



Monitoring mosselsterfte in de Oosterschelde – Tussentijdse resultaten 2024

Eerste inzichten in temporele en ruimtelijke patronen van sterfte en mosselweerbaarheid

Auteur(s): Jildou Schotanus, Jacob Capelle, Sara Breunesse, Douwe van den Ende, Suzanne Cornelisse, Jesse van der Pool

Wageningen Marine Research
Rapport: C063/25

Monitoring mosselsterfte in de Oosterschelde – Tussentijdse resultaten 2024

Eerste inzichten in temporele en ruimtelijke patronen van sterfte en mosselweerbaarheid

Auteur(s): Jildou Schotanus, Jacob Capelle, Sara Breunese, Douwe van den Ende, Suzanne Cornelisse, Jesse van der Pool

Wageningen Marine Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Marine Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Marine en aquatische voedselproductie' (projectnummer BO-43-119.01-076)

Wageningen Marine Research
Yerseke, oktober 2025

Wageningen Marine Research rapport C063/25

Keywords: Mossel, sterfte, Oosterschelde, Conditie, Survival in Air

Opdrachtgever: LNVN

T.a.v.: Emil Kuijs
Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/701508>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

© Wageningen Marine Research

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

KvK nr. 09098104,
WMR BTW nr. NL 8065.11.618.B01.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

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

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	5
2 Kennisvraag	7
3 Methoden	8
3.1 Monitoringsprogramma	8
3.2 Monstername	8
3.3 Laboratorium	9
3.4 Analyse	9
3.4.1 Sterfte	10
3.4.2 Conditie-index (CI)	10
3.4.3 Survival in Air (SiA) en LT50	10
4 Resultaten	11
4.1 Perceelbemonsteringen	11
4.2 Conditie-index	17
4.3 Survival in Air (SiA) en LT50	18
5 Discussie	21
6 Dankwoord	24
7 Literatuur	25
8 Kwaliteitsborging	27
Verantwoording	28

Samenvatting

Massale mosselsterfte (Mass Mortality Events, MMEs) is een terugkerend fenomeen in de Oosterschelde. Sinds 2015 worden MMEs bij mosselen echter waargenomen zonder duidelijke oorzaak, met grootschalige sterfte in 2015-2016, 2019 en recent in 2023-2024. De massale mosselsterfte varieert sterk per locatie en jaar, wat leidt tot ecologische en economische zorgen.

Om meer inzicht te krijgen in de verspreiding en oorzaken van deze sterfte, is vanaf mei 2024 een maandelijks monitoringscampagne gestart. Dit rapport presenteert de eerste resultaten en toetst de volgende hypothesen:

1. Mosselsterfte varieert temporeel en ruimtelijk.
2. Conditie-index (CI) en de stress-test Survival in Air (SiA, LT50) voorspellen sterfte.
3. Mosselgrootte beïnvloedt sterftekans.

Uit de eerste analyses blijkt dat sterftepatronen sterk variëren in tijd en ruimte. In het voorjaar was de sterfte het hoogst in het midden van de Oosterschelde en verschoof later in het jaar naar het westen. In de noordtak was de sterfte over het algemeen lager, al zijn hier ook minder percelen in gebruik. Binnen deze deelgebieden (West, Midden, Noord) zijn verschillen tussen percelen waargenomen, perceellocaties met hoge sterfte konden hierbij direct naast perceellocaties met lage sterfte liggen.

De overlevingscurves voor Survival in Air (SiA) tonen significante verschillen in overlevingskansen van mosselen tussen regio's en tijdstippen, waarbij lagere SiA-waarden samenhangen met hogere sterfte op de percelen. Dit suggereert dat SiA een mogelijke indicator is voor de weerbaarheid van de populatie. Verwachte relaties met de conditie-index (CI) en LT50 werden echter niet bevestigd. Dit wijst erop dat mosselen plotseling kunnen sterven zonder duidelijk zichtbare verzwakking, en dat de conditie van de mosselen weinig invloed heeft op hun sterftekans. Dit komt overeen met waarnemingen van mosselkwekers die aangaven dat de mosselen kort voor hun sterfte nog voldoende vlees bevatten en er gezond uitzagen. De analyse van sterftepatronen kan helpen bij het koppelen van sterfte aan omgevingsfactoren zoals temperatuur of pathogenenbelasting.

Langjarige monitoring van mosselsterfte in de Oosterschelde is essentieel om natuurlijke variabiliteit van structurele trends te onderscheiden en onderliggende oorzaken, zoals milieufactoren of ziekten, beter te begrijpen. Toekomstige monitoring binnen het *PPS Onverklaarbare en Massale Sterfte in de Oosterschelde (OMASS)* richt zich op het verder koppelen van sterftepatronen aan omgevingsfactoren en het ontwikkelen van betrouwbaardere indicatoren voor mosselgezondheid. Daarnaast wordt aanbevolen om de invloed van mosseloorsprong, lokale variatie en aanvullende fysiologische metingen te onderzoeken.

1 Inleiding

Massale sterfte, ook bekend als Mass Mortality Events (MMEs), is een terugkerend fenomeen in de Oosterschelde. Door de jaren heen hebben zich meerdere sterftegolven onder de mosselpopulatie (*Mytilus edulis*) voorgedaan, met uiteenlopende oorzaken. Zo leidde de parasiet *Mytilicola intestinalis* in 1949-1950 tot een verlies van 80% van de mosselpopulatie (Korringa, 1968), en veroorzaakte een massale *Phaeocystis*-bloei in 2001 zuurstofloosheid, wat tot grootschalige sterfte leidde (Peperzak & Poelman, 2008). Sinds 2015 worden echter MMEs bij mosselen in de Oosterschelde waargenomen met onbekende oorzaak. In 2015-2016 liep de sterfte lokaal op tot 100% (Capelle et al., 2021). In de jaren daarna zijn vergelijkbare sterfte-incidenten gemeld, waaronder Oosterschelde breed in 2019 en recent in 2023-2024. De sterfte treft zowel wilde als gekweekte mosselen en vertoont grote variatie per locatie en jaar. Dit heeft geleid tot groeiende zorgen, zowel vanwege de ecologische impact als vanwege de economische schade.

Ondanks diverse studies is de oorzaak van de recente mosselsterfte tot op heden onbekend. Histologische analyses toonden geen bekende ziekteverwekkers aan, maar wel verhoogde aantallen granuloma's (ontstekingshaarden), wat zou kunnen duiden op chronische stress. De exacte oorzaak van het ontstaan van de granuloma's is nog onduidelijk. Ook onderzoek naar mogelijke omgevingsfactoren, zoals toxische stoffen uit staalslakken (Foekema et al., 2016; Escaravage & Kamermans, 2018) of temperatuurverandering door klimaatverandering (Capelle et al., 2021), leverde geen duidelijke aanknopingspunten op. Daarnaast werd in de afgelopen jaren de bacterie *Francisella haliotcida* in mosselen in de Oosterschelde aangetroffen, vooral tijdens MMEs. Bepaalde families van deze bacterie kunnen sterfte bij schelpdieren veroorzaken, maar de precieze rol van deze bacterie, (bijvoorbeeld, veroorzaker of opportunist) is nog onzeker (Charles et al., 2020c). Wat de sterfte nog complexer maakt, is de variabiliteit in tijd en ruimte. In 2015 was er sprake van meer dan gewone sterfte in het najaar en dit hield chronisch aan tot na de zomer van 2016, wat cumulatief tot forse verliezen leidde. In 2019 was het patroon anders, het beperkte zich tot een hoge sterftepiek in het voorjaar. Mosselen kwamen destijds verzwakt uit de winter, produceerden een hoge hoeveelheid gameten in het voorjaar en werden blootgesteld aan een *Phaeocystis*-bloei, mogelijk leidend tot voedselopnameproblemen en zuurstofloze condities. In het najaar van 2023 was opnieuw sprake van verhoogde sterfte, wat aanhield tot aan de zomer van 2024, een patroon dat lijkt op 2015-2016.

Vergelijkbare sterfteproblemen worden ook in andere mosselkweekgebieden gerapporteerd. In Frankrijk, waar sinds 2014 grootschalige mosselsterfte optreedt, hebben MMEs geleid tot sterftepercentages tot 90%, met ernstige gevolgen voor de mosselindustrie (Polsenaere et al., 2017; Charles et al., 2020a; Lupo et al., 2021). Daar zijn verschillende ziekten in verband gebracht met MMEs, waaronder neoplasie, en ongecontroleerde celgroei die leidt tot tumorvorming in weefsels (Benabdelmouna & Ledu, 2016), en pathogene bacteriën zoals *Vibrio splendidus* (Ben Cheikh et al., 2017; Charles et al., 2020b) en *Francisella haliotcida* (Charles et al., 2020c; Bouras et al., 2023). Tot op heden is echter geen enkel onderzoek erin geslaagd een directe oorzaak-gevolgrelatie aan te tonen, hoewel histologische waarnemingen wijzen op de mogelijke betrokkenheid van virussen of bacteriën (Benabdelmouna et al., 2018; Charles et al., 2020c; Ajithkumar et al., 2025). Neoplasie lijkt in ieder geval in Nederland niet wijdverspreid voor te komen (Jansen et al., 2019).

Al met al is het waarschijnlijk dat meerdere factoren bijdragen aan de sterfte, waarbij hun cumulatieve effect uiteindelijk tot massale sterfte kan leiden (Lupo et al., 2021). Mosselen lijken minder weerbaar dan voorheen, en een opeenstapeling van stressoren resulteert uiteindelijk in grootschalige sterfte, een fenomeen dat door Charles et al., 2020a wordt aangeduid als het "mortality window". Externe factoren die hier bij een rol zouden kunnen spelen zijn bijvoorbeeld toxische stoffen, factoren die onder invloed staan van klimaatverandering, zoals algensamenstelling, zoutgehalte en temperatuur, en ziekteverwekkers. Ook mosselkenmerken zoals grootte, conditie-index en genetische achtergrond, eveneens als stressoren in de kweekcyclus zouden een rol kunnen spelen. Ondanks eerdere studies blijft het onduidelijk hoe de verschillende factoren bijdragen aan de sterfte en welke combinaties van verschillende stressoren mogelijk

samen een drempelwaarde kunnen overschrijden (Lupo et al., 2021). Dit gebrek aan kennis belemmert zowel preventieve maatregelen als effectieve beleidsontwikkeling voor de mosselsector.

