



Hittestress op intergetijdenplaten van de Oosterschelde

Auteur(s): W. Suykerbuyk, L. van den Bogaart, A. Hamer, B. Walles, K. Troost & M. Tangelder

Wageningen University & Research rapport C026/21



Hittestress op intergetijdenplaten van de Oosterschelde

Gecombineerd onderzoek naar bodemtemperatuurmetingen en kokkelsterfte in de zomer van 2020

Auteur(s): W. Suykerbuyk, L. Van den Bogaart, A. Hamer, B. Walles, K. Troost & M. Tangelder

Dit gecombineerde onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Marine Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Natuurambitie Grote Wateren' (projectnummer BO-43-021.03-001) en het kennisbasis onderzoek gekoppeld aan de Wettelijke Onderzoekstaken op het gebied van Visserij (KB-WOT, projectnummer KB-36-002-012).

Wageningen Marine Research
Yerseke, maart 2021

VERTROUWELIJK Nee

Wageningen Marine Research rapport C026/21

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

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

BO-43-021.03-001

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
T.a.v.: Wilbert Schermer Voest
Bezoudehoutseweg 73
2594 AC Den Haag

KB-36-002-012

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/543892>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Droogvallend slik op de Roggenplaat bij inzet van de loggers (11 mei 2020). Voorgrond: net drooggevalen slik met schelpfragmenten. Achtergrond: droger slik met rechtsachter een suppletie (lichte strook). Foto: M. Tangelder

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut
binnen de rechtspersoon Stichting
Wageningen Research, hierbij
vertegenwoordigd door
Dr.ir. J.T. Dijkman, Managing director

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 V30 (2020)

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Aanleiding	7
1.3 Combinatie van twee onderzoekssporen: BO en KB-WOT	8
1.4 Onderzoeksvragen	8
1.5 Leeswijzer	9
2 Temperatuur van intergetijdengebieden en kokkelsterfte	10
3 Methoden	12
3.1 Selectie van meetlocaties	12
3.2 Temperatuurmetingen	13
3.2.1 Plaatsing van de loggers en gebruikte materialen	13
3.2.2 Labverwerking	14
3.2.3 Analyse	14
3.3 Kokkelsampling	15
3.3.1 Monsternamen	15
3.3.2 Labverwerking	15
4 Resultaten	17
4.1 Verloop bodemtemperatuur	17
4.2 Temperatuurverloop op dieptes	18
4.3 Effect van instraling	18
4.4 Verschillen tussen locaties	19
4.5 Effect van hittegolf	21
4.6 Kokkelsterfte	24
4.7 Kokkelsterfte in relatie tot temperatuur	28
5 Conclusies en discussie	30
5.1 Temperatuurverloop in de bodem	30
5.1.1 Locatie	30
5.1.2 Sediment	30
5.1.3 Droogvalduur	31
5.1.4 Diepte en timing	31
5.2 Kokkelsterfte gedurende de zomer	32
5.3 Koppeling kokkelsterfte met droogvalduur en bodemtemperaturen	33
5.4 Lange termijn ontwikkeling van de kokkelpopulatie in de Oosterschelde met het oog op klimaatverandering	34
5.5 Aanbevelingen	35
6 Kwaliteitsborging	37
Literatuur	38
7 Bijlages	41
7.1 Meetpunt karakteristieken	41
7.2 Sediment karakteristieken	42
7.3 Temperatuurverloop op Dortsman en Roggenplaat	43
7.4 Temperatuurverloop: verschillen in diepte op Dortsman en Roggenplaat	44

7.5	Temperatuur verloop: verschillen in locatie - mei / juni	45
7.6	Temperatuur verloop: verschillen in locatie - augustus	46
7.7	Temperatuur verloop tijdens hittegolf: Dortsman en Roggenplaat	47
7.8	Temperatuur reeks tijdens hittegolf: Dortsman	48
7.9	Temperatuur reeks tijdens hittegolf: Roggenplaat	49
7.10	Temperatuur reeks lange termijn: Dortsman	50
7.11	Temperatuur reeks lange termijn: Roggenplaat	51

Samenvatting

Vanuit Programmatische Aanpak ecologie Grote Wateren (PAGW) wordt, op initiatief van de ministeries van Infrastructuur & Waterstaat (I&W) en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV), gewerkt aan het robuuster maken van de natuur in grote wateren van Nederland. Dit betreft ook de intergetijdennatuur in de Oosterschelde, die onder druk staat als gevolg van zandhonger en de door klimaatverandering gedreven zeespiegelstijging en toenemend aantal hittegolven. 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 overtijden tijdens laagwater. Behoud van intergetijdengebieden staat hoog op de agenda en het rijk heeft de ambitie om hiervoor met regionale partijen projecten te starten. Daarom is het van belang te weten hoe temperatuur de kwaliteit van het bodemleven – en daarmee de foerageerfunctie voor vogels – kan beïnvloeden. In 2019 is een eerste verkennend onderzoek uitgevoerd naar van de temperatuur ontwikkeling in de bovenste sediment laag van de droogvallende platen van de Oosterschelde en ontwikkeling van een methode om dit goed te kunnen meten (Suykerbuyk et al. 2020). Voorliggende rapportage is het vervolg hierop en is erop gericht om een beter beeld te krijgen van de temperatuur ontwikkeling in het sediment gedurende de hele zomer en welke relatie dit mogelijk heeft met de sterfte van kokkels. Daarom is het onderzoek naar temperatuurophopbouw in de bodem (beleidsondersteunend onderzoek) gekoppeld aan het onderzoeksspoor naar de zomersterfte van kokkels (wettelijke onderzoekstaken) in opdracht van het ministerie van LNV.

Daarbij zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- Heeft droogvalduur een effect op de mate van opwarming van de bodem?
- Heeft sedimentsamenstelling (zand/slib) een effect op de mate van opwarming van de bodem?
- Hoe verhouden deze relaties zich op grotere diepte in de bodem?
- Zijn deze relaties verschillend eerder of later in de zomer?
- Wat is de sterfte onder kokkels gedurende de zomer van 2020?
- Welke relatie bestaat er tussen de droogvalduur, de waargenomen bodemtemperatuur en de sterfte van kokkels?

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden zijn meetlocaties geselecteerd die verspreid lagen over meerdere hoogtes in de getijdenzone, verschillende deelgebieden (kom, centrale deel en monding), en met verschil in sedimentsamenstelling van de bodem (zandig/ slibrijk) en met een hoge dichtheid aan kokkels. 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 begin mei tot begin september 2020 de bodemtemperatuur op 3 cm diepte gemeten, en is de instraling en overstromingsduur op locatie bepaald. Daarbij is begin mei en begin september de dichtheid aan kokkels bepaald.

Na analyse van de temperatuurdata over de zomer en tijdens een hittegolf in augustus werd geconcludeerd dat:

- Tijdens laag water volgt de bodemtemperatuur het patroon van de luchttemperatuur en instraling van de zon met een vertraging van 1 à 2 uur.
- De watertemperatuur tijdens de inundatiefase (onder water) de bodemtemperatuur lijkt te bufferen waardoor de temperatuur minder hoog oploopt.
- Bij een korte droogvalduur (laag in de getijdenzone), is de buffering van het water op de temperatuur van de bodem groter omdat deze lage delen langer onder water staan dan hogere delen. Er is dan minder tijd voor de volgende processen om op te bouwen: i) opwarming van de bodem door blootstelling aan de luchttemperatuur en instraling (overdag) of ii) afkoelen van de bodem bij een lagere luchttemperatuur ('s nachts). Dit effect neemt af later in de zomer wanneer watertemperaturen toenemen.
- Bij toenemende droogvalduur is er meer tijd om op te warmen, waardoor de bodemtemperatuur hogere waarden bereikt. Deze ontwikkeling is in alle deelgebieden geconstateerd. Wel leek de meest oostelijke locatie (Oesterdam) minder op te warmen, wat mogelijk toe te schrijven is aan

de samenstelling van de bodem. Zandige locaties (Roggenplaat) draineren mogelijk beter waardoor ze sneller op kunnen warmen. De Oesterdam is een slibrijke locatie met meer bodemvocht dan zandige locaties wat mogelijk een bufferende werking heeft.

- Diepere delen van de bodem warmen langzamer op en koelen minder snel af. Fluctuaties in temperatuur zijn op diepte minder groot gebleken.
- Bodemtemperaturen en fluctuaties daarin verschillen gedurende de zomer. Later in de zomer is de afkoeling van de bodem minder groot, omdat dan de watertemperatuur en luchttemperatuur in de nacht hoger zijn. Aan het begin van de zomer worden in de bodem geen extreme ($>30^{\circ}\text{C}$) temperaturen gemeten, ondanks de hogere instraling op dit tijdstip van het jaar. Later in de zomer, o.a. tijdens de hittegolf, zijn dit soort extreme temperaturen wel gemeten. Kokkelsterfte over de zomer is uitzonderlijk hoog gebleken. Met een sterfte van 95% onder de 1-jarige kokkels en 81% onder de 2-jarige kokkels, lag de sterfte onder 1- en 2-jarigen hoger dan voor meerjarige kokkels (sterfte van 68%) en hoger dan de gemiddelde zomersterfte in de Oosterschelde (28%, over een heel jaar is de gemiddelde sterfte ca. 60%). De locatie Roggenplaat vertoonde de laagste sterftcijfers, terwijl locaties Oesterdam en Dortsman beide hoge sterftcijfers vertoonden, ondanks hun geografisch contrasterende ligging (kom vs. middendeel van de Oosterschelde), sedimentsamenstelling en daarmee samenhangende temperatuurverloop.
- Met de huidige klimaatverandering zullen luchttemperaturen stijgen en worden extremere temperaturen en meer hittegolven verwacht. Als gevolg zal de watertemperatuur ook stijgen en mogelijk ook al eerder in de zomer zijn afkoelende werking verliezen. Daardoor zouden kokkels langer blootgesteld zijn aan voor hen suboptimale temperaturen, waarbij ze verminderd actief zijn en wat mogelijk hun fitness vermindert. Dit effect zal dan het grootst worden geacht in het oostelijke deel van de Oosterschelde, waar het water langer verblijft, eerder en hoger opwarmt en meer slibrijke sedimenten te vinden zijn. Met de huidige kennis is echter niet te voorspellen hoe de kokkelpopulatie in de Oosterschelde zal veranderen als gevolg van klimaatverandering. Enkele mogelijke scenario's en mechanismen worden in dit rapport belicht.
- Het effect van extreme temperaturen op de kokkelpopulatie vertaalt zich door naar de kwaliteit van het intergetijdengebied en de beschikbaarheid van voedsel voor vogels. Scholeksters en andere steltlopers zijn in de winter voor hun voedselvoorziening sterk afhankelijk van schelpdieren, met name kokkels en mosselen. Indien er vanwege extreme zomersterfte niet voldoende kokkels aanwezig zijn, kan dat een negatief effect op de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers hebben indien ook andere voedselbronnen ontbreken waarvan de vogels in de winter afhankelijk zijn (zoals mosselen). Dit zou kunnen leiden tot een voedseltekort en mogelijk omvangrijke sterfte onder steltlopers in de winter.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de zomers van 2018, 2019 en 2020 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 overtijen tijdens laagwater (Beukema en Dekker 2020; Troost en van Asch 2018). Vanuit de Programmatische Aanpak ecologie Grote Wateren (PAGW) wordt, op initiatief van de beide ministers van I&W en LNV, gewerkt aan het robuuster maken van de natuur in grote wateren van Nederland. Dit betreft ook de intergetijdennatuur 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 Oosterdam (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 (Harley et al. 2006). 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 (>90%) plaats onder kokkels in de Oosterschelde (en ook in de Waddenzee, >60%) 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). Ook in 2019 is in de Waddenzee grootschalige sterfte (63,9%) waargenomen. In de Oosterschelde bleef het in 2019 beperkt tot 9.6%. 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). Het sterftepercentage in 2018 en 2019 ligt daar ver boven. Door klimaatverandering kunnen in de toekomst periodes met hoge temperaturen (zoals waargenomen in 2018 en 2019) vaker en langer voorkomen (Perkins-Kirkpatrick en Lewis 2020). Belangrijk is het daarom om inzicht te krijgen in hoe de bodemtemperatuur 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 of de huidige gehanteerde zomergroei- en sterftcijfers nog voldoende accuraat zijn of eventuele temperatuur gerelateerde ontwikkelingen in de schelpdierpopulatie het ecologisch functioneren en andere populaties (zoals bijv. N2000 vogelsoorten) in het gebied beïnvloeden. Om een betrouwbaarder beeld te krijgen van het temperatuurverloop over de zomer is het van belang om meer inzicht te krijgen in de relaties tussen instraling, water- en luchttemperatuur en bodemtemperatuur evenals de opbouw over het seizoen. Daarnaast is het waardevol om gelijktijdig de kokkelsterfte te bepalen om verbanden tussen hitte en sterfte te onderzoeken.

1.3 Combinatie van twee onderzoekssporen: BO en KB-WOT

Binnen beleidsondersteunend onderzoek voor het ministerie van LNV in 2019 is in de zomer van 2019 ervaring opgedaan met het meten van bodemtemperaturen op droogvallende slikken en platen in de Oosterschelde waarbij het gebruik van temperatuurloggers is getest en globale relaties zijn onderzocht (Suykerbuyk et al., 2019). 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 beleidsondersteunend onderzoek (BO-43-021.03-001).

Daarnaast wordt binnen het kennisbasis programma gekoppeld aan de wettelijke onderzoekstaken op het gebied van visserij (KB-WOT, KB-36-002-012), gefinancierd door het ministerie van LNV, in de periode 2019-2021 onderzoek gedaan naar de zomersterfte onder kokkels. Doel hiervan is te kunnen evalueren hoe klimaatbestendig de sterfte schatting is waarmee jaarlijks het kokkelbestand op 1 september wordt geschat, en waarop de quota voor de visserij gebaseerd worden. Hiertoe is de sterfte onder kokkels gedurende de zomermaanden gemeten in 2019 (Waddenzee en Oosterschelde) en 2020 (Oosterschelde en Westerschelde).

Omdat onderzoek naar opbouw van temperatuur in de bodem van intergetijdenplaten en sterfte van kokkels in deze bodem zeer complementair is en verklaarbaarheid van de data kan vergroten is besloten om deze twee onderzoeken aan elkaar te verknopen en in dit rapport gezamenlijk te rapporteren.

1.4 Onderzoeksvragen

In 2019 is een eerste verkenning geweest van de temperatuur ontwikkeling in de bovenste sediment laag van de droogvallende platen van de Oosterschelde (Suykerbuyk et al. 2020). Belangrijkste bevindingen waren hierbij, dat bij laagwater overdag i) luchttemperatuur, maar zeker ook instraling de bodemtemperatuur bepalen, ii) bodemtemperatuur verder oploopt bij langer droogvallen en kan oplopen tot 5°C boven de luchttemperatuur, iii) geen verschil hierin gevonden is tussen locaties dichterbij of verder weg van de monding van de Oosterschelde, en iv) temperatuuropbouw in modderig sediment minder snel en hoog verloopt dan in zandiger sediment. 's Nachts volgt de bodemtemperatuur de luchttemperatuur. Tijdens inundatie wordt de bodemtemperatuur bepaald door de watertemperatuur. Nog onduidelijk was hoe deze temperatuuropbouw verloopt eerder in het jaar (bij langere daglengte en grotere instraling) en dieper in het sediment. En of de gemeten temperatuuropbouw gekoppeld kan worden aan de sterfte van kokkels over de zomer.

Dit onderzoek is erop gericht om een beter beeld te krijgen van de temperatuur ontwikkeling in het sediment gedurende de zomer en welke relatie dit mogelijk heeft tot de sterfte van kokkels.

Daarbij zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- Heeft droogvalduur een effect op de mate van opwarming van de bodem?
- Heeft sedimentsamenstelling (zand/slib) een effect op de mate van opwarming van de bodem?
- Hoe verhouden deze relaties zich op grotere diepte in de bodem?
- Zijn deze relaties verschillend eerder of later in de zomer?

- Wat is de sterfte onder kokkels gedurende de zomer van 2020?
- Welke relatie bestaat er tussen de droogvalduur, de waargenomen bodemtemperatuur en de sterfte van kokkels?

Uitkomsten van bovenstaande vragen zijn gebruikt om conclusies te trekken over de verwachting van de lange termijn ontwikkeling van de kokkel populatie in de Oosterschelde met het oog op klimaatverandering.

1.5 Leeswijzer

Deze rapportage kent een klassieke opbouw met een nadere verdieping van de rol van temperatuur van intergetijdengebieden in relatie tot kokkelsterfte: Introductie (Hoofdstuk 2), Materiaal & Methoden (Hoofdstuk 3), Resultaten (Hoofdstuk 4) en Conclusie en discussie (Hoofdstuk 5).

2 Temperatuur van intergetijdengebieden en kokkelsterfte

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, substraattype (rots, zand, slib) etc. kan de temperatuur van intergetijdengebieden variëren. De organismen die leven in intergetijdengebieden worden blootgesteld aan snelle en soms extreme temperatuurfluctuaties (Serôdio en Catarino 1999; Suykerbuyk et al. 2020). 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 (Verdelhos et al. 2015).

In de zomer van 2018 vond grootschalige sterfte plaats onder kokkels in de Oosterschelde (Figuur 1) en ook in de Waddenzee zoals werd gekwantificeerd na herziening van de reguliere WOT bestandsschatting in het najaar van 2018 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. Onder 1-jarige kokkels werd in de Waddenzee geen afwijkende sterfte geconstateerd. In de Oosterschelde is deze leeftijdsklasse in 2018 wél massaal gestorven. Uit onderzoek door Kamermans et al. (2003) bleek dat de sterfte van kokkels over een geheel jaar gemiddeld 59% is (normale gemiddelde zomersterfte 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 den Dortsman in de Oosterschelde in de zomer van 2018 (foto door Margriet van Asch, Wageningen Marine Research).

Te hoge temperaturen kunnen negatieve effecten hebben op de respiratie van kokkels en hun filterend vermogen, het kan leiden tot gedragsveranderingen en het kan zelfs lethaal zijn. Daarnaast kunnen synergetische effecten optreden, zoals de aanwezigheid van organisch materiaal en hoge temperaturen, wat kan leiden tot zuurstofloosheid in het water en sediment (Burdon et al. 2014). Zuurstofgehalte heeft ook een effect op de maximale temperatuurtolerantie (Portner et al. 2006) waarbij de maximale temperatuurtolerantie van de tweekleppige *Laternula elliptica* met 2,5°C steeg als gevolg van verdubbeling van de hoeveelheid zuurstof in het water. Verschillende typen sediment laten verschillende

patronen zien in opwarming en hoeveelheid zuurstof die vastgehouden wordt. Daarnaast heeft de hoeveelheid aanwezig voedsel effect op de overleving van kokkels. Al deze factoren samen zorgen ervoor dat het moeilijk is om enkel de effecten van temperatuur te meten. Andere factoren, zoals zuurstof, sediment en voedsel, spelen eveneens een rol in de overleving van kokkels.

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. Dit wordt ook geopperd door Beukema en Dekker (2020) uit analyse van lange termijntrends van de kokkelpopulatie in de Waddenzee. In een studie naar gedrag en sterfte van kokkels bij verschillende temperaturen bleek dat de activiteit van kokkels afnam naarmate de temperatuur meer afweek van hun optimale temperatuurrange (20 – 23°C) (Verdelhos et al. 2015). De laagste activiteit werd waargenomen bij de meest extreme temperaturen. Daarnaast bleek dat de kokkels in de buurt van de optimale temperatuur in het begin hoge activiteit vertoonden, maar dat die afnam doorheen de tijd. Dit suggereert dat kokkels lange tijd kunnen overleven onder niet-optimale omstandigheden, maar dat ze niet in staat zijn hun normale gedrag in stand te houden, wat op den duur tot sterfte kan leiden. Uit het onderzoek bleek daarnaast dat geen sterfte optrad bij temperaturen van 5 – 23°C, sterfte sterk toeneemt bij langdurige blootstelling aan een temperatuur boven 26°C en dat boven 32°C een sterfte van 100% optreedt. Bij een temperatuur van 29°C begon sterfte na 36 uur en na 99 uur bleek de helft van de kokkels gestorven. Bij een temperatuur van 32°C was 40% van de individuen dood na 48 uur en 100% na 84 uur. Bij 35°C is de lethale blootstellingsduur slechts 6 uur gebleken. Ook andere experimenten tonen aan dat uiterst korte blootstelling van niet langer dan enkele minuten tot 2 uur aan 34 tot 35°C lethaal is voor kokkels in laboratorium setting (Kristensen, 1957, Verdelhos et al. 2015 en ongepubliceerde onderzoeksresultaten onderzoeker van het NIOZ). Vooral abrupte veranderingen in temperatuur zijn problematisch voor kokkels (Ansell et al. 1981; Newell en Bayne 1980).

Uit een eerste verkenning van de temperatuuropbouw van droogvallende platen in de Oosterschelde in 2019 bleek dat temperaturen in het sediment tijdens laagwaterperiodes aan het eind van de zomer al op kunnen lopen tot ver boven de 30°C. Onder invloed van instraling door de zon kan het sediment zelfs bij geringe daglengte oplopen tot tegen de 5°C boven de luchttemperatuur. Onbekend is tot welke hoogte temperaturen kunnen oplopen eerder in het seizoen, bij grotere daglengtes en hogere zonnestraling en bij extreme temperaturen tijdens hittegolven in deze periode.

