechts weinig af van het aanvoerwater, als er een afwijking zichtbaar is dan is de saliniteit in de mesocosm gemiddeld 0.4 eenheden hoger dan in het aangevoerde water. Dit zal het gevolg zijn van verdamping die in de mesocosm plaatsvindt. Dit effect is sterker in de mesocosms met lage verversingssnelheid, waar de saliniteit gemiddeld 1.0 eenheid hoger ligt dan in het aangevoerde water. Deze waarden kunnen als normaal worden beschouwd voor de Oosterschelde.

Tussen de mesocosms met dezelfde verversingssnelheid zijn geen significante verschillen in saliniteit waarneembaar.

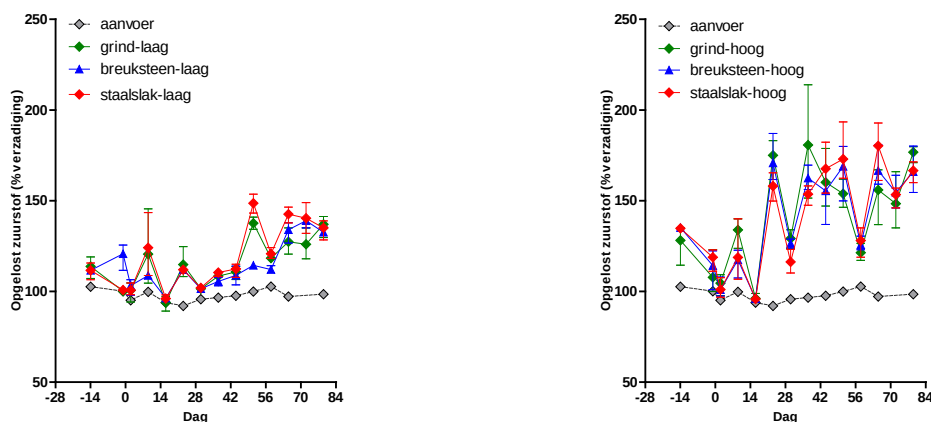


Figuur 7 Saliniteit van het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.2.3 Zuurstofgehalte

Het zuurstofgehalte van het verversingswater lag gedurende de gehele studie rond de 100% van de maximale verzadiging (Figuur 8). Na dag 14 was het zuurstofgehalte van het mesocosm water consequent hoger als gevolg van primaire productie. In de mesocosms met lage verversingssnelheid worden aan het eind van de studie zuurstofpercentages gemeten tot 140%, terwijl in de mesocosms met hoge verversingssnelheid zelfs de 160% wordt overschreden. Dit duidt op een hogere primaire productie in de mesocosms met hoge verversingssnelheid.

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid bestaan geen verschillen tussen zuurstofgehalten in de mesocosms met de verschillende testmaterialen. In de mesocosms met lage verversingssnelheid zijn de zuurstofgehalten op dag -1 significant ($p < 0.05$) hoger in de mesocosms waar een dag later breuksteen aan zou worden toegevoegd. De reden van deze afwijking is niet duidelijk en berust waarschijnlijk op toeval, en het verschil is niet meer aanwezig bij de volgende meting 2 dagen later. Op dag 51 stijgt het zuurstofgehalte in de alle mesocosms met een lage verversingssnelheid behalve die waar breuksteen in is gestort waardoor de zuurstofgehalten in deze mesocosms op die dag significant afwijken van de mesocosms grind-laag en staalslak-laag. Ook dit verschil is echter niet structureel en is bij de volgende meting verdwenen.



Figuur 8 Zuurstofgehalte van het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

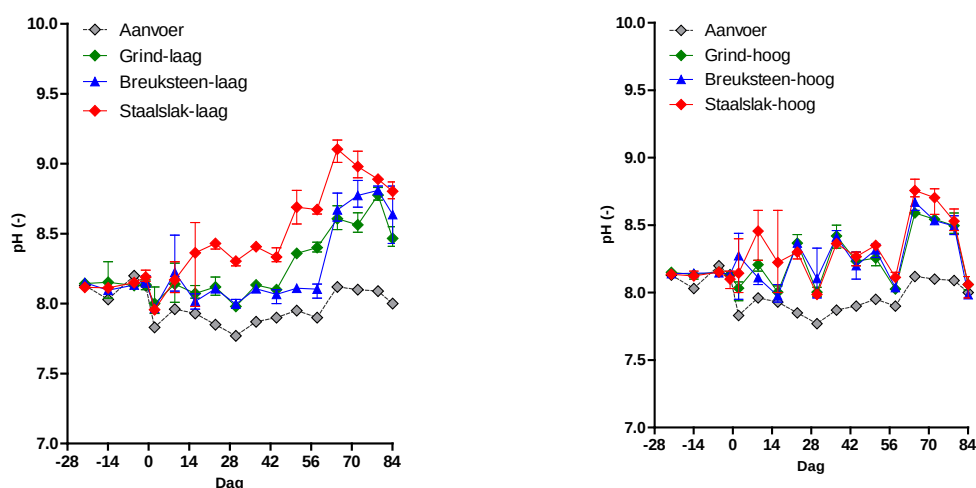
4.2.4 pH

De zuurgraad (pH) van het aangevoerde verversingswater was relatief stabiel tussen 7.8 en 8.2 (Figuur 9). In een natuurlijk systeem hangt de pH sterke samen met de primaire productie, omdat - eenvoudig gezegd - door consumptie van het 'zure' CO₂ de pH van het water stijgt. De pH kan echter ook beïnvloed worden door de aanwezigheid van zure of basische stoffen.

Vanaf dag 0 is de pH van het water in de mesocosms hoger dan van het aangevoerde water. In alle mesocosms met hoge verversingssnelheid volgt de pH hetzelfde patroon en wordt een maximale waarde van rond 8.8 bereikt rond dag 70. De enige uitzondering hierop is op dag 9 wanneer in de staalslakken-hoog mesocosms een hogere pH wordt gemeten dan in de andere mesocosms met hoge verversingssnelheid. Ten opzichte van de breuksteen-hoog mesocosms is dit verschil sterk significant (Tabel 5). Het is aannemelijk dat de verhoogde pH ten opzichte van het aanvoer water in alle mesocosms met hoge verversingssnelheid in belangrijkste mate het gevolg is van primaire productie, maar dat het afwijkende patroon rond dag 9 samenhangt met uitloging van basische stoffen uit de staalslakken.

Dit vermoeden wordt versterkt door de observaties in de mesocosms met lage verversingssnelheid. Tussen dag 0 en dag 44 stijgt de pH in de staalslakken mesocosms, terwijl deze in de andere mesocosms stabiel blijft. Vanaf dag 16 is de pH van het water in de staalslakken-laag mesocosms significant hoger dan in de corresponderende mesocosms met grind of breuksteen (Tabel 5). Hoewel de pH ook stijgt in mesocosms grind-laag na dag 44 blijft de pH in de staalslakken mesocosms tot het eind van de studie significant hoger. De pH in de breuksteen-laag mesocosms begint te stijgen na dag 58 en loopt dan snel op waardoor na dag 65 de verschillen met de staalslakken mesocosms verdwijnen.

De maximale pH-waarde in de Staalslakken-laag wordt bereikt op dag 65 en blijft net beneden 9.2. Dit kan worden geschouwd als een extreme waarde voor een natuurlijke situatie. In de mesocosms met grind of breuksteen komt de pH niet boven 8.8.



Figuur 9 Zuurgraad (pH) van het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

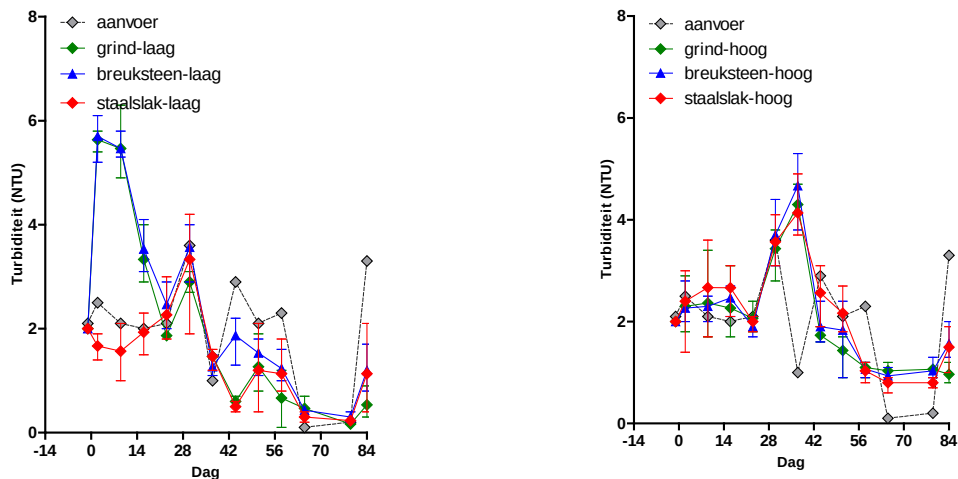
Tabel 5 Statistische significantie van de verschillen in pH van het water in de mesocosms met staalslakken ten opzichte van mesocosms met grind en breuksteen bij de lage en hoge verversingssnelheid. 'ns' = niet significant; '*' = $p < 0.05$; '**' = $p < 0.01$; '***' = $p < 0.001$; '****' = $p < 0.0001$.

Dag nr.	Lage verversing		Hoge verversing	
	t.o.v. grind	t.o.v. breuksteen	t.o.v. grind	t.o.v. breuksteen
-22 tot 2	ns	ns	ns	ns
9	ns	ns	ns	***
16	**	***	ns	ns
23	**	**	ns	ns
30	**	**	ns	ns
37	*	**	ns	ns
51	***	****	ns	ns
58	*	****	ns	ns
65	****	****	ns	ns
72	****	ns	ns	ns
84	***	ns	ns	ns

4.2.5 Troebelheid

De testmaterialen werden zonder verdere voorbewerking in de mesocosms gebracht. Grind en breuksteen bevatte resten van klei/slibachtig materiaal waardoor het water in de mesocosms vertroebelde. De partij staalslakken was vrij van dergelijke vertroebelende materialen. In de mesocosms met lage verversingssnelheid was in de eerste 10 dagen na het aanbrengen van het grind en het breuksteen sprake van een significant ($p < 0.01$ op dagen 2 en 9) hogere troebelheid dan in de mesocosms waaraan staalslakken werden toegevoegd (Figuur 10). In de mesocosms met hoge doorstroomsnelheid werd dezelfde vertroebeling waargenomen direct na het aanbrengen van het breuksteen en grind. Door het hogere verversingssnelheid verdween deze troebelheid echter snel. De troebelheid wordt verder beïnvloed door de aanwezigheid van algen en gesuspendeerd materiaal dat in de mesocosms zelf ontstond en/of met het verversingswater werd aangevoerd. Hierdoor fluctueert de troebelheid in de tijd, met iets hogere waarden in de mesocosms met de hoge verversingssnelheden. Met uitzondering van een enkelvoudige waarneming op dag 44 waarop in de lage verversingsmesocosms het water in de mesocosms met breuksteen om onduidelijk redenen

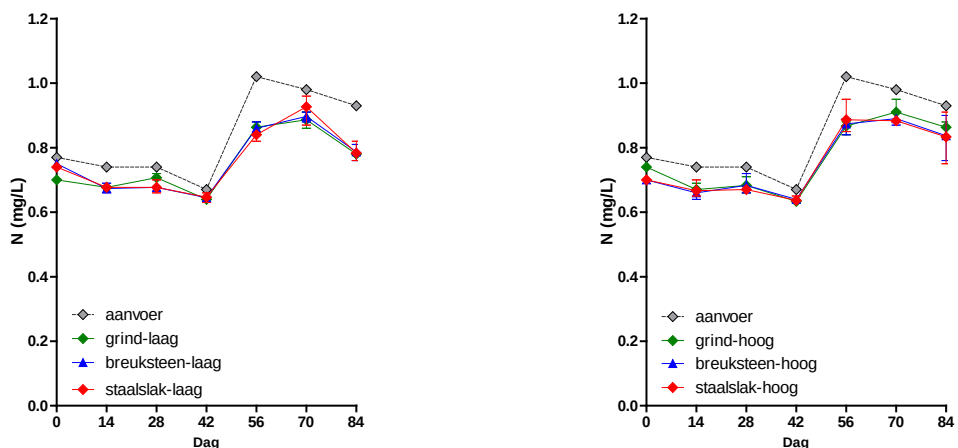
significant helderder is dan in de overige mesocosms, zijn er geen aanwijzingen dat de testmaterialen op de langere termijn invloed hebben op de troebelheid van het water.



Figuur 10 Troebelheid (turbiditeit) van het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.2.6 Nutriënten gehalten

Stikstof was in de vorm van ammonium en nitraat gedurende de gehele studie in het aangevoerde verversingswater aantoonbaar aanwezig (Figuur 11), met een duidelijke toename van voornamelijk het nitraatgehalte na dag 42. De stikstofgehalten in het water van de mesocosms volgden het gehalte in het aangevoerde water, zij het dat de gehalten in de mesocosms consequent iets lager waren. Het stikstofgehalte werd niet waarneembaar beïnvloed door de verversingssnelheid of door de testmaterialen.

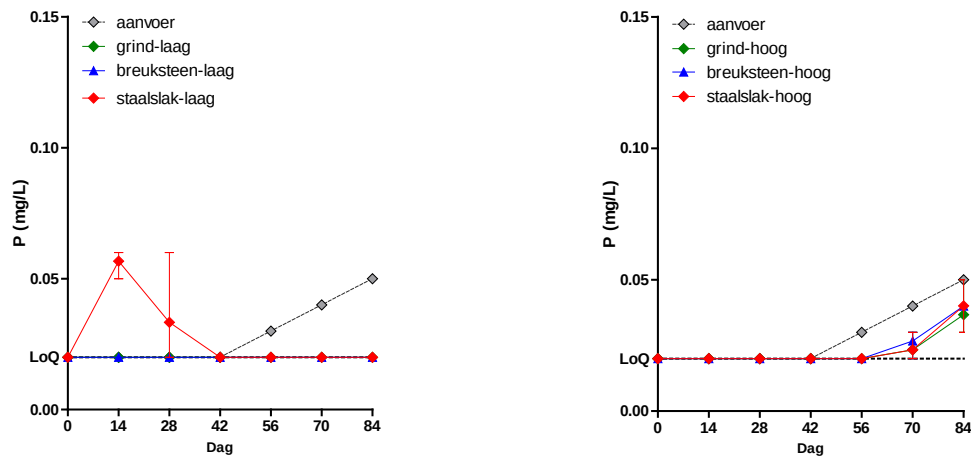


Figuur 11 Concentraties van stikstof (als NH_4 en NO_3) in het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

Tot dag 42 lagen de fosfaatgehalten in het aanvoerwater beneden de kwantificatielimiet (Figuur 12). Daarna nam het gehalte geleidelijk toe tot een maximale concentratie van 0.05 mg P/l op dag 84. In dezelfde periode steeg de fosfaatconcentratie ook in alle mesocosm met hoge verversing boven de kwantificatielimiet, zonder aanwijzing dat het testmateriaal dit proces in deze mesocosms beïnvloedde.

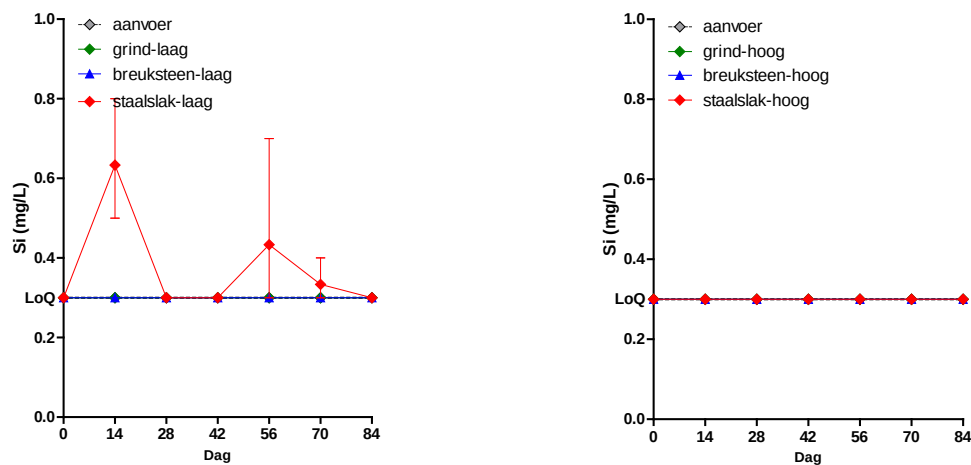
In de mesocosms met lage verversingssnelheid werd geen stijgend fosfaatgehalte na dag 42 zichtbaar. Het fosfaatgehalte in deze mesocosms met breuksteen en grind bleef dan ook gedurende de

gehele studie onmeetbaar laag. In de staalslak-laag mesocosms werd echter wel op de dagen 14 en 28 fosfaat in de waterkolom gemeten, waarschijnlijk afkomstig uit de aangebrachte staalslakken. Na dag 28 waren de fosfaatgehalten weer vergelijkbaar (beneden de kwantificatielimiet) met de mesocosms met breuksteen en grind.



Figuur 12 Concentraties van fosfor (als PO_4) in het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde. 'LoQ' = kwantificatielimiet

Gedurende de hele studie waren de silicaatgehalten in het aanvoerwater en vrijwel alle mesocosms te laag om te kunnen worden gemeten (Figuur 13). De enige uitzonderingen hierop vormden de mesocosms met lage verversingssnelheid waarin staalslakken waren gestort. Hier werden rond dagen 14 en 60 sporen van silicaat aangetoond. Het is aannemelijk dat dit silicaat uit de staalslakken afkomstig was.

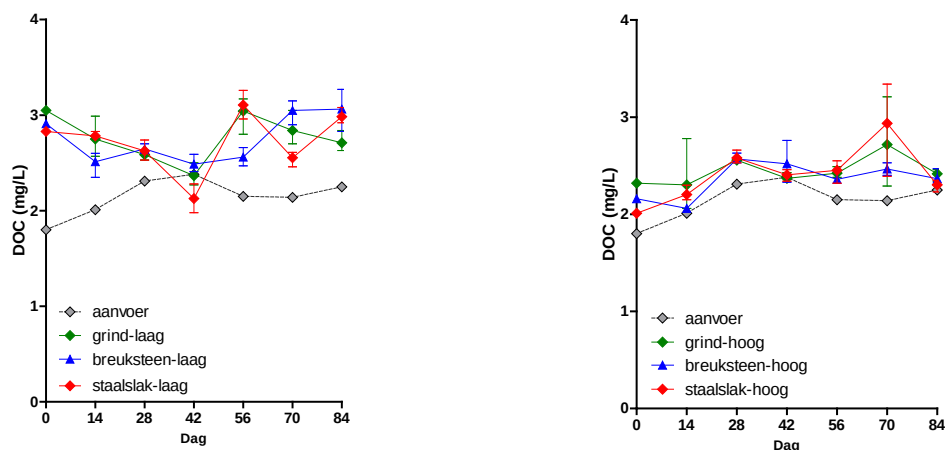


Figuur 13 Concentraties van silicium (als SiO_2) in het mesocosm water en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde. 'LoQ' = kwantificatielimiet

4.2.7 Opgelost organisch koolstof

Het opgelost organisch koolstof ('Dissolved Organic Carbon', DOC) gehalte in het aangevoerde water varieerde tussen 1.8 en 2.4 mg C/L (Figuur 14). In de mesocosms werd netto DOC geproduceerd waardoor de gehalten hier iets hoger waren met maxima rond 3 mg/L, met de hoogste waarden in de mesocosms met de lage verversingssnelheid.

Er zijn geen aanwijzingen dat het DOC gehalte door de testmaterialen zijn beïnvloed.

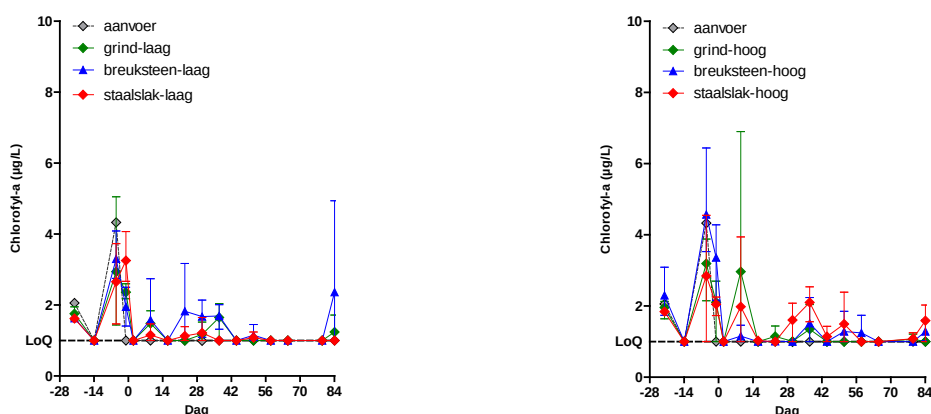


Figuur 14 Concentraties opgelost organisch koolstof (Dissolved Organic Carbon, DOC) in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.3 Biologische resultaten

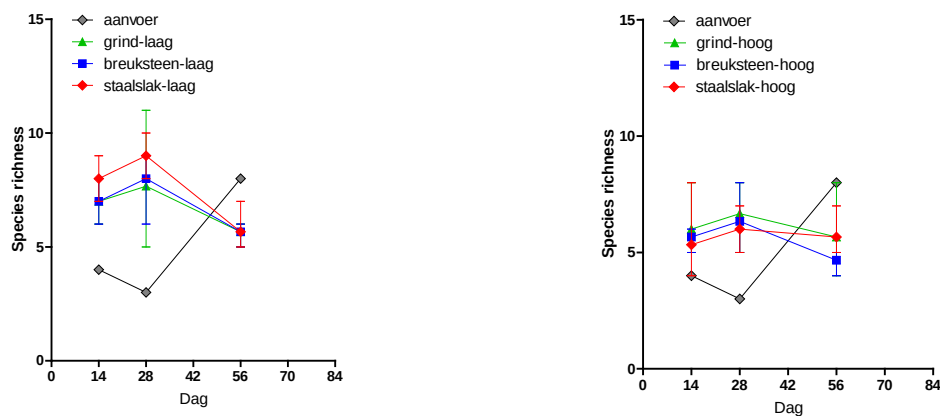
4.3.1 Phytoplankton

De phytoplankton biomassa in het aangevoerde verversingswater was erg laag. Het chlorofyl-a gehalte kwam alleen in de dagen voor het aanbrengen van de testmaterialen iets boven de kwantificatielimiet van $1 \mu\text{g/L}$ (Figuur 15). In de mesocosms werden iets vaker meetbare chlorofyl gehalten aangetroffen, maar ook hier bleven de chlorofyl gehalten laag met slechts enkele uitschieters boven $2 \mu\text{g/L}$. Hoewel door de lage gehalten het beeld ontstaat dat er relatief grote verschillen tussen de verschillende mesocosms bestonden, zijn de verschillen in absolute zin laag. Er zijn geen aanwijzingen dat de fytoplankton biomassa door de behandelingen is beïnvloed.



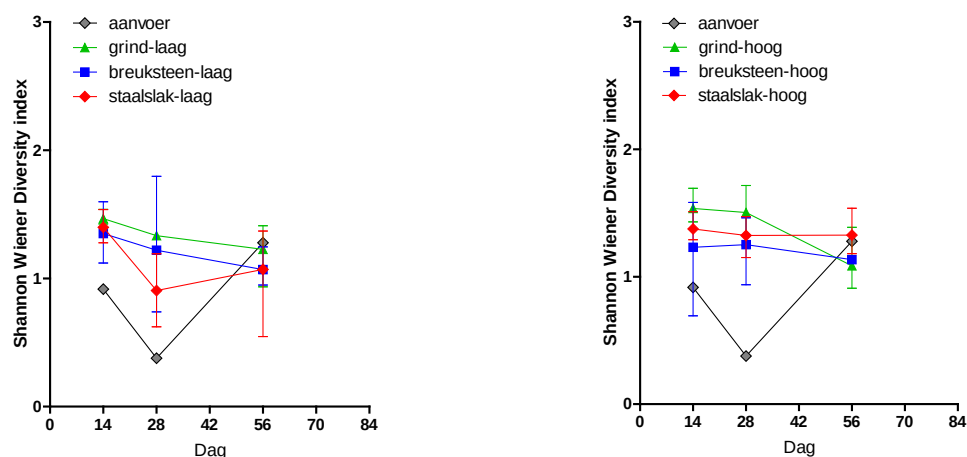
Figuur 15 Chlorofyl-a gehalten in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

Flagelaten vormden gedurende de gehele studie in alle mesocosms de meest dominante fytoplankton groep, met een relatief aandeel van rond de 60%. De soorten *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* sp en *Fragilaria* sp hadden regelmatig een aandeel van meer dan 10%, maar andere soorten waren slechts in lage relatieve dichtheden aanwezig. In totaal waren er tussen de 5 en 10 fytoplankton soorten in de mesocosms aanwezig (Figuur 16). In de mesocosms met lage verversingssnelheid was de soortenrijkdom aanvankelijk iets hoger dan in de mesocosms met hoge doorstroming. In de tweede helft van de studie nam het aantal soorten in de mesocosms met lage verversingssnelheid echter af. Op dag 14 en dag 28 lijkt de soortenrijkdom in de staalslak-laag mesocosms iets hoger dan in de andere mesocosms met lage doorstroming. Deze verschillen zijn echter niet statistisch significant.



Figuur 16 Soortenrijkdom ('species richness') van de fytoplanktongemeenschap in de mesocosms. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

De biodiversiteit van de fytoplankton gemeenschap ligt in alle mesocosms op hetzelfde niveau en is aanvankelijk iets hoger dan in het aangevoerde Oosterscheldewater. Blijkbaar ontwikkelde zich in de in de mesocosms met hoge verversingssnelheid een fytoplankton gemeenschap die zelfs bij hoge verversingssnelheid kon handhaven. Er zijn geen aanwijzingen dat de behandelingen de diversiteit van de planktongemeenschap hebben beïnvloed.

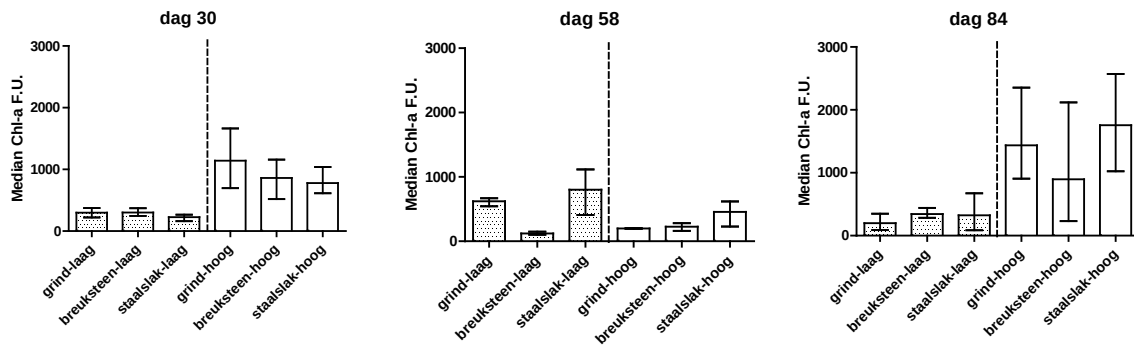


Figuur 17 Biodiversiteit (Shannon Wiener Diversity Index) van de fytoplanktongemeenschap in de mesocosms. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.3.2 Benthische algen

De ontwikkeling van de benthische algen op de uitgehangen glasplaatjes liet op dag 30 en dag 84 een vergelijkbaar patroon zien, met lage biomassa in de mesocosm met lage verversingssnelheid en een hoge biomassa in de mesocosms met hoge waterversing (*Figuur 18*). Binnen de mesocosms met dezelfde verversingssnelheid bestonden geen verschillen die gerelateerd konden worden aan de testmaterialen.

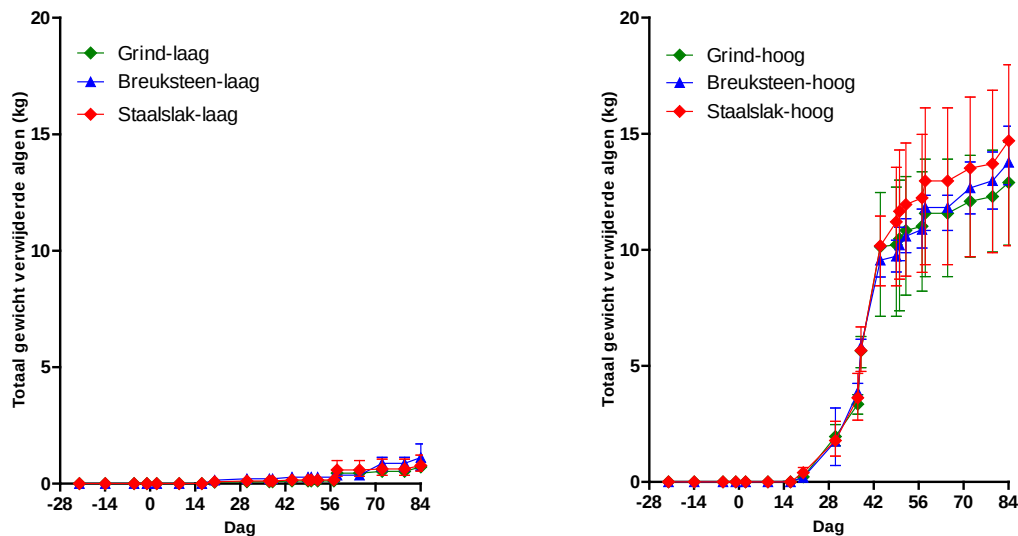
Tijdens het tussenliggende meetpunt (dag 58) was geen duidelijk verschil aanwezig tussen de mesocosm met lage en hoge verversingssnelheid. Bij de mesocosm met lage verversingssnelheid was de benthische algen biomassa in de mesocosm met breuksteen significant lager dan in de mesocosms met staalslakken of grind.



Figuur 18 Chlorofyl fluorescentie als maat voor de biomassa aan benthische algen dat zich heeft ontwikkeld op in de mesocosms ge-exposeerde glasplaatjes.

4.3.3 Macro-algen

Verschillende soorten macro-algen waaronder zeesla (*Ulva lactuca*) en darmwier (*Enteromorpha* sp.) ontwikkelden zich zo sterk in de mesocosms dat de algen handmatig verwijderd moesten worden om dichtgroei van de bodem te voorkomen. De totale hoeveelheid algen die gedurende de studie uit de mesocosms werd verwijderd benaderde voor de mesocosms met hoge verversingssnelheid de 15 kg natgewicht per mesocosm (Figuur 19). In de mesocosms met lage verversingssnelheid ontwikkelden de algen zich minder snel, en werd 10 tot 15 maal minder algenbiomassa verwijderd. De macro-alg productie in de mesocosms werd dus duidelijk beïnvloed door de verversingssnelheid, maar was gelijk voor de verschillende testmaterialen.

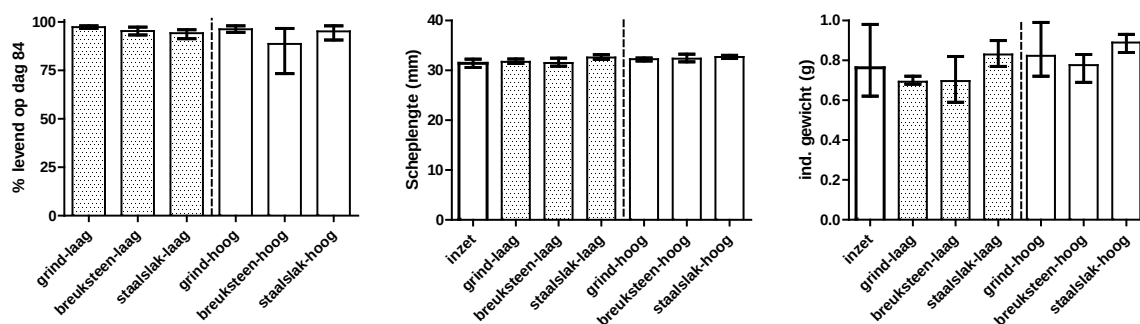


Figuur 19 De hoeveelheid macro-algen dat gedurende de studie uit de mesocosms werd verwijderd, cumulatief weergegeven in de tijd. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met een hoge verversingssnelheid.

4.3.4 Mosselen

De sterfte onder de 150 mosselen die in elk mesocosm waren geïntroduceerd bedroeg minder dan 10% per mesocosm (Figuur 20). Mesocosm Y13 (breuksteen-hoog) vormde hierop een uitzondering. Om onduidelijke redenen was de sterfte onder de mosselen hier 27%.

Bij inzetten was de schelpenlengte van de mosselen gemiddeld 31 mm en in de mesocosm vond geen significante groei plaats, ook het vlees(gewicht) van de mosselen veranderde niet significant tijdens de studie. Er zijn geen aanwijzingen dat overleving of conditie van de mosselen is beïnvloed door de behandelingen.

