



THE UNIVERSITY
of NORTH CAROLINA
at CHAPEL HILL



INZICHTEN UIT ECOFYSIOLOGIE- EXPERIMENTEN EN SUGGESTIES VOOR VERBETERD KORAALHERSTEL.

Gretchen Goodbody-Gringley
& Haley Davis

2024



In collaboration with GFDRR

INHOUD

• Achtergrond	1
• CCMI Koraal Kwekerij	4
• Werkwijze van het project	5
• Resultaten & Discussie	6
• Aanbevelingen	11
• Geciteerde werken	13
• Figuur Legendas	20



ACHTERGROND



In de afgelopen decennia zijn Caribische koralen drastisch afgenomen (Contreras-Silva et al., 2020; Cramer et al., 2020), waarbij de Caribische brede koraalbedekking daalde tot ongeveer 5- 10% (Gardner et al., 2003). Terwijl de verliezen nog ernstiger zijn in zwaar getroffen regio's zoals het Florida Reef Tract, waar de koraalbedekking ongeveer 4% bedraagt (Toth et al., 2019), worden afgelegen en sterk beschermde atollen nog steeds bedreigd (Sanchez et al., 2019).

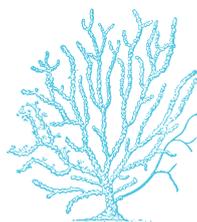
Een groot aantal milieueffecten houdt verband met deze achteruitgang en omvat, maar is niet beperkt tot, kustontwikkeling (DeGeorges et al., 2010; Ryan et al., 2008), nieuwe ziekten (Alvarez-Filip et al., 2019; Estrada-Saldivar et al., 2020; Hayes et al., 2020; Aronson & Precht 2001) en thermische stress (Eakin et al., 2005; Munoz-Castillo et al., 2019). Persistentie van chronische antropogene stressoren en voortdurende toename van de ernst en frequentie ervan beperken het herstelveeomogen van koralen verder, wat leidt tot sombere voorspellingen voor de toekomstige stabiliteit van koraalriffen (Jones et al., 2022; Gonzalez-Barrios et al., 2020).

Een van de eerste gedocumenteerde incidentie van koraalachteruitgang die rechtstreeks aan een specifieke oorzaak werd toegeschreven, was de regionale sterfte van *Acropora cervicornis* en *A. palmata* in het Caribisch gebied en de Golf van Mexico begin jaren 1980 als gevolg van een uitbraak van White Band Disease (Aronson en Precht 2001). Voorafgaand aan de uitbraak van de ziekte domineerde *Acropora* spp. rifzones in ondiep water en leverde onschatbare ecosysteemdiensten, waaronder kustbescherming door de versterking van golfslag (Ghianian, et al., 2020) en leefgebied voor kleine en jonge vissen die mogelijk cultureel waardevolle visserij hebben ondersteund (Wilson et al., 2008). Binnen het eerste decennium na de uitbraak van de ziekte daalde het geslacht echter van >60% naar <5% dekking (Aronson & Precht 2001). Deze achteruitgang heeft zich alleen maar voortgezet in het Caribisch gebied, wat ertoe heeft geleid dat beide soorten op de IUCN-lijst van bedreigde diersoorten zijn vermeld.

De vrijwel afwezigheid van Acroporidae koralen in de ondiepe zones van de meeste riffen vertegenwoordigt tegenwoordig een onnatuurlijke toestand voor moderne Caribische rifecosystemen en heeft de structuur en het functioneren van Caribische rifecosystemen ingrijpend veranderd. Zo is er in het afgelopen decennium veel aandacht besteed aan het herstel van Caribische koraalriffen, waarbij de nadruk vooral ligt op *A. cervicornis* en *A. palmata* vanwege hun kwetsbare status, historisch ecologisch belang en vertakkende aard waardoor ze 5 tot 10 keer sneller kunnen groeien dan boulderkorallen (Gladfelter et al., 1978; Lirman et al., 2014). Koraalherstel, bestaande uit het uitplanten van in de kwekerij gekweekte acroporale naar aangetaste riffen om de structuur en functie van het rif weer op te bouwen, is een steeds populairdere benadering om de lokale achteruitgang van de koraalovervloed het hoofd te bieden. Geïnspireerd door succesvolle herstelstrategieën die worden gebruikt om andere habitats te herstellen, bestaan hedendaagse benaderingen voor koraalherstel voornamelijk uit het uitplanten van koralen die in de kwekerij zijn gekweekt naar aangetaste riffen. Vermeerdering en uitplant van in de kwekerij gekweekte koralen is zo populair geworden dat inspanningen voor koraalherstel steeds beter in staat zijn om koraalpopulaties op ecologisch zinvolle schaal te vergroten. Er is grote vooruitgang geboekt in deze industrie door verschillende niet- gouvernementele organisaties (NGO's) van de overheid en op natuurbehoud gerichte niet- gouvernementele organisaties (NGO's) in Zuidoost-Florida en het Caribisch gebied, onder leiding van vroege inspanningen van de Coral Restoration Foundation, MOTE Marine Laboratory en SCORE International.

Veel van de oorspronkelijke technieken worden nog steeds gebruikt, waarbij koralen van kansen of fragmenten van wilde volwassen koralen worden gekweekt in kwekerijen op zee of op het land en periodiek worden gefragmenteerd om "nieuwe" individuen te creëren die de kwekerij bevolken. Eerdere studies waren gericht op het bieden van optimale opfokomstandigheden in deze kwekerijomgevingen, zowel in situ als ex situ, om hun groei te maximaliseren zoals gemeten door Total Linear Extension (TLE; Johnson et al., 2011; Maneval et al. 2021). Deze inspanningen groeiden in populariteit en dus in omvang en werden een groot aandachtspunt van natuurbeschermingsorganisaties. Alleen al in Zuidoost-Florida zijn duizenden *A. cervicornis* fragmenten gekweekt in kwekerijen en vervolgens uitgeplant op het rif, waarbij één organisatie meer dan 15.000 fragmenten van deze soort plantte over een periode van 5 jaar. Langetermijnmonitoring van uitgeplante fragmenten laat echter zeer wisselende resultaten zien, zelfs binnen één rifgebied, wat suggereert dat grootschalige genetische en omgevingsvariabelen belangrijk kunnen zijn om te overwegen bij het plannen van herstelwerkzaamheden (van Woosik et al., 2020).

Naarmate er nieuwe informatie wordt verzameld over optimale groeiomstandigheden en maximale slagingspercentages, blijven de inspanningen voor het herstel en het uitplanten van *Acropora* zich ontwikkelen. Verschillende groepen nemen nu bijvoorbeeld aspecten van seksuele voortplanting op die gericht zijn op kruisbestuiving van gameten van ouders met gewenste eigenschappen zoals ziektebestendigheid of hoge thermische tolerantie (Koch et al., 2022a,b), die het vermogen heeft om herstel op industriële schaal op te schalen (Banazsack et al., 2023). Deze nieuwe ontwikkelingen zijn gebruikt als onderdeel van de ontwikkeling van op veerkracht gebaseerde beheerstrategieën van koralen, die gericht zijn op het beschermen van genetische diversiteit en het behouden van routes voor genoverdracht door seksuele voortplanting (McLeod et al., 2019). Geassisteerde evolutie via geselecteerde kruisbestuiving is echter afhankelijk van informatie over de stressgevoeligheid (of beter gezegd stressbestendigheid) en het voortplantingsvermogen van volwassen kolonies (Koch et al., 2022a,b). In Florida onderzocht recent werk van Cunning et al. (2021) het thermische tolerantiebereik van verschillende koralen op herstelllocaties langs het ifkanaal van Florida door de fotosynthese-efficiëntie van in de kwekerij gekweekte koralen te meten als reactie op een reeks temperaturen. Interessant is dat ze ontdekten dat hoewel er verschillen in thermische tolerantie voor koraal bestonden tussen kwekerijen, dit niet gerelateerd was aan de historische maandelijkse gemiddelde maximumtemperatuur. Bovendien vond een groter deel van de variabiliteit van thermische tolerantie plaats binnen kwekerijen, in plaats van tussen hen, wat suggereert dat genetische variabiliteit tussen individuen waarschijnlijk een sterkere invloed had op thermische tolerantie dan omgevingsomstandigheden in het verleden. Symbiontenconsortia kunnen ook van invloed zijn op thermische toleranties en daarom is er ook veel inspanning geïnvesteerd in de identificatie van Symbiodinacae-soorten voor kweekkoralen, evenals inoculatiestudies met thermisch tolerante symbiontensoorten (O'Donnel et al. 2019; Davies et al., 2023; Minjie et al., 2023). Terwijl een verhoogde temperatuur een grote bedreiging vormt voor het succes van het herstel, geldt dat ook voor de vatbaarheid voor ziekten, aangezien uitbraken van de ziekte van de witte oever *Acropora* spp. blijven aantasten. Het is dus ook belangrijk om volwassen kolonies te identificeren die resistent zijn tegen ziekten die kunnen worden gebruikt in stroomafwaarts seksuele voortplantingsexperimenten (bijv. Koch et al. 2022).



