LTZ1 David Boom & Jerome Rotgans

Verantwoorde be

Hoe neurowetenschap inzicht geeft in de effectiviteit van automatisering bij de Koninklijke Marine

De Koninklijke Marine kampt met een dubbele uitdaging: minder bemanningsleden aan boord en een toenemende operationele druk door een veranderend geopolitiek landschap. Tegelijkertijd staat de vloot de komende jaren voor grootschalige vervangingen en moderniseringen, terwijl de personele bezetting daalt. Om de operationele gereedheid te waarborgen, zijn innovatieve oplossingen noodzakelijk.

manningsreductie



De potentie en uitdaging van automatisering

Automatisering lijkt een potentiële oplossing. Het Commando Zeestrijdkrachten (CZSK) en het Commando Materieel & IT (COMMIT) investeren in geavanceerde systemen die de werkdruk van bemanningsleden moeten verlichten. Een voorbeeld hiervan is de introductie van de Automatische Advies Functies (AAF), een softwareprogramma dat personeel in de technische centrale (TC) ondersteunt bij toezicht, besluitvorming en het ondernemen van kritieke acties in noodsituaties in de machinekamer (MK). Het idee achter AAF is dat het taken overneemt van ervaren bemanningsleden, waardoor minder (senior) personeel nodig is en de TC met minder personeel kan worden bemenst. In de praktijk blijkt dat automatisering niet altijd de werkdruk verlaagt zoals gehoopt en in sommige gevallen zelfs nieuwe uitdagingen creëert. Sterker nog, sommige schepen die AAF hebben geïmplementeerd ervaren gemengde resultaten. In plaats van lagere werkdruk rapporteren sommige bemanningsleden juist een toename van de mentale belasting.

LEES VERDER →



Innovatie in actie: onderzoeksteam en instructeurs enthousiast over (neuro) onderzoek op KMTO

Waarom leidt automatisering in sommige gevallen tot verbetering, terwijl het in andere gevallen juist nieuwe problemen veroorzaakt? De sleutel ligt in de interactie tussen mens en technologie. Automatisering is geen wondermiddel dat zelfstandig al het denkwerk van de bemanning overneemt; in vrijwel alle marine-operaties blijft de mens verantwoordelijk voor cruciale beslissingen, het nemen van initiatief en het oplossen van onvoorziene situaties. Hierdoor verschuift de cognitieve werkdruk: soms verlicht technologie de last, maar soms introduceert het juist een nieuwe mentale belasting. Denk bijvoorbeeld aan het aanleren van nieuwe procedures, het omgaan met uitzonderingen en het bewaken van geautomatiseerde systemen.

In dit artikel laten we zien hoe neuro-ergonomie[1], en in het bijzonder een technologie genaamd functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS), inzicht kan geven in de vraag of automatiseringssystemen zoals AAF daadwerkelijk bijdragen aan het verlagen van de werkdruk. We bespreken de opzet en resultaten van een recent onderzoek en de lessen die hieruit te trekken zijn. Onze centrale boodschap: de effectiviteit van automatisering wordt niet alleen bepaald door de kwaliteit van de technologie, maar ook door de mate van training van gebruikers en de objectieve meting van de afname van cognitieve belasting.

Het probleem: waarom wordt AAF niet consequent gebruikt op alle marineschepen waarop het is geïnstalleerd?

De potentie van automatisering

Binnen de marine wordt al geruime tijd gezocht naar automatiseringsoplossingen om de werkdruk op personeel te verlichten. Denk bijvoorbeeld aan geavanceerde navigatiesoftware, zoals het Integrated Bridge Management System (IBMS), of aan systemen voor machinekamermonitoring, zoals het Integrated Platform Management System (IPMS). Het uitgangspunt is dat taken die complex, repetitief, tijdrovend of gevaarlijk zijn, worden overgenomen door automatisering, zodat de operator zich beter kan concentreren op het daadwerkelijke missiebelang. Bij AAF in de TC gaat het specifiek om het *real-time* bewaken van de status van diverse machinekamersystemen en de gekoppelde noodprocedures. Bij een calamiteit – zoals een brand in de machinekamer – kan AAF automatisch noodprocedures in gang zetten: denk aan het afsluiten van de brandstofaanvoer, het activeren van een blusinstallatie of het uitsturen van waarschuwingen en vocale alarmen. Hierdoor kan een minder ervaren onderofficier potentieel dezelfde taken uitvoeren als een meer ervaren collega, waardoor de TC met minder personeel bezet kan worden.