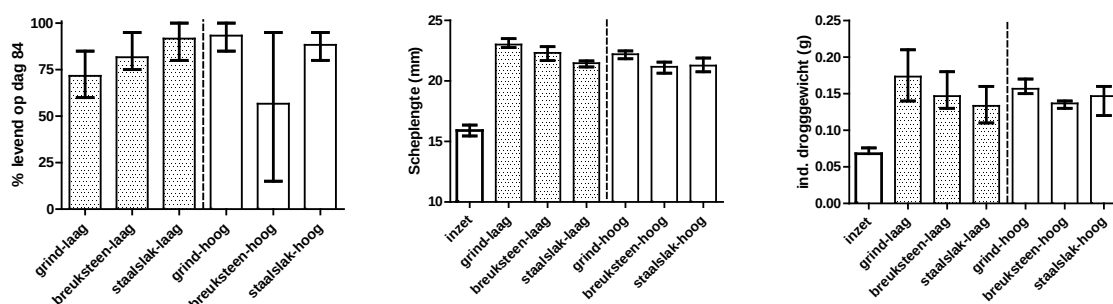


Figuur 20 Overleving, schelpenlgte en vleesgewicht van de op dag -19 ('inzet') in de mesocosms geïntroduceerde mosselen aan het eind van de studie, 84 dagen na het aanbrengen van de testmaterialen.

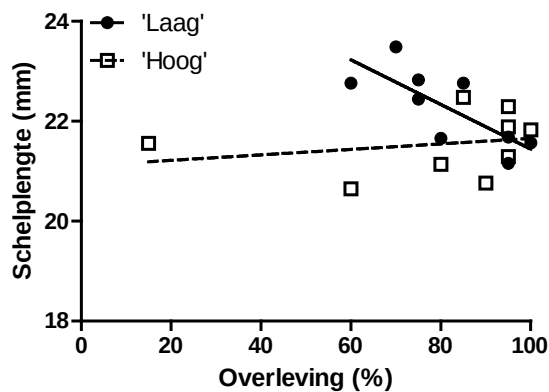
4.3.5 Kokkels

De ingezette kokkels vertoonden wel substantiële groei tijdens de studie. De gemiddelde schelpenlgte nam toe van iets meer dan 15 mm naar ruim boven 21 mm en het initiële (vlees)gewicht van 0.07 g verdubbelde. In mesocosm Y13 (breuksteen–hoog) werd slechts 15% van de kokkels levend teruggevonden bij het eind van de studie, maar in alle andere mesocosms lag de overleving tussen 60 en 100%. De oorzaak van de hoge sterfte in Y13 is niet duidelijk, maar komt overeen met de relatief hoge sterfte onder de mosselen in dezelfde mesocosm. Net als bij de mosselen was de overleving in de andere breuksteen-hoog mesocosms goed. De verschillen in overleving tussen de behandelingen zijn dan ook niet statistisch significant. Er zijn dus geen aanwijzingen dat de relatief hoge scheldiersterfte in Y13 direct verband houdt met de aanwezigheid van het breuksteen.

De schelpen van de kokkels in de staalslak-laag mesocosms waren significant ($P < 0.05$) kleiner dan in de grind-laag mesocosms. De gewichten waren statistisch gezien niet verschillend tussen de verschillende behandelingen, maar er lijkt wel sprake van een vergelijkbare trend als met de schelpenlgte; de hoogste waarden in grind-laag, de laagste in staalslak-laag en breuksteen-laag als intermediair. Deze volgorde is negatief gecorreleerd met de overlevingspercentages in de mesocosms, voor schelpenlgte is deze correlatie significant ($p = 0.02$). De significant mindere schelpgroei in de staalslak-laag mesocosms houdt dus verband met de betere overleving van de kokkels in deze mesocosms.



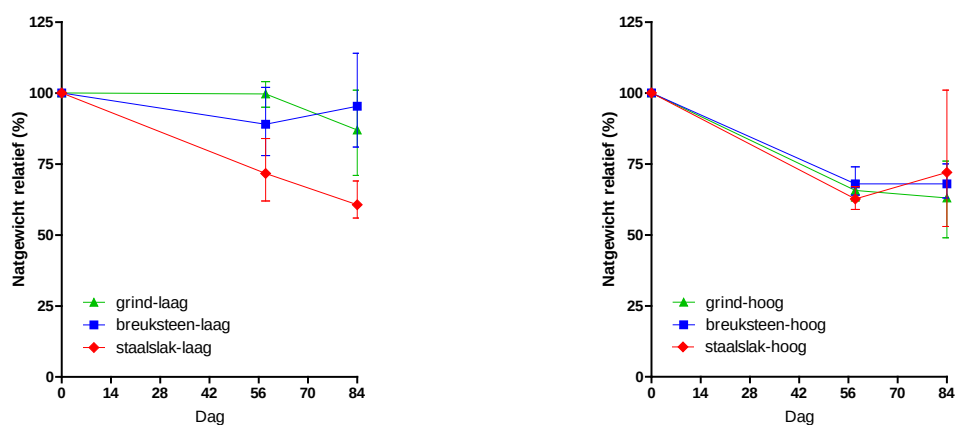
Figuur 21 Overleving, schelpenlgte en vleesgewicht van de op dag -25 ('inzet') in de mesocosms geïntroduceerde kokkels aan het eind van de studie, 84 dagen na het aanbrengen van de testmaterialen.



Figuur 22 Correlatie tussen overlevingspercentage en schelpenlengte van de kokkels aan het eind van de studie in de mesocosms met lage verversingssnelheid ('Laag') en de mesocosms met hoge verversingssnelheid ('hoog'). De correlatie in de mesocosms met lage verversingssnelheid is significant met $p=0.02$.

4.3.6 Sponzen

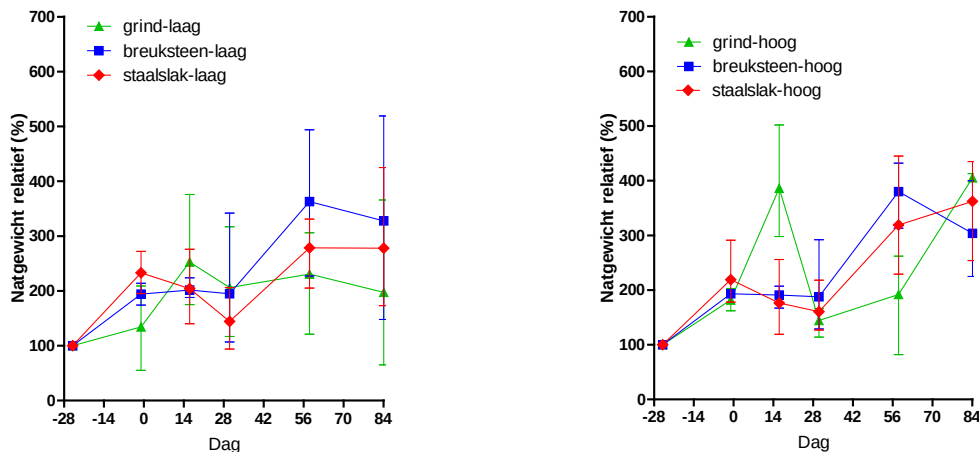
De sponzen in de mesocosms ondervonden vooral in de mesocosms met hoge verversingssnelheid hinder van de sterke groei van macroalgen die de sponzen bedekten. Het wekelijks verwijderen van algen van de sponzen enclosures moet voor de sponzen stress op hebben geleverd wat waarschijnlijk verklaard waarom tegen de verwachting in er geen echte groei van de sponzen werd geconstateerd. In de mesocosm met hoge verversingssnelheid nam het gewicht van de sponzen tijdens de studie met gemiddeld 25% af tijdens de studie, zonder verschillen tussen behandelingen (Figuur 23). In de mesocosms met lage verversingssnelheid, waar de macroalgen minder prominent aanwezig waren, konden de sponzen het initiële gewicht redelijk handhaven in de mesocosms met grind en breuksteen. In de staalslakken mesocosms vond wel een gewichtsafname plaats, die op beide bemonsteringsdagen (dag 58 en 84) significant verschilde van de grind-laag mesocosms ($p<0.05$) en op dag 84 ook van de breuksteen mesocosms ($p<0.01$).



Figuur 23 Verloop van het gewicht van de op dag 0 in de mesocosms geïntroduceerde sponzen. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met een hoge verversingssnelheid.

4.3.7 Zee-eik

Zee-eik gedijde goed in alle mesocosms. Het volgen van de groei in de tijd werd soms bemoeilijkt doordat delen van de planten afbraken. De groeigegevens die op basis van wegingen werden verzameld (Figuur 24) moeten daarom als indicatief worden beschouwd. Dit in ogenschouw nemende tonen de gegevens substantiële groei in alle mesocosms, zonder structurele verschillen tussen de verschillende behandelingen.



Figuur 24 Verloop van het gewicht van het op dag -25 in de mesocosms geïntroduceerde zee-eik. Gegevens zijn indicatief omdat soms materiaal van de planten afbrak. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met een hoge verversingssnelheid.

4.3.8 Zakpijpen

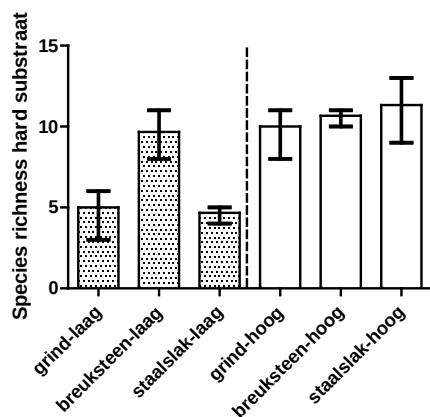
Van de 6 zakpijpen die als adulte exemplaren in elke mesocosm waren geïntroduceerd op dag 20, was ongeveer de helft dood of in een slechte conditie tijdens de bemonstering op dag 58. Dit beeld was vergelijkbaar voor alle mesocosms en toonde dus geen relatie met het testmateriaal en de verversingssnelheid. De levensduur van een zakpijp is beperkt tot 1 á 2 jaar en bij het inzetten van de mesocosms konden allen individuen worden verzameld die reeds een jaar oud waren. De hoge sterfte onder deze zakpijpen is dus waarschijnlijk het gevolg van de leeftijd. Op dag 58 konden uit elke mesocosm nog wel 3 ogenschijnlijk gezonde zakpijpen worden verzameld voor de chemische analyses. Bij de eindbemonstering waren er echter onvoldoende overlevende exemplaren voor een chemische bemonstering.

Tijdens de eindbemonstering bleken in alle mesocosms wel juveniele zakpijpen aanwezig te zijn met een lengte van maximaal 1 cm, voornamelijk op de onderzijde van de testmaterialen. Het is onduidelijk of deze zakpijpen met het verversingswater als larven zijn aangevoerd of nakomelingen zijn van de geïntroduceerde adulten.

De dichtheden waren moeilijk betrouwbaar te kwantificeren, maar er waren geen aanwijzingen voor structurele verschillen tussen mesocosms met verschillende testmaterialen of verversingssnelheden. Als alternatief voor de niet voldoende aanwezige adulte zakpijpen tijdens de eindbemonstering, is geprobeerd deze juveniele zakpijpen te verzamelen voor een chemisch monster. Vooral bij de staalslakken bleek het echter niet mogelijk om de kleine en zeer stevig gehechte organismen te verzamelen zonder dat het monster verontreinigd raakte met materiaal van de ondergrond.

4.3.9 Benthosgemeenschap op hard substraat en zacht substraat

Alle met het blote oog waarneembare soorten die tijdens de eindbemonstering op het harde substraat in de mesocosms werden aangetroffen zijn genoteerd. In totaal waren dit 20 taxonomische eenheden. Hiervan werden alleen alikruiken (*Litorina littorea*), slijkgarnalen (*Corophidae sp.*), vlokeeffen (*Gammaridae sp.*) en vuilwitte zakpijpen (*Ascidella aspersa*) in alle mesocosms aangetroffen (Tabel 6). Sommige soorten/groepen werden alleen aangetroffen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid. Dit betrof kalkkokerwormen (*Serpulidae sp.*), zeeduizendpoten (*Nereidinae sp.*), zeeanemonen (*Actiniaria sp.*), slingerzakpijpen (*Botrylloides violaceus*) en strandkrabben (*Carcinus maenas*). De strandkrab was opvallend afwezig in alle mesocosms met breuksteen, terwijl ze wel werden aangetroffen in alle andere mesocosms met hoge verversingssnelheid. Voor de andere soorten waren er geen aanwijzingen dat de aanwezigheid beïnvloed was door de behandelingen. In de mesocosms met lage verversingssnelheid was de soortenrijkdom ook vergelijkbaar voor de verschillende testmaterialen. Bij een lage verversingssnelheid was de soortenrijkdom op het harde substraat vergelijkbaar tussen de grind en staalslak mesocosms, maar hoger in de breuksteen mesocosms (Figuur 25).



Figuur 25 Soortenrijkdom van de benthosgemeenschap die op het harde substraat werd aangetroffen in de mesocosms bij beëindiging van de studie 84 dagen na het aanbrengen van de testmaterialen.

Tabel 6 Overzicht van de soorten/taxonomische groepen die op het testmateriaal zijn aangetroffen tijdens de eindbemonstering. Het getal geeft aan in hoeveel van de drie replica's de soort werd aangetroffen. In de laatste rij 'Totaal eenheden' is aangegeven hoeveel verschillende taxonomische eenheden in totaal per behandeling zijn aangetroffen.

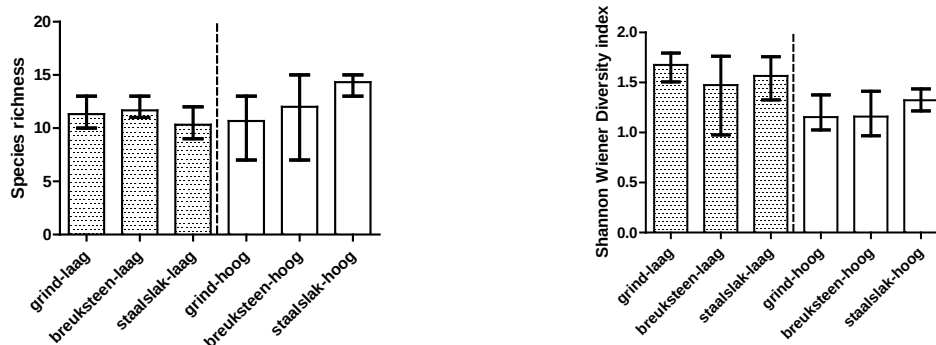
Hard substraat	Lage verversingssnelheid			Hoge verversingssnelheid		
Taxonomische eenheid	Grind	Breuksteen	Staalslak	Grind	Breuksteen	Staalslak
<i>Littorina littorea</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Corophiidae</i> sp.	3	3	3	3	3	3
<i>Ascidella aspersa</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Gammaridae</i> sp.	3	3	3	3	3	3
<i>Spirorbinae</i> sp.	3	3	2	3	3	3
<i>Ciona intestinalis</i>	0	2	0	3	3	3
<i>Austrominius modestus</i>	2	2	0	0	3	3
<i>Phaeophyta</i> sp.	0	3	1	3	1	2
<i>Lanice conchilega</i>	0	1	0	2	2	2
<i>Peringia ulvae</i>	0	1	0	3	2	1
<i>Carcinus maenas</i>	0	0	0	3	0	3
<i>Terebellidae</i>	1	3	0	0	1	1
<i>Ulva</i> sp.	1	0	1	1	1	1
<i>Balanidae</i> sp.	0	1	0	1	1	1
<i>Leucosolenia variabilis</i>	0	1	0	0	2	1
<i>Sycon ciliatum</i>	0	2	0	0	1	1
<i>Serpulidae</i> sp.	0	0	0	1	1	1
<i>Nereidinae</i> sp.	0	0	0	0	0	1
<i>Actiniaria</i> sp.	0	0	0	0	1	0
<i>Botrylloides violaceus</i>	0	0	0	1	0	0

In/op de zandbodems in de mesocosms werden in totaal 27 taxonomische eenheden geïdentificeerd, hiervan waren alleen slijkgarnalen (*Corophiidae* sp.) en slangpieren (*Capitella* sp.) in alle mesocosms aanwezig.). Er waren geen aanwijzingen dat de aanwezigheid van soorten in/op de zandbodem door de behandelingen waren beïnvloed. De soortenrijkdom en biodiversiteit waren dan ook niet significant verschillend tussen de verschillende behandelingen (Figuur 26).

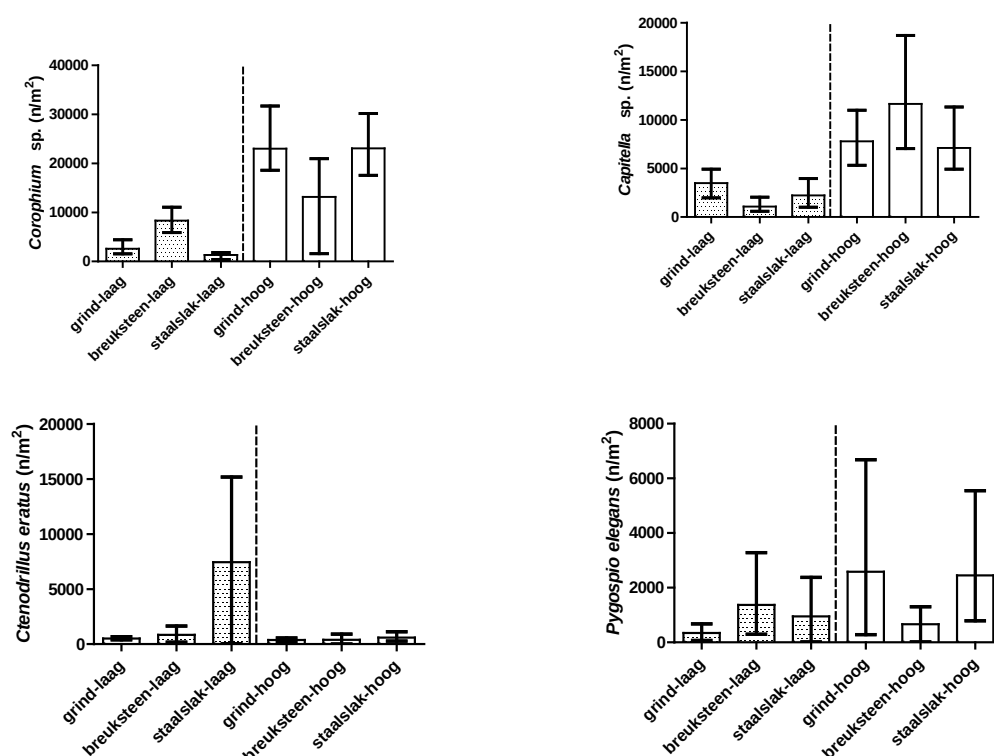
Er waren geen verschillen in dichtheden van dominante soorten die konden worden toegeschreven aan de testmaterialen (Figuur 27). Wel werden van *Corophium sp* en *Capitella sp* gemiddeld hogere dichtheden aangetroffen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid dan in de mesocosms met lage verversingssnelheid. Een andere dominante soort *Ctenodrilus serratus* was in twee van de drie staalslak mesocosms met lage verversingssnelheid in zeer hoge dichtheden aanwezig, maar vrijwel afwezig in de derde replica. Verschillen met de andere mesocosms zijn dan ook niet statistisch significant. De vierde meest dominante soort, *Pygospio elegans* vertoonde een grote variatie in dichtheden tussen de mesocosm zonder aanwijzingen voor een relatie met de behandeling.

Tabel 7 Overzicht van de soorten/taxonomische groepen die in/op de zandbodem zijn aangetroffen tijdens de eindbemonstering. Het getal geeft aan in hoeveel van de drie replica's de soort werd aangetroffen. In de laatste rij 'Totaal eenheden' is aangegeven hoeveel verschillende taxonomische eenheden in totaal per behandeling zijn aangetroffen.

Zacht substraat	Lage verversingssnelheid			Hoge verversingssnelheid		
taxonomische eenheid	grind	breuksteen	staalslak	grind	breuksteen	staalslak
Corophiidae sp.	3	3	3	3	3	3
Capitella sp.	3	3	3	3	3	3
Ctenodrilus serratus	3	3	3	3	2	3
Pygospio elegans	3	3	3	3	2	3
Oligochaeta sp.	2	3	3	2	3	3
Macoma baltica	2	3	1	2	2	3
Peringia	1	2	2	2	3	3
Microdeutopus sp.	3	1	1	0	2	3
Abra tenuis	0	2	2	2	2	2
Polydora cornuta	3	3	3	0	0	1
Amphipoda sp.	3	1	0	1	2	2
Malacoceros cornuta	2	2	1	1	2	1
Gammarus locusta	0	0	1	1	2	3
Gammarus sp.	0	0	0	2	3	1
Isopoda sp.	1	2	1	0	1	0
Nereidinae sp.	0	1	0	2	1	0
Aphelochaeta sp.	2	0	0	0	0	1
Donax vittatus	0	0	0	0	0	2
Cirratulidae sp.	0	1	0	1	0	0
Hediste diversicolor	0	0	1	0	1	0
Terebellidae sp.	0	0	1	1	0	0
Ascidacea sp.	0	0	0	0	0	1
Nemertea sp.	0	0	0	0	0	1
Alitta virens	1	0	0	0	0	0
Fabricidae sp.	0	1	0	0	0	0
Lanice conchilega	0	0	0	0	0	1
Spionidae sp.	0	0	0	1	0	0



Figuur 26 Biodiversiteit (links: Species richness; rechts: Shannon Wiener Diversity Index) van de benthosgemeenschap in/op de zandbodem bij beëindiging van de studie, 84 dagen na het aanbrengen van de testmaterialen.



Figuur 27 Dichtheden van de vier meest dominante benthossoorten in/op de zandbodem bij beëindiging van de studie, 84 dagen na het aanbrengen van de testmaterialen.

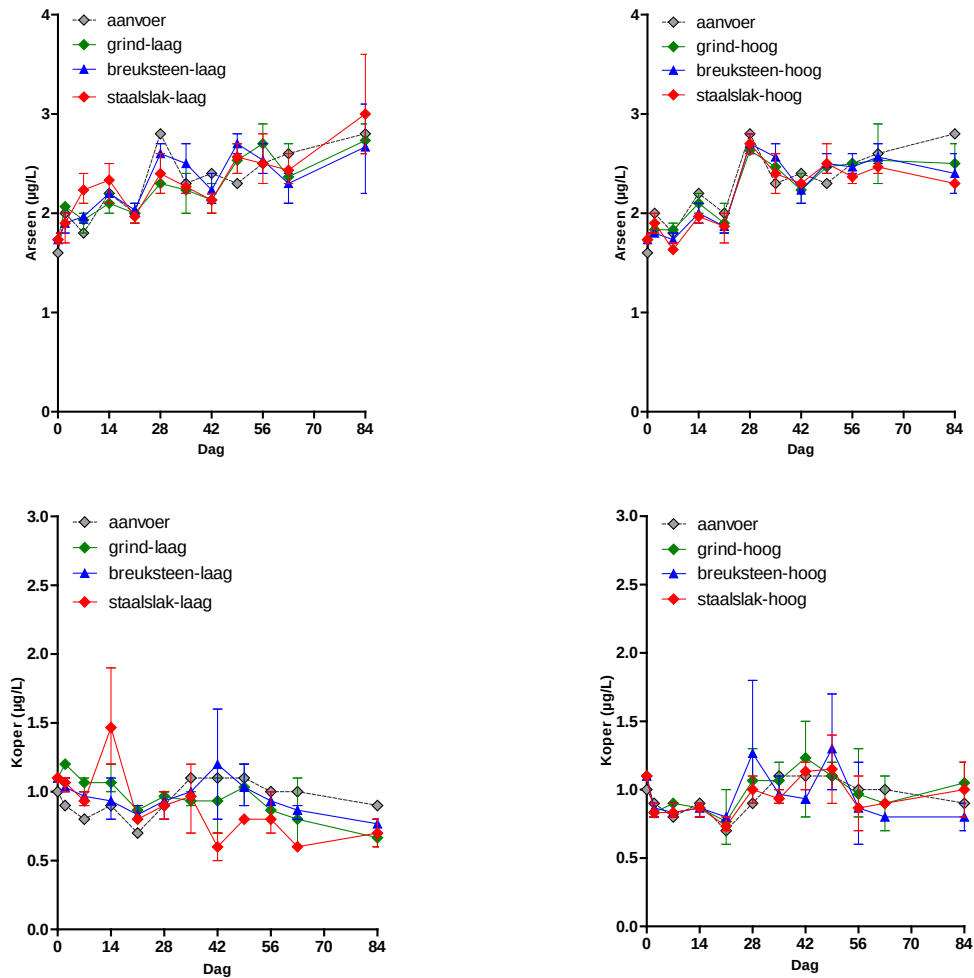
4.4 Resultaten chemische analyses

4.4.1 Gehalten in water

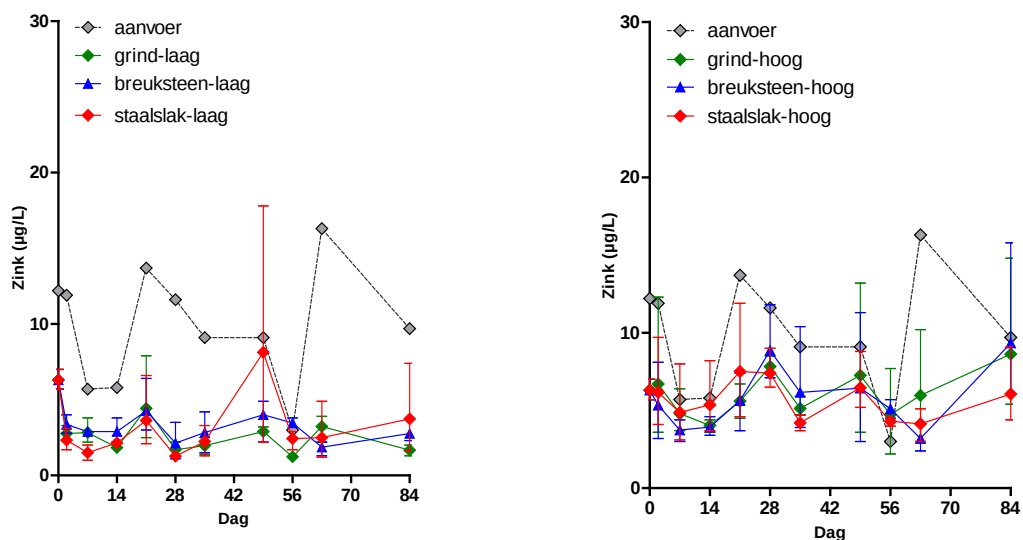
De volgende elementen werden in de watermonsters nauwelijks boven de kwantificatielimiet (LoQ) aangetroffen: kwik (LoQ: 0.1 µg/L); lood (LoQ: 0.2 µg/L); seleen (LoQ: 0.5 µg/L) en tin (LoQ: 0.5 µg/L). Antimoon en cadmium waren slechts aanwezig in concentraties die dicht rond de kwantificatielimieten (resp 0.3 en 0.1 µg/L) lagen. De dataset bevatte geen aanwijzingen dat de concentraties van bovengenoemde elementen op enige wijze beïnvloed waren door de behandelingen.

Arseen, koper en zink waren in alle watermonsters in kwantificeerbare concentraties aanwezig die echter geen relatie toonden met de behandelingen (Figuur 28). De arseen en koper gehalten in de mesocosms kwamen overeen met de gehalten in het aangevoerde water. Voor zink waren de gehalten in de mesocosms in het algemeen lager dan in het aangevoerde water. Dit verschil was groter in de mesocosms met lage verversingssnelheid. Blijkbaar werd een deel van het met het verversingswater

aangevoerde zink, dat een essentieel element is voor veel biologische processen, in de mesocosms door organismen opgenomen.

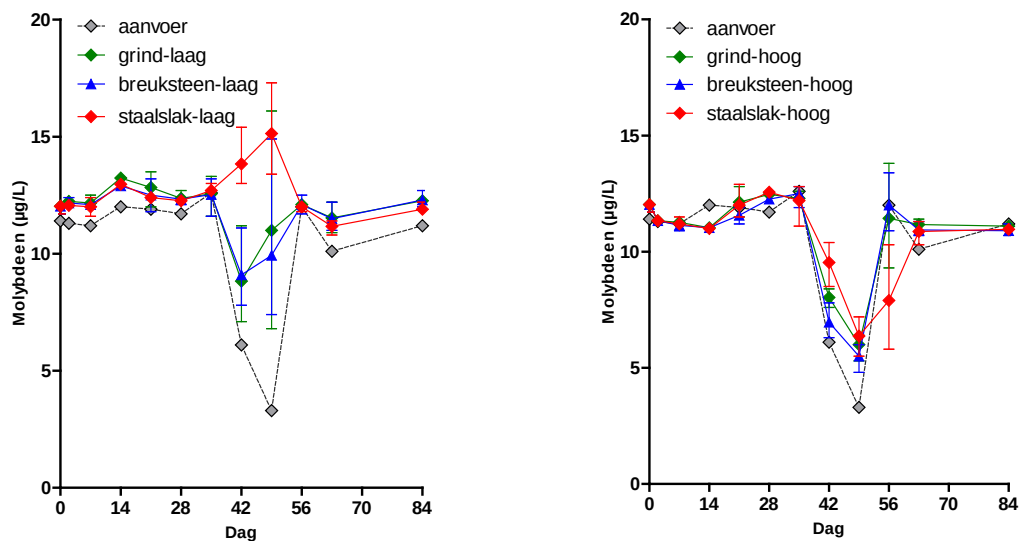


Figuur 28 Concentraties opgelost arseen (boven) en koper (onder) in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.



Figuur 29 Concentraties opgelost zink in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

Het verloop van de concentratie opgelost molybdeen is in de mesocosms toont geen eenduidig beeld over de uitloging van deze stof uit de testmaterialen. Tot dag 42 zijn er geen verschillen tussen de molybdeen gehalten in de mesocosms met de verschillende testmaterialen. In de mesocosms met lage verversingssnelheid zijn de gehalten iets hoger dan in het aangevoerde water, wat suggereert dat alle mesocosms een geringe bron voor molybdeen bevatten. Tussen dag 35 en 56 daalt het molybdeen gehalte in het aangevoerde water met meer dan 50%. Deze dip is ook zichtbaar in alle mesocosms met uitzondering van die met lage verversing en staalslakken waar de molybdeen concentratie in de waterkolom dan juist stijgt. Hierdoor bestaan rond de dagen 42 en 49 statistisch significant (*Tabel 8*) hogere concentraties in de staalslakken mesocosms ten opzichte van de breuksteen mesocosms. Als op dag 56 de molybdeengehalten in het aangevoerde water weer naar de oorspronkelijke waarden zijn teruggekeerd, verdwijnt ook het verschil tussen de mesocosms met de staalslakken en de andere testmaterialen. Een verklaring voor dit verloop van de molybdeenconcentraties is niet voorhanden. Een soortgelijk beeld is afwezig in de mesocosm met hoge verversingssnelheid, waar geen verschillen tussen de mesocosms aanwezig zijn.



