Hittestress op de intergetijdenplaten van de Oosterschelde

Temperatuurmetingen in de bodem van droogvallende platen in de zomer van 2019

Auteur(s): W. Suykerbuyk, M. Tangelder & B. Walles

Wageningen University &
Research rapport C018/20

Hittestress op de intergetijdenplaten van de Oosterschelde

Temperatuurmetingen in de bodem van droogvallende platen in de zomer van 2019

Auteur(s): W. Suykerbuyk, M. Tangelder & B. Walles

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Marine Research in opdracht van en gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Natuurambitie Grote Wateren' (projectnummer BO-43-021.03-001)

Wageningen Marine Research
Yerseke, Februari 2020

VERTROUWELIJK Nee

Wageningen Marine Research rapport C018/20

Keywords: Oosterschelde, intergetijdengebieden, benthos, hittestress, temperatuur, kokkelsterfte

Opdrachtgever: Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
T.a.v.: Jip van Peijpe
Bezoudenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

BO-43-021.03-001

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/515407>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Droogvallend slik op meetlocatie Rattekaai (Kom) op 22-08-2019 gezien in noordelijke richting vanaf het meetpunt met 66% droogvalduur 1 uur na laagwater. Voorgrond: overgang van nat slik (links) naar droog slik (rechts). Achtergrond midden rechts: een strook met dode kokkelschelpen. Foto: W. Suykerbuyk

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut
binnen de rechtspersoon Stichting
Wageningen Research, hierbij
vertegenwoordigd door Dr. M.C.Th.
Scholten, Algemeen directeur

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

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

A_4_3_1 V29 (2019)

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Aanleiding	7
1.3 Onderzoeksvragen	7
1.4 Leeswijzer	8
2 Temperatuur van intergetijdengebieden en kokkelsterfte in 2018	9
3 Materiaal en methoden	11
3.1 Selectie van meetlocaties	11
3.2 Plaatsing van de loggers & gebruikte materialen	13
3.3 Gebruik van datasets	14
3.4 Analyse	14
4 Resultaten	16
4.1 Slaagratio van de loggers	16
4.2 Globale relaties van verloop bodemtemperatuur met andere variabelen	16
4.3 Effect van droogvalduur	19
4.4 Effect van locatie: kom, centrale deel en monding	22
4.5 Effect van sediment type	25
5 Conclusie	26
5.1 Globale relaties van verloop bodemtemperatuur met andere variabelen	26
5.2 Effect van droogvalduur	26
5.3 Effect van locatie: kom, centrale deel en monding	26
5.4 Effect van sedimentsamenstelling	27
6 Discussie en vervolg	28
6.1 Verloop bodemtemperatuur in relatie tot andere variabelen	28
6.2 Bodemtemperatuur en overleving van kokkels	28
6.3 Vervolg / aanbevelingen	29
7 Kwaliteitsborging	31
Literatuur	32
Verantwoording	33
Bijlage 1 Meetpunt karakteristieken	34
Bijlage 2 Temperatuurcurves	35
2.1 Roggenplaat I	36
2.2 Roggenplaat II	37
2.3 Galgeplaat I	38
2.4 Galgeplaat II	39
2.5 Galgeplaat suppletie I	40

2.6	Galgeplaat suppletie II	41
2.7	Dortsman I	42
2.8	Dortsman II	43
2.9	Dortsman III	44
2.10	Rattekaai I	45
2.11	Rattekaai II	46
2.12	Oesterdam I	47
2.13	Oesterdam II	48
2.14	Oesterdam III	49
Bijlage 3	Dry bulk density	50
Bijlage 4	Validatie droogvalduur	51

Samenvatting

Vanuit Programmatische Aanpak ecologie Grote Wateren (PAGW) wordt, op initiatief van de ministeries van Infrastructuur & Waterstaat (I&W) en Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid (LNV), gewerkt aan het robuuster maken van de natuur in grote wateren van Nederland als ook de intergetijdennatuur in de Oosterschelde, die onder druk staat als gevolg van zandhonger en zeespiegelstijging. In de Oosterschelde vormen intergetijdengebieden een belangrijk habitat voor talrijke soorten die zijn beschermd binnen Natura 2000, vooral vanwege de foerageerfunctie voor steltlopers en als rustgebied voor zeehonden.

In de zomer van 2018 is grootschalige kokkelsterfte opgetreden in de Oosterschelde en de Waddenzee. Vermoedelijk heeft dit te maken met het optreden van te hoge temperaturen op de droogvallende platen waar kokkels zich ingraven en overtijen tijdens laagwater. Aangezien behoud van intergetijdengebieden hoog op de agenda staat en het rijk de ambitie heeft om hiervoor met regionale partijen projecten te starten, is het van belang te weten hoe temperatuur de kwaliteit van het bodemleven – en daarmee de foerageerfunctie – kan beïnvloeden. Een belangrijke eerste stap is om erachter te komen hoe de bodemtemperatuur zich ontwikkelt op een hete dag. Daarom is dit onderzoek erop gericht om een beeld te krijgen van de temperatuur in de bovenste centimeters van de bodem van intergetijdenplaten in de Oosterschelde, het leefgebied van de kokkel en andere soorten bodemdieren.

De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

1. Wat zijn de globale relaties tussen verloop van de bodemtemperatuur met andere variabelen lucht- en watertemperatuur, instraling, getij en moment van de dag?
2. Heeft droogvalduur een effect op de mate van opwarming van de bodem?
3. Verschillen de temperaturen van bodem en water over een gradiënt van west naar oost, dus tussen de deelgebieden monding, centrale deel en kom? Water in het oostelijk deel verblijft langer in het gebied dan water in het westelijke deel, waar 2 keer per dag vers water de Oosterschelde binnen stroomt.
4. Heeft sedimentsamenstelling (zand/slib) een effect op de mate van opwarming van de bodem?

Om de verschillende onderzoeksvragen te beantwoorden zijn meetlocaties geselecteerd die verspreid lagen over verschillende hoogtes in de getijdenzone, over verschillende deelgebieden (kom, centrale deel en monding) en over verschillende sedimentsamenstellingen (bv. zandig / slibrijk). Op elke meetlocatie zijn meetpunten geselecteerd langs de hoogtegradiënt, variërend van een droogvalduur van 10% tot 80% van de tijd. Op deze locaties is van eind augustus tot begin oktober 2019 de bodemtemperatuur op 3 cm diepte gemeten. Daarnaast zijn meteorologische en hydrologische data over deze periode verzameld bij het KNMI en Rijkswaterstaat en benut voor de analyse. Na analyse van de temperatuurdata op twee warme dagen van de meetperiode (23 & 24 augustus 2019, maximum temperatuur respectievelijk 24,7 en 29,2°Celsius) werd geconcludeerd dat:

- De watertemperatuur tijdens de inundatiefase (onder water) de bodemtemperatuur lijkt te bufferen waardoor de temperatuur minder hoog oploopt.
- Tijdens laag water volgt de bodemtemperatuur het patroon van de luchttemperatuur en instraling van de zon met een vertraging van 1 a 2 uur en kan tot 5 graden boven de luchttemperatuur uitstijgen.
- Bij een korte droogvalduur (laag in de getijdenzone) is, de buffering van het water op de bodemtemperatuur groter. De tijdsperiode is dan kleiner om: i) tijdens droogvallen sterk op te warmen door een hogere luchttemperatuur en instraling (overdag) of ii) af te koelen bij een lagere luchttemperatuur ('s nachts).
- Bij toenemende droogvalduur is er meer tijd om op te warmen, waardoor de bodemtemperatuur hogere waarden bereikt. Deze ontwikkeling is in alle deelgebieden gezien. Wel leek de meest oostelijke locatie minder op te warmen, wat mogelijk toe te schrijven is aan de samenstelling van de bodem. Zandige locaties draineren mogelijk beter waardoor ze sneller op kunnen warmen.

In de relatief korte meetperiode naderen bodemtemperaturen op meerdere dagen temperaturen die voor kokkels lethaal kunnen zijn of overschrijden deze zelfs. Ook beslaat de meetperiode niet 24 en 25

juli 2019 waarop hittestatistieken zijn gebroken (max. 40,3 graden in Wilhelminadorp) en bodemtemperaturen vermoedelijk nog hoger zijn opgelopen.

De methode met plaatsing van temperatuurloggers is succesvol gebleken en heeft eerste inzichten opgeleverd in de relatie tussen variabelen als droogvalduur, water-/luchttemperatuur, zoninstraling, locatie, sedimenttype, etc. Daarom biedt deze aanpak een goede basis om in vervolg onderzoek toe te passen en worden in dit rapport suggesties gedaan om metingen te optimaliseren. Van belang is om eerder in het jaar te starten met meten om te kunnen onderzoeken hoe de bodemtemperatuur gedurende voorjaar en zomer ontwikkelt.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de zomer van 2018 is grootschalige kokkelsterfte (*Cerastoderma edule*) opgetreden in de Oosterschelde en de Waddenzee (Troost en van Asch 2018). Vermoedelijk heeft dit te maken met het optreden van te hoge temperaturen op de droogvallende platen waar kokkels zich ingraven en overtijden tijdens laagwater. Vanuit Programmatische Aanpak ecologie Grote Wateren (PAGW) wordt, op initiatief van beide ministers I&W en LNV, gewerkt aan het robuuster maken van de natuur in grote wateren van Nederland als ook de intergetijden natuur in de Oosterschelde. In de Oosterschelde vormen intergetijdengebieden een belangrijk habitat voor talrijke soorten die zijn beschermd binnen Natura 2000, vooral vanwege de foerageerfunctie voor steltlopers en als rustgebied voor zeehonden. I&W en LNV hebben de ambitie om met regionale partijen projecten te starten, gericht op het compenseren van zandhonger en zeespiegelstijging door het suppleren van intergetijdengebieden. Daarnaast zijn in het verleden al meerdere suppleties uitgevoerd met dit doel zoals onlangs de Roggenplaatsuppletie in de winter van 2019/2020 en eerder al de veiligheidsbuffer Oesterdam (2013) en de Galgeplaatsuppletie (2008).