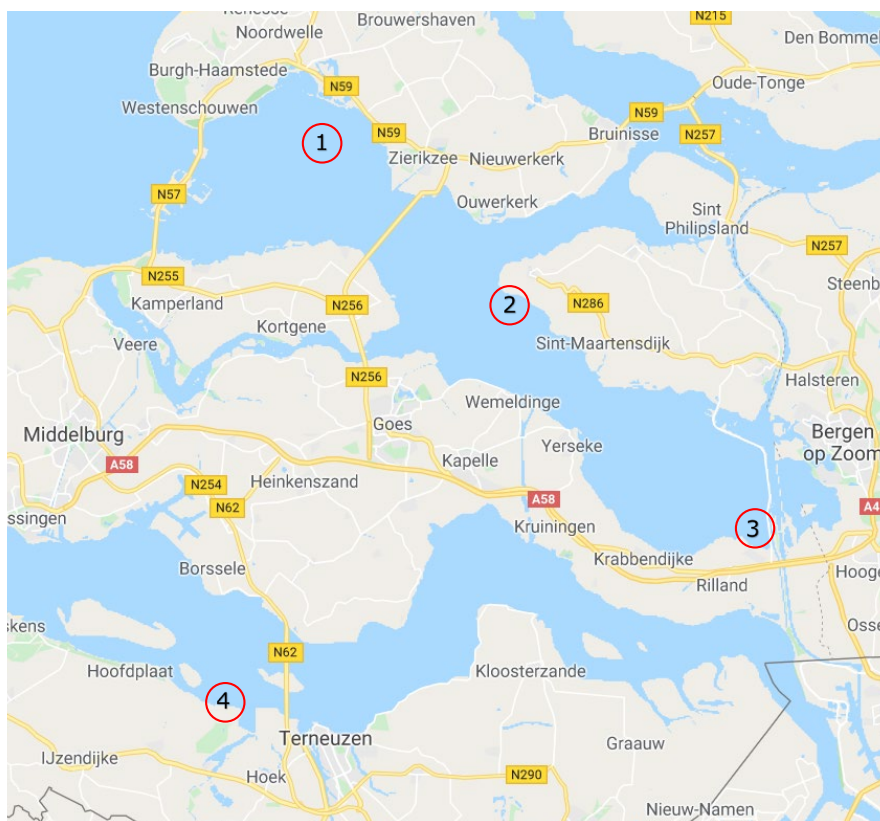
3 Methoden

3.1 Selectie van meetlocaties

De selectie van de meet- en monsterlocaties heeft plaatsgevonden rekening houdend met de geschiktheid voor zowel de temperatuur- als kokkelcomponent van deze studie. Hierbij is getracht zoveel als mogelijk eerder gebruikte locaties en/ of meetpunten van beide studies te handhaven om continuïteit in datasets te waarborgen.

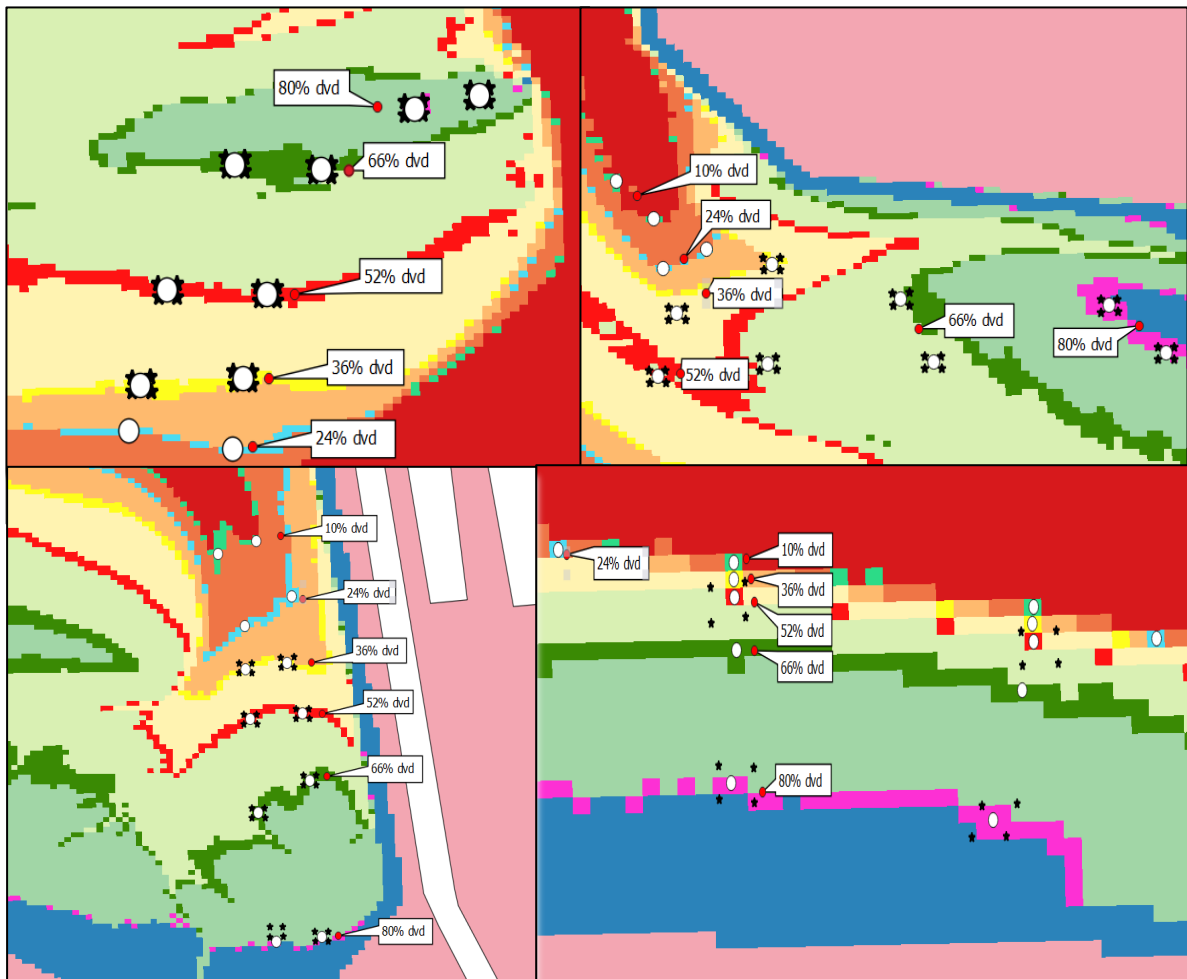
Selectie van deze locaties (Figuur 2) is gebaseerd op beschikbaarheid van een hoogtegradiënt, toegankelijkheid vanaf de kant, aanwezigheid van kokkels op basis van de WOT-survey van (voorjaar) 2019 en een goede verspreiding van locaties over het Deltagebied. Geselecteerde locaties zijn: 1) Roggenplaat, 2) Dortsman, 3) Oesterdam en 4) Braakmanhaven (Westerschelde).

Met behulp van een hoogte- en geomorfologische kaart (2016, data: Rijkswaterstaat) zijn op elk van de locaties 2 raaien uitgezet met meetpunten op 10, 24, 36, 52, 66 en 80% gemiddelde droogvalduur¹. 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.



Figuur 2. Overzicht van de vier bemonster-/ meetlocaties. 1) Roggenplaat; 2) Slikken van den Dortsman; 3) Oesterdam; 4) Braakmanhaven.

¹ Droogvalduurpercentages zijn een berekend jaarlijks gemiddelde.



Figuur 3. Gedetailleerd overzicht van de kokkelvakkens per locatie. Linksboven: Roggenplaat, Oosterschelde. Rechtsboven: Slikken van den Dortsman, Oosterschelde. Linksonder: Oesterdam, Oosterschelde. Rechtsonder: Braakmanhaven, Westerschelde. Kaarten zijn noord georiënteerd en niet op dezelfde schaal. Kleuren duiden de gemiddelde droogvalduur: lopend van blauw vlakken = 100% droogval naar rode vlakken = 0% droogval. Witte cirkels representeren meetpunten met temperatuurloggers. Zwarte sterren vormen de contouren van de kokkelvakkens (40 bij 40 m).

3.2 Temperatuurmetingen

3.2.1 Plaatsing van de loggers en gebruikte materialen

Voor het meten van de bodemtemperatuur zijn begin mei 2020 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 bamboestok, welke voorzichtig in de grond werd gedrukt (Figuur 4). 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. Op alle meetpunten zijn de loggers op 3cm diepte geplaatst, een relevante diepte waar kokkels voornamelijk aangetroffen worden. Per droogvalduur zijn 2 meetpunten geselecteerd. Bij 1 van de meetpunten op 36 en 66 % droogvalduur zijn er ook loggers geplaatst op 5 en 10 cm diepte, om de temperatuuroopbouw dieper in de bodem te analyseren. Ook zijn er net boven maaiveld een temperatuurlogger (zelfde als in de bodem), lichtlogger (Hobo Onset type UA-002-64) en druklogger (Reefnet Sensus Ultra) om respectievelijk in situ water-/ luchttemperatuur, instraling en waterdiepte/ overstroming te meten. 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 meten 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).

3.2.2 Labverwerking

Na een meetperiode van 4 maanden met verscheidene tropische² dagen zijn de loggers en referentiepalen begin september 2020 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).



Figuur 4. Logger in veldsituatie aan het eind van de meetperiode op meetlocatie Roggenplaat (2019). Logger zit nog onder het maaiveld. Alleen de kabelbinder is bovengronds zichtbaar. Inzet: loggerset bevestigd aan bamboe, zwarte logger = druklogger, horizontale logger = lichtlogger (meest links), blauwe logger = temperatuurlogger (o.a. meest rechts).

3.2.3 Analyse

In de verdere analyse zal alleen gewerkt worden met temperatuurdata gemeten tussen de plaatsing van de laatste loggers (13 mei) en het uithalen van de eerste loggers (3 september). Doordat of een enkele logger niet is teruggevonden (weggespoeld) of doordat bij het uitlezen van de loggers is geconstateerd dat een gedeelte van loggers niet (volledig) gemeten heeft (defect of waterschade), ontbreekt het aan data voor enkele meetpunten. Daardoor ontbreekt deze data ook in de analyse. Echter door het in duplo inzetten van de loggers op de verschillende droogvalduren is op elke droogvalduur bijna altijd 1 meting beschikbaar voor analyse (zie ook Bijlage 7.1 en 7.2). Afdoende om de onderzoeksvragen te

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

beantwoorden. Op locatie Braakmanhaven zijn onvoldoende bruikbare loggers teruggevonden, de temperatuurdata voor deze locatie ontbreekt daardoor in dit rapport.

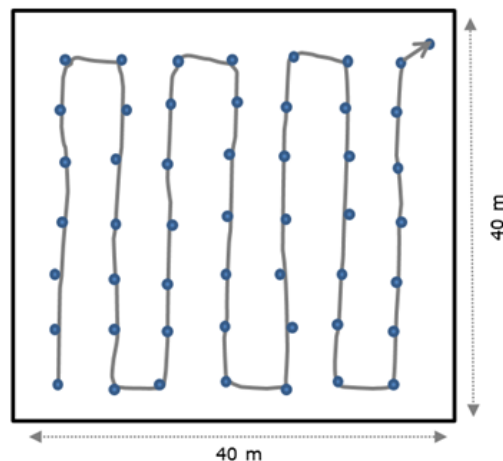
3.3 Kokkelsampling

3.3.1 Monstername

De voorjaarsbemonstering ging van start op 28 april, op locatie Slikken van Den Dortsman, op 11 mei is locatie Roggenplaat bemonsterd, op 12 mei locatie Braakmanhaven en op 13 mei locatie Oesterdam (Figuur 2). In het najaar zijn dezelfde locaties bemonsterd: 3 september Oesterdam, 9 september Slikken van Den Dortsman, 10 september Roggenplaat en 11 september Braakmanhaven.

Per locatie in de Oosterschelde zijn acht vakken geselecteerd op vier verschillende droogvalduren, twee replica's per droogvalduur. Er is gekozen voor droogvalduren 36%, 52%, 66% en 80%. In de Westerschelde zijn vier vakken bemonsterd, op twee droogvalduren (52% en 80%).

De locaties van de hoekpunten van elk vak zijn voorafgaand aan het veldwerk in een GPS gezet, zodat in het veld de hoekpunten met een bamboestok gemarkeerd konden worden. Elk kokkelvak had een oppervlakte van 40m bij 40m. Per vak zijn met behulp van een steekbuis van 10,4 cm doorsnee 50 monsters uitgestoken van ca. 10cm diep. De 50 steken werden gelijkmatig over het kokkelvak verspreid door raaien te lopen door het vak en om de vijf meter een monster te nemen (Figuur 5). Per vak zijn op deze manier zeven raaien gelopen met elk zeven punten en één extra punt op het eind.



Figuur 5. Kokkelvak met 50 bemonsteringspunten.

De monsters werden in een grote zeef (2mm zeef) verzameld. Tussendoor werd het sediment gezeefd zodat de ton niet te zwaar werd. Dit gebeurde in een klein laagje water zodat het sediment gemakkelijker wegspoelde. Nadat alle 50 steekbuizen genomen waren, werd nogmaals zorgvuldig gezeefd zodat zoveel mogelijk sediment was weggespoeld. Het achtergebleven materiaal werd verzameld in een plastic zak waarin een label zat met locatienummer. Vervolgens werd het zakje gesloten en in de rugzak gedaan. De stokjes werden van de hoekpunten gehaald en de GPS ingesteld op het volgende kokkelvak. Nadat alle vakken bemonsterd waren, werden de zakken in een koelbox met koelelementen geplaatst. Tijd tussen bemonstering van het eerste vak en het plaatsen van de samples in de koelbox, was ca. 4 uur.

3.3.2 Labverwerking

De monsters werden in de ochtend en/of middag verzameld in het veld en werden daarna teruggebracht naar het lab in een koelbox met koelelementen. Indien mogelijk werden de monsters nog dezelfde dag verwerkt. Als dat niet mogelijk was, vond de verwerking de volgende dag plaats en werden de monsters bewaard in de koelbox die afgesloten in een koelcel (4°C) werd geplaatst.

In het lab werd een monster uit de koelbox gehaald en uitgeschud boven een bak. Uit het monster werden de levende kokkels verzameld en apart gelegd. Ook kapotte schelpen waar nog wel vlees in zat en het slot zichtbaar en intact was, werden apart gehouden. Doordat alleen schelpen werden bewaard

waarbij het slot zichtbaar was, werden kapotte schelpen niet dubbel geteld. Nadat het hele monster nauwkeurig was doorzocht op kokkels, werd het overige materiaal weggegooid. Daarna werden de kokkels gesorteerd op leeftijd aan de hand van groeiringen op de schelp. Per monster werden per jaarklasse alle kokkels geteld. Alle gegevens zijn opgeslagen in een Access database.

Het sterftepercentage in de periode tussen de voor- en najaarsbemonstering is per leeftijdsklasse (1-jarig, 2-jarig en meerjarig) berekend uit het aantal kokkels in het voorjaar en najaar, als:

$$M = 100 - \left(100 \times \frac{d_{nj}}{d_{vj}} \right)$$

Waarbij: M = mortaliteit (sterfte in %)
 d_{nj} = gemiddeld aantal kokkels in het najaar
 d_{vj} = gemiddeld aantal kokkels in het voorjaar

Het sterftepercentage is per locatie bepaald als het totaal aantal kokkels in de acht vakken. Vervolgens is per locatie de sterfte uitgesplitst naar droogvalduur. Die is op eenzelfde manier berekend, namelijk uit het verschil tussen voor- en najaar van totaal aantal kokkels per droogvalduur per locatie. Op locatie Braakmanhaven zijn onvoldoende kokkels in het voor- en najaar gevonden voor een solide sterfte analyse. Omdat ook temperatuurdata ontbreken voor deze locatie, is besloten deze locatie niet verder mee te nemen in de analyses in dit rapport.

4 Resultaten

4.1 Verloop bodemtemperatuur

De bodemtemperatuur op 3 cm diepte gaat op en neer gedurende de dag en lijkt net als in 2019 gestuurd door de lucht- en watertemperatuur, instraling en droogvalduur (Suykerbuyk et al. 2020). Door gebruik van temperatuurloggers en drukloggers net boven het sediment zijn het moment van overstromen dan wel droogvallen en de lokale watertemperatuur veel nauwkeuriger dan in 2019 bepaald. Ter illustratie: Het verloop van de bodemtemperatuur op het meetpunt met 66% droogvalduur op locatie Oesterdam (Figuur 6) kent de volgende fases:

1) *Laag water 's nachts*: bodemtemperatuur (blauwe lijn) daalt door de koudere luchttemperatuur (rode lijn). Bodemtemperatuur blijft hoger dan de luchttemperatuur

2) *Inundatie begin van de dag*: Op het moment van overstromen (streep-stippellijn) loopt de logger net boven de grond snel op tot de watertemperatuur. De bodemtemperatuur stijgt in een aantal uur ook tot de watertemperatuur.

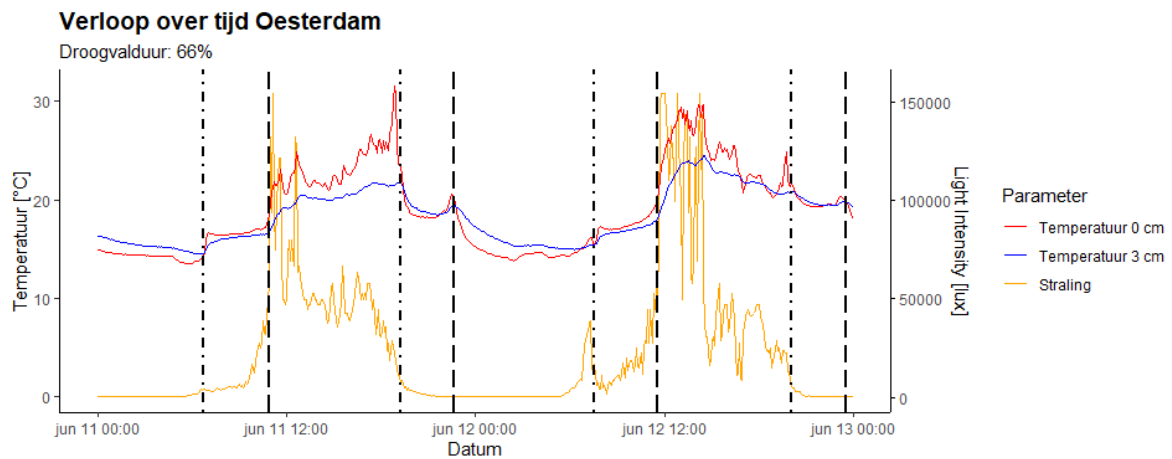
3) *Laag water overdag*: Zodra de logger droogvalt (streeplijn) komt ook de lichtlogger bloot te liggen en wordt er instraling gemeten (gele lijn). Onder invloed van de stijgende luchttemperatuur en instraling stijgt de temperatuur in de bodem, welke de luchttemperatuur tot op enkele graden benadert. Het verloop van de bodemtemperatuur is gelijkmatiger dan die van de luchttemperatuur, welke meer fluctueert onder invloed van veranderende instraling, de luchttemperatuur bereikt dan ook snel een hogere temperatuur. Later op de dag wanneer de instraling afneemt, neemt de luchttemperatuur als eerste sterk af. De bodemtemperatuur daalt gelijkmatiger, wat duidelijk zichtbaar is op 12 juni.

4) *Inundatie einde van de dag*: Het moment van overstromen aan het einde van de dag (tweede streep-stippellijn) wordt gekenmerkt door een kleine, tijdelijke stijging in de temperatuur van de logger net boven het sediment. Dit is waarschijnlijk het gevolg van warmer water dat de plaat op komt stromen, gevolgd door iets kouder water. De bodemtemperatuur laat op sommige dagen ook een kleine piek zien, op moment van overstroming en koelt vervolgens af tot de watertemperatuur. Aan het einde van de overstromingsperiode (streeplijn), is weer een piekje in de temperatuur van de logger boven het sediment te zien dat vermoedelijk afkomstig is van het laatste water dat de plaat afstroomt.

5) *Laag water 's nachts*: bodemtemperatuur daalt door de koudere luchttemperatuur. Bodemtemperatuur blijft duidelijk hoger dan de luchttemperatuur, tot het moment waarop de instraling langzaam terugkeert in de ochtend.

6) *Inundatie begin van de dag*: meetpunt overstromt op moment dat het al licht is. De gemeten instraling bouwt tot aan dit moment op, is tijdens de overstromingsperiode lager, en neemt sterk toe zodra het meetpunt weer droogvalt.

Bovengenoemde fases herhalen zich dagelijks en zijn vergelijkbaar op de verschillende meetlocaties (zie 7.3 voor het temperatuursverloop op de meetlocaties Dortsman en Roggenplaat).



Figuur 6. Temperatuurverloop net boven (rode lijn) en op 3 cm in het sediment (blauwe lijn) op meetlocatie Oesterdam met een gemiddelde droogvalduur van 66% gedurende 2 dagen. De rode lijn zal bij droogvallen de luchttemperatuur meten en bij overstromen de watertemperatuur. De gele lijn geeft de instraling op het meetpunt weer, gemeten net boven het sediment. NB. Bij overstroming valt de instraling ook (grotendeels) weg. De streep-stip-lijn markeert het moment van overstroming. De streeplijn markeert het moment van droogvallen.