Deze studies, samen met onderzoeken naar mogelijke afwegingen met andere gewenste eigenschappen, hebben bijgedragen aan de herstelkeuzes van *A. cervicornis* in Florida. Het combineren van verschillende ideale factoren, zoals thermische tolerantie en ziekteresistentie, om veerkrachtige individuen te produceren die, eenmaal uitgeplant, zich zullen voortplanten en de gewenste eigenschappen zullen doorgeven aan de volgende generatie (Humanes et al. 2021; Koch et al., 2022 a,b). Door deze "veerkrachtige" individuen door het lot te volgen, kunnen wetenschappers datagestuurd advies geven aan restauratiebeoefenaars dat de doeltreffendheid van het restauratiesucces zal vergroten en geassisteerde evolutie en selectie van eigenschappen zal begeleiden. Er zijn echter maar weinig studies die uitgeplante koralen langer dan 12 maanden volgen, en dus blijft er een grote kennislacune in het succes van deze inspanningen.



Figuur 1.

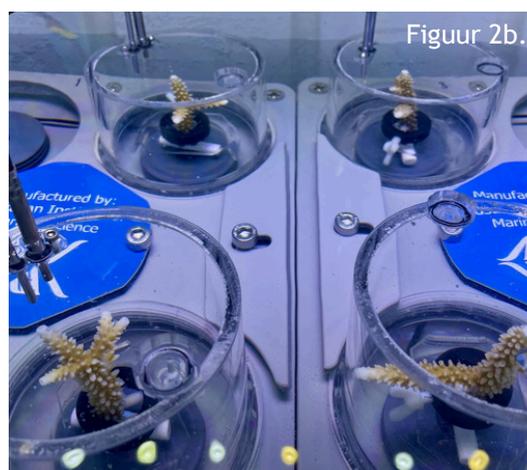




Figuur 2a.

CCMI KORAAL KWEKERIJ

CCMI startte in 2011 een wetenschappelijk onderbouwd herstelprogramma op de Kaaimaneilanden en is en zal een pionier blijven zijn op het gebied van het herstel van koraalriffen. De toekomst van koraalherstelinspanningen is afhankelijk van ons succes, aangezien ons een van de weinige herstelprojecten is die onderzoeksgeïntegreerde oplossingen omvat om beter te begrijpen hoe herstel kan bijdragen aan de wilde koraalpopulatie en hoe we de geheimen van koraalveerkracht voor de toekomst kunnen ontsluiten. Huidig empirisch herstelonderzoek in combinatie met beschikbare langetermijnecosysteemgegevens bij CCMI vormt de basis voor het bevorderen van kennis van de veerkracht van riffen. Uit ons eerdere werk bleek dat overleving en groei het hoogst waren in onze diepere kwekerij (15 m) in vergelijking met onze ondiepe kwekerij (5 m) (Maneval et al. 2021). Bovendien toonde monitoring van uitbraken en herstel van White Band Disease in onze kwekerij de voordelen aan van het handhaven van genetisch diverse assemblages binnen individuele kwekerijkaders (Brown et al. 2022). Wat uitplant betreft, hebben we een 10-voudige toename van de overleving gevonden door koralen op driedimensionale koepels te planten in plaats van rechtstreeks op het rif (CCMI 2020 jaarverslag). Bovendien vonden we een significant hogere overleving en minder ziekte bij uitplanting tot 20 m in vergelijking met 5 m diepte (CCMI 2021 jaarverslag). Om het potentieel voor outplant-succes door individuen beter te kwantificeren, heeft CCMI onlangs een thermisch stress-experiment uitgevoerd, samen met de daaropvolgende uitplanting en het volgen van het lot van *A. cervicornis* fragmenten op Little Cayman Island. Hier presenteren we dit werk samen met aanbevelingen om het herstelsucces op lange termijn te verbeteren op basis van onze resultaten.



WERKWIJZE VAN HET PROJECT

Fragmenten werden verzameld uit de kwekerij op basis van hun eerder geïdentificeerde categorische genet (Drury et al. 2017), gesubsampled voor stroomafwaartse moleculaire analyse en vervolgens naar een kwekerij op het land en een nat laboratorium gebracht voor thermische tolerantieanalyse. Thermische tolerantie werd beoordeeld met behulp van thermische prestatiecurven (TPC's), waarbij fotosynthese en ademhaling worden gebruikt als een proxy voor koraalprestaties.

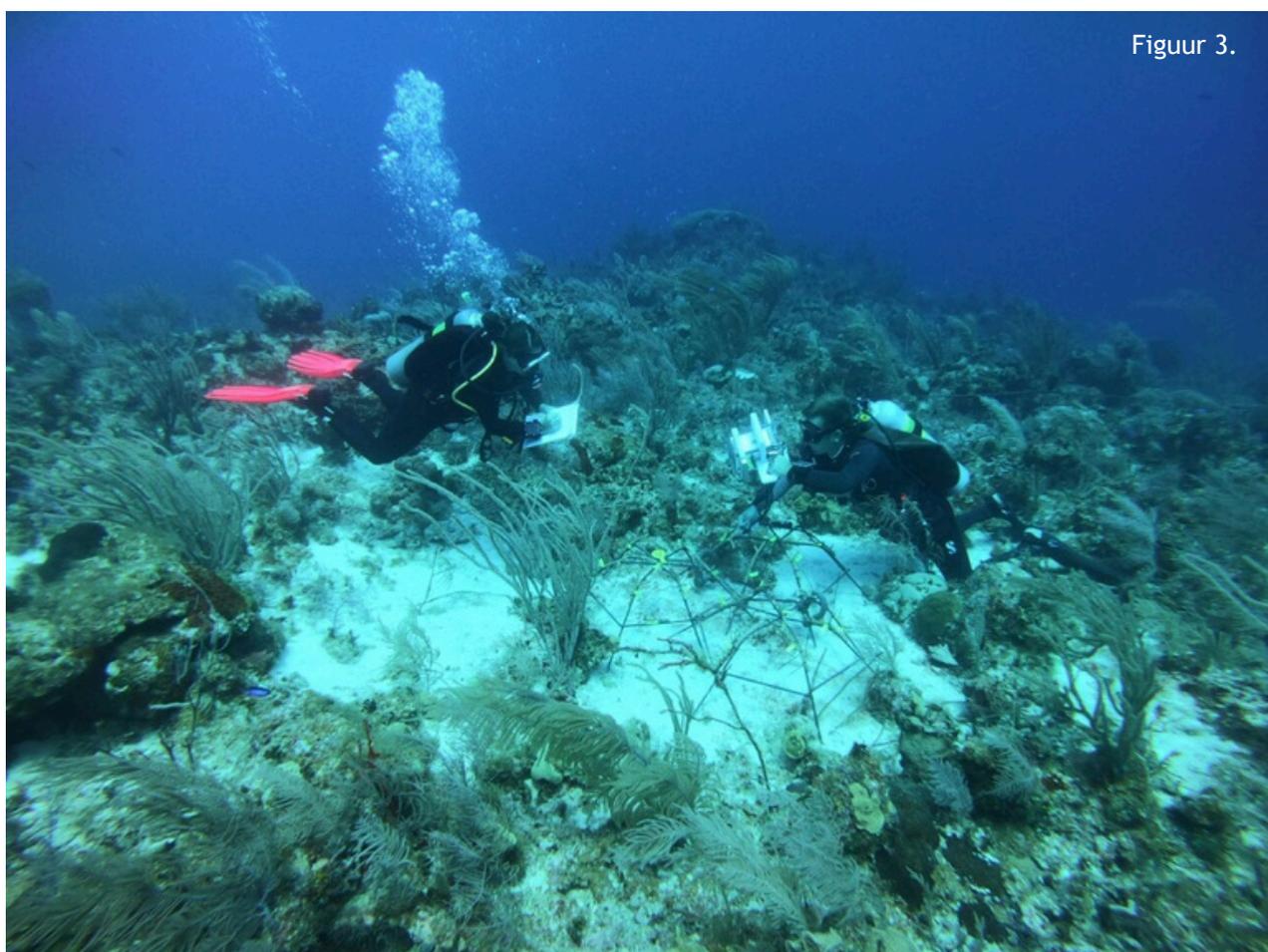
Zuurstofproductie en -verbruik werden gemeten met behulp van een gesloten kamersysteem met echte tijd zuurstof- en temperatuursondes zoals in Silbiger et al. (2019) en Gould et al. (2021). Om de TPC's te maken, werd een enkel fragment van een individuele *A. cervicornis* genet blootgesteld aan acht temperaturen variërend van 28°C tot 37°C (28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37°C), onder een oplopende temperatuurscenario.

In totaal werden 8 bekende genotypen uit de kwekerij getest, waarbij 3 gerepliceerde individuen elk genotype vertegenwoordigden. De temperatuur in de kamers werd geregeld ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) door een thermostaatsysteem (Apex Aquacontroller, Neptune Systems) met behulp van een koeler (AquaEuroUSA Max Chill-1/13 HP Chiller) en kachels (AccuTherm Heater 300W). De zuurstofconcentratie werd gedurende 15 minuten elke seconde in elke kamer gemeten onder verzadigende lichtomstandigheden, waarna het systeem werd afgedekt en de metingen nog eens 30 minuten in absolute duisternis werden voortgezet. De lichtniveaus waren gebaseerd op de initiële P/I-curve om de PAR te bepalen die de optimale fotosynthesesnelheid bij omgevingstemperatuur induceerde. De absolute waarden van netto fotosynthese plus donkere ademhaling produceerden bruto fotosynthese (GP). Twee blanco controlekamers (alleen FSW en magnetische roerstaaf) waren verantwoordelijk voor de zuurstofproductie en het zuurstofverbruik van micro-organismen in het zeewater. Deze metabolische achtergrondactiviteit werd afgetrokken van elke overeenkomstige experimentele kamer. De snelheid van de zuurstofflux werd bovendien gecorrigeerd voor het kamervolume en de oppervlakte van het fragment met behulp van de paraffinewas-dompelmethode (Stimson en Kinzie 1991; Holmes et al., 2008). Bayesiaanse hiërarchische modellen met Markov Chain Monte Carlo (MCMC)-simulaties werden vervolgens gebruikt om de thermische tolerantiestatistieken van koraal voor GP te schatten (Silbiger et al. 2019; Gould et al. 2021). Thermische prestatieparameters voor geselecteerde genotypen werden geëxtraheerd met het RTPC-pakket en NLS multi-start met behulp van een Sharpe-Schoolfield-model en bootstrapping en omvatten: maximale kritische temperatuur (CTmax), activeringsenergie (e), deactiveringsenergie (eh), thermische veiligheidsmarge en optimale temperatuur (Topt).