Figuur 30 Concentraties opgelost molybdeen in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

Tabel 8 Statistische significantie van de verschillen in molybdeen concentraties in het water in de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. ‘’: $p < 0.05$; ‘**’: $p < 0.01$; ‘***’: $p < 0.001$; ‘ns’: niet significant. Alleen dagen met significante verschillen zijn weergegeven. Bij hoge verversingssnelheid werden geen significante verschillen geconstateerd.*

Molybdeen	
Lage verversing	
grind vs staalslak	
dag 0	ns
dag 42	***
dag 49	**
Dag 56-84	ns
grind vs breuksteen	
dag 0-84	ns
breuksteen vs staalslak	
dag 0	ns
dag 42	***
dag 49	***
Dag 56-84	ns

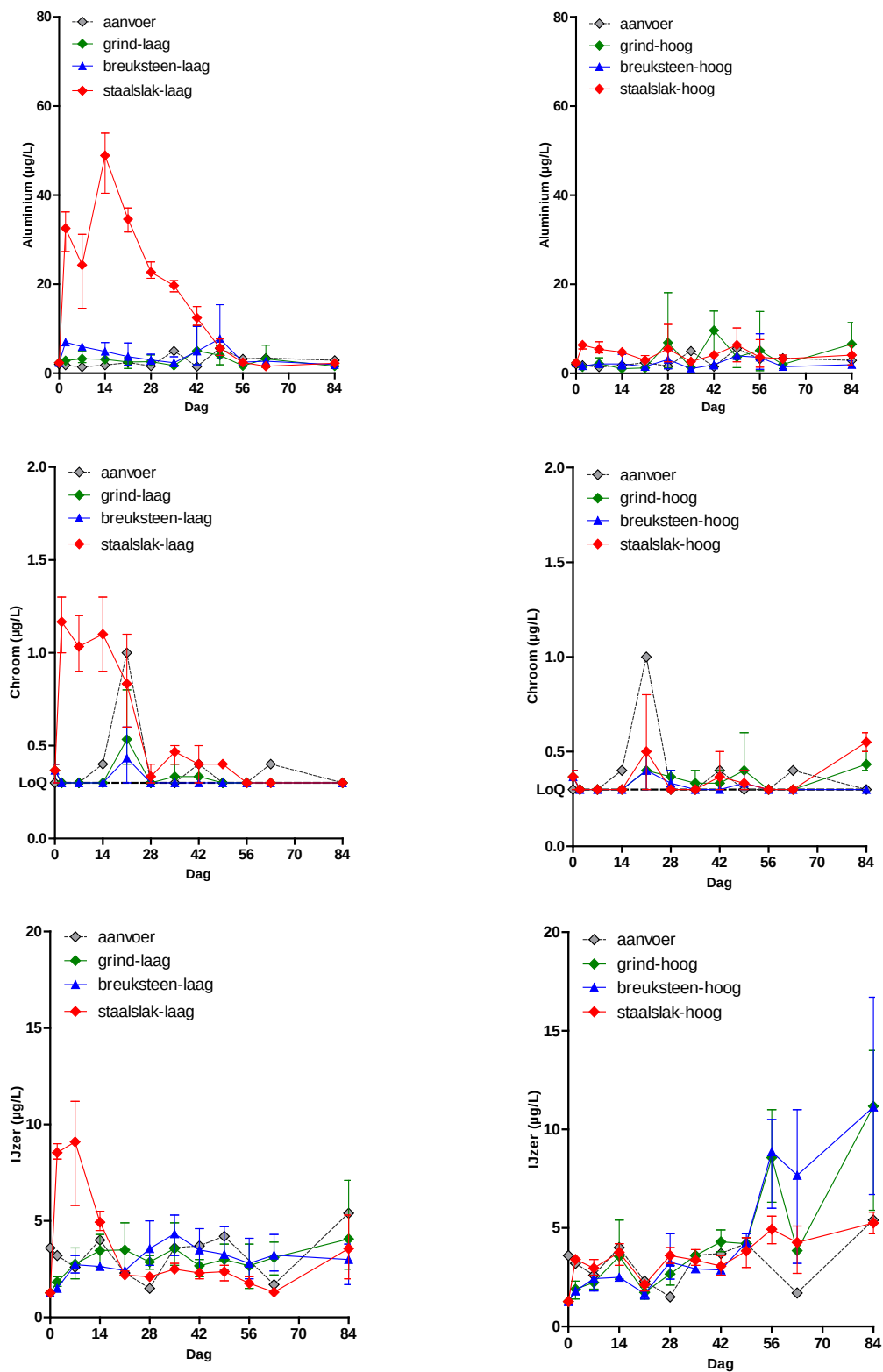
De gehalten opgelost aluminium, chroom en ijzer stegen substantieel na het aanbrengen van de staalslakken in de mesocosms met lage verversingssnelheid (*Figuur 31*). De aluminium concentratie nam toe van minder dan 5 naar maximaal 50 µg/L op dag 14 en was tot en met dag 35 in deze mesocosms significant hoger dan in de mesocosms met grind en met breuksteen (*Tabel 9*). Daarna namen de concentraties geleidelijk af om na dag 42 weer vergelijkbaar te zijn met de andere mesocosms. Voor chroom werd reeds op dag 2 de hoogste concentraties gemeten, met 1.2 µg/L was dit 4 maal hoger dan de achtergrondwaarde. De verhoogde chroomconcentratie bleef min of meer constant tot dag 14. Op dag 28 waren de chroomconcentraties weer terug op het oorspronkelijke niveau.

De ijzerconcentratie in de staalslak mesocosms bereikte de maximale waarde van ca 10 µg/L op dag 7 en was twee weken later weer op het achtergrond niveau van rond 3 µg/L. In de mesocosms met de hoge verversingssnelheid hadden de staalslakken geen significante invloed op de concentraties van aluminium, chroom en ijzer in het water.

De andere testmaterialen, grind en breuksteen, beïnvloedden de concentraties van aluminium, chroom en ijzer niet op een meetbare wijze. In de watermonsters van dag 56 en daarna uit de grind-hoog en breuksteen-hoog mesocosms werden bij individuele mesocosms wel relatief hoge ijzerconcentraties gemeten. Deze waarnemingen waren echter niet consequent en lijken daardoor het gevolg van contaminatie van de monsters.

Tabel 9 Statistische significantie van de verschillen in concentraties van aluminium, chroom en ijzer in het water in de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. ‘’: $p < 0.05$; ‘**’: $p < 0.01$; ‘***’: $p < 0.001$; ‘ns’: niet significant. Alleen dagen met significante verschillen zijn weergegeven. Bij hoge verversingssnelheid werden geen significante verschillen geconstateerd.*

	Aluminium Lage verversing	Chroom Lage verversing	IJzer Lage verversing
staalslak vs grind			
dag 0	ns	ns	ns
dag 2	**	****	****
dag 7		****	**
dag 14	***	****	ns
dag 21	**	ns	ns
dag 28	*	ns	ns
dag 35	**	ns	ns
dag 42-84	ns	ns	ns
breuksteen vs grind			
dag 0-84	ns	ns	ns
staalslak vs breuksteen			
dag 0	ns	ns	ns
dag 2	ns	****	****
dag 7	ns	****	**
dag 14	*	****	ns
dag 21	*	ns	ns
dag 28	ns	ns	ns
dag 35	*	ns	ns
dag 42-84	ns	ns	ns



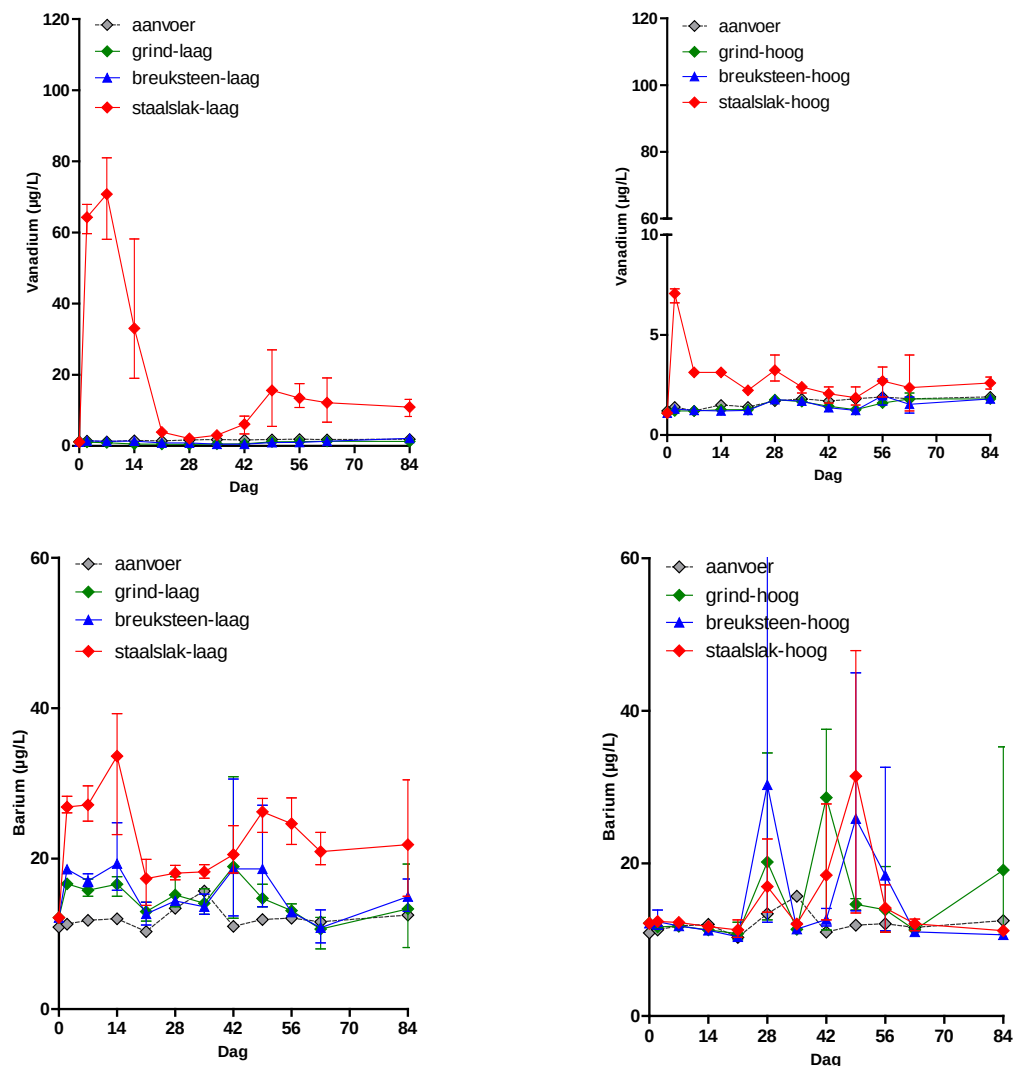
Figuur 31 Concentraties opgelost aluminium (boven), chroom (midden) en ijzer (onder) in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde. 'LoQ' = kwantificatielimit

Vanadium was in het aangevoerde water in lage concentraties rond de 1 µg/L aanwezig. Dit was ook de concentratie in het water van alle mesocosms waarin geen staalslakken waren gestort (*Figuur 32*). In de mesocosms waar staalslakken werden aangebracht stegen de vanadiumconcentraties binnen 10 dagen naar 70 en 7 µg/L in respectievelijk de mesocosms met lage en hoge verversingssnelheid. In de mesocosms met lage verversingssnelheid en staalslakken bleven de vanadiumconcentraties in het water gedurende de gehele studie significant hoger dan in de andere mesocosms (*Tabel 10*). In de

mesocosms met hoge verversingssnelheid was de vanadiumconcentratie gedurende de eerste 14 dagen na het aanbrengen van de staalslakken ook significant verhoogd.

De bariumconcentratie nam in alle mesocosms met lage verversingssnelheid toe nadat de testmaterialen waren aangebracht. De verhoging was vergelijkbaar in de grind en breuksteen mesocosms; de barium concentraties bleven net onder 20 µg/L. In de mesocosms met staalslakken werden op dag 14 concentraties van rond 30 µg/L bereikt. Na een week waren de concentraties weliswaar gedaald, maar gedurende de gehele studie bleven de bariumconcentraties verhoogd in de staalslakken mesocosms ten opzichte van de mesocosms met breuksteen en grind en het verversingswater. Tussen dag 7 en dag 56 waren de bariumconcentraties in het water van de staalslak-laag mesocosms regelmatig significant hoger dan in de mesocosms met grind en breuksteen (Tabel 10).

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid werden gedurende de eerste weken na het aanbrengen van de testmaterialen geen verhoogde bariumconcentraties waargenomen. Na dag 21 werden in watermonsters uit mesocosms met verschillende testmaterialen regelmatig verhoogde barium-concentraties gemeten, maar deze pieken waren niet consequent, en vertoonden grote variatie tussen replica's. De oorzaak van deze spreiding en waarom deze alleen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid wordt gevonden is onduidelijk. In elk geval waren de verschillen tussen de mesocosms met hoge verversingssnelheid niet statistisch significant.

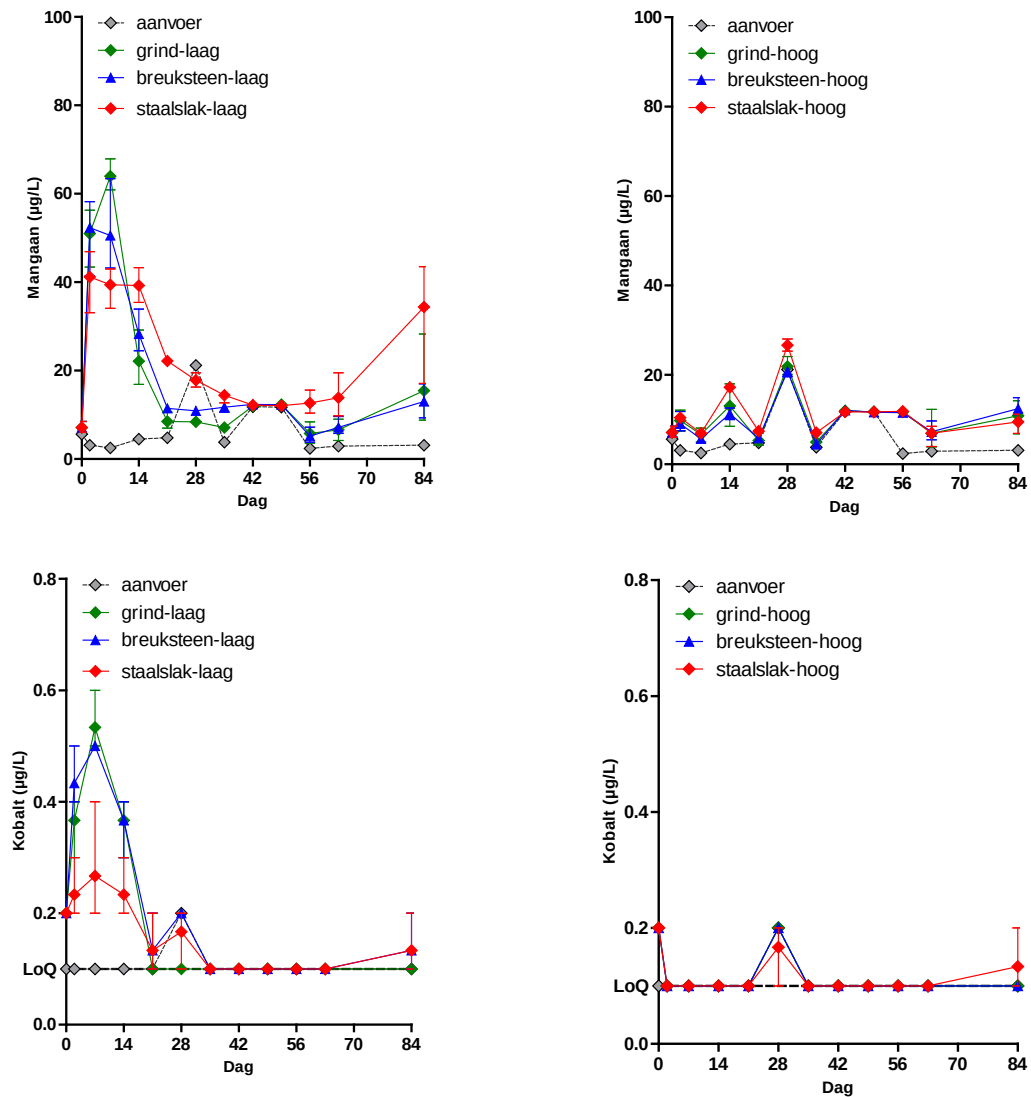


Figuur 32 Concentraties opgelost vanadium (boven) en barium (onder) in het mesocosmwat en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

Tabel 10 Statistische significantie van de verschillen in vanadium en barium concentraties in het water in de mesocosms met verschillende testmaterialen. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; 'ns': niet significant. Alleen dagen met significante verschillen zijn weergegeven. Bij hoge verversingssnelheid werden voor barium geen significante verschillen geconstateerd.

	Vanadium		Barium	
	Lage verversing	Hoge verversing	Lage verversing	Hoge verversing
staalslak vs grind				
dag 0	ns	ns	ns	ns
dag 2	****	****	ns	ns
dag 7	****	**	*	ns
dag 14	****	**	***	ns
dag 21	****	ns	ns	ns
dag 28	****	ns	ns	ns
dag 35	****	ns	ns	ns
dag 42	****	ns	ns	ns
dag 49	****	ns	*	ns
Dag 56	****	ns	*	ns
dag 63	****	ns	ns	ns
dag 84	****	ns	ns	ns
breuksteen vs grind				
dag 0	ns	ns	ns	ns
dag 14	**	ns	ns	ns
dag 21-84	ns	ns	ns	ns
staalslak vs breuksteen				
dag 0	ns	ns	ns	ns
dag 2	****	****	ns	ns
dag 7	****	**	ns	ns
dag 14	****	**	**	ns
dag 21	****	ns	ns	ns
dag 28	***	ns	ns	ns
dag 35	****	ns	ns	ns
dag 42	****	ns	ns	ns
dag 49	****	ns	ns	ns
Dag 56	****	ns	*	ns
dag 63	****	ns	ns	ns
dag 84	****	ns	ns	ns

De mangaan- en kobaltconcentraties namen in alle mesocosms met lage verversingssnelheid toe na het aanbrengen van de testmaterialen. In de mesocosms met hoge verversingssnelheid werden voor deze elementen geen verhoogde concentraties gemeten (Figuur 33). In de mesocosms met lage verversingssnelheid werden de maximale concentraties gemeten op dag 9. Deze waren in de eerste weken na het aanbrengen van de testmaterialen significant lager in de mesocosms met staalslakken dan in de andere mesocosms. Op dag 21 was de kobaltconcentratie in alle mesocosms weer op het achtergrondniveau. Dit was ook het geval voor mangaanconcentraties in de grind-laag en breuksteen-laag mesocosms. In de staalslakken-laag mesocosms bleef de mangaanconcentratie echter iets hoger, met een kleine onderbreking tussen dag 35 en 56 waren deze verschillen statistische significant (Tabel 11). De resultaten van de laatste bemonstering suggereren dat de uitloging van mangaan uit de staalslakken na dag 70 in 2 van de 3 mesocosm weer toeneemt.

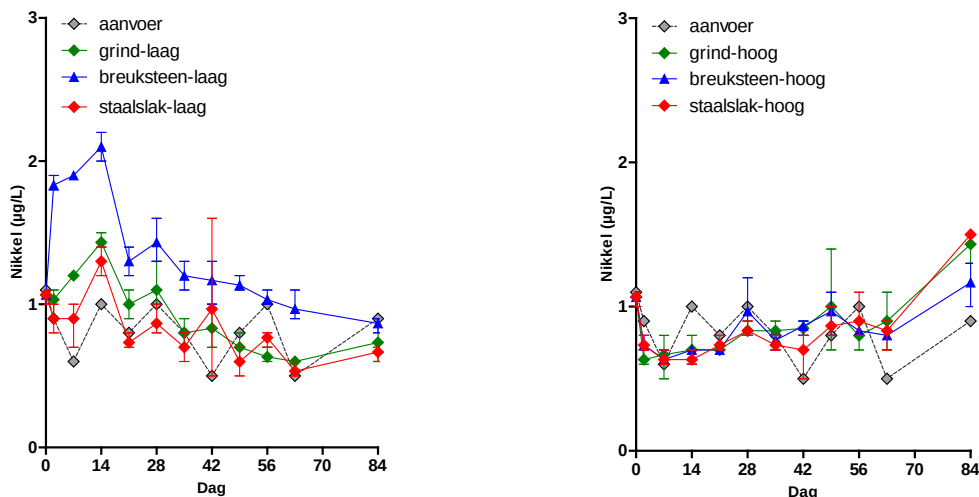


Figuur 33 Concentraties opgelost mangaan (boven) en kobalt (onder) in het mesocosmwater en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde. 'LoQ' = kwantificatielimiet

Tabel 11 Statistische significantie van de verschillen in mangaan en kobalt concentraties in het water in de mesocosms met verschillende testmaterialen. '*': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant. Alleen dagen met significante verschillen zijn weergegeven. Bij hoge verversingssnelheid werden geen significante verschillen geconstateerd.

	Mangaan Lage verversing	Kobalt Lage verversing
grind vs staalslak		
dag 0	ns	ns
dag 2	ns	*
dag 7	ns	****
dag 14	ns	*
dag 21	****	ns
dag 28	**	*
dag 35	*	ns
Dag 56	**	ns
dag 63	**	ns
dag 84	***	ns
grind vs breuksteen		
dag 0	ns	ns
dag 28	ns	****
dag 35-84	ns	ns
breuksteen vs staalslak		
dag 0	ns	ns
dag 2	ns	****
dag 7	ns	****
dag 14	ns	*
Dag 56	***	ns
dag 84	***	ns

De nikkelconcentratie in het water van de mesocosms met lage verversingssnelheid werd positief beïnvloed door het storten van breuksteen (Figuur 34). Op dag 2 werd een statistische significant hogere nikkelconcentratie aangetoond in de breuksteen mesocosms ten opzichte van de andere mesocosms. In vergelijking met de staalslak mesocosms waren de nikkelconcentraties in het water van de breuksteen mesocosms gedurende vrijwel de gehele studie significant hoger. In de mesocosms met hoge verversingssnelheid is de invloed van breuksteen op de nikkelconcentratie niet zichtbaar.



Figuur 34 Concentraties opgelost nikkel in het mesocosmwater en het aangevoerde verversingswater. Links de mesocosms met lage verversingssnelheid en rechts de mesocosms met de hoge verversingssnelheid die realistisch is voor de Oosterschelde.

4.4.2 Gehalten in biota

Het verloop van de gehalten van alle 18 gemeten elementen in mossel, zee-eik, zakpijp en spons is weergegeven in figuren in de Bijlage 2 tot en met Bijlage 5. In de volgende paragrafen wordt voor elk element aangegeven of er tijdens de studie sprake was van statistisch significante verschillen tussen de concentraties in deze soorten in de mesocosms met de verschillende test materialen. Significante verschillen zullen worden besproken. Voor antimoon, cadmium, ijzer, kobalt, koper, kwik, mangaan, seleen, tin en zink werden geen significante verschillen tussen de mesocosms gevonden.

4.4.2.1 Aluminium

Mesocosms met lage verversingssnelheid

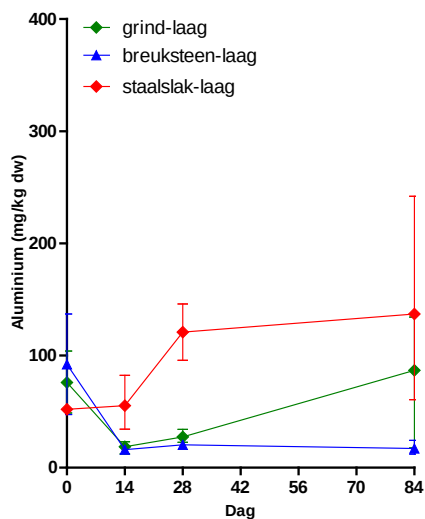
De aluminiumgehalten in mossel, spons en zakpijpen waren niet beïnvloed door de testmaterialen. In zee-eik waren de aluminiumconcentraties niet hoger in de staalslak mesocosms ten opzichte van de grind mesocosms, maar wel ten opzichte van de breuksteen mesocosms waar relatief lage gehalten gemeten werden ().

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de aluminiumgehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. Opvallend was wel dat tussen dag 28 en 56 de aluminiumgehalten in alle onderzochte soorten ca. 2 tot 3 maal hoger was dan in de mesocosms met lage verversingssnelheid.

Tabel 12 Statistische significantie van de verschillen in aluminiumconcentraties in mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

Lage verversing	Aluminium			
staalslak vs grind	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs grind	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
Dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
staalslak vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	*		
Dag 56			ns	ns
dag 84	ns	**		ns

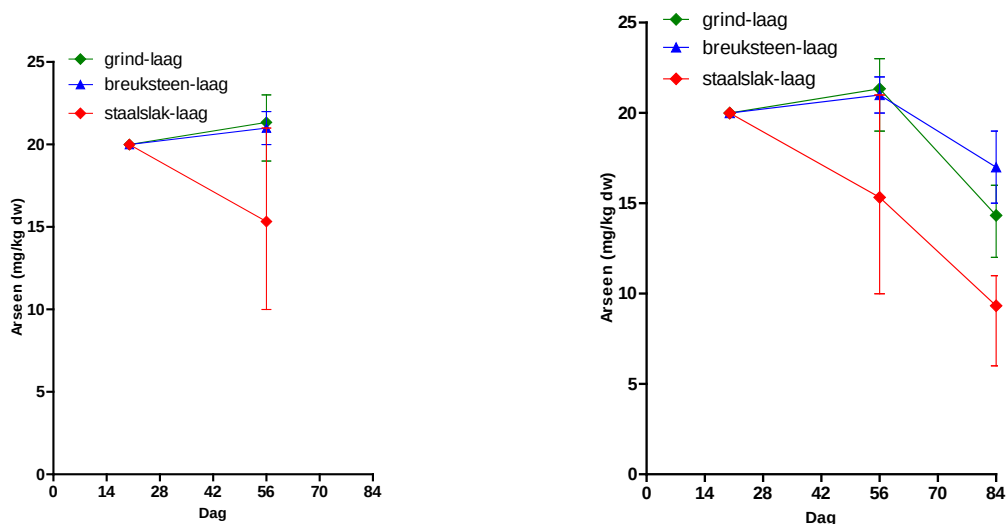


Figuur 35 Aluminium concentraties in zee-eik in mesocosms met lage verversingssnelheid.

4.4.2.2 Arseen

Mesocosms met lage verversingssnelheid

De arseenconcentraties in mossel, spons, zakpijp en zee-eik waren vergelijkbaar tussen de mesocosms met grind en breuksteen. In de mesocosms met staalslakken waren de arseenconcentraties in zakpijpen en zee-eik in de loop van de studie significant (Tabel 13) lager dan die in de mesocosms met grond of breuksteen (Figuur 36).



Figuur 36 Arseenconcentraties in zakpijpen (links) en zee-eik (rechts) in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Tabel 13 Statistische significantie van de verschillen in arseenconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing				
Arseen				
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	***		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	**		ns

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de arseengehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. Ook waren er geen substantiële verschillen met de arseengehalten in de soorten uit de mesocosms met lage verversingssnelheid.

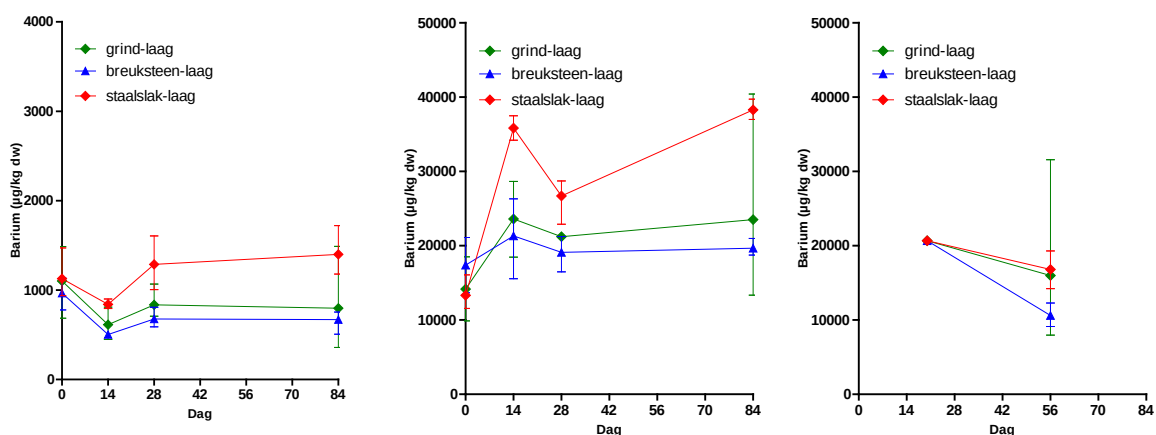
4.4.2.3 Barium

Mesocosms met lage verversingssnelheid

De bariumconcentraties in biota waren vergelijkbaar tussen de mesocosms met breuksteen en grind. In de staalslak mesocosms bleek meer barium beschikbaar en aan het eind van de studie waren de gehalten in mosselen en zee-eik hier significant hoger dan in de breuksteen mesocosms (*Figuur 37*). Het is verder nog vermeldenswaardig dat ongeacht de testmaterialen de bariumgehalten in zee-eik en zakpijpen meer dan een factor 10 hoger zijn dan de gehalten in mosselen.

Tabel 14. Statistische significantie van de verschillen in bariumconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; ns: niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing	Barium			
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	*	*		ns



Figuur 37 Barium concentraties in mosselen (links), zee-eik (midden) en zakpijpen (rechts) in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

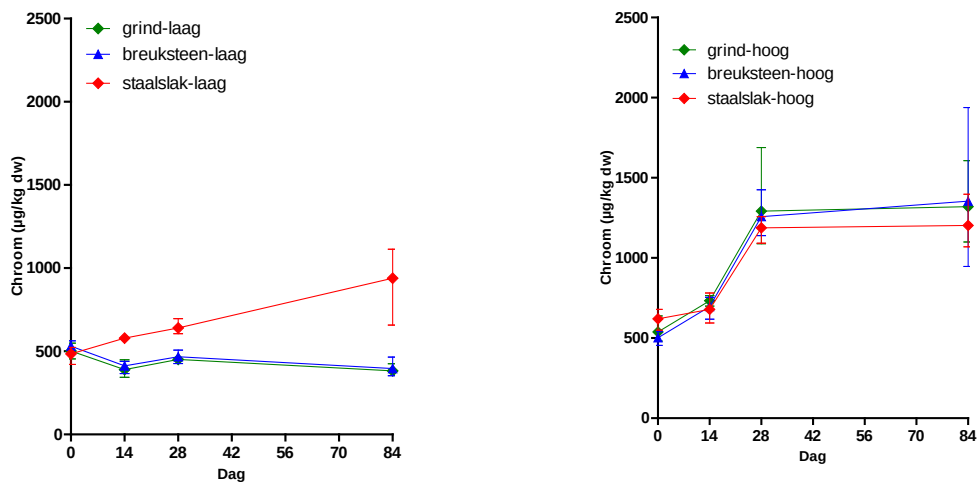
In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de bariumgehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. In de mosselen waren de bariumgehalten op dag 28 circa 3 maal hoger dan in de mosselen uit de mesocosms met lage

verversingssnelheid. Het verloop van het bariumgehalte in de mosselen uit de mesocosms met hoge verversingssnelheid vertoonde sterke overeenkomsten met het verloop van het aluminiumgehalte in dezelfde mosselen.

4.4.2.4 Chroom

Mesocosms met lage verversingssnelheid

Tijdens de laatste bemonsteringsdag zijn de chroomconcentraties in de mosselen uit de staalslak mesocosms significant hoger dan in de andere mesocosms (Tabel 15). Dit is het gevolg van een geleidelijke toename van de chroomconcentraties in de staalslak mesocosms die al op dag 14 zichtbaar wordt (Figuur 38). De chroomconcentraties in zakpijp, spons en zee-eik vertoonden geen relatie met de behandeling.



Figuur 38 Chroomconcentraties in mosselen in mesocosms met lage (links) en hoge (rechts) verversingssnelheid.

Tabel 15 Statistische significantie van de verschillen in chroomconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. '*': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing		Chroom			
grind vs staalslak		Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0		ns	ns		
dag 14		ns	ns		
dag 28		ns	ns		
Dag 56				ns	ns
dag 84		***	ns		ns
grind vs breuksteen		Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0		ns	ns		
dag 14		ns	ns		
dag 28		ns	ns		
dag56				ns	ns
dag 84		ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak		Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0		ns	ns		
dag 14		ns	ns		
dag 28		ns	ns		
dag56				ns	ns
dag 63					
dag 84		***	ns		ns

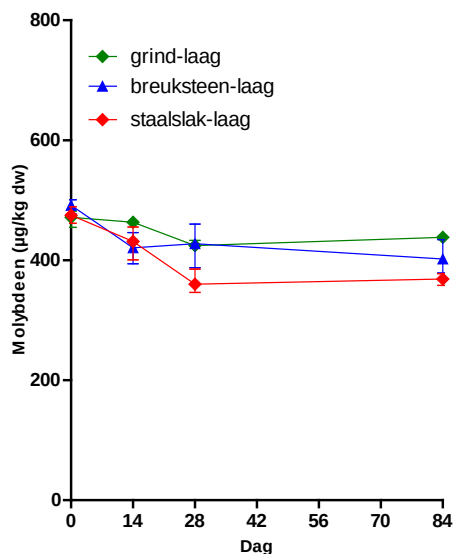
Mesocosms met hoge verversingssnelheid

Bij hoge verversingssnelheid ontstonden geen verschillen tussen de chroomgehalten in biota uit mesocosms met verschillende testmaterialen. De chroomgehalten in mosselen en zakpijpen waren in alle mesocosms met hoge verversingssnelheid hoger dan in mesocosms met lage verversingssnelheid.

4.4.2.5 Molybdeen

Mesocosms met lage verversingssnelheid

De hogere molybdeen concentraties die rond de dagen 42 en 49 werd waargenomen in de staalslak mesocosm werden niet teruggevonden in de biota. In de mosselen waren de gehalten op dag 28 in de staalslak mesocosms zelfs significant lager dan in de andere mesocosms, hoewel de verschillen niet substantieel zijn (Figuur 39).