4.2 Temperatuur verloop op dieptes

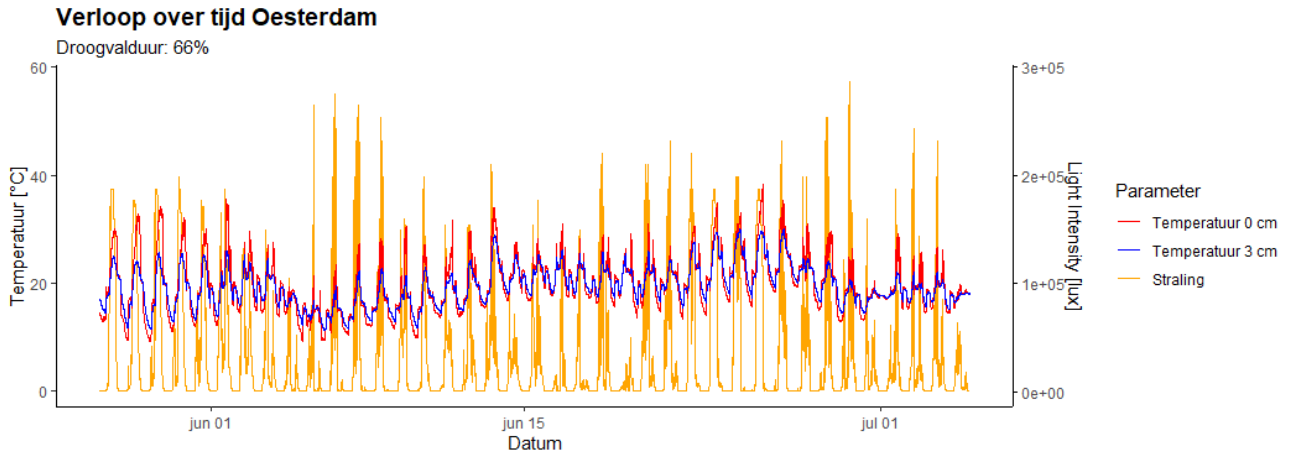
In aanvulling op de temperatuurmetingen, genomen net boven en onder het sediment oppervlak, zijn op alle locaties bij een droogvalduur van 66% ook extra temperatuurloggers geplaatst. Deze loggers lagen op 5 en 10 cm diepte, om de temperatuursopbouw dieper in het sediment in kaart te brengen. Op alle locaties is een eenduidig beeld te zien aan het begin van de meetperiode (selectie 27 mei – 5 juni, Figuur 7 en de figuren in bijlage 7.4): temperaturen op 3 cm diepte lopen het hoogste op en dalen het verst over de dag heen. Op 5 cm dieper is eenzelfde temperatuurcurve gemeten, maar de maximum- en minimumtemperaturen liggen op deze diepte net iets lager c.q. hoger aan het begin van de zomer. Nb. Om de grafiek leesbaar te houden, is de curve op 5 cm niet weergegeven in de grafiek. Op 10 cm diepte is de opbouw en afkoeling van het sediment het geringst en heeft de temperatuurcurve een meer geleidelijke vorm. Hierbij is een duidelijk patroon zichtbaar, waarbij hoe dieper in het sediment, hoe geleidelijker het temperatuur verloop over de dag is. Dit betekent tijdens een hittegolf, dat er op 10 cm minder heftige temperaturen overdag te verwachten zijn, maar ook minder afkoeling 's nachts.

4.3 Effect van instraling

Op alle locaties is bij een droogvalduur van 66% net boven het sediment de lokale instraling gemeten (zie o.a. Figuur 7). Gedurende de nacht is de instraling logischerwijs nul. Bij inundatie overdag wordt er ook geen of nauwelijks instraling gemeten, omdat er dan een waterlaag boven de lichtlogger staat. Tijdens de droogvalperiodes overdag wordt er wel instraling gemeten, waarbij het dagelijkse maximum vaak midden op de dag plaatsvindt, afhankelijk van de weersomstandigheden. Instraling kan fluctueren gedurende de dag onder invloed van voorbijtrekkende wolken, wat te zien is als veel opeenvolgende pieken in de instralingscurves. Als de inundatieperiode midden op de dag valt (bijvoorbeeld 1 juni), dan worden 2 duidelijke pieken in instraling waargenomen. Ondanks deze onderbreking van instraling, bereikt de bodemtemperatuur ongeveer dezelfde waarden, wanneer deze worden vergeleken met een dag waarbij de laagwaterperiode midden op de dag valt (bijvoorbeeld 27 mei). De gemeten temperatuur net boven de bodem is sterk gerelateerd aan de mate van en de fluctuaties in instraling. Deze temperatuur fluctueert mee met de instraling gedurende de laagwaterperiodes overdag. Op 3 cm diepte worden deze fluctuaties niet waargenomen in de temperatuurcurves en lijkt de temperatuur niet direct gerelateerd aan de instraling.

Dit wordt geïllustreerd aan de hand van de volgende waarneming. Kijkend naar een langere periode rondom de langste dag van het jaar waarbij instraling het hoogst verwacht wordt (27/5 tot 5/7), zijn grote verschillen in gemeten instraling waar te nemen (Figuur 7). Opvallend is dat bij relatief hoge fluctuerende instraling (onder invloed van voorbijtrekkende wolken), in de tweede week van juni (rond

9 juni), waarbij droogval overdag plaatsvindt (LW rond het middaguur), relatief lage maximumtemperaturen en een geringe amplitude van de bodemtemperatuurcurve worden waargenomen. Terwijl een goede week later bij geringe, sterk fluctuerende instraling en juist een inundatieperiode overdag tot bijna 10°C hogere temperaturen worden gemeten op 3 cm diepte. In de laatstgenoemde week, liggen de watertemperatuur en de luchttemperatuur in de nacht ook zichtbaar hoger.



Figuur 7. Temperatuur verloop over de periode 27/5 tot 5/7/2020 op de locatie Oesterdam bij 66% droogvalduur. Weergegeven: temperatuur net boven de bodem (rood), temperatuur op 3 cm diepte (blauw) en instraling (geel).

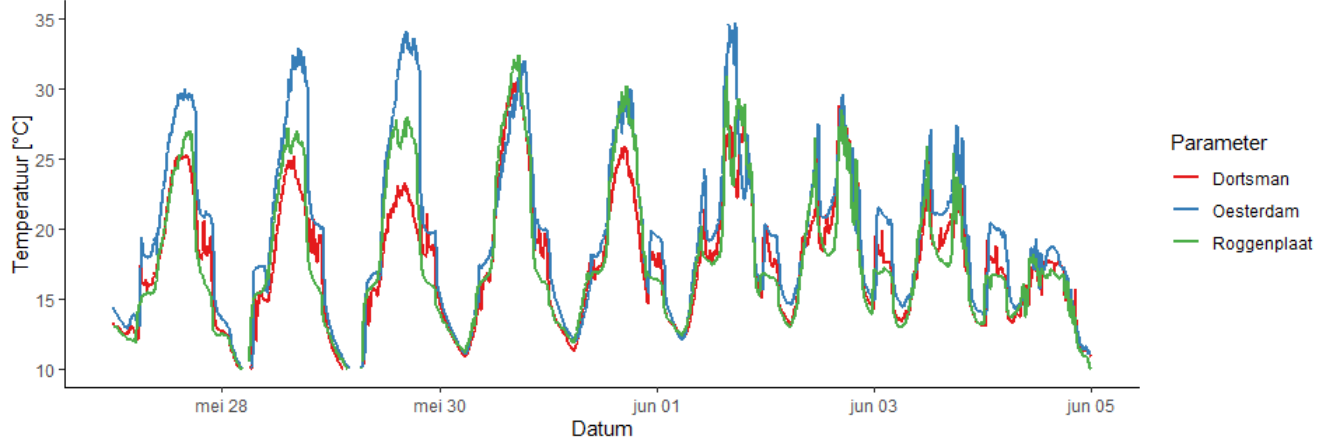
4.4 Verschillen tussen locaties

Het temperatuursverloop en de verschillende fases daarin zijn gelijk tussen de locaties. Echter, hoewel veelal gelijk van vorm, worden toch temperatuurverschillen van enkele graden waargenomen tussen de locaties, zowel net boven maaiveld als op 3 cm diepte (Figuur 8 en bijlage 7.5). Deze verschillen zijn het grootste tijdens de droogvalperiode overdag, waar opwarming van de bodem plaatsvindt. Grofweg is de gemeten temperatuur op het maaiveld, aan het begin van de zomer, het hoogste op de locatie Oesterdam en het laagste op Dortsman. Temperaturen op de Roggenplaat liggen daar tussenin. Op 3 cm in de bodem zijn de verschillen in gemeten temperaturen minder groot. Soms ontlopen Oesterdam en Roggenplaat elkaar weinig (eind mei). Echter warmt Oesterdam soms het hoogste op van deze twee locaties. Dortsman vertoont structureel de laagste temperaturen. Watertemperaturen verschillen enkele graden tussen de genoemde locaties (Figuur 8). Bijv. de horizontale lijnen in de 0 cm curve boven de markering op de x as van "1 jun"): water bij de Oesterdam is dicht tegen de 20°C, water bij Dortsman is enkele graden kouder en het water bij de Roggenplaat is met een temperatuur rond de 16°C het koudste.

Bovengenoemde trend verandert in de loop van de zomer (Figuur 9 en bijlage 7.6). Op maaiveld worden de hoogste temperaturen begin augustus tijdens laagwater op Dortsman en Roggenplaat waargenomen. De watertemperatuur verschilt nog steeds enkele graden tussen de locaties met de warmste temperaturen op de Oesterdam, gevolgd door Dortsman en daarna Roggenplaat. Op 3 cm diepte in de bodem zien we dat Roggenplaat tijdens laagwater overdag het snelste en sterkst opwarmt, maar ook afkoelt. Oesterdam en Dortsman warmen minder snel en sterk op en koelen minder snel af. Gedurende droogval tijdens de nacht koelt Dortsman sterker af dan Oesterdam. Ook in de diepere delen zijn dezelfde trends zichtbaar. Mogelijk dat het verschil in sediment samenstelling hier een rol in speelt. Zandiger sediment zou beter en of sneller kunnen draineren dan slikkiger sediment. Hierdoor zou warmte, maar ook kouder vers water bij overstroming sneller, dieper in de bodem kunnen komen. De locatie Oesterdam is slikkiger dan de Dortsman en Roggenplaat, welke in sedimenteigenschappen weinig van elkaar verschillen op 66% droogvalduur (Bijlage 7.2).

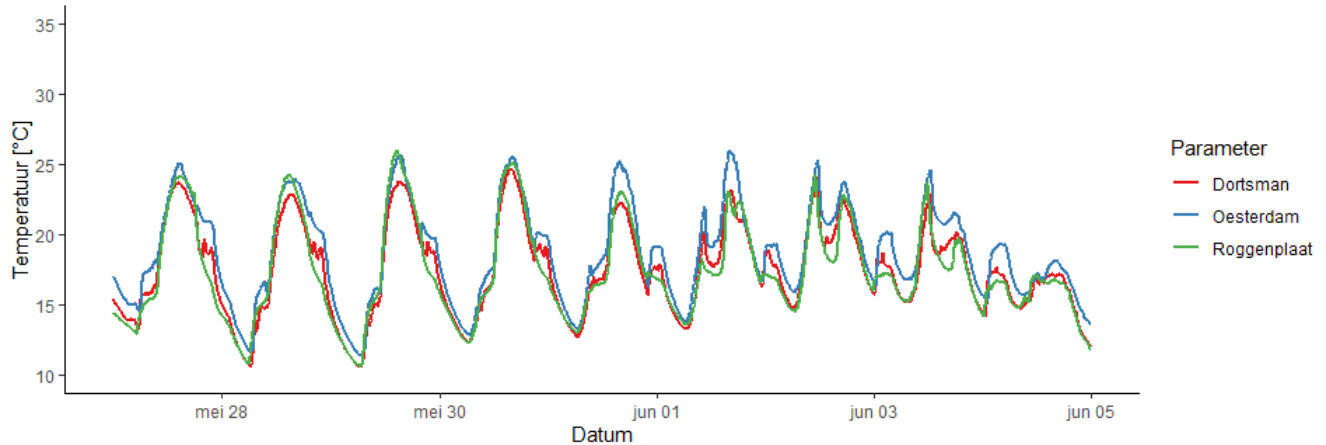
Verloop alle locaties over tijd - 0 cm

Droogvalduur: 66%



Verloop alle locaties over tijd - 3 cm

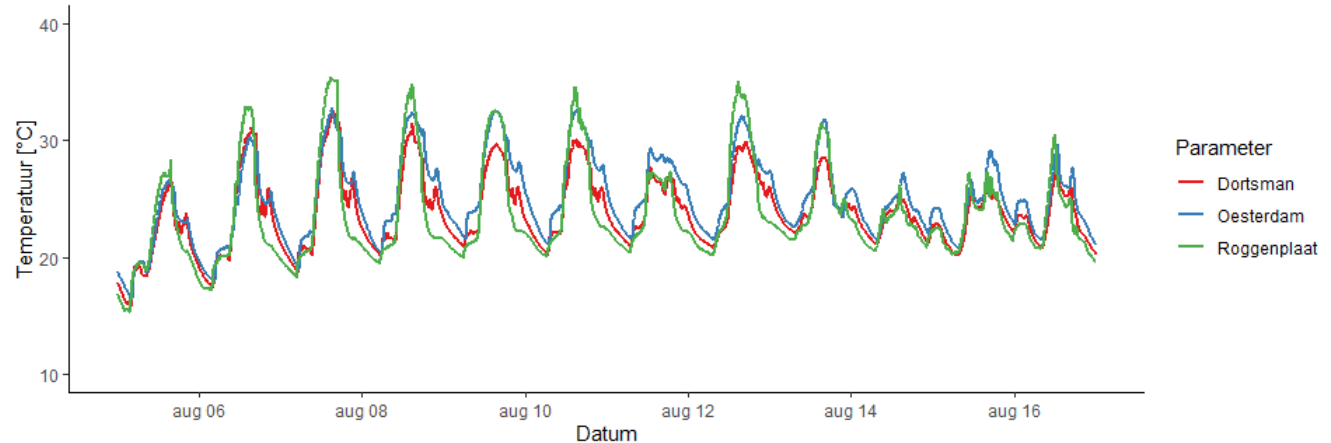
Droogvalduur: 66%



Figuur 8. Temperatuurverloop in de periode 27 mei tot 5 juni 2020 op locaties Dortsman (rood), Oesterdam (blauw) en Roggenplaat (groen). Boven: metingen net boven maaiveld. Onder: metingen op 3 cm diepte in het sediment.

Verloop alle locaties over tijd - 3 cm

Droogvalduur: 66%

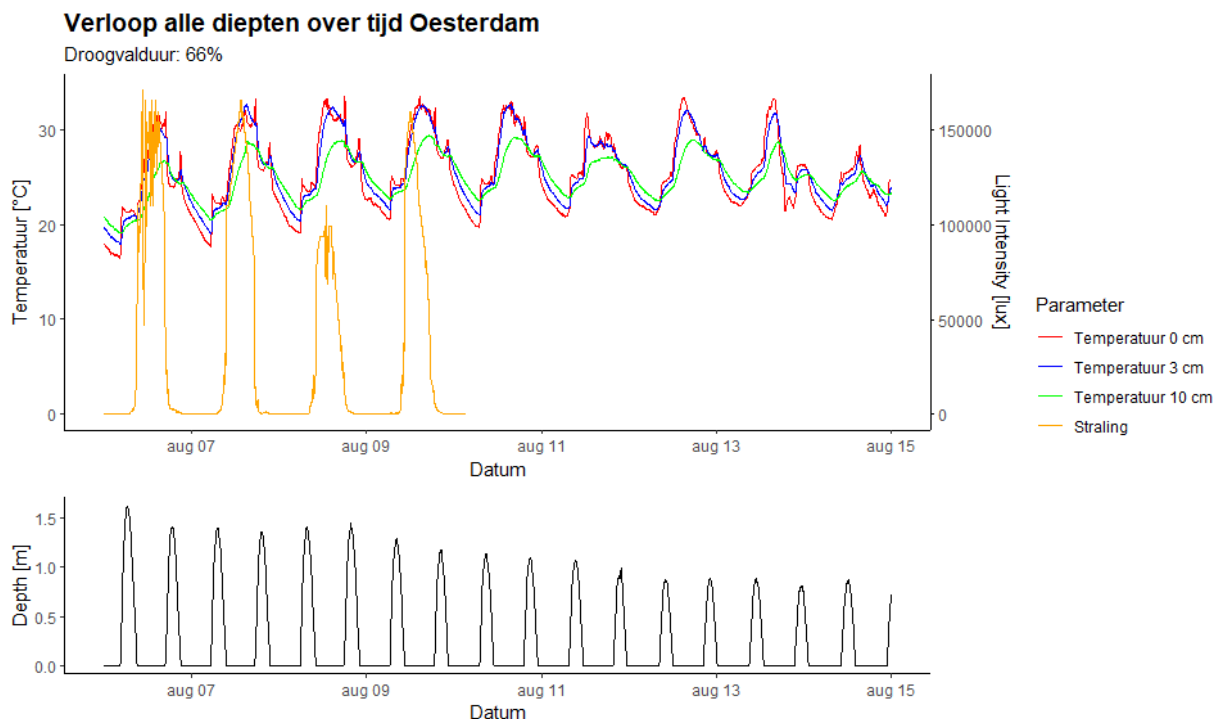


Figuur 9. Temperatuurverloop in de periode 5 tot 17 augustus 2020 op locaties Dortsman (rood), Oesterdam (blauw) en Roggenplaat (groen).

4.5 Effect van hittegolf

In 2020 heeft er een landelijke hittegolf (min. 5 zomerse dagen ($>25^{\circ}\text{C}$) waarvan er 3 tropisch ($>30^{\circ}\text{C}$)) plaatsgevonden van 5 tot en met 17 augustus. Van deze 13 dagen waren er 9 tropisch. De warmste dag gemeten op KNMI-weerstation Wilhelminadorp (Zeeland) was op 8 augustus met een maximumtemperatuur van 34.2°C . Het begin van deze hittegolf viel samen met laagwaterperiodes overdag.

Figuur 10 laat het temperatuurverloop, tijdens deze hittegolf, op verschillende dieptes in het sediment zien bij 66% droogvalduur op de Oesterdam. Een overzicht van deze grafiek voor alle locaties is te vinden in bijlage 7.7. Op alle locaties worden, in deze periode, maximumtemperaturen van boven de 30°C bereikt op 3 cm in de bodem. Op de Roggenplaat worden temperaturen van zelfs 35°C benaderend op 3cm diepte. Opvallend is, dat tijdens deze hittegolf, de maximumtemperatuur op zelfs 10cm diepte, de 25°C passeert en richting de 30°C gaat. Dit is te zien op alle locaties. 's Nachts koelt de bodem af, maar blijft de temperatuur echter hangen rond de 20°C . Doordat het sediment op 10 cm relatief langzamer afkoelt, blijft het hier 's nachts langer warm. In Figuur 9 is te zien dat de temperaturen op 3 cm, tijdens de hittegolf, op de Roggenplaat overdag hoger worden, maar 's nachts ook beter afkoelen. De Roggenplaat heeft hierdoor 's nachts koudere sediment temperaturen dan de Oesterdam.

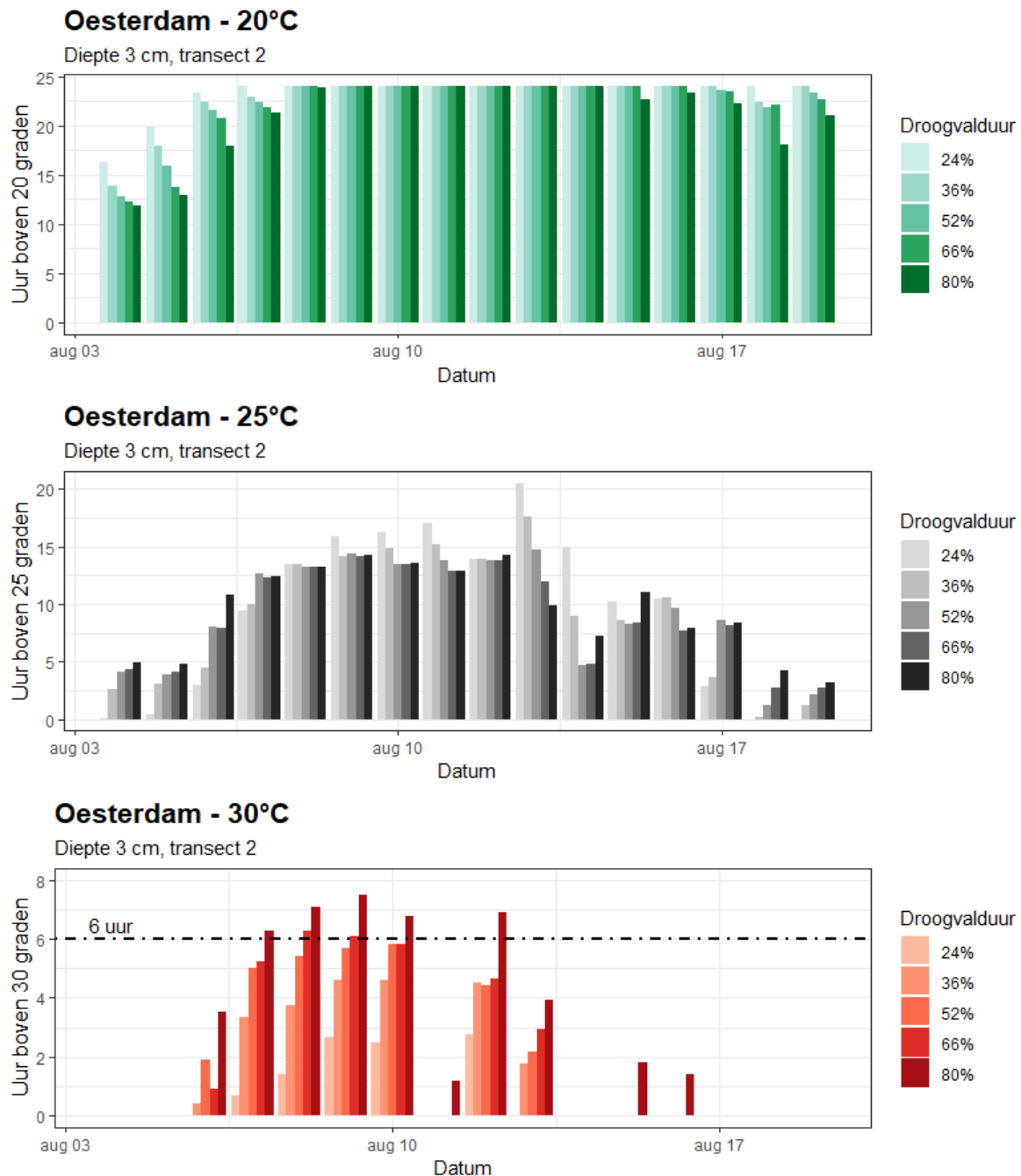


Figuur 10. Temperatuurverloop in de periode 6 tot 15 augustus 2020 op locatie Oesterdam op dieptes 0, 3 en 10 cm (resp. rood, blauw en groen), Instraling in geel. Onder: Verloop in waterdiepte waarbij horizontale stukken de periode van droogvallen zijn.