Replicaat-ramets van genet werden vervolgens uitgeplant in een gemeenschappelijk tuinscenario op een reeks koepelstructuren ($n = 3$) die dienden om een driedimensionale structuur te creëren en om uitplanten van het sediment te tillen om de kans op overdracht van ziekten te verkleinen. In totaal werden 3 replicaten van elk van de 8 genotypen op elke structuur uitgeplant voor een totaal van 9 replicaten per genotype. Outplants werden vervolgens na 11 en 16 maanden (respectievelijk april 2023 en september 2023) beoordeeld op gezondheidstoestand (gezond, bleek, gebleekt, ziekte, predatie, dood, vermist). Daarnaast werd op elk tijdstip ook Total Linear Extensions (TLE) gemeten om de groeipercentages te schatten.

RESULTATEN & DISCUSSIE

Over het algemeen waren onze thermische prestatieresultaten voor temperatuurtolerantie vergelijkbaar tussen genotypen, maar een paar belangrijke prestatieparameters vielen op. Genotype OB had bijvoorbeeld de laagste deactiveringsenergie en de meest geleidelijke helling na thermische optima, evenals de hoogste thermische veiligheidsmarge, wat suggereert dat dit genotype de minst ernstige bleekrespons kan hebben. Genotype G daarentegen had de hoogste deactiveringsenergie en de steilste helling, wat aangeeft dat een ernstige bleekreactie zou worden verwacht (Figuur 3). Een duidelijke "winnaar" of "verliezer" kan echter niet worden geïdentificeerd, en dus zouden deze gegevens alleen al suggereren dat een benadering van het afdekken van weddenschappen die maximale genetische diversiteit handhaaft, waarschijnlijk de beste methode is voor restauratiebeoefenaars.



Na verloop van tijd ontdekten we aanhoudende verliezen van onze uitgeplante koralen, ongeacht het genotype, waarbij de overlevingskans na de periode van 11 maanden onder de 50% daalde (Figuur 4). De zomer van 2023 was de warmste ooit, met Little Cayman Island met een record van 19.5 graden verwarmingsweken (NOAA). Dit bood de mogelijkheid om de reactie van de gewone tuinplanten op een natuurlijke bleekgebeurtenis te volgen en te vergelijken met laboratoriumgebaseerde beoordelingen van bleektolerantie. Aan het einde van de verbleking waren de meeste koralen ernstig gebleekt of dood, en alleen het genotype (KW) had nog gezonde kolonies (Figuur 5).



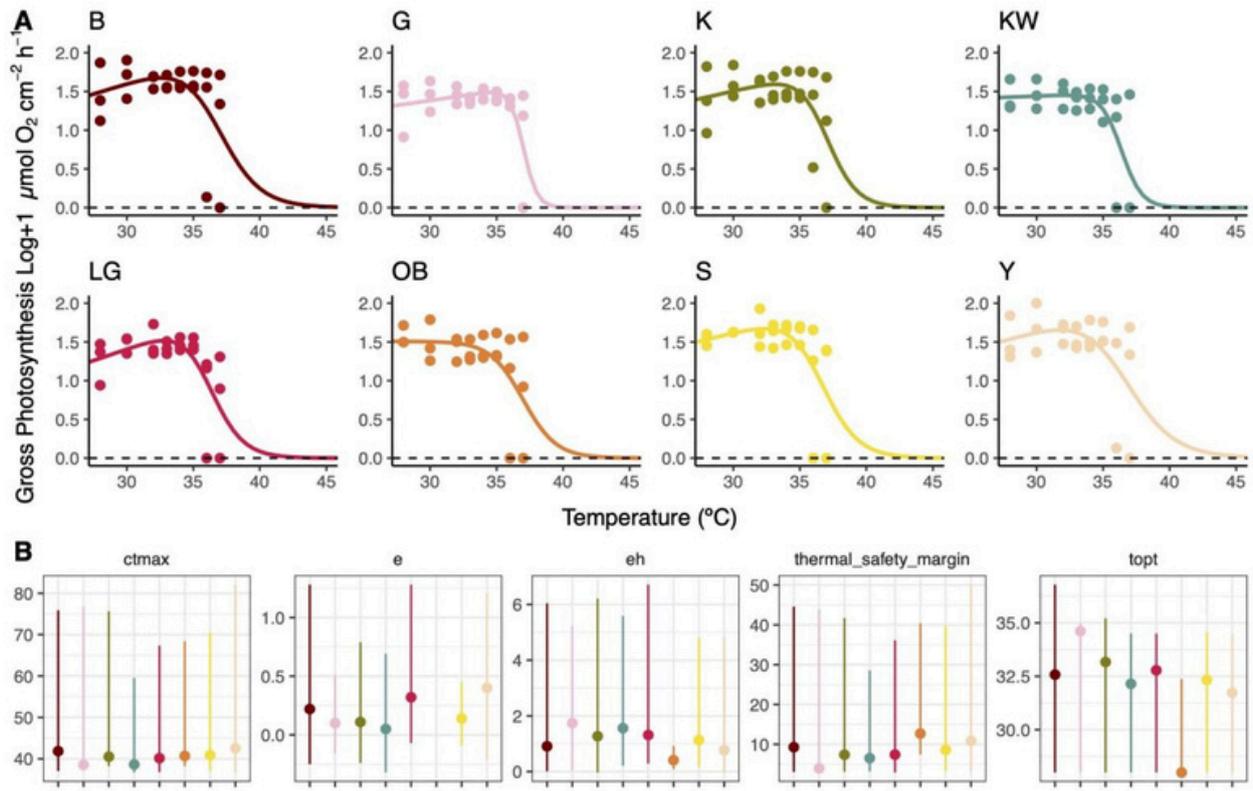


Figure 4.