1.2 Aanleiding

Naast zeespiegelstijging is opwarming en het vaker voorkomen van warme of tropische dagen ook een, door klimaatverandering gedreven factor, welke het ecologisch functioneren van intergetijdengebieden kan veranderen. Aangezien behoud van intergetijdengebieden hoog op de agenda staat en het rijk de ambitie heeft om hiervoor middelen te gaan investeren, is het ook van belang te weten hoe temperatuur de kwaliteit van het bodemleven – en daarmee de foerageerfunctie – kan beïnvloeden. In de zomer van 2018 vond grootschalige sterfte plaats onder kokkels in de Oosterschelde (en ook in de Waddenzee zoals werd geconstateerd na bestandschattingen in het voor- en najaar vanuit LNV-gefinancierd onderzoek binnen de Wettelijke Onderzoekstaken (WOT) door Troost en van Asch, 2018. Op zich is het niet ongebruikelijk dat de kokkelpopulatie te maken krijgt met zomersterfte door o.a. (te) hoge temperaturen. Uit analyse over meerdere jaren wordt aangenomen dat de gemiddelde sterfte van kokkels in de periode 1 mei tot 1 september 28% bedraagt (Kamermans et al. 2003; Twisk 1990). Vaak vindt sterfte plaats onder twee- en meerjarige kokkels die in de zomermaanden een mindere conditie kennen als gevolg van gewichts- en daarmee energieverlies door voortplanting. Eenjarige kokkels planten meestal niet voort in het eerste jaar. De mate van impact van hoge temperaturen op de populatie en het herstel hiervan hangt dan ook samen met het moment van voortplanten en welke jaarklassen in het betreffende jaar voortplanten. Door klimaatverandering kunnen in de toekomst periodes met hoge temperaturen vaker en langer voorkomen. Belangrijk is het daarom om inzicht te krijgen in hoe de bodem temperatuur van intergetijdengebieden zich ontwikkelt en hoe hoog deze oploopt in relatie tot omgevingsfactoren zoals getij, water- en luchttemperatuur, zoninstraling, etc. Daarbij is het van belang om te weten hoe vaak dit in de toekomst gaat plaatsvinden, of er dan voldoende hersteltijd is voor de schelpdierpopulatie en of deze ontwikkelingen in de schelpdierpopulatie het ecologisch functioneren en andere populaties (zoals bijv. N2000 vogelsoorten) in het gebied beïnvloeden. Het ministerie van LNV vindt het van belang dat dit nader wordt onderzocht en heeft Wageningen Marine Research opdracht gegeven om de temperatuuropbouw in de bodem nader te onderzoeken binnen BO-43-021.03-001.

1.3 Onderzoeksvragen

Dit onderzoek is er op gericht om een beeld te krijgen van de temperatuur ontwikkeling in de bovenste sedimentlaag van de droogvallende platen van de Oosterschelde, het belangrijkste leefgebied van

kokkels. Om grip te krijgen op de invloed van droogvalduur op de temperatuur in de bodem en of dit verschillend is voor verschillende sedimenttypes (zand of slib) en verschilt over de west – oost gradiënt zijn voor dit onderzoek zijn daarom de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

1. Wat zijn de globale relaties tussen verloop van de bodemtemperatuur met andere variabelen lucht- en watertemperatuur, instraling, getij en moment van de dag?
2. Heeft droogvalduur een effect op de mate van opwarming van de bodem?
3. Verschillen de temperaturen van bodem en water over een gradiënt van west naar oost, dus tussen de deelgebieden monding, centrale deel en kom? Water in het oostelijk deel verblijft langer in het gebied dan water in het westelijke deel, waar 2 keer per dag vers water de Oosterschelde binnen stroomt.
4. Heeft sedimentsamenstelling (zand/slib) een effect op de mate van opwarming van de bodem?

1.4 Leeswijzer

Deze rapportage kent een klassieke opbouw met een nadere verdieping van de rol van temperatuur van intergetijdengebieden in relatie tot het leven wat er voorkomt (Hoofdstuk 2), Materiaal & Methoden (Hoofdstuk 3), Resultaten (Hoofdstuk 4), Conclusie (Hoofdstuk 5) en Discussie en vervolg (Hoofdstuk 6).

2 Temperatuur van intergetijdengebieden en kokkelsterfte in 2018

Temperatuur is een van de belangrijkste abiotische factoren die de verspreiding van organismen in het intergetijdengebied bepaalt (zie bijvoorbeeld (Helmuth en Hofmann 2001) en referenties daarin). Afhankelijk van verschillende factoren zoals de tijd van de dag (nacht, ochtend, middag, avond), seizoen, weersomstandigheden (zonnig, bewolkt, mistig etc.), watertemperatuur, substraat type (rots, zand, slib) etc. kan de temperatuur van intergetijdengebieden variëren. De organismen die leven op de intergetijdengebieden worden blootgesteld aan snelle en soms extreme temperatuur fluctuaties. Deze organismen kunnen verschillende strategieën hanteren om zich beter te beschermen tegen hitte, kou, uitdroging etc. zoals sluiten van de klep (schelpdieren), ingraven en terugtrekken in poelen. Soms kunnen temperaturen vermoedelijk ook te hoog oplopen.

In de zomer van 2018 vond grootschalige sterfte plaats onder kokkels in de Oosterschelde (Figuur 1) en ook in de Waddenzee zoals werd geconstateerd na herziening van de reguliere WOT bestandsschatting in het najaar van 2019 door Troost en van Asch 2018. In dit onderzoek werd een sterfte vastgesteld van 90% onder de 1-jarige kokkels, 94% onder de 2-jarige kokkels en 96% onder de meerjarige kokkels in de Oosterschelde. In de Waddenzee was de sterfte lager dan in de Oosterschelde en bedroeg 60% onder 2 jarige kokkels en 66% onder meerjarige kokkels. Terwijl onder 1-jarige kokkels in de Waddenzee geen afwijkende sterfte werd geconstateerd, is deze leeftijdsklasse in de Oosterschelde wél massaal gestorven. Uit onderzoek door Kamermans et al. 2003& 2004 bleek dat de sterfte van kokkels over een geheel jaar gemiddeld 59% is (normale gemiddelde zomer sterfte bedraagt 28%) en dat een jaarlijkse sterfte hoger dan 60% incidenteel wordt waargenomen in jaren met strenge winter. De sterfte in de Oosterschelde en Waddenzee is daarom extreem te noemen.

Figuur 1 Lege kokkelschelpen op de Slikken van de Dortsman in de Oosterschelde in de zomer van 2018 (foto door Margriet van Asch, Wageningen Marine Research).

Het achterhalen van oorzaken voor de sterfte was geen onderdeel van het onderzoek door (Troost en van Asch 2018). Wel wordt aangegeven dat het optreden van hoge temperaturen in de warme zomer van 2018 een mogelijke oorzaak is. Het is mogelijk om aan de hand van gemeten temperaturen in lucht en water op verschillende meetstations in Nederland te zien hoe warm het is geweest. Maar er zijn geen

temperaturen gemeten in de bovenste laag van het sediment tijdens laagwater, afgezien van enkele metingen op 2 augustus in de Oosterschelde, door visserijkundig ambtenaar H. Heidekamp. Hierbij werden in het laagje water dat bij laagwater nog op een drooggevalen plaat stond, temperaturen tot 30,9°C gemeten terwijl die dag in Vlissingen een maximum temperatuur van 25,6°C werd gemeten. Dit suggereert dat de temperatuur in het water dat bij laagwater nog op de plaat staat mogelijk hogere waarden kan bereiken dan de omringende luchttemperatuur, waarschijnlijk afhankelijk van de hoeveelheid zonnestraling. Voor kokkels kan een temperatuur van boven de 30 graden bij een tijdsduur van 6 uur al lethaal zijn (Verdelhos et al. 2015). Bij hogere bodemtemperaturen wordt de lethale blootstellingsduur snel korter: 2 uur bij 35 graden in laboratorium setting (persoonlijke communicatie Zhengquan Zhou).

3 Materiaal en methoden

3.1 Selectie van meetlocaties

Om de verschillende onderzoeksvragen te beantwoorden zijn meetlocaties geselecteerd in de Oosterschelde. Uitgangspunten daarbij waren:

- Aanwezigheid van hoogtegradiënt, zodat de eventuele effecten van droogvalduur op de mate van opwarming van de bodem onderzocht kunnen worden.
- Geografische verspreiding over de Oosterschelde, zodat vastgesteld kan worden of water- en bodemtemperaturen verschillen over een gradiënt van west naar oost (deelgebieden monding, centrale deel en kom).
- Verschillende sedimentsamenstellingen (bijv. zandig, slibbig), zodat de invloed van sedimentsamenstelling op de mate van opwarming van de bodem geanalyseerd kan worden.