Figuur 11 laat de cumulatieve duur per dag zien dat een temperatuur overschreden wordt per droogvalduur, voor de Oesterdam, tijdens de hittegolf. Een overzicht van deze grafiek voor alle locaties is te vinden in bijlage 7.8 en 7.9. Op alle locaties is de bodemtemperatuur op 3 cm diepte gedurende 7 dagen lang tijdens de hittegolf minimaal 20°C of meer (dus ook 's nachts). Aan het begin van en na de hittegolf is te zien dat vooral lagere droogvalduren meer tijd boven de 20°C zitten, dit komt waarschijnlijk door het bufferende effect van het water (die rond deze temperatuur zit). Temperaturen boven de 25°C worden niet heel de dag door bereikt. Op de Oesterdam zijn er een goede 5 aaneengesloten dagen dat de temperatuur op 3 cm diepte 12 uur per dag boven 25°C is bij alle droogvalduren. Op de Dortsman en Roggenplaat is dit alleen het geval voor de langere (66 en 80%) droogvalduren, maar dan iets minder lang per dag, respectievelijk rond de 10 en 8 uur. Het feit dat de Roggenplaat minder lang temperaturen boven de 25°C laat zien is opmerkelijk, aangezien de hoge droogvalduren op de Roggenplaat de hoogste temperaturen bereikten. Echter koelt het sediment daar sneller af waardoor 's nachts veel sneller lagere temperaturen worden bereikt. De data ondersteunen Figuur 9, waarop te zien is dat de Oesterdam langzamer afkoelt, en dus langer op temperaturen boven

de 25°C blijft hangen. De lagere droogvalduren lijken tijdens de hittegolf meer moeite te hebben met afkoelen dan de hogere droogvalduren. Dit patroon is weer andersom aan het begin van en na de hittegolf. Mogelijk dat dit verband houdt met feit dat het sediment op de 10 en 24% droogvalduur op de Roggenplaat voor een groot deel uit vette klei bestaat (Figuur 19 in bijlage 7.2 en persoonlijke observaties).

Temperaturen boven de 30°C worden op alle locaties op droogvalduren vanaf 24% gemeten. Grofweg geldt: hoe langer de droogvalduur, hoe langer de tijd is dat deze extreme temperaturen gemeten worden. Op 66% droogvalduur is er geen duidelijk verschil te zien in tijd boven de 30°C tussen de Roggenplaat en de Oesterdam, wel bereikt de Roggenplaat temperaturen die 3-4°C hoger liggen. Voor 80% droogvalduur kan deze vergelijking niet gemaakt worden. Wanneer er gekeken wordt naar kortere droogvalduren, valt het op dat de Roggenplaat opeens minder lang boven de 30°C komt dan de Oesterdam. Wanneer dit patroon wordt vergeleken met een grafiek met de temperatuur over tijd, wordt het duidelijk dat de Roggenplaat bij kortere droogvalduren, tijdens de hittegolf, over bijna heel de dag veel lagere waardes laat zien dan de Oesterdam, bij droogvalduur 24% overschrijdt de temperatuur op de Roggenplaat niet één keer de temperatuur op de Oesterdam. Het sediment bij de Dortsman houdt temperaturen van boven de 30°C maar enkele uren aan, met een uitschieter van 5 uur op 7 augustus bij 80% droogvalduur.

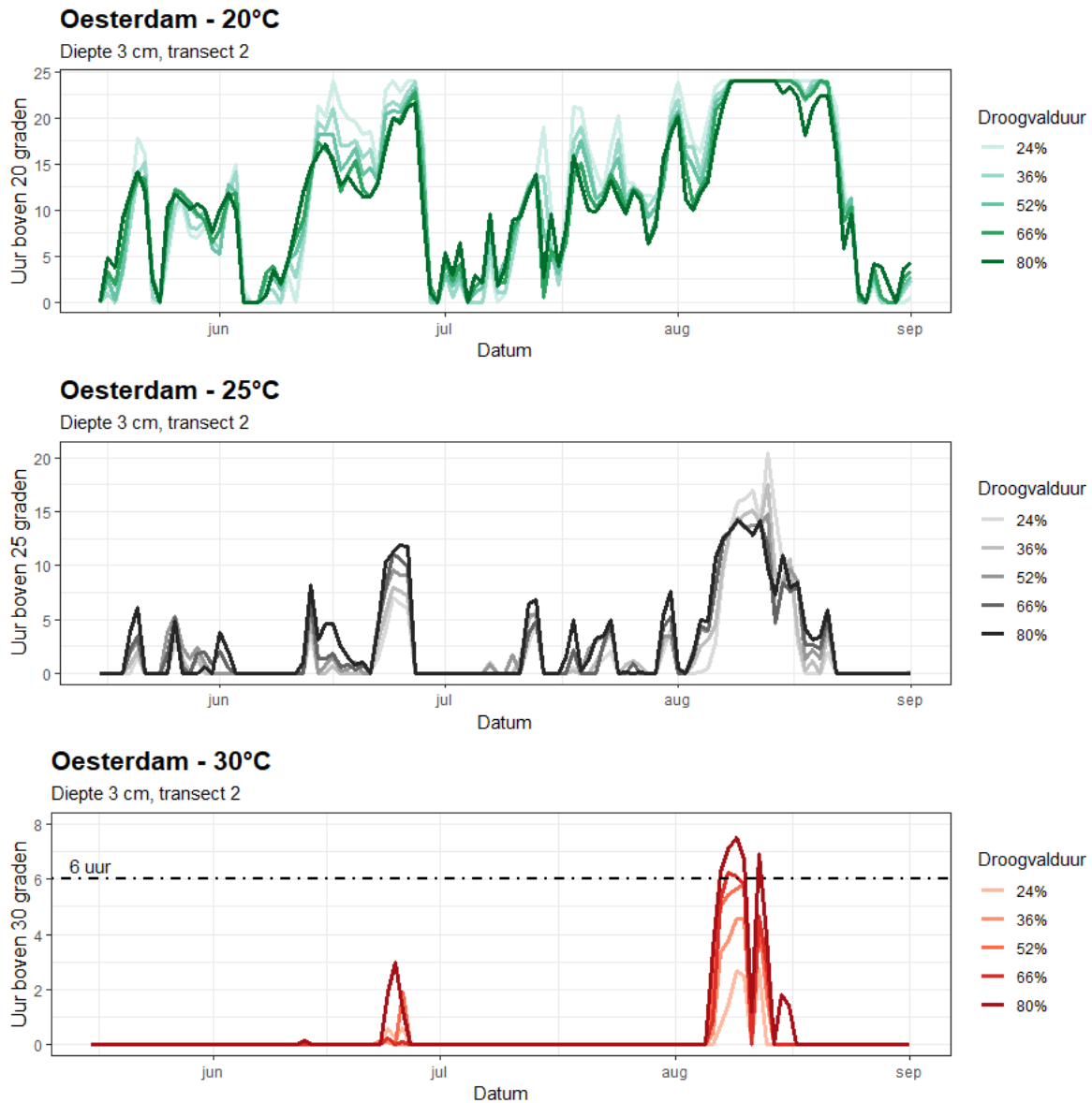


Figuur 11. De duur dat een bepaalde temperatuur overschreden wordt tijdens de hittegolf. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Oesterdam, opgesplitst per droogvalduur.

Figuur 11 laat over de gehele meettermijn de hoeveelheid uur boven 20°C, 25°C en 30°C zien voor iedere droogvalduur, gemeten op de Oesterdam. Een overzicht van deze grafiek voor alle locaties is te vinden in bijlages 7.10 en 7.11. Over de gehele zomer worden langdurige temperaturen van boven de 30°C slecht enkele malen waargenomen. De eerste piek komt tegen het einde van de maand juni voor. Bij de kortere droogvalduren wordt deze extreme temperatuur niet of slechts kort bereikt. Temperaturen van boven de 35°C worden op Dortsman en Oesterdam niet waargenomen. Op de Roggenplaat wordt op 7 augustus bij 66% en 36% droogvalduur, respectievelijk 135 en 10 minuten lang temperaturen van boven de 35°C gemeten op 3 cm in het sediment.

Opvallend bij de Oesterdam is dat juist bij deze kortere droogvalduren tijdens de hittegolf langer temperaturen van boven de 25°C (maar onder de 30°C) worden gemeten. Het lijkt erop deze kortere droogvalduren niet de kans krijgen om af te koelen tijdens het laagwater gedurende de nacht en ook niet bij overstroming met het relatief warme water op dit moment van de zomer. Op de Roggenplaat en Dortsman lijkt het sediment op plekken met kortere droogvalduur wel beter af te koelen. Tot slot,

worden lange periodes, waarbij de sediment temperaturen structureel 24 uur boven de 20°C uitkomen, op geen enkel tijdstip buiten de hittegolf waargenomen.

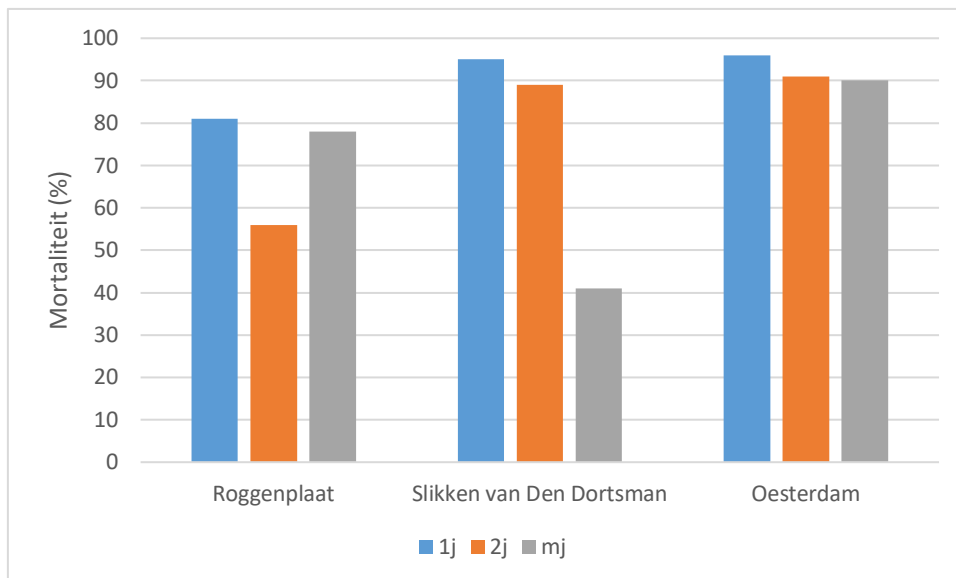


Figuur 12. De duur dat een bepaalde temperatuur van de bodem overschreden wordt tijdens de zomer. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Oesterdam, opgesplitst per droogvalduur.

4.6 Kokkelsterfte

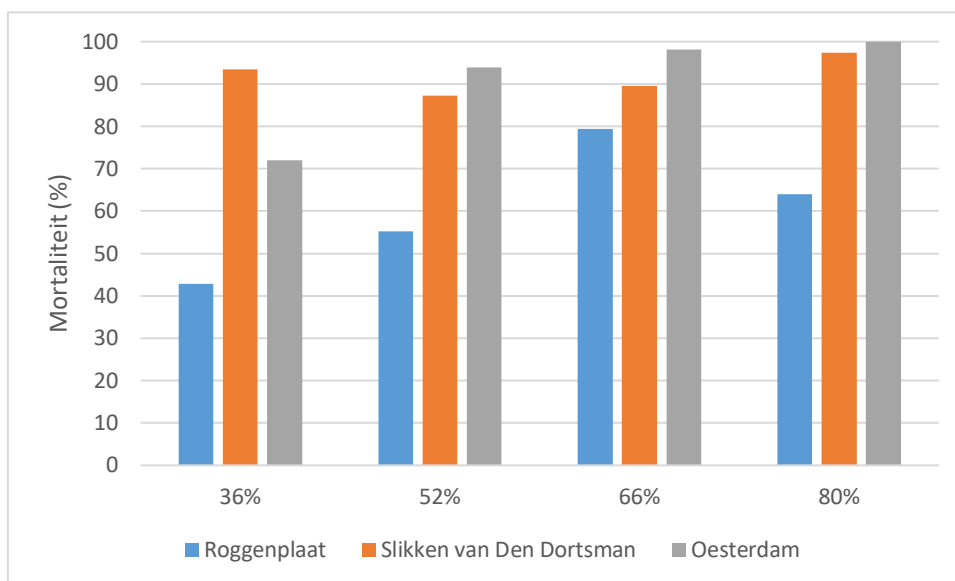
De kokkelsterfte in de zomer van 2020 voor alle leeftijdsklasse samen varieerde van 62% op de Roggenplaat, tot 94% op de Oesterdam (Tabel 1). De totale sterfte op de Slikken van Den Dortsman was 92%.

Binnen alle leeftijdsklassen nam het aantal kokkels af tussen het voorjaar en najaar van 2020 (Figuur 13). De sterfte onder de 1-jarige kokkels varieerde van ruim 80% op de Roggenplaat tot 95% en 96% op respectievelijk de Slikken van Den Dortsman en Oesterdam. Ook de sterfte onder 2-jarige kokkels bleek het hoogst op de Slikken van den Dortsman en Oesterdam, met respectievelijk 89% en 91%. De sterfte op de Roggenplaat was 56%. Onder de meerjarige kokkels was de sterfte op de Slikken van Den Dortsman lager dan voor de 1- en 2-jarige kokkels, namelijk 41%. De sterfte op de Roggenplaat en Oesterdam waren respectievelijk 78% en 90%.



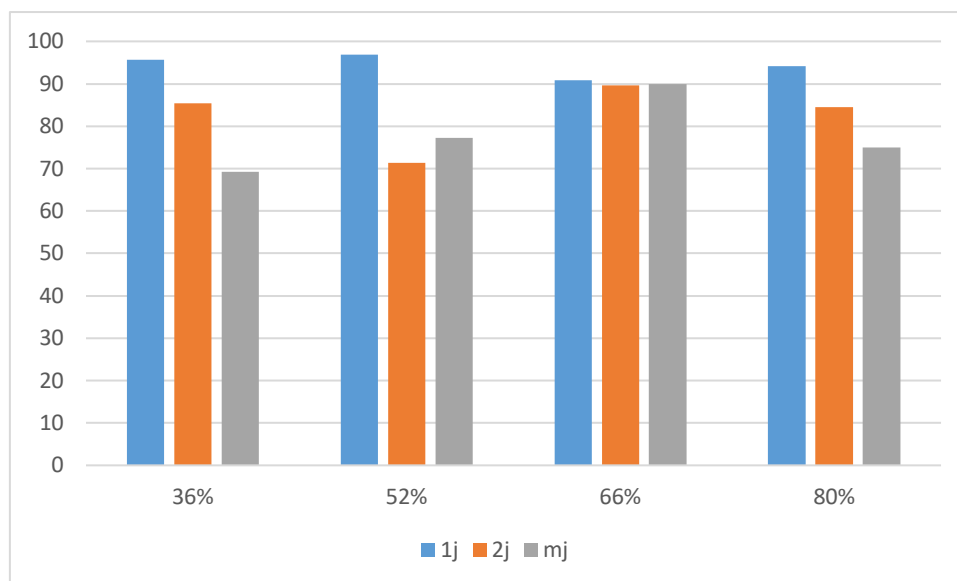
Figuur 13. Sterfte (%) per deelgebied in de Oosterschelde in 2020. Per deelgebied is de sterfte berekend uit het totale aantal kokkels uit de acht vakken. 1j: 1-jarige kokkels, 2j: 2-jarige kokkels, mj: meerjarige kokkels.

De sterfte uitgesplitst naar droogvalduur per locatie is weergegeven in Figuur 14. Op de Oesterdam en Roggenplaat was de sterfte het laagst bij een droogvalduur van 36%. Op de Slikken van Den Dortsman was de sterfte voor alle droogvalduren hoger dan 87%. Op de Roggenplaat werd de hoogste sterfte waargenomen bij een droogvalduur van 66%, namelijk 79%.



Figuur 14. Sterfte (%) in 2020 uitgesplitst naar droogvalduur op drie locaties in de Oosterschelde in 2020. Per deelgebied is de sterfte berekend uit het totale aantal kokkels uit de acht vakken. 1j: 1-jarige kokkels, 2j: 2-jarige kokkels, mj: meerjarige kokkels.

De gemiddelde sterfte varieerde van 84% (droogvalduur 52%) tot 90% (droogvalduur 36% en 66%) voor alle leeftijdsklasse samen (Figuur 15). De sterfte van kokkels onder een droogvalduur van 80% bedroeg 88%. Onder 1-jarige kokkels was de sterfte voor alle droogvalduren hoger dan 90%. Onder 2-jarige en meerjarige kokkels varieerde de sterfte van 70% tot bijna 90%, waarbij de sterfte het hoogst was bij een droogvalduur van 66%.



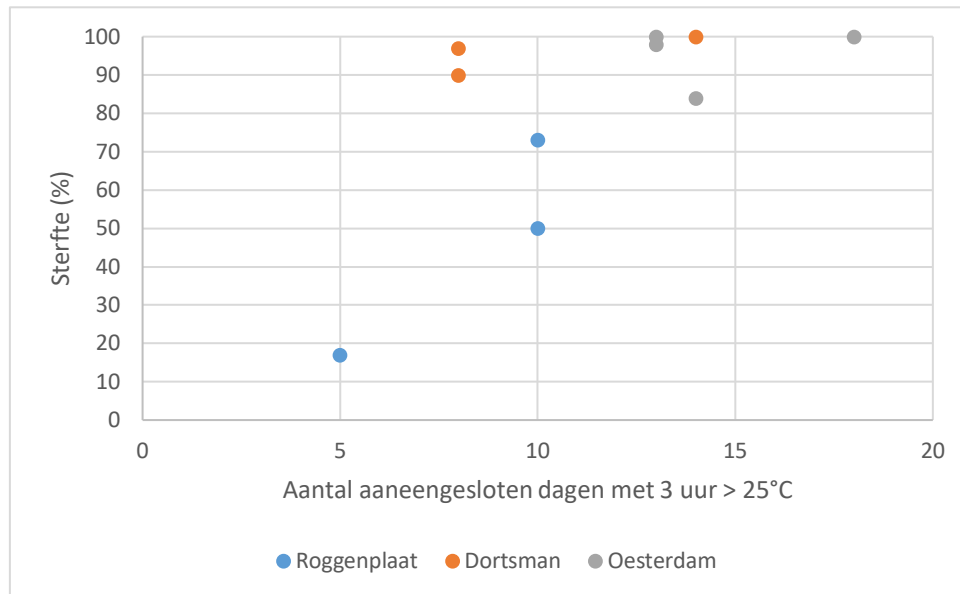
Figuur 15. Sterfte (%) uitgesplitst naar droogvalduur per leeftijdsklasse voor alle locaties in de Oosterschelde in 2020.

Tabel 1. Totaal aantal kokkels per locatie en per droogvalduur in het voorjaar (vj) en najaar (nj) van 2020, en de daaruit berekende sterfte. Weergegeven per leeftijdsklasse (nb = niet bepaald) en voor het totaal van alle leeftijdsklassen samen (zonder de 0-jarigen).

Gebied	Droogvalduur	0-jarig		1-jarig			2-jarig			meerjarig			nb		totaal		
		nj (n)	vj (n)	nj (n)	sterfte (%)	vj (n)	nj (n)	sterfte (%)	vj (n)	nj (n)	sterfte (%)	vj (n)	nj (n)	sterfte (%)	vj (n)	nj (n)	sterfte (%)
Roggenplaat	36%	8	27	5	81	183	81	56	40	9	78	0	250	95	62		
	52%	1	1	2	-100	6	5	17	7	1	86	0	14	8	43		
	66%	0	3	1	67	114	57	50	26	6	77	0	143	64	55		
	80%	5	18	1	94	45	12	73	5	1	80	0	68	14	79		
		2	5	1	80	18	7	61	2	1	50	0	25	9	64		
Slikken van Den Dortsman	36%	20	386	18	95	224	24	89	17	10	41	0	627	52	92		
	52%	13	214	7	97	125	12	90	12	4	67	0	351	23	93		
	66%	2	73	0	100	55	11	80	5	6	-20	0	133	17	87		
	80%	1	70	10	86	35	1	97	0	0	NA	0	105	11	90		
		4	29	1	97	9	0	100	0	0	NA	0	38	1	97		
Oesterdam	36%	130	307	12	96	244	16	93	16	4	75	0	567	32	94		
	52%	6	12	1	92	149	3	98	5	3	40	0	166	7	72		
	66%	106	241	9	96	80	13	84	11	1	91	0	332	23	94		
	80%	18	54	2	96	14	0	100	0	0	NA	0	68	2	98		
		0	0	0	NA	1	0	100	0	0	NA	0	1	0	100		

4.7 Kokkelsterfte in relatie tot temperatuur

Als gekeken wordt naar de koppeling tussen de waargenomen sterfte en gemeten temperatuur, lijkt de beste positieve correlatie te bestaan tussen sterfte van 2-jarige kokkels in de gehele Oosterschelde en het aantal aaneengesloten dagen met minstens 3 uur een temperatuur van boven de 25°C (Figuur 16). Echter, wanneer niet naar de Oosterschelde als geheel wordt gekeken maar naar de locaties apart van elkaar, is te zien dat de correlatie voornamelijk wordt bepaald door één punt op de Roggenplaat (sterfte op 36% droogvalduur). Wanneer dit punt linksonder in de grafiek niet wordt meegenomen in de analyse, blijft er weinig tot geen correlatie over tussen sterfte en het aantal aaneengesloten dagen met minstens 3 uur >25°C. Dat betekent dat er geen heel duidelijk verband is tussen sterfte en aantal dagen dat de temperatuur boven een bepaalde grens uitsteeg op basis van dit onderzoek.