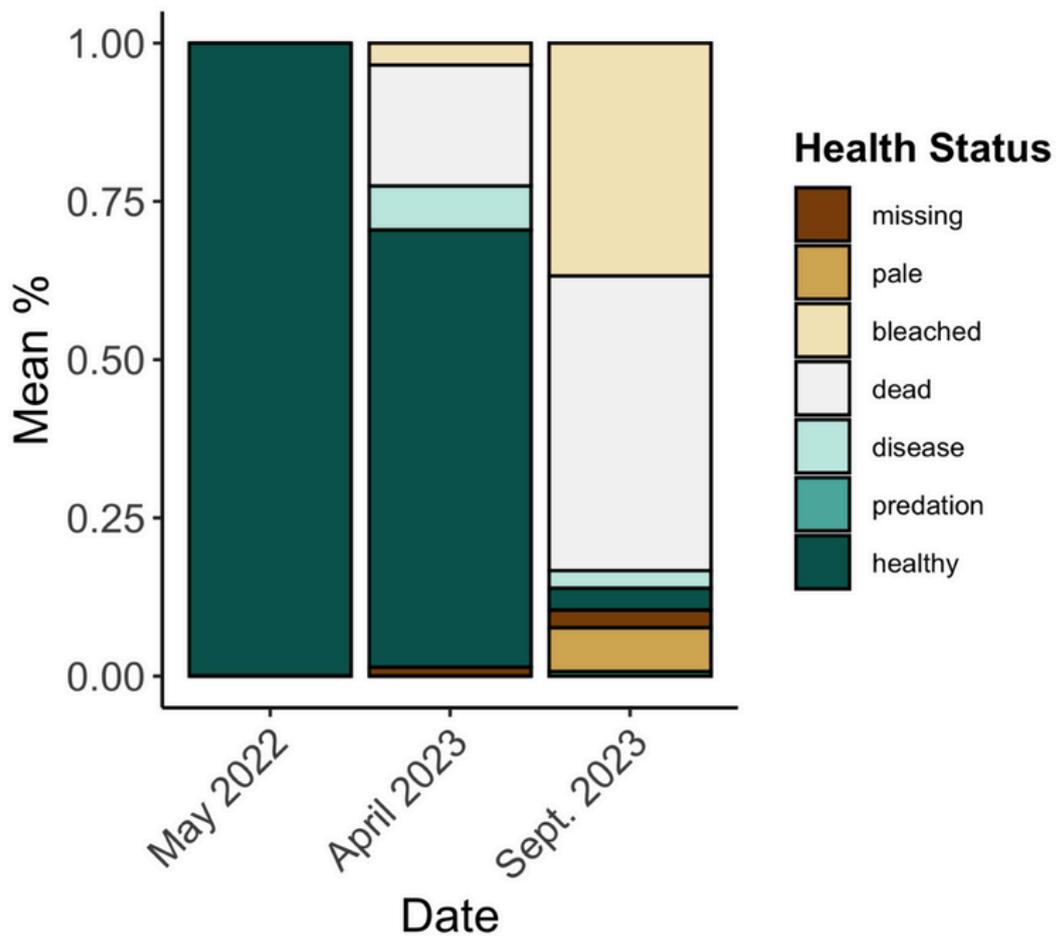
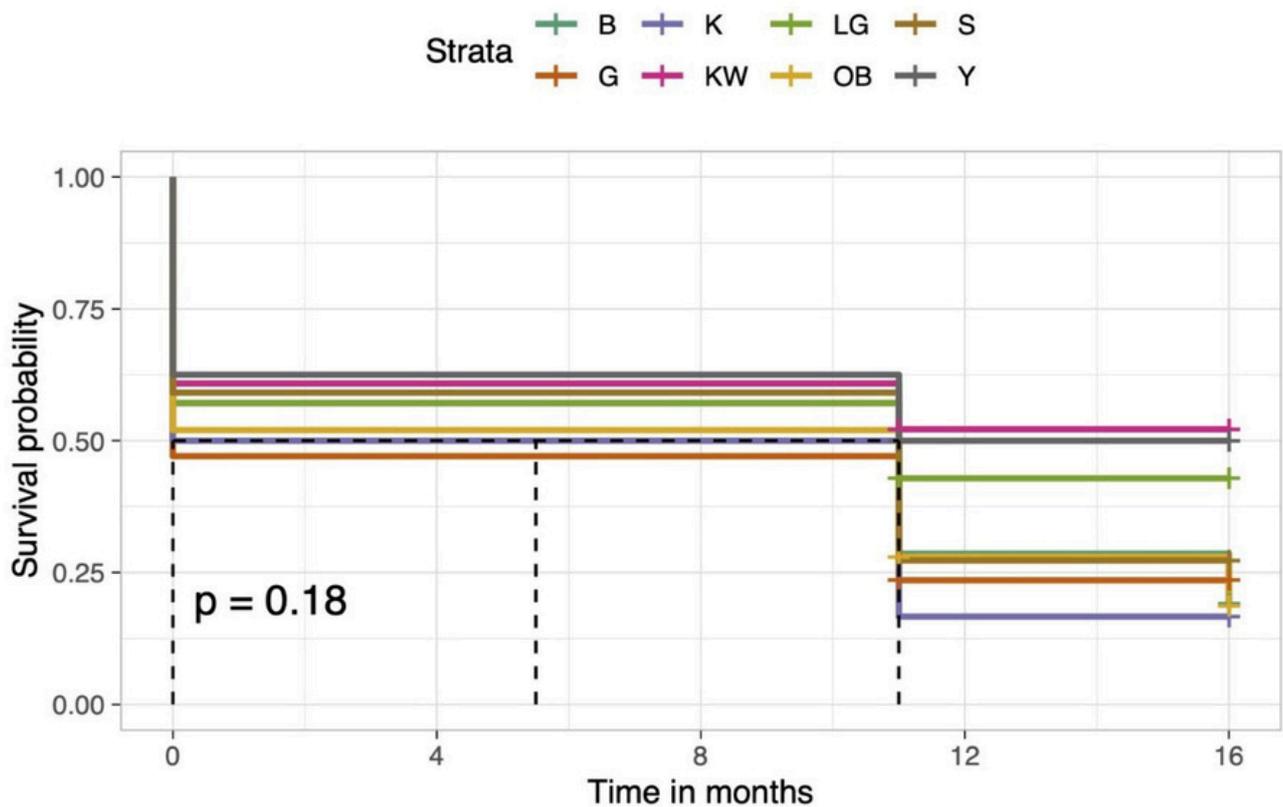


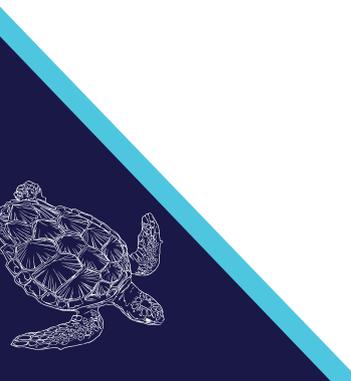
Figure 5a.

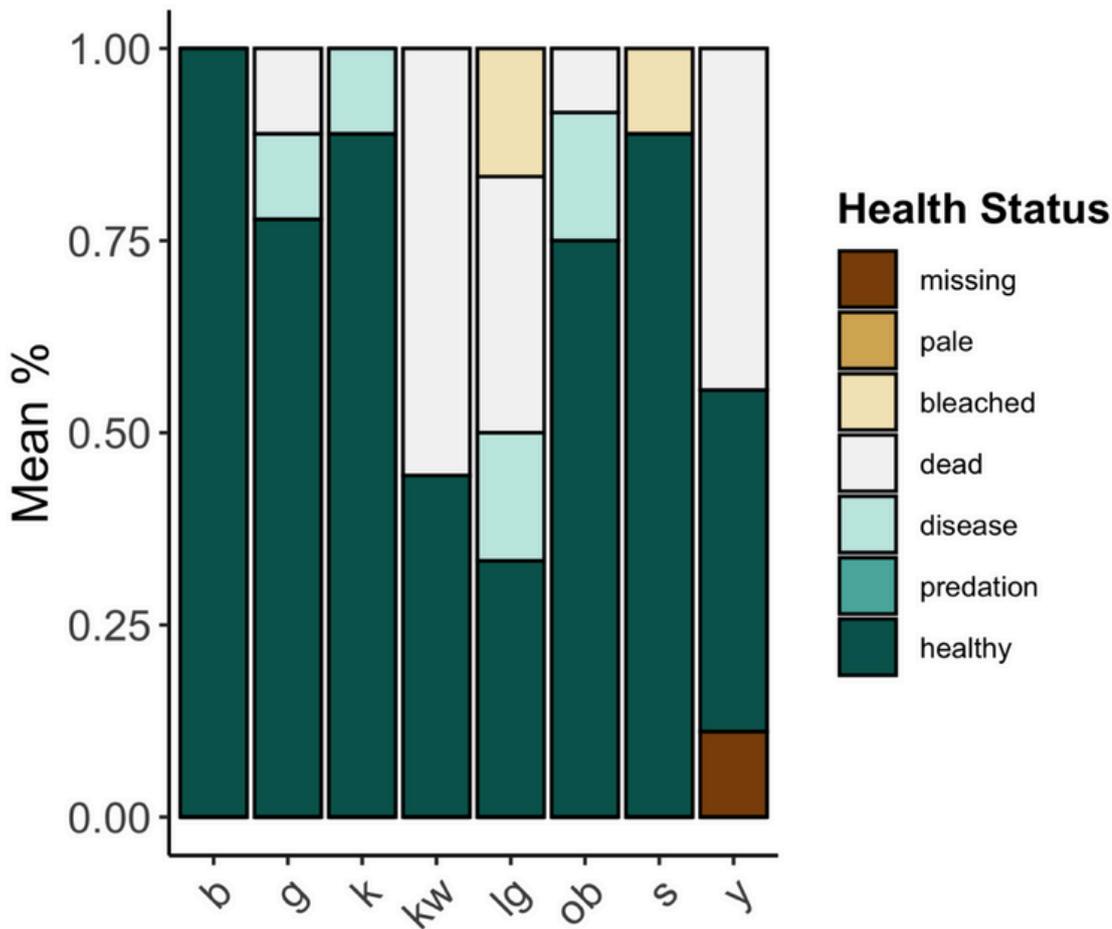




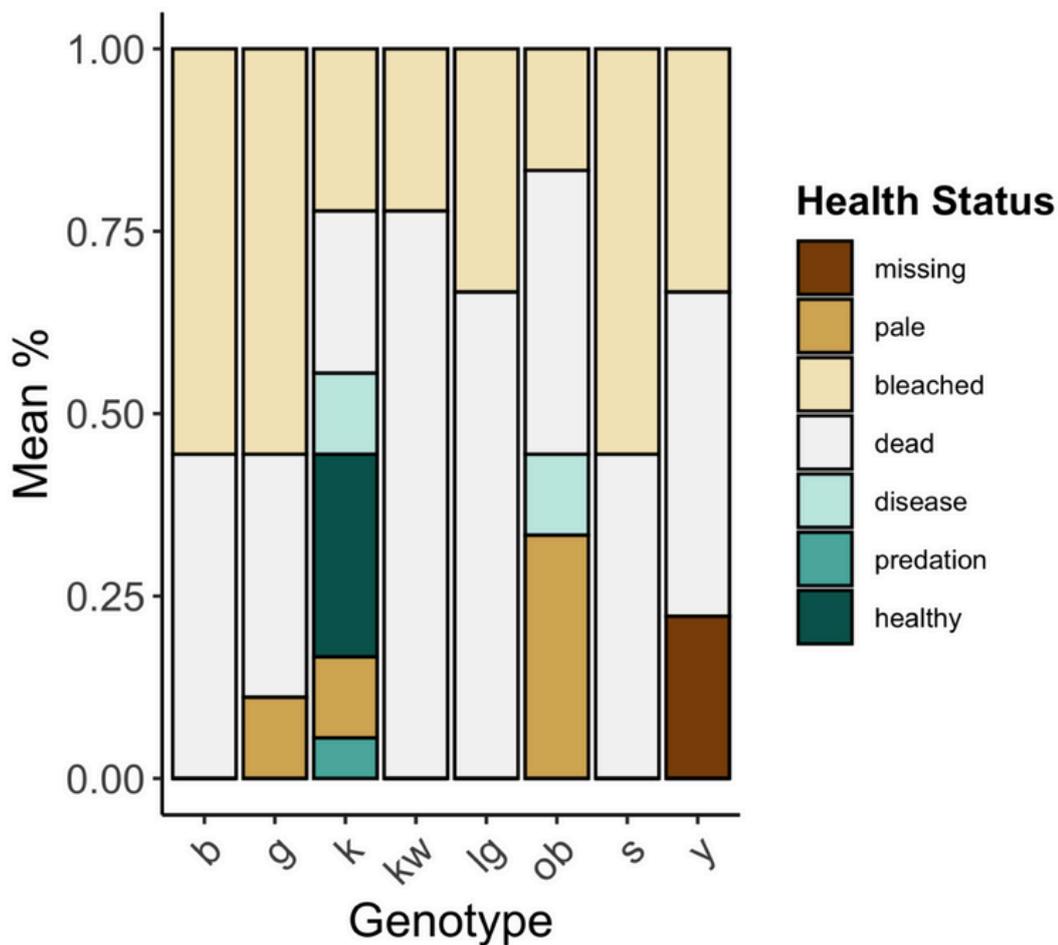
Figuur 5b.