Met behulp van een hoogte- en geomorfologische kaart (2016) (data: Rijkswaterstaat) zijn zes meetlocaties geselecteerd (Tabel 1).

Op elke locatie is een raai uitgezet langs de hoogtegradiënt (m.u.v. de Galgeplaat suppletie) (Figuur 2, Figuur 3, Figuur 4, Tabel 1). Op deze raaien zijn de meetpunten gekozen op 10, 24, 36, 52, 66 en 80% gemiddelde droogvalduur¹, gebaseerd op bathymetrie kaarten voor de Oosterschelde uit 2016 (data: Rijkswaterstaat). Deze meetpunten zijn zo gekozen omdat ze overeenkomen met de droogvalduur percentages zoals die in het NWO onderzoeksproject EMERGO (Eco-morphological functioning and management of tidal flats) zijn bepaald om voldoende onderscheidend te kunnen zijn. Op de raai op de Galgeplaat suppletie zijn meetpunten met afwijkende droogvalduurpercentages gekozen, namelijk 36, 46, 49, 55, 56 & 58%. Deze raai loopt over de in 2008 aangelegde suppletie (zand ophoging), waardoor een natuurlijke hoogte gradiënt ontbreekt. Hier is gekozen voor een raai op de zeer beperkte hoogte gradiënt van het nattere naar het drogere deel.

Tabel 1 Overzicht van het aantal geselecteerde meetpunten per meetlocatie en de bijbehorende droogvalduur.

	Monding	Centrale deel			Kom		
Droogvalduur %	Roggenplaat	Galgeplaat	Galgeplaat suppletie	Dortsman	Rattekaai	Oesterdam	Totaal
80				1	1	1	3
66				1	1	1	3
52	1	1		1	1	1	5
36	1	1		1	1	1	5
24	1	1		1	1	1	5
10	1	1		1	1	1	5
Overig			6*				6
Totaal	4	4	6	6	6	6	32

*de raai op de Galgeplaat suppletie heeft afwijkende droogvalduur namelijk 36, 46, 49, 55, 56 & 58%.

¹ Droogvalduurpercentages zijn een berekend jaarlijks gemiddelde.

Figuur 3 Kaart meetlocatie Roggenplaat in de monding o.b.v. droogvalduurpercentages. Zwarte zeshoeken representeren de meetpunten. De gewenste droogvalduren zijn aangegeven met rood, in een gradiënt van lage droogvalduren in donkerblauw naar hoge droogvalduren in bruin

Figuur 2 Kaart meetlocaties "centrale deel" o.b.v. droogvalduurpercentages. Zwarte zeshoeken representeren de meetpunten. De gewenste droogvalduren zijn aangegeven met rood, in een gradiënt van lage droogvalduren in donkerblauw naar hoge droogvalduren in bruin. Linksboven: raai Galgeplaat suppletie, linksonder: Galgeplaat en rechts: Dortsman.

Figuur 4 Kaart meetlocaties "Kom" o.b.v. droogvalduurpercentages. Zwarte zeshoeken representeren de meetpunten. De gewenste droogvalduren zijn aangegeven met rood, in een gradiënt van lage droogvalduren in donkerblauw naar hoge droogvalduren in bruin. Links: raai Rattekaai (Kom 2) en rechts: Oesterdam (Kom 1).

3.2 Plaatsing van de loggers & gebruikte materialen

Voor het meten van de bodemtemperatuur zijn tussen 5 en 22 augustus 2019 temperatuurloggers (Hobo Onset type mx2201, $\pm 0,5^\circ\text{C}$ nauwkeurig) geplaatst op de meetlocaties. De loggers zijn d.m.v. kabelbinders vastgezet bovenaan een 50 cm lange bamboe stok, welke voorzichtig in de grond werd gedrukt (Figuur 5). De bovenkant van de bamboe werd gelijk gehouden aan het maaiveld. Dit is gedaan om erosie (*ontgronding*) rondom de stok zoveel mogelijk te voorkomen en ook te voorkomen dat wieren zoals zeesla vast kwamen te zitten aan de stok en de metingen zouden beïnvloeden. De loggers werden op 3cm diepte geplaatst. Op 1 meter ten noorden van de loggerbamboe is een tweede bamboe (10cm uitstekend boven maaiveld) in de grond gedrukt. Deze stok diende als markering om het terugvinden van de ingegraven bamboe met logger te vergemakkelijken. De loggers maten de bodemtemperatuur met een interval van 5 minuten. De meetpunten zijn op het moment van inzetten gekarakteriseerd door het nauwkeurig bepalen van de x,y-positie en hoogte met een hoge precisie GPS (Trimble® R8s GNSS receiver i.c.m. TSC3 controller). Na een meetperiode van ruim 2 maanden met verscheidene tropische² dagen zijn de loggers en referentiepalen tussen 2 oktober en 18 november 2019 uit het veld gehaald, waarna de loggers zijn uitgelezen.

Bij ieder meetpunt zijn sediment monsters genomen om de sedimentsamenstelling van de bovenste 3cm te bepalen. Van deze sedimentmonsters is het natgewicht bepaald (direct uit het veld) en het drooggewicht (na vriesdrogen met Alpha 1-4 LSCbasic), waarna ze geanalyseerd zijn op korrelgrootteverdeling (Malvern Mastersizer 2000, serie nummer 34403/139, model APA 2000 i.c.m. Malvern Autosampler, model ASA 2000).

² Terminologie overeenkomstig met het KNMI:

- warme dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 20°Celsius
- zomerse dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 25°Celsius
- tropische dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 30°Celsius

Figuur 5 Logger in veldsituatie aan het eind van de meetperiode op meetlocatie Roggenplaat. Logger zit nog onder het maaiveld. Alleen de kabelbinder is bovengronds zichtbaar. Inzet: logger aan bamboe stok bevestigd.

3.3 Gebruik van datasets

Om het patroon in bodemtemperatuur te verklaren, zijn extra gegevens gedurende de meetperiode verzameld. Ten eerste de luchttemperatuur (in 0,1 graden Celsius op 1.50 m hoogte tijdens de waarneming) en globale instraling of 'radiation' (in J/cm²) per uurvak op KNMI station Wilhelminadorp (<https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>, 07/11/2019). Ten tweede de temperatuur van het oppervlaktewater op Rijkswaterstaat meetlocaties Marollegat) en Oosterschelde 4, met een meetinterval van 10 minuten (waterinfo.rws.nl/#!/bulkdownload/, 04/11/2019). En als laatste de gemeten waterhoogten oppervlaktewater t.o.v Normaal Amsterdams Peil op de Rijkswaterstaat meetpalen Oosterschelde 4 (o & b), Stavenisse en Marollegat, met een meetinterval van 10 minuten (waterinfo.rws.nl/#!/bulkdownload/, 04/11/2019).

3.4 Analyse

Voor analyse van de bodemtemperatuurdata heeft een tweetraps voorselectie plaatsgevonden. Ten eerste is de meetperiode per temperatuurlogger beperkt tot de periode die start de eerste middernacht na het moment van inzet en die eindigt de laatste middernacht voor het moment van uithaal. Hiermee worden metingen buiten de veldsituatie tijdens transport uitgesloten. Ten tweede is een periode bepaald waarin alle loggers gemeten hebben en dus met elkaar vergeleken kunnen worden. Immers, loggers zijn niet op precies hetzelfde tijdstip ingezet en uitgethaald en een enkele logger is gaandeweg de meetperiode defect geraakt. Werkbare periode na voorselectie: 23 augustus tot en met 1 oktober 2019. Na deze voorselectie is een selectie gemaakt van twee opvolgende hete dagen die nader bekeken werden om het temperatuursverloop te begrijpen. Hierbij is gekozen voor de eerste twee dagen van de hittegolf

eind augustus 2019 (d.i. 23 en 24 augustus 2019). Op beide dagen valt het laagwater 's nachts en midden op de dag, waardoor het aannemelijk is dat op deze dagen ook de eventuele effecten van instraling door felle zon op de bodemtemperatuur meetbaar moeten zijn. Bij het analyseren van de bodemtemperatuur per meetpunt wordt de luchttemperatuur en instraling van KNMI meetstation Wilhelminadorp gebruikt omdat dit het enige station rondom de Oosterschelde is waar deze beide parameters tegelijkertijd gemeten worden. Daarbij wordt de gemiddelde watertemperatuur van Marollegat (gemiddelde van RWS meetpunten Marollegat o & b) gebruikt, omdat deze nauwelijks afweek van die van de Oosterschelde 4 (gemiddelde van RWS meetpunten Oosterschelde 4 o & b). Voor het vergemakkelijken van de interpretatie worden gemeten getijdedata verminderd met de gemeten meetpunthoogte. Dit resulteert in een relatieve waterhoogte per meetpunt, die in de tijd de loop van de getijcurve volgt, en direct laat zien hoe hoog de waterlaag op dat meetpunt is (positief = inundatie, negatief = laag water).