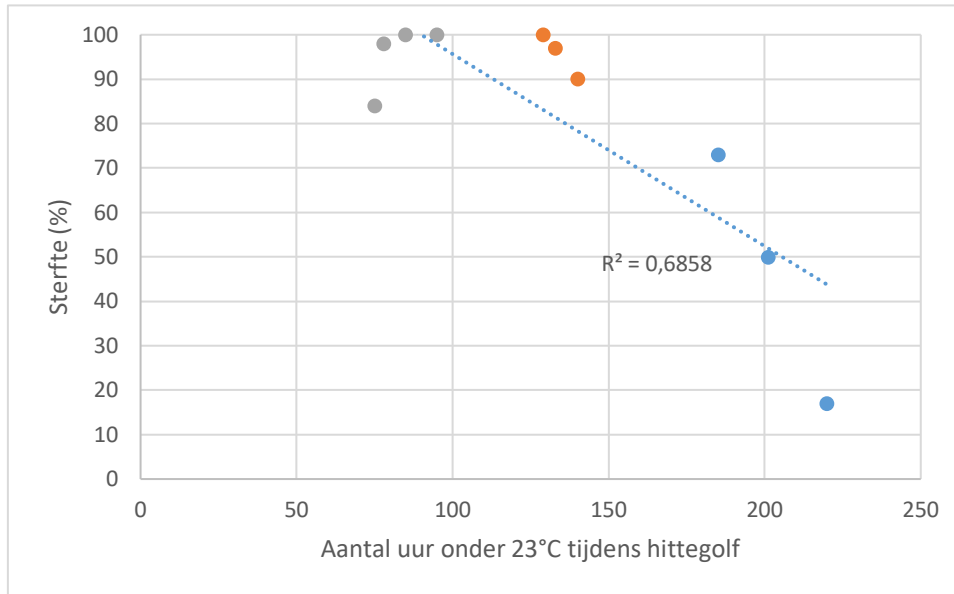
Figuur 16. Sterfte (%) onder 2-jarige kokkels in de Oosterschelde in 2020 uitgezet tegen het aantal aaneengesloten dagen met minstens 3 uur een temperatuur boven de 25°C.

Toch zie je wel consequent een positieve correlatie tussen sterfte en temperatuur (Tabel 2). De correlatie is voor alle locaties onder alle temperatuur variabelen positief of nul. Dat duidt erop dat er een positief verband is tussen temperatuur en sterfte; hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de sterfte. Echter, omdat slechts 3 of 4 waarden per locatie zijn meegenomen in de analyse (sterfte per droogvalduur), is een correlatie niet statistisch vast te stellen. Daarvoor zijn meer waarden nodig die meegenomen kunnen worden in de analyse.

Tabel 2. Correlatie tussen sterfte (1-, 2- en meerjarige kokkels) en temperatuur. R^2 is de determinatiecoëfficiënt en neemt een waarde aan tussen 0 en 1. Hoe dichter dit getal bij de 1 zit, hoe beter de correlatie is tussen de variabelen. '+' geeft aan een positieve correlatie, en '0' geen correlatie. Negatieve correlaties zijn niet waargenomen.

		Roggenplaat		Slikken vd Dortsman		Oesterdam		Totaal	
		R^2	+/-	R^2	+/-	R^2	+/-	R^2	+/-
Totaal aantal uren boven	25°C	0,93	+	0,27	+	0,75	+	0,22	+
	30°C	0,97	+	0,02	+	0,57	+	0,09	+
Aantal aaneengesloten dagen met >12 uur boven	25°C	0	0	0,01	+	0,02	+	0,13	+
	30°C	0	0	0	0	0	0	0	0
Aantal aaneengesloten dagen met >6 uur boven	25°C	0,70	+	0,32	+	0	0	0,32	+
	30°C	0	0	0	0	0,45	+	0,02	+
Aantal aaneengesloten dagen met >3 uur boven	25°C	0,57	+	0,82	+	0,27	+	0,40	+
	30°C	0,80	+	0,68	+	0,22	+	0,16	+

Wanneer gekeken wordt naar het aantal uren dat de temperatuur onder de 23°C kwam gedurende de hittegolf (15 t/m 17 augustus), is te zien dat dit aantal uur veel hoger ligt op de Roggenplaat dan op de andere locaties (gemiddeld 202 uur voor alle droogvalduren t.o.v. 134 uur voor de Dortsman en 83 uur voor de Oesterdam) en dat dit correleert met sterfte (Figuur 17). Sterfte lijkt af te nemen naarmate het aantal uur onder de 23°C tijdens de hittegolf toeneemt. Ook het effect van droogvalduur is hier duidelijk zichtbaar; de laagste droogvalduur (36%) heeft de meeste uren onder de 23°C, namelijk 220. Hoe hoger de droogvalduur, hoe lager het aantal uren onder de 23°C en hoe hoger de sterfte. Een verklaring voor de lagere sterfte op de Roggenplaat zou kunnen zijn dat de kokkels gedurende de nacht iets meer tijd gehad hebben om te herstellen van de hoge temperaturen gedurende de dag. De sterfte op de Oesterdam en Dortsman zijn voor alle droogvalduren zodanig hoog, dat binnen deze twee locaties geen trends meer zichtbaar zijn.



Figuur 17. Sterfte (%) onder 2-jarige kokkels in de Oosterschelde in 2020 uitgezet tegen het aantal uren onder de 23°C. Blauwe bolletjes: Roggenplaat; oranje bolletjes: Dortsman; grijze bolletjes: Oesterdam.

5 Conclusies en discussie

Dit onderzoek is erop gericht om een beter beeld te krijgen van de temperatuurontwikkeling in het sediment gedurende de zomer en welke relatie dit mogelijk heeft tot de sterfte van kokkels.

5.1 Temperatuurverloop in de bodem

Het temperatuurverloop in de bodem op 3 cm diepte is in navolging van het eerdere onderzoek in 2019 nauwkeurig in kaart gebracht. Globaal worden de volgende patronen gevonden:

- Tijdens het droogvallen van het sediment wordt de bodemtemperatuur overdag gestuurd door instraling (alleen overdag) en de luchttemperatuur. Overdag kan het sediment sterk opwarmen. Gedurende de hele zomer worden in de bodem temperaturen van boven de 25°C gemeten. Aan het einde van de zomer tijdens de hittegolf lopen deze temperaturen op tot boven de 30°C. Temperaturen van meer dan 35°C zijn uitzonderingen en worden slechts op 1 dag gemeten op de Roggenplaat. 's Nachts koelt het sediment onder invloed van de luchttemperatuur juist sterk af met soms wel tot >15°C verschil tussen dag en nacht afhankelijk van de droogvalduur. 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 aan de watertemperatuur, indien de inundatieperiode lang genoeg is (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. Het moment van het jaar is hierin bepalend, niet alleen de daglengte en sterkte van de instraling maar ook het feit dat de watertemperatuur steeds hoger opbouwt over de zomer en daardoor minder kan bufferen of in de nachten zelfs hoger is dan de luchttemperatuur.

5.1.1 Locatie

Kokkelsterfte in voorgaande jaren is groter gebleken in de kom dan bij de monding. Daaruit kwam de vraag naar voren of er in de kom van de Oosterschelde sprake is van hogere temperaturen (zowel bodem als water) dan in het middendeel en bij de monding. Het 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. In 2019 is door ontbreken van on-site watertemperatuurmetingen geen verschil in watertemperatuur tussen alle locaties gemeten. Dit jaar zien we die verschillen wel (paragraaf 4.4). Al vroeg in de zomer zijn de watertemperaturen in het oostelijk deel van de Oosterschelde al enkele graden hoger dan die van de gebieden in het middendeel en westen. Dit verschil wordt de hele zomer waargenomen, ook al stijgt de watertemperatuur in alle deelgebieden gedurende de zomer.

De watertemperatuur is sturend voor de bodemtemperatuur na inundatie. Als een locatie lang genoeg overstroomt zal de bodem de watertemperatuur aannemen. Tijdens inundatie wordt dan ook een verschil in bodemtemperatuur gevonden tussen de verschillende locaties, waarbij geldt: hoe oostelijker, hoe warmer. Roggenplaat koelt elke dag weer sterk af onder invloed van het koudere water in de monding. Dit effect is minder groot op de meer oostelijke locaties. Als gevolg zijn de oostelijke locaties bij droogvallen dan ook enkele graden warmer. Echter worden deze verschillen in temperatuur niet teruggevonden in de maximumtemperaturen die bereikt worden in juni (temperaturen Oesterdam en Roggenplaat zijn gelijkwaardig) of tijdens de hittegolf in augustus (Roggenplaat warmt hoger op dan Oesterdam). Andere factoren dan locatie spelen dus ook een rol.

5.1.2 Sediment

Een mogelijke factor die mede het verschil in temperaturopbouw tussen de verschillende locaties kan verklaren is de sedimentsamenstelling. Oesterdam is aanzienlijk slibbiger dan de meer zandige locaties Dortsman en Roggenplaat. Slibrijke sedimenten warmen minder snel en hoog op en koelen minder snel af dan zandige sedimenten (Harrison en Phizacklea 1987, Suykerbuyk et al. 2020, persoonlijke communicatie onderzoeker van het NIOZ, data in dit rapport). Waarschijnlijk is dit het gevolg van verminderde of gebrek aan drainage en daarmee ook gebrek aan instroom van vers zeewater de bodem in bij overstroming. Bij zandigere sedimenten kan lucht en / of vers water dieper in de bodem

binnendringen (Fivash et al. 2019), waardoor de temperatuureffecten dan ook groter zijn. De Roggenplaat warmt immers ondanks de lagere watertemperatuur (en daarmee lagere bodemtemperatuur tijdens inundatie) sneller op en koelt ook sneller af dan de Oesterdam. Dortsman zit daar tussenin, ondanks dat deze locatie net zo zandig is als de Roggenplaat. Hoewel zandig sediment de potentie heeft om goed te draineren hoeft dit natuurlijk in de praktijk niet (altijd) het geval te zijn. Op de cm tot m schaal zien we op zowel Dortsman als Roggenplaat getijdepoeltjes. Op lokaal niveau zou opwarming en/ of afkoeling kunnen verschillen. Al worden eventuele verschillen klein geacht. Daarentegen zijn er grote verschillen in het gedrag van kokkels bij hittestress onder aan- dan wel afwezigheid van getijdepoeltjes (Zhou et al. In prep.): kokkels bewegen bij hittestress naar diepere delen (tot enkele cm's) bij goed drainerende bodem en bewegen naar de oppervlakte wanneer er een klein laagje water op het sediment blijft staan. Mogelijk houdt dit verband met oplopende anoxia, kokkels gaan dan op ondiepere delen of zelfs aan de oppervlakte zitten (Marsden en Bressington 2009), waar ze mogelijk eerder en langer aan hoge temperaturen worden blootgesteld.

5.1.3 Droogvalduur

Droogvalduur heeft doorgaans een positief effect op de mate van opwarming van de bodem in de zomer. Hoe langer een plek droogvalt, hoe langer het de tijd heeft om op te warmen. Hoge bodemtemperaturen worden dan ook eerder en langer bij de langste droogvalduren gemeten (sectie 4.5). Extreme temperaturen die na enkele uren al lethaal kunnen zijn voor kokkels worden ($>34^{\circ}\text{C}$), als ze bij korte droogvalduren al bereikt worden, slechts voor zeer korte tijd gemeten. Effecten op kokkels worden dan ook kleiner verwacht. Echter, dat wil niet zeggen dat korte droogvalduren alleen maar voordelig zijn. Aan het einde van de zomer kan de watertemperatuur warmer zijn dan de luchttemperatuur 's nachts. Waar kort droogvallen overdag dan voordelig is (het water voorkomt het extreem opwarmen van de bodem), kan het juist 's nachts nadelig zijn omdat het sediment dan slechter afkoelt dan wanneer het was blootgesteld aan de koudere luchttemperatuur.

5.1.4 Diepte en timing

Hoe verhouden bovengenoemde relaties zich op grotere diepte in de bodem en gedurende de zomer? Gebleken is dat op grotere diepte in de bodem temperatuurschommelingen minder groot zijn gedurende de dag en dat ze gelijkmatiger verlopen. Diepere delen van het sediment zijn over het algemeen overdag kouder dan de lagen meer aan de oppervlakte, omdat ze minder snel, minder hoog opwarmen. 's Nachts zijn diepere delen vaak warmer, omdat ze minder snel afkoelen onder invloed van de lucht- en/ of watertemperatuur. Dit neemt niet weg dat ook de bodemtemperaturen van de diepere delen aan het eind van de zomer hoog op kunnen lopen. Een eventuele vlucht van kokkels naar koelere, diepere delen is dan zinloos. Bodemtemperaturen tijdens de hittegolf zijn dagen achtereen warmer dan 20°C en daarmee suboptimaal voor kokkels. Kokkels vertonen de hoogste activiteit rond de 20°C . Bij 35°C is de kokkelactiviteit geminimaliseerd en treedt na 6 uur 100% sterfte op (Verdelhos et al. 2015). Mogelijk krijgen kokkels later in de zomer door uitblijven van afkoeling dan ook minder rust of worden ze minder fit omdat ze minder actief zijn en daardoor minder eten.

Tabel 3 Samenvattend overzicht van de factoren die van invloed zijn op de bodemtemperatuur, zoals hierboven beschreven in 5.1.

Factor	Conclusie	Oorzaak
Locatie	Bij inundatie: hoe oostelijker, hoe warmer	Hoe oostelijker, hoe warmer de watertemperatuur
	Bij droogval: geen verschil in maximum temperaturen die bereikt worden gedurende de zomer en tijdens hittegolven	Andere factoren spelen een rol
	Fluctuaties in temperatuur zijn hierdoor in westen groter	
Sediment	Zandig t.o.v. slibrijk: Sneller en meer opwarmen en afkoelen bij zandige sedimenten	Potentieel betere drainage ³ , waardoor in zandig sediment: a) opwarming dieper en beter in de grond kan optreden b) vers, koel water eerder in de bodem komt en voor afkoeling zorgt
Droogvalduur	Bij langere droogvalduur: Overdag: eerder en langer warm 's Nachts: vaak kouder	Langer de tijd om te draineren en onder invloed van straling en luchttemperatuur op te warmen. 's Nachts: vaak kouder omdat luchttemperatuur 's nachts lager ligt dan de watertemperatuur
	Tijdens hittegolf: Korte droogvalduren koelen minder af	Aan het einde van de zomer: Watertemperatuur > luchttemperatuur 's nachts. Afkoeling blijft dan uit.
Diepte	Overdag: Hoe dieper, hoe kouder 's Nachts: Hoe dieper, hoe warmer Tijdens hittegolf: Bodem wordt ook warm en koelt slecht af.	Warmte heeft tijd nodig om diep in te bodem te komen. Idem voor afkoeling door kouder water

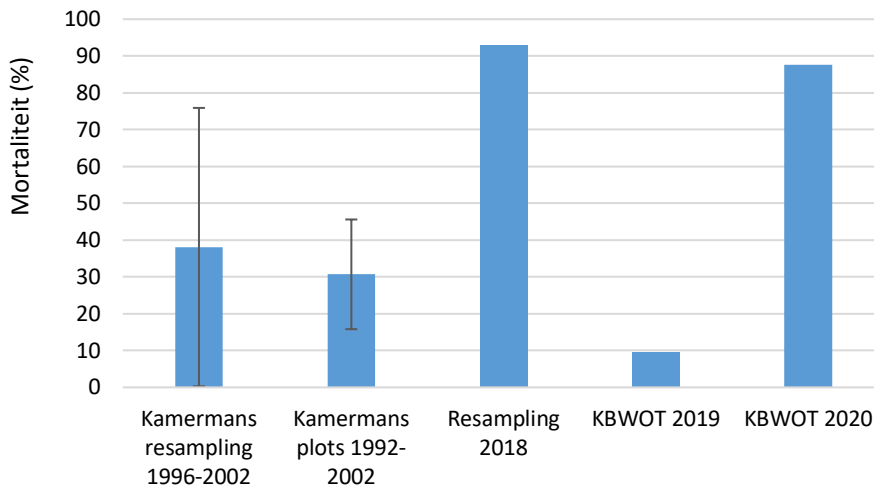
5.2 Kokkelsterfte gedurende de zomer

Met een sterfte van 95% onder de 1-jarige kokkels en 81% onder de 2-jarige kokkels, lag de sterfte onder 1- en 2-jarigen hoger dan voor meerjarige kokkels (sterfte van 68%). De laagst waargenomen sterfte was gemeten onder de meerjarige kokkels op de Slikken van den Dortsman, namelijk 41%. De hoogste sterfte was gevonden onder de 1-jarige kokkels op de Oesterdam, namelijk 96%. Dit is in tegenstelling met wat je zou verwachten op basis van paaigedrag van kokkels (Troost en van Asch 2018). Kokkels paaen meestal pas vanaf hun tweede zomer (Cardoso et al. 2009). De 2-jarige en meerjarige kokkels hebben waarschijnlijk aan het begin van de zomer gepaaid. Ze zijn daarbij een groot deel van hun lichaamsmassa (en dus energie) kwijtgeraakt. Om die reden zou te verwachten zijn dat oudere kokkels met een slechtere conditie de hete zomer in zijn gegaan dan de 1-jarige kokkels, resulterend in hogere sterfte. Op basis van huidig onderzoek blijkt dat echter niet het geval. Het zou kunnen zijn dat de 1-jarige kokkels wel al gepaaid hadden waardoor ook deze leeftijdsklasse een slechtere conditie had alvorens de warme zomer begon. Bij een periode van inactiviteit door bijvoorbeeld hittestress in de zomer zijn mogelijk stressringen gevormd. Deze kunnen worden aangezien voor jaarringen waardoor 1-jarige kokkels zijn geclassificeerd als 2-jarige kokkels en daardoor sterfte onder 2-jarige enigszins is overschat en die onder 1-jarige is onderschat. Om dit zoveel mogelijk te voorkomen, zijn de kokkels bij twijfel door een tweede of zelfs derde expert gecontroleerd op leeftijd. Voor de meerjarige kokkels geldt dat de aangetroffen dichtheden zeer laag waren, waardoor de sterfte schatting door een hogere onzekerheid omgeven is.

De sterfte onder alle leeftijdsklassen samen varieerde van 62% op de Roggenplaat, tot 94% op de Oesterdam. De totale sterfte op de Slikken van Den Dortsman volgde kort op de Oesterdam, namelijk 92%. De gemiddeld gemeten sterfte in de Oosterschelde over alle locaties was 88%.

³ Daadwerkelijke drainage is afhankelijk van de vorm/ helling van je slik/ plaat en kan op de meterschaal verschillen als gevolg van lokale hoogteverschillen (bulten en kuilenlandschap in de orde van cm tot dm).

Van 1992 tot 2002 hebben Kamermans et al. (2003) onderzocht wat de sterfte van kokkels was op een aantal vaste plaatsen (vakken) in de Oosterschelde. De 16 vakken van 40 bij 40 m in de Oosterschelde zijn door de jaren heen zoveel mogelijk hetzelfde gehouden. Daarnaast zijn in 1996 en 2000 t/m 2002 in de maanden september tot december najaar inventarisaties na de visserij uitgevoerd. In 1996 is gebruik gemaakt van een zuigkor vanaf een kokkelvaartuig en in de jaren 2000 t/m 2002 is bemonsterd met een kokkelschepje. Een uitgebreide beschrijving van de methodiek is terug te vinden in de rapportage van Kamermans et al (2003). Hieruit bleek een gemiddelde zomersterfte van 28%, en een gemiddelde sterfte gemeten over een jaar ca. 60% (Figuur 18). De herbemonstering na de massale sterfte in de zomer van 2018 (Troost en van Asch 2018) laat een veel hoger sterftepercentage zien en sluit daarmee beter aan op de resultaten uit voorliggend onderzoek. De waargenomen zomersterfte in 2020 van 88% is daarmee onder alle leeftijdsklassen aan de hoge kant te noemen.



Figuur 18. Gemiddelde kokkelsterfte gedurende de zomermaanden in de Oosterschelde op basis van verschillende onderzoeken.

5.3 Koppeling kokkelsterfte met droogvalduur en bodemtemperaturen

Oorzaken van de sterfte kunnen mogelijk gezocht worden in oplopende temperaturen in de bodem. Van 5 t/m 17 augustus is er een landelijke hittegolf geweest met laagwaterperiodes overdag. Dat heeft ertoe geleid dat maximumtemperaturen in de bodem hoog opliepen. Aangezien enkel in mei en september kokkelbemonsteringen zijn uitgevoerd, kan enkel op basis van persoonlijke observaties iets gezegd worden over de timing van de sterfte gedurende de zomer. Op 12 augustus, tijdens de hittegolf, kwam de eerste melding binnen van extreme kokkelsterfte in de Oosterschelde. Op basis van de gegevens van de temperatuursensoren van voorliggend onderzoek blijkt dat de temperaturen in de bodem binnen een dag op kunnen lopen van ca. 19°C tot 35°C en enkele uren op de hoogste temperatuur blijven steken. Mogelijk leidt dit temperatuurverschil tot verandering van fysiologische processen in kokkels en uiteindelijk tot sterfte. Onder suboptimale condities (hoge temperaturen) vindt namelijk een shift plaats in de energiehuishouding; de energie wordt niet meer gebruikt voor essentiële processen (groeien, eten, reproductie of beweging), maar voor onderhoud (Verdelhos et al., 2015 en referenties daarin). In het onderzoek door Verdelhos et al. 2015 werden de kokkels continu aan bepaalde temperaturen blootgesteld, terwijl in de natuur de temperatuur fluctueert. Het is niet duidelijk wat het effect is van tussenposes waarin de temperatuur weer binnen de optimale range van kokkels valt en hoeveel tijd kokkels nodig hebben om te herstellen van suboptimale condities. Hier kunnen experimenten in het lab meer duiding aan geven. Kokkels kunnen hun gedrag tot op zekere hoogte aanpassen (ingraven) en zo omgaan met hogere temperaturen. Bij oplopende temperaturen graven ze zich iets dieper in zodat ze mogelijk ontsnappen aan de hitte (Zhou et al. In prep.). Echter, uit de temperatuurmetingen blijkt dat ook op grotere diepte (10 cm) temperaturen worden bereikt van 25 – 30 °C. Tijdens laagwater kunnen kokkels dus niet ontsnappen van de hitte door zich dieper in te graven, aangezien daar de temperaturen

net zo hoog oplopen als op 3 cm diepte. Wanneer temperaturen langer dan enkele uren kritische waarden ($>34^{\circ}\text{C}$) aanhouden, kan dit leiden tot inactiviteit, fysiologische stress en uiteindelijk sterfte (Kristensen 1957; Verdelhos et al. 2015).