Figuur 39 Molybdeen concentraties in mosselen in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Tabel 16 Statistische significantie van de verschillen in molybdeenconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. '*': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing	Molybdeen			
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	**	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	**	ns		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	**	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns

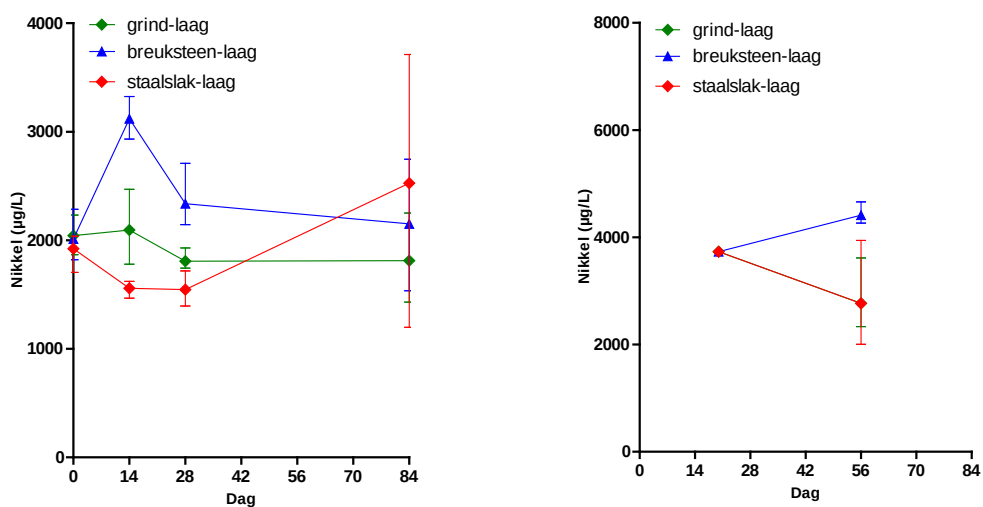
Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de molybdeengehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. Ook waren er geen substantiële verschillen met de molybdeengehalten in de soorten uit de mesocosms met lage verversingssnelheid.

4.4.2.6 Nikkel

Mesocosms met lage verversingssnelheid

De hogere nikkelconcentraties in het water van de mesocosms met breuksteen komen ook tot uiting in de gehalten in mosselen en zakpijpen. Significant hogere nikkelconcentraties in de breuksteen mesocosms werden ook vastgesteld in mosselen op dag 14 ten opzichte van mosselen uit de staalslakken mesocosms, en in de zakpijpen op dag 56 ten opzichte van de grind mesocosms (Figuur 19). In spons en zee-eik worden geen verhoogde gehalten vastgesteld.



Figuur 40 Nikkelconcentraties in mosselen (links) en zakpijpen (rechts) in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de nikkelgehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. Ook waren er geen substantiële verschillen met de nikkelgehalten in de soorten uit de mesocosms met lage verversingssnelheid.

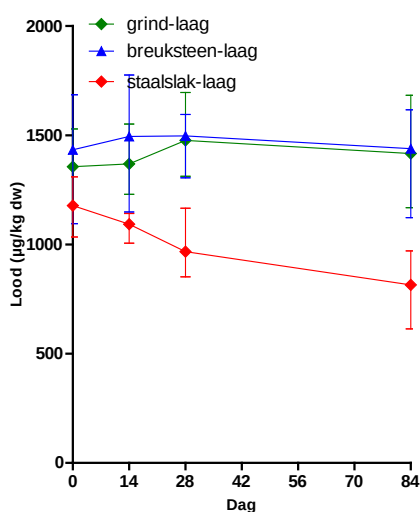
Tabel 17 Statistische significantie van de verschillen in nikkelconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. '*': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing	Nikkel			
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			*	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	***	ns		
dag 28	ns	ns		
dag 56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns

4.4.2.7 Lood

Mesocosms met lage verversingssnelheid

Lood was in vrijwel geen van de watermonsters aantoonbaar boven de kwantificatielimiët. Desondanks werden er wel significante verschillen gevonden tussen de loodgehalten in de mosselen uit de staalslakken mesocosms en de andere mesocosms. De loodconcentraties in de mosselen waren niet verschillend tussen de grind en breuksteen mesocosms, maar waren significant lager in de staalslak mesocosms vanaf dag 28 (Figuur 24). In de andere biotasoorten werden deze verschillen niet gevonden.



Figuur 41 Lood concentraties in mosselen in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In de mesocosms met hoge verversingssnelheid ontstonden geen significante verschillen tussen de loodgehalten in de biota die gerelateerd waren aan de testmaterialen. Ook waren er geen substantiële verschillen met de loodgehalten in de soorten uit de mesocosms met lage verversingssnelheid.

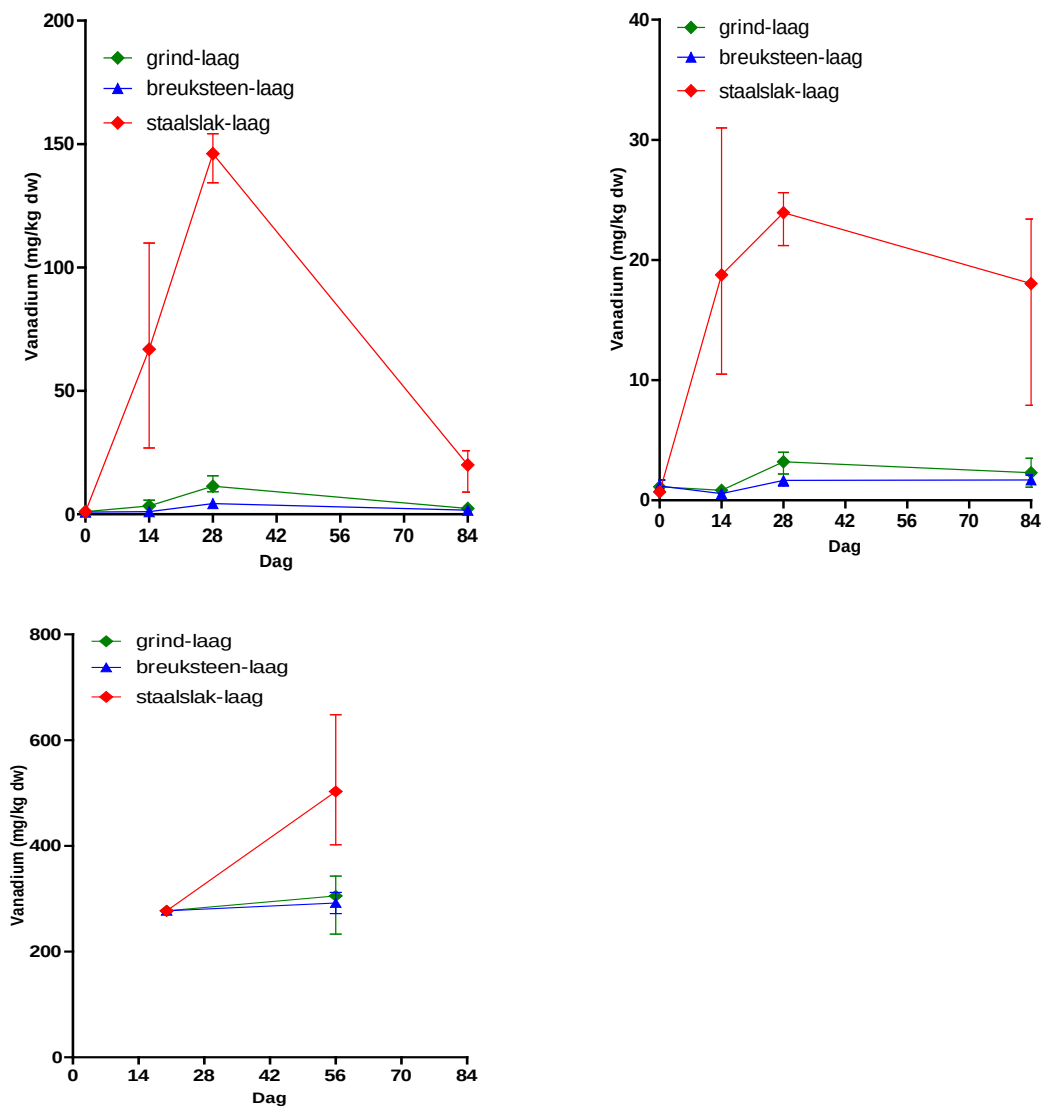
Tabel 18 Statistische significantie van de verschillen in loodconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. '': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.*

lage verversing	Lood			
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	*	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	***	ns		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	**	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	***	ns		ns

4.4.2.8 Vanadium

Mesocosms met lage verversingssnelheid

De vanadiumconcentratie in het mesocosmwatervan gedurende de gehele looptijd van de studie significant hoger in de staalslak mesocosms dan in de andere mesocosms. Deze situatie wordt ook gereflecteerd door de vanadiumgehalten in mosselen en zee-eik, die significant verhoogd zijn vanaf dag 14 en in de zakpijpen op dag 56 (*Figuur 43*).



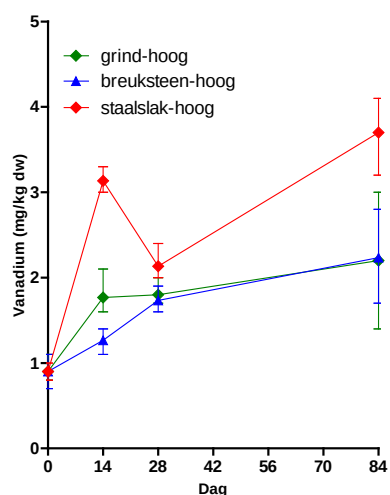
Figuur 42 Vanadiumconcentraties in mosselen (links boven), zee-eik (rechts boven) en zakpijpen (links onder) in mesocosms met lage verversingssnelheid.

Tabel 19 Statistische significantie van de verschillen in vanadiumconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en lage verversingssnelheid. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

lage verversing	Vanadium			
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	****	****		
dag 28	****	****		
dag 56			*	ns
dag 84	****	****		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	*	ns		
dag 28	*	ns		
dag 56			*	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	****	****		
dag 28	****	****		
dag 56			*	ns
dag 84	****	****		ns

Mesocosms met hoge verversingssnelheid

In biota uit de mesocosms met hoge verversingssnelheid worden alleen op dag 14 in de mosselen uit de staalslak mesocosms verhoogde vanadiumgehalten aangetoond (Figuur 43). Ten opzichte van de grind en breuksteen mesocosms bedroeg deze verhoging minder dan een factor 2.



Figuur 43 Vanadium concentraties in mosselen in mesocosms met hoge verversingssnelheid.

Tabel 20 Statistische significantie van de verschillen in vanadiumconcentraties in water, mossel, Zee-eik, spons en zakpijp uit de mesocosms met verschillende testmaterialen en hoge verversingssnelheid. **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$; ****: $p < 0.001$; 'ns': niet significant; blanco: niet bemonsterd op dit tijdstip.

hoge verversing				
grind vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
grind vs breuksteen	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	ns	ns		
dag 28	ns	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns
breuksteen vs staalslak	Mossel	Zee-eik	Zakpijp	Spons
dag 0	ns	ns		
dag 14	*	ns		
dag 28	ns	ns		
dag56			ns	ns
dag 84	ns	ns		ns

5 Discussie

5.1 Testmaterialen

De testmaterialen in deze studie zijn in de mesocosms gebracht zoals het bij IMARES werd aangeleverd. De op het grind en breuksteen aanwezige resten slib/klei leidden direct tot vertroebeling van het water in de mesocosms. In de mesocosms met lage verversingssnelheid bleef deze vertroebeling gedurende twee weken meetbaar, terwijl in de mesocosms met hoge verversingssnelheid deze binnen twee dagen verdwenen was. De staalslakken bevatten geen klei of slib of ander stof en veroorzaakten geen vertroebeling van de waterkolom.

Het grind en het breuksteen ondergingen geen zichtbare veranderingen tijdens het verblijf in de mesocosms. Op de staalslakken ontstonden als snel roestplekken door oxidatie van ijzerresten. Na enige tijd ontstonden op/in een deel van de staalslakken witte aders en uitstulpingen (*Figuur 44*). Dit betreft hoogstwaarschijnlijk calciumcarbonaat dat wordt gevormd wanneer de in de staalslakken aanwezige calcium in contact met water en het daarin aanwezige CO_2 . Calciumcarbonaat is slecht wateroplosbaar waardoor het zich ophoopt op/in de staalslak. Doordat calciumcarbonaat meer volume heeft dan het calcium wordt de staalslak uit elkaar gedrukt. Bij de vorming van het calciumcarbonaat wordt CO_2 (koolzuur) gebonden. Hierdoor stijgt de zuurgraad (pH) van het water, zoals duidelijk zichtbaar was in de mesocosms met lage verversingssnelheid. In de mesocosms met hoge verversingssnelheid was deze pH verhoging alleen gedurende de eerste 14 dagen na de stort zichtbaar.



Figuur 44 Kalkrijke staalslakken na 12 weken verblijf in de mesocosms.

Volgens informatie van de leverancier van de gebruikte staalslakken (ArcelorMittal, Gent) bevat een verse geproduceerde partij staalslakken gemiddeld ca. 13% vrije kalk. Dit gehalte is te hoog voor toepassing in de waterbouw omdat kalkrijke slakken niet stabiel zijn. Daarom wordt de partij verse staalslakken gedurende minimaal 6 maanden in de buitenlucht opgeslagen zonder afdekking. In deze periode kunnen de kalkrijke slakken uit elkaar vallen, waarna zij uit de partij worden gezeefd. Het gehalte vrije kalk in de overgebleven staalslakken zou dan maximaal 5% mogen zijn. Voor waterbouw mogen alleen staalslakken worden gebruikt die bovengenoemde procedure hebben ondergaan.

Tijdens de eindbemonstering werd geschat dat circa 20% van de in de mesocosm aangebrachte staalslakken waren verbrokkeld als gevolg van de calciumcarbonaat vorming. Dit suggereert een hoger kalkgehalte dan 5%. Bij navraag bleek de leeftijd van de gebruikte partij niet exact te achterhalen, maar werd duidelijk dat het niet tenminste 6 maanden aan de buitenlucht was blootgesteld. Omdat onduidelijk was welke consequenties dat heeft voor de representativiteit van de onderzoeksresultaten voor de veldsituatie en ook voor de biobeschikbaarheid van zware metalen waarin uitsluitend gezeefde staalslakken van >6 maanden oud worden toegepast, is een aanvullende uitlogingsproef uitgevoerd. Hierin is de uitloging van een niet verder behandelde partij 'verse' staalslakken van 6-7 maanden oud vergeleken met die van een partij 'waterbouwslakken' van 1.5-2 jaar oud die volgens de juiste procedure geschikt is gemaakt voor toepassing in de waterbouw. De

proef werd uitgevoerd in binnen opgestelde testvaten met een volume van 80 liter waarvan per dag 10% verversd werd, vergelijkbaar met de mesocosms met lage verversingssnelheid. Gedurende de test die wegens de tijdsdruk niet langer kon duren dan 56 dagen werd het verloop van de concentratie van de 18 metalen in water en mosselen gevolgd.

Met uitzondering van de uitloging van aluminium dat nauwelijks vrijkwam uit de verse slakken en vanadium dat uit de verse slakken juist iets sterker uitloogde, waren er weinig substantiële verschillen in de uitloging tussen verse slakken en waterbouwslakken. Het uitloogprofiel van de in de mesocosms gebruikte slakken kwam goed overeen met dat van de waterbouwslakken. Er zijn daarom geen aanwijzingen dat de uitloging van de in de mesocosmstudie gebruikte partij staalslakken niet representatief is voor de staalslakken die voor waterbouw worden toegepast. Er is dus ook geen reden om aan te nemen dat in de mesocosmstudie de effecten van uitlogende stoffen onderschat zijn. Voor barium en vanadium bleek de biologische beschikbaarheid zelfs hoger in de mesocosms dan onder de minder natuurlijke condities in de indoor tanks. De opzet en resultaten van de aanvullende uitloogproef zijn opgenomen in Bijlage 6 van dit rapport.

5.2 Biologische parameters

5.2.1 Algemeen

Het functioneren van een lokaal ecosysteem wordt in belangrijke mate bepaald door voedselaanbod, chemisch-fysische omstandigheden en de structuur van de leefomgeving. Doordat deze omstandigheden in de veldsituatie in ruimte en tijd sterk kunnen variëren is het moeilijk om daar veranderingen van en gemeenschap te koppelen aan een specifieke factor zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van staalslakken.

Mesocosms bieden de mogelijkheid om deze variabelen veel meer te controleren. De chemisch-fysische omstandigheden waren bij aanvang van de studie in alle mesocosms vergelijkbaar, en voor het verversingswater bleef dit het geval gedurende de gehele studie. De structuur was bij aanvang van de studie in alle mesocosms gelijk en werd alleen beïnvloed door verschillen in vorm en formaat van de aangebrachte testmaterialen.

Het voedselaanbod voor de organismen in de mesocosms wordt volledig bepaald door de beschikbaarheid van nutriënten met als belangrijkste vertegenwoordigers stikstof en fosfaat. Samen met (zon)licht zijn deze nutriënten bepalend voor de primaire productie dat de basis vormt voor de voedselketen. Na de inrichting was het verversingswater de enige bron van nutriënten voor de mesocosms. Gedurende de gehele studie was het fosfaatgehalte in het verversingswater erg laag (grotendeels beneden de kwantificatielimiet). In de mesocosms met lage verversingssnelheid werden de weinige fosfaten die werden aangevoerd snel uitgeput wat duidelijk zichtbaar is aan de geremde ontwikkeling van de macroalgen. Door de hogere doorvoersnelheid was er netto meer fosfaat beschikbaar in de mesocosm met hoge verversingssnelheid, wat een substantieel hogere productie van macroalgen mogelijk maakte. Hierdoor neemt ook het zuurstofgehalte in de mesocosms met hoge verversing toe. Andere indicaties van een hogere primaire productie in de mesocosms met hoge verversingssnelheid zijn te vinden in de hogere perifyton productie op twee van de drie meettijdstippen. Perifyton (benthische algen) is een belangrijke voedselbron voor de benthosgemeenschap en het is aannemelijk dat dankzij het betere voedselaanbod *Corophium sp.* en *Capitella sp.* hogere dichtheden konden ontwikkelen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid. Voor Zee-eik is de variatie in de dataset te groot om duidelijke verschillen in biomassa ontwikkeling tussen mesocosms zichtbaar te maken, hoewel er aan het eind van de studie ook hier een trend lijkt te worden ingezet naar hogere biomassa in de mesocosms met hoge verversingssnelheid.

De fytoplanktondichtheid in het verversingswater was laag, waarschijnlijk als gevolg van de zandfiltratie. Ook in de mesocosms bleef de fytoplanktonbiomassa laag. Het algenaanbod bleek voor de mosselen nog net voldoende om het lichaamsgewicht op het oorspronkelijk niveau te houden, maar was te laag om meetbare groei mogelijk te maken. Dit was in alle mesocosms het geval. De kokkels die ook afhankelijk zijn van het fytoplankton groeiden wel duidelijk tijdens de studie. In de mesocosm met lage verversingssnelheid bleek deze groei negatief gecorreleerd met de overleving, wat een duidelijke aanwijzing is dat kokkels in deze mesocosms sterk concurreerden om het aanwezige voedsel. In de mesocosms met hoge verversingssnelheid werden geen aanwijzingen voor een soortgelijke concurrentie gevonden.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de primaire productie in de mesocosm met hoge verversingssnelheid groter was dan in de mesocosm met lage verversingssnelheid, en dat dit op verschillende biologische processen tot uiting komt.

5.2.2 Invloed van de testmaterialen

Er werden in de hele studie slechts twee aanwijzingen gevonden van biologische processen die waren beïnvloed door de testmaterialen. In beide gevallen betrof het waarnemingen in de mesocosms met lage verversingssnelheid.

De sponzen verloren significant meer lichaamsgewicht in de staalslak-laag mesocosms dan in de mesocosms met grind en breuksteen met dezelfde verversingssnelheid. Dit verschil bleef in stand tot en met de laatste bemonstering, zonder indicatie voor herstel. Hoewel er geen verhoogde concentraties in de sponzen werden aangetroffen kan niet worden uitgesloten dat de sponzen toch hinder ondervonden van de uitlogende metalen, mogelijk in combinatie met de hoge pH die onder invloed van de staalslakken in deze mesocosms (met lage verversingssnelheid) ontstond.

De tweede aanwijzing betrof de soortenrijkdom van de benthosgemeenschap op het harde substraat, die in de breuksteen-laag mesocosms significant hoger was dan in de grind-laag en staalslak-laag mesocosms, waarin de soortenrijkdom gelijk was. De achterliggende oorzaak is onduidelijk. Mogelijk faciliteert het oppervlak (structuur, ruwheid etc) van breuksteen de ontwikkeling van een meer complexe community beter dan het gladde grind. Ogenscheinlijk vertoont het oppervlak van een solide staalslak (dus niet van de kalkrijke exemplaren) een sterke overeenkomst met breuksteen. Als dit door de benthosgemeenschap ook zo wordt 'ervaren' dan zou de lagere soortenrijkdom op de staalslakken het gevolg kunnen zijn van uitlogende metalen. Deze aanname is echter sterk speculatief.

Bovengenoemde aanwijzingen van verstoorde biologische processen waren niet aanwezig in de mesocosms met hoge verversingssnelheid. In deze mesocosms werden ook geen andere aanwijzingen voor effecten op soorten of gemeenschappen als gevolg van de gebruikte testmaterialen vastgesteld.

5.2.3 Vergelijking met veldmonitoringsdata 2009-2014

In de periode 2009 – 2014 is een monitoringprogramma uitgevoerd bij bestorte vooroevers in de Ooster- en Westerschelde (Tangelder et al, 2015). Hierbij werd geconstateerd dat zich op gestorte breuksteen en staalslakken vergelijkbare gemeenschappen ontwikkelden. Dit komt overeen met de waarnemingen in de mesocosms met een (hoge) verversingssnelheid die representatief is voor de veldsituatie in de Oosterschelde.

De infauna gemeenschappen in sedimenten in de directe omgeving van de stortlocaties veranderden wel na het storten, maar dit was waarschijnlijk het gevolg van veranderende stromingspatronen en sedimentatieprocessen die na de stort optraden. In de mesocosms, waar stromings- en sedimentatiepatronen door het storten niet substantieel werden veranderd had het gestorte testmateriaal geen aantoonbare invloed op de infauna gemeenschap. Zelfs niet in de mesocosms met de lage verversingssnelheid. Dit onderschrijft de aanname van Tangelder et al.(2015) dat de in het veld aangetroffen veranderingen in de infauna gemeenschap door andere factoren wordt veroorzaakt dan door stoffen die uitlogen uit gestorte materialen.

5.3 Fysisch - chemische parameters

5.3.1 Invloed van de testmaterialen

De invloed van de testmaterialen op fysisch chemische parameters komen het duidelijkst naar voren in de mesocosms met lage verversingssnelheid. Vanaf dag 16 was de zuurgraad (pH) van het water in deze mesocosms met staalslakken significant hoger dan in de andere mesocosms. Zelfs in de mesocosms met hoge verversingssnelheid werd eenmalig (dag 9) een significant hogere pH vastgesteld. In de mesocosms met lage verversingssnelheid bleef het verschil gedurende de gehele

studie aanwezig. Zoals beschreven in paragraaf 5.1 is deze pH stijging en logisch gevolg van het calcium dat in de gebruikte staalslakken aanwezig was. De maximale pH die werd bereikt was 9.1, en daarmee één eenheid hoger dan de pH van het verversingswater. Onder invloed van primaire productie (waarbij CO₂ geconsumeerd wordt) steeg de pH in de lage-verversingsmesocosms met breuksteen en grind ook. Hier werden maximale waarden rond 8.7 bereikt. Deze waarden kunnen ook als extreem voor het open water van de Oosterschelde worden beschouwd. Tijdens laagwater kunnen dergelijke pH waarden wel verwacht worden in poeltjes waar hoge primaire productie plaatsvindt. In de hoge-verversingsmesocosms bleven de pH waarden iets lager en toonden geen invloed van de testmaterialen.

Uit de metingen in de mesocosms met lage verversing bleek fosfaat en silicaat in lichte mate uit de staalslakken vrijkomen. Deze hoeveelheden die van deze nutriënten vrijkwamen waren echter te laag om de primaire productie in deze mesocosms positief te beïnvloeden. In de mesocosms met hoge verversingssnelheid was de uitloging van fosfaat en silicaat niet waarneembaar.

In deze studie werd geen enkele aanwijzing gevonden voor uitloging van kwik, lood, antimoon, nikkel, zink, arseen, seleen, tin en koper uit de staalslakken. De waterconcentraties van deze elementen waren niet verschillend tussen mesocosms met staalslakken en mesocosms met grind. Significant hogere concentraties werden gemeten in de mesocosms met lage verversingssnelheid en staalslakken voor de metalen vanadium, barium, chroom, mangaan, ijzer, aluminium en molybdeen (Tabel 21). Deze metalen kunnen op basis hiervan in verband gebracht worden met staalslakken. Uitloging van barium en vanadium uit staalslakken is eerder aangetoond in kolomproeven met Westerschelde water door Alcontrol (Bosters, 2008), en tijdens laboratorium proeven bij stichting Zeeschelp (Dubbeldam, 2011). In deze laatste studie werd ook uitloging van mangaan gevonden. Aluminium werd in beide genoemde studies niet gemeten. In geen van deze studies werd uitloging van chroom, ijzer en molybdeen geconstateerd zoals tijdens de mesocosmstudie het geval was.

In de mesocosms met voor de Oosterschelde realistische (hoge) waterverversingssnelheden leidde de uitloging in de meeste gevallen niet tot verhoogde waterconcentraties. Vanadium en chroom vormden hierop een uitzondering. Chroom is in de mesocosms met hoge verversingssnelheid opvallend genoeg alleen verhoogd in de staalslak-mesocosms tijdens de eindbemonstering. De verhoging van de vanadiumgehalten bestaat gedurende de eerste 14 dagen na het aanbrengen van de staalslakken. Ten opzichte van de achtergrondconcentraties laten vanadium en aluminium de duidelijkste verhoging zien in de staalslak mesocosms met lage doorstroming. Voor vanadium wordt deze verhoging ook teruggevonden in zakpijpen, mossel en zee-eik. Chroomgehalten zijn alleen verhoogd in mosselen uit de staalslak-laag mesocosms. Ondanks de duidelijke piek in waterconcentraties wordt aluminium in geen van de organismen in verhoogde gehalten teruggevonden. Blijkbaar accumuleert aluminium slecht. Ook kobalt- en molybdeengehalten blijken niet verhoogd in biota uit de staalslak mesocosms. De molybdeengehalten in mosselen uit de staalslak-laag mesocosms zijn zelfs lager dan in mosselen uit de grind-laag mesocosms. Dit geldt ook voor loodgehalten in de mosselen en de arseengehalten in zakpijp en zee-eik.

Ten opzichte van grind blijkt uit breuksteen nikkel vrij te komen en te leiden tot significant hogere concentraties in het water van de mesocosm met lage verversingssnelheid. De nikkelconcentratie is ook significant hoger in zakpijpen uit de breuksteen-laag mesocosms ten opzichte van de grind-laag mesocosms.

Samenvattend blijkt vanadium de meest geschikte tracer voor de aanwezigheid van staalslakken in het marine milieu omdat dit metaal gedurende een langere periode uitloogde en daarbij een relatief sterke verhoging ten opzichte van de lage achtergrondconcentratie veroorzaakte, zodat deze zelfs gedurende een periode meetbaar was in de mesocosms met hoge verversingssnelheid. Bovendien wordt vanadium goed geaccumuleerd door zakpijpen, mosselen en zee-eik.

De concentraties van aluminium, kobalt, molybdeen, lood, arseen, kwik, lood, antimoon, nikkel, zink, arseen, seleen, tin en koper in biota tonen geen enkele relatie met de aanwezigheid van staalslakken. Aluminium kan wel verhoogd in de waterkolom worden aangetroffen, maar wordt niet opgenomen door biota. De effecten van de uitloging op de concentraties in de waterkolom zijn vooral zichtbaar gedurende de eerste 4 weken na de stort.

Tijdens de T1 en T2 veldmonitoring is geconstateerd dat gehalten van molybdeen in zakpijpen bemonsterd op de pijler van de Zeelandbrug enkele meters boven de nieuwe ondergrond een factor 4-8 lager zijn dan in zakpijpen bemonsterd op de nieuwe ondergrond bij de locatie Zeelandbrug (Van den Heuvel-Greve e.a., 2012). Naar aanleiding hiervan werd bediscussieerd dat mogelijk een directe hechting op de nieuwe ondergrond de opname van molybdeen in zakpijpen beïnvloedt of dat dit komt door de positie vlak boven de nieuwe ondergrond waardoor meer water dat vlak over de nieuwe ondergrond stroomt, wordt gefiltreerd. In de zakpijpen uit mesocosmstudie wordt molybdeen echter niet in verhoogde concentraties aangetroffen.

Tabel 21 Overzicht van de statistisch 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.

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

5.3.2 Vergelijking met veldmonitoringsdata 2009-2014

5.3.2.1 Absolute gehalten van zware metalen

In Tabel 23 tot en met Tabel 26 zijn de ranges van de gemeten metaalgehalten uit de veldmonitoring 2009 en 2014 (Tangelder et al., 2015) en mesocosmstudie naast elkaar gezet.

Voor de meeste metalen blijken de ranges die in veld of mesocosm in dezelfde matrix (water, zakpijp, mossel of zee-eik) worden gemeten minder dan een factor 3 te verschillen. Wanneer wel grotere verschillen aanwezig zijn dan is er veelal sprake van lager gemeten concentraties in de mesocosms ten opzichte van het veld.

Uitzonderingen waarbij de maximale gehalten wel tenminste 3 maal hoger waren in de mesocosms dan in het veld waren:

- Het ijzer- en zinkgehalte in het verversingswater van de mesocosms en daardoor in de mesocosms zelf. Deze verhoging is mogelijk het gevolg van uitloging van metalen onderdelen in de pompen die gebruikt zijn om het water te transporteren.
- Het aluminium- en vanadiumgehalte in het water van de staalslak-laag mesocosms als gevolg van uitloging uit de staalslakken.
- Het vanadiumgehalte in mosselen uit de staalslak-laag mesocosms als gevolg van uitloging uit de staalslakken.

Voor slechts een beperkt aantal zware metalen bestaan normen voor gehalten in biota (Tabel 22). Het betreft kwik, lood en cadmium, dus allen metalen waarvoor geen uitloging uit staalslakken of

breuksteen kon worden aangetoond. De normen werden dan ook in geen van de mesocosms overschreden.

Tabel 22 Normen voor metaalgehalten in biota, die toegepast worden binnen de KRW en OSPAR.

(Methyl)Kwik	20 µg/kg natgewicht	biota	EU, 2008
Kwik	2,5 mg/kg drooggewicht	Mosselen en oesters	OSPAR, 2009
Lood	7,5 mg/kg drooggewicht	Mosselen en oesters	OSPAR, 2009
Cadmium	5,0 mg/kg drooggewicht	Mosselen en oesters	OSPAR, 2009

Tabel 23 Gemeten minimum en maximum concentraties in watermonsters tijdens de veldmonitoring 2009-2014 (Veld) en in de mesocosms met respectievelijk grind, breuksteen en staalslakken.

Water element (µg/l)		VELD			GRIND		BREUKSTEEN		STAALSLAK	
		referentie	stortlocaties	aanvoer	hoog	laag	hoog	laag	hoog	laag
Al	min	2.7	2.3	1.4	1.1	1.6	1.0	1.9	2.4	1.6
	max	4.0	3.8	5.6	9.7	5.0	4.0	7.8	6.4	48.8
As	min	-	-	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.7
	max	-	-	2.8	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	3.0
Ba	min	10.5	5.9	10.3	10.8	10.6	10.4	10.9	11.2	12.2
	max	14.1	14.8	15.7	28.6	19.0	30.3	19.3	31.4	33.7
Cd	min	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	max	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Co	min	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	max	0.1	0.4	0.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2
Cr	min	0.04	0.03	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	max	0.92	2.7	1.0	0.4	0.5	0.4	0.4	2.3	1.1
Cu	min	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6
	max	3.3	2.5	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.1	1.5
Fe	min	0.1	0.1	<0.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	max	1.5	1.6	5.4	11.2	4.1	11.2	4.3	5.2	9.1
Mn	min	1.0	3.2	2.4	5.0	5.7	4.5	5.2	6.9	7.1
	max	9.6	30.9	21.2	21.9	64.0	20.8	52.3	26.7	41.2
Mo	min	9.6	6.8	3.3	6.0	8.8	5.5	9.1	6.4	11.2
	max	12	12.1	12.6	12.5	13.3	12.5	12.9	12.5	15.1
Ni	min	-	-	0.5	0.6	0.6	0.6	0.9	0.6	0.5
	max	-	-	1.1	1.4	1.4	1.2	2.1	2.4	1.3
Sb	min	0.16	0.16	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	max	0.23	0.25	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	min	0.1	0.1	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
	max	0.3	0.6	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
V	min	1.3	1.1	1.2	1.1	0.4	1.1	0.5	1.1	1.1
	max	2.5	4.1	1.9	1.8	1.3	2.0	2.1	7.1	70.8
Zn	min	0.3	0.1	3.0	4.0	1.2	3.2	1.9	4.1	1.3
	max	4.0	5.7	16.3	8.6	6.3	11.5	6.3	16.4	8.2

Tabel 24 Gemeten minimum en maximum concentraties in zakpijpen tijdens de veldmonitoring 2009-2014 (Veld) en in de mesocosms met respectievelijk grind, breuksteen en staalslakken.