Realiteit: acceptatie blijft achter

Ondanks de veelbelovende mogelijkheden van AAF is de brede implementatie tot nu toe beperkt. Een belangrijke oorzaak is dat personeel vaak onvoldoende is getraind in de werking van de software. Hierdoor maken operators ofwel gebruik van het systeem, óf helemaal niet. Daarnaast speelt technologische weerstand een rol. Beman-

> Traditionele methoden voor het meten van werkdruk – meestal via vragenlijsten – **bieden weinig inzicht in wat er tijdens de operatie in het hoofd van de operator gebeurt**

ningsleden die al jaren vertrouwd zijn met een beproefde werkwijze, ervaren de automatisering als een 'zwarte doos' waarin ze geen volledig inzicht hebben. Dit leidt tot scepsis en een gebrek aan draagvlak. Ook de traditionele methoden voor het meten van werkdruk – meestal via vragenlijsten – bieden weinig inzicht in wat er tijdens de operatie in het hoofd van de operator gebeurt, waardoor het moeilijk is om objectief vast te stellen of de mentale belasting daadwerkelijk afneemt of juist toeneemt.

Een recente studie bij de KMTO

Opzet en doel van het experiment

Om meer inzicht te krijgen in de interactie tussen mens en automatisering, is bij de Koninklijke Marine Technische Opleidingen (KMTO) een experiment uitgevoerd in een gesimuleerde maritieme omgeving. Het doel was te onderzoeken of het gebruik van AAF bij een complexe machinekamerbrand daadwerkelijk leidt tot een lagere cognitieve werkbelasting. Daarnaast moest het onderzoek achterhalen welke rol ervaring en training in deze automatiseringssoftware spelen.

Voor dit experiment zijn acht operators geselecteerd die als chef van de wacht (CvdW)[2] konden optreden. Zij verschilden in leeftijd, rang en eerdere ervaring met AAF. In een realistische simulator, de Multi Platform Procedure Trainer (MPPT)[3], moesten zij twee opeenvolgende scenario's uitvoeren:

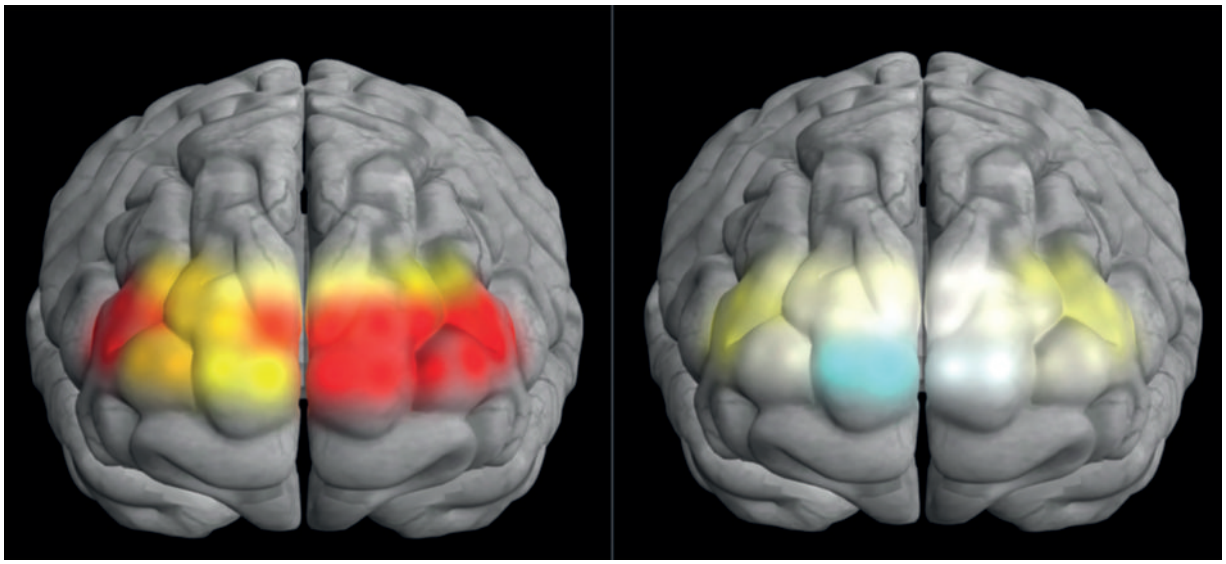
- Scenario A (manueel): een brand in de gasturbinemodule moest volledig handmatig worden bestreden, zonder enige hulp van AAF;
- Scenario B (geautomatiseerd): exact hetzelfde scenario, maar nu met AAF ingeschakeld om bepaalde stappen automatisch uit te voeren, zoals het afsluiten van brandstofkleppen, het starten van alternatieve voortstuwing en het genereren van meldingen.