Als reactie op recente sterfte-incidenten in de Oosterschelde is in mei 2024 een uitgebreide maandelijkse monitoringscampagne gestart. Het doel van deze campagne is om inzicht te krijgen in de temporele en ruimtelijke variatie in mosselsterfte en mosselweerbaarheid op de verschillende mosselpercelen in de Oosterschelde. Door maandelijks op meerdere locaties te monitoren, hopen we beter te begrijpen hoe de sterfte zich in de tijd ontwikkelt, hoe deze ruimtelijk verspreid is en in hoeverre dit samenhangt met de algehele conditie en weerbaarheid van de mosselen. Daarnaast fungeert de monitoring als een “vinger aan de pols”, waarmee we vroegtijdig kunnen signaleren of er sprake is van meer dan normale sterfte en hier tijdig op kunnen inspelen.

Op deze manier hopen we gerichtere hypothesen te formuleren over de mogelijke oorzaak van de sterfte en te onderzoeken of de algemene conditie en weerbaarheid van de mosselen als voorspeller kan dienen voor toekomstige sterfte. Dit rapport presenteert de voorlopige resultaten van de monitoring in 2024, als onderdeel van een meerjarig onderzoek dat loopt tot 2029 en dat wordt gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN). Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is om de onderliggende oorzaken van de massale sterftegebeurtenissen te identificeren. Op basis hiervan kunnen sectoren risico's beter inschatten en hierop anticiperen, en kan beleid worden ontwikkeld om de mosselsector weerbaarder maken.

2 Kennisvraag

De monitoringscampagne, gestart in mei 2024, heeft als doel meer inzicht te krijgen in de temporele en ruimtelijke variatie in mosselsterfte op mosselpercelen in de Oosterschelde. Door maandelijkse monitoring van mosselen op mosselpercelen verspreidt over de Oosterschelde willen we beter begrijpen hoe de sterfte zich over tijd ontwikkelt, hoe deze geografisch is verdeeld en in welke mate dit verband houdt met de algehele conditie en weerbaarheid van de mosselen.

In dit rapport toetsen we een aantal hypothesen:

- 1) Mosselsterfte varieert temporeel en ruimtelijk.
- 2) Conditie-index (CI) voorspelt sterfte: Verwacht wordt dat sterftekans hoger is voor mosselen in een minder goede conditie.
- 3) De stress-test Survival in Air (SiA), voorspelt sterfte: Verwacht wordt dat een lage LT50 (Lethal Time 50%, tijd waarop 50% van de mosselen die aan drooglegging werden blootgesteld dood waren) een indicator zal zijn voor verhoogde sterfte
- 4) Mosselgrootte beïnvloedt sterftekans: verwacht wordt dat grotere mosselen een andere sterftepatroon vertonen dan kleinere mosselen.

3 Methoden

3.1 Monitoringsprogramma

In 2024 zijn van mei tot en met december maandelijks monsters genomen op circa 25 mosselpercelen verspreid over de Oosterschelde. Deze bemonstering vond plaats in samenwerking met de mosselsector en visserijkundige ambtenaren van het RVO. De geselecteerde percelen waren zo veel mogelijk gespreid over de Oosterschelde, met meer monsterpunten op locaties waar meer gekweekt werd, de monsternamen representeert daarmee de kweekpraktijk. Er werd ook gestreefd naar een representatieve doorsnede van de kweekpraktijk, met betrekking tot variabelen zoals de oorsprong en grootte van de mosselen, en omgevingsfactoren zoals diepte. De bemonstering op elk perceel werd maandelijks herhaald, zolang er voldoende mosselen aanwezig waren. Indien mosselen door sterfte of wegvissen door de kweker onvoldoende beschikbaar waren, werd een nabijgelegen perceel van eventueel een andere kweker in het onderzoek opgenomen. In totaal zijn er 50 verschillende percelen bemonsterd, met een grote variatie in monsterringfrequentie. Vanwege de privacyregels benoemen we in dit rapport niet welke percelen we precies hebben bemonsterd.

3.2 Monsternamen

Op elke bemonsterde locatie zijn de details van het perceel en de mosselen zorgvuldig geregistreerd. Vervolgens werd op elk perceel een korte trek van circa 30 meter uitgevoerd met een onderzoekskor¹. Hierbij werden de vulling van de kor en eventuele bijzonderheden, zoals de aanwezigheid van zeesterren, wieren of stank, gedocumenteerd. Uit de vangst werd een representatief monster van de mosselen genomen van 880 ml. Binnen elk monster zijn zowel levende als dode mosselen geteld. Hierbij werden de dode mosselen verdeeld in drie categorieën, namelijk 1) verse dode mosselen, 2) recent dode mosselen, 3) oude dode mosselen (zie **Tabel 1**). Waar mogelijk werden minstens 60 levende mosselen naar het laboratorium gebracht voor verdere analyses.

Tabel 1 Gehanteerde categorieën dode mosselen bij monsternamen in het veld

Categorie	Indicatie voor:	Parameter	
Verse dode mosselen; Dode mosselen met vleesresten in de schelpen	Acute sterfte	Percentage ten opzichte van de levende mosselen in het monster	

¹ Deze heeft een mesbreedte van 1 meter en is daarmee een stuk kleiner dan de korren die in de mosselkweek gebruikt worden (mesbreedte van ca. 2 meter).

Recent dode mosselen; Dode mosselen waarbij beide schelphelften nog aan elkaar vastzitten.	Recente sterfte	Percentage ten opzichte van het totaal (levende mosselen + oude en verse peulen)	
Oude dode mosselen; Losse schelphelften, of delen hiervan (met onderkant intact) waarbij het totaal aan schelphelften door 2 is gedeeld	Sterfte van langer geleden	Percentage ten opzichte van het totaal (levende mosselen + oude en verse peulen)	

3.3 Laboratorium

In het laboratorium werd van 30 mosselen de gemiddelde lengte (cm, L) en het drooggewicht (mg, DW) en as-vrij drooggewicht (mg, AFDW) van het vlees bepaald. Hiermee kan de ontwikkeling in conditie over de tijd worden bijgehouden. De Conditie Index (CI) werd berekend als: $AFDW/L^3$. De Conditie Index (CI) is een veelgebruikte maat om de gezondheidstoestand van een mossel te evalueren. Het geeft een indicatie van de hoeveelheid beschikbare lichaamsreserves ten opzichte van de schelpgrootte en wordt vaak gebruikt om de voedingsstatus en fysiologische conditie van tweekleppigen te monitoren (Filgueira et al., 2013).

De overige 30 mosselen werden gebruikt om de Survival in Air (SiA) te bepalen. In deze stress-test wordt het overlevingspercentage van mosselen gedurende een periode van droogstand onderzocht. Droogstand is een stressor voor mosselen. De test onderzoekt in hoeverre mosselen bestand zijn tegen cumulatieve stress: verzwakte individuen, bijvoorbeeld door eerdere blootstelling aan stress, worden verondersteld minder lang droogstand te overleven en sterven dus eerder. Tijdens deze test bepalen we voor alle mosselen, 30 per perceel, hoeveel uren het duurt voordat er sterfte optreedt. Daarnaast bepalen we ook de LT50 (Lethal Time 50%), wat het moment aangeeft waarop 50% sterfte optreedt. Dit is een maat voor de weerbaarheid van de mosselen. Hoe hoger deze LT50 hoe weerbaarder, of stressbestendiger de mosselen zouden moeten zijn. Om te bepalen of er een verband was tussen het moment waarop de mossel dood ging en de grootte van een mossel, werd de lengte van elke mossel opgeschreven nadat een mossel dood was.

3.4 Analyse

Voor de ruimtelijke en temporele analyse is de Oosterschelde opgedeeld in drie gebieden: West, Midden, Noord. Hoewel deze indeling relatief grof is, maakt het een toetsing mogelijk van de hypothese van mosselkwekers dat de sterfte in de noordtak lager was en dat in mei de sterfte met name hoog was in het Midden. Daarnaast zijn niet continue dezelfde percelen bemonsterd, waardoor er geen overlevingsanalyse per perceel kan worden uitgevoerd. Door percelen te groeperen kan dit wel per deelgebied.

3.4.1 Sterfte

Om de sterfte van mosselen te analyseren in relatie tot monsterdatum en gebied (West, Midden, Noord), werd een quasibinomiaal Generalized Linear Model (GLM) toegepast. Dit model is geschikt voor proportionele data met overdispersie, waarbij de variantie groter is dan verwacht op basis van een standaard binomiale verdeling. Het model beschrijft hoe de kans op sterfte (uitgedrukt als het totale aantal dode mosselen, inclusief oude, nieuwe en verse sterfte) varieert per monsterdatum en gebied en of er significante interacties tussen deze factoren aanwezig zijn.

3.4.2 Conditie-index (CI)

Om te bepalen of de Condition Index (CI) significant varieerde tussen verschillende monsterdatums en gebieden (West, Midden, Noord), werd een ANOVA uitgevoerd. Voorafgaand hieraan werd de normaliteit van de CI-waarden beoordeeld met een Shapiro-Wilk test, aangevuld met een visuele inspectie via een histogram en een Q-Q plot. Daarnaast werd de normaliteit per maand afzonderlijk gecontroleerd met een Shapiro-Wilk test per datumgroep. Aangezien de CI een maat is voor de gezondheid van mosselen, werd tevens geanalyseerd of er een correlatie bestond tussen de gemiddelde CI en het aantal recent dode mosselen per perceel.

3.4.3 Survival in Air (SiA) en LT50

Als maat voor de weerbaarheid en gezondheid van de mosselen hebben we onderzocht hoe goed de mosselen van verschillende percelen droogstand overleefden (SiA). Hiervoor hebben we maandelijks een overlevingsanalyse uitgevoerd om de overleving van mosselen, blootgesteld aan lucht, over tijd tussen de percelen te vergelijken. De metingen zijn geanalyseerd tot en met september, omdat in de latere maanden veel meetfouten optraden. Normaal gesproken openen mosselen hun kleppen als ze dood zijn, maar in de wintermaanden leek dit niet altijd het geval te zijn, wat de betrouwbaarheid van de metingen beïnvloedde.

Een Kaplan-Meier overlevingsanalyse is uitgevoerd om de overlevingskansen tussen verschillende percelen en deelgebieden te vergelijken, gevolgd door een log-rank test om statistische verschillen in overlevingspatronen te bepalen. Voor de analyse van LT50 (de tijd waarbij 50% van de mosselen dood gaat) werd een Negative Binomial Generalized Linear Model (GLM) gebruikt, waarbij datum en locatie als verklarende variabelen en hun interactie werden meegenomen. Aangezien de LT50 een indicator is voor de gezondheid van een mossel, werd ook onderzocht of er een correlatie bestond tussen de gemiddelde LT50 en het aantal recent gestorven mosselen per perceel. Daarnaast werd gekeken of er een effect is van mosselgrootte door te testen of er een significante correlatie was tussen het aantal uren tot sterfte en de lengte van een mossel.