Onze gegevens over het volgen van het lot toonden geen significante verschillen in groeisnelheden of bleekfrequentie op basis van genotype, maar bepaalde genotypen leken in de loop van de tijd beter te zijn dan andere. Genotypen KW en LG hadden bijvoorbeeld de laagste groeipercentages in vergelijking met alle andere genotypen, terwijl OB, K en KW de laagste procentuele bleekrespons vertoonden (Figuur 6). Hoewel er geen significante correlaties werden gevonden, suggereerden onze thermische prestatiegegevens dat genotype OB een minder ernstige bleekrespons zou vertonen, wat overeenkwam met onze resultaten voor het volgen van het lot. Met verhoogde replicatie kunnen thermische prestatiecurven dus een waardevol hulpmiddel zijn bij het onderzoeken van de gerealiseerde thermische veerkracht. Naast bleken en groei werd de ziektestatus geregistreerd op alle uitplantingen op alle bemonsteringspunten. Resultaten van deze gegevens suggereren dat de meest thermisch tolerante genotypen de neiging hebben om lagere groeisnelheden en een hogere ziektegevoeligheid te hebben, wat wijst op een afweging tussen groei, ziekteresistentie en bleektolerantie. Bevindingen van biologische afwegingen tussen gewenste eigenschappen in restauratiekoralen zijn niet uniek voor deze studie (Cornwell et al., 2021; Ladd et al., 2017; Quigley et al., 2021), hoewel het niet universeel is onder wenselijke eigenschappen (Koch et al., 2022a,b). Toch leveren mogelijke afwegingen tussen gewenste eigenschappen verder bewijs voor de waarde van verhoogde genetische diversiteit in kwekerijkoralen.

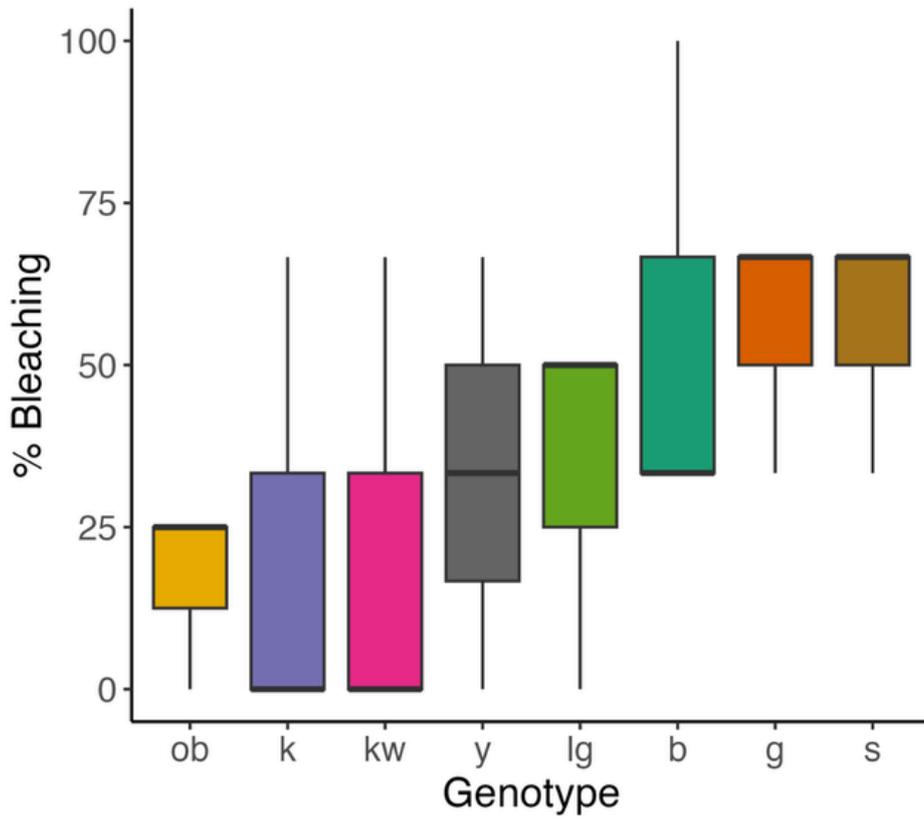




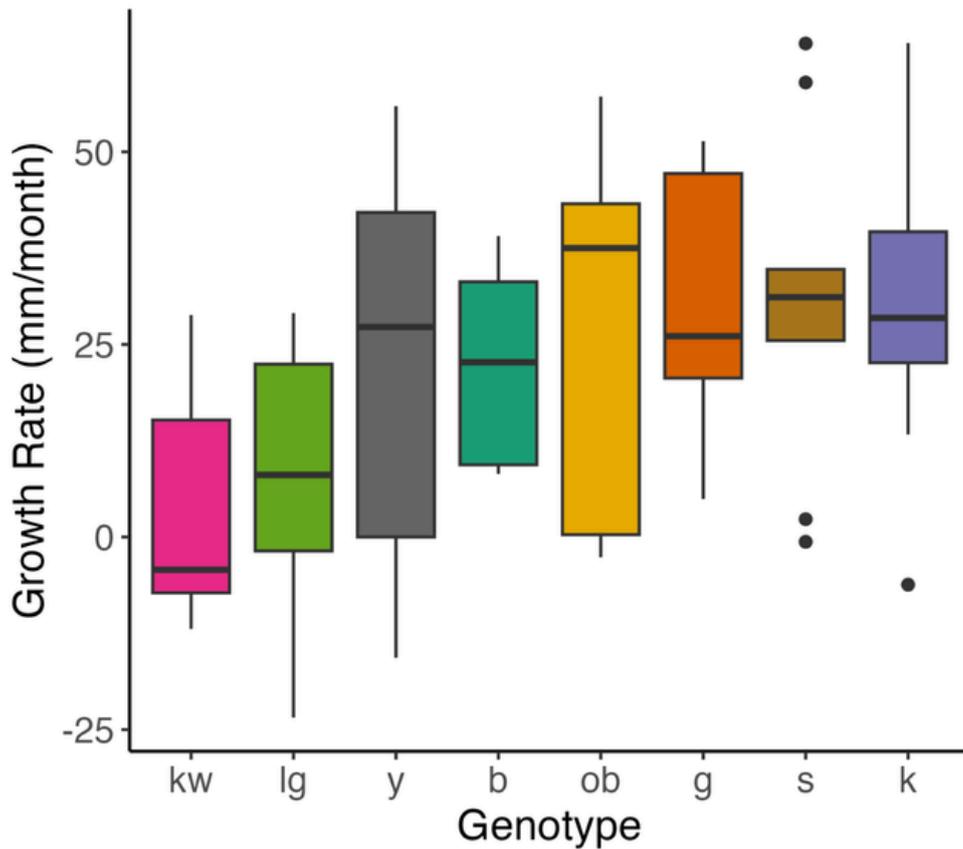
Figuur 6a.



Figuur 6b.



Figuur 7a.



Figuur 7b.



AANBEVELINGEN

De gegevens van deze studie tonen aan dat het onwaarschijnlijk is dat er één individu of genet van *A. cervicornis* bestaat die bestand is tegen een breed scala aan stressoren die als een superkoraal zou kunnen worden beschouwd. Hoewel sommige kolonies een sterkere tolerantie voor acute thermische stress hadden, waren dit niet noodzakelijkerwijs de genets die waarschijnlijk het snelst groeiden, het meest effectief bestand waren tegen ziekten of langdurige thermische stress van meer dan 19 graden verwarmingsweken tolereerden. Dit soort afwegingen in de stresstolerantie van koraal zijn goed gedocumenteerd in het hele veld en suggereren dat het handhaven van maximale biologische diversiteit in kwekerijen de beste en enige manier is om rifeerstel te bewerkstelligen. Deze genetische diversiteit kan belangrijk zijn om vast te leggen in zowel seksuele als asexuele uitplantingsinspanningen. Of faciliteiten nu gericht zijn op het gebruik van ongeslachtelijk gereproduceerde volwassen koraaluitplantingen of seksueel gereproduceerde larven, het zal van vitaal belang zijn om maximale biologische en genetische diversiteit te behouden in plaats van winterharde of veerkrachtige individuen te selecteren. Deze beheerpraktijk zal kunstmatig opgelegde genetische knelpunten vermijden ten gunste van de grootste genetische "gereedschapskist" die een koraalpopulatie kan hebben, waardoor planten de grootste kans op succes op populatieniveau hebben.