Om de overeenkomsten dan wel verschillen in het temperatuurverloop bij verschillende droogvalduren op een meetlocatie te bepalen, zijn de bodemtemperaturen van alle gemeten droogvalduren per locatie met elkaar vergeleken.

Om de overeenkomsten dan wel verschillen in het temperatuurverloop tussen de deelgebieden (monding, centrale deel en kom) bij gelijke droogvalduur te bepalen, zijn de bodemtemperaturen van gelijke droogvalduur van alle meetlocaties met elkaar vergeleken.

Om de effecten van sedimentsamenstelling op de bodemtemperatuur te bepalen zijn de mediane korrelgrootte (D50), slib fractie <63µm en de "*dry bulk density*" (droge sedimentdelen per volume-eenheid) van de meetlocaties met elkaar vergeleken.

4 Resultaten

4.1 Slaagratio van de loggers

De temperatuurloggers zijn in oktober en november 2019 uit het veld gehaald en uitgelezen. Van de 30 geplaatste loggers zijn er 29 teruggevonden; een logger op de suppletie van de Galgeplaat ("Galgeplaat suppletie 3") werd niet teruggevonden. Daarnaast zijn er 3 loggers vroegtijdig gestopt met meten: 24% en 66% droogvalduur op Rattekaai en 10% droogvalduur op de Roggenplaat. De overige 26 loggers zijn meegenomen in de analyse. Karakteristieken van de meetpunten, waaronder meetperiode, ingemeten locatie en hoogte en de sediment karakteristieken zijn terug te vinden in Bijlage 1.

4.2 Globale relaties van verloop bodemtemperatuur met andere variabelen

De bodemtemperatuur op 3 cm diepte gaat op en neer gedurende de dag en lijkt afhankelijk van de lucht- en watertemperatuur, instraling en droogvalduur (Figuur 6 als voorbeeld, temperatuurcurves van alle meetpunten afzonderlijk zijn te vinden in bijlage 2, Figuur 12 tot en met Figuur 25). Om de globale relatie van de bodemtemperatuur met instraling en lucht- en watertemperatuur beter te begrijpen is voor een eerste analyse het verloop in bodemtemperatuur op 23 en 24 augustus vergeleken tussen 3 meetpunten met drie contrasterende droogvalduren (24%, 52% en 80%) op meetlocatie Dortsman. Op verschillen tussen droogvalduren wordt in de volgende paragraaf nader ingezoomd.

Op het meetpunt met 24% droogvalduur (Figuur 6a) zien we achtereenvolgens de volgende fases (de nummering hieronder correspondeert met de nummering in de figuur:

- 1) *Laag water 's nachts*: bodemtemperatuur daalt door de koude luchttemperatuur.
- 2) *Inundatie begin van de dag*: luchttemperatuur en instraling lopen snel op, bodemtemperatuur daalt nog even en stijgt daarna in een paar uur tijd tot aan de watertemperatuur.
- 3) *Laag water overdag*: instraling heeft een hoogtepunt bereikt en neemt af, luchttemperatuur zit stabiel op het dagmaximum van 27.5°C, bodemtemperatuur loopt relatief snel op van de watertemperatuur tot enkele graden boven de luchttemperatuur. Bodemtemperatuur is circa 5 uur hoger dan de watertemperatuur.
- 4) *Inundatie einde van de dag*: luchttemperatuur en instraling nemen snel af, bodemtemperatuur zakt snel mee tot aan de watertemperatuur, maar blijft tijdens de daling tot enkele graden boven de luchttemperatuur.
- 5) *Inundatie gedurende de nacht*: bodemtemperatuur is stabiel gezakt tot de watertemperatuur.
- 6) *Laag water 's nachts*: bodemtemperatuur daalt als gevolg van de koelere luchttemperatuur.
- 7) *Inundatie begin van de dag*: luchttemperatuur en instraling lopen snel op, bodemtemperatuur daalt nog even en stijgt daarna in een paar uur tijd tot aan de watertemperatuur.
- 8) *Laag water overdag*: instraling is sterk en neemt al af, luchttemperatuur zit net onder het dagmaximum van 28.7°C, bodemtemperatuur loopt snel op van de watertemperatuur tot net onder de luchttemperatuur.
- 9) *Inundatie einde van de dag*: luchttemperatuur en instraling nemen snel af, bodemtemperatuur zakt snel mee tot aan de watertemperatuur.

Op het meetpunt met 52% droogvalduur (Figuur 6b) zien we dezelfde fases. Daarbij zien we de volgende verschillen met Figuur 6b (24%) (de nummering hieronder correspondeert met de nummering in de figuur):

- 2) *Inundatie begin van de dag*: bodemtemperatuur stijgt ook tot watertemperatuur, maar deze periode is korter dan bij 24% droogvalduur.

- 3) *Laag water overdag*: bodemtemperatuur loopt ook snel op tot enkele graden boven de luchttemperatuur en blijft een paar uur op deze maximale waarde van 28.9°C. Bodemtemperatuur blijft gedurende circa 10 uur boven de water- en luchttemperatuur.
- 4) & 9) *Inundatie einde van de dag*: Bodemtemperatuur daalt langzaam na inundatie, stijgt daarna weer even licht om vervolgens sterk te dalen tot de watertemperatuur. De bodemtemperatuur lijkt het patroon van de luchttemperatuur en instraling te volgen maar met een paar uur vertraging.
- 5) *Inundatie gedurende de nacht*: Periode dat de bodemtemperatuur gelijk is aan de watertemperatuur is zeer kort.
- 7) *Inundatie begin van de dag*: bodemtemperatuur daalt ook hier nog even na inundatie.
- 8) *Laag water overdag*: bodemtemperatuur loopt snel en blijft >3 uur stabiel op 30°C.

Bodemtemperatuurverloop op het meetpunt met 80% droogvalduur (Figuur 6c) lijkt veel op het meetpunt met 52% droogvalduur (Figuur 6b), afgezien van de volgende verschillen (de nummering hieronder correspondeert met de nummering in de figuur):

- 2) *Inundatie begin van de dag*: bodemtemperatuur lijkt bijna in 1 keer door te stijgen van de minimale nachtwaarde naar de maximale dagwaarde
- 3) *Laag water overdag*: bodemtemperatuur loopt ook snel op tot enkele graden boven de luchttemperatuur en blijft een paar uur op deze maximale waarde (>3 uur stabiel op 30°C), waarna hij met een uur vertraging de daling in luchttemperatuur en instraling volgt tot het moment van inundatie. Bodemtemperatuur blijft ~12 uur boven de water- en luchttemperatuur
- 4) & 8) *Inundatie einde van de dag*: Bodemtemperatuur daalt eerst na inundatie om vervolgens te stijgen tot de temperatuur voor inundatie

A

B

C

Figuur 6 Bodemtemperatuurcurve op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Dortsman. A, B en C geven data weer van de meetpunten met respectievelijk 24%, 52% en 80% droogvalduur. T_{air} (blauw-groene lijn) is de luchttemperatuur (Celsius) van het KNMI weerstation Wilhelminadorp. T_{water} (lichtblauwe lijn) is de watertemperatuur (graden Celsius) gemeten op de RWS meetpaal Marollegat. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur (graden Celsius) op 3cm diepte. Water level (grijze lijn, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water). Radiation (donkerblauwe lijn, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon in J/cm² per uurvak op KNMI station Wilhelminadorp.

4.3 Effect van droogvalduur

Tijdens inundatie lijkt de bodemtemperatuur beïnvloed te worden door de watertemperatuur. 's Nachts stijgt de temperatuur van de koudere bodem bij inundatie tot aan de watertemperatuur, terwijl overdag de opgewarmde bodem juist zakt tot aan de watertemperatuur (Figuur 7 en Figuur 8). Na droogvallen overdag stijgt de bodemtemperatuur relatief snel onder invloed van de hogere luchttemperatuur en instraling. Dit patroon is terug te vinden op alle locaties en bij alle droogvalduren. Echter, de mate en duur van opwarming van de bodem verschillen per droogvalduur. Bij een gemiddelde droogvalduur van 10% (Roggenplaat, Galgeplaat, Rattekaai en Oesterdam) stijgt de bodemtemperatuur relatief langzaam van 15 graden tot maximaal 22 a 23 graden, enkele graden boven de watertemperatuur en blijft altijd onder de luchttemperatuur. Naarmate de bodem langer droogvalt (hogere droogvalduren) warmt de bodem over het algemeen sneller op en blijft langer warm, met hogere temperaturen bij een langere droogvalduur. Bij 24%, 36% en 52% droogvalduur loopt de bodemtemperatuur op van 15 graden tot boven de 25 graden, maar blijft veelal beneden de 30 graden Celsius. Uitzondering hierop is de bodemtemperatuur bij het meetpunt met 36% droogvalduur op de Roggenplaat, deze overstijgt de 30 graden, terwijl het meetpunt met 52% droogvalduur op dezelfde locatie daar ver onder blijft. Een tweede uitzondering wordt gevonden op de Galgeplaat bij het meetpunt met een droogvalduur van 52%, waar op 24 augustus 2019 een bodemtemperatuur van boven de 30 graden Celsius gemeten wordt. Droogvalduren van 66 en 80% lijken een garantie om op warme dagen³ een opbouw van de bodemtemperatuur tot boven 30 graden te bereiken (Rattekaai en Dortsman). De Oesterdam (66%) vormt hier een uitzondering op, deze warmt niet zo hoog op.