4 Resultaten

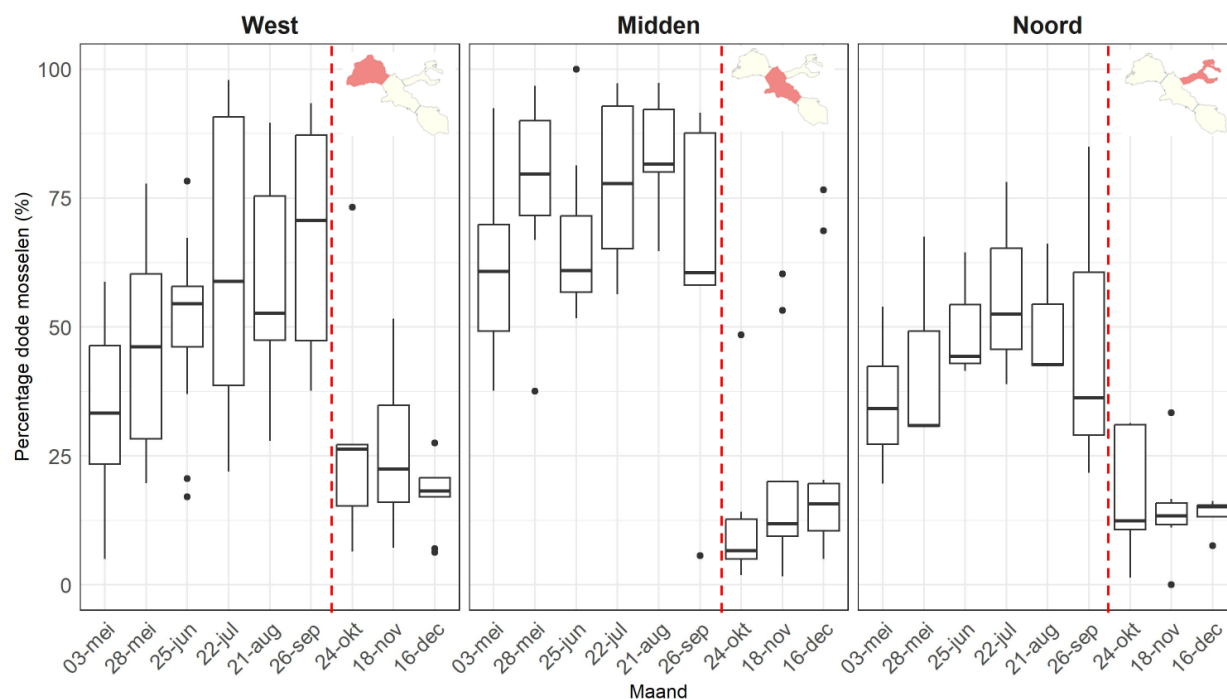
4.1 Perceelbemonsteringen

Figuur 1 toont het gemiddelde percentage dode mosselen ten opzichte van het totale aantal gevonden mosselen over de tijd, uitgesplitst voor drie deelgebieden van de Oosterschelde: West, Midden en Noord. Voor deze analyse zijn de categorieën verse, recente en oude dode mosselen samengevoegd tot één maat voor cumulatieve sterfte. Deze geeft een schatting van de sterfte vanaf het zaaien tot aan de bemonstering, maar kan worden overschat als een perceel vooraf niet volledig is schoon gevist en oude schelpresten zijn meegeteld. Alleen “verse dode mosselen” kunnen met zekerheid aan recente sterfte worden toegeschreven. Aangenomen wordt dat het wel of niet schoonvissen willekeurig over de percelen is verdeeld, waardoor de invloed op de vergelijking beperkt is.

Uit de analyse blijkt dat de mosselsterfte sterk varieert in de tijd en tussen de drie deelgebieden. In **Figuur 1** is duidelijk te zien dat het schoonvissen van de percelen tussen september en oktober heeft geleid tot een aanzienlijke afname van het aandeel dode mosselen (voor en na de stippellijn). Dit effect wordt versterkt doordat er in deze periode ook nieuwe mosselen zijn uitgezaaid en er een verschuiving plaatsvond in welke percelen werden bemonsterd. Door dit soort ingrepen, schoonvissen, herbezaaien en het wisselen van bemonsterde percelen, is het lastiger om sterftcijfers tussen meetmomenten direct met elkaar te vergelijken. Door het schoonvissen was de cumulatieve sterfte bijvoorbeeld aanzienlijk lager in oktober, november en december dan aan het begin van de bemonstering op 3 mei 2024. Op 21 augustus leek de cumulatieve sterfte juist iets hoger te zijn dan in mei, maar dit verschil was niet statistisch significant ($p = 0.056$).

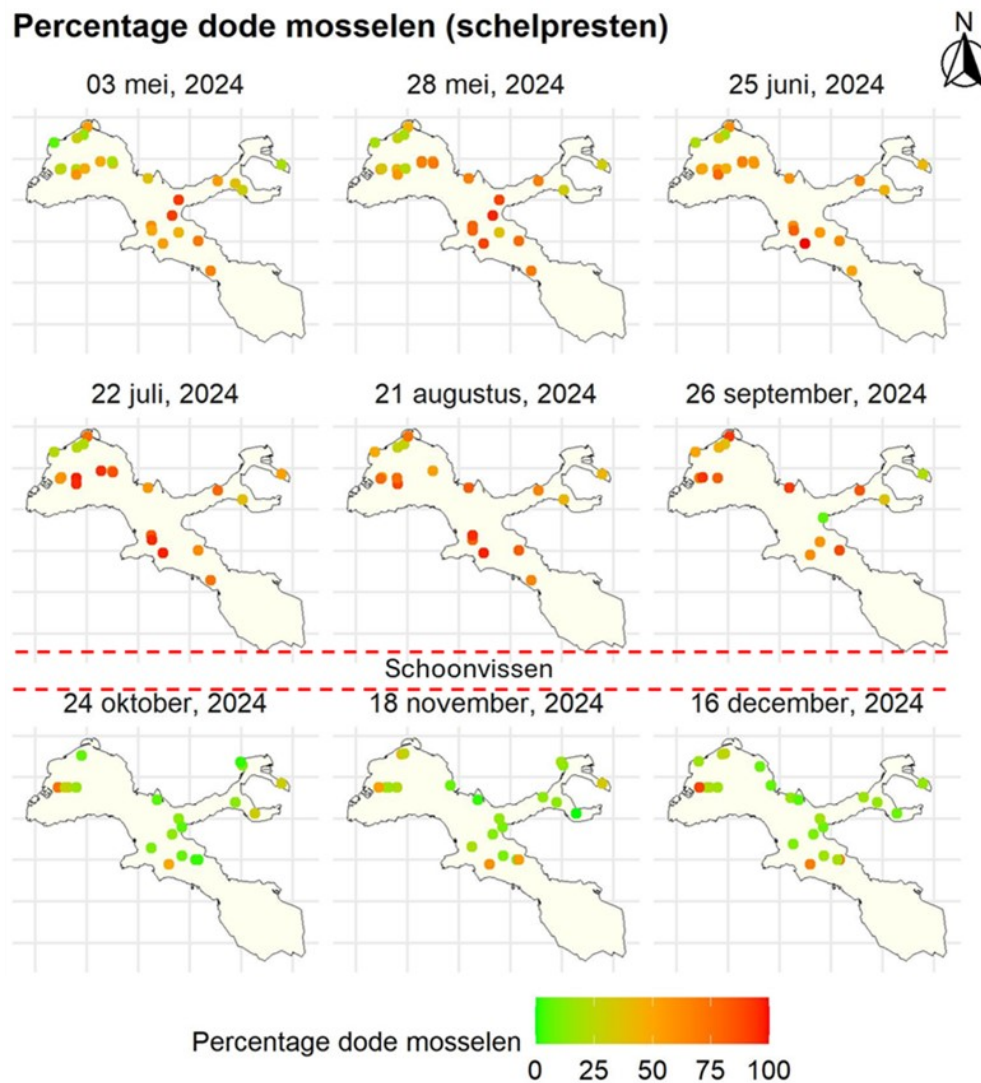
Naast deze temporele variatie zijn er ook duidelijke ruimtelijke verschillen. Cumulatieve sterfte was gemiddeld aanzienlijk lager in de deelgebieden Noord ($p < 0.001$) en West ($p < 0.01$) in vergelijking met het Midden van de Oosterschelde. Dit patroon was echter niet in alle maanden hetzelfde. Zo was de cumulatieve sterfte in Noord op 24 oktober significant hoger dan in het Midden ($p = 0.026$), terwijl in West de cumulatieve sterfte op 26 september en 24 oktober duidelijk hoger was dan in het Midden ($p = 0.019$ en $p = 0.001$).

Figuur 2 toont de ruimtelijke verspreiding van het percentage dode mosselen in de tijd. In mei was de optelsom van de sterfte (cumulatieve sterfte) vooral geconcentreerd in het Midden van de Oosterschelde, waarna het patroon zich geleidelijk verplaatste richting het Westen, in de richting van de monding naar de Noordzee. In de Noordtak van de Oosterschelde zijn minder meetpunten beschikbaar en is de variatie tussen de locaties groter. Desondanks lijkt de opgetreden sterfte hier gemiddeld lager geweest, met een toename dichter naar het Middengebied.



Figuur 1 Gemiddelde percentage dode mosselen (verse, recente en oude dode mosselen) ten opzichte van het totale aantal gevonden mosselen over de tijd, uitgesplitst voor drie deelgebieden van de Oosterschelde: West, Midden en Noord. De verticale rode stippellijn geeft aan wanneer veel mosselpercelen werden schoongevist en er nieuwe mosselen werden gezaaid.