Zakpijp <i>C.intestinalis</i>		VELD	GRIND		BREUKSTEEN		STAALSLAK	
			hoog	laag	hoog	laag	hoog	laag
Al [mg/kg ds]	min	1185	897	399	897	252	897	359
	max	6686	1266	897	1542	897	1108	897
As [mg/kg ds]	min	6	19	20	18	20	19	15
	max	26	20	21	20	21	20	20
Ba [µg/kg ds]	min	4675	20667	10615	20667	15995	20667	16797
	max	16348	24353	20667	25339	20667	22450	20667
Cd [µg/kg ds]	min	43	126	127	127	124	127	127
	max	198	127	182	129	127	160	155
Co [µg/kg ds]	min	951	1373	1373	1373	1085	1373	1373
	max	4332	1906	1537	1661	1373	1886	1457
Cr [µg/kg ds]	min	3789	4655	1764	4655	993	4655	2014
	max	45396	5881	4655	8316	4655	6153	4655
Cu [µg/kg ds]	min	5087	6909	5702	6909	5966	6909	6417
	max	45613	7214	6909	7852	6909	7660	6909
Fe [mg/kg ds]	min	2221	1609	665	1609	511	1609	546
	max	10362	2215	1609	2707	1609	2048	1609
Hg [µg/kg ds]	min	58	83	83	68	83	83	83
	max	123	108	97	83	99	107	88
Mn [mg/kg ds]	min	151	288	288	281	288	288	288
	max	1141	506	389	288	295	480	457
Mo [µg/kg ds]	min	556	1633	1206	1689	1342	1583	1282
	max	2688	1689	1689	2036	1689	1689	1689
Ni [µg/kg ds]	min	3199	3733	3733	3733	2769	3733	2767
	max	310870	4187	4413	4696	3733	4170	3733
Pb [µg/kg ds]	min	3437	2374	1820	2374	1227	2374	1343
	max	13648	3339	2374	3521	2374	3162	2374
Sb [µg/kg ds]	min	<37	138	134	135	138	138	138
	max	164	138	138	138	141	155	148
Se [µg/kg ds]	min	1747	3978	3978	3598	3978	3978	3978
	max	4144	5147	5236	3978	4359	4770	4297
Sn [µg/kg ds]	min	<73	302	269	377	281	330	295
	max	812	377	377	473	377	377	377
V [mg/kg ds]	min	7	277	277	249	277	277	277
	max	306	287	292	277	305	355	503
Zn [mg/kg ds]	min	64	120	105	120	89	120	109
	max	475	164	120	152	120	178	120

Tabel 25 Gemeten minimum en maximum concentraties in mosselen tijdens de veldmonitoring 2009-2014 (Veld) en in de mesocosms met respectievelijk grind, breuksteen en staalslakken.

Mossel <i>M. edulis</i>		VELD	GRIND		BREUKSTEEN		STAALSLAK	
			hoog	laag	hoog	laag	hoog	laag
Al (mg/kg ds)	min	7.8	13	13	14	8.1	19	11
	max	703	217	49	233	53	191	57
As (mg/kg ds)	min	11	9.4	8.5	9.0	8.7	9.0	7.7
	max	13	12	9.0	11	10	11	8.8
Ba (µg/kg ds)	min	220	444	503	413	612	503	840
	max	2805	2605	965	2159	1102	2340	1399
Cd [µg/kg ds]	min	415	432	493	418	471	405	463
	max	556	441	682	455	637	445	658
Co [µg/kg ds]	min	517	586	602	522	571	525	580
	max	1861	696	894	703	1027	675	1114
Cr [µg/kg ds]	min	279	501	396	538	382	620	484
	max	41475	1354	530	1319	501	1203	939
Cu [µg/kg ds]	min	7	5.2	5.0	5.3	4.9	5.0	5.2
	max	50	7.0	6.5	6.5	6.5	6.7	6.4
Fe [mg/kg ds]	min	81	103	95	105	100	114	89
	max	3767	405	135	437	162	372	147
Hg [µg/kg ds]	min	139	122	122	121	117	118	100
	max	268	133	147	133	149	130	138
Mn [mg/kg ds]	min	8.0	6.2	8.0	6.7	7.4	7.0	7.7
	max	47	21	23	23	23	19	16
Mo [µg/kg ds]	min	1695	443	402	471	425	447	360
	max	2966	588	491	525	472	536	475
Ni [µg/kg ds]	min	1002	1353	2012	1186	1807	1305	1547
	max	19473	2373	3119	2522	2095	2281	2526
Pb [µg/kg ds]	min	679	1055	1433	1082	1356	989	815
	max	3731	1490	1497	1478	1477	1358	1178
Sb [µg/kg ds]	min	<77	75	75	75	75	75	75
	max	102	75	75	75	75	75	75
Se [µg/kg ds]	min	3298	3118	3044	3041	2772	2956	3296
	max	7251	4385	4634	4278	4320	4461	4734
Sn [µg/kg ds]	min	<154	151	149	154	150	153	149
	max	1008	180	165	199	161	160	151
V [mg/kg ds]	min	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0
	max	10	2	4	2	11	4	146
Zn [mg/kg ds]	min	88	107	99	105	97	109	99
	max	133	159	137	157	152	151	108

Tabel 26 Gemeten minimum en maximum concentraties in zee-eik tijdens de veldmonitoring 2009-2014 (Veld) en in de mesocosms met respectievelijk grind, breuksteen en staalslakken.

Zee-eik <i>F. vesiculosus</i>		VELD	GRIND		BREUKSTEEN		STAALSLAK	
			hoog	laag	hoog	laag	hoog	laag
Al [mg/kg ds]	min	107	16	16	17	19	24	52
	max	1800	209	105	248	87	144	137
As [mg/kg ds]	min	7	17	17	17	14	18	14
	max	55	31	26	35	27	29	16
Ba [µg/kg ds]	min	4491	15919	18140	18403	14171	17091	13321
	max	24782	22065	21323	25761	23593	19930	38288
Cd [µg/kg ds]	min	37	282	424	264	326	277	295
	max	692	340	531	417	532	356	384
Co [µg/kg ds]	min	1199	715	158	1101	519	1049	996
	max	3931	1240	2910	1470	3116	1361	1799
Cr [µg/kg ds]	min	539	140	122	173	158	176	381
	max	6608	1368	2118	1343	2887	1148	1909
Cu [µg/kg ds]	min	1693	2129	1738	2047	1963	2280	1949
	max	7095	2652	3715	3073	3070	3114	2492
Fe [mg/kg ds]	min	253	74	51	78	77	92	99
	max	3128	405	261	487	278	324	211
Hg [µg/kg ds]	min	17	12	11	11	12	10	13
	max	56	15	20	17	16	17	16
Mn [mg/kg ds]	min	178	88	126	124	122	114	82
	max	757	230	244	236	413	218	444
Mo [µg/kg ds]	min	256	159	151	178	184	160	158
	max	1399	251	219	240	454	212	208
Ni [µg/kg ds]	min	3404	2840	3852	2939	3439	2545	2661
	max	7892	5476	5774	5683	6119	4876	3792
Pb [µg/kg ds]	min	746	200	344	212	358	208	269
	max	5418	808	1047	870	1103	870	576
Sb [µg/kg ds]	min	<35	45	45	46	45	45	45
	max	107	48	50	59	64	52	53
Se [µg/kg ds]	min	67	66	59	64	57	70	68
	max	3192	111	107	106	128	127	108
Sn [µg/kg ds]	min	45	86	86	100	85	87	85
	max	101	163	144	174	162	805	137
V [mg/kg ds]	min	1.0	1.0	0.6	0.8	0.9	1.5	0.7
	max	8.0	2.1	1.8	7.3	3.2	3.6	24
Zn [mg/kg ds]	min	35	89	78	103	86	103	84
	max	62	140	124	132	118	132	103

5.3.2.2 Interpretatie veldmonitoring met inzichten uit de mesocosmstudie

Op basis van de veldmonitoring rond bestorte vooroevers in de Ooster- en Westerschelde konden geen eenduidige conclusies worden getrokken wegens grote variaties tussen soorten (mossel, oesters, zakpijpen en zee-eik), locaties en in de tijd. Bovendien waren er geen specifieke metalen die opvielen, maar trad de variatie op over de gehele linie van de 18 gemeten metalen (dezelfde set als in de mesocosmstudie). Desondanks werden uit de dataset de volgende indicaties gedestilleerd (Tangelder et al, 2015):

- Kwik werd relatief vaak in hogere concentraties in biota op zowel breuksteen als staalslakken gemeten 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 zijn relatief vaak hoog in biota op referentielocaties.

De metalen die in de mesocosm studie het meest prominent in biota accumuleren bij blootstelling aan staalslakken (vanadium, chroom, en in mindere mate mangaan en ijzer) of aan breuksteen (nikkel) werden in het veldonderzoek dus niet in verhoogde concentraties in biota aangetroffen. Met de aanname dat de samenstelling en eigenschappen van de staalslakken en het breuksteen op de stortlocaties in de Ooster- en Westerschelde gelijk zijn aan die van de materialen in de mesocosms kan worden geconcludeerd dat tijdens de veldmonitoring geen relatie is gevonden tussen van de aanwezigheid van staalslakken of breuksteen en gehalten van metalen in biota. De bovengenoemde indicaties zijn veroorzaakt door andere bronnen.

Als de resultaten van de T0-T5 monitoring (trendgrafieken in tijd) met kennis van de mesocosm resultaten (accumulatie van vanadium, chroom, en in mindere mate, mangaan en ijzer uit staalslakken bij lage doorstroming, en van nikkel uit breukstenen) nogmaals beschouwd worden dan valt het volgende op:

- In mosselen: op Cluster-I locatie Zeelandbrug in 2009 werd een mogelijk hoger gehalte aan vanadium, chroom, mangaan, ijzer en nikkel geconstateerd twee jaar na het aanbrengen van de vooroeververdediging. Echter, er is geen referentielocatie voor mosselen, waardoor niet te zeggen valt of deze hogere gehalten een autonome trend in de Oosterschelde zijn of werkelijk een gevolg van de vooroeververdediging. Er zijn in hetzelfde monitoringsjaar namelijk ook hogere gehalten zichtbaar van bijvoorbeeld kwik en lood, die op basis van de mesocosmstudie niet te relateren zijn aan de gestorte materialen.
- In zakpijpen: geen van de monsters laten een hoger gehalte aan vanadium, chroom, mangaan, ijzer en nikkel zien na het storten van de vooroeververdediging op Cluster-I locatie Zeelandbrug in 2009, met uitzondering van één afwijkend monster op staalslakken dat afwijkt van de andere staalslak- en breuksteenmonsters.
- In oesters: een mogelijk hoger gehalte aan nikkel één jaar na vooroeververdediging op Cluster-I locatie Zeelandbrug in 2009. In de mesocosmstudie loogde nikkel uit het breuksteen en niet uit staalslakken. De andere metalen die uit de mesocosmstudie naar voren kwamen als gerelateerd aan de test materialen laten in oesters in de veldmonitoring geen hoger gehalte zien na het storten van de vooroeververdediging.

Alleen in mosselen zijn dus mogelijk na twee jaar hogere gehalten aangetroffen van enkele van de metalen die uit de mesocosmstudie naar voren komen als uitlogend en accumulerend. Dit wordt echter niet bevestigd door de monitoringsresultaten in zakpijpen en oesters, terwijl dat in de mesocosm wel het geval is bij vanadium in zakpijpen.

Met de aanname dat de samenstelling en eigenschappen van de staalslakken en het breuksteen op de stortlocaties in de Ooster- en Westerschelde gelijk zijn aan die van de materialen in de mesocosms kan daarom worden geconcludeerd dat tijdens de veldmonitoring geen evidente en structurele relatie is gevonden tussen van de aanwezigheid van staalslakken of breuksteen en gehalten van metalen in biota. De bovengenoemde vermeende indicaties lijken daarmee veroorzaakt te zijn door autonome variatie en trends in de Oosterschelde of andere bronnen.

6 Conclusies

De studie leverde de volgende resultaten op:

- In de mesocosms met lage verversingsnelheid veroorzaakten de staalslakken een duidelijke verhoging van de zuurgraad (pH) van het water ten opzichte van de mesocosms met grind en breuksteen. Tijdens de eerste twee weken na het aanbrengen van de staalslakken werd een pH verhoging ook geconstateerd in de mesocosms met hoge verversingsnelheid. Na 14 dagen waren er geen pH-verschillen meer tussen de mesocosms met hoge verversingsnelheid met grind, breuksteen of staalslakken.
- De gehalten van de metalen vanadium, aluminium, ijzer, chroom, mangaan, barium en molybdeen waren op verschillende tijdstippen significant verhoogd in de mesocosm met lage verversingsnelheid en staalslakken. Deze verhoging was het sterkst gedurende de eerste 6 weken na het storten. Bij hoge verversingsnelheid is alleen de vanadiumconcentratie gedurende een korte periode (14 dagen) significant verhoogd. De concentraties van kwik, lood, seleen, tin, antimoon, cadmium, arseen, koper en zink in de waterkolom werden niet beïnvloed door de aanwezigheid van de testmaterialen of door de verversingsnelheid.
- In de mesocosms met staalslakken en een lage verversingsnelheid werden op verschillende bemonsteringstijdstippen verhoogde concentraties van vanadium gemeten in zakpijpen (tot 2x het achtergrondgehalte), mosselen (tot 150x het achtergrondgehalte) en zee-eik (tot 20x het achtergrondgehalte) en van chroom in mosselen (tot 2x het achtergrondgehalte). In de mesocosms met hoge verversingsnelheid en staalslakken werd alleen in de zakpijpen voor vanadium nog een verhoogde concentratie (tot 2x achtergrondgehalte) aangetroffen.
- In de mesocosms met hoge verversingsnelheid werd, met uitzondering van een eenmalige korte piek van het vanadiumgehalte in mosselen in de staalslak mesocosms geen verhoging van metaalconcentraties in biota geconstateerd.
- In de mesocosms met de hoge verversingsnelheid (realistische situatie voor de Oosterschelde) kon geen effect van staalslakken op het ecosysteem worden aangetoond. In de mesocosms met lage verversingsnelheid leidde de aanwezigheid van staalslakken alleen tot een gewichtsafname (op basis van natgewicht) van de sponzen. Er werden geen andere biologische effecten vastgesteld.
- In de mesocosms met breuksteen en lage verversingsnelheid (niet realistisch voor de Oosterschelde) werd voor nikkel een significante verhoging in de waterkolom, in mosselen en zakpijpen (beiden tot 2x het achtergrondgehalte) geconstateerd. Bij hoge verversingsnelheid (realistische situatie voor de Oosterschelde) waren geen verhogingen in water of biota detecteerbaar. De aanwezigheid van breuksteen leidde niet tot biologische effecten ongeacht de verversingsnelheid.
- De ontwikkeling van het ecosysteem in de mesocosms werd op een aantal aspecten beïnvloed door de waterverversingsnelheid. Tussen de mesocosms met hoge verversingsnelheid ontstonden geen biologische verschillen als gevolg van de gebruikte testmaterialen. In de mesocosms met staalslakken vond bij de lage verversingsnelheid alleen bij sponzen een gewichtsafname plaats. De soortenrijkdom en biodiversiteit van hard-en zachsubstraatgemeenschappen waren nergens beïnvloed door de testmaterialen, wat overeen komt met de resultaten van de veldmonitoringgegevens tot nu toe (2009-2015).
- Uit het aanvullend uitlogingsexperiment met als doel de representativiteit van de gebruikte staalslakken in het mesocosm te testen blijkt dat de in het mesocosm gebruikte staalslakken goed overeen komen met de langduriger verouderde staalslakken zoals die voor de waterbouw (vooroeverbetorsten) worden toegepast.

In relatie tot de veldmonitoring gegevens kan het volgende worden geconcludeerd:

- Tijdens de veldmonitoring rond stortlocaties zijn geen aanwijzingen gevonden dat de benthos gemeenschappen op de substraten of in/op de nabijgelegen zachte sedimenten op een directe wijze beïnvloed worden door uitlogende stoffen uit staalslakken of breukstenen. Dit komt overeen met de bevindingen in de mesocosmstudie, waar zelfs bij een lage waterverversing geen effecten op de benthosgemeenschap werden aangetoond.
- In het veld zijn rond stortlocaties geen verhoogde concentraties in biota aangetroffen van de metalen vanadium, ijzer, chroom en mangaan, die in de mesocosms indicatief voor de

aanwezigheid van staalslakken blijken te zijn. Op grond van deze veldmetingen kan dus geen effect van het storten van staalslakken worden aangetoond. Dit komt overeen met de bevindingen in de mesocosms met hoge verversingssnelheid, die realistisch voor de Oosterschelde kan worden geacht, waar ijzer, chroom en mangaan niet verhoogd in biota werden aangetroffen en vanadium in zeer geringe mate. De mesocosm studie maakt duidelijk dat de tijdens de veldmonitoring wel aangetroffen verhoogde gehalten van kwik, seleen, molybdeen en cadmium in biota niet gerelateerd zijn aan de aanwezigheid van staalslakken of breuksteen.

- Vanadium is het meest geschikte element om de aanwezigheid van (invloed van) staalslakken in het mariene milieu aan te tonen. Het is in lage achtergrondconcentraties aanwezig, loogt relatief lang uit, is relatief goed wateroplosbaar en accumuleert goed in biota.

Ervan uitgaande dat de in de mesocosm geteste staalslakken en breuksteen representatief zijn voor de materialen die in de Oosterschelde zijn gestort, kan op grond van de bevindingen van deze studie in combinatie met de gegevens uit veldmonitoring met zekerheid worden gesteld dat het ecosysteem in de Oosterschelde niet negatief wordt beïnvloed door uitlogende stoffen uit de op dit moment op de stortlocaties aanwezige staalslakken en breuksteen.

7 Kwaliteitsborging

IMARES beschikt over een ISO 9001:2008 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem (certificaatnummer: 187378-2015-AQ-NLD-RvA). Dit certificaat is geldig tot 15 september 2018. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV Certification B.V.

Literatuur

De Jong F.M.W., T.C.M. Brock, E.M. Foekema, P. Leeuwangh (2008): Guidance for summarizing and evaluating aquatic micro- and mesocosm studies. Guidance document of the Dutch Platform for the Assessment of Higher Tier Studies RIVM Report 601506009/2008A

Dubbeldam M.C. (2011): Uitloging van metalen uit breuksteen en staalslakken in zeewater en de bepaling van de toxiciteit met oesterlarven. Rapport stichting Zeeschelp 28 maart 2011.

EU (2013): richtlijn 2013/39/EU van het Europees parlement en de raad van 12 augustus 2013 tot wijziging van Richtlijn 2000/60/EG en Richtlijn 2008/105/EG wat betreft prioritare stoffen op het gebied van het waterbeleid.

Jansen, H.M., S.T. Glorius, M. Tangelder, M. van den Heuvel-Greve (2015). Gehaltes aan zware metalen in biota op stort- en referentielocaties in de Oosterschelde & Westerschelde. Data rapport 2014. IMARES Wageningen UR rapport C079/15.

OSPAR (2009). Background document on CEMP Assessment Criteria for QSR 2010.

Tangelder, M., M. van den Heuvel-Greve, M. de Kluijver, S. Glorius, H. Jansen (2015): Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde en Westerschelde 2014. IMARES Wageningen UR Rapport nummer C102/15

Verantwoording

Rapport nummer: C063/16
Projectnummer: 4305114001

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 IMARES.

Akkoord: Dr. ir. M.J.J. Kotterman
Senior onderzoeker

Handtekening:



Datum: 16 juni 2016

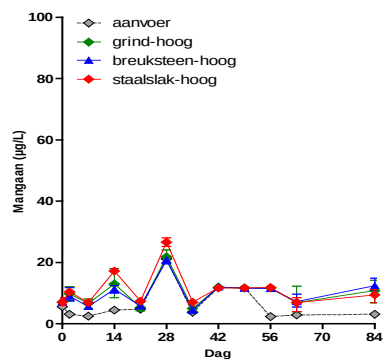
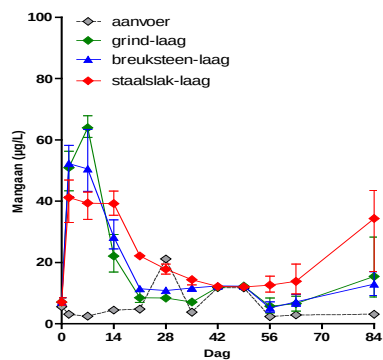
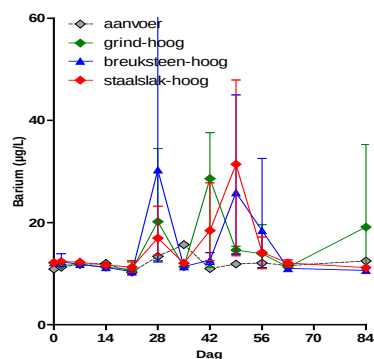
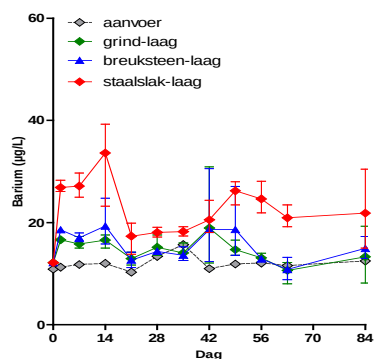
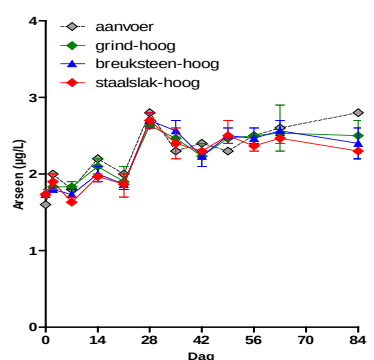
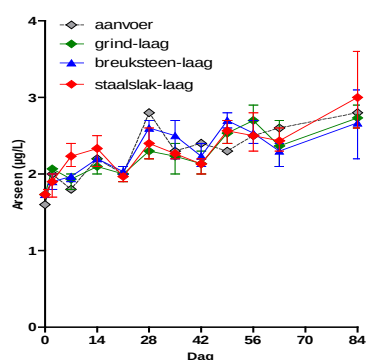
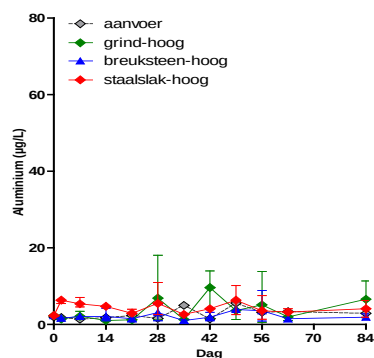
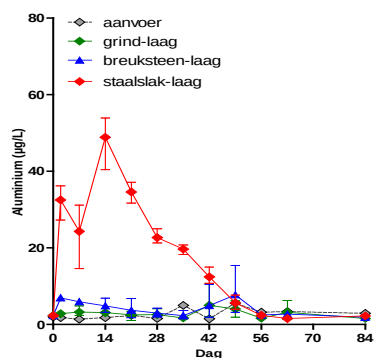
Akkoord: Dr. ir. T.P. Bult
Instituutsmanger

Handtekening:

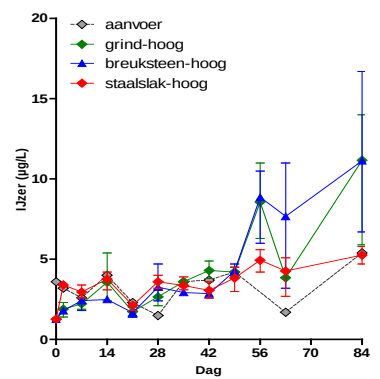
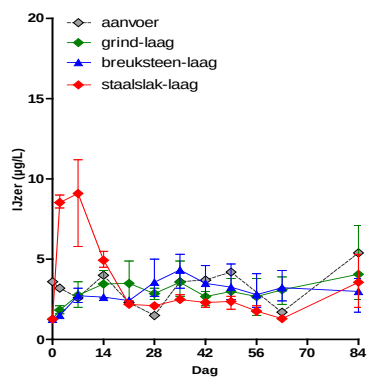
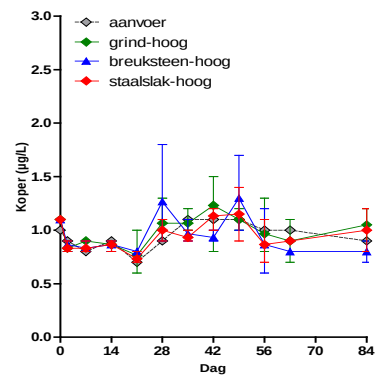
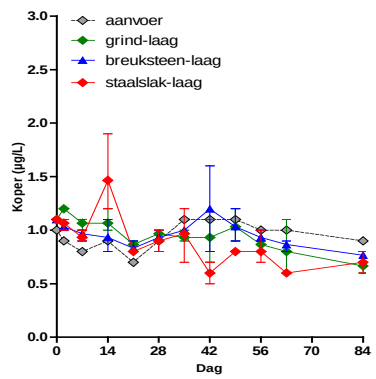
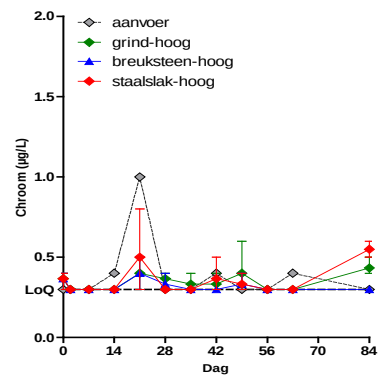
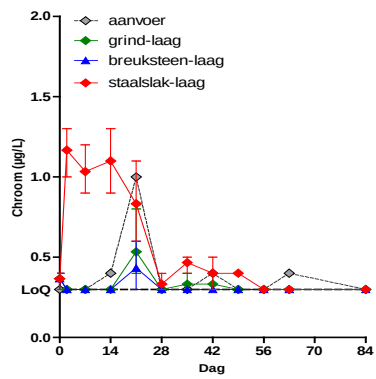
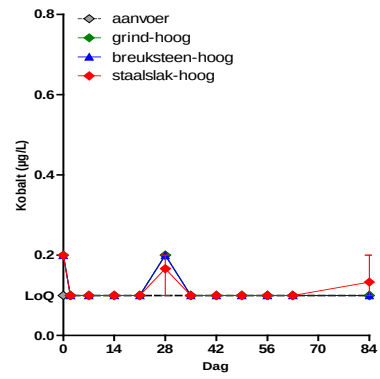
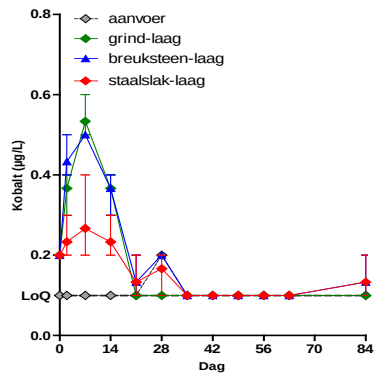


Datum: 16 juni 2016

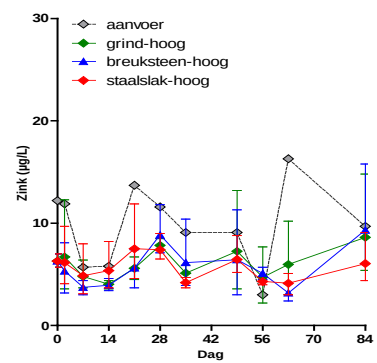
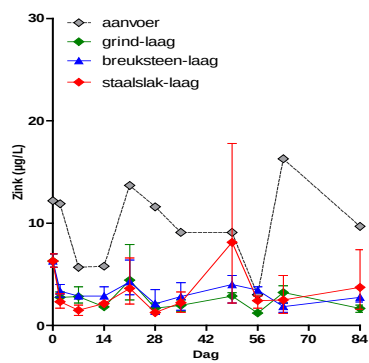
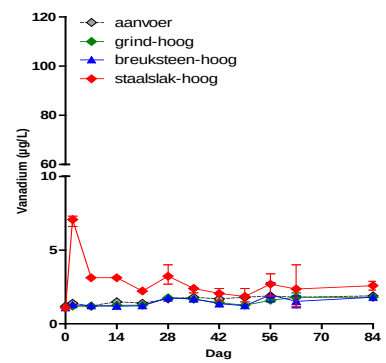
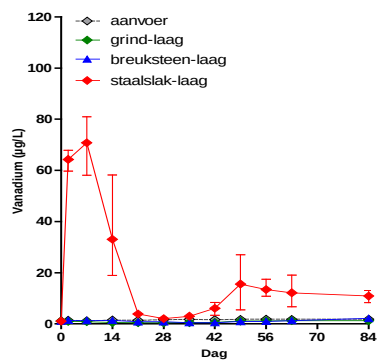
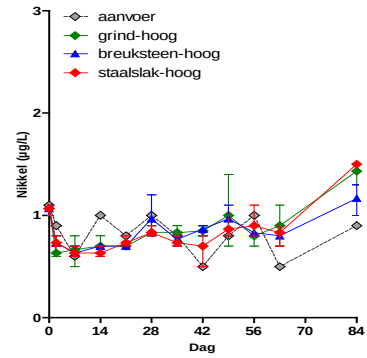
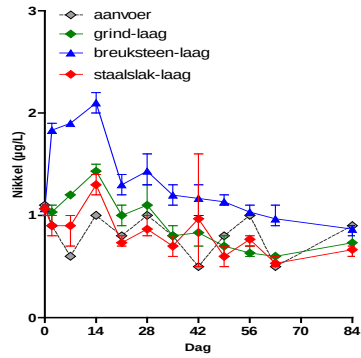
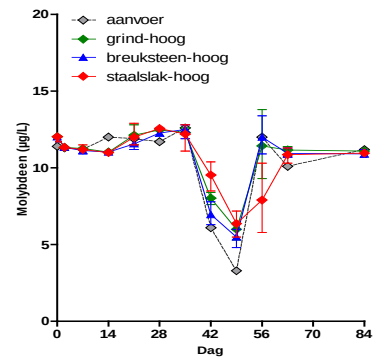
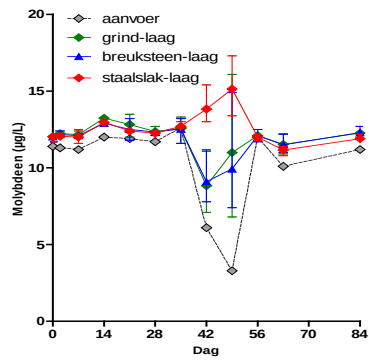
Bijlage 1 Metaalconcentraties in water



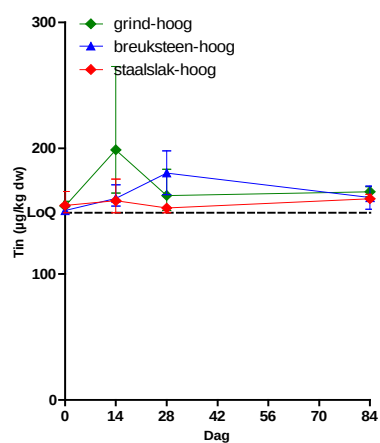
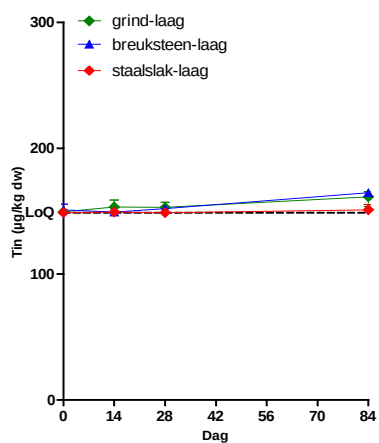
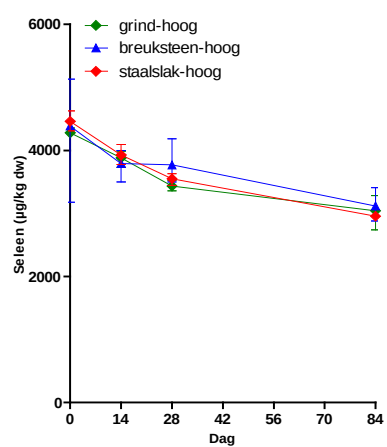
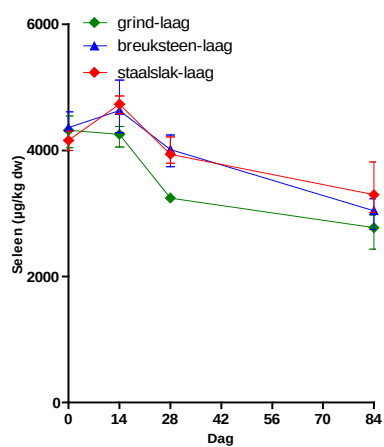
Bijlage 3 Metaalconcentraties in water (2)