De optimale temperatuurrange voor kokkels is $20 - 23^{\circ}\text{C}$ (Verdelhos et al., 2015). Tijdens de hittegolf in augustus zijn temperaturen gemeten die hier ver boven kwamen. Uit de resultaten van het onderzoek van Verdelhos et al. 2015 blijkt dat fysiologische processen in kokkels aangetast worden bij temperaturen boven de 23°C wat uiteindelijk kan leiden tot sterfte. Het is echter niet bekend in hoeverre kokkels in staat zijn te herstellen na periodes met hogere temperaturen dan hun optimum. Mogelijk is sterfte afhankelijk van de tijd dat ze blootgesteld worden aan hoge temperaturen in combinatie met de tijd die ze krijgen om te herstellen. Een temperatuur van minder dan 23°C valt binnen de optimumrange voor kokkels wat ze de mogelijkheid geeft om te herstellen (indien geen onomkeerbare fysiologische processen zijn opgetreden). Uit de resultaten van voorliggend onderzoek blijkt dat sterfte op de Roggenplaat (62%) een stuk lager ligt dan sterfte op de Oesterdam (94%) en Dortsman (92%).

De mate waarin dieren in het intergetijdengebied worden blootgesteld aan bepaalde temperaturen varieert per seizoen. Seizoensgebonden veranderingen in thermische tolerantie van *Mytilus edulis* (mossel) zijn nauw gecorreleerd met de hoeveelheid stresseiwitten (Chapple et al. 1998). Tijdens extreme hitte zijn stresseiwitten (hsp70) voor veel organismen belangrijk voor overleving, maar ze hebben ook hoge energetische kosten (Hofmann en Somero 1996). Als het produceren van stresseiwitten veel energie kost, zal natuurlijke selectie ervoor gezorgd hebben dat de kosten/baten ratio optimaal is, waardoor de hoeveelheid stresseiwitten afhankelijk zal zijn van de omgeving (Coleman et al. 1995). Dat blijkt het geval bij *Drosophila* (fruitvlieg). Bij een normale omgevingstemperatuur heeft *Drosophila* weinig stresseiwitten, maar deze eiwitten nemen explosief toe onder extreme omstandigheden. Dat de hoeveelheid stresseiwitten afhankelijk is van de omgevingstemperatuur, wordt ook aangetoond in een studie naar *M. trossulus* (mossel), waarbij hogere levels van stresseiwitten worden gevonden in individuen die in de zomer zijn verzameld dan in de winter (Hofmann en Somero 1995). De synthese van stresseiwitten in *M. trossulus* gebeurt tijdens hoogwater, terwijl het metabolisme tijdens laagwater onderdrukt is waardoor weinig energie beschikbaar is voor de synthese van stresseiwitten tot het weer hoogwater is. Als dit bij kokkels ook het geval is, dan kan dit ertoe leiden dat kokkels op een lagere droogvalduur meer tijd hebben om stresseiwitten te produceren waardoor ze in staat zijn beter met de hitte tijdens laagwater om te gaan.

5.4 Lange termijn ontwikkeling van de kokkelpopulatie in de Oosterschelde met het oog op klimaatverandering

Met de huidige klimaatverandering zullen luchttemperaturen stijgen en worden extremere temperaturen en meer hittegolven verwacht. Als gevolg zal de watertemperatuur ook stijgen en mogelijk ook al eerder in de zomer zijn afkoelende werking verliezen. Daardoor zouden kokkels langer blootgesteld zijn aan voor hen suboptimale temperaturen, waarbij ze verminderd actief zijn en wat mogelijk hun fitness vermindert. Dit effect zal dan het grootst worden geacht in het oostelijke deel van de Oosterschelde, waar het water langer verblijft, eerder en hoger opwarmt en meer slibrijke sedimenten te vinden zijn. Een kanttekening: uit historische analyse blijkt dat hoge zomertemperaturen minder effect hebben op het kokkelbestand dan strenge winters (Beukema en Dekker 2020). Opwarming en daarmee het uitblijven van extreme winters zou dan netto juist positief uit kunnen pakken voor het kokkelbestand. Met de kennis op dit moment blijft het speculeren hoe de kokkelpopulatie zich anders zal gaan ontwikkelen als gevolg van klimaatverandering. We noemen hieronder mogelijke scenario's maar benadrukken dat we op dit moment geen voorspellingen kunnen doen.

Langjarig onderzoek heeft uitgewezen dat zomersterfte onder kokkels gemiddeld 28% is, met grote verschillen tussen jaren (Kamermaans et al. 2003; Figuur 18). De sterftes die zijn bepaald middels een herbemonstering van 2018 (Troost en van Asch 2018) en in deze studie laten zien dat het sterftepercentage nog beduidend hoger kan liggen met als waarschijnlijke oorzaak periodes met extreme hitte. Normaal gesproken worden broed en juvenielen van mariene invertebraten gevoeliger geacht voor hoge temperaturen (Beukema en Dekker 2020). Uit de herbemonstering van 2018 bleek dat in de Waddenzee extreme sterfte was opgetreden onder 2-jarige en meerjarige kokkels maar niet onder 1-jarige kokkels (Troost en van Asch 2018). In de Oosterschelde was echter ook deze leeftijdsklasse massaal gestorven. Uit de resultaten van voorliggend onderzoek lijkt de sterfte het hoogst voor de 1-jarige en het laagst voor de meerjarige kokkels. Toch is dat niet statistisch vast te stellen aangezien het aantal meerjarige kokkels dat is aangetroffen erg laag was door massale sterfte in 2018. Analyse van langjarige data van het kokkelbestand in de Waddenzee wijst ook op een hogere gevoeligheid ten aanzien van extreme temperaturen van adulte kokkels ten opzichte van juveniele

(Beukema en Dekker 2020). Indien in toekomstige jaren de 2-jarige en meerjarige kokkels gevoeliger zijn voor hitte in de zomer en enkel de 1-jarige blijven leven, dan kan er nog een aanzienlijk bestand over blijven dat in het volgende voorjaar of vroege zomer weer kan paaien voordat er eventueel weer een massale zomersterfte plaatsvindt. Omdat paaiende kokkels miljoenen eitjes en zaadcellen uitstoten is er een relatief kleine ouderpopulatie nodig om in één seizoen weer een bestand van betekenis te hebben. Dit geldt ook in het scenario waarin sterfte onder 1-jarige kokkels even hoog is als onder de meerjarige, maar er toch een kleine restpopulatie achterblijft in gebieden waar de omstandigheden minder extreem zijn geweest, zoals het ondiepe sublitoraal dat meestal is bedekt met water (en waar steltlopers er niet bij kunnen). Dan moeten deze individuen echter niet te zeer verzwakt zijn geraakt, moeten ze niet ook nog een strenge winter te verduren krijgen, en voldoende kwalitatief goed voedsel krijgen om hun gonaden weer op te bouwen tot het volgende paaiseizoen. Klimaatverandering zou kunnen leiden tot een verandering in de gemiddelde omvang van het kokkelbestand, tot een verschuiving in de leeftijdsopbouw, of tot een verschuiving in het verspreidingspatroon naar bijvoorbeeld het ondiepe sublitoraal. Op dit moment kunnen we enkel speculeren over de toekomst van de kokkel populatie op de droogvallende platen van de Oosterschelde onder invloed van het vaker optreden van extreme zomersterftes. Om gefundeerde voorspellingen te kunnen doen is meer onderzoek nodig naar bijvoorbeeld de fysiologische respons van kokkels op veranderingen in leefomstandigheden. Het effect van extreme temperaturen op de kokkelpopulatie vertaalt zich door naar de kwaliteit van het intergetijdengebied en de beschikbaarheid van voedsel voor vogels. Scholeksters en andere steltlopers zijn in de winter voor hun voedselvoorziening sterk afhankelijk van schelpdieren, met name kokkels en mosselen. Indien er vanwege extreme zomersterfte niet voldoende kokkels aanwezig zijn, kan dat een negatief effect op de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers hebben indien ook andere voedselbronnen ontbreken waarvan de vogels in de winter afhankelijk zijn (zoals mosselen). Dit zou kunnen leiden tot een voedseltekort en mogelijk omvangrijke sterfte onder steltlopers in de winter.

5.5 Aanbevelingen

De methode met plaatsing van temperatuurloggers aan bamboestokken en gebruik van markers ter bepaling van de temperatuuropbouw in de bodem is wederom succesvol gebleken, ondanks verlies van enkele loggers. Het over langere tijd meten en de uitbreiding met loggers ter bepaling van het exacte overstromingsmoment, de lokale watertemperatuur en mate van instraling on-site heeft geleid tot een betere interpretatie van de temperatuurdata. Ook de uitbreiding met loggers op meerdere diepten heeft tot een betere inzichten geleid m.b.t. de temperatuuropbouw in de bodem en de effecten op de kokkels en/ of andere infauna. Bij herhaling van dit onderzoek is het dan ook waardevol om deze meetopzet te handhaven. Wel dient rekening gehouden te worden met verlies en of uitvallen van loggers. Replica's in metingen wordt dan ook geadviseerd.

Ook de methode tot bepaling van kokkelsterfte is afdoende gebleken. Voortzetting van deze bepaling in de komende jaren wordt aanbevolen om trends in kokkelsterfte op dezelfde locaties te kunnen monitoren. Voor betrouwbare sterftecijfers dient bij selectie van de monsterlocaties wel initieel een hoge aanwezigheid van kokkels te zijn (> 50 individuen/m²). Wanneer aantallen bij de voorjaarsbemonstering al laag zijn, is het lastig om betrouwbare sterfteberekeningen te kunnen uitvoeren. Dergelijke locaties zouden dan achterwege gelaten kunnen worden. Wanneer slechts 1 jaarklasse lage aantallen heeft, geeft dit mogelijk ook een minder betrouwbaar beeld. Deze jaarklasse zou dan buiten de analyse gehouden kunnen worden.

Daarbij is het lastig gebleken om voor sommige kokkels de leeftijd te bepalen door de aanwezigheid van zogenaamde 'stressringen', welke zijn ontstaan doordat de kokkels gedurende een periode in de zomer als gevolg van stress niet gegroeid zijn. Deze ringen lijken veel op de jaarringen die ontstaan doordat kokkels in de winter niet groeien, en zijn daar moeilijk van te onderscheiden. Derhalve zou het aantal jaarringen overschat kunnen zijn waardoor kokkels als ouder zijn bestempeld. Hetzelfde zou andersom kunnen zijn gebeurd; jaarringen zijn aangezien voor stressringen en kokkels zijn juist jonger ingeschat dan ze in werkelijkheid waren. Een alternatieve methode tot leeftijdsbepaling, waarbij de schelp doorgezaagd wordt, zou overwogen kunnen worden.

De mechanismen achter kokkelsterfte in het licht van temperatuurstress zouden verder uitgediept kunnen worden, zowel in het veld als experimenteel. Bij laboratoriumexperimenten worden kokkels vaak langdurig blootgesteld aan extreme temperaturen (Kristensen 1957; Verdelhos et al. 2015). Het is echter van belang om te onderzoeken wat het effect is van meer natuurlijke, fluctuerende temperaturen op kokkels, waarbij enkele uren temperaturen worden bereikt van meer dan 30°C, maar dat deze vervolgens weer afnemen tot 20°C. Vragen die daarbij gesteld kunnen worden zijn: In hoeverre kunnen kokkels herstellen na deze extreme temperaturen? En wat is daarvoor nodig? Hoe vaak kunnen dit soort pieken optreden alvorens kokkels sterven? Wanneer treden onomkeerbare fysiologische processen op?

En is deze respons hetzelfde voor kokkels uit warmere oorden die wellicht genetisch al beter bestand zijn tegen hoge temperaturen (kokkels komen voor van de Barents zee tot Marokko⁴)? Dit soort vragen zouden onderzocht kunnen worden door kokkels onder gecontroleerde omstandigheden bloot te stellen aan verschillende omgevingstemperaturen. Onderliggend onderzoek leert dat hierbij naast aandacht voor effect van piektemperaturen ook aandacht moet zijn voor de effecten van langdurig verminderde afkoeling van de omgeving op het gedrag, de fitness en eventuele sterfte van kokkels. Dit levert waardevolle informatie op over de tolerantie van kokkels ten aanzien van temperatuur en de mogelijke gevolgen daarvan op de fysiologie, populatie op korte en langere termijn. Met kennis van dat vervolgonderzoek zou bepaald kunnen worden of er maatregelen genomen kunnen worden om de sterfte te beperken. Op dit moment zien we niet in hoe de sterfte beperkt kan worden. Aan eventuele herstelmaatregelen, zoals introducties om het bestand op peil te houden, kleven vaak ook nadelige effecten.

⁴ <https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1384>

6 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

- Ansell, A. D., Barnett, P. R. O., Bodoy, A., en Masse, H. (1981), 'Upper temperature tolerances of some european mollusks .3. *Cardium glaucum*, *Cardium-tuberculatum* and *Cardium-edule*', *Marine Biology*, 65 (2), 177-83.
- Beukema, J. J. en Dekker, R. (2020), 'Winters not too cold, summers not too warm: long-term effects of climate change on the dynamics of a dominant species in the Wadden Sea: the cockle *Cerastoderma edule* L', *Marine Biology*, 167 (4), 8.
- Burdon, D., Callaway, R., Elliott, M., Smith, T., en Wither, A. (2014), 'Mass mortalities in bivalve populations: A review of the edible cockle *Cerastoderma edule* (L.)', *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 150, 271-80.
- Cardoso, Jfmf, Witte, J. I. J., en van der Veer, H. W. (2009), 'Differential reproductive strategies of two bivalves in the Dutch Wadden Sea', *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 84 (1), 37-44.
- Chapple, J. P., Smerdon, G. R., Berry, R. J., en Hawkins, A. J. S. (1998), 'Seasonal changes in stress-70 protein levels reflect thermal tolerance in the marine bivalve *Mytilus edulis* L', *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 229 (1), 53-68.
- Coleman, J. S., Heckathorn, S. A., en Hallberg, R. L. (1995), 'Heat-shock proteins and thermotolerance - linking molecular and ecological perspectives', *Trends in Ecology & Evolution*, 10 (8), 305-06.
- 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*.
- Harley, C. D. G., Hughes, A. R., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., en Williams, S. L. (2006), 'The impacts of climate change in coastal marine systems', *Ecology Letters*, 9 (2), 228-41.
- 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.
- Hofmann, G. E. en Somero, G. N. (1995), 'Evidence for protein damage at environmental temperatures - seasonal-changes in levels of ubiquitin conjugates and hsp70 in the intertidal mussel *Mytilus-trossulus*', *Journal of Experimental Biology*, 198 (7), 1509-18.
- (1996), 'Protein ubiquitination and stress protein synthesis in *Mytilus trossulus* occurs during recovery from tidal emersion', *Molecular Marine Biology and Biotechnology*, 5 (3), 175-84.
- 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*.
- 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.
- Kristensen, I (1957), 'Differences in density and growth in a cockle population in the Dutch Wadden Sea', *ARCH NEERLAND ZOOLOGIE*, V12, 351.
- 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.
- Newell, R. I. E. en Bayne, B. L. (1980), 'Seasonal-changes in the physiology, reproductive condition and carbohydrate content of the cockle *Cardium (=cerastoderma) edule* (bivalvia, cardiidae)', *Marine Biology*, 56 (1), 11-19.
- Perkins-Kirkpatrick, S. E. en Lewis, S. C. (2020), 'Increasing trends in regional heatwaves', *Nature Communications*, 11 (1), 8.
- 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.
- Portner, H. O., Peck, L. S., en Hirse, T. (2006), 'Hyperoxia alleviates thermal stress in the Antarctic bivalve, *Laternula elliptica*: evidence for oxygen limited thermal tolerance', *Polar Biology*, 29 (8), 688-93.
- 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.

-
- Suykerbuyk, W, Tangelder, M, en Walles, B (2020), 'Hittestress op de intergetijdenplaten van de Oosterschelde. Temperatuurmetingen in de bodem van droogvallende platen in de zomer van 2019'.
- 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.
- Zhou, Z., Bouma, T.J., Ysebaert, T., van IJzerloo, L., en van Dam, B. Walles, B. (In prep.), 'Thermal stress affects bioturbators' burrowing behavior: a mesocosm experiment on common cockles (*Cerastoderma edule*)'.

Verantwoording

Rapport C026/21

Projectnummer: 4318100312

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. P. Kamermans
Onderzoeker

Handtekening:



Datum: 19 maart 2021

Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager integratie

Handtekening:



Datum: 19 maart 2021

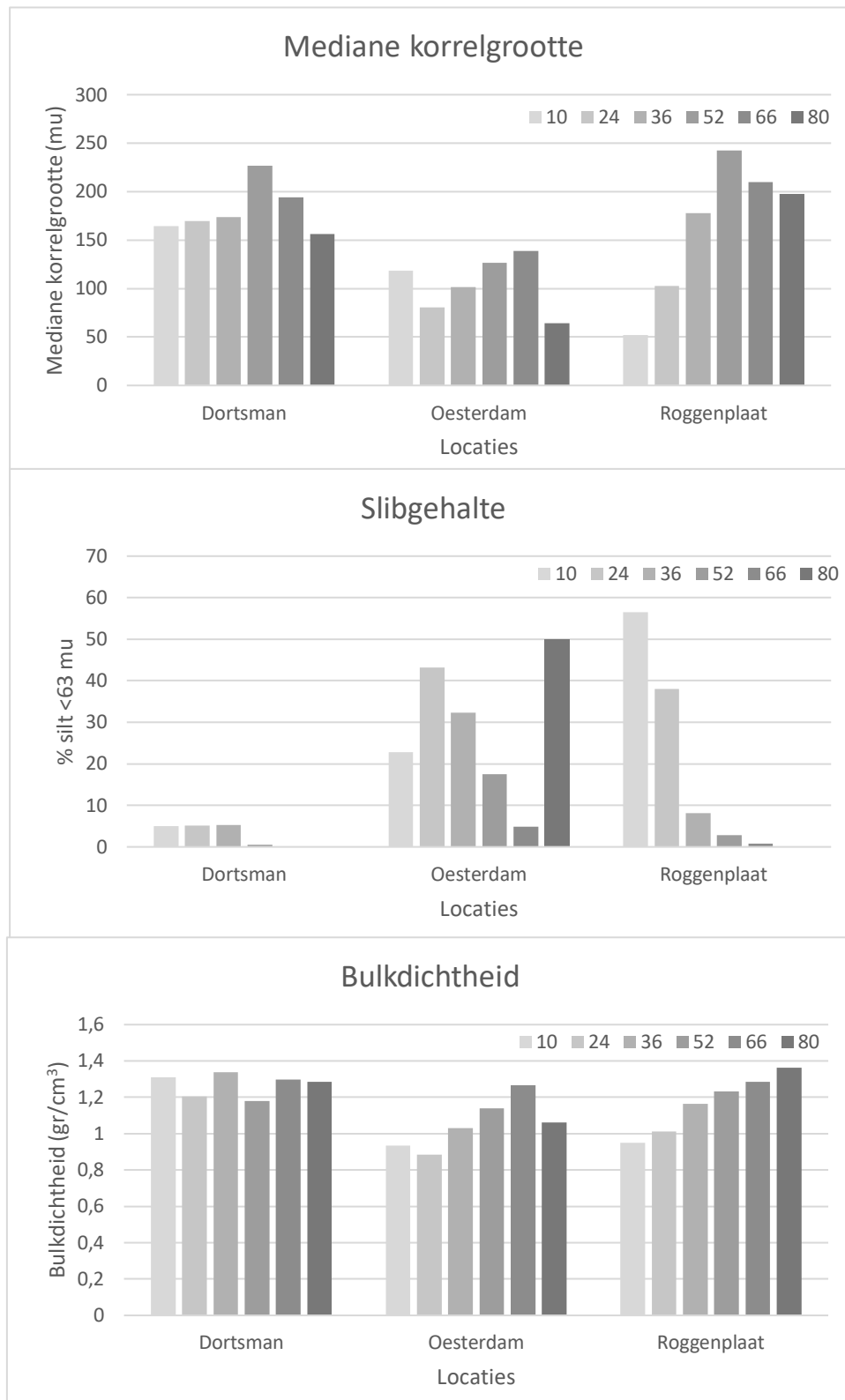
7 Bijlages

7.1 Meetpunt karakteristieken

Tabel 4 Karakteristieken per meetpunt. Droogvalduur: % gemiddelde droogvalduur op basis van bathymetriekaarten. Loggercoördinaten (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. Schuingedrukte loggers zijn niet meegenomen in de analyses omdat deze of niet teruggevonden zijn of niet (volledig) gemeten hebben.