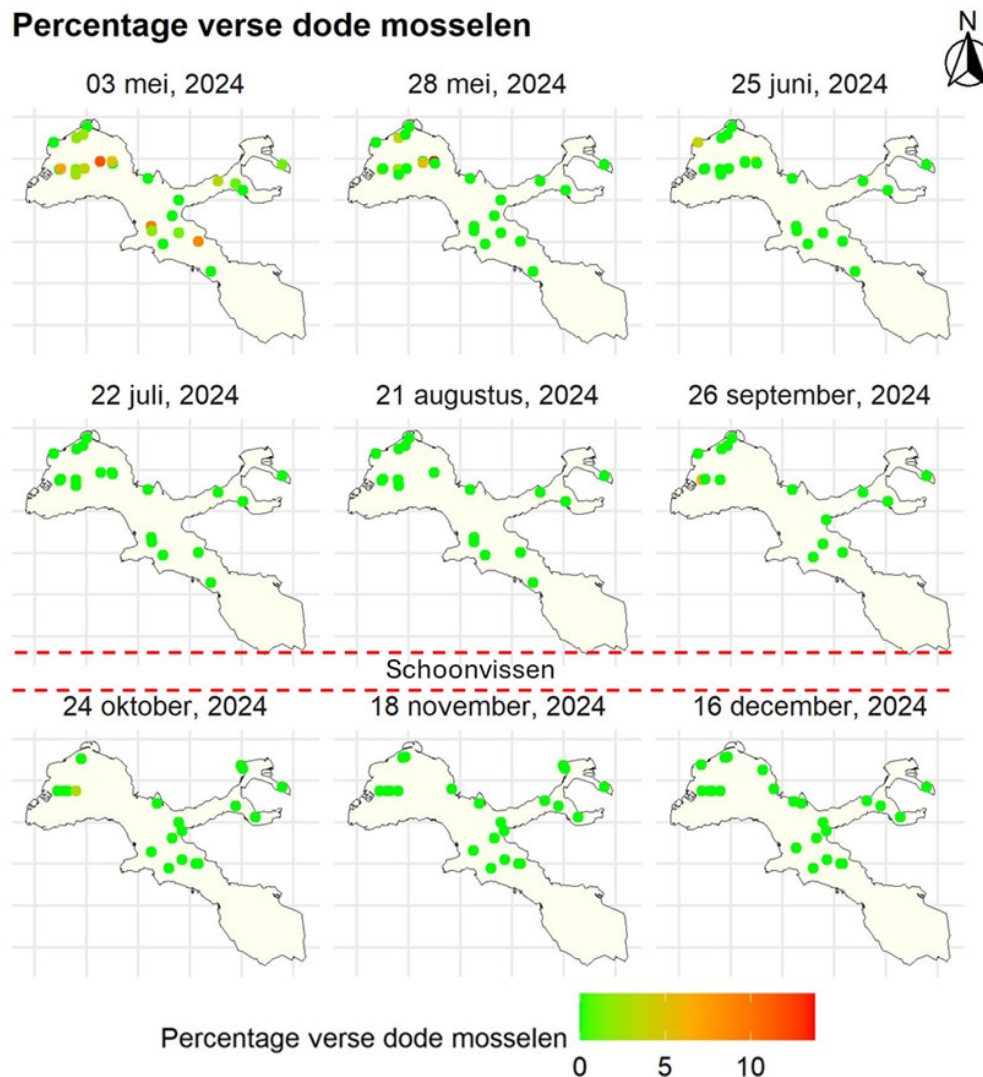
Percentage dode mosselen (schelpresten)



Figuur 2 Ruimtelijke verspreiding van het percentage cumulatieve sterfte (verse, recente en oude dode mosselen) ten opzichte van het totale aantal gevonden mosselen over de tijd. De rode stippellijnen geven de periode aan wanneer veel mosselpercelen werden schoongevist en nieuwe mosselen werden gezaaid.

Wanneer we uitsluitend kijken naar de acute sterfte (mosselen met vleesresten in de schelp), zien we deze begin mei voornamelijk in West en in mindere mate in het Midden van de Oosterschelde (**Figuur 3**). Omdat er wel veel schelpresten zijn gevonden (**Figuur 1**) in het Middengebied kan dit erop wijzen dat de sterfte in het Midden al vóór de start van het monstereven is begonnen en pas in mei in West optrad. In de Noordtak werden gedurende de hele monsterperiode nauwelijks verse dode mosselen gevonden.

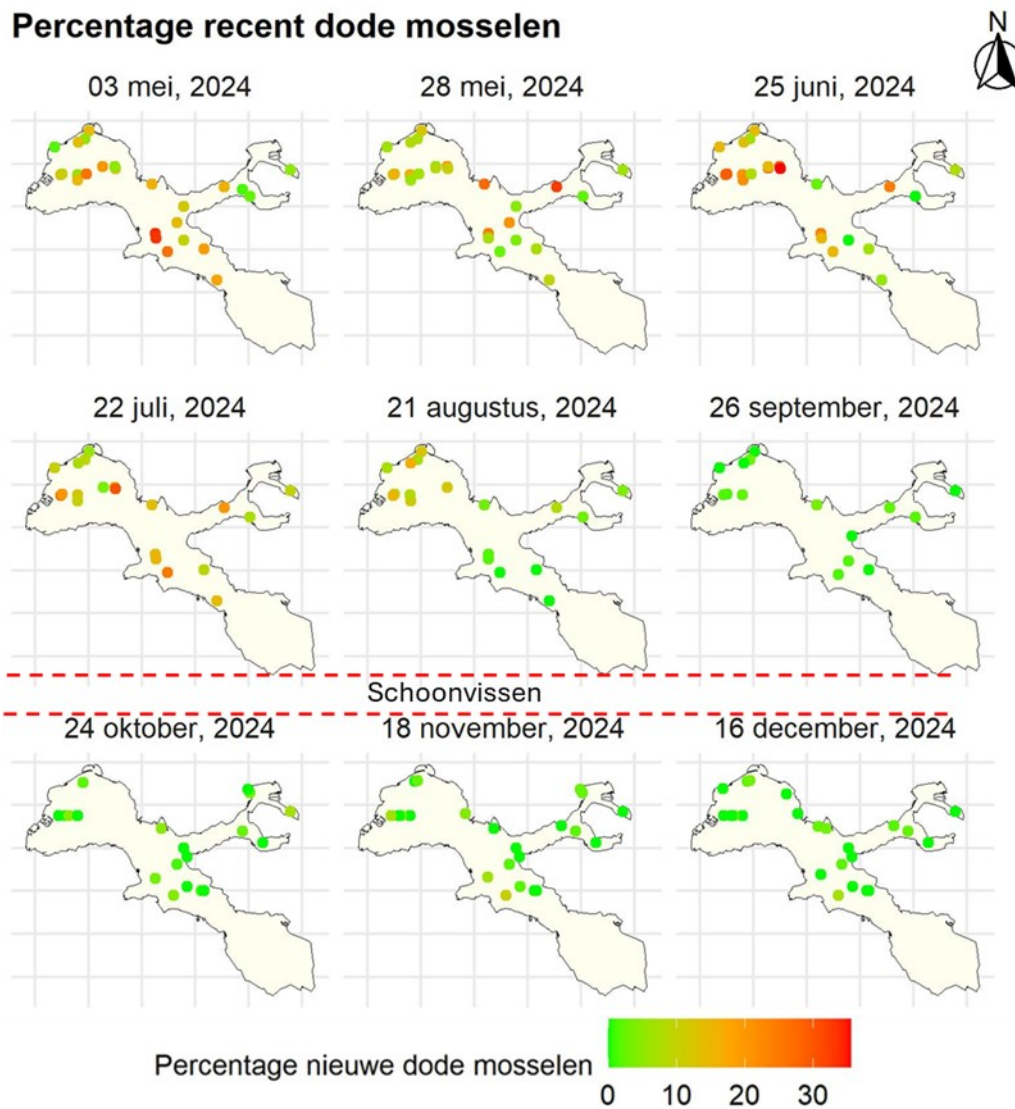
Percentage verse dode mosselen



Figuur 3 Ruimtelijke verspreiding van het percentage verse dode mosselen (dode mosselen met vleesresten in de schelpen) ten opzichte van het totale aantal gevonden mosselen over de tijd. De rode stippellijnen geven de periode aan wanneer veel mosselpercelen werden schoongevist en nieuwe mosselen werden gezaaid.

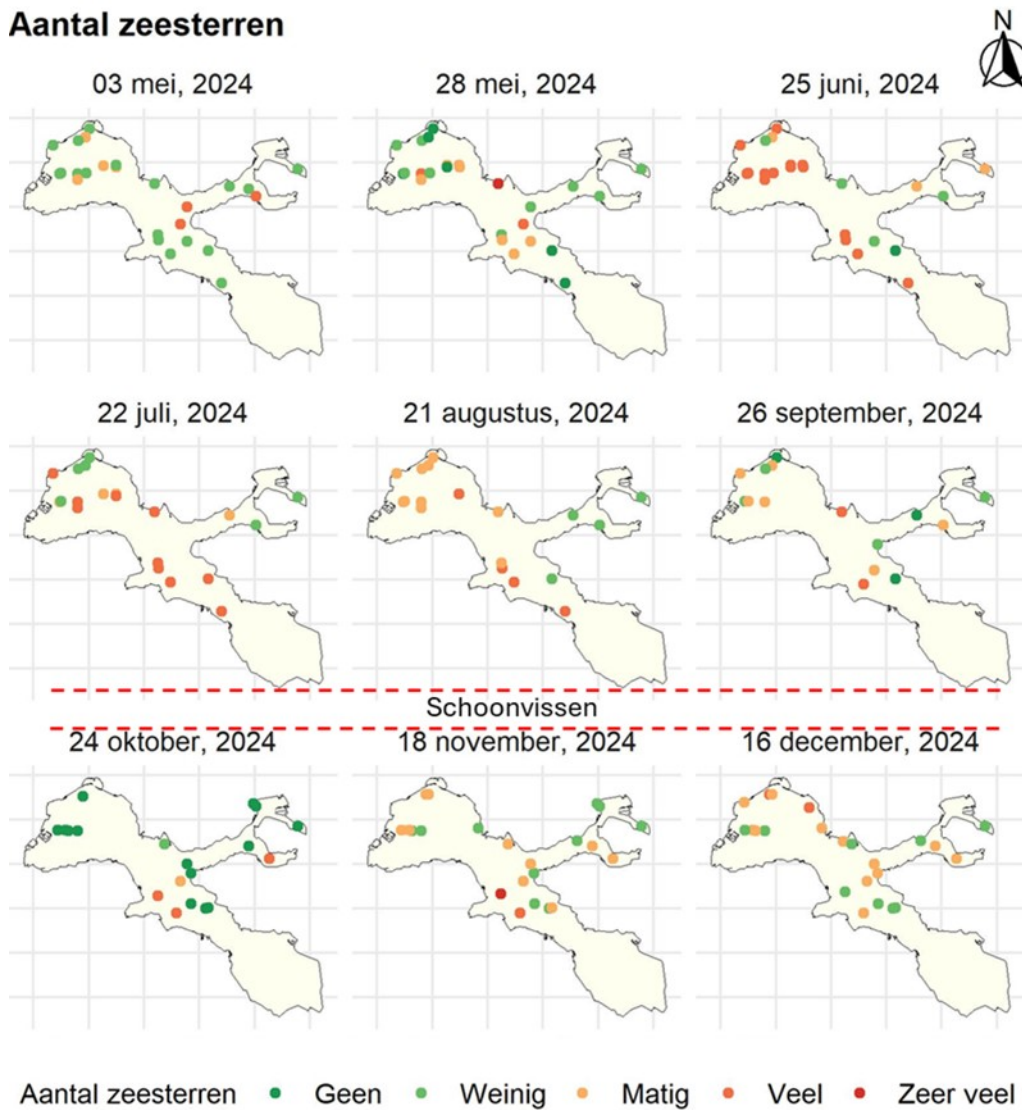
Dit patroon zien we terug als we naar recente sterfte (dode mosselen, zonder vleesresten maar met de twee schelpresten nog aan elkaar) over de tijd kijken (**Figuur 4**). Begin mei vinden we deze namelijk vooral in het Midden, terwijl eind juni er relatief ook veel worden gevonden in West. Recente dode mosselen worden in augustus nog relatief veel gevonden in West en nauwelijks meer in het Midden. Dit suggereert dat de sterfte in het Midden eerder is begonnen, waarschijnlijk al voor de start van de monitoring, en ook eerder is afgenomen dan in het westelijke deel van de Oosterschelde. In de Noordtak zijn tussen mei en augustus wel recente dode mosselen aangetroffen, maar geen verse dode exemplaren zoals eerder te zien was in **Figuur 2**. Het kan echter ook zijn dat we de verse dode mosselen daar net gemist hebben tijdens het bemonsteren, aangezien het vlees van dode mosselen snel verteert. Een andere verklaring voor de aanwezigheid van recent dode mosselen, zonder waarneming van dode mosselen met vleesresten in de schelpen, is predatie door zeesterren. Zeesterren laten na consumptie immers alleen lege schelpen achter. **Figuur 5** toont het aantal waargenomen zeesterren op de mosselpercelen tijdens de bemonsteringen. Dit is weergegeven op een kwalitatieve schaal van 0 (geen zeesterren) tot 4 (zeer veel zeesterren). Opvallend is dat het aantal zeesterren in oktober, na het schoonvissen, aanzienlijk lager was.