De grootschalige verbleking in 2023 die de riffen van het Caribisch gebied en Floridian trof, biedt rifbeoefenaars ook de kans om herstelprotocollen opnieuw te beoordelen naarmate we verder gaan, waarbij veel locaties kwekerijen bijna helemaal opnieuw moeten opstarten. We raden aan om op dit moment kwekerijen te vullen met de breedst mogelijke genetische diversiteit aan volwassen kolonies voor toekomstige inspanningen. Dit seizoen heeft ons geleerd dat biologische afwegingen niet alleen een ondergang kunnen zijn van selectief fokken, maar ook kunnen worden gebruikt als de grootste troef in de toekomst van koraalherstelpraktijken.

Gezien de algehele achteruitgang van het Caribische koraal buiten *Aporosa* spp., is het belangrijker dan ooit geworden om niet alleen de genetische bank van elke soort te diversifiëren, maar ook de soort zelf, met koralen van verschillende groeivormen. Hoewel Acroporiden historisch waardevol zijn in het Caribisch gebied, zelfs met de breedte van de genotypen die overblijven, bezit het geslacht mogelijk niet het vermogen om voort te gaan met extreme hittegebeurtenissen die zeer waarschijnlijk zullen doorgaan met snelheden van verhoogde frequentie en ernst. Om riffen te herstellen naar hun historische biologische complexiteit, of zelfs om te behouden wat er nog over is, moeten herstelbeoefenaars de opgenomen soorten verbreden naar een grotere variëteit, inclusief die welke kwetsbaar zijn voor nieuwe ziekten. Het opnemen van meer langzaam groeiende en structuurvormende hermatypische koralen zal ook ons vermogen vergroten om de rugositeit van het rif, de aangroeisnelheid en de biologische diversiteit op een langdurigere manier te behouden. Bovendien kan het opnemen van onkruidsoorten in deze praktijken zorgen voor een langere overleving van outplants, waardoor riffen kunnen blijven bestaan, zelfs onder uitdagende omgevingsomstandigheden.

Uiteindelijk is het buitengewoon duidelijk geworden dat om Caribische riffen te herstellen of zelfs te behouden met behulp van aanvullende koraaltransplantatie, we moderne technologieën moeten beschouwen als een vereist onderdeel van de gereedschapskist. Het gebruik van moleculaire sequencing-technologieën, die geleidelijk toegankelijker worden, kan van vitaal belang zijn voor het begrijpen van de genetische afstamming en verbondenheid van koraalpopulaties, en beschermt tegen genetische knelpunten binnen een herstelsoort. Evenzo suggereren onze resultaten dat thermische prestatiebeoordelingen waardevol kunnen zijn bij het bepalen van personen met de hoogste temperatuurtoleranties. Herstel door middel van seksuele voortplanting zal ook meer schaalbare praktijken mogelijk maken, evenals het vergroten van de genetische diversiteit door het potentieel voor genetische recombinatie. Door deze middelen te combineren, krijgen rifbeoefenaars de grootste kans om blijvende en impactvolle verandering teweeg te brengen. V oortdurende focus op koraalsymbiontenpopulaties en gerelateerde omgevingsstressoren zou een pad kunnen leggen voor het gebruik van symbionteninoculatie in of populatiebeheer in kwekerijkoralen en larven. Ten slotte zal het vergroten van de soortenrijkdom van zowel seksuele als ongeslachtelijke herstelpraktijken de mogelijkheid creëren voor een volledig hersteld rifecosysteem. In navolging van consensus in het hele veld (Banaszak et al., 2023; Hughes et al., 2023; Johnson et al., 2011; Mcleod et al., 2019), zijn het deze aanpassingen van de strategie die zullen helpen om zinvolle praktijken voor het herstel van koraalriffen verder in de 21e eeuw voort te stuwen.



GECITEERDE WERKEN



Alvarez-Filip, L.; Estrada-Saldivar, N.; Perez-Cervantes, E.; Molina-Hernandez, A.; Gonzales-Barrios, F. J. (2019). A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. *Peer J.* e8069. Fragments were collected from the nursery based on their previously identified categorical genet (Drury et al. 2017), subsampled for downstream molecular analysis, and then brought to a land-based nursery and wet-lab for thermal tolerance analysis.

Aronson, R. B. & Precht, W. F. (2001). White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. In: Porter, J.W. (eds) *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases*. Developments in Hydrobiology, vol 159. Springer, Dordrecht. Fragments were collected from the nursery based on their previously identified categorical genet (Drury et al. 2017), subsampled for downstream molecular analysis, and then brought to a land-based nursery and wet-lab for thermal tolerance analysis.

Banaszak, A. T.; Marhaver, K. L.; Miller, M. W.; Hartmann, A. C.; Albright, R.; Hagedorn, M.; Harrison, P. L.; Latijnhouwers, K. R. W.; Quiroz, S. M.; Pizarro, V.; Chamberland, V. F. (2023). Applying coral breeding to reef restoration: best practices, knowledge gaps, and priority actions in a rapidly-evolving field. *Restoration Ecology*. 31(7), e13913. <https://doi.org/10.1111/rec.13913>

Brown, A.L.; Anastasiou, D.E.; Schul, M.; MacVittie, S.; Spiers, L.J.; Meyer, J.L.; Manfrino, C.; Frazer, T.K. (2022) Mixtures of genotypes increase disease resistance in a coral nursery. *Scientific Reports*. 12, 19286. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23457-6>

Contreras-Silva, A. I.; Tilstra, A.; Migani, V.; Thiel, A.; Perez-Cervantes, E.; Estrada-Saldivar, N.; Elias-Ilosvay, X.; Mott, C.; Alvarez-Filip, L.; Wild, C. (2020) A meta-analysis to assess long-term spatiotemporal changes of benthic coral and macroalgae cover in the Mexican Caribbean. *Scientific Reports*. 10, 8897. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65801-8>

Cornwell, B.; Armstrong, K.; Walker, N. S.; Lippert, M.; Nestor, V.; Golbuu, Y.; Palumbi, S. R. (2021). Widespread variation in heat tolerance and symbiont load are associated with growth tradeoffs in the coral *Acropora hyacinthus* in Palau. *Ecology*. <https://doi.org/10.7554/eLife.64790>

Cramer, K. L.; Jackson, J. B. C.; Donovan, M. K.; Greenstein, B. J.; Koropanty, C. A.; Cook, G. M.; Pandolfi, J. M. (2020), Widespread loss of Caribbean acroporid corals was underway before coral bleaching and disease outbreaks. *Science Advances*. 6(17). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9395>

Cunning, R.; Parker, K. E.; Johnson-Sapp, K.; Karp, R. F.; Wen, A. D.; Williamson, O. M.; Bartels, E.; D'Alessandro, M.; Gilliam, D. S.; Hanson, G.; Levy, J.; Lirman, D.; Maxwell, K.; Million, W. C.; Moulding, A. L.; Moura, A.; Muller, E. M.; Nedimyer, K.; Reckenbeil, B.; van Hooijdonk, R.; Dahlgren, C.; Kennel, C.; Parkinson, J. E.; Baker, A. C. (2021). Census of heat tolerance among Florida's staghorn corals finds resilient individuals throughout existing nursery populations. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*. 288(1961). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1613>

Davies, S.W.; Gamache, M. H.; Howe-Kerr, L.I.; Kriefall, N. G.; Baker, A.C.; Banaszak, A.T.; Bay, L.K.; Bellantuono, A.J.; Bhattacharya, D.; Chan, C.X.; Claar, D.C.; Coffroth, M.A.; Cuning, R.; Davy, S.K.; del Campo, J.; Díaz-Almeyda, E.M.; Frommlet, J.C.; Fuess, L.E.; González-Pech, R.A.; Goulet, T.L.; Hoadley, K.D.; Howells, E.J.; Hume, B.C.C.; Kemp, D.W.; Kenkel, C.D.; Kitchen, S.A.; LaJeunesse, T.C.; Lin, S.; McIlroy, S.E.; McMinds, R.; Nitschke, M.R.; Oakley, C.A.; Peixoto, R.S.; Prada, C.; Putnam, H.M.; Quigley, K.; Reich, H.G.; Reimer, J.D.; Rodriguez-Lanetty, M.; Rosales, S.M.; Saad, O.S.; Sampayo, E.M.; Santos, S.R.; Shoguchi, E.; Smith, E.G.; Stat, M.; Stephens, T.G.; Strader, M.E.; Suggestt, D.J.; Swain, T.D.; Tran, C.; Traylor-Knowles, N.; Voolstra, C.R.; Warner, M.E.; Weis, V.M.; Wright, R.M.; Xiang, T.; Yamashita, H.; Ziegler, M.; Correa, A.M.S.; Parkinson, J.E. (2023). Building consensus around the assessment and interpretation of Symbiodiniaceae diversity. *PeerJ*. 11, e15023.

DeGeorges, A.; Gorceau, T. J.; Reilly, B. (2010). Land-sourced pollution with an emphasis on domestic sewage: lessons from the Caribbean and implications for coastal development on Indian Ocean and Pacific coral reefs. *Sustainability*,2(9), 2919-2949.