Tijdens het nachtelijke laagwater daalt de bodemtemperatuur overal onder invloed van de luchttemperatuur tot de volgende inundatie. Afkoeling van de bodem 's nachts gaat vele malen langzamer dan opwarming overdag. Mogelijk dat deze afkoeling bij een lagere luchttemperatuur in de nacht sneller gaat. Meetpunten met een korte droogvalduur (10%) koelen dan ook maar weinig af, waar bij langere droogvalduur de bodemtemperatuur de luchttemperatuur vaak op enkele graden benadert. Meetpunten met de langste droogvalduur (80%) koelen af tot aan de luchttemperatuur.

³ Terminologie overeenkomstig met het KNMI:

- warme dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 20°Celsius
- zomerse dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 25°Celsius
- tropische dag = dag met dagmaximum luchttemperatuur boven de 30°Celsius

Figuur 7 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Roggenplaat (boven), Galgeplaat (midden) en Galgeplaat suppletie (onder). Per locatie zijn de curves voor de aanwezige droogvalduren geplot (verschillende kleuren), alsmede de luchttemperatuur (T_{air}), de watertemperatuur (T_{water}) en de instraling (radiation J/cm²).

Figuur 8 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Dortsman (boven), Rattekaai (midden) en Oesterdam suppletie (onder). Per locatie zijn de curves voor de aanwezige droogvalduren geplot (verschillende kleuren), alsmede de luchttemperatuur (T_{air}), de watertemperatuur (T_{water}) en de instraling (radiation J/cm²).

4.4 Effect van locatie: kom, centrale deel en monding

Verschillen tussen bodemtemperatuur en het verloop daarin tussen locaties blijken gering of afwezig. Bij 80% droogvalduur (Dortsman (centrale deel) en Rattekaai (kom)) (Figuur 10) zijn de bodemtemperatuurcurves nagenoeg identiek. Daarentegen is deze overeenkomst tussen de Kom en het centrale deel niet aanwezig bij 66% droogvalduur. Het meetpunt op de Dortsman warmt tijdens laagwater overdag namelijk een paar graden hoger op dan het meetpunt op de Oesterdam (kom). Ook bij 52% droogvalduur is dit het geval. Temperatuurcurves van de meest westelijke (Roggenplaat (monding)) en oostelijke (Oesterdam) meetlocaties zijn bij 52% droogvalduur nagenoeg identiek aan elkaar, terwijl temperaturen van de centrale locaties Dortsman en Galgeplaat (centrale deel) en komlocatie Rattekaai enkele graden hoger zijn. Eenzelfde trend is bij 36% droogvalduur niet terug te vinden (Figuur 9). Hier worden op de meest westelijk en oostelijke locaties juist de hoogste temperaturen gemeten i.p.v. de laagste. Ook bij de korte droogvalduurperiodes 10 en 24% worden geen grote verschillen in temperatuuropbouw waargenomen tussen locaties in de kom en de monding van de Oosterschelde. Meetlocaties in de kom (Oesterdam en Rattekaai) lijken langzamer en minder ver af te koelen tijdens laagwater dan de andere locaties. Mogelijk is dit een effect van een hogere watertemperatuur in de kom. Watertemperaturen bij droogvalduren van 10 tot 52% zijn in de kom tijdens de inundatieperiode namelijk tot enkele graden hoger dan in het centrale gedeelte en de bij de monding van de Oosterschelde (Rijkswaterstaat en eigen data).

Figuur 9 Bodemtemperatuurcurves per droogvalduur op 23 en 24 augustus 2019. Per droogvalduur zijn de curves voor de verschillende meetlocaties geplott (verschillende kleuren), alsmede de luchttemperatuur (T_{air}), de watertemperatuur (T_{water}) en de instraling (radiation J/cm²).

Figuur 10 Bodemtemperatuurcurves per droogvalduur op 23 en 24 augustus 2019. Per droogvalduur zijn de curves voor de verschillende meetlocaties geplot (verschillende kleuren), alsmede de luchttemperatuur (T_{air}), de watertemperatuur (T_{water}) en de instraling (radiation J/cm²).

4.5 Effect van sediment type

De sedimentsamenstelling van de meetlocaties is zandig van aard (Figuur 11). Alle locaties met uitzondering van de Oesterdam kunnen worden geclassificeerd als fijn zand (125 – 250, Wentworth classificatie (Wentworth 1922)), de Oesterdam wordt geclassificeerd als zeer fijn zand (62.5 – 125 μm). Opvallend is dat de meetlocaties op de intergetijdeplaten (Roggenplaat en Galgeplaat) veel homogener zijn van samenstelling dan de meetlocaties op de slikken zoals Dortsman en Rattekaai. Opgemerkt moet worden dat de Roggenplaat en Galgeplaat ook de hoge droogvalduurklassen missen, die iets vaak wat slibrijker en minder zandig blijken (Tabel 2, Bijlage 1). Fijn zand locaties hebben ook een laag slibgehalte (0-10% van het totaal). Op de meetpunten van de Oesterdam worden daarentegen slibgehaltenes van 10 tot 44% gevonden, oplopend van 66 tot 10% droogvalduur. Mogelijk dat het slibrijke karakter van de Oesterdam kan verklaren dat de temperaturen bij 66% droogvalduur enkele graden lager liggen t.o.v. de Dortsman en deels het langer vasthouden van de bodemwarmte bij laagste droogvalduren.

Figuur 11 Mediane korrelgrootte D50 (μm) en slibfractie kleiner dan 63 μm weergegeven per meetlocatie. Gemeten in de bovenste 3cm van het sediment op moment van inzet van de loggers. Weergave in boxplots.

Daarbij is de *dry bulk density* van het sediment op de Oesterdam ook lager dan voor de andere locaties, welke meer overeenkomen (Figuur 26 in Bijlage 2). In zandige sedimenten is de *dry bulk density* een maat voor de compactheid en porositeit van het sediment en wordt berekend als het drooggewicht van de sedimentdelen gedeeld door het volume van het sample. Bij een hoge *bulk density* zitten er veel sedimentdeeltjes per volume eenheid en is er weinig ruimte tussen de deeltjes (lage porositeit). Het sediment is dan zeer compact en bevat weinig water. Bij een lage *bulk density* zitten er weinig sedimentdeeltjes per volume eenheid en is er dus veel ruimte tussen de deeltjes (hoge porositeit). Het sediment is dan niet compact en bevat veel water. Een lage *bulk density* wordt ook gevonden als het sediment een hoog gehalte aan klei, slib of organisch materiaal bevat, omdat deze sedimentdeeltjes minder wegen dan zanddeeltjes. Een lage *bulk density* in deze sedimenten gaat ook gepaard met veel water tussen de sedimentdelen.

5 Conclusie

In dit onderzoek zijn de bodemtemperaturen op droogvallende delen van de Oosterschelde onderzocht. De conclusie van dit onderzoek wordt opgebouwd aan de hand van globale patronen die zichtbaar waren en de onderzoeksvragen.

5.1 Globale relaties van verloop bodemtemperatuur met andere variabelen

Wat zijn de globale relaties tussen verloop van de bodemtemperatuur met andere variabelen lucht- en watertemperatuur, instraling, getij en moment van de dag?

Globale patronen die te herkennen zijn op basis van deze eerste analyse van twee warme dagen op 23 en 24 augustus:

- De watertemperatuur lijkt gedurende de inundatiefase de bodemtemperatuur te bufferen: tijdens inundatie stijgt ('s nachts) of zakt (overdag) de bodemtemperatuur tot de watertemperatuur.
- Tijdens laagwater lijkt de bodemtemperatuur het patroon van de luchttemperatuur en instraling te volgen met een vertraging van 1 a 2 uur.
- De bodemtemperatuur kan tijdens laag water overdag tot 5 graden boven de luchttemperatuur uitstijgen vermoedelijk door instraling.
- 's Nachts valt de bodemtemperatuur beneden de watertemperatuur, maar blijft boven of gelijk aan de luchttemperatuur.

5.2 Effect van droogvalduur

Heeft droogvalduur een effect op de mate van opwarming van de bodem?

Hoe korter de droogvalduur is, hoe groter de buffering van het water is op de bodemtemperatuur. De tijdspanne is dan gering om tijdens droogvallen sterk op te warmen door een hogere luchttemperatuur en instraling (overdag) of af te koelen bij een lagere luchttemperatuur ('s nachts). Dit resulteert in geringe verschillen (6 a 8 graden) tussen de minimum en maximum temperaturen op de onderzochte warme dagen. Met toenemende droogvalduur wordt de tijdspanne langer, waardoor ook de mogelijkheid tot opwarmen dan wel afkoelen toeneemt. Bodemtemperaturen waaraan kokkels blootgesteld worden, lopen op tot boven de 30 graden en het verschil in minimum en maximum temperaturen ligt rond de 15 graden. De periode waarover minimum en maximum bodemtemperaturen worden gemeten is over het algemeen langer. Middellange droogvalduur (36 & 52%) lijkt al voldoende om een maximumtemperatuur van meer dan 30 graden Celsius te bereiken, een temperatuur die na 6 uur al lethaal voor kokkels blijkt (Verdelhos et al. 2015).