Percentage recent dode mosselen



Figuur 4 Ruimtelijke verspreiding van het percentage nieuwe dode mosselen (dode mosselen waarbij beide schelpheften nog aan elkaar vastzitten maar zonder vleesresten) ten opzichte van het totale aantal gevonden mosselen over de tijd. De rode stippellijnen geven de periode aan wanneer veel mosselpercelen werden schoongevist en nieuwe mosselen werden gezaaid.

Aantal zeesterren

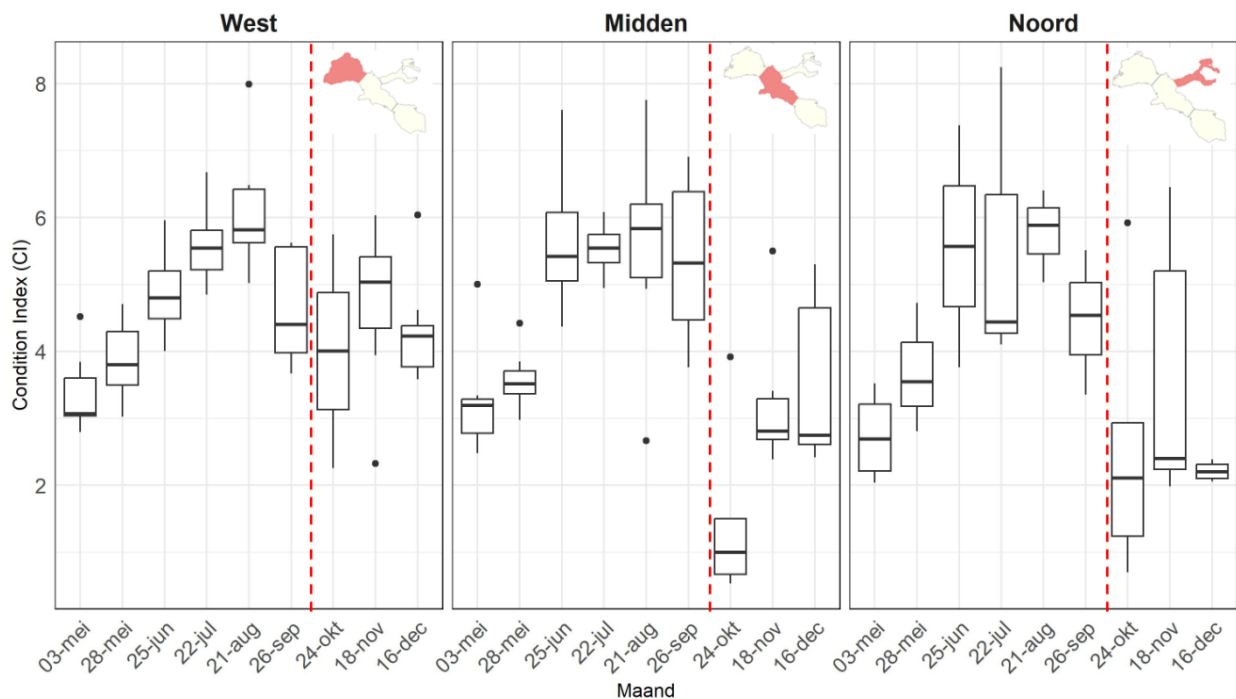


Figuur 5 Aantal waargenomen zeesterren op de mosselpercelen tijdens de bemonsteringen. Dit is weergegeven op een kwalitatieve schaal van "geen zeesterren" tot "zeer veel zeesterren". De rode stippellijnen geven de periode aan wanneer veel mosselpercelen werden schoongevist en nieuwe mosselen werden gezaaid.

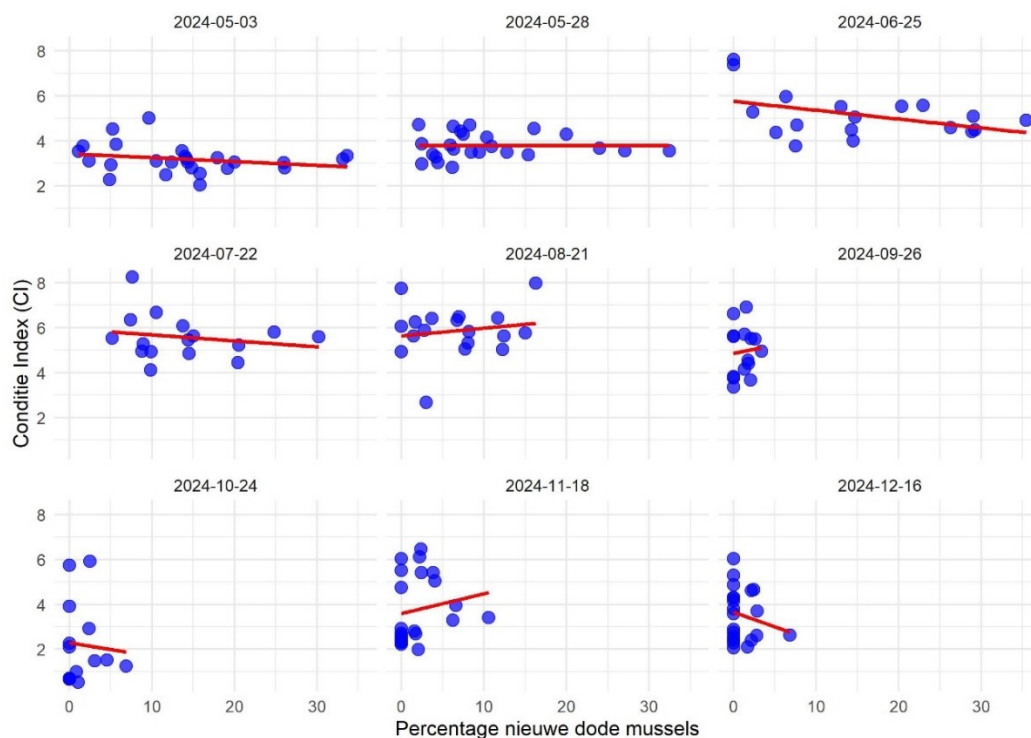
4.2 Conditie-index

In **Figuur 6** is de gemiddelde Conditie-Index (AFDW/L³, CI) van de mosselen per maand weergegeven voor de drie deelgebieden: West, Midden en Noord. Zoals te verwachten, varieert de conditie-index sterk per maand ($p < 2e-16$). Daarnaast verschilt de gemiddelde CI significant tussen de deelgebieden ($p = 0.033$), en de relatie tussen de monstermaand en de gemiddelde CI verschilt enigszins per deelgebied ($p = 0.033$). Over het algemeen neemt de gemiddelde CI in alle deelgebieden toe tot juli, blijft daarna relatief stabiel en neemt in september weer af. Dit patroon komt overeen met de jaarlijkse voortplantingscyclus van mosselen: in het voorjaar verliezen ze veel gewicht door de voortplanting, waarna ze zich in het late voorjaar en de zomer herstellen dankzij gunstige voedselomstandigheden.

Mosselen in verminderde conditie zijn waarschijnlijk vatbaarder voor ziekten en minder weerbaar tegen andere stressoren. Daarom is onderzocht of er een relatie bestaat tussen de conditie-index en de hoeveelheid gevonden dode mosselen, evenals tussen de conditie-index en de overleving in de Survival in Air test. Indien mosselen met een lagere CI gevoeliger zouden zijn voor sterfte, zou men een negatieve correlatie verwachten tussen de CI en het aantal recent gestorven mosselen op een perceel. Deze correlatie werd echter niet gevonden ($p = 0.299$), ook niet wanneer de analyse werd opgesplitst per maand (**Figuur 7**).



Figuur 6 Gemiddelde Conditie Index (AFDW/L³, CI) van de mosselen per maand weergegeven voor drie deelgebieden: West, Midden, Noord.



Figuur 7 Correlatie tussen de Conditie Index CI en het percentage recent dode mosselen die op een perceel zijn gevonden per monsternoment.

4.3 Survival in Air (SiA) en LT50

Als maat voor de weerbaarheid van de mosselen hebben we onderzocht hoe goed de mosselen van verschillende percelen blootstelling aan drooglegging overleefde. Hiervoor hebben we maandelijks een overlevingsanalyse uitgevoerd om de overleving van mosselen, blootgesteld aan lucht, over tijd tussen de percelen te vergelijken (Survival in Air, SiA) (Eertman et al., 1993; Pampanin et al., 2005). Mosselen worden hierbij blootgesteld aan een stressor, in dit geval drooglegging. Hoe weerbaarder de mossel is, hoe beter deze met de stressor om kan gaan. Als een mossel echter al gestrest is of in een slechte conditie verkeert, is de hypothese dat ze juist minder goed in staat zijn om deze stressor te doorstaan.