Hoe hebben we gemeten? fNIRS als neuro-ergonomische meetmethode

Om de cognitieve werkbelasting van de bemanningsleden tijdens beide scenario's objectief te kunnen meten, maakten we gebruik van fNIRS. Dit is een draagbare technologie die hersenactiviteit registreert via nabij-infrarood licht. Door lichtbronnen en detectors op het hoofd te plaatsen, kan in *real-time* de zuurstofverzadiging in de bovenste lagen van de hersenen – met name de prefrontale cortex - worden gemeten. Deze hersenregio speelt een cruciale rol bij besluitvorming, focus en aandachtsverdeling. fNIRS heeft verschillende voordelen die het geschikt maken voor simulators en mogelijk ook aan boord van schepen. Zo is de apparatuur compact en draagbaar, waardoor metingen kunnen plaatsvinden in een omgeving die dicht bij de operationele praktijk ligt (zie onderstaande foto). Daarnaast kent het systeem relatief veel bewegingsvrijheid. Hoewel extreme bewegingen worden vermeden, is fNIRS minder gevoelig voor bewegingsartefacten dan



Voorbeeld van een fNIRS-headset die de zuurstofverzadiging in de prefrontale cortex meet. De real-time data wordt direct doorgestuurd naar een datalogger (laptop)



Verschil in hersenactivatie tussen 'onervaren' (links) en 'ervaren' (rechts) gebruikers

bijvoorbeeld EEG of fMRI. Bovendien geeft het systeem directe, *real-time* feedback. De meetgegevens zijn direct te volgen, zodat pieken in hersenactiviteit op specifieke momenten (bijvoorbeeld tijdens alarmering of procedurewisselingen) direct te analyseren zijn.

Resultaten

CvdW's met AAF-ervaring profiteren van AAF

CvdW's met eerdere ervaring met AAF vertoonden een meetbaar lagere hersenactiviteit tijdens het bestrijden van de gesimuleerde brand in de gasturbinemodule. Hierdoor konden zij zich beter richten op kerntaken zoals coordinatie en besluitvorming, omdat routinematige handelingen grotendeels automatisch werden uitgevoerd.

Ongetrainde CvdW's raken overbelast

CvdW's zonder, of met weinig AAF-ervaring voelden zich vaak onzeker over wat de software wel en niet deed. Dit werd bevestigd door hogere fNIRS-metingen. Zij combineerden namelijk twee cognitief belastende taken: het uitvoeren van de juiste noodprocedures en het constant monitoren van een voor hen nieuw systeem.

fNIRS biedt real-time inzicht

In tegenstelling tot de achteraf ingevulde vragenlijsten, registreerden de fNIRS-data exact de momenten waarop de mentale belasting piekte tijdens de noodprocedure. In figuur 2 geven de kleuren de mate van activatie (vergeleken met baseline) aan in de prefrontale cortex tijdens een MK-noodprocedure in de MPPT-trainer. De onervaren gebruiker laat duidelijke pieken zien bij het gebruik van de AAF-software, terwijl de ervaren gebruiker stabielere en lagere activering heeft

De rol van training

Een van de meest opvallende bevindingen uit het onderzoek is het effect van korte, gerichte training. Een CvdW, zonder ervaring met AAF, die in het eerste scenario met AAF hoge pieken in hersenactiviteit vertoonde, liet na slechts vijftien minuten uitleg en oefening een aanzienlijke daling zien. De hersenactiviteit was daarna vergelijkbaar met die van een ervaren AAF-gebruiker. Dit suggereert dat een groot deel van de mentale belasting voortkomt uit onbekendheid met AAF, en dat zelfs een korte training de effectiviteit van automatisering aanzienlijk kan vergroten.