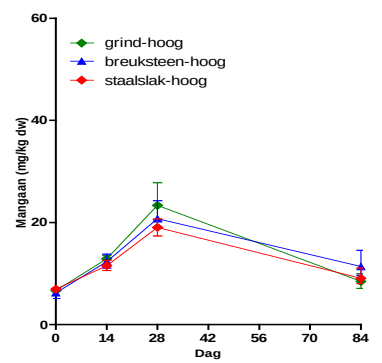
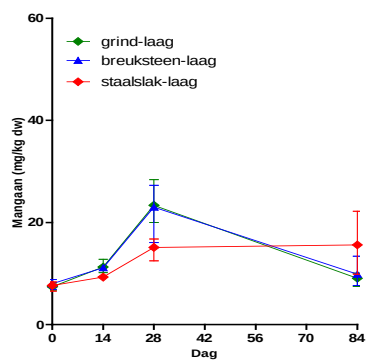
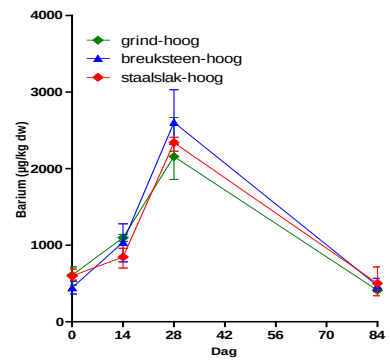
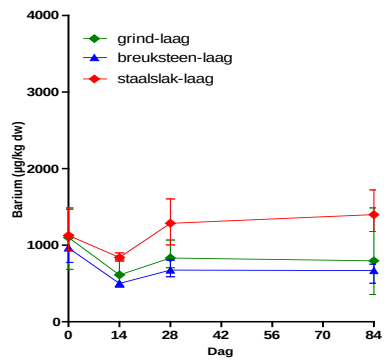
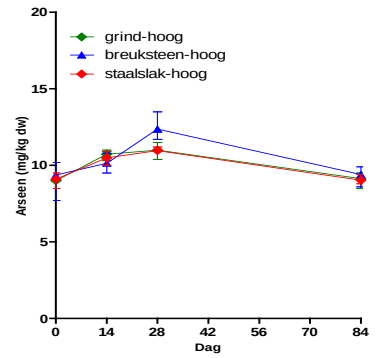
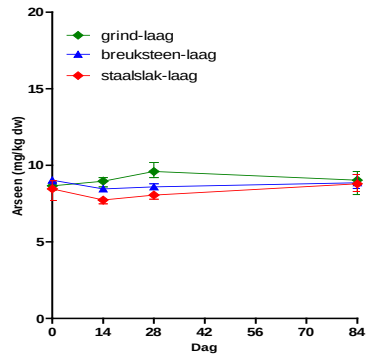
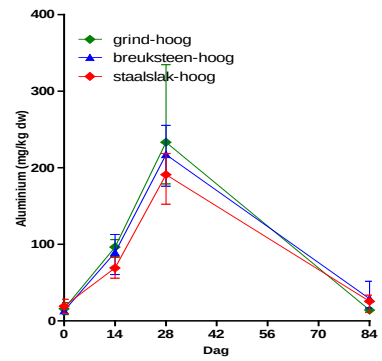
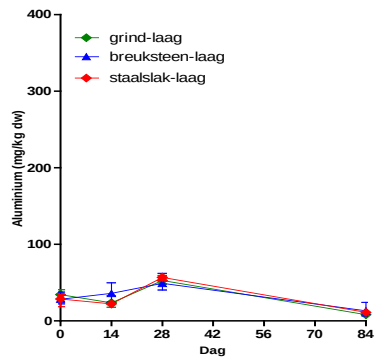
Bijlage 3 Metaalconcentraties in water (3)



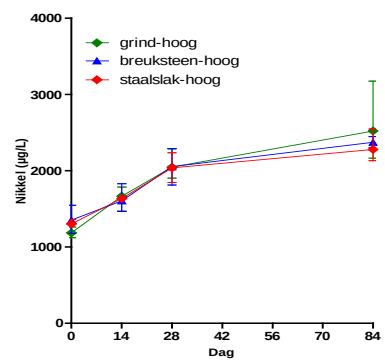
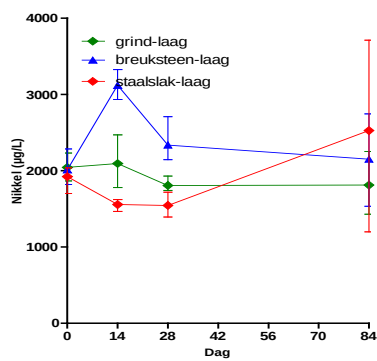
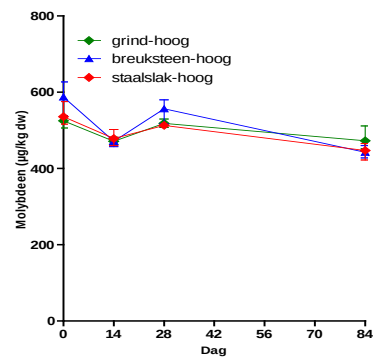
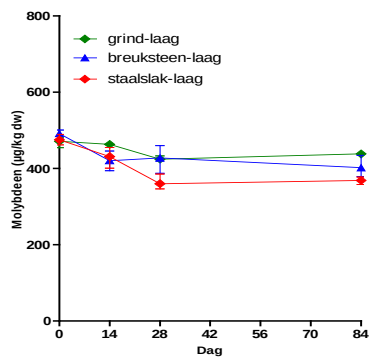
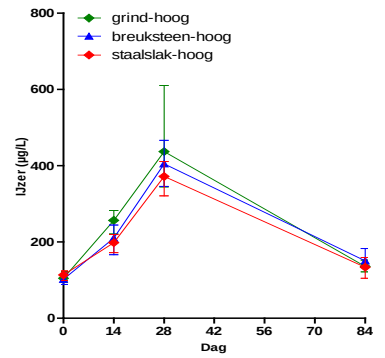
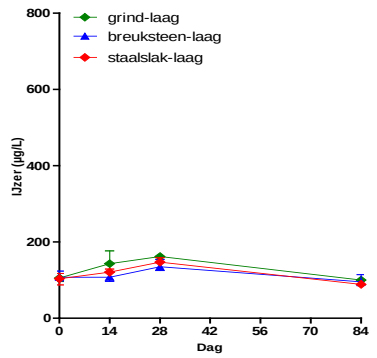
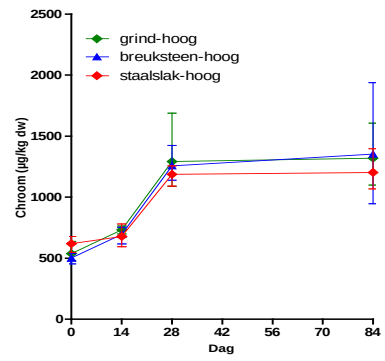
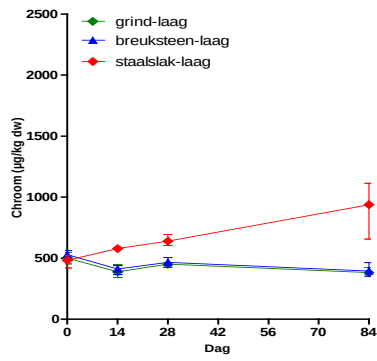
Bijlage 2 Metaalconcentraties in mossel



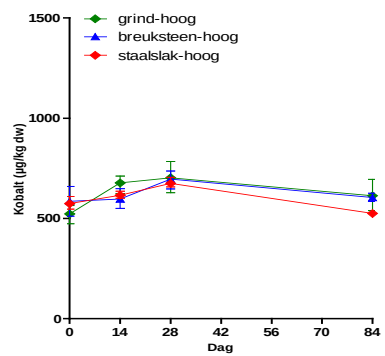
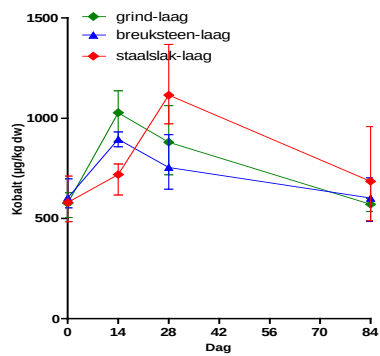
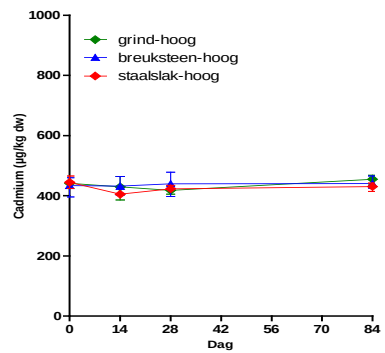
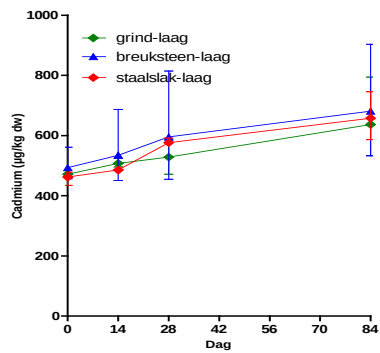
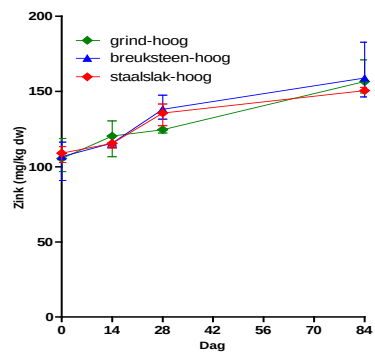
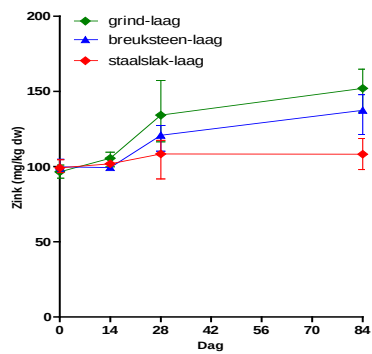
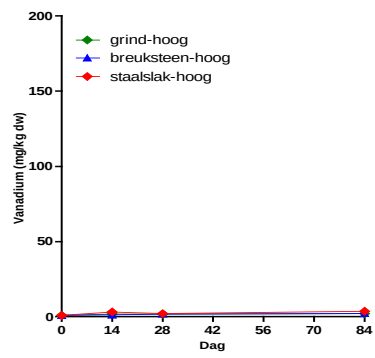
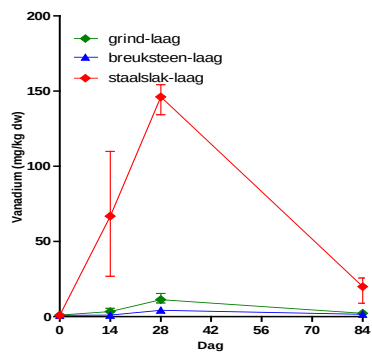
Metaalconcentraties in mossel (2)



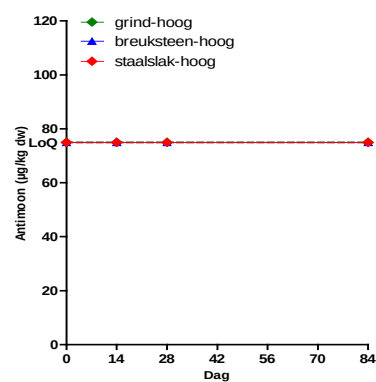
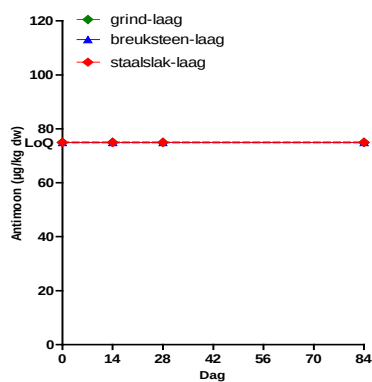
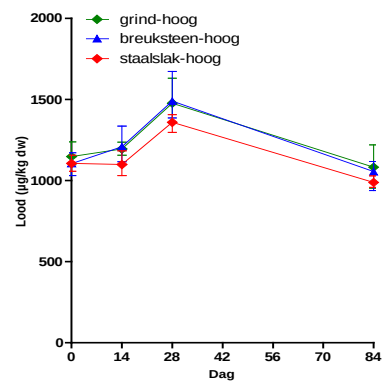
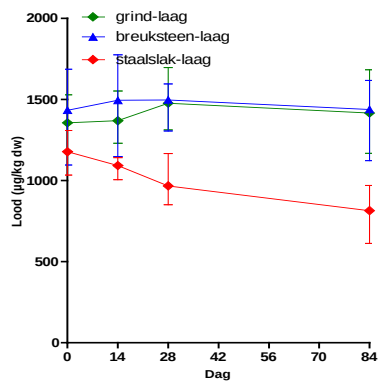
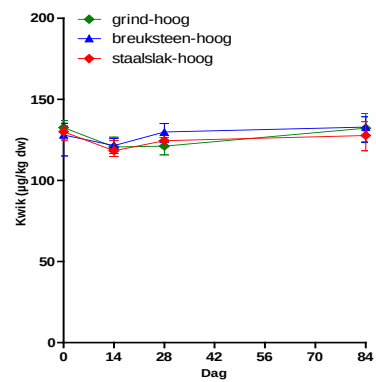
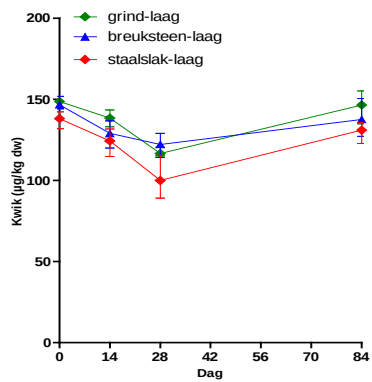
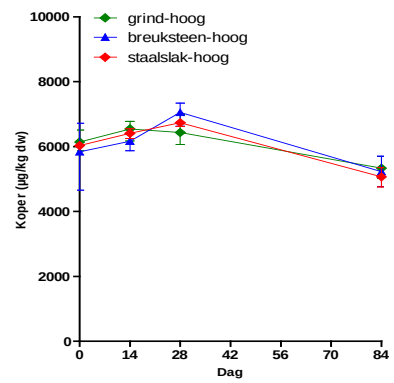
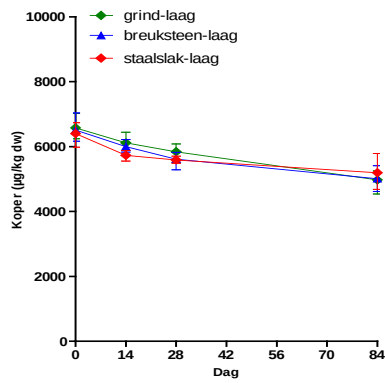
Metaalconcentraties in mossel (3)



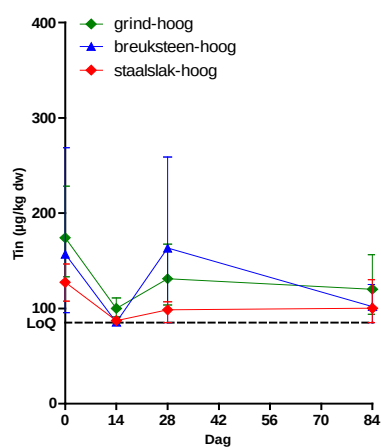
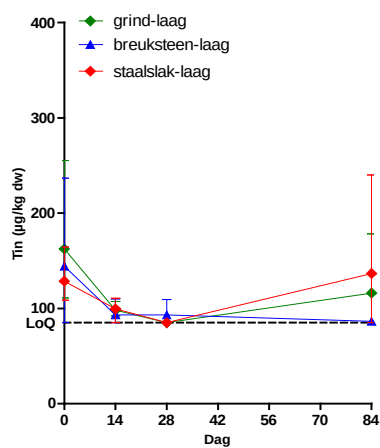
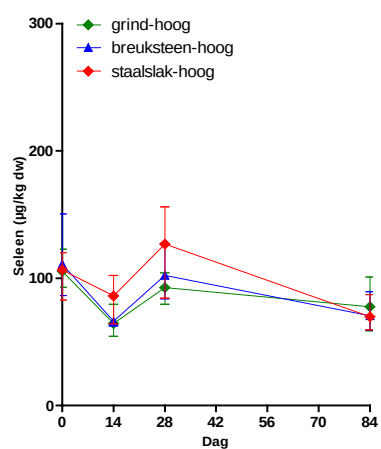
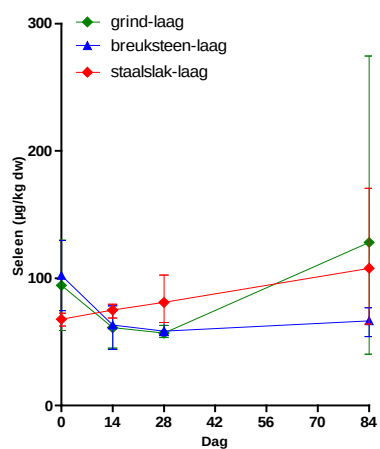
Metaalconcentraties in mossel (4)



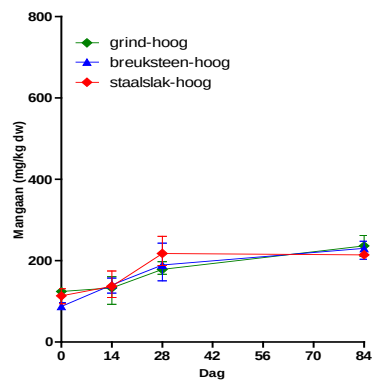
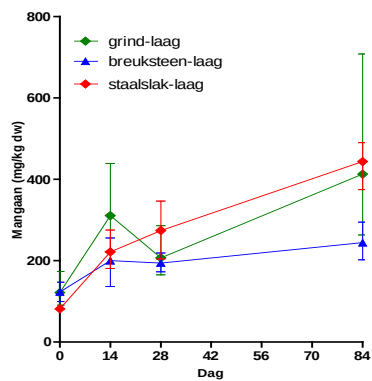
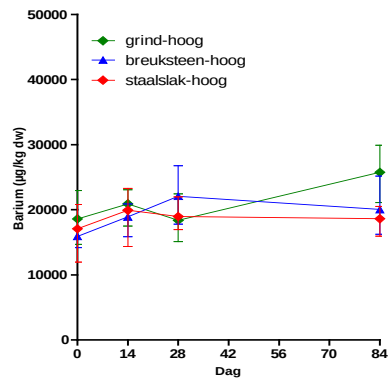
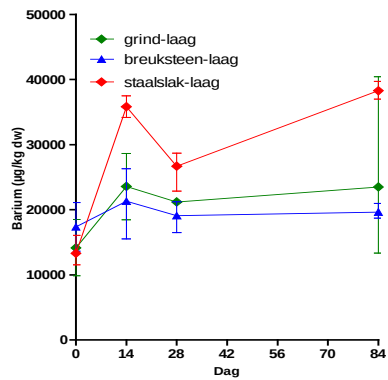
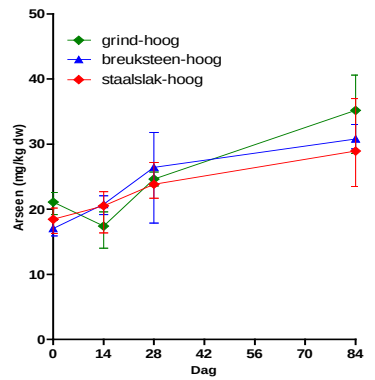
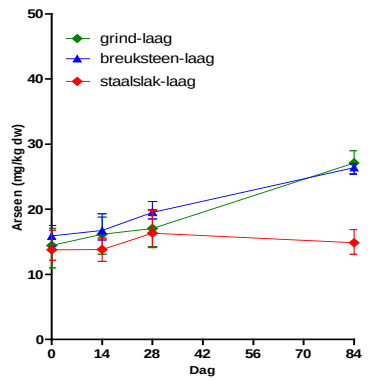
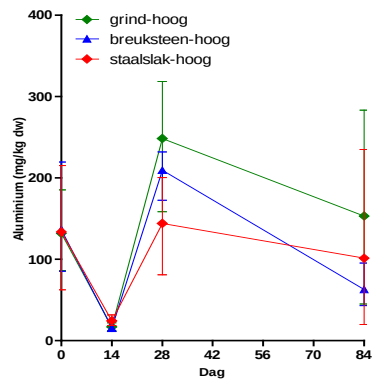
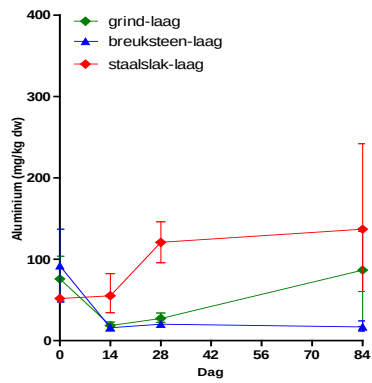
Metaalconcentraties in mossel (5)



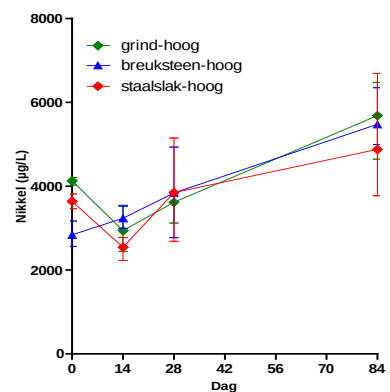
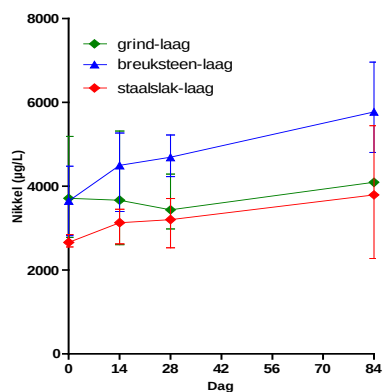
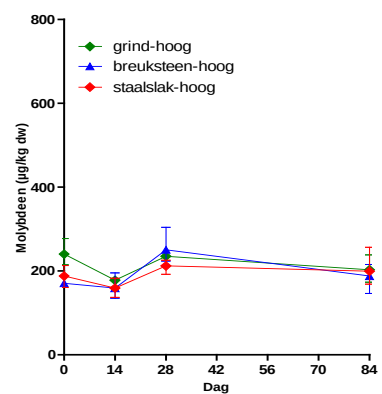
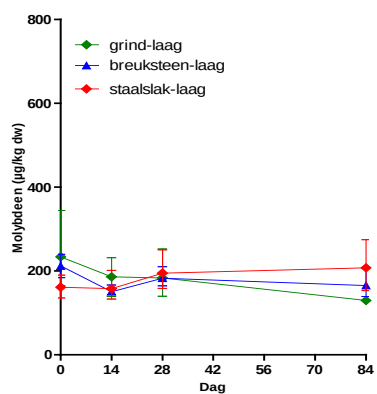
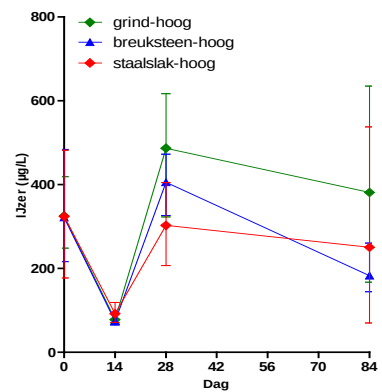
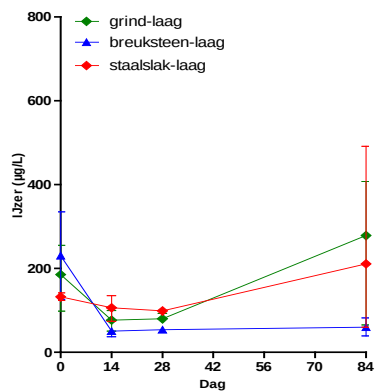
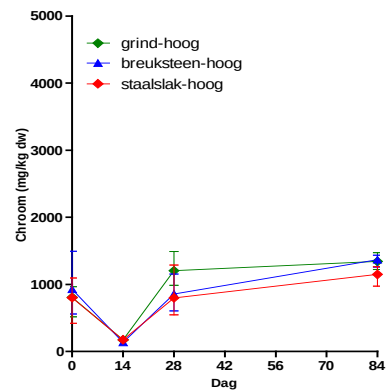
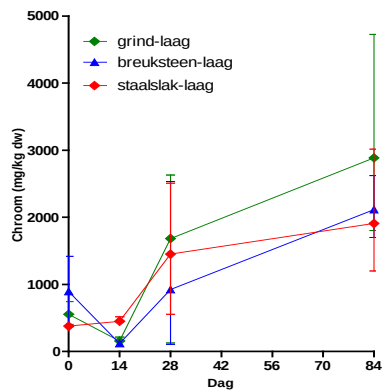
Bijlage 3 Metaalconcentraties in zee-eik



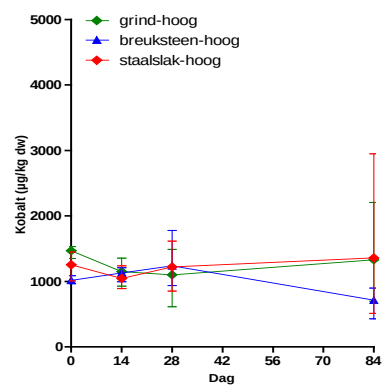
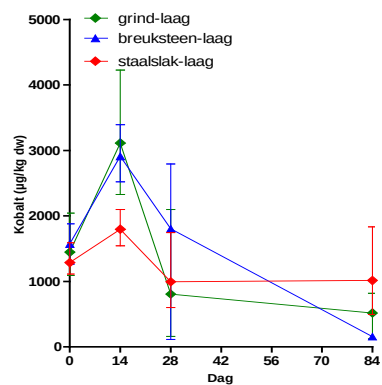
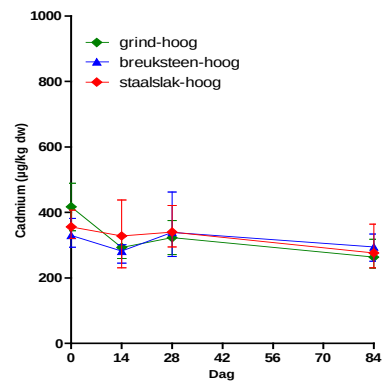
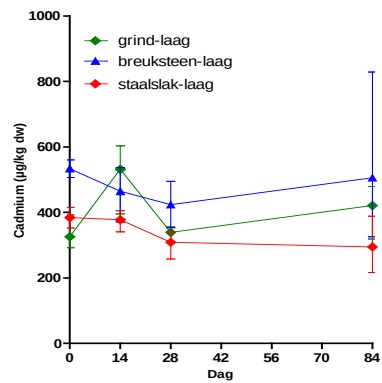
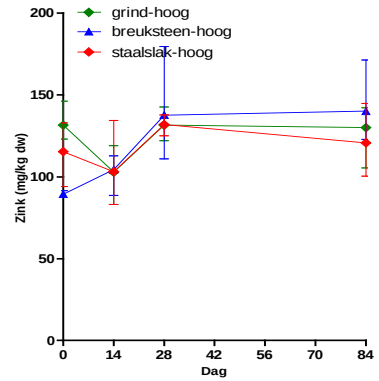
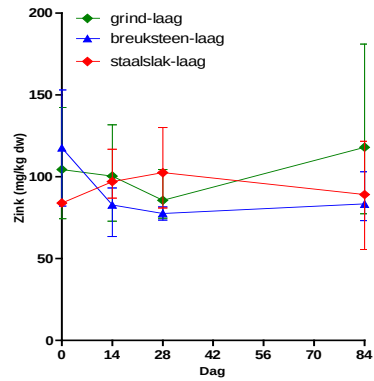
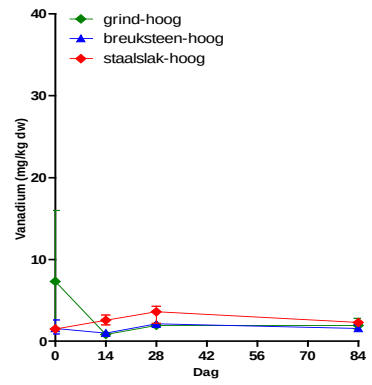
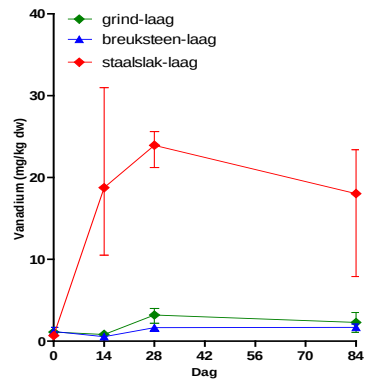
Metaal concentraties in zee-eik (2)



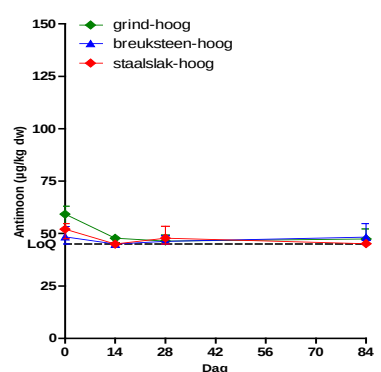
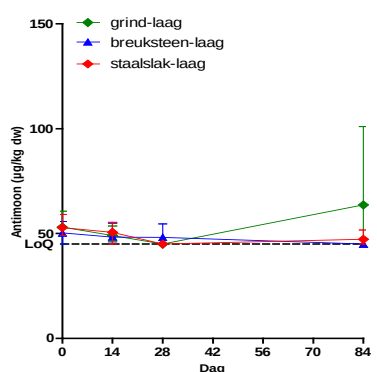
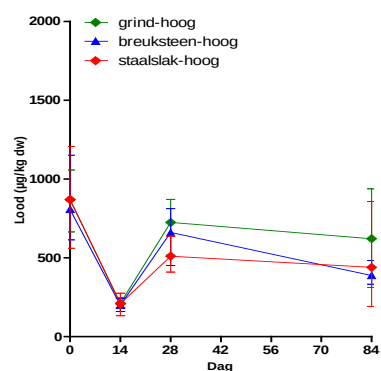
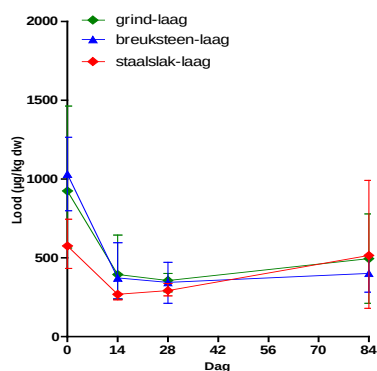
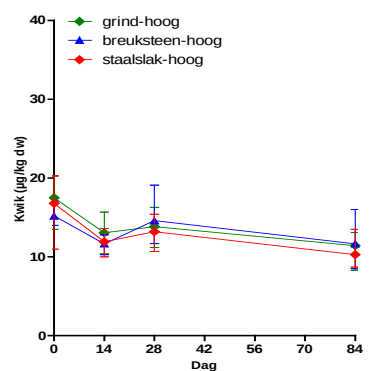
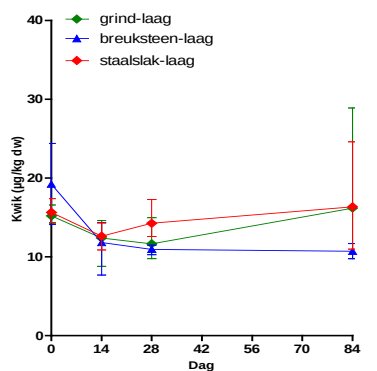
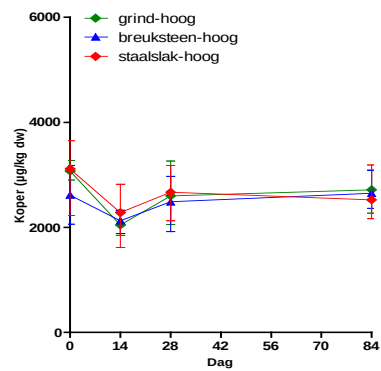
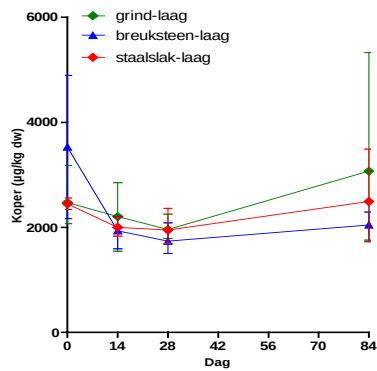
Metaal concentraties in zee-eik (3)