In alle maanden werd tijdens de SiA een significant verschil in overleving waargenomen, met de grootste verschillen op 3 mei ($p < 0.001$). **Figuur 8** toont de gemiddelde overlevingscurves per monsternismoment van de SiA voor de drie deelgebieden. Het tijdstip 0 geeft het moment aan waarop de mosselen aan de lucht werden blootgesteld, waarna de tijd tot sterfte werd geregistreerd. De grafiek bevestigt het volgende:

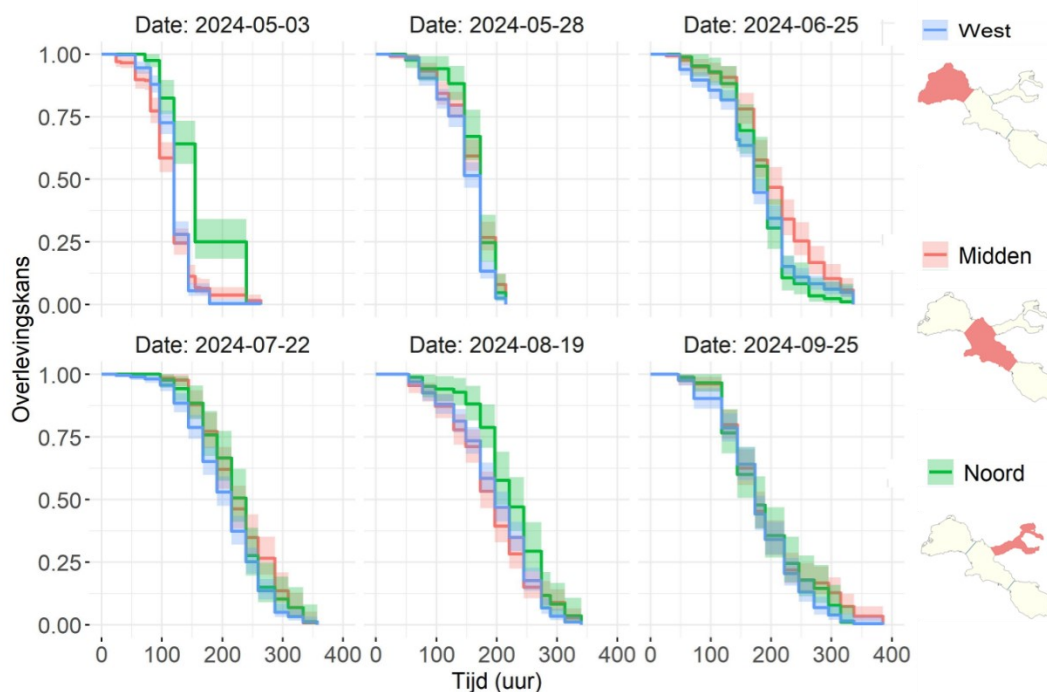
- Op 3 mei hadden de mosselen in de Noordtak een hogere weerbaarheid tegen blootstelling aan lucht dan in het Midden of Westen. De overlevingskans in Noord was significant hoger.
- In juni werd opnieuw een significant verschil tussen de gebieden gevonden ($p < 0,001$). Uit de log-rank test bleek dat de SiA in Midden hoger was dan verwacht, wat wijst op een betere overleving. In Noord en West daarentegen was de sterfte hoger dan verwacht, wat duidt op een lagere overlevingskans bij blootstelling aan lucht.
- In augustus veranderde het patroon opnieuw: de overleving verschilde wederom significant tussen de gebieden ($p = 0,01$). Ditmaal hadden de mosselen in Noord minder sterfte dan verwacht, wat wijst op een betere weerbaarheid ten opzichte van Midden en West.

Daarnaast nam de maximale overlevingstijd toe gedurende de studieperiode: op 28 mei werd een maximum van 215 uur geregistreerd, terwijl dit in september opliep tot 385 uur.

In **Figuur 9** is de gemiddelde aantal uur aangegeven waarop 50% sterfte optrad van mosselen die aan de lucht werden blootgesteld (LT50) op de verschillende percelen in de Oosterschelde per maand weergegeven.

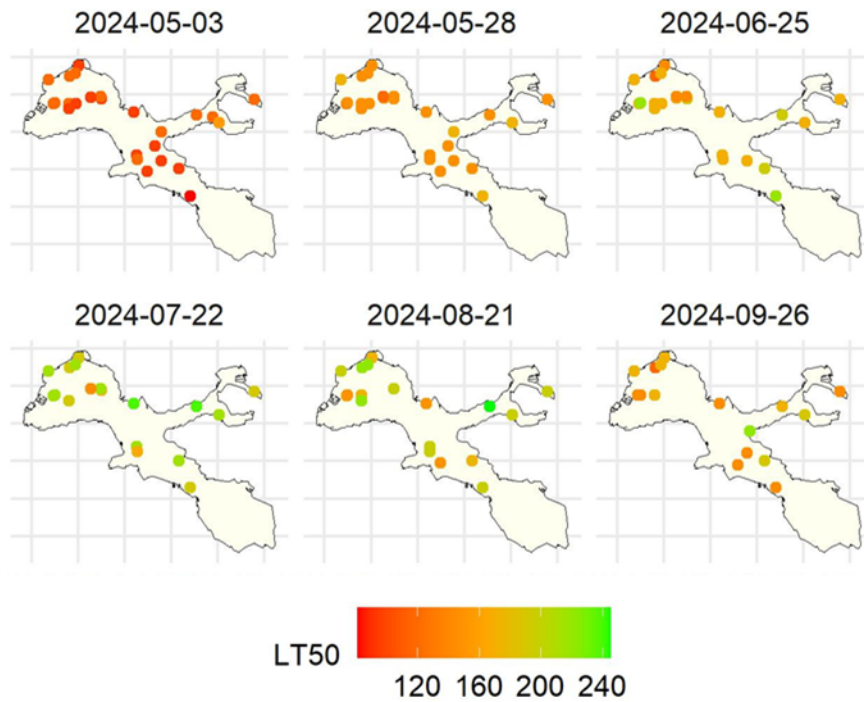
De LT50 varieerde, zoals te verwachten, sterk per maand ($p < 2e-16$). Daarnaast zijn er ook significante verschillen tussen deelgebieden. In de Noordtak van de Oosterschelde was de LT50 significant hoger dan in de het Midden ($p = 0.001$), wat betekent dat mosselen hier langer overleefde. In het Westelijke deel was de LT50 iets hoger dan in het Midden, maar dit verschil was niet statistisch significant ($p = 0.088$). Daarnaast bleek dat de LT50 over de tijd toenam, vooral in het Midden. Dit wordt bevestigd door significante interacties tussen datum en locatie: op 28 mei was de toename van LT50 in de Noordtak kleiner (-0.232 , $p = 0.033$), net als op 25 juni (-0.278 , $p = 0.012$) en 26 september (-0.230 , $p = 0.040$). Voor West werd een vergelijkbare afname van het effect gezien op 25 juni (-0.196 , $p = 0.016$). Dit betekent dat hoewel mosselen overall langer overleefde naarmate de tijd vorderde, deze verbetering in Noord en West minder uitgesproken was.

Net als de CI kan de LT50 een maat zijn voor de weerbaarheid van mosselen. Een lage LT50 zou een voorteken kunnen zijn van sterfte omdat deze mosselen dus minder goed met de stress van droogligging lijken te kunnen omgaan. Er werd echter geen significante correlatie gevonden tussen LT50 en het aantal recent dode mosselen op een perceel ($p = 0.299$). Om te onderzoeken of de grootte van de mosselen verband hield met sterfte, werd de lengte van elke mossel gemeten op het moment van sterven. Er werd geen significant effect gevonden (**Figuur 10**).

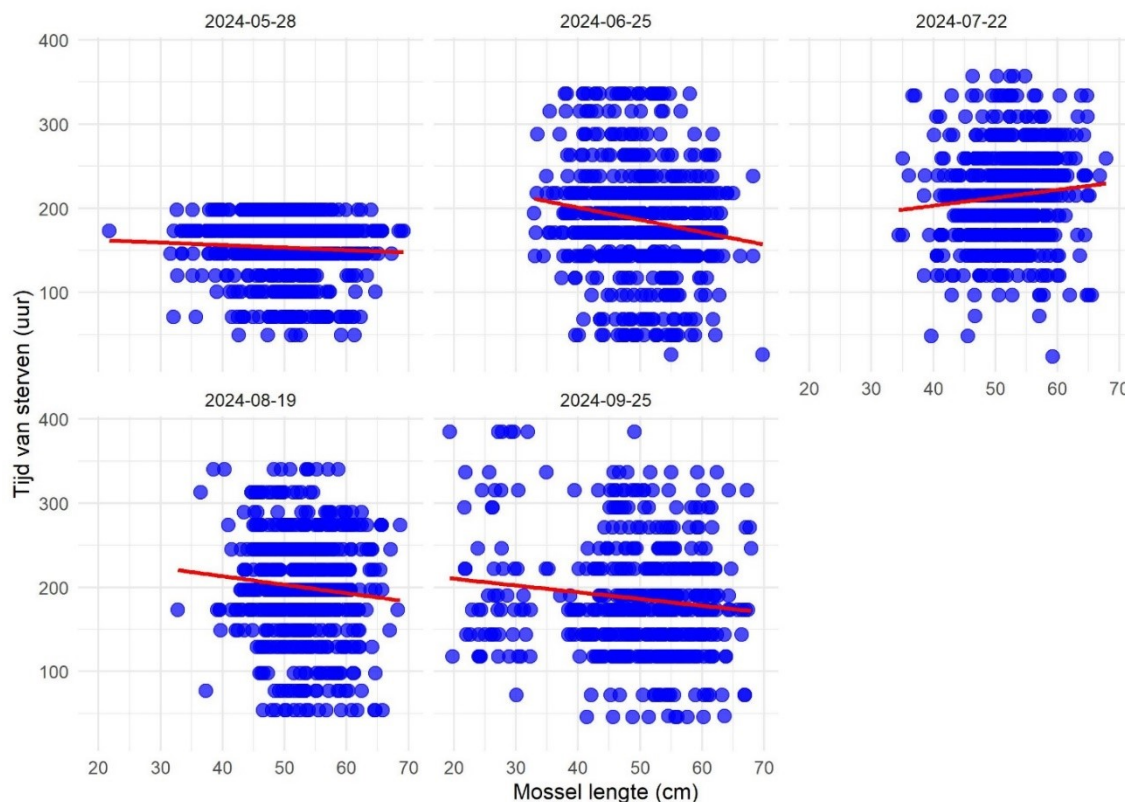


Figuur 8 Gemiddelde overlevingscurves voor drie deelgebieden (West, Midden, Noord). Hierbij is 0 het moment waarop de mosselen werden blootgesteld aan de lucht en werden de uren bijgehouden totdat een mossel doodging.