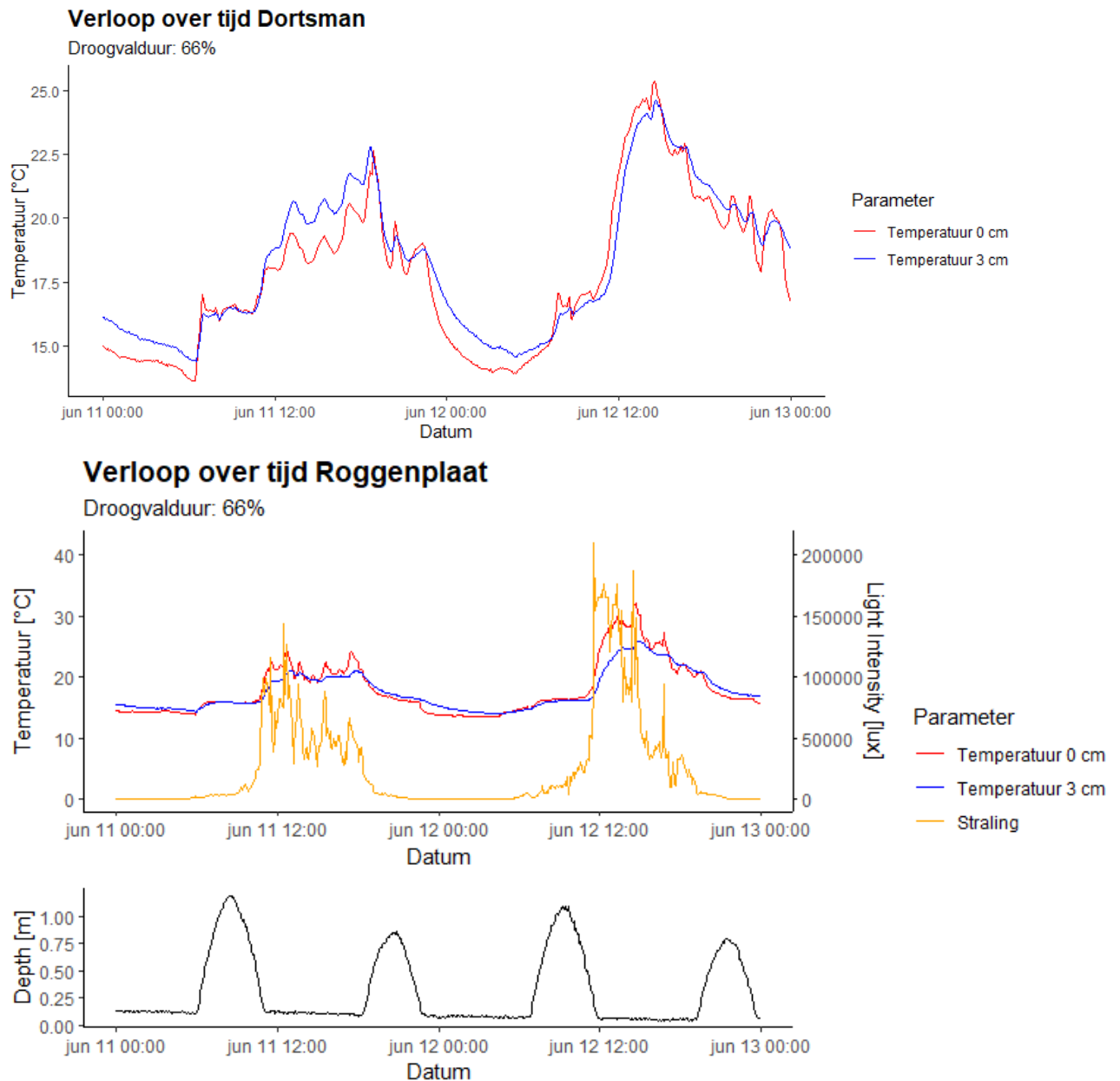
Locatie	Transect	DVD (%)	Loggers		Lat(North)	Lon(East)	Height (m)			Bulk density
			Temperatuur	Licht / Diver				SD50	SILT <63µm	
								µm	%	
Dortsman	1	10	3		399467	57744	-1.34	162.2	5.66	1.34
Dortsman	1	24	3		399359	57878	-0.89	177.6	6.06	1.24
Dortsman	1	36	3		399293	58018	-0.43	157.5	6.85	1.37
Dortsman	1	52	3		398945	57744	-0.03	231.4	0.00	1.10
Dortsman	1	66	3		399192	58337	0.70	196.1	0.00	1.34
Dortsman	1	80	3		399156	58851	1.22	156.2	0.00	1.26
Dortsman	2	10	3		399588	57656	-1.38	166.6	4.29	1.28
Dortsman	2	24	3		399299	57764	-0.90	161.2	4.30	1.18
Dortsman	2	36	0/3/5/10	Diver	399157	57782	-0.36	190.1	3.68	1.31
Dortsman	2	52	3		398982	58019	0.13	222.6	1.05	1.26
Dortsman	2	66	0/3/5/10	Licht & Diver	398982	58418	0.72	192.3	0.00	1.25
Dortsman	2	80	3		399003	58980	1.17	156.7	0.00	1.31
Oesterdam	1	10	3		385401	73677	-1.50	86.4	40.03	0.93
Oesterdam	1	24	3		385173	73786	-0.98	76.3	45.62	0.86
Oesterdam	1	36	3		384897	73768	-0.46	115.5	25.23	1.10
Oesterdam	1	52	3		384692	73816	0.03	140.3	6.29	1.21
Oesterdam	1	66	3		384410	73831	0.58	140.2	4.68	1.28
Oesterdam	1	80	3		383764	73855	1.24	76.3	40.09	0.84
Oesterdam	2	10	3		385355	73577	-1.42	150.0	5.57	0.94
Oesterdam	2	24	3		385053	73639	-0.95	84.6	40.78	0.91
Oesterdam	2	36	0/3/5/10	Diver	384873	73637	-0.40	87.4	39.35	0.96
Oesterdam	2	52	3		384670	73650	-0.05	112.6	28.67	1.06
Oesterdam	2	66	0/3/5/10	Licht & Diver	384279	73670	0.63	137.9	4.93	1.25
Oesterdam	2	80	3		383784	73718	1.02	52.6	59.97	1.29
Roggenplaat	1	10	3		408375	47629	-1.23	22.6	68.04	0.90
Roggenplaat	1	24	3		408520	47632	-0.98	122.3	29.93	1.22
Roggenplaat	1	36	3		408652	47676	-0.62	180.5	8.00	1.20
Roggenplaat	1	52	3		408919	47723	0.03	221.1	4.74	1.13
Roggenplaat	1	66	3		409308	47886	0.60	218.4	0.60	1.29
Roggenplaat	1	80	3		409443	48269	0.68	203.0	0.00	1.35
Roggenplaat	2	10	3		408357	47830	-1.27	81.1	45.09	1.00
Roggenplaat	2	24	3		408462	47863	-1.10	83.2	46.23	0.80
Roggenplaat	2	36	0/3/5/10	Diver	408669	47884	-0.62	174.5	8.20	1.13
Roggenplaat	2	52	3		408912	47946	0.15	263.7	0.86	1.34
Roggenplaat	2	66	0/3/5/10	Licht & Diver	409268	48067	0.46	201.6	0.94	1.28
Roggenplaat	2	80	3		409481	48412	0.62	192.0	0.00	1.38

7.2 Sediment karakteristieken



Figuur 19 Sedimentkarakteristieken van de meetpunten op locaties Dortsman, Oesterdam en Roggenplaat. Boven: mediane korrelgrootte verdeling (mu), midden: gehalte slib kleiner dan 63mu uitgedrukt als het percentage totale monster, onder: Bulkdichtheid van het sediment in gr/cm³. Per locatie zijn de waarde opgesplitst per droogvalduur (resp. 10, 24, 36, 52, 66 en 80%).

7.3 Temperatuur verloop op Dortsman en Roggenplaat

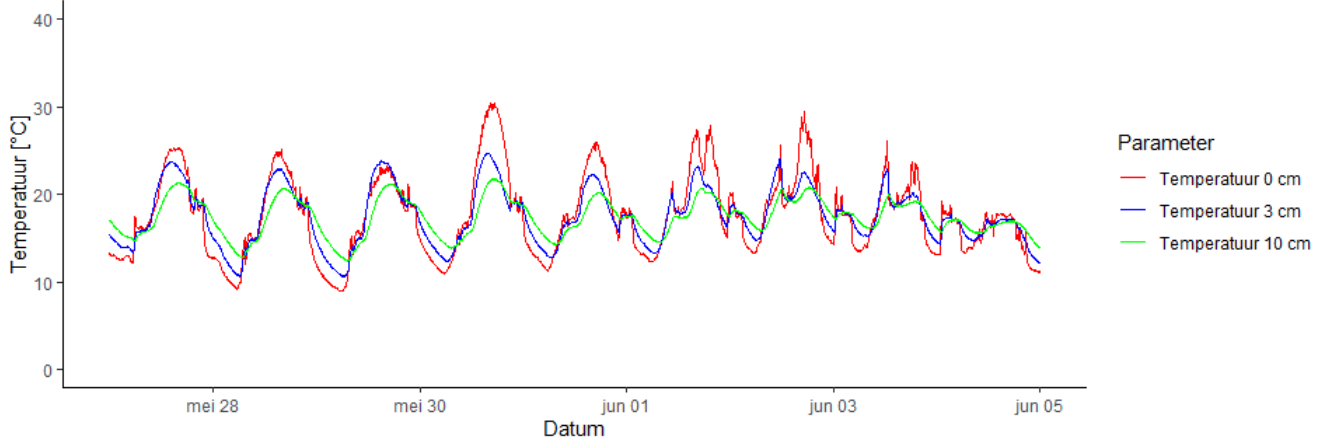


Figuur 20 Temperatuurverloop net boven (rode lijn) en op 3cm in het sediment (blauwe lijn) op meetlocatie Dortsman (boven) en Roggenplaat (midden) met een gemiddelde droogvalduur van 66%. De rode lijn zal bij droogvallen de luchttemperatuur meten en bij overstromen de watertemperatuur. De gele lijn geeft de instraling op het meetpunt weer, gemeten net boven het sediment. NB. Bij overstroming valt de instraling ook (grotendeels) weg. In zwart onder: verloop in waterdiepte waarbij horizontale stukken de periode van droogvallen zijn.

7.4 Temperatuur verloop: verschillen in diepte op Dortsman en Roggenplaat

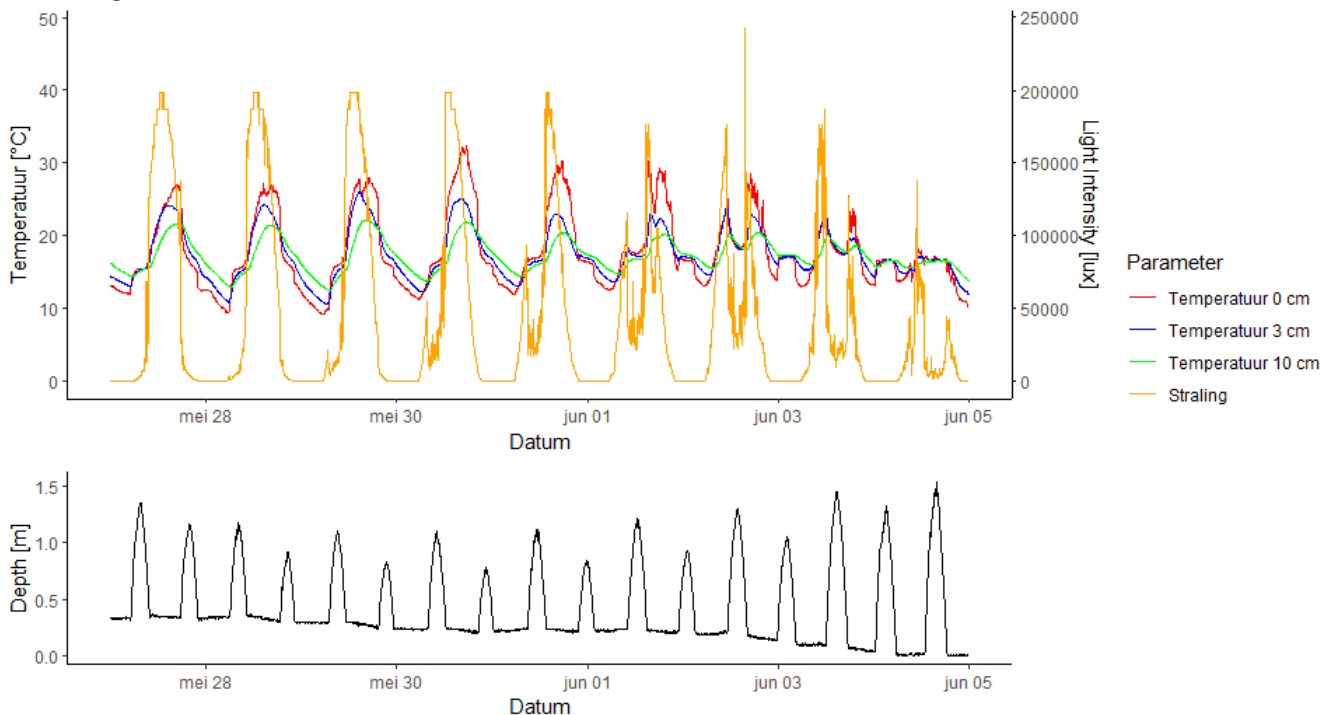
Verloop alle diepten over tijd Dortsman

Droogvalduur: 66%



Verloop alle diepten over tijd Roggenplaat

Droogvalduur: 66%

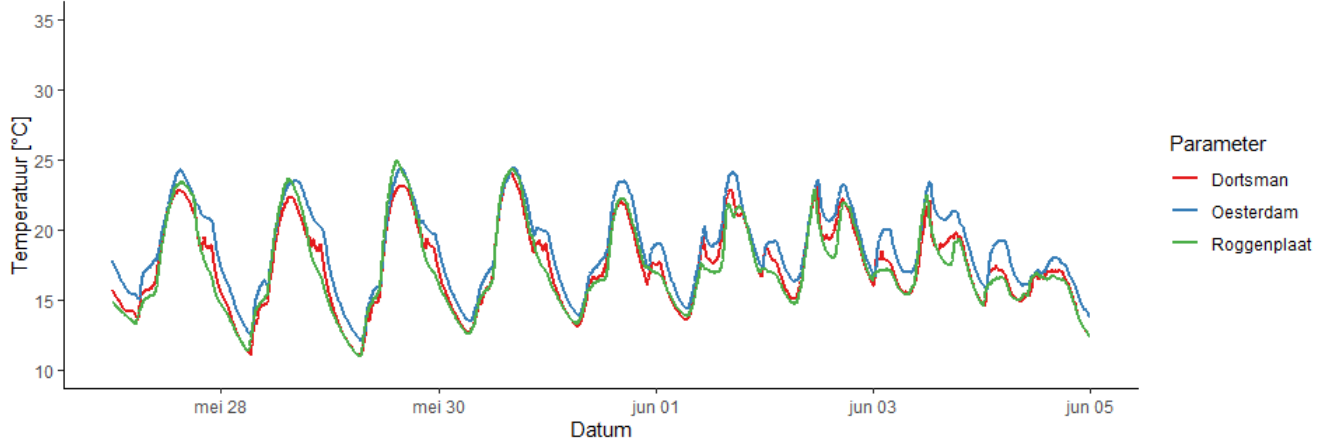


Figuur 21 Temperatuurverloop net boven (rode lijn) en op 3cm in het sediment (blauwe lijn) op meetlocatie Dortsman (boven) en Roggenplaat (midden) met een gemiddelde droogvalduur van 66%. De rode lijn zal bij droogvallen de luchttemperatuur meten en bij overstromen de watertemperatuur. De gele lijn geeft de instraling op het meetpunt weer, gemeten net boven het sediment. NB. Bij overstroming valt de instraling ook (grotendeels) weg. In zwart: verloop in waterdiepte waarbij horizontale stukken de periode van droogvallen zijn.

7.5 Temperatuur verloop: verschillen in locatie - mei/ juni

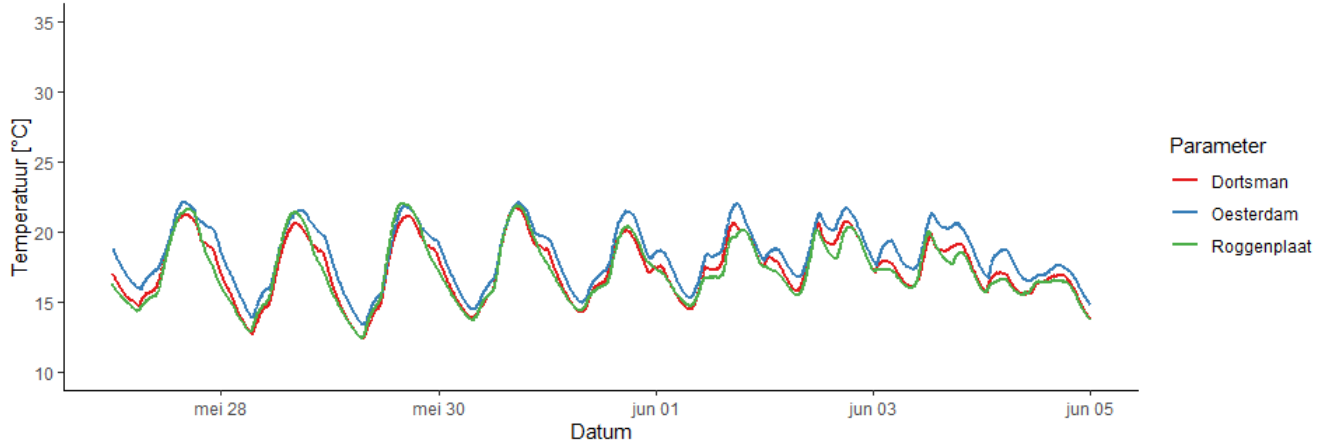
Verloop alle locaties over tijd - 5 cm

Droogvalduur: 66%



Verloop alle locaties over tijd - 10 cm

Droogvalduur: 66%

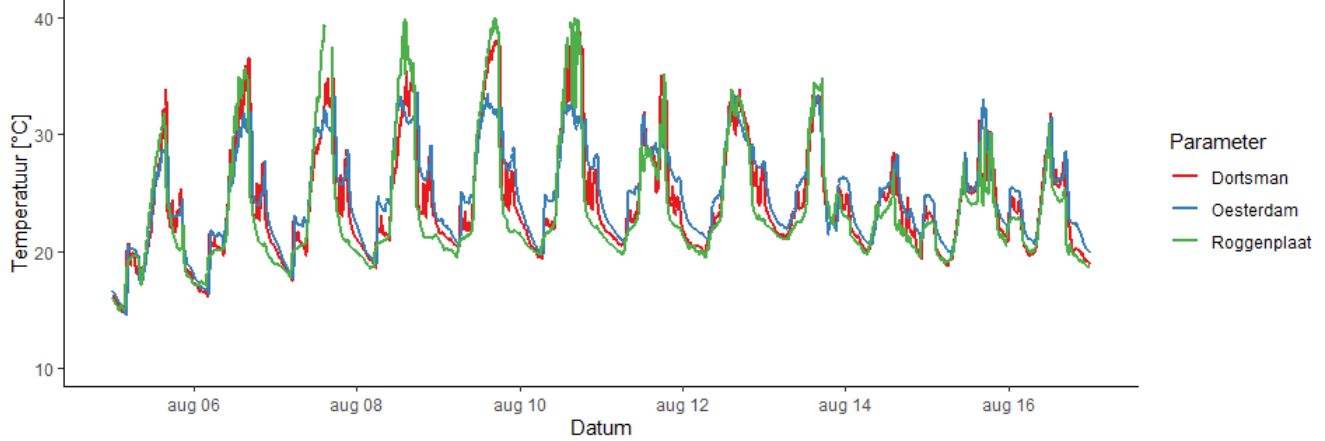


Figuur 22 Temperatuurverloop in de periode 27 mei tot 5 juni 2020 op locaties Dortsman (rood), Oesterdam (blauw) en Roggenplaat (groen). Metingen op 5 cm (boven) en 10 cm (onder) diepte in het sediment.

7.6 Temperatuur verloop: verschillen in locatie - augustus

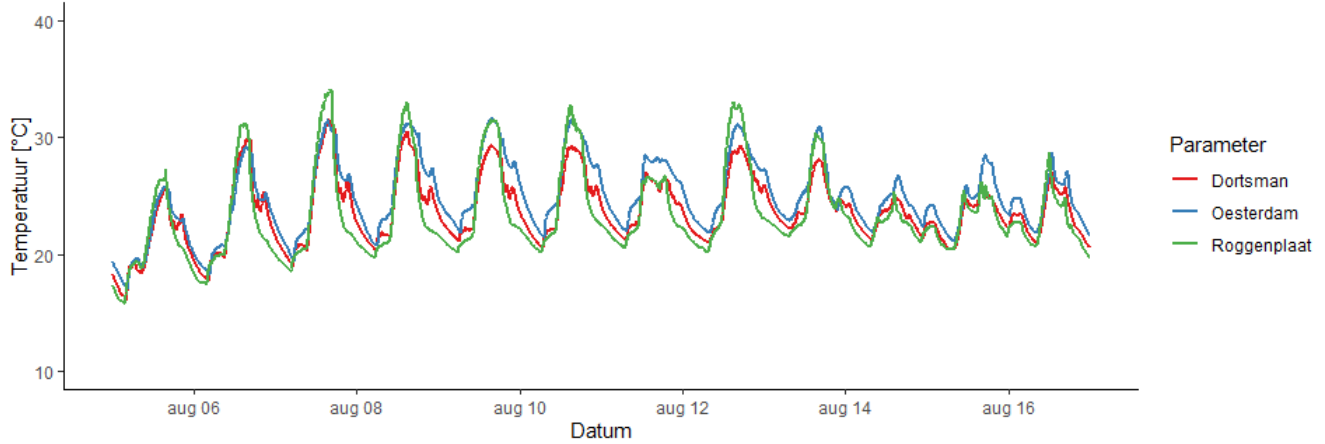
Verloop alle locaties over tijd - 0 cm

Droogvalduur: 66%



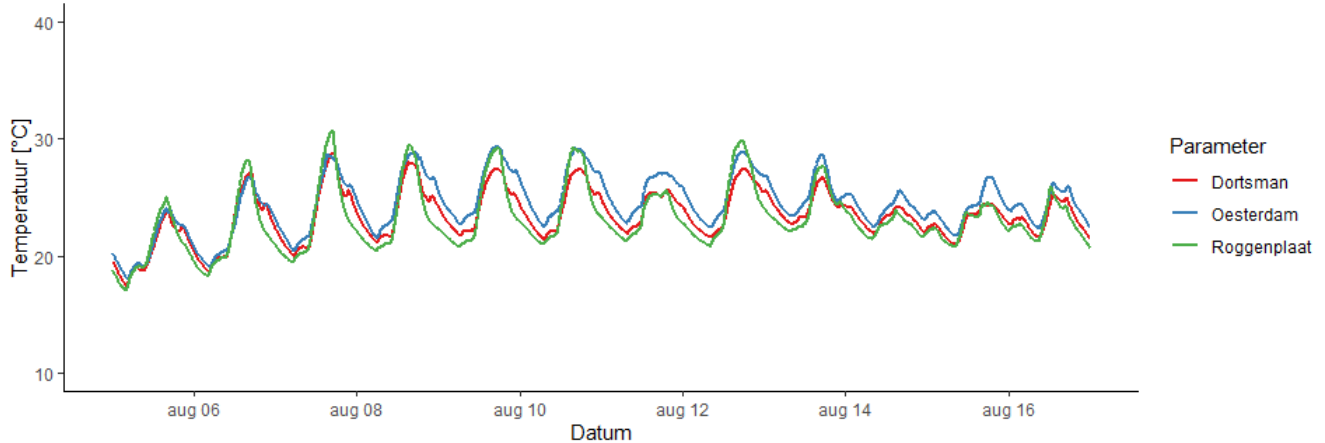
Verloop alle locaties over tijd - 5 cm

Droogvalduur: 66%



Verloop alle locaties over tijd - 10 cm

Droogvalduur: 66%

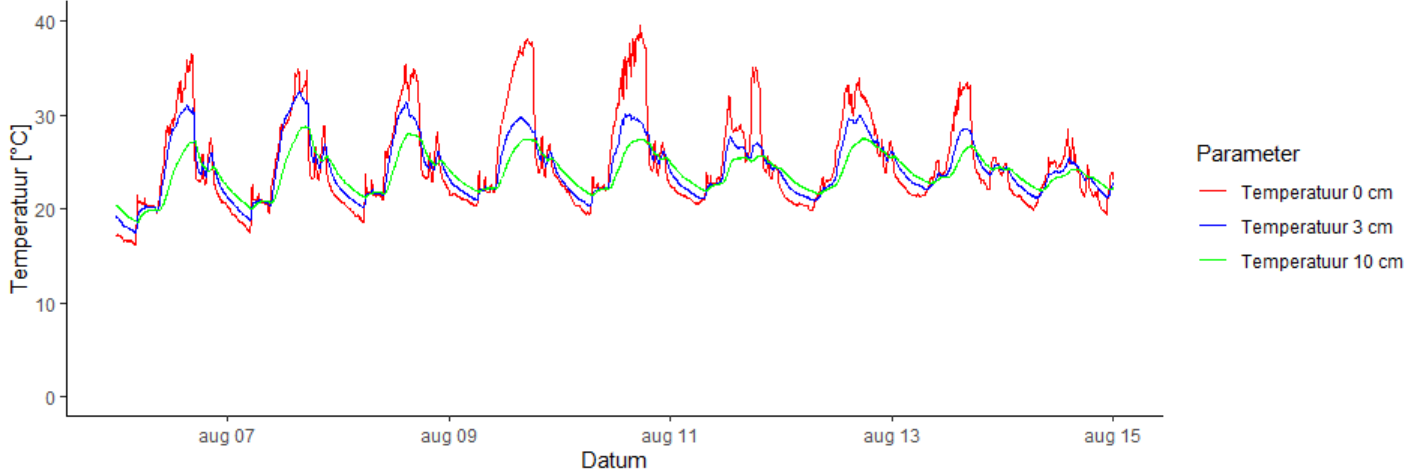


Figuur 23 Temperatuurverloop in de periode 5 tot 17 augustus 2020 op locaties Dortsman (rood), Oesterdam (blauw) en Roggenplaat (groen). Metingen op 0 cm (boven) 5 cm (midden) en 10 cm (onder) diepte in het sediment.