Drury, C.; Schopmeyer, S.; Goergen, E.; Bartel, E.; Nedimyer, K.; Johns, M.; Maxwell, K.; Galvan, V.; Manfrino, C.; Lirman, D. (2017) Genomic patterns in *Acropora cervicornis* show extensive population structure and variable genetic diversity. *Ecology and Evolution*. 7, 6188-6200. DOI: 10.1002/ece3.3184

Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhuri, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

Estrada-Saldivar, N.; Molina-Hernandez, A.; Perez-Cervantes, E.; Medellin-Maldonado, F.; Gonzales-Barrios, F. J.; Alvarez-Filip, L. (2020). Reef-scale impacts of the stony coral tissue loss disease outbreak. *Coral Reefs*. 39, 861-866. Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; BC Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhuri, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>



Gladfelter, E.H.; Monahan, R. K.; Gladfelter, W.B. (1978). Growth rates of five reef-building corals in the Northeast Caribbean. *Bulletin of Marine Science*.28(4), 728-734.

Gonzales-Barrios, F. J; Cabral-Tena, R. A.; Alvarez-Filip, L. (2020). Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*. 27(3), 640-652. avies, S.W.; Gamache, M. H.; Howe-Kerr, L.I.; Kriefall, N. G.; Baker, A.C.; Banaszak, A.T.; Bay, L.K.; Bellantuono, A.J.; Bhattacharya, D.; Chan, C.X.; Claar, D.C.; Coffroth, M.A.; Cunning, R.; Davy, S.K.; del Campo, J.; Díaz-Almeyda, E.M.; Frommlet, J.C.; Fuess, L.E.; González-Pech, R.A.; Goulet, T.L.; Hoadley, K.D.; Howells, E.J.; Hume, B.C.C.; Kemp, D.W.; Kenkel, C.D.; Kitchen, S.A.; LaJeunesse, T.C.; Lin, S.; McIlroy, S.E.; McMinds, R.; Nitschke, M.R.; Oakley, C.A.; Peixoto, R.S.; Prada, C.; Putnam, H.M.; Quigley, K.; Reich, H.G.; Reimer, J.D.; Rodriguez-Lanetty, M.; Rosales, S.M.; Saad, O.S.; Sampayo, E.M.; Santos, S.R.; Shoguchi, E.; Smith, E.G.; Stat, M.; Stephens, T.G.; Strader, M.E.; Suggett, D.J.; Swain, T.D.; Tran, C.; Traylor-Knowles, N.; Voolstra, C.R.; Warner, M.E.; Weis, V.M.; Wright, R.M.; Xiang, T.; Yamashita, H.; Ziegler, M.; Correa, A.M.S.; Parkinson, J.E. (2023). Building consensus around the assessment and interpretation of Symbiodiniaceae diversity. *PeerJ*. 11, e15023.

DeGeorges, A.; Gorceau, T. J.; Reilly, B. (2010). Land-sourced pollution with an emphasis on domestic sewage: lessons from the Caribbean and implications for coastal development on Indian Ocean and Pacific coral reefs. *Sustainability*,2(9), 2919-2949.

Drury, C.; Schopmeyer, S.; Goergen, E.; Bartel, E.; Nedimyer, K.; Johns, M.; Maxwell, K.; Galvan, V.; Manfrino, C.; Lirman, D. (2017) Genomic patterns in *Acropora cervicornis* show extensive population structure and variable genetic diversity. *Ecology and Evolution*. 7, 6188-6200. DOI: 10.1002/ece3.3184

Gorbunov, M. Y.; Shirsin, E.; Nikonova, E.; Fadeev, V. V.; Falkowski, P. G. (2020). A multi-spectral fluorescence induction and relaxation (FIRe) technique for physiological and taxonomic analysis of phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*. 644, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps13358>

Hayes, N. K.; Walton, C. J.; Gilliam, D. S. (2022). Tissue loss disease outbreak significantly alters the Southeast Florida stony coral assemblage. *Frontiers in Marine Science*. 9. avies, S.W.; Gamache, M. H.; Howe-Kerr, L.I.; Kriefall, N. G.; Baker, A.C.; Banaszak, A.T.; Bay, L.K.; Bellantuono, A.J.; Bhattacharya, D.; Chan, C.X.; Claar, D.C.; Coffroth, M.A.; Cunning, R.; Davy, S.K.; del Campo, J.; Díaz-Almeyda, E.M.; Frommlet, J.C.; Fuess, L.E.; González-Pech, R.A.; Goulet, T.L.; Hoadley, K.D.; Howells, E.J.; Hume, B.C.C.; Kemp, D.W.; Kenkel, C.D.; Kitchen, S.A.; LaJeunesse, T.C.; Lin, S.; McIlroy, S.E.; McMinds, R.; Nitschke, M.R.; Oakley, C.A.; Peixoto, R.S.; Prada, C.; Putnam, H.M.; Quigley, K.; Reich, H.G.; Reimer, J.D.; Rodriguez-Lanetty, M.; Rosales, S.M.; Saad, O.S.; Sampayo, E.M.; Santos, S.R.; Shoguchi, E.; Smith, E.G.; Stat, M.; Stephens, T.G.; Strader, M.E.; Suggett, D.J.; Swain, T.D.; Tran, C.; Traylor-Knowles, N.; Voolstra, C.R.; Warner, M.E.; Weis, V.M.; Wright, R.M.; Xiang, T.; Yamashita, H.; Ziegler, M.; Correa, A.M.S.; Parkinson, J.E. (2023). Building consensus around the assessment and interpretation of Symbiodiniaceae diversity. *PeerJ*. 11, e15023.

DeGeorges, A.; Gorceau, T. J.; Reilly, B. (2010). Land-sourced pollution with an emphasis on domestic sewage: lessons from the Caribbean and implications for coastal development on Indian Ocean and Pacific coral reefs. *Sustainability*,2(9), 2919-2949.

Drury, C.; Schopmeyer, S.; Goergen, E.; Bartel, E.; Nedimyer, K.; Johns, M.; Maxwell, K.; Galvan, V.; Manfrino, C.; Lirman, D. (2017) Genomic patterns in *Acropora cervicornis* show extensive population structure and variable genetic diversity. *Ecology and Evolution*. 7, 6188-6200. DOI: 10.1002/ece3.3184



Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhour, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

Estrada-Saldivar, N.; Molina-Hernandez, A.; Perez-Cervantes, E.; Medellin-Maldonado, F.; Gonzales-Barrios, F. J.; Alvarez-Filip, L. (2020). Reef-scale impacts of the stony coral tissue loss disease outbreak. *Coral Reefs*. 39, 861-866.

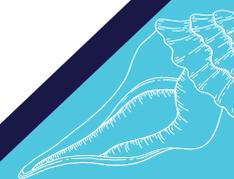
Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhour, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

Gardner, T. A.; Cote, I. M.; Gill, J. A.; Grant, A.; Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*. 301(5635), 958-960. DOI: 10.1126/science.1086050

Ghianian, M.; Carrick, J.; Rhode-Barbarigo, L.; Haus, B.; Baker, A. C.; Lirman, D. (2020). Dissipation of wave energy by a hybrid artificial reef in a wave simulator: implications for coastal resilience and shoreline protection. *Limnology and oceanography*. 19(1), 1-7. DOI: 10.1126/science.1086050

Gladfelter, E.H.; Monahan, R. K.; Gladfelter, W.B. (1978). Growth rates of five reef-building corals in the Northeast Caribbean. *Bulletin of Marine Science*. 28(4), 728-734.

Gonzales-Barrios, F. J.; Cabral-Tena, R. A.; Alvarez-Filip, L. (2020). Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*. 27(3), 640-652.



Gorbunov, M. Y.; Shirsin, E.; Nikonova, E.; Fadeev, V. V.; Falkowski, P. G. (2020). A multi-spectral fluorescence induction and relaxation (FIRe) technique for physiological and taxonomic analysis of phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*. 644, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps13358>

Hayes, N. K.; Walton, C. J.; Gilliam, D. S. (2022). Tissue loss disease outbreak significantly alters the Southeast Florida stony coral assemblage. *Frontiers in Marine Science*. 9. Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhuri, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

Hughes, T. P.; Baird, A. H.; Morrison, T. H.; Torda, G. (2023). Principles for coral reef restoration in the Anthropocene. *One Earth*. Eakin, C. M.; Morgan, J. A.; Heron, S. F.; Smith, T. B.; Liu, G.; Alvarez-Filip, L.; Baca, B.; Bartels, E.; Bastifas, C.; Bouchon, C.; Brandt, M.; Bruckner, A. W.; Bunkley-Williams, L.; Cameron, A.; Causey, B. D.; Chiappone, M.; Christensen, T. R. L.; Crabbe, M. J. C.; Day, O.; de la Guardia, E.; Diaz-Pulido, G.; DiResta, D.; Gil-Agudelo, D. L.; Gilliam, D. S.; Ginsburg, R. N.; Gore, S.; Guzman, H. M.; Hendee, J. C.; Hernandez-Delgado, E. A.; Husain, E.; Jeffrey, C. F. G.; Jones, R. J.; Jordan-Dahlgren, E.; Kaugman, L. S.; Kline, D. I.; Kramer, P. A.; Lang, J. C.; Lirman, D.; Mallela, J.; Manfrino, C.; Marechal, J. P.; Marks, K.; Mihaly, J.; Miller, W. J.; Mueller, E. M.; Muller, E. M.; Toro, C. A. O.; Pxenford, H. A.; Ponce-Taylor, D.; Quinn, N.; Ritchie, K. B.; Rodriguez, S.; Ramirez, A. R.; Romano, S.; Samhuri, J. F.; Sanchez, J. A.; Schmahl, G. P.; Shank, B. V.; Skirving, W. J.; Steiner, S. C. C.; Villamizar, E.; Walsh, W. M.; Walter, C.; Weil, E.; Williams, 8 / 9 W. H.; Roberson, K. W.; Rusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *Plos one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>

Humanes, A.; Beauchamp, E. A.; Bythell, J. C.; Carl, M. K.; Craggs, J. R.; Edwards, A. J.; Golbuu, Y.; Lachs, L.; Martinez, H. M.; Palmowski, P.; Paysinger, F.; Randle, J. L.; van der Steeg, E.; Sweet, M.; Treumann, A.; Guest, J. R. (2021). An experimental framework for selectively breeding corals for assisted evolution, *Frontiers in Marine Science*. 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.669995>



Johnson, M. E.; Lustic, C.; Bartels, R.; Baums, I. B.; Gilliam, D. S.; Larson, L.; Lirman, D.; Miller, M. W.; Nedimyer, K.; Schopmeyer, S. (2011). Caribbean Acropora restoration guide: best practices for propagation and population enhancement. The Nature Conservancy.