5.3 Effect van locatie: kom, centrale deel en monding

Verschillen de temperaturen van bodem en water over een gradiënt van west naar oost, dus tussen de deelgebieden monding, centrale deel en kom?

Verschillen tussen bodemtemperatuurmaximum en het verloop daarin tussen locaties in de verschillende deelgebieden kom, centrale deel en monding blijken over het algemeen gering of afwezig. De meest oostelijke locatie Oesterdam bereikt een paar graden lagere maximum temperatuur t.o.v. de andere locaties. Locaties in de kom (Oesterdam en Rattekaai) lijken langzamer en enkele graden minder ver af

te koelen tijdens laagwater ten opzichte van de meer westelijke locaties. Mogelijk dat het meer slibrijke karakter van de locaties in de kom dit kan verklaren (volgende paragraaf) of de enkele graden hogere watertemperatuur in de kom t.o.v. de monding.

5.4 Effect van sedimentsamenstelling

Heeft sedimentsamenstelling (zand/slib) een effect op de mate van opwarming van de bodem?

De meetlocaties worden allen geclassificeerd als fijn zand, de Oesterdam als zeer fijn zand. Laatstgenoemde heeft een hoger slibgehalte en een lagere *dry bulk density* t.o.v. alle andere locaties. Platen lijken wat uniformer qua sedimentsamenstelling dan slikken. Een slibrijker sedimenttype warmt tijdens droogvallen overdag enkele graden minder warm op t.o.v. een zandiger sedimenttype en koelt bij een korte droogvalduur tot 52% tijdens inundatie enkele graden minder ver af.

6 Discussie en vervolg

6.1 Verloop bodemtemperatuur in relatie tot andere variabelen

Het temperatuurverloop in de bodem op 3cm diepte is mede door de hoge meetresolutie (1 meting elke 5 minuten) en geografische spreiding op en over de meetlocaties nauwkeurig in kaart gebracht. Tijdens inundatie wordt de bodemtemperatuur sterk beïnvloed door de watertemperatuur. Zodra dat het water de plaat op stroomt, wordt warmte uitgewisseld tussen de waterlaag en de bodem (Kim et al. 2010; Pivato et al. 2018). Net als bij andere ondiepe kustwateren past de bodemtemperatuur zich aan, na inundatie en indien de inundatieperiode lang genoeg is, aan de watertemperatuur (Kim et al. 2010; Serôdio en Catarino 1999). De mate van afkoeling, dan wel opwarming door het water hangt sterk af van het verschil in lucht- en watertemperatuur op het moment van het jaar. Op warme dagen, zoals hier onderzocht, kan het temperatuurverloop in de bodem tot boven de 15 graden oplopen. Daarentegen, als de water- en luchttemperatuur op een ander moment in het jaar nagenoeg gelijk zijn, zal dit verloop slechts enkele graden zijn.

In deze studie zijn globale relaties gelegd tussen het verloop van de bodemtemperatuur en water- en luchttemperatuur, instraling, getij en moment van de dag. Er kwamen echter ook zaken naar voren waarbij metingen en data niet helemaal overeen lijken te komen. Bij opkomend water aan het begin van een warme gemeten dag (bodem is circa 5 graden kouder dan het water) daalt de bodemtemperatuur structureel nog enige tijd (orde van een uur), enkele graden door terwijl deze locatie volgens getijde data al geïnundeerd zou moeten zijn. Welk proces hieraan ten grondslag ligt is onbekend. De meest plausibele verklaring hiervoor zou een mismatch in berekende en werkelijke timing van overstroming zijn. Een dergelijke mismatch is bij het droogvallen van de meetpunten overdag niet heel duidelijk waarneembaar, ondanks de snelle stijging in bodemtemperatuur (Figuur 6b). Echter zou deze mismatch hier ook mogelijk kunnen zijn, er van uitgaande dat meetpunten op moment van theoretisch droogvallen niet gelijk droog liggen doordat er nog enige tijd run-off van water over de plaat plaatsvindt. De meetpunten zullen dan niet gelijk blootgesteld zijn aan de lucht. Tevens zal het ook even duren voordat instraling de bodem op 3cm diepte opwarmt. Gedurende de inundatie overdag (Figuur 6b) wordt eerst een afname en vervolgens een stijging in de temperatuur waargenomen. Zonder mismatch in tijd is dit verloop moeilijk te verklaren. Met mismatch is dit vrij logisch: het eerste water dat over de sterk opgewarmde platen stroomt warmt sterk op, in de kom van de Oosterschelde tot zelfs boven de 37 graden Celsius (persoonlijke observaties W. Suykerbuyk), waardoor de bodemtemperatuur ook nog even meestijgt. Een dergelijk grote, tijdelijke verhoging in watertemperatuur bij opkomend water is niet terug gevonden in de data verkregen van meetpunt Marollegat. De watertemperatuur varieert slechts 1 tot 2 graden op de gemeten warme dagen. In vervolgonderzoek zouden watertemperaturen beter op locatie en kort bij de bodem gemeten kunnen worden.

6.2 Bodemtemperatuur en overleving van kokkels

Bodemtemperaturen dicht tegen en boven de 30 graden Celsius zijn geen zeldzaamheid in deze studie. Voor kokkels kan een temperatuur van boven de 30 graden bij een tijdsduur van 6 uur al lethaal zijn (Verdelhos et al. 2015). Bij hogere bodemtemperaturen wordt de lethale blootstellingsduur snel korter: 2 uur bij 35 graden in laboratorium setting (persoonlijke communicatie Zhengquan Zhou). Uiteraard kunnen hoge temperaturen ook gevolgen hebben voor andere bodemorganismen. Water in het oostelijk deel verblijft langer in het gebied dan water in het westelijke deel, waar 2 keer per dag vers water de Oosterschelde binnen stroomt. Verwacht werd dat door de langere verblijftijd van het water, bodemtemperaturen mogelijk hoger opgelopen in de kom van de Oosterschelde dan in de monding nabij de kering. In dit onderzoek is dat echter niet waargenomen. Hoge temperaturen worden bereikt bij droogvallen overdag en bij sterke instraling, zoals op de twee in detail bekeken hittedagen in dit

onderzoek (23 en 24 augustus 2018). Het is niet onwaarschijnlijk dat de maximaal haalbare bodemtemperaturen hoger en langer kan zijn dan nu gemeten. Immers, in 2019 zijn er 2 hittegolven gemeten en tot aan 3 november 2019 10 tropische, 12 zomerse en 63 warme dagen op meetstation Wilhelminadorp. De timing van droogvallen speelt waarschijnlijk een belangrijke rol in het bereiken van hoge bodemtemperaturen. Droogvallen midden op de dag kan tot hogere temperatuursopbouw leiden (Serôdio en Catarino 1999). Het is aannemelijk dat de bodem minstens zoveel of meer en langer opgewarmd kan worden op een dag die valt bij springtij rond de langste dag van het jaar. De daglengte is dan minimaal 2.5 uur langer en de instraling 10 tot 20% langer (data KNMI 2019). Een sequentie van warme dagen (20 tot 25 graden) zou dan hetzelfde effect kunnen hebben als een hittegolf later in het jaar. In juni is de watertemperatuur wel lager (~16 graden in juni t.o.v. ~20 graden in augustus), waardoor misschien door een sterkere bufferende werking, de bodemtemperatuur ook langer nodig heeft om hoge temperaturen te bereiken. Of hoge temperaturen aan het begin van de zomer eenzelfde uitwerking hebben op de kokkels valt te bezien. Mogelijk zijn meerjarige kokkels kwetsbaarder tijdens de voortplanting die plaatsvindt van februari tot oktober met een piek tussen mei en juli (Troost en van Asch 2018).

Langere droogvalduur en zandiger sediment leiden tot hogere bodemtemperaturen dan korte droogvalduur en / of slibrijker sediment. Droogvalduur is in deze niet een geheel zuivere maat. Immers, als de grote laag bufferend zeewater weg is tijdens eb, betekent dit niet dat het sediment (gelijk) droog is. Vaak stroomt nog geruime tijd (orde van uren) een dun laagje water van hogere delen over de plaat naar de waterlijn. Of het water blijft in poeltjes staan door de lokale microtopografie. Deze dunne waterlaagjes kunnen niet verhinderen dat de bodem opwarmt, maar vertragen en remmen dit wel (persoonlijke communicatie Zhengquan Zhou). Als het poriewater niet uitzakt, kan als een neveneffect daarvan, zuurstofrijk zeewater bij opkomend tij niet in het sediment infiltreren, waardoor er zuurstofarmere condities heersen (Fivash et al. 2019). Met oplopende anoxia gaan kokkels op ondiepere delen of zelfs aan de oppervlakte zitten (Marsden en Bressington 2009), waar ze mogelijk eerder en langer aan hoge temperaturen worden blootgesteld. Slibrijk sediment (zoals aangetroffen in de kom) houdt van nature water vast. Uitzakken van het poriewater en daarmee de verversing met zuurstofrijk water bij inkomend getij is hier niet of veel minder aan de orde. Mogelijk dat dit resulteert in de geringere temperatuuroopbouw in slibrijke sedimenten ten opzichte van zandige sedimenten (Harrison en Phizacklea 1987), persoonlijke communicatie Zhengquan Zhou, data in dit rapport).