LT50



Figuur 9 Gemiddelde aantal uur waarop 50% sterfte optrad van mosselen die aan de lucht werden blootgesteld (LT50) op de verschillende percelen in de Oosterschelde per maand weergegeven.



Figuur 10 Correlatie mosselschelpenlengte (cm) en tijd dat mossel dood ging (uur) voor verschillende meetmomenten.

5 Discussie

Deze monitoringscampagne had als doel meer inzicht te krijgen in de temporele en ruimtelijke variatie van mosselsterfte op de verschillende mosselpercelen in de Oosterschelde. Door maandelijkse monitoring op meerdere locaties willen we beter begrijpen hoe de sterfte zich over tijd ontwikkelt, hoe deze geografisch is verdeeld en in welke mate dit verband houdt met de algehele conditie van de mosselen. Op basis van de veldwaarnemingen en de analyse van verse en recent dode mosselen blijkt dat er sprake was van een sterfte-event in de Oosterschelde in het voorjaar van 2024, dat zich waarschijnlijk over meerdere maanden heeft uitgespreid. Er zijn echter sterke aanwijzingen dat een aanzienlijk deel van deze sterfte al vóór de start van de bemonstering op 3 mei 2024 heeft plaatsgevonden, met name in het middengebied.

Temporele variatie

De mosselsterfte in de Oosterschelde varieerde sterk in de tijd tussen de drie deelgebieden, West, Midden, Noord. In mei was de sterfte met name in het Midden van de Oosterschelde hoog, waarna de sterfte zich richting West verplaatste. De analyse van verse en recent dode mosselen suggereert dat de sterfte in het Midden eerder begon maar ook eerder afnam dan in West. In oktober tot en met december was de sterfte aanzienlijk lager. Dit komt overeen met waarnemingen vanuit de kweekpraktijk.

Het voorjaar is een kwetsbare periode voor mosselen, dat komt omdat ze zich dan voorplanten (spawning). Spawning is een energetisch kostbaar proces waarbij mosselen grote hoeveelheden energie investeren in de productie en afgifte van gameten (Myrand et al., 2000). Dit kan leiden tot fysiologische stress, verminderde weerstand tegen ziekten en verhoogde vatbaarheid voor omgevingsfactoren zoals temperatuurstijgingen, zuurstoftekort of infecties. Vergelijkbare sterftepatronen tijdens het voortplantingsseizoen zijn ook in Frankrijk waargenomen, al werd daar geen directe causale link met spawning genoemd (Dégrement et al., 2019; Charles et al., 2020a).

Ruimtelijke variatie

Naast de temporele variatie waren er duidelijke ruimtelijke verschillen in de mosselsterfte. Vroeg in het jaar lag het zwaartepunt van de sterfte in het middengebied, terwijl dit tegen het einde van de zomer verschoof naar het westelijke deel, richting de Noordzee. In de noordtak nam de sterfte van zuid naar noord toe. Daarnaast was er binnen de onderzochte deelgebieden aanzienlijke variatie in zowel tijd als ruimte. De figuren met sterftepatronen van dode mosselen laten zien dat locaties met hoge sterfte direct naast locaties met lage sterfte kunnen liggen. Dit duidt op lokale verschillen in sterftedynamiek, mogelijk gerelateerd aan mosselkarakteristieken en/of omgevingsfactoren zoals stroming, voedselbeschikbaarheid of infectiedruk. Met de huidige dataset kunnen deze oorzaken echter niet met zekerheid worden vastgesteld.

Invloed van schoonvissen en

Een belangrijke factor bij de interpretatie van de resultaten is dat in de loop van de meetperiode op diverse percelen schoonvis- en zaaiactiviteiten hebben plaatsgevonden. Bij het schoonvissen worden dode mosselen en lege schelpen verwijderd, waardoor het gemeten aandeel dode mosselen direct na deze ingreep kunstmatig laag kan uitvallen. Bovendien vond er soms ook een verschuiving plaats in welke percelen in de monitoring werden meegenomen. Deze combinatie van factoren bemoeilijkt een directe vergelijking van sterftepercentages tussen meetmomenten, omdat veranderingen in het aandeel dode mosselen niet uitsluitend het gevolg zijn van natuurlijke sterfteprocessen, maar ook van ingrepen door de kweekpraktijk. Bij de interpretatie van de gegevens moet hier dus rekening mee worden gehouden door de context van deze werkzaamheden mee te nemen in de analyse en door de resultaten primair te beschouwen als momentopnames binnen een dynamisch productieproces. Voor een zuiverder beeld van natuurlijke sterftepatronen is het in toekomstig onderzoek wenselijk om percelen te selecteren waarop gedurende het meetseizoen geen schoonvis- of zaaiacties plaatsvinden, of om de timing en omvang van deze ingrepen systematisch vast te leggen en mee te modelleren in de analyse. In de praktijk is dit echter voor kwekers vaak nauwelijks haalbaar, omdat dergelijke ingrepen essentieel zijn voor het behoud van de productie en de

kwaliteit van het product. Dit maakt het extra belangrijk om informatie over deze werkzaamheden nauwkeurig vast te leggen en te betrekken bij de interpretatie van de monitoringsresultaten.

Correlatie sterfte en weerbaarheid mosselen: SiA, conditie en LT50

De overlevingscurves voor Survival in Air (SiA) laten significante verschillen zien in de overlevingskansen van mosselen die aan lucht worden blootgesteld, zowel tussen monitoringsmomenten als tussen deelgebieden (Figuur 8). In mei was de overleving (SiA) het hoogst voor mosselen uit het Noorden, terwijl in juni de hoogste overleving werd gemeten in het Midden. Dit patroon komt overeen met het percentage recent dode mosselen dat tijdens de bemonstering op deze percelen werd aangetroffen. De SiA-overlevingscurves suggereren daarmee dat de weerbaarheid van mosselen tegen blootstelling aan lucht lager is in gebieden met relatief hoge sterfte, wat erop wijst dat SiA een mogelijke indicator kan zijn voor de algehele conditie van de populatie. Hoewel een soortgelijk verband werd verwacht voor de conditie-index (CI) en de overleving in lucht tot 50% sterfte (LT50), konden deze hypothesen niet worden bevestigd. De sterftepatronen vertoonden geen duidelijke relatie met een lage conditie-index, LT50 of mosselgrootte. Dit suggereert dat deze parameters, ondanks hun biologische relevantie, in dit geval geen betrouwbare voorspellers zijn voor verhoogde sterfte, en dat mosselen mogelijk plotseling sterven zonder een voorafgaande periode van verzwakking. Deze observaties komen overeen met de waarnemingen van mosselkwekers, die aangaven dat de mosselen kort voor hun sterfte nog voldoende vlees bevatten en er gezond uitzagen.

Deze resultaten benadrukken het belang van een bredere analyse van sterftepatronen over de gehele meetperiode. Door het verloop van de sterfte te volgen, kan beter inzicht worden verkregen in de dynamiek van sterfte, en kan worden vastgesteld of deze geleidelijk toeneemt of dat er sprake is van plotselinge sterftepieken. Daarnaast maken overlevingscurves het mogelijk om omgevingsfactoren zoals temperatuurveranderingen, voedselbeschikbaarheid en pathogenenbelasting te koppelen aan specifieke sterftepatronen. Om dergelijke verbanden betrouwbaar vast te kunnen leggen, is het echter noodzakelijk om gegevens op fijnere schaal te verzamelen, bijvoorbeeld op perceelblokniveau in plaats van op gebiedsniveau. Ruimtelijke variatie in omgevingsfactoren kan namelijk lokaal sterk verschillen. Het combineren van gedetailleerde ecologische en omgevingsgegevens met overlevingsdata vergroot daarmee de kans om de achterliggende oorzaken van sterfte beter te begrijpen.

Een probleem dat zich voordeed bij het vaststellen van de SiA was dat de mosselen in de wintermaanden niet meer opengingen staan als zij doodgingen. Dit maakte de monitoring erg lastig en onbetrouwbaar en hierdoor zijn maanden oktober tot en met december dus ook niet meegenomen in de analyse. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat de lagere temperaturen in de winter de fysiologische processen in de mosselen aanzienlijk vertragen. In het vervolg van het experiment willen we kijken of afname in gewicht kan helpen bij het vaststellen van de SiA.

Status immuunsysteem als mogelijke parameter voor weerbaarheid

Naast CI, SiA en LT50 zijn er andere parameters die kunnen helpen bij het beoordelen van de gezondheid en weerbaarheid van mosselen die meer gerelateerd zijn aan het functioneren van het immuunsysteem. In Frankrijk hebben ze bijvoorbeeld gekeken naar de cytogenetische status dat verwijst naar de chromosomale stabiliteit en genetische integriteit van hemocyten (Benabdelmouna & Ledu, 2016; Ajithkumar et al., 2025). Hemocyten zijn de immuuncellen in de hemolymfe (bloed) van mosselen en andere schelpdieren. Ze spelen een cruciale rol in de afweer tegen pathogenen en het opruimen van dode cellen. Schade aan het DNA van hemocyten (bijvoorbeeld door vervuiling, stress of infecties) kan leiden tot afwijkingen aan de chromosomen of abnormale celdelingen. Dit kan resulteren in een verminderde functionele capaciteit van hemocyten, waardoor ze minder effectief pathogenen bestrijden. De resultaten over het gebruik van cytogenetische status als indicator voor de gezondheid van mosselen zijn tegenstrijdig. Benabdelmouna (2016) koppelde een verlaagde cytogenetische status aan verhoogde sterfte in Frankrijk en stelde voor om flowcytometrie te gebruiken voor het monitoren van de cytogenetische kwaliteit van mosselpopulaties. Daarentegen vond een vervolgstudie van Ajithkumar (2025) geen duidelijk verband tussen cytogenetische status en overleving, hoewel opgemerkt werd dat de algehele conditie van de mosselen al vrij laag was.

Een andere optie is om te kijken naar de totale hemocytenconcentratie (THC) of het percentage granulocyten in de hemolymfe (Hornstein et al., 2018). THC verwijst naar het totaal aantal hemocyten per hoeveelheid hemolymfe en het percentage granulocyten geeft aan welk deel van de totale hemocyten uit immuunactieve granulocyten bestaat. De THC geeft een algemene indicatie van de immuunstatus van de mossel. Een lage THC kan wijzen op chronische stress, uitputting of onderdrukking van het immuunsysteem, terwijl een verhoogde THC duidt op een actieve immuunrespons, bijvoorbeeld bij infectie met bacteriën zoals *Vibrio splendidus* of *Francisella haliotica*. Er zijn verschillende parameters die inzicht kunnen geven in de immuunstatus van een mossel. De immuunstatus is een belangrijke indicator voor de gezondheid van een organisme: een goed functionerend immuunsysteem beschermt tegen infecties en stressfactoren, terwijl afwijkingen in de immuunstatus kunnen wijzen op ziekte, stress of omgevingsproblemen. Een volgende stap zou dus kunnen zijn om meer te focussen op het meten van dergelijke parameters.