Kort samengevat

De resultaten tonen aan dat AAF de cognitieve belasting van de CvdW's significant kan verminderen—mits zij goed bekend zijn met de software en begrijpen welke taken geautomatiseerd zijn. Zonder deze kennis kan de werkdruk juist toenemen. Dankzij de inzet van fNIRS, naast traditionele meetinstrumenten zoals de NASA Task Load Index (NASA-TLX[4]), kon het onderzoeksteam in *real-time* vaststellen wanneer en waardoor de mentale belasting piekte. Deze inzichten bieden een stevige basis voor gerichte trainingsprogramma's en de verdere ontwikkeling van automatiseringssystemen binnen de marine.

Kansen voor de Koninklijke Marine

fNIRS als innovatie en meetinstrument

Hoewel de inzet van fNIRS in militaire context, buiten de training van gevechtspiloten, nog relatief nieuw is, biedt deze technologie de Koninklijke Marine grote kansen om cognitieve belasting objectief in kaart te brengen. Denk bijvoorbeeld aan het beoordelen van nieuw ontwikkelde softwaremodules voordat deze op grotere schaal worden geïmplementeerd, of aan het monitoren van trainees tij-

> Een van de meest opvallende bevindingen uit het onderzoek is **het effect van korte, gerichte training**

Over fNIRS en validiteit

fNIRS is al sinds eind jaren negentig in ontwikkeling, maar pas de afgelopen tien jaar zijn de systemen draagbaar en robuust genoeg geworden om buiten het laboratorium in te zetten. Dit betekent dat de Koninklijke Marine zich in een pionierspositie bevindt door de technologie direct toe te passen in realistische of operationele omgevingen. De validiteit van fNIRS als meetmethode voor cognitieve belasting is in tal van wetenschappelijke publicaties bevestigd.[5] Zo zijn er vergelijkingen gemaakt met fMRI-studies die laten zien dat veranderingen in zuurstofverzadiging in de prefrontale cortex sterk correleren met hogere cognitieve belasting.[6]

Wordt alles gemeten?

Nee, fNIRS meet primair wat er in het bovenste deel van de hersenen (de cortex) gebeurt. Emotionele reacties, stress of vermoeidheid kunnen natuurlijk ook in andere delen van de hersenen spelen. Toch is de prefrontale cortex een belangrijke aanwijzer voor 'mentaal werk' rondom beslissingen en planning. Tegelijk moeten de metingen wel correct worden geïnterpreteerd. Een hogere activiteit in de prefrontale cortex is niet per definitie slecht: het kan erop duiden dat een operator geconcentreerd en actief is. Pas bij extreme of langdurige pieken wordt het risicovol.

Koppeling met andere metingen

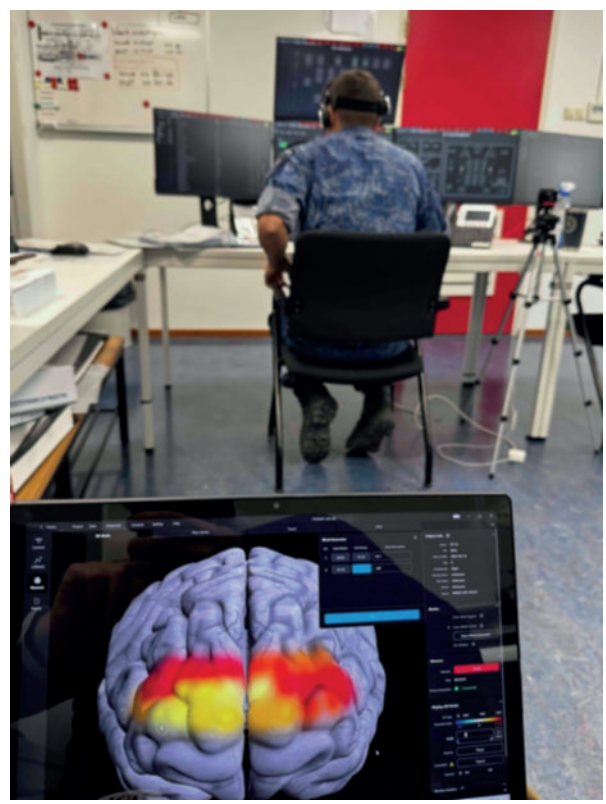
Om een volledig beeld te krijgen, raden we aan fNIRS te combineren met NASA-TLX – een bekende vragenlijst om subjectief de ervaren werkdruk te kwantificeren, prestatiemetingen – bijvoorbeeld hoe snel en effectief een brand is geblust, of hoeveel fouten zijn gemaakt in de procedure, en fysiologische parameters zoals hartslagvariabiliteit (HRV) of pupilgrootte. Door een multi sensorische aanpak te hanteren, ontstaat een holistisch beeld van wat er in het hoofd en het lichaam van de operator gebeurt.