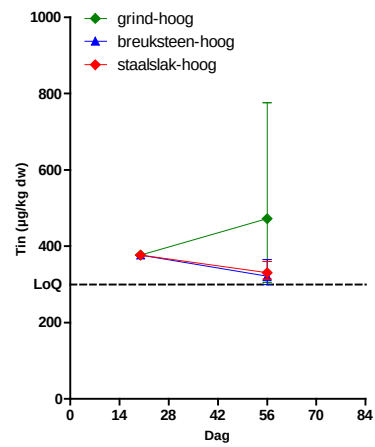
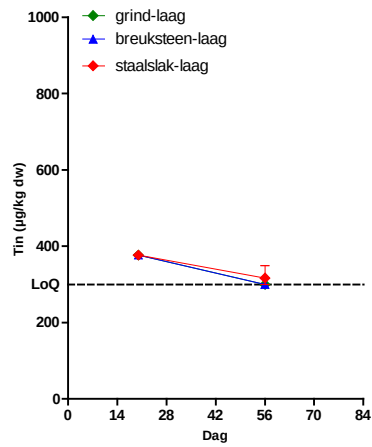
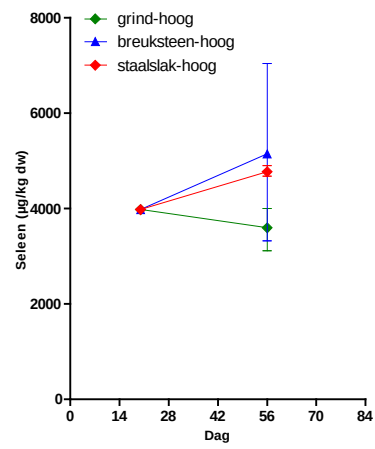
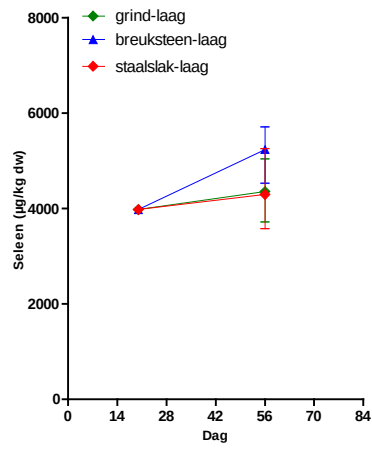
Metaalconcentraties in zee-eik (4)



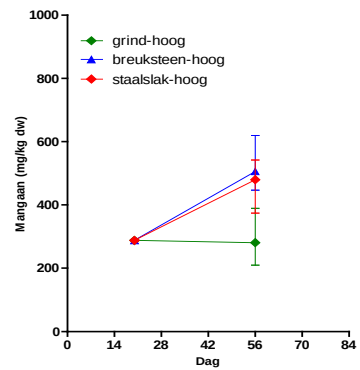
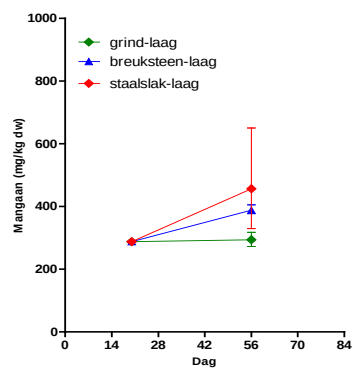
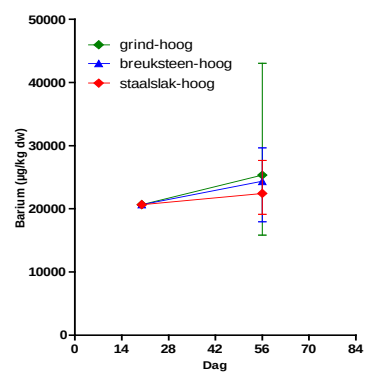
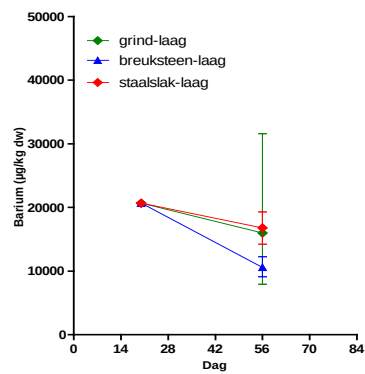
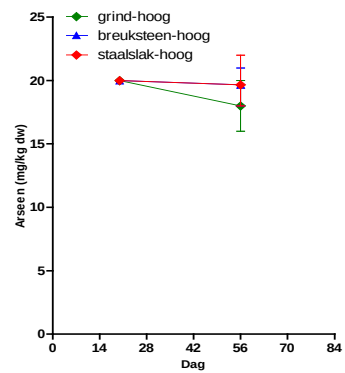
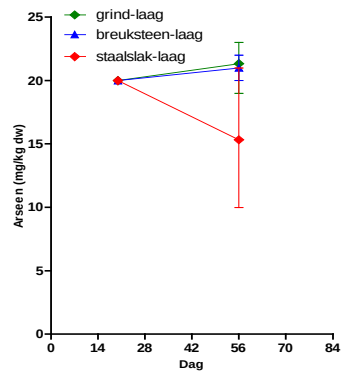
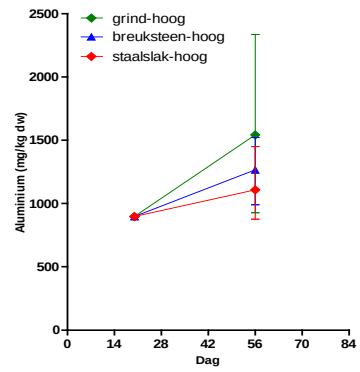
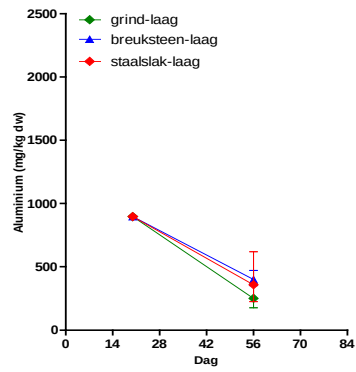
Metaalconcentraties in zee-eik (5)



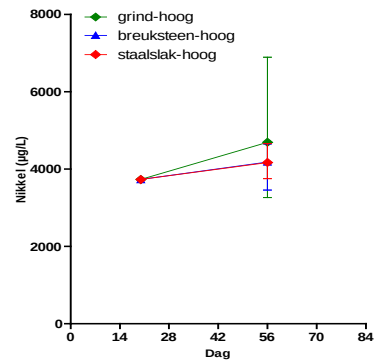
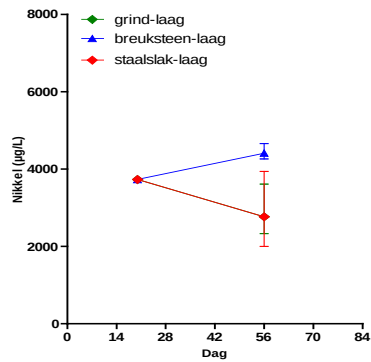
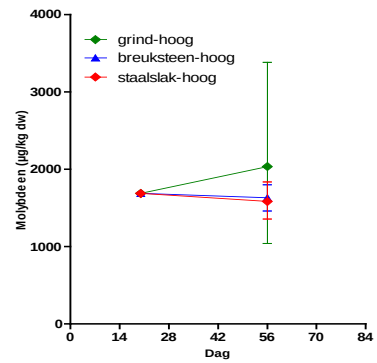
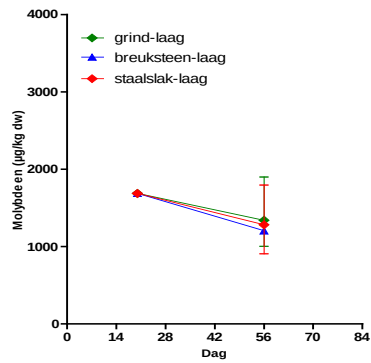
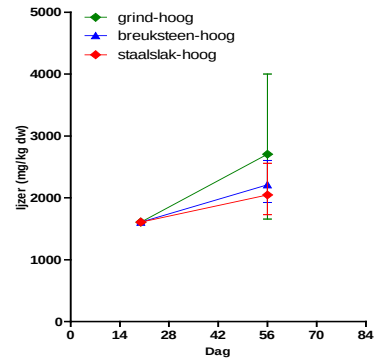
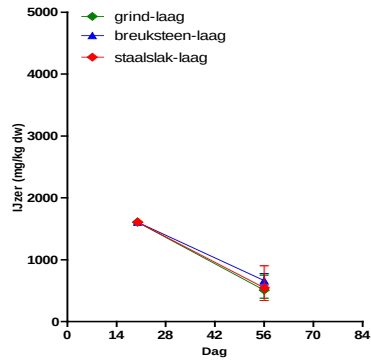
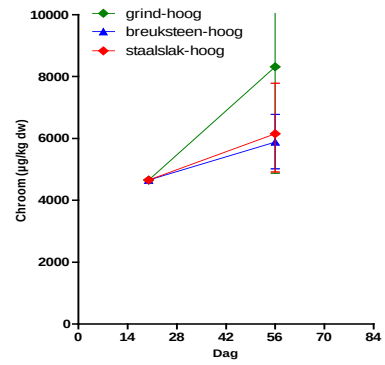
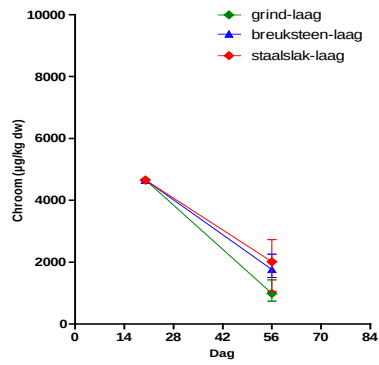
Bijlage 4 Metaalconcentraties in zakpijp



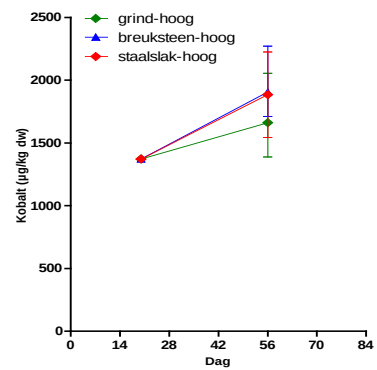
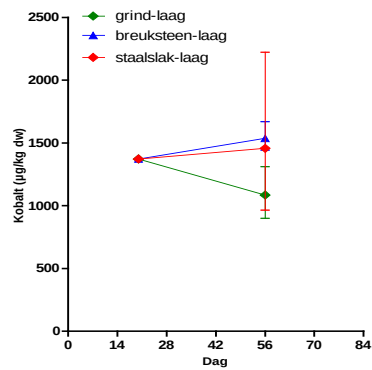
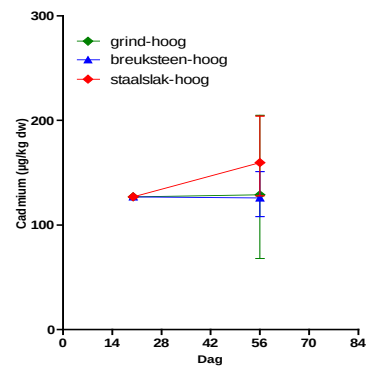
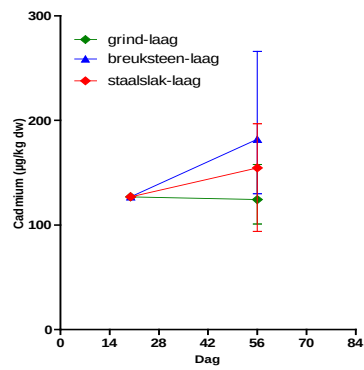
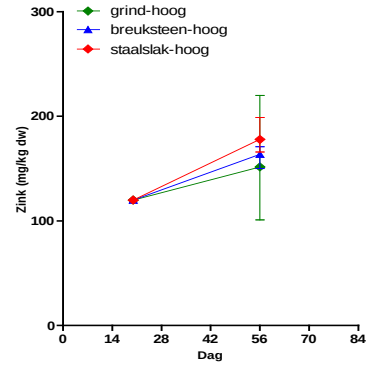
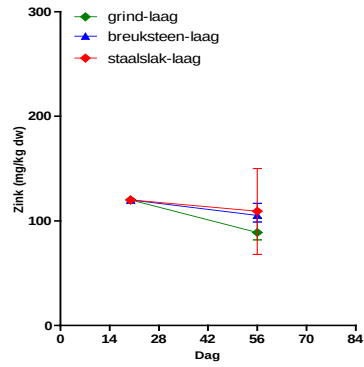
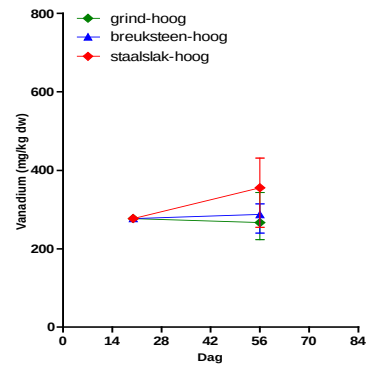
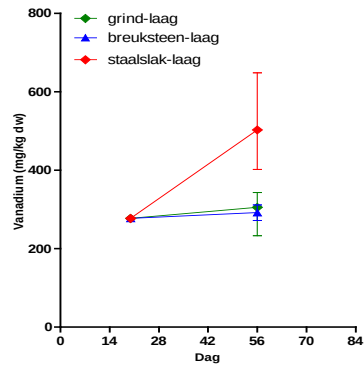
Metaalconcentraties in zakpijp (2)



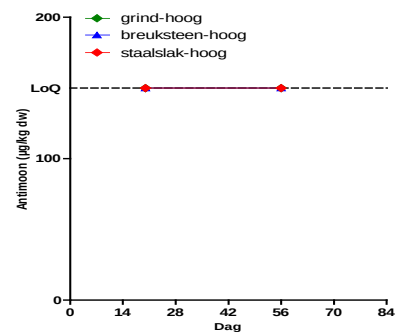
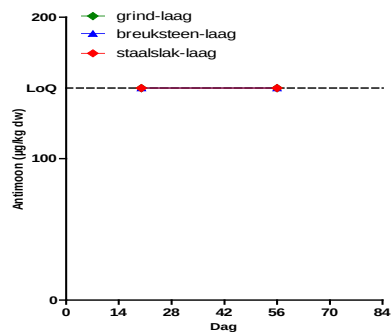
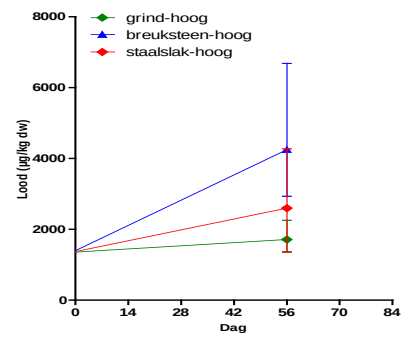
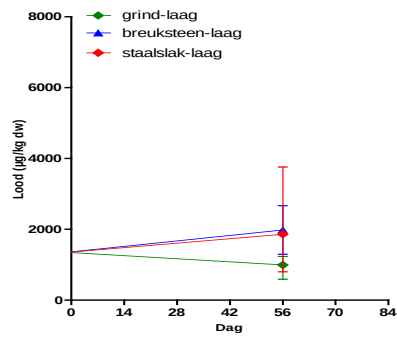
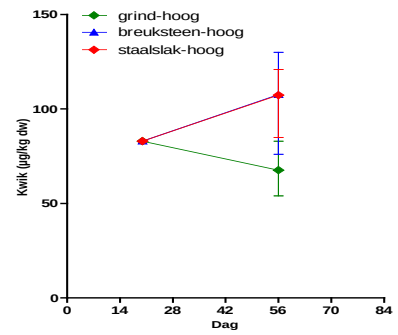
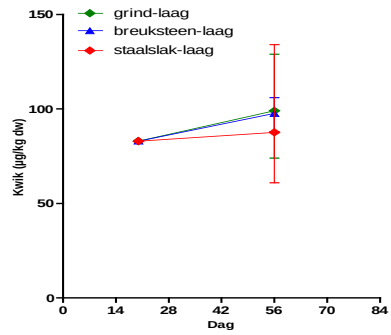
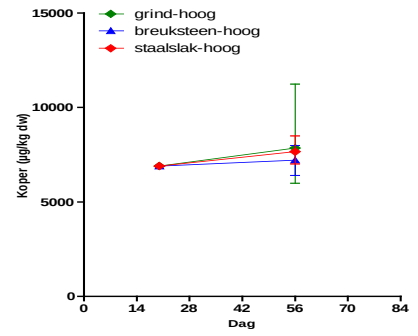
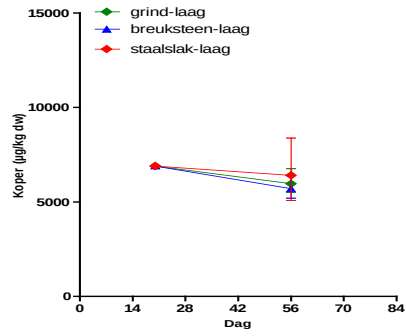
Metaalconcentraties in zakpijp (3)



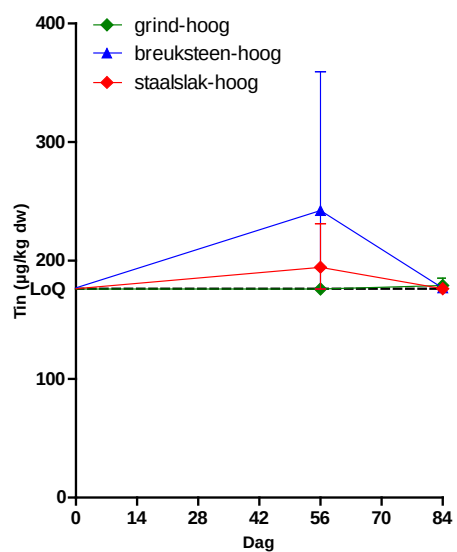
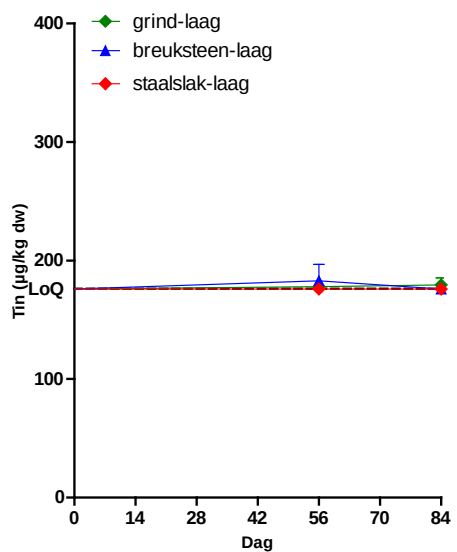
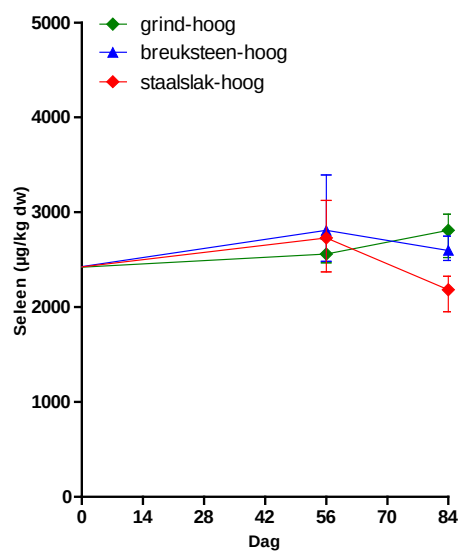
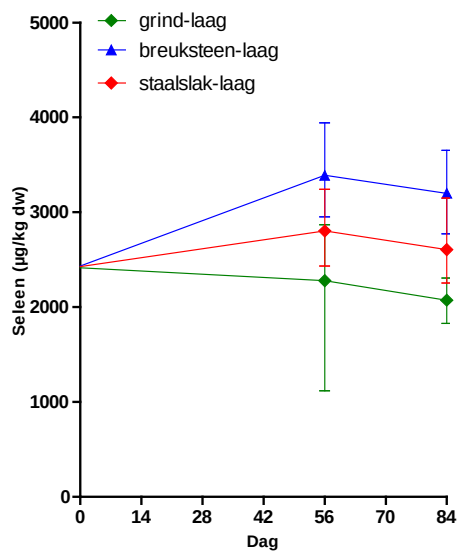
Metaalconcentraties in zakpijp (4)



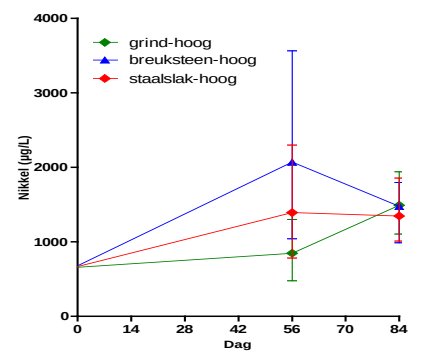
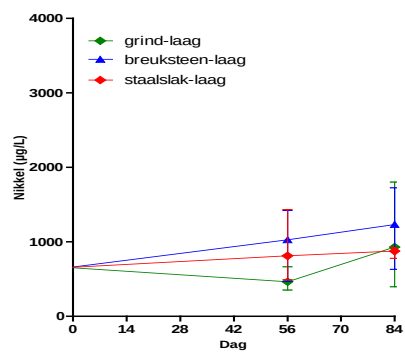
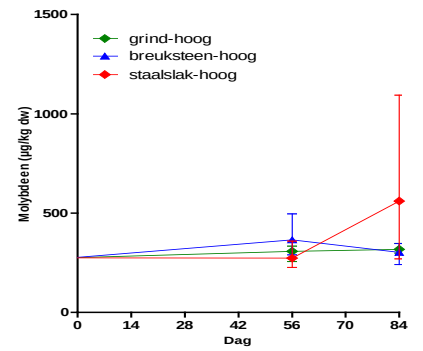
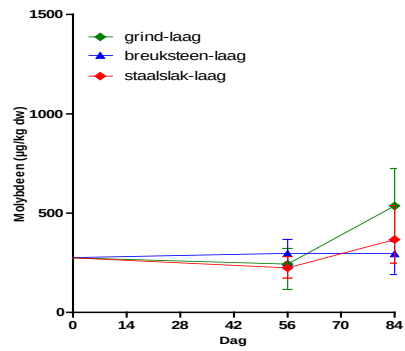
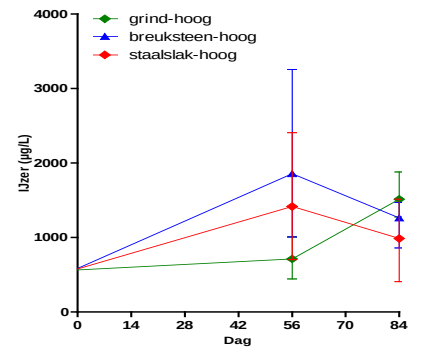
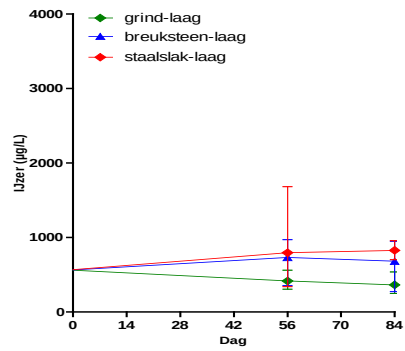
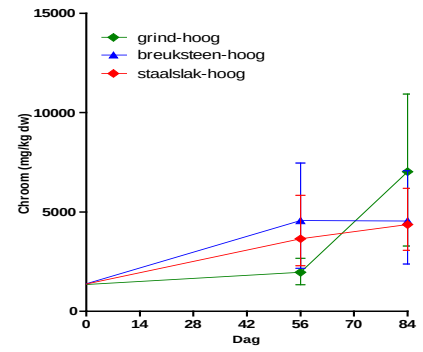
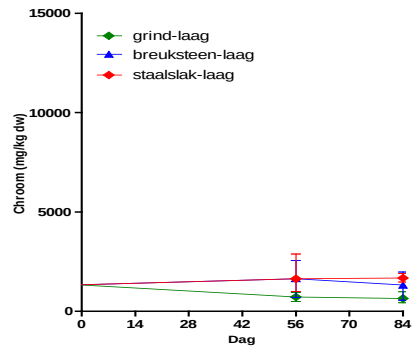
Metaalconcentraties in zakpijpen (5)



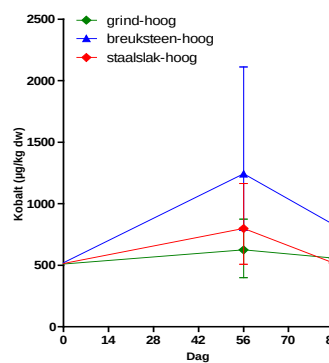
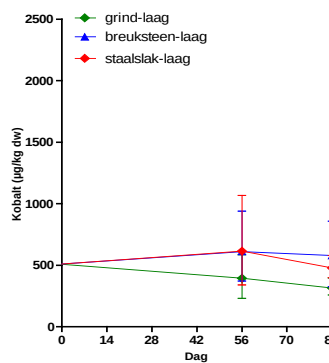
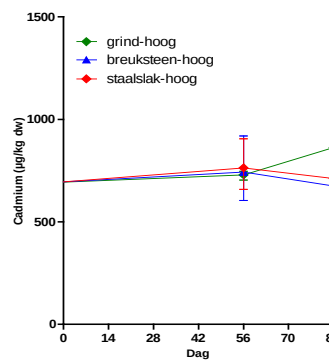
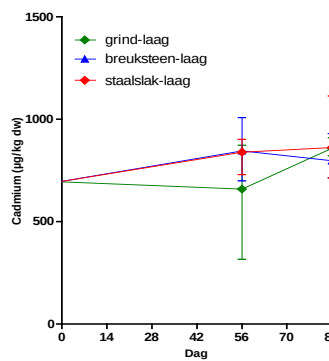
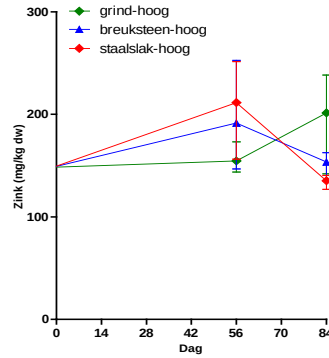
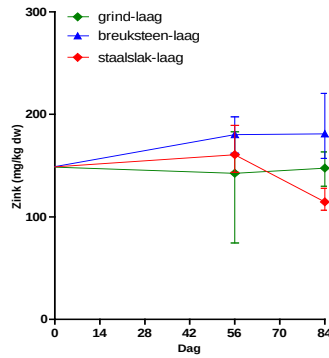
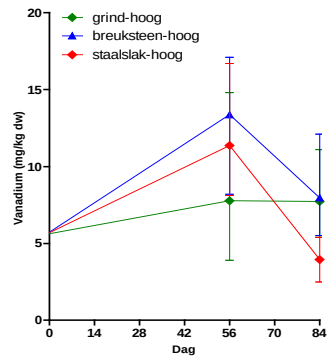
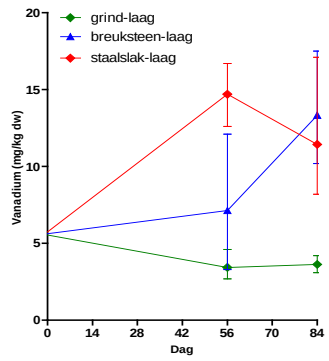
Bijlage 5 Metaalconcentraties in sponzen



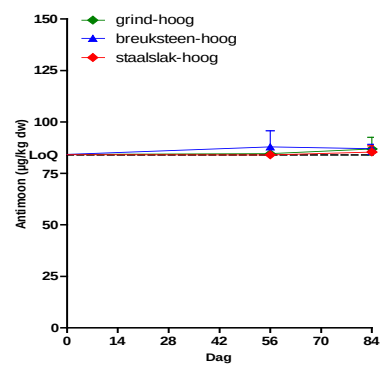
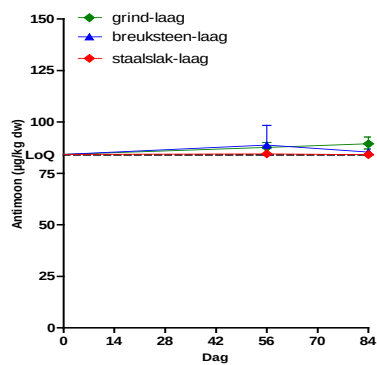
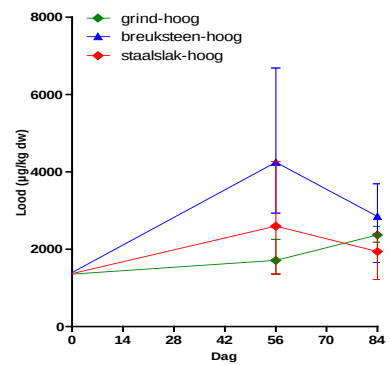
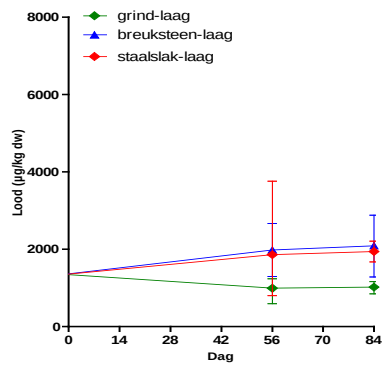
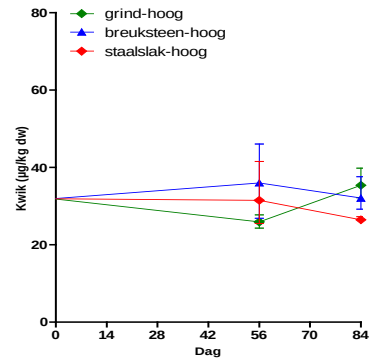
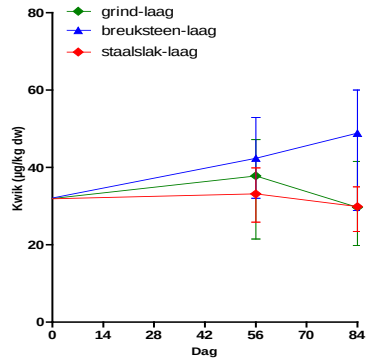
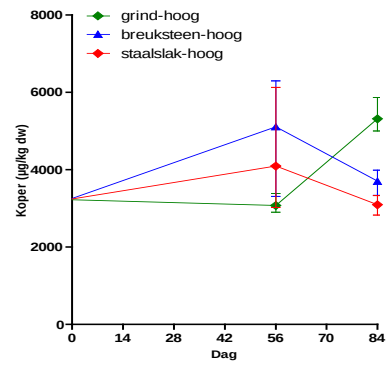
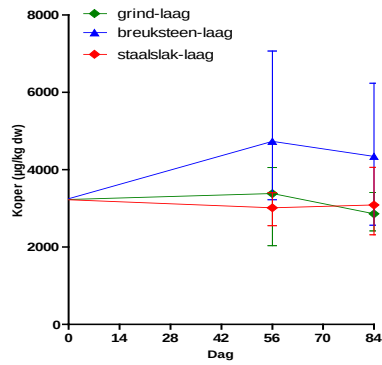
Metaalconcentraties in sponzen (2)



Metaalconcentraties in sponzen (3)



Metaalconcentraties in spozen (4)



Bijlage 6 Aanvullende uitloogstudie

Inleiding

Tijdens de eindbemonstering van de mesocosmstudie bleek een deel (naar schatting 20%) van de staalslakken na het verblijf van 12 weken in de mesocosms dooraderd te zijn met witte kalkaders en bij aanraking eenvoudig in kleinere stukken uiteen te vallen. Navraag bij de leverancier riep vragen op of de gebruikte partij wel representatief was voor de staalslakken die voor waterbouw gebruikt worden. Het was onduidelijk of de partij staalslakken wel voldoende verouderd en gezeefd was volgens de procedure als beschreven in paragraaf 5.1 van het hoofdrapport. Om de invloed hiervan op de testresultaten te onderzoeken is een aanvullende test uitgevoerd. Hierin is de uitloging vergeleken van metalen uit staalslakken zoals deze voor waterbouw worden toegepast en 'verse' slakken die deze behandeling (verouderen en zeven) niet hebben ondergaan.

De test werd uitgevoerd in 80 liter tanks met zeewater en 10% verversing per dag (gelijk aan de mesocosms met lage verversingssnelheid). Gedurende 8 weken werden de concentraties gevolgd in water en mosselen van dezelfde 18 metalen die in de mesocosms werden geanalyseerd.

Materiaal en methoden

Testmaterialen

De voor deze test gebruikte staalslakken werden bij IMARES afgeleverd op 17 dec 2015. Volgens opgave van de leverancier lag de productiedatum van de verouderde slakken ('waterbouw slakken') tussen eind 2013 en de eerste helft van 2014, en is deze partij in maart 2015 gezeefd over 32 mm, en daarna gereed zijn voor gebruik in waterbouw. De partij 'verse slakken' is geproduceerd vanaf midden 2015, en heeft geen verdere behandeling ondergaan. De materialen zijn bij IMARES binnen opgeslagen tot de eerste week van januari 2016 toen de test begon. Bij aanvang van de test was de leeftijd van de verse slakken dus 6-7 maanden, en van de waterbouwslakken 1.5-2 jaar.

Testsystemen

De test werd uitgevoerd in een klimaatkamer bij IMARES locatie Yerseke in 6 polyethyleen tanks met een diameter van ca 40 cm en een hoogte van ca. 80 cm. De tanks werden gevuld met 80 L gefiltreerd (zandfilter) Oosterschelde water waarvan continu ca 10% per dag werd ververst. De waterkolom werd continue belucht om gasuitwisseling en homogene menging te bevorderen. Bij aanvang van de studie op 5 januari 2016 werd in elke tank 10 'sinaasappelnetsjes' met elk 15 mosselen gehangen. Vervolgens werd in twee van de gevulde tanks 10 liter 'verse slakken' gestort en in 2 andere 10 liter 'waterbouw slakken'. In de resterende 2 tanks (controles) werd geen materiaal aangebracht.