Jones, N. P.; Ruzicka, R. P.; Colella, M. A.; Pratchett, M. S.; Gilliam, D. S. (2022). Frequent disturbances and chronic pressures constrain stony coral recovery on Florida's Coral Reef. *Coral Reefs*. 41, 1665-1679.

Gorbunov, M. Y.; Shirsin, E.; Nikonova, E.; Fadeev, V. V.; Falkowski, P. G. (2020). A multi-spectral fluorescence induction and relaxation (FIRe) technique for physiological and taxonomic analysis of phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*. 644, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps13358>

Koch, H. R.; Matthews, B.; Leto, C.; Engelsma, C.; Bartels, E. (2022). Assisted sexual reproduction of *Acropora cervicornis* for active restoration of Florida's Coral Reef. *Frontiers in Marine Science*. 9.

Gorbunov, M. Y.; Shirsin, E.; Nikonova, E.; Fadeev, V. V.; Falkowski, P. G. (2020). A multi-spectral fluorescence induction and relaxation (FIRe) technique for physiological and taxonomic analysis of phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*. 644, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps13358>

Koch H. R.; Azu, Y.; Bartels, E.; Muller, E. M. (2022). No apparent cost of disease resistance on reproductive output in *Acropora cervicornis* genets used for active coral reef restoration in Florida. *Frontiers in Marine Science*. 9.

Gorbunov, M. Y.; Shirsin, E.; Nikonova, E.; Fadeev, V. V.; Falkowski, P. G. (2020). A multi-spectral fluorescence induction and relaxation (FIRe) technique for physiological and taxonomic analysis of phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*. 644, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps13358>

Ladd, M. C.; Shantz, A. A.; Bartels, E.; Burkepile, D. E. (2017). Thermal stress reveals a genotype-specific tradeoff between growth and tissue loss in restored *Acropora cervicornis*. *Marine Ecology Progress Series*. 572, 129-139. <https://doi.org/10.3354/meps12169>

Lirman, D.; Schopmeyer, S.; Galvan, V.; Drury, C.; Baker, A. C.; Baums, I. B. (2014). Growth dynamics of the threatened Caribbean staghorn coral *Acropora cervicornis*: influence of host genotype, symbiont identity, colony size, and environmental setting. *Plos one*.

Maneval, P.; Jacoby, C.A.; Harris, H.E.; Frazer, T.K. (2017) Genotype, Nursery Design, and Depth Influence the Growth of *Acropora cervicornis* Fragments. *Frontiers in Marine Science*. 8, 670474. doi: 10.3389/fmars.2021.670474

Mcleod, E.; Anthony, K. R. N.; Mumby, P. J.; Maynard, J.; Beeden, R.; Graham, N. A. J.; Heron, S. F.; Hoegh-Guldberg, O.; Jupiter, S.; MacGowan, P.; Mangubhai, S.; Marshall, N.; Marshall, P. A.; McClanahan, T. R.; Mcleod, K.; Nystrom, M.; Obura, D.; Parker, B.; Possingham, H. P.; Salm, R. V.; Tamelander, J. (2019). The future of resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*. 233, 291-301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>

Minjie, H.; Bai, Y.; Zheng, X.; Zheng, Y. (2023). Coral-algal endosymbiosis characterized using RNAi and single-cell RNA-seq. *Nature microbiology*. 8, 1240-1251. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01397-9>



- Munoz-Castillo, A. I.; Rivera-Sosa, A.; Chollett, I.; Eakin, C. M.; Andrade-Gomez, L.; McField, M.; Arias-Gonzalez, E. A. (2019). Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delineation to enhance conservation. *Scientific Reports*. 9.
- O'Donnell, K. E.; Lohr, K. E.; Bartels, E.; Baums, I. B.; Patterson, J. T. (2018). *Acropora cervicornis* genet performance and symbiont identity throughout the restoration process. *Coral Reefs*. 37, 1109-1118. <https://doi.org/10.1007/s00338-018-01743-y>
- Quigley, K. M.; Marzonie, M.; Ramsby, B.; Abrego, D.; Milton, G.; van Oppen, M. J. H.; Bay, L. K. (2021). Variability in fitness trade-offs amongst juveniles with mixed genetic backgrounds held in the wild. *Frontiers in Marine Science*. 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.636177>
- Ryan, K. E.; Walsh, J. P.; Corbett, D. R.; Winter, A. (2008). A record of recent change in terrestrial sedimentation in a coral-reef environment, La Parguera, Puerto Rico: A response to coastal development? *Marine Pollution Bulletin*. 56(6), 1177-1183.
- Sanchez, J. A.; Gomez-Corrales, M.; Gutierrez-Cala, L.; Vergara, D. C.; Roa, P.; Gonzalez-Zapata, F. L.; Gnecco, M.; Puerto, N.; Nierra, L.; Sarmiento, A. (2019). Steady decline of corals and other benthic organisms in the SeaFlower Biosphere Reserve (Southwestern Caribbean). *Frontiers in Marine Science*. 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00073>
- Silbiger, N. J.; Goodbody-Gringley, G.; Bruno, J. F.; Putnam, H. M. (2019). Comparative thermal performance of the reef-building coral *Orbicella franksi* at its latitudinal range limits. *Marine Biology*. 166. <https://doi.org/10.1007/s00227-019-3573-6>
- Toth, L. T.; Stathakopoulos, A.; Kuffner, I. B.; Ruzicka, R. R.; Colella, M. A.; Shinn, E. A. (2019) The unprecedented loss of Florida's reef-building corals and the emergence of a novel coral-reef assemblage. *Ecology*. 100(9), 102781. <https://doi.org/10.1002/ecy.2781>
- Van Woesik, R.; Banister, R. B.; Bartels, E.; Gilliam, D. S.; Goergen, E. A.; Lustic, C.; Maxwell, K.; Moura, A.; Muller, E. M.; Schopmeyer, S.; Winters, R. S.; Lirman, D. (2020). Differential survival of nursery-reared *Acropora cervicornis* outplants along the Florida reef tract. *Restoration Ecology*, 29(1), e13302. <https://doi.org/10.1111/rec.13302>
- Wilson, S. K.; Fisher, R.; Pratchett, M. S.; Graham, N. A. J.; Dulvy, N. K.; Turner, R. A.; Cakacaka, A.; Polunin, N. V. C.; Rushton, S. P.(2008). Exploitation and habitat degradation as agents of change within coral reef fish communities. *Global Change Biology*. 14(12), 2796-2809. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01696.x>



FIGUUR LEGENDAS

Figuur 1. Afbeelding van *Acropora cervicornis*-kolonies die groeien in de CCMI-koraalkwekerij op ongeveer 15 meter diepte in Little Cayman.

Figuur 2. (a) Afbeelding van de hoofdonderzoekers G. Goodbody-Gringley en J. Bruno met de experimentele opstelling voor thermische prestaties. b) Afbeelding van de incubatiekamers in een waterbad met constante temperatuur, voorzien van zuurstof- en temperatuursondes, die elk een afzonderlijk *A. cervicornis*-fragment bevatten .

Figuur 3. Afbeelding van duikers die gezondheidsbeoordelingen uitvoeren op een gemeenschappelijke tuinplantlocatie. Elke site bevatte een gelijk aantal replicatiefragmenten die elk van de 8 genotypen vertegenwoordigden die lukraak op de koepel waren geplaatst.

Figuur 4. Resultaten van de thermische prestatie-experimenten.

Figuur 5. (a) Gezondheidstoestand van alle uitgeplante koralen na de eerste uitplant in mei 2022, secundaire beoordelingen in april 2023 en definitieve beoordeling in september 2023. b) Kaplan-Meier-overlevingswaarschijnlijkheidscurven per genotype.

Figuur 6. Gezondheidstoestand per genotype in (a) april 2023 en (b) september 2023.

Figuur 7. (a) Bleekprevalentie en (b) groei (totale lineaire extensie) per genotype aan het einde van de lotsmeting in september 2023.



THE UNIVERSITY
of NORTH CAROLINA
at CHAPEL HILL



resembid



Funded by the
European Union



Liberté
Égalité
Fraternité



Implemented by Expertise France



In collaboration with GFDRR

Dit handboek is tot stand gekomen met financiële steun van de Europese Unie. De inhoud ervan valt uitsluitend onder de verantwoordelijkheid van het Central Caribbean Marine Institute (CCMI) en weerspiegelt niet noodzakelijkerwijs de standpunten van de Europese Unie.

© 2024 Central Caribbean Marine Institute.

Alle rechten voorbehouden. Onder voorwaarden in licentie gegeven aan de Europese Unie.