dens simulatorsessies, zodat instructeurs in *real-time* kunnen zien wanneer de mentale belasting te hoog oploopt. In de toekomst zou fNIRS zelfs kunnen worden ingezet aan boord om bemanningsleden tijdens langdurige of kritieke missies te monitoren. Dit zou tijdig signaleren wanneer vermoeidheid of overbelasting optreedt, waardoor gerichte interventies mogelijk zijn en inzichtelijk raakt welke processen verder geautomatiseerd kunnen worden. Deze toepassingen laten zien dat fNIRS meer is dan een experimenteel meetinstrument; het heeft de potentie om een integraal onderdeel te zijn van hoe de marine innovaties implementeert, optimaliseert en onderhoudt.

Nieuwe kijk op training en implementatie

Uit het onderzoek blijkt dat een relatief korte, gerichte training al veel kan bijdragen aan het verminderen van cognitieve belasting bij het gebruik van geautomatiseerde systemen zoals AAF. Dit suggereert dat overgang van overbelasting naar het efficiënt gebruik van automatisering klein kan zijn, mits de bemanning precies begrijpt wat de software wel en niet overneemt. Het ontwikkelen van beknopte, maar effectieve opleidingsmodules die zich richten op kernfuncties, beperkingen en veelvoorkomende scenario's kan daarom van grote meerwaarde zijn. fNIRS kan hierbij worden ingezet om trainees *real-time* inzicht te geven in hun mentale inspanning, zodat zij beter begrijpen wanneer en waarom cognitieve belasting toeneemt.

Daarnaast is het essentieel om automatiseringssoftware grondig te evalueren voordat deze aan boord wordt geïmplementeerd. Dit vergroot de kans op acceptatie binnen de organisatie. Pas wanneer automatisering aantoonbaar effectief is getest in een simulator omgeving, zoals de MPPT, en alle stakeholders betrokken zijn geweest, kan het verantwoord worden ingevoerd. Uit de vragenlijsten bleek bovendien dat een onboard trainingssimulator (OBTS) hierin van grote toegevoegde waarde kan zijn. Hiermee kan de software niet alleen in een simulator, maar ook aan boord worden getest.



Real-time fNIRS-meting in de MPTT-trainer

Vervolgstudie

Naast MK-noodprocedures zijn er veel andere domeinen binnen de Koninklijke Marine waarin cognitieve taken zeer intensief kunnen zijn en waar automatisering een belangrijke rol kan spelen. Denk bijvoorbeeld aan complexe Command and Control (C2), of de bediening van radar-, sonar- en wapensystemen via het *combat management system*. In een geplande vervolgstudie met de Onderzeedienst zal fNIRS worden ingezet waar, gedurende de Chef

Onderwater Bedrijf (COWB)-opleiding, de hoogste cognitieve belasting bij operators optreedt. De hypothese is dat hier een aanzienlijke winst te behalen valt door automatisering zorgvuldig te integreren en bemanningsleden hierop gericht te trainen. De resultaten van deze studie zullen niet alleen bijdragen aan een beter inzicht in cognitieve werkbelasting, maar ook worden meegenomen in bedrijfsvoering studies voor de ontwikkeling van de toekomstige onderzeeboten.

Deze focus op cognitieve belasting sluit aan bij een bredere trend binnen Defensie en de NAVO, waar systemen steeds verder worden geïntegreerd en gegevensstromen samenkomen in centrale besluitvormingspunten. In zo'n omgeving is het cruciaal dat de mens – vaak de zwakste schakel – niet overbelast raakt. Met behulp van fNIRS kan objectief in kaart worden gebracht waar en wanneer cognitieve overbelasting optreedt, zodat gerichte interventies mogelijk worden. Dit kan variëren van het optimaliseren van interfaces en het verfijnen van procedures tot het bijsturen van personeelsbeleid en trainingsmodules.