Aanbevelingen voor verdere ruimtelijke en temporele monitoring

Het is belangrijk om de situatie in de Oosterschelde meerjarig te monitoren om beter inzicht te krijgen in de temporele en ruimtelijke verspreiding van mosselsterfte. Door langjarige monitoring kunnen we onderscheid maken tussen natuurlijke variabiliteit en structurele trends, zoals terugkerende sterftepatronen in bepaalde seizoenen of gebieden. Dit helpt bij het identificeren van onderliggende oorzaken, zoals milieufactoren of ziekten. Daarnaast maakt een meerjarige aanpak het mogelijk om extreme gebeurtenissen, zoals hittegolven of periodes van zuurstoftekort, beter in de context van lange-termijn veranderingen te plaatsen. Daarnaast willen we in de toekomst de volgende factoren nog meenemen in deze monitoring:

- Hoewel mosselgrootte geen duidelijke invloed had op sterftetekansen (SiA), is nog niet onderzocht of de oorsprong van de mosselen (bijvoorbeeld verschillende kweekgebieden of subpopulaties) een rol speelt in hun gevoeligheid voor sterfte. Om dit beter in kaart te brengen is echter informatie nodig van de kwekers. Daarnaast kan het interessant zijn om de populaties genetisch te karakteriseren, aangezien bepaalde groepen mogelijk genetisch vatbaarder zijn voor sterfte. Door een meer gedetailleerde ruimtelijke analyse toe te passen, dus op kleinere schaal, kunnen we beter inzicht krijgen in lokale variatie en mogelijke sterfterisico's per gebied.
- Naast de conditie-index en LT50 kunnen aanvullende fysiologische metingen, zoals cytogenetische status, mogelijk betrouwbaardere indicatoren zijn voor zowel de gezondheid als de stressstatus van mosselen. Daarom is het aan te bevelen een beknopte literatuurstudie, met eventueel ondersteunende kleine labexperimenten, uit te voeren om vast te stellen welke specifieke metingen het meest relevant en waardevol zijn.

Toekomstige monitoring binnen het OMASS-programma

In dit onderzoek zijn de temporele en ruimtelijke patronen van mosselsterfte in de Oosterschelde in kaart gebracht, van mei 2024 tot en met december 2024. Uit de monitoring bleek dat de sterfte al vóór begin mei was begonnen en zich gedurende het jaar over de Oosterschelde verspreidde. De huidige monitoring wordt voortgezet binnen het *PPS Onverklaarbare en Massale Sterfte in de Oosterschelde (OMASS)*. Door meer data te verzamelen, hopen we de temporele en ruimtelijke verspreiding te kunnen koppelen aan veranderingen in omgevingsfactoren, zoals temperatuur en de aanwezigheid van ziekteverwekkers. Dit onderzoek draagt bij aan het duurzaam beheer van mosselbestanden, helpt de risico's voor de mosselsector te verminderen en biedt belangrijke inzichten voor het behoud van de ecologische balans in de Oosterschelde.

6 Dankwoord

Wij willen graag visserijkundig ambtenaar Gert-Jan van Veen en de bemanning van de *Luctor*, *IJsselmeer* en de *Regulus* bedanken, die ons elke maand vergezellen op hun vaart over de Oosterschelde om op diverse mosselpercelen monsters te nemen. Hun samenwerking is van onschatbare waarde voor het succes van ons onderzoek, en we waarderen hun constante inzet om deze monitoring mogelijk te maken. Daarnaast danken wij de mosselkwekers op wiens percelen wij mochten monstern. We hopen dat we op deze manier steeds meer kunnen bijdragen aan het ontrafelen van de oorzaken van de sterfte en het ontwikkelen van effectieve mitigatiemaatregelen.

7 Literatuur

- Ajithkumar, M., Dégremont, L., Garcia, C., Ledu, C., & Benabdelmouna, A. (2025). Response to selection for cytogenetic status and their relationship with mortality in *Mytilus edulis* and *Mytilus galloprovincialis* in France. *Aquaculture*, 597(May 2024).
- Ben Cheikh, Y., Travers, M. A., & Le Foll, F. (2017). Infection dynamics of a *V. splendidus* strain pathogenic to *Mytilus edulis*: In vivo and in vitro interactions with hemocytes. *Fish and Shellfish Immunology*, 70, 515–523.
- Benabdelmouna, A., Garcia, C., Ledu, C., Lamy, P., Maurouard, E., & Dégremont, L. (2018). Mortality investigation of *Mytilus edulis* and *Mytilus galloprovincialis* in France: An experimental survey under laboratory conditions. *Aquaculture*, 495(December 2017), 831–841.
- Benabdelmouna, A., & Ledu, C. (2016). The mass mortality of blue mussels (*Mytilus* spp.) from the Atlantic coast of France is associated with heavy genomic abnormalities as evidenced by flow cytometry. *Journal of Invertebrate Pathology*, 138, 30–38.
- Bouras, H., Quesnelle, Y., Barozet, A., Goux, D., Blin, J. L., Savary, M., Zatylny-Gaudin, C., & Houssin, M. (2023). First isolation of *Francisella haliotidica* strains from blue mussel (*Mytilus edulis*) in Normandy, France. *Journal of Invertebrate Pathology*, 200, 107950.
- Capelle, J. J., Blanco Garcia, A., Kamermans, P., Engelsma, M. Y., & Jansen, H. M. (2021). Observations on recent mass mortality events of marine mussels in the Oosterschelde, the Netherlands. *Aquaculture International*, 29(4), 1737–1751.
- Charles, M., Bernard, I., Villalba, A., Oden, E., Burioli, E. A. V., Allain, G., Trancart, S., Bouchart, V., & Houssin, M. (2020a). High mortality of mussels in northern Brittany – Evaluation of the involvement of pathogens, pathological conditions and pollutants. *Journal of Invertebrate Pathology*, 170(December 2019), 107308.
- Charles, M., Trancart, S., Oden, E., & Houssin, M. (2020b). Experimental infection of *Mytilus edulis* by two *Vibrio splendidus*-related strains: Determination of pathogenicity level of strains and influence of the origin and annual cycle of mussels on their sensitivity. *J Fish Dis.*, 43, 9–21.
- Charles, M., Villalba, A., Meyer, G., Trancart, S., Lagy, C., Bernard, I., & Houssin, M. (2020c). First detection of *Francisella haliotidica* in mussels *Mytilus* spp. experiencing mortalities in France. *Diseases of Aquatic Organisms*, 140(June), 203–208.
- Dégremont, L., Maurouard, E., Rabiller, M., & Glize, P. (2019). Response to selection for increasing resistance to the spring mortality outbreaks in *Mytilus edulis* occurring in France since 2014. *Aquaculture*, 511(August 2018), 734269.
- Eertman, R. H. M., Wagenvoort, A. J., Hummel, H., & Smaal, A. C. (1993). "Survival in air" of the blue mussel *Mytilus edulis* L. as a sensitive response to pollution-induced environmental stress. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 170(2), 179–195.
- Escaravage, V., & Kamermans, P. (2018). *Mosselen in troebel water : onderzoek naar een mogelijk effect van stof van breuksteen en staalslakken op mosselen*. Retrieved from Wageningen University & Research rapport C077/18 website: <https://edepot.wur.nl/462891>
- Filgueira, R., Comeau, L. A., Landry, T., Grant, J., Guyondet, T., & Mallet, A. (2013). Bivalve condition index as an indicator of aquaculture intensity: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, 25, 215–229.
- Foekema, A. E. M., Sonneveld, C., Hoornsman, G., & Blanco, A. (2016). *Uitloging en effecten van metalen uit staalslakken beoordeeld in mesocosms*. IMARES Rapport C063/16.
- Hornstein, J., Pales Espinosa, E., Cerrato, R. M., Lwiza, K. M. M., & Allam, B. (2018). The influence of temperature stress on the physiology of the Atlantic surfclam, *Spisula solidissima*. *Comparative Biochemistry and Physiology -Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 222(February), 66–73.
- Jansen, H., Capelle, J., & Engelsma, M. (2019). *Neoplasie in schelpdieren: Wat weten we? Een korte Q&A* (Vol. 2019, pp. 5–7). Vol. 2019, pp. 5–7. Wageningen University & Research.
- Korringa, P. (1968). On the Ecology and Distribution of the Parasitic Copepod *Mytilicola intestinalis* Steuer. *Bijdragen Tot de Dierkunde*, 38(1), 47–57.
- Lupo, C., Bougeard, S., Le Bihan, V., Blin, J. L., Allain, G., Azéma, P., ... Le Bouquin, S. (2021). Mortality of marine mussels *Mytilus edulis* and *M. galloprovincialis*: systematic literature review of risk factors and recommendations for future research. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 504–536.
- Myrand, B., Guderley, H., & Himmelman, J. H. (2000). Reproduction and summer mortality of blue mussels *Mytilus edulis* in the Magdalen Islands, southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Ecology Progress Series*, 197, 193–207.
- Pampanin, D. M., Volpato, E., Marangon, I., & Nasci, C. (2005). Physiological measurements from native and transplanted mussel (*Mytilus galloprovincialis*) in the canals of Venice. Survival in air and condition index. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 140(1), 41–52.
- Peperzak, L., & Poelman, M. (2008). Mass mussel mortality in The Netherlands after a bloom of *Phaeocystis globosa* (prymnesiophyceae). *Journal of Sea Research*, 60(3), 220–222.
- Polsenaere, P., Soletchnik, P., Le Moine, O., Gohin, F., Robert, S., Pépin, J. F., ... Goulletquer, P. (2017). Potential

environmental drivers of a regional blue mussel mass mortality event (winter of 2014, Breton Sound, France).
Journal of Sea Research, 123, 39–50.

8 Kwaliteitsborging

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

Verantwoording

Rapport: C063/25

Projectnummer: 4318100482

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

Akkoord: dr. L. Tonk
Onderzoeker

Handtekening:

Signed by:

094CCC4D7BC84DB...

Datum: 1 oktober 2025

Akkoord: Dr. C.J. Wiebinga
Business Manager Projecten

Handtekening:

Signed by:

D41E9304A710493...

Datum: 1 oktober 2025

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

Bezoekersadres:

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



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

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.