7.7 Temperatuur verloop tijdens hittegolf: Dortsman en Roggenplaat

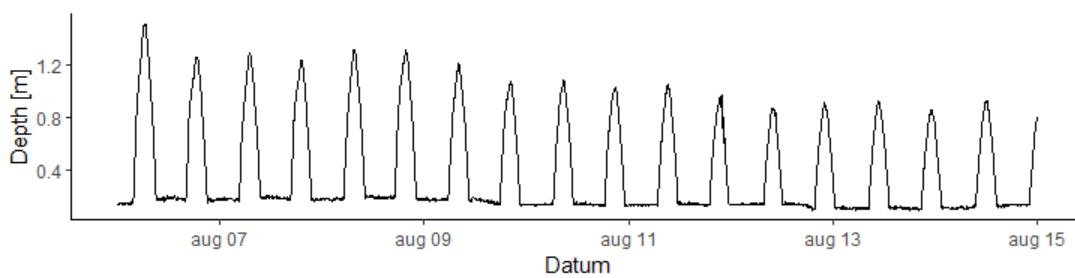
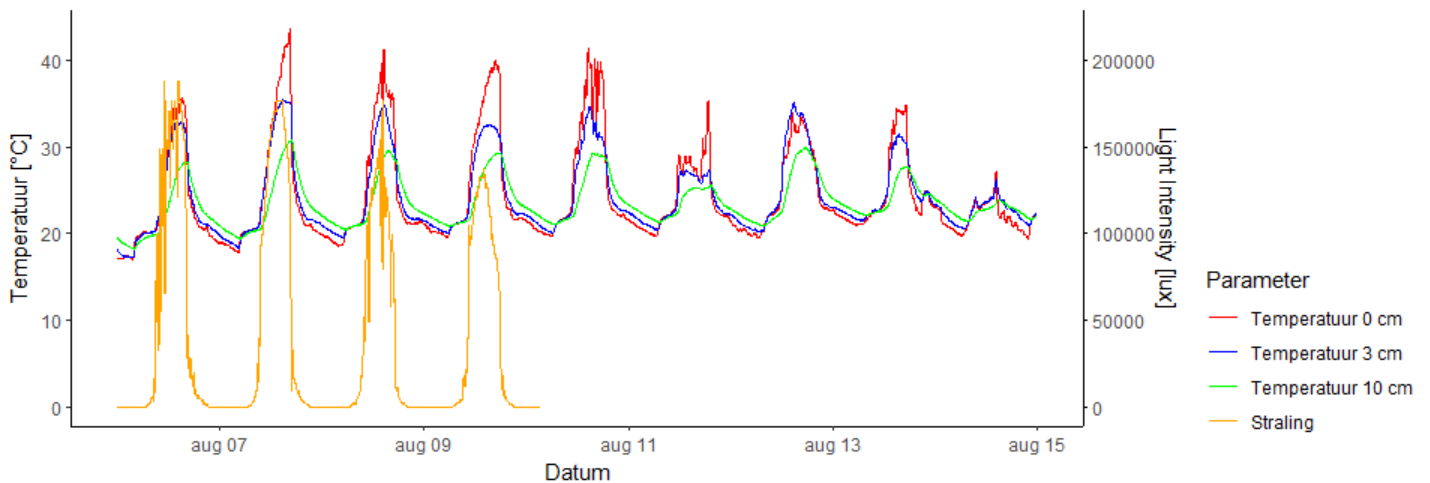
Verloop alle diepten over tijd Dortsman

Droogvalduur: 66%



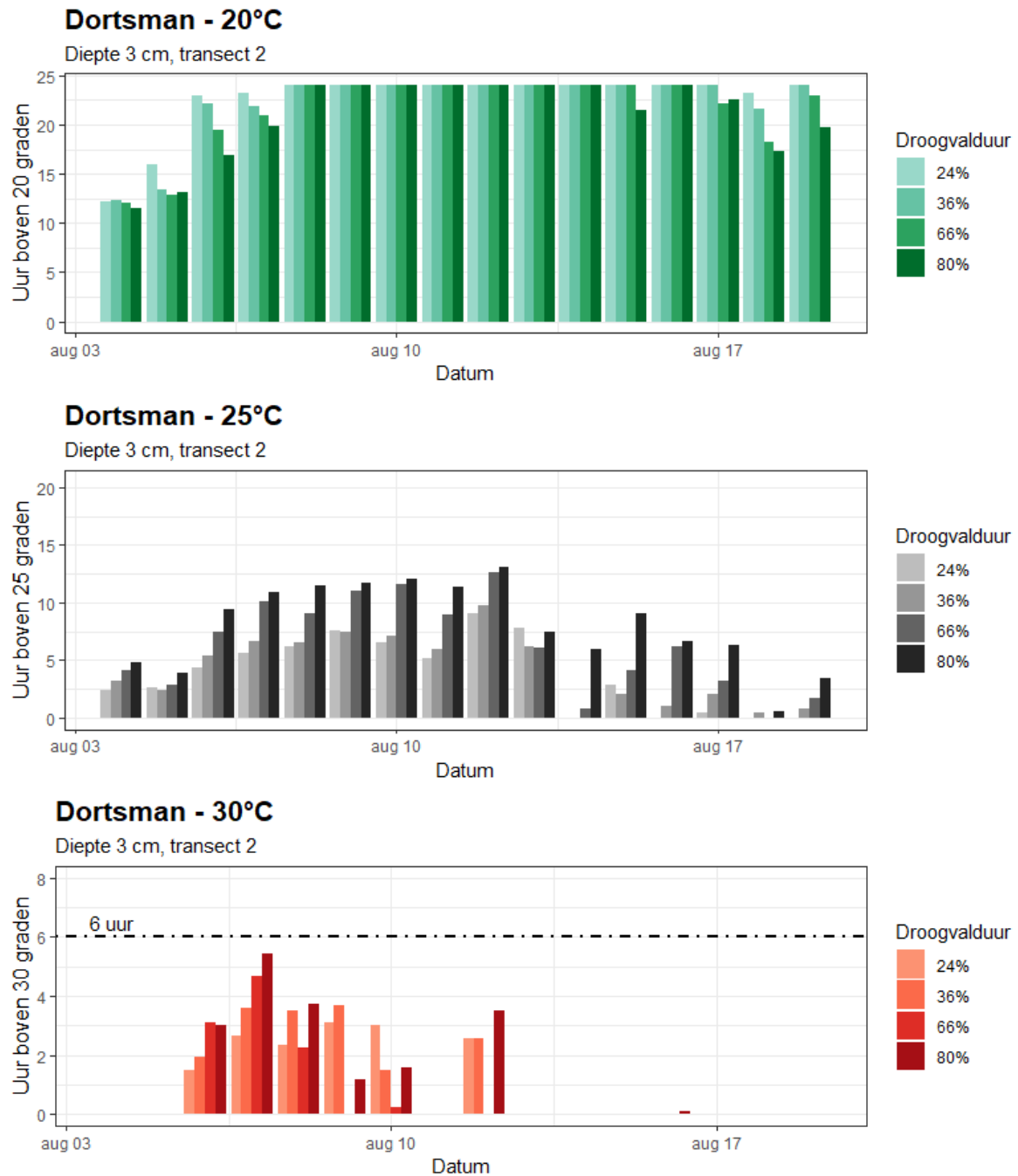
Verloop alle diepten over tijd Roggenplaat

Droogvalduur: 66%



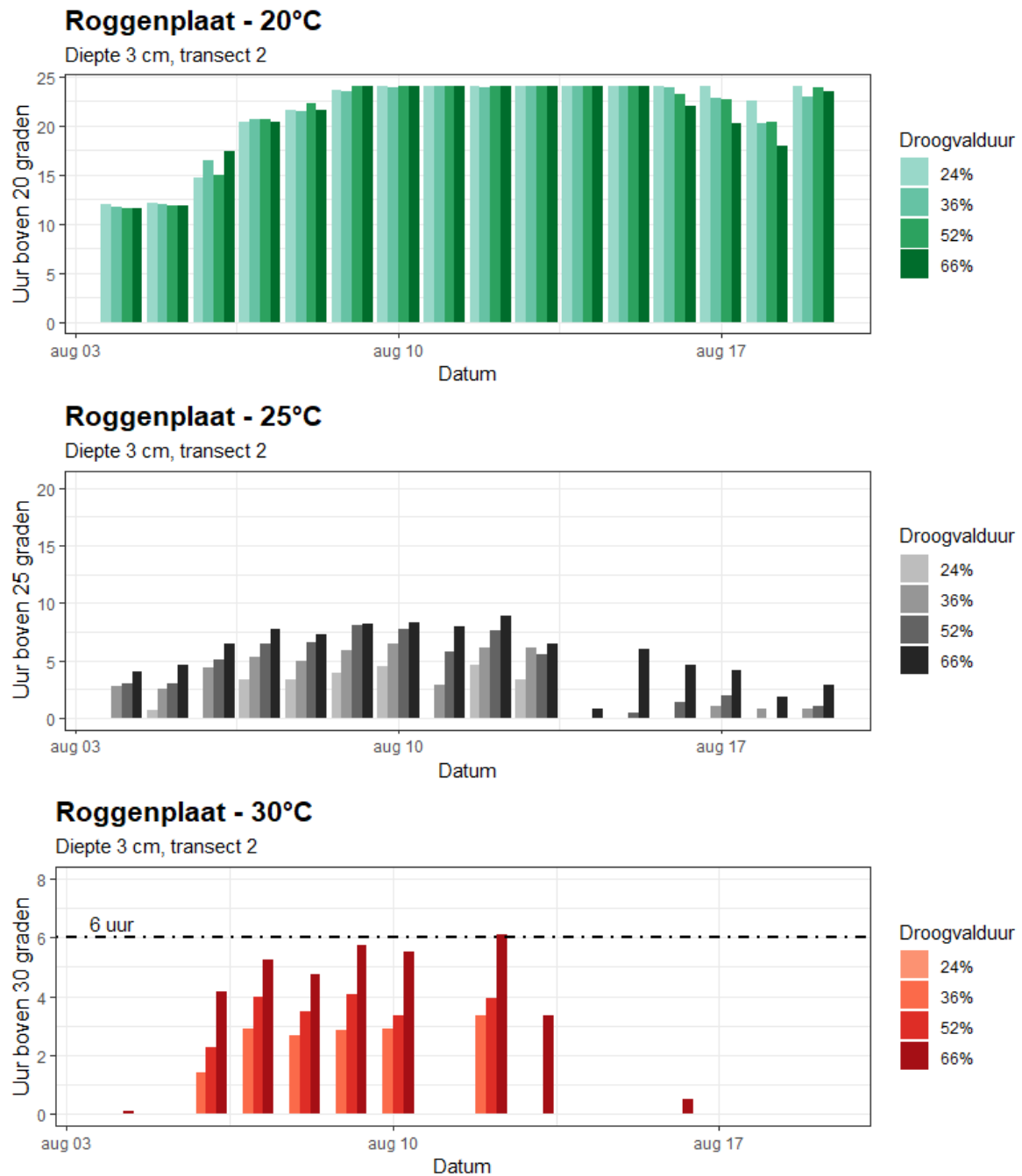
Figuur 24 Temperatuurverloop in de periode 6 tot 15 augustus 2020 op locatie Dortsman (boven) en Roggenplaat (midden) op dieptes 0, 3 en 10 cm (resp. rood, blauw en groen), Instraling in geel. Onder: Verloop in waterdiepte waarbij horizontale stukken de periode van droogvallen zijn.

7.8 Temperatuur reeks tijdens hittegolf: Dortsman



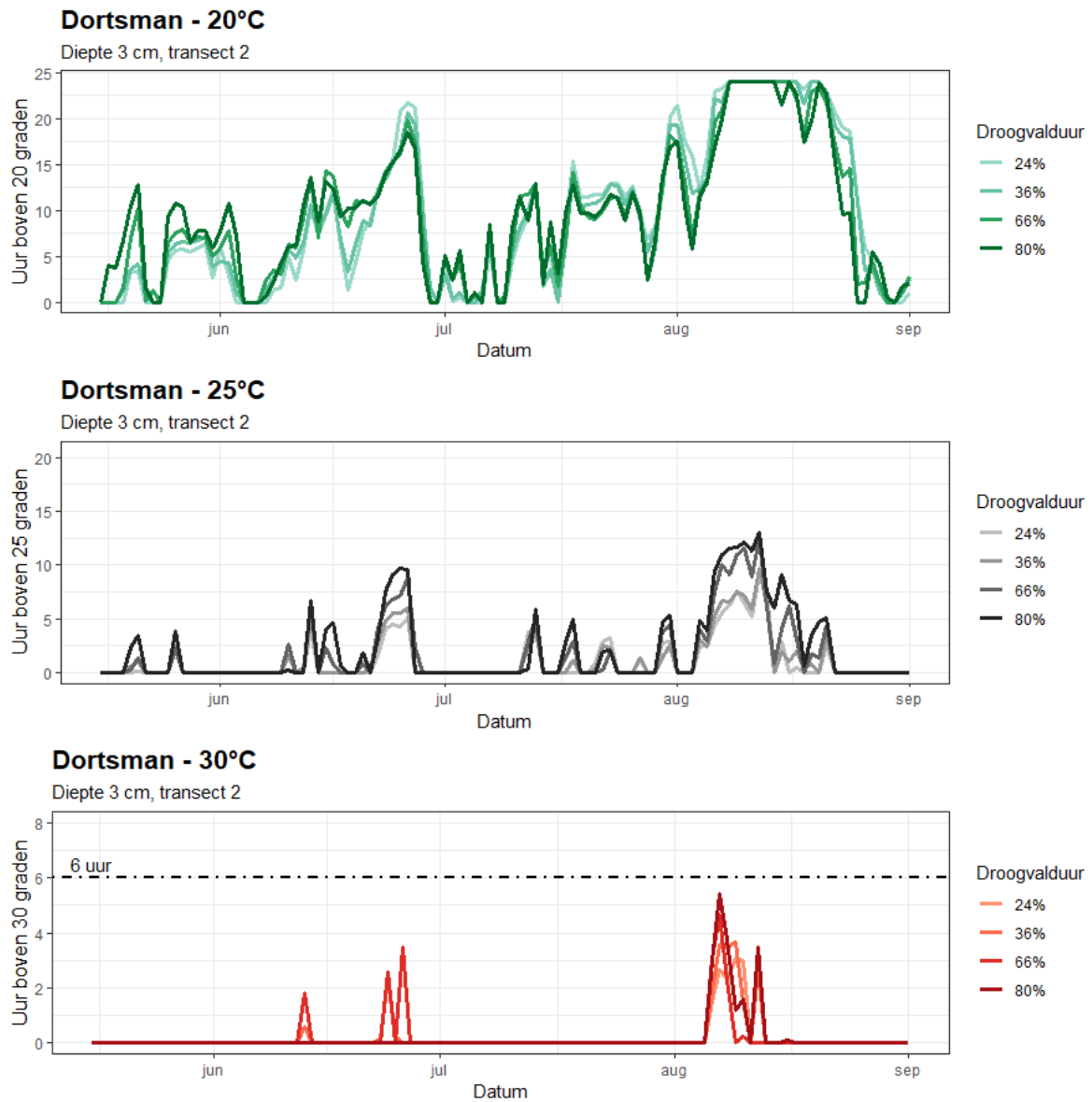
Figuur 25 De duur dat een bepaalde temperatuur overschreden wordt tijdens de hittegolf. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Dortsman, opgesplitst per droogvalduur.

7.9 Temperatuur reeks tijdens hittegolf: Roggenplaat



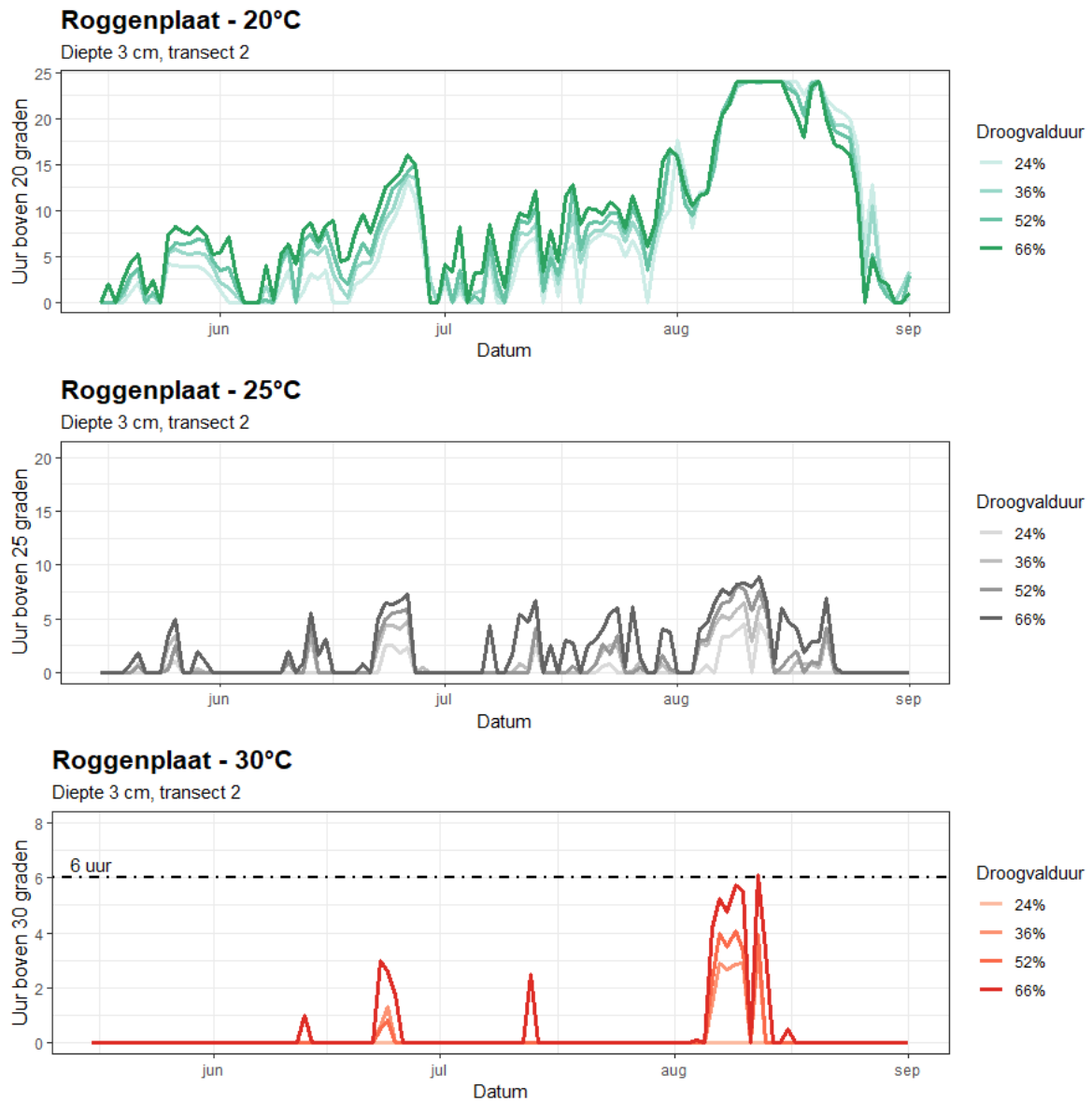
Figuur 26 De duur dat een bepaalde temperatuur overschreden wordt tijdens de hittegolf. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Roggenplaat, opgesplitst per droogvalduur.

7.10 Temperatuur reeks lange termijn: Dortsman



Figuur 27 De duur dat een bepaalde temperatuur overschreden wordt tijdens de zomer. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Dortsman, opgesplitst per droogvalduur

7.11 Temperatuur reeks lange termijn: Roggenplaat



Figuur 28 De duur dat een bepaalde temperatuur overschreden wordt tijdens de zomer. Weergegeven is de totale duur per dag dat een temperatuur van 20, 25 of 30 gemeten is op locatie Roggenplaat, opgesplitst per droogvalduur

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

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.

Bezoekers adres:

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



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'