Conclusie: automatisering als bondgenoot, niet als tegenstander

De Koninklijke Marine staat voor een toekomst waarin automatisering een steeds grotere rol zal spelen. Van geavanceerde besturingssystemen in de technische centrale tot (semi-)autonome onbemande systemen voor verkenning en bewaking: de inzet van technologie zal alleen maar toenemen. De uitdaging is dat automatisering nooit in een vacuüm functioneert: de mens blijft essentieel om systemen correct te gebruiken, te interpreteren en aan te passen wanneer de omstandigheden veranderen.

Neuro-ergonomisch onderzoek met fNIRS toont aan dat automatisering niet per definitie de werkdruk verlaagt. Waar ervaren, getrainde operators profiteren van AAF, kan bij ongetraind personeel juist een hogere cognitieve belasting ontstaan. Een effectieve implementatie van automatiseringssystemen vereist daarom drie cruciale elementen:

1. Inzicht in mentale belasting: objectieve metingen, zoals fNIRS, bieden concrete data over cognitieve belasting;
2. Gerichte training: korte en effectieve opleidingsmodules zorgen ervoor dat operators snel vertrouwd raken met de software;
3. Bewustwording van de valkuilen: zowel wantrouwen als blind vertrouwen in automatisering kan leiden tot operationele risico's.

Neuro-ergonomisch onderzoek met fNIRS toont aan dat automatisering niet per definitie de werkdruk verlaagt

Naast operationele winst en verhoogde veiligheid kan deze aanpak ook helpen om personeelsdruk, opleidingskosten en ontwikkelkosten op termijn te verlagen. Door fNIRS als instrument te benutten, krijgt de Koninklijke Marine een unieke kans om automatisering strategisch en doelgericht in te zetten. De toekomst ligt niet alleen in meer technologie, maar in slimme toepassing ervan, zodat de werkdruk daadwerkelijk afneemt en de operationele effectiviteit toeneemt. Automatisering kan dan eindelijk de bondgenoot worden die zij belooft te zijn—geen tegenstander, maar een krachtig hulpmiddel dat mens en machine optimaal laat samenwerken.

Dr. Jerome I. Rotgans is professor en directeur van Rotgans Research Pte. Ltd., een bedrijf gespecialiseerd in toegepaste neurowetenschap voor risicovolle beroepen, zoals defensie, de medische sector en de luchtvaart.

LTZ1 David M. Boom werkt als Hoofd Bureau Navigatie bij de Afdeling Maritieme Systemen (COMMIT). In deze functie heeft hij met succes de masteropleiding *Maritime Innovations* aan het Maritiem Instituut Willem Barentsz gevolgd met als eindinnovatie het hierboven beschreven onderzoek.

SCAN VOOR DE VOLLEDIGE REFERENTIELIJST DE QR-CODE

DOWNLOAD HIER HET VOLLEDIGE ONDERZOEK:

Noten

1 Neuro-ergonomie bestudeert hoe de hersenen en het zenuwstelsel reageren op taken, werkomgevingen en technologieën, met als doel deze beter af te stemmen op de cognitieve en fysieke capaciteiten van mensen.

2 De chef van de wacht (CvdW) is minimaal een KPL TD en draagt zorg voor het bedienen, bewaken, veiligstellen en aanbieden van platformsystemen benodigd gedurende een reguliere wacht(zeewacht).

3 De MPPT biedt een veilige trainingsomgeving waarin de bemanning van luchtverdedigings- en commandofregatten (LCF's) procedures voor brandbestrijding, lekkage en motorstoringen kan oefenen, die niet op grote schaal aan boord uitgevoerd kunnen worden, met als doel deze noodsituaties realistisch te trainen.

4 De NASA Task Load Index (NASA-TLX) is een veelgebruikt meetinstrument voor het evalueren van de subjectieve werkbelasting, waarbij zes factoren – mentale, fysieke en temporele belasting, prestatie, inspanning en frustratie – worden gewogen om de totale taakbelasting van een operator te bepalen.

5 Zie bijvoorbeeld: Fan et al., 2021; Ferrari & Quaresima, 2012; Heinzel et al., 2013; Mark et al., 2022; Pierro et al., 2014; Plichta et al., 2006; Unni et al., 2015.

6 Lim et al., 2020; Pinti et al., 2020