Tweemaal per week werd aan elke tank een kleine hoeveelheid gekweekte microalgen (*Isochrysis* sp.) toegevoegd waardoor het chlorofylgehalte in de waterkolom tot ca. 10 µg/L werd verhoogd. Dit werd beschouwd als een minimale hoeveelheid die nodig was om verhongering van de mosselen te voorkomen.

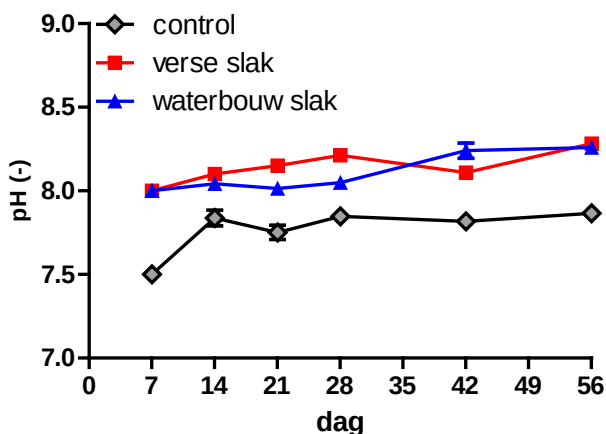
Bemonsteringen en analyses

Op dagen 7, 14, 28, 42 en 56 zijn water en mosselen verzameld ten bate van chemische analyses van de 18 elementen die ook in de mesocosmstudie zijn gevolgd. Op dezelfde dagen werd tevens temperatuur, saliniteit, pH en zuurstofgehalte van het water bepaald. De gehanteerde bemonsterings- en analysemethoden/-apparatuur waren gelijk aan de mesocosmstudie.

Resultaten

Waterparameters

De gemeten verversingssnelheid van het water in de tanks was 0.36 ± 0.03 liter per uur wat overeenkomt met 11% per dag. De saliniteit van het water varieerde tussen 33.9 en 34.3, het zuurstofpercentage tussen 88 en 100% verzadiging, en de temperatuur tussen 13 en 15°C. Deze waarden waren gelijk in alle vaten, ongeacht de behandeling. De pH was in de controle tanks zonder slakken lager (range 7.5-7.8) dan in de tanks met de slakken (range 8.0-8.3), maar vergelijkbaar voor beide typen slakken (Fig 2.1). Deze waarden zijn iets lager dan in de mesocosms werden gemeten, en waar de pH ook steeg onder invloed van primaire productie wat in de indoor proef niet noemenswaardig plaatsvond.



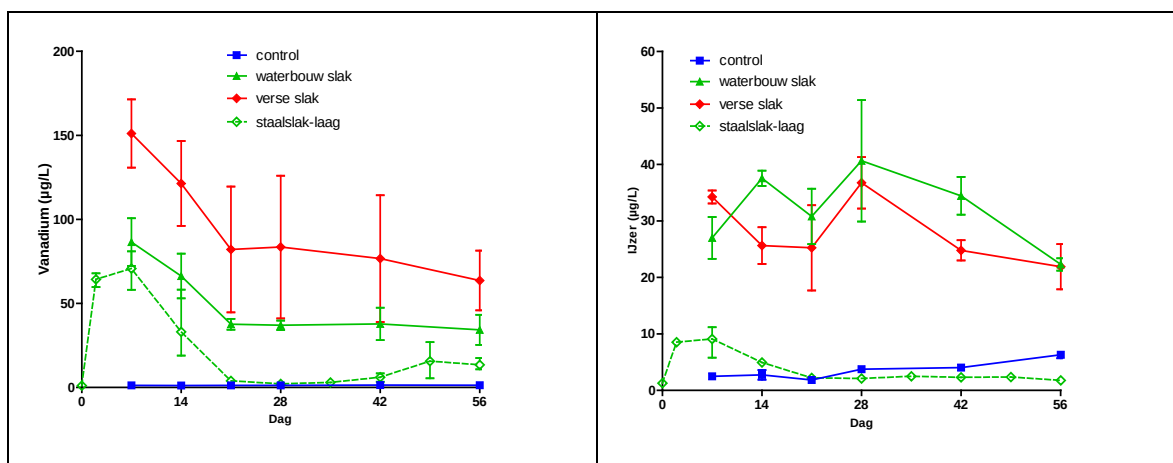
Figuur 2.1 pH in de vaten zonder slakken (controle) en met verse slakken en waterbouwslakken

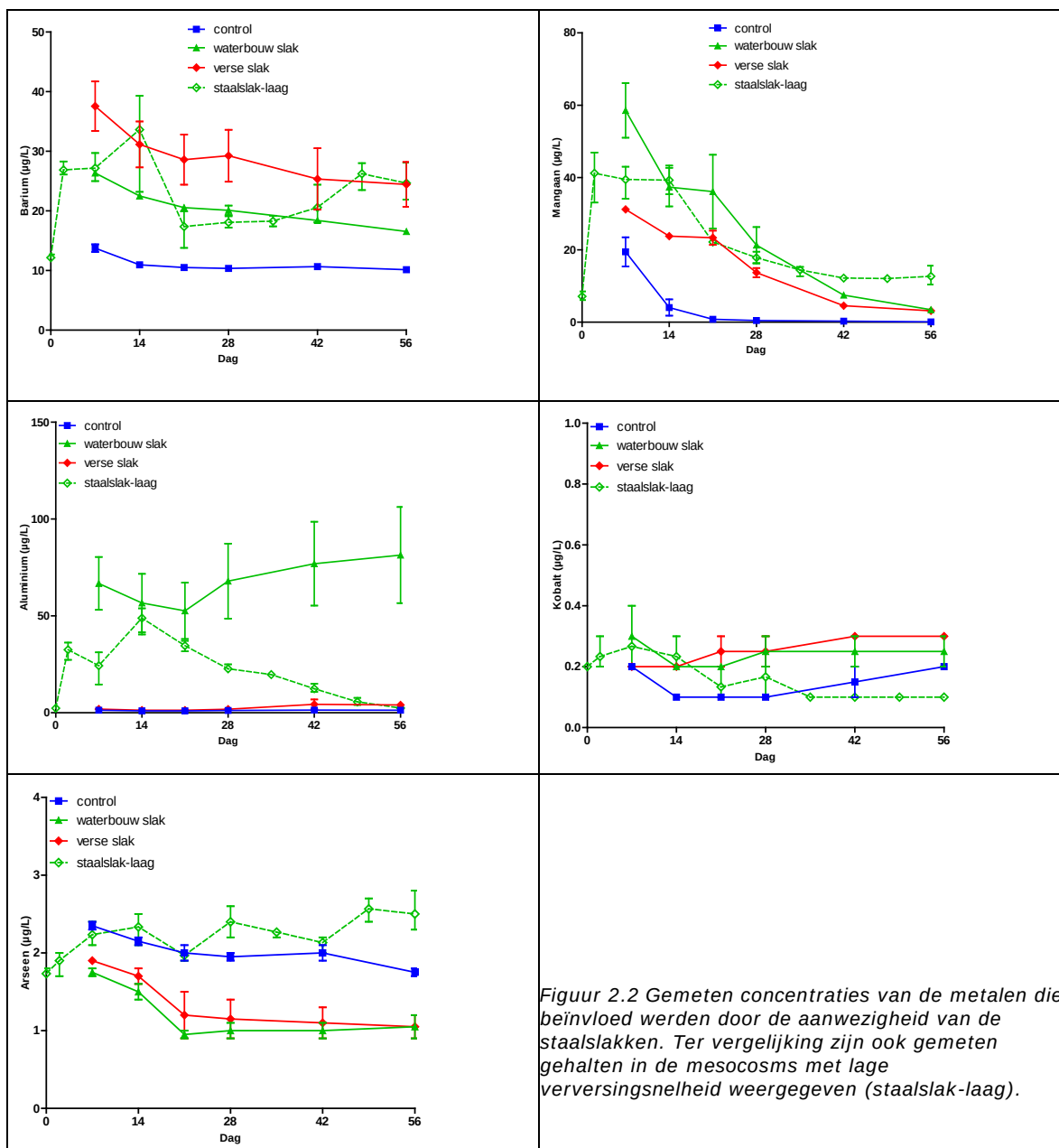
Metaalconcentraties in water

De gehalten van vanadium, ijzer, barium, mangaan, aluminium en kobalt waren significant hoger in het water van de tanks met staalslakken dan in controles (tabel. 2.1, figuur 2.2). De arseengehalten waren juist lager in de tanks met staalslakken. Voor de andere 9 metalen leidde de aanwezigheid van de staalslakken niet tot een significante verandering van de concentratie in de waterkolom. De concentraties vanadium en barium zijn gemiddeld iets hoger in tanks met verse slakken dan in de tanks met bouwslakken maar deze verschillen zijn niet statistisch significant. Alleen voor aluminium zijn significante verschillen gevonden tussen het water van met verse en waterbouwslakken. Opvallend genoeg loogt er duidelijk aluminium uit de waterbouwslakken terwijl dit in de verse slakken nauwelijks zichtbaar is. Voor de andere 15 elementen zijn er geen verschillen tussen de uitloging uit verse en bouwsteenslakken gevonden.

Tabel 2.1 Statistische significantie van de verschillen in concentraties van metalen in het water tijdens de aanvullende uitloogstudie. Van boven naar onder Controle (alleen zeewater) vs respectievelijk verse staalslakken en waterbouw. en verse vs waterbouw staalsakken. Tabel is beperkt tot de metalen die statistisch significante waarnemingen opleverden. Dit was niet het geval voor Cd, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, en Sn. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$; 'ns': niet significant.

control vs verse slak							
Dag	V	Fe	Ba	Mn	Al	Co	As
7	****	****	****	ns	ns	ns	ns
14	****	****	****	ns	ns	*	ns
21	****	****	****	***	ns	**	ns
28	****	****	****	***	ns	**	*
42	****	****	****	**	ns	*	*
56	****	***	****	****	ns	ns	ns
control vs waterbouw slak							
Dag	V	Fe	Ba	Mn	Al	Co	As
7	****	****	**	ns	****	ns	ns
14	****	****	***	*	****	*	ns
21	****	****	***	****	****	*	**
28	****	****	**	****	****	**	**
42	****	****	**	***	****	ns	**
56	****	***	*	****	****	ns	ns
verse slak vs waterbouw slak							
Dag	V	Fe	Ba	Mn	Al	Co	As
7	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns
14	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns
21	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns
28	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns
42	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns
56	ns	ns	ns	ns	****	ns	ns





Figuur 2.2 Gemeten concentraties van de metalen die beïnvloed werden door de aanwezigheid van de staalslakken. Ter vergelijking zijn ook gemeten gehalten in de mesocosms met lage verversingsnelheid weergegeven (staalslak-laag).

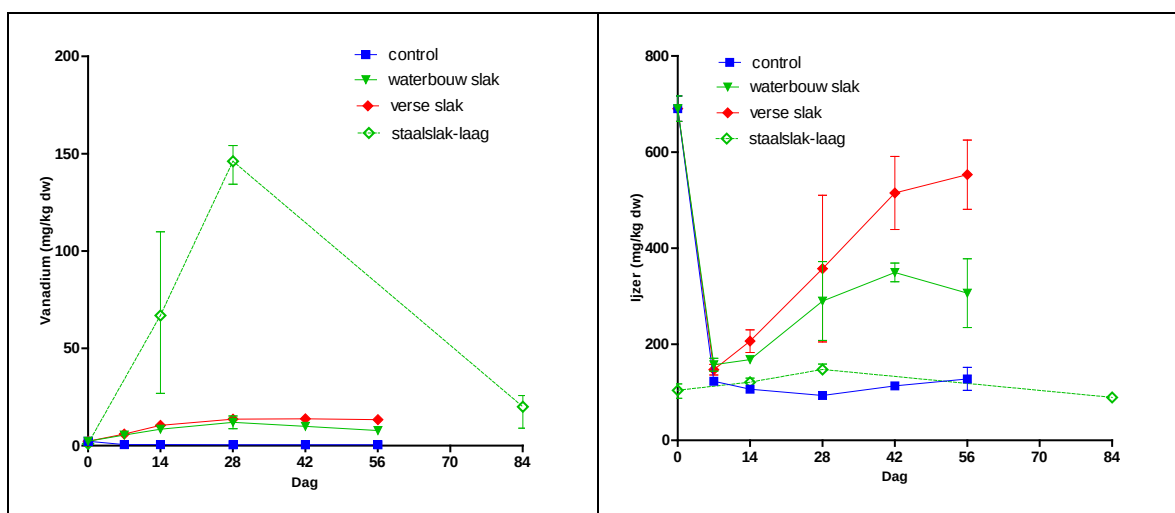
Metaalconcentraties in mosselen

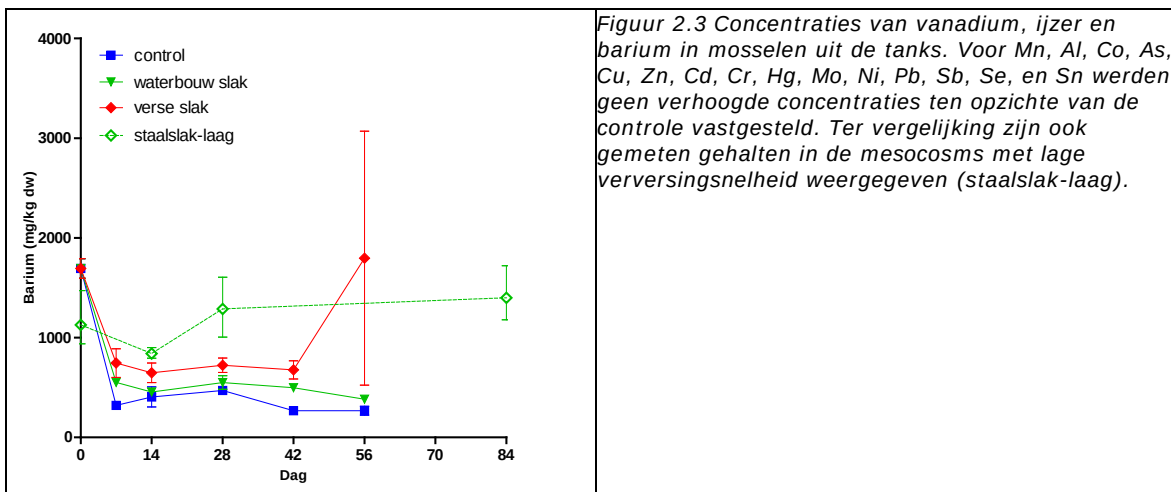
Voor vanadium en ijzer werd duidelijk accumulatie in het mosselweefsel aangetoond. In beide gevallen waren de concentraties hoger in de mosselen uit de tanks met verse slakken dan in de tanks met waterbouwslakken (Figuur 2.3). De verschillen tussen de typen slakken waren echter niet statistisch significant (Tabel 2.2). De accumulatiecurves vlakken zijn aan het eind van de test afgevlakt wat aangeeft dat langere blootstelling niet tot substantieel hogere concentraties in de mosselen zou hebben geleid.

Het bariumgehalte in de mosselen uit de tanks met verse slakken volgt geen duidelijke accumulatiecurve maar is toch significant verhoogd aan het eind van de blootstelling.

Table 2.2 Statistische significantie van de verschillen in concentraties van metalen in het mosselweefsel tijdens de aanvullende uitloogstudie. Van boven naar onder Controle (alleen zeewater) vs respectievelijk verse staalslakken en waterbouw. en verse vs waterbouw staalsakken. Tabel is beperkt tot de metalen die statistisch significante waarnemingen opleverden. Dit was niet het geval voor Mn, Al, Co, As, Cu, Zn, Cd, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, en Sn. '*': $p < 0.05$; '**': $p < 0.01$; '***': $p < 0.001$; 'ns': niet significant.

control vs verse slak			
	V	Fe	Ba
7	ns	ns	ns
14	****	ns	ns
21	****	ns	ns
28	****	***	ns
42	****	****	ns
56	****	****	**
control vs waterbouw slak			
	V	Fe	Ba
7	ns	ns	ns
14	****	ns	ns
21	****	ns	ns
28	****	**	ns
42	****	**	ns
56	****	*	ns
verse slak vs waterbouw slak			
	V	Fe	Ba
7	ns	ns	ns
14	ns	ns	ns
21	ns	ns	ns
28	ns	ns	ns
42	ns	ns	ns
56	ns	ns	*





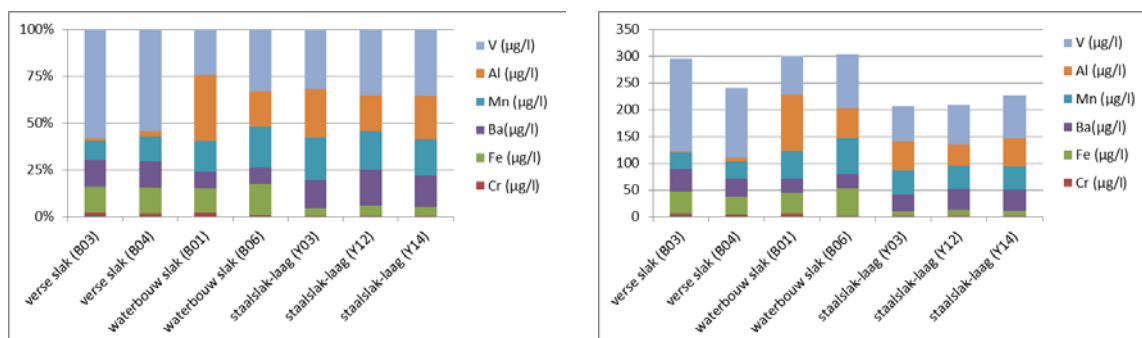
Vergelijking met mesocosmstudie

Het uitloogprofiel gebaseerd op de verhouding van de maximale concentraties van de belangrijkste uitloogende metalen toont grote overeenkomst tussen de staalslakken gebruikt in de mesocosmstudie en de waterbouw slakken in de aanvullende studie (Fig 2.4). Zowel relatief als absoluut zijn de gehalten ijzer lager in de mesocosms en van barium hoger. De verse slakken tonen een afwijkend patroon met nauwelijks uitloging van aluminium en een hogere uitloging van vanadium.

De concentraties van de relevante metalen in het water van de indoor tanks met waterbouwslakken en de mesocosms met lage waterverversing en staalslakken lagen in dezelfde orde van grootte. Alleen de ijzer- en aluminiumconcentraties waren in de indoor tanks iets hoger dan in de mesocosms (Figuur 2.2). In het geval van ijzer is dit mogelijk het gevolg van de opname van ijzer door de primaire producenten in de mesocosms, terwijl in de indoortanks van primaire productie nauwelijks of geen sprake zijn geweest. In het weefsel van de mosselen uit de indoor tanks worden ook hogere ijzerconcentraties gevonden dan in de mosselen uit de mesocosms staalslak-laag. Dit komt overeen met de hogere ijzer concentraties in het water van de indoor tanks.

Het hogere aluminiumgehalte in het water in de indoor tanks ten opzichte van de mesocosms laat zich lastig verklaren. De onverwachte waarneming dat aluminium juist wel uitloogt uit de verouderde waterbouwslakken maar nauwelijks uit de verse slakken duidt er wellicht op dat de uitloging van aluminium aan bijzondere factoren onderhevig is. Zowel in de mesocosms als in de indoorstudie blijft aluminium niet merkbaar te accumuleren in mosselen.

Voor barium en vanadium was de concentratie in de waterkolom in de indoor tanks min of meer vergelijkbaar met de staalslak-laag mesocosms. De gehalten in het mosselweefsel waren echter deze mesocosms duidelijk hoger. Dit duidt op een grotere biologische beschikbaarheid van deze metalen in de mesocosms. Mogelijk speelt opname via de voedselketen (algen) hierbij een rol. De algen die de mosselen in de indoor tanks kregen waren 'schoon' terwijl de mosselen in de mesocosms met lage verversingssnelheid zich moesten voeden met algen die in de mesocosms geproduceerd waren.



Figuur 2.4 Relatieve (links) en absolute (rechts) verhoudingen tussen de maximale gehalten van staalslak gerelateerde metalen gemeten in de waterkolom van de individuele indoor tanks (B03, B04, B01 en B06) en in de outdoor mesocosms met lage verversingssnelheid (Y03, Y12 en Y14).

Conclusie

Met uitzondering van de uitloging van aluminium dat nauwelijks vrijkomt uit de verse slakken en vanadium dat iets sterker uitloogt uit verse slakken zijn er weinig substantiële verschillen met betrekking tot de uitloging uit verse slakken de waterbouwslakken. Het uitloogprofiel van de in de mesocosms gebruikt slakken komt goed overeen met dat van de waterbouw slakken. Er zijn geen aanwijzingen dat de uitloging van de in de mesocosm studie gebruikte partij staalslakken niet representatief is voor de staalslakken die voor waterbouw worden toegepast. Er is dus ook geen reden om aan te nemen dat in de mesocosmstudie de effecten van uitlogende stoffen zijn onderschat. Voor barium en vanadium blijkt de biologische beschikbaarheid zelfs hoger in de mesocosms dan onder de minder natuurlijke condities in de indoor tanks.

Bijlage 7 Deltares Modelberekening



Memo

Aan
Edwin Foekema (Imares)

Datum
27 maart 2015

Aantal pagina's
5

Van
Frank Kleissen

Doorkiesnummer
+31(0)88335 8291

E-mail
frank.kleissen@deltares.nl

Onderwerp
Verduunningsberekeningen Oosterschelde

1 Inleiding

In opdracht van Imares, in de persoon van Edwin Foekema, heeft Deltares, met als Frank Kleissen als projectleider, berekeningen uitgevoerd met als doel om een inschatting te maken van verdunningen nabij de oever van de Oosterschelde (in een gebied 5m rondom een lozingspunt). Dit memo geeft een korte weergave van de uitgevoerde werkzaamheden en resultaat.

1.1 Achtergrond

De oorspronkelijke vraag zoals die door Imares is geformuleerd is: Wat zijn de mogelijkheden voor het maken van een inschatting van de verversingssnelheid van water langs een dijk in de Oosterschelde. Het gaat hierbij om het krijgen van een idee van de waterversing (bijv. % verversing per dag, maar mag ook per maand om getijde variatie te dempen) in een gebied binnen 5 meter langs een 'standaard/gemiddelde/representatieve' dijk in de Oosterschelde. Bij voorkeur op basis van een bij Rijkswaterstaat (RWS) bekend model.

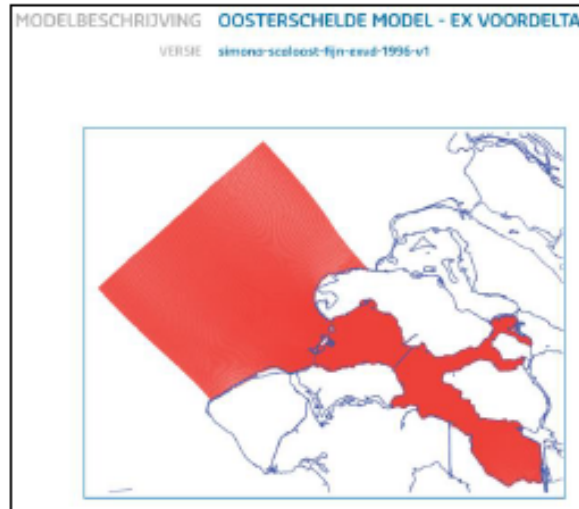
De resultaten van de berekeningen worden dan vervolgens gebruikt om in een tank een situatie na te bootsen die representatief is voor de situatie in de Oosterschelde. In deze tank bevinden zich staalslakken, zoals die wellicht in als dijkbescherming zullen worden toegepast, waaruit metalen kunnen uitlogen en in het water terecht kunnen komen. De verdunningsberekeningen leveren de informatie waarop het doorspoeldebiet in deze tank kan worden gebaseerd.

1.2 Aanpak

Deze studie heeft gebruik gemaakt van het 2-dimensionale hydrodynamische model Scalooost dat het deeltjes model Delft3D-PART aanstuurt. Part berekent de verspreiding van een geloosde stof. Uit de afname van de concentratie bij het lozingspunt kan dan een inschatting gemaakt worden van de lokale verblijftijd dat in dit geval gedefinieerd is als een gebied van ongeveer 5 meter, waarbinnen het lozingspunt zich bevindt.

1.2.1 Het Hydrodynamische model Scaloot

In deze studie is uitgegaan van een bestaand model dat door RWS is ontwikkeld: Het Oosterschelde model (Simona-Scaloot-fijn-1996-v1), zie Figuur 1.1., en dat bij Deltares in beheer is. RWS heeft toestemming gegeven voor het gebruik van dit model in deze studie.

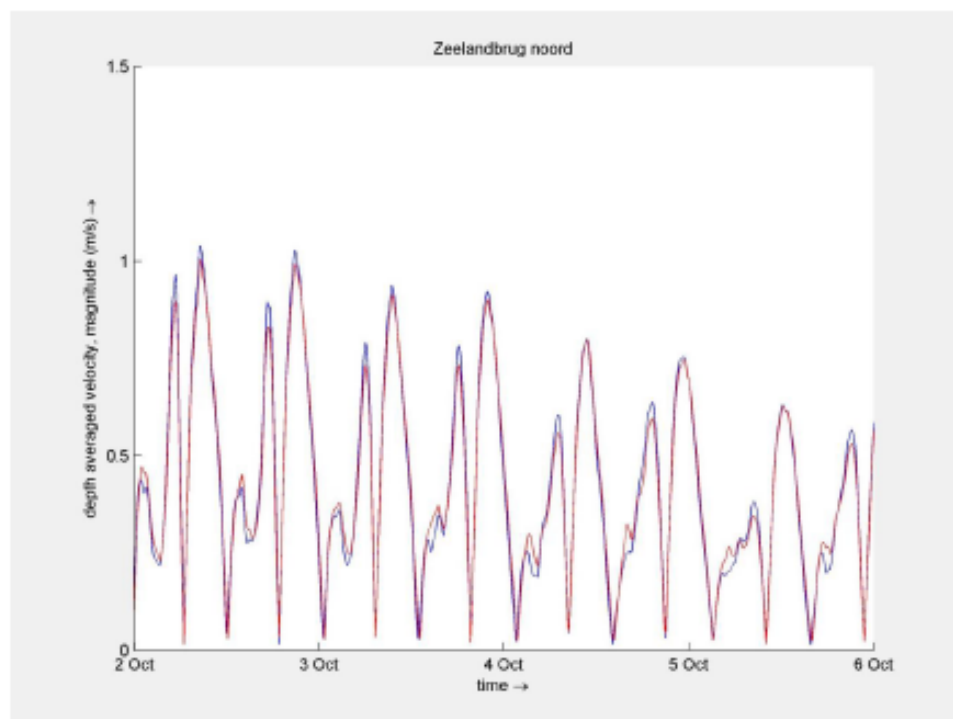


Figuur 1.1 Scaloot modelgrid

Het gebied dat door het model omvat wordt is de Oosterschelde en een gedeelte van de Nederlandse kust. Dit gedeelte loopt van de kop van Schouwen-Duiveland (Brouwersdam) tot de punt van Walcheren. In zeewaartse richting strekt het zich uit tot ongeveer 30 km uit de kust.

Dit 2-dimensionale model, dat in de Oosterschelde een resolutie heeft van ongeveer 50-100m, is voor deze studie toegepast voor een periode van 7 dagen, exclusief een aantal dagen dat als spin-up van het model wordt gebruikt zodat de effecten van de initiële condities niet langer significant zijn. De periode waarvoor is gekozen is 3 oktober tot 10 oktober 2014. Deze keuze is vrij arbitrair binnen de restrictie dat randvoorwaarden voor het model direct beschikbaar zijn en dat in deze periode de windopzet (meteorologische forcering) van beperkte invloed is op de waterbeweging in de Oosterschelde.

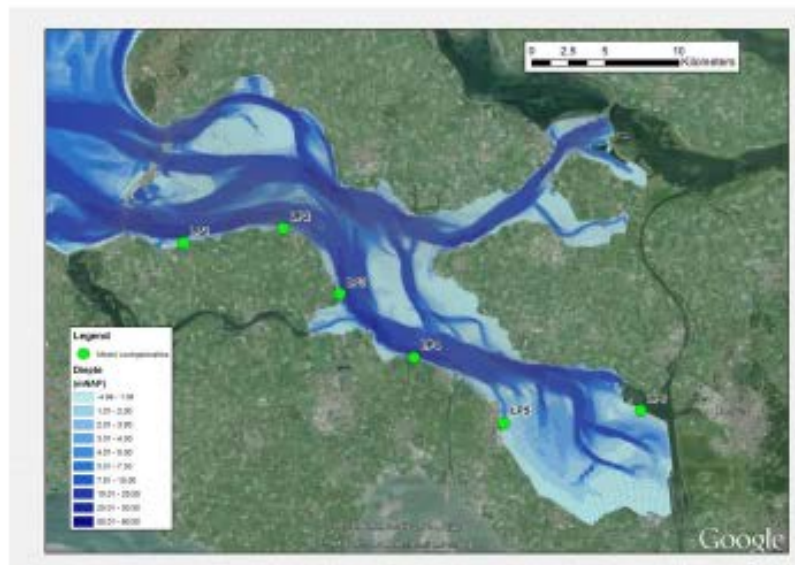
Het Scaloot model is beschikbaar als model opzet in het SIMONA modelsysteem, oftewel een WAQUA model, maar ook in een versie binnen het Delft3D systeem (Delft3D-FLOW). Omdat gekozen is voor een aanpak met het Delft3D-PART model en er geen goede koppeling tussen WAQUA en Delft3D-PART bestaat, is gekozen voor de Delft3D variant van het model. Het WAQUA model is het oorspronkelijke Oosterschelde model, terwijl Delft3D hiervan is afgeleid. Het Delft3D model bevat niet de effecten van een open Schelddekering die wel in WAQUA is opgenomen, maar de effecten op de snelheden in de Oosterschelde zijn relatief klein. Dit heeft vooral ook te maken met het feit dat dit een 2-Dimensionaal model is waarbij de snelheden al in de verticaal zijn geïntegreerd. Om dit te bevestigen is een vergelijking uitgevoerd tussen beide modellen en hieruit blijkt dat de verschillen vrij klein zijn en voor toepassing in deze studie acceptabel (Figuur 1.2), ook gezien de beperkingen en onzekerheden van de berekeningen.



Figuur 1.2 Vergelijking snelheden bij Zeelandbrug Noord tussen WAQUA (blauw) en Delft3D (rood)

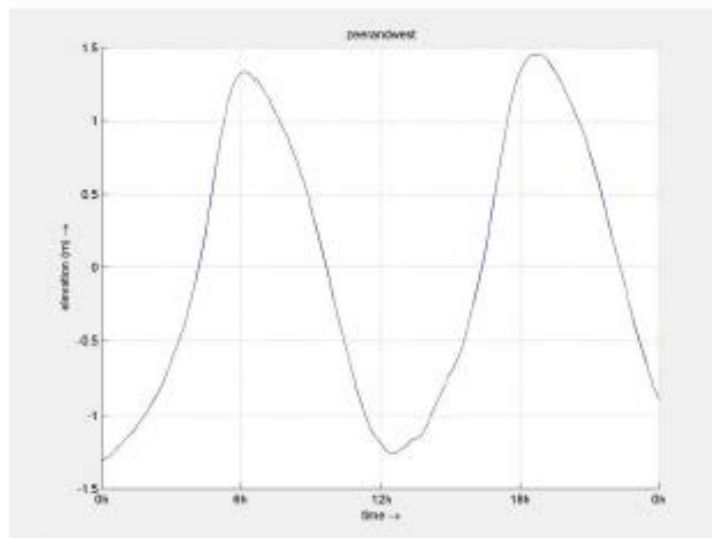
1.2.2 Het deeltjesmodel Delft3D-PART

In afwijking van onze offerte is in overleg besloten om niet de webapplicatie van de immissietoets (zie Helpdesk Water van RWS) te gebruiken, maar gebruik te maken van deeltjesmodellering met Delft3D-Part, waarbij de resultaten van het hydrodynamische model worden gebruikt voor de forcering van het advectief transport van de deeltjes in PART. Het grote voordeel van PART is dat het kan rekenen met een ruimtelijke resolutie die hoger is dan het onderliggende hydrodynamisch model. Verder geeft dit model een dynamische afname van de concentratie weer in tegenstelling tot het resultaat van de immissietoets dat een stationaire conditie berekent. Omdat het schattingen betreft zijn er voor een aantal (8) verschillende punten in de Oosterschelde lozingen gesimuleerd van een conservatieve stof (een tracer zonder afbraakprocessen), zie Figuur 1.3. De hoeveelheid instantaan geloosde stof is arbitrair gezet op 100 eenheden.



Figuur 1.3 Bathymetrie van het Scalost model en locaties van de in deze studie gebruikte lozingspunten

De instantane lozingen zijn ingebracht op een viertal momenten in een getij: laagwater (3 oktober 00:00uur), vloed (3 oktober 04:30uur), hoogwater (3 oktober 07:00uur) en eb (3 oktober 10:00uur), zie Figuur 1.4. Alle lozingen zijn verdeeld over de gehele lokale waterdiepte.



Figuur 1.4 Waterstand op de westelijke modelrand op 3 oktober

Datum
27 maart 2015

Pagina
5/5

Kopie aan
Arno Nolte