6.3 Vervolg / aanbevelingen

De methode met plaatsing van temperatuurloggers aan bamboestokken en gebruik van markers ter bepaling van de temperatuuroopbouw in de bodem is succesvol gebleken. Van de 30 loggers die zijn geplaatst konden er 29 worden uitgelezen. Daarom biedt deze aanpak een goede basis om in vervolg onderzoek op voort te borduren. De gekozen droogvalduurpercentages van de meetpunten zijn voldoende verschillend binnen een meetlocatie en voldoende gelijk tussen meetlocaties gebleken gebaseerd op de gemeten hoogtes (Bijlage 4).

Hydrologische data (temperatuur en getij) en meteorologische data zouden bij herhaling meer lokaal gemeten kunnen worden voor een gedetailleerder, on-site beeld. Ook is het wenselijk om een langere periode te meten en het hele verloop van voorjaar en zomer in kaart te brengen. Enkele aanbevelingen / overwegingen voor vervolgonderzoek:

- 1) Experiment herhalen en eerder in het seizoen inzetten om 1) tijdens alle mogelijke hittegolven te meten en 2) de bodem- en watertemperatuuroopbouw te bepalen bij langere dagduur en grotere instraling eerder in de zomer
- 2) Gebruik loggers om op de meetlocatie on-site watertemperaturen en het exacte overstromingsmoment te meten
- 3) Overwegen de mate van instraling en effect van bewolking preciezer te bepalen d.m.v. gebruik te maken van wildcams die de wolkenbedekking met een kleinere tijdsinterval on-site kunnen bepalen
- 4) Overwegen om activiteiten meer te concentreren in 1 gebied. Mechanismen lijken vergelijkbaar op alle meetlocaties. Zo kunnen de details van de mechanismes beter ontrafeld worden.

-
- 5) De invloed van sediment type op temperatuuropbouw kan nader onderzocht worden. Een grover sediment type wordt gedacht eerder te draineren waardoor temperatuuropbouw sneller zal gaan. Het effect van poriewater en de verwachte verversing hiervan in poreuzere sedimenten kan ook nader onderzocht worden. Bulk density kan hierbij een goede indicator zijn voor grofheid en porositeit van op elkaar lijkende sedimenten. Echter vergelijk tussen slibrijke, organische sedimenten en zandige sedimenten is bulk density een minder goede indicator en zal een andere parameter gezocht moeten worden.
 - 6) In navolging van het voorgaande punt dient dan ook de natuurlijke afwatering en lokale microtopografie te worden onderzocht. Lange afwatering of aanwezigheid van getijdepoeltjes zouden temperatuuropbouw kunnen bufferen en zuurstofloosheid kunnen bevorderen
 - 7) De diepte van meting zou aangepast kunnen worden. Naar een diepere diepte, indien uit experiment van het NIOZ (PhD onderzoek van Zengquan Zhou) blijkt dat opbouw van hoge bodemtemperaturen gebufferd blijft op een iets grotere diepte. Effecten van hoge temperatuur zouden daar dus langer ervaren kunnen worden, waardoor de risicozone voor kokkels niet alleen tot de bovenste paar cm beperkt blijft.
 - 8) Onderzoek kan uitgebreid worden naar andere systemen waar de massale kokkelsterfte in de zomer van 2018 niet is opgetreden, zoals de Westerschelde. Mogelijk dat mechanismen daar anders werken en extreme opbouw van de bodemtemperatuur uitblijft. Data voor een eerste vergelijking zijn in december 2019 ontvangen van Marco Schrijver (Rijkswaterstaat), maar zijn nog niet geanalyseerd op moment van het schrijven van dit rapport.
 - 9) Het onderzoek koppelen aan lopend onderzoek binnen het WOT programma (KB-WOT) in opdracht van LNV naar kokkelsterfte in de Oosterschelde en eventueel de Waddenzee zodat temperatuurgegevens direct gekoppeld kunnen worden aan gegevens over kokkelsterfte en herstel of uitblijven hiervan. Mogelijk kan dit van voorspellende waarde zijn voor de bestands grootte op middellange termijn.
 - 10) In navolging van het vorige punt, onderzoek uitbreiden naar de korte en middellange termijn effecten van hoge temperaturen op andere schelpdieren en bentische infauna die van belang zijn voor Natura 2000 vogelsoorten en of (schelpdier)visserij.

7 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. Dit certificaat is geldig tot 15 december 2021. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV GL.

Het chemisch laboratorium te IJmuiden beschikt over een EN-ISO/IEC 17025:2017 accreditatie voor testlaboratoria met nummer L097. Deze accreditatie is geldig tot 1 april 2021 en is voor het eerst verleend op 27 maart 1997; deze accreditatie is verleend door de Raad voor Accreditatie. Het chemisch laboratorium heeft hierdoor aangetoond in staat te zijn op technisch bekwaame wijze valide resultaten te leveren en te werken volgens de ISO17025 norm. De scope (L097) met de geaccrediteerde analysemethoden is te vinden op de website van de Raad voor Accreditatie (www.rva.nl).

Op grond van deze accreditatie is het kwaliteitskenmerk Q toegekend aan de resultaten van die componenten die op de scope staan vermeld, mits aan alle kwaliteitseisen is voldaan. Het kwaliteitskenmerk Q staat vermeld in de tabellen met de onderzoeksresultaten. Indien het kwaliteitskenmerk Q niet staat vermeld is de reden hiervan vermeld.

De kwaliteit van de analysemethoden wordt op verschillende manieren gewaarborgd. De juistheid van de analysemethoden wordt regelmatig getoetst door deelname aan ringonderzoeken waaronder die georganiseerd door QUASIMEME. Indien geen ringonderzoek voorhanden is, wordt een tweede lijnscontrole uitgevoerd. Tevens wordt bij iedere meetserie een eerstelijnscontrole uitgevoerd.

Naast de lijnscontroles wordende volgende algemene kwaliteitscontroles uitgevoerd:

- Blanco onderzoek.
- Terugvinding (recovery).
- Interne standaard voor borging opwerkmethode.
- Injectie standaard.
- Gevoeligheid.

Bovenstaande controles staan beschreven in Wageningen Marine Research werkvoorschrift *ISW 2.10.2.105*.

Indien gewenst kunnen gegevens met betrekking tot de prestatiekenmerken van de analysemethoden bij het chemisch laboratorium worden opgevraagd.

Indien sprake is van onbeheerste kwaliteit worden passende maatregelen genomen.

Literatuur

- Fivash, Gregory S, Belzen, Jim van, Temmink, Ralph J M, Didden, Karin, Lengkeek, Wouter, Heide, Tjisse van der, en Bouma, Tjeerd J (2019), 'Elevated micro-topography boosts growth rates in *Salicornia procumbens* by amplifying a tidally driven oxygen pump: implications for natural recruitment and restoration', *Annals of Botany*.
- Harrison, S. J. en Phizacklea, A. P. (1987), 'Vertical temperature-gradients in muddy intertidal sediments in the Forth estuary, Scotland', *Limnology and Oceanography*, 32 (4), 954-63.
- Helmuth, B. S. T. en Hofmann, G. E. (2001), 'Microhabitats, thermal heterogeneity, and patterns of physiological stress in the rocky intertidal zone', *Biological Bulletin*, 201 (3), 374-84.
- Kamermans, P., Kesteloo, J.J., en Baars, D (2003), 'Eindverslag Evaluatie Schelpdiervisserij tweede fase. Deelproject H2: Evaluatie van de geschatte omvang en ligging van de kokkelbestanden in de Waddenzee, de Oosterschelde en de Westerschelde.', *RIVO-rapport C054/03*.
- Kamermans, P., Bult, T, Kater, B, Baars, D, Kesteloo, J, Perdon, J, en Schuiling, E (2004), 'Eindrapport EVA II (Evaluatie Schelpdiervisserij tweede fase). Deelproject H4: Invloed van natuurlijke factoren en kokkelvisserij op de dynamiek van bestanden aan kokkels (*Cerastoderma edule*) en nonnen (*Macoma balthica*) in de Waddenzee, Ooster- en Westerschelde.', *RIVO-rapport C058/03*.
- Kim, T. W., Cho, Y. K., You, K. W., en Jung, K. T. (2010), 'Effect of tidal flat on seawater temperature variation in the southwest coast of Korea', *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 115, 15.
- Marsden, I. D. en Bressington, M. J. (2009), 'Effects of macroalgal mats and hypoxia on burrowing depth of the New Zealand cockle (*Austrovenus stutchburyi*)', *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 81 (3), 438-44.
- Pivato, M., Carniello, L., Gardner, J., Silvestri, S., en Marani, M. (2018), 'Water and sediment temperature dynamics in shallow tidal environments: The role of the heat flux at the sediment-water interface', *Advances in Water Resources*, 113, 126-40.
- Serôdio, João en Catarino, Fernando (1999), 'Fortnightly light and temperature variability in estuarine intertidal sediments and implications for microphytobenthos primary productivity', *Aquatic Ecology*, 33 (3), 235-41.
- Troost, K en van Asch, M (2018), 'Herziene schatting van het kokkelbestand in de Waddenzee en Oosterschelde in het najaar van 2018', (Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO)).
- Twisk, F. (1990), 'Groei en sterfte van overjarige kokkels in de Oosterschelde.', *Rijkswaterstaat DGW, Notitie GWWS-90.13093*.
- Verdelhos, T., Marques, J. C., en Anastacio, P. (2015), 'Behavioral and mortality responses of the bivalves *Scrobicularia plana* and *Cerastoderma edule* to temperature, as indicator of climate change's potential impacts', *Ecological Indicators*, 58, 95-103.
- Wentworth, Chester K. (1922), 'A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments', *The Journal of Geology*, 30 (5), 377-92.

Verantwoording

Rapport C018/20

Projectnummer: 4318100282

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. Karin Troost
Onderzoeker

Handtekening:

Datum: 4 maart 2020

Akkoord: Jakob Asjes
MT-lid integratie

Handtekening:

Datum: 4 maart 2020

Bijlage 1 Meetpunt karakteristieken

Tabel 2 Karakteristieken per meetpunt. Droogvalduur: % gemiddelde droogvalduur op basis van bathymetriekaarten. X,Y,Z: coördinaten (RD coördinatenstelsel) en hoogte bepaald met een hoge precisie GPS. Sedimentkarakteristieken van de bovenste 3 cm sediment: Mediane korrelgrootte, slibfractie kleiner dan 63µm uitgedrukt percentage van het geheel en de dry bulk density uitgedrukt als de hoeveelheid droog sediment per volume eenheid.

Locatie	Droogvalduur	Start meting	Einde meting	X	Y	Z	Mediane korrelgrootte (D50)	Slib fractie <63µm	Dry bulk density
	%	dd/mm/jjjj	dd/mm/jjjj	RD	RD	m NAP	µm	%	gr/cm ³
Roggenplaat	10	14/08/2019	18/11/2019	46132.4	411272.8	-1.227	207.62	3.93	1.41
Roggenplaat	24	14/08/2019	18/11/2019	46134.97	411174	-1.017	195.65	6.14	1.51
Roggenplaat	36	14/08/2019	18/10/2019	46190.38	410921.2	-0.635	194.27	8.72	1.40
Roggenplaat	52	14/08/2019	18/10/2019	46244.41	410594.6	0.061	204.42	0.00	1.44
Galgeplaat	10	08/08/2019	30/10/2019	56070.28	396390.1	-1.431	211.15	0.00	1.25
Galgeplaat	24	08/08/2019	30/10/2019	56104.94	396467	-1.101	165.93	4.27	1.22
Galgeplaat	36	08/08/2019	30/10/2019	56151.39	396533.7	-0.674	173.79	4.27	1.19
Galgeplaat	52	08/08/2019	30/10/2019	56217.63	396646.3	-0.229	174.48	0.00	1.20
Galgeplaat Suppletie 1	36	08/08/2019	30/10/2019	55551.53	397753.7	-0.710	200.68	4.22	1.28
Galgeplaat Suppletie 2	49	08/08/2019	30/10/2019	55555.38	397877.1	-0.314	221.27	3.52	1.39
Galgeplaat Suppletie 4	58	08/08/2019	30/10/2019	55589.08	398142.9	-0.039	212.57	0.00	1.26
Galgeplaat Suppletie 5	56	08/08/2019	30/10/2019	55604.08	398267.7	-0.110	204.40	0.40	1.40
Galgeplaat Suppletie 6	46	08/08/2019	30/10/2019	55614.81	398345.9	-0.407	183.69	6.24	1.37
Dortsman	24	05/08/2019	02/10/2019	59127.41	397316.3	-0.956	180.72	2.52	1.42
Dortsman	36	05/08/2019	02/10/2019	59285.63	397429.9	-0.662	186.95	0.00	1.53
Dortsman	52	05/08/2019	02/10/2019	59689.99	397769.7	-0.022	143.02	5.46	1.36
Dortsman	66	05/08/2019	02/10/2019	59940.58	398034.5	0.647	141.88	0.02	1.26
Dortsman	80	05/08/2019	02/10/2019	60343.92	398459.1	1.167	125.16	4.77	1.48
Rattekaai	10	22/08/2019	03/10/2019	68842	386290.9	-1.533	158.90	9.54	1.41
Rattekaai	36	22/08/2019	03/10/2019	69622.87	385814.2	-0.592	154.90	5.31	1.42
Rattekaai	52	22/08/2019	03/10/2019	70176.9	385730.2	-0.134	155.37	4.24	1.36
Rattekaai	80	22/08/2019	03/10/2019	71319.1	384690.7	1.175	127.30	4.84	1.37
Oesterdam	10	06/08/2019	03/10/2019	73594.2	385463.1	-1.570	73.69	44.02	1.03
Oesterdam	24	06/08/2019	03/10/2019	73639.75	385054.5	-0.971	99.75	34.31	1.06
Oesterdam	36	06/08/2019	03/10/2019	73616.73	384861.2	-0.544	112.70	28.39	1.14
Oesterdam	52	06/08/2019	03/10/2019	73631.23	384654.3	-0.100	125.08	21.30	1.12
Oesterdam	66	06/08/2019	03/10/2019	73659.98	384175.5	0.493	114.78	10.52	1.30

Bijlage 2 Temperatuurcurves

In de hierna volgende bijlages worden de temperatuurcurves gepresenteerd per locatie en droogvalduur. Daarbij wordt de volgende opmaak gehanteerd:

x-as: Tijd in uren, meetdagen 23 en 24 augustus 2019

linker y-as:

- Bodemtemperatuur (T_{sed}) in graden Celsius, oranje lijn
- Watertemperatuur (T_{water}) in graden Celsius, lichtblauwe lijn
- Luchttemperatuur (T_{air}) in graden Celsius, blauwe lijn, groene stippen

Rechter y-as:

- instraling door de zon (radiation in J/cm²) donkerblauwe lijn
- Berekende waterhoogte in cm, grijze lijn. positief = inundatie, negatief = laag water

2.1 Roggenplaat I

Figuur 12 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Roggenplaat. Boven: 24% droogvalduur, onder 36% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.2 Roggenplaat II

Figuur 13 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Roggenplaat. Meetpunt met 52% droogvalduur. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.3 Galgeplaat I

Figuur 14 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Galgeplaat. Boven: 10% droogvalduur, onder 24% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.4 Galgeplaat II

Figuur 15 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Galgeplaat. Boven: 36% droogvalduur, onder 52% droogvalduur.. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.5 Galgeplaat suppletie I

Figuur 16 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Galgeplaat Suppletie. Beide tussen de 36 en 52% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.6

Galgeplaat suppletie II

Figuur 17 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Galgeplaat Suppletie. Beide tussen de 36 en 52% droogvalduur. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.7 Dortsman I

Figuur 18 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Dortsman. Boven: 24% droogvalduur, onder 36% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.8 Dortsman II

Figuur 19 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Dortsman. Boven: 52% droogvalduur, onder 66% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.9 Dortsman III

Figuur 20 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Dortsman. Meetpunt met 80% droogvalduur. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.10 Rattekaai I

Figuur 21 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Rattekaai. Boven: 10% droogvalduur, onder 36% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm^2) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.11 Rattekaai II

Figuur 22 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Rattekaai. Boven: 52% droogvalduur, onder 80% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radiation (in J/cm^2) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.12 Oesterdam I

Figuur 23 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Oesterdam. Boven: 10% droogvalduur, onder 24% droogvalduur. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.13 Oesterdam II

Figuur 24 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Oesterdam. Boven: 36% droogvalduur, onder 52% droogvalduur. T_{sed} (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_{air} is de luchttemperatuur. T_{water} is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

2.14 Oesterdam III

Figuur 25 Bodemtemperatuurcurves op 23 en 24 augustus 2019 op meetlocatie Oesterdam. Meetpunt met 66% droogvalduur. T_sed (oranje lijn) is de bodemtemperatuur op 3cm diepte. T_air is de luchttemperatuur. T_water is de watertemperatuur. Water level (grijs, rechter Y-as) is de berekende waterhoogte in cm in de tijd op het meetpunt (positief = inundatie, negatief = laag water. Radation (in J/cm²) (donkerblauw, rechter Y-as) is de globale instraling door de zon.

Bijlage 3 Dry bulk density

Figuur 26 Dry bulk density in gram droog materiaal per volume eenheid per meetlocatie. Gemeten in de bovenste 3cm van het sediment op moment van inzet van de loggers. Weergave in boxplots.

Bijlage 4 Validatie droogvalduur

Figuur 27 Drogvalduurpercentage van de meetpunten uitgezet tegen de gemeten hoogte t.o.v. NAP, opgesplitst per meetlocatie. Drogvalduurpercentages zijn gebaseerd op GIS bathymetrie kaarten voor de Oosterschelde uit 2016 (data: Rijkswaterstaat). Deze meetpunten zijn zo gekozen omdat ze overeenkomen met de droogvalduur percentages zoals die in het NWO onderzoeksproject EMERGO (Eco-morphological functioning and management of tidal flats) zijn bepaald om voldoende onderscheidend te kunnen zijn. De gemeten hoogtes zijn de hoogtes gemeten bij inzetten van de loggers.

Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 09 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekers adres:

- 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.

Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'