

Forschungs- und Technologiezentrum Westküste
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Erschließungsstrategien zur Identifizierung, Bewertung und Nutzung Dichte-getriebener Meeresströmungen zur Stromerzeugung durch Turbinen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37641/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Roberto Mayerle & Dr. Kadir Orhan

Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern.....	3
Verzeichnis von Tabellen	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	6
Zusammenfassung	7
Einleitung	8
Projektaktivitäten.....	10
Erkundung und Zusammenstellung von Daten und Modellen	10
Einrichten der Messstationen im Zielgebiet und Naturmessungen.....	11
Optimierung des HN-3D-Strömungsmodells.....	15
Langzeit-Modellsimulationen der Strömungsbedingungen.....	17
Einpflegen virtueller Turbinen ins HN-3D-Modell und Simulationen	20
Zusammenstellung der Umweltdaten und Risikoeinschätzung	23
Ausblick.....	28
Fazit.....	29
Literaturverzeichnis.....	31

Verzeichnis von Bildern

Abbildung 1. Von den türkischen Projektpartnern entwickeltes HN-3D-Modell (Özturk et al., 2012).	11
Abbildung 2. Standort der Messstation.....	11
Abbildung 3. Einsetzen der Messstation.....	12
Abbildung 4. Konfiguration der Messstation.	12
Abbildung 5. Von der Messstation erfasste aktuelle Strömungsgeschwindigkeit (oben)	13
Abbildung 6. Wasserstandshöhen von der Messstation und den Online-Radargeräten in Istanbul.	14
Abbildung 7. Von der Messstation erfasste Salzgehalt- und Temperaturdaten.....	14
Abbildung 8. Von der Messstation erfasste Luftdruck- und Temperaturmessungen.	15
Abbildung 9. Gitter und Bathymetrie des überarbeiteten HN-3D-Modells.	16
Abbildung 10. Vergleich der aktuellen Messungen und der vom überarbeiteten HN-3D-Modell simulierten Strömungen. Der rote Punkt zeigt den Ort der zum Vergleich verwendeten stationären ADCP-Messungen an.	17
Abbildung 11. Simulierte Strömungen für a) die obere und b) die untere Strömungsschicht über ein Jahr.....	18
Abbildung 12. Jährliche durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeiten in Wassertiefen von a) 1 m b) 5 m c) 10 m d) 15 m e) 20 m f) 50 m.	18
Abbildung 13. Aktivitätsraten der Turbinen in Wassertiefen von a) 1m b) 5m c) 10m d) 15m e) 20m f) 50 m.....	19
Abbildung 14. Simulierte (a) obere Schicht (b) Grenzschicht (c) untere Schicht des Wasserkörpers.....	19
Abbildung 15. In den Simulationen berücksichtigte Turbinenstandorte a) für die obere Schicht (10 m) und b) für die untere Schicht (55 m). Der stromabwärtige Abstand zwischen den Turbinen beträgt $10 \times D$ und der seitliche Abstand beträgt $2,5 \times D$	20
Abbildung 16. Strömungsbedingungen an der oberen Fließschicht a) ungestört b) mit MCTs mit 5 m Durchmesser.....	21
Abbildung 17. Strömungsbedingungen in der unteren Strömungsschicht (a) ungestört (b) mit MCTs mit 5 m Durchmesser. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.....	22
Abbildung 18. Einfluss der MCT-Arrays mit unterschiedlichen Konfigurationen auf den Wasserstand.....	22

Abbildung 19. Der Unterschied in den Strömungsgeschwindigkeiten der oberen Schicht. Die magentafarbene Linie	24
Abbildung 20. Der Unterschied in den Strömungsgeschwindigkeiten der unteren Schichten. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.....	24
Abbildung 21. Einfluss der MCTs auf das Strömungsfeld in 10 m Tiefe. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.....	25
Abbildung 22. Räumliche Veränderungen der Dichtegradienten a) ungestört b) beeinflusst durch die MCTs.	26
Abbildung 23. Änderungen der Dichtegradienten vor dem Turbinenfeld über die Zeit, a) ungestört und.....	27

Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1. Von den türkischen Projektpartnern bereitgestellte Messungen (Yuksel et al., 2008).	
.....	10

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
HLES	<i>Horizontal Large Eddy Simulation</i>
HN-3D	<i>Hydrodynamisches 3D</i>
MCT	<i>Marine Current Turbine</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
C_p	<i>Leistungskoeffizient</i>
C_t	<i>Schubkoeffizient</i>
$C_{\text{loss-x}}$	<i>Verlustkoeffizient, x-Komponente</i>
$C_{\text{loss-y}}$	<i>Verlustkoeffizient, y-Komponente</i>
D	<i>Turbinendurchmesser</i>

Zusammenfassung

Der Bosphorus, das Marmarameer und die Dardanellen bilden zusammen das Türkische Meerengensystem (TMS). Der Bosphorus und die Dardanellen, es sind lange, flache und schmale Wasserstraßen, sind die einzigen Verbindungen zwischen dem Mittelmeer und dem Schwarzen Meer. Daher hat das TMS insbesondere für die Anrainerstaaten des Schwarzen Meeres ökologische, ökonomische, soziale und militärische Bedeutung.

Der Bosphorus ist der bedeutendste Bestandteil des türkischen TMS, der das hydrodynamische Verhalten des gesamten Systems mitbestimmt. Daher ist ein fundiertes Verständnis der hydrodynamischen Prozesse im Bosphorus auch von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der regionalen Meeresökosysteme. Darüber hinaus kann uns eine umfassende Kenntnis der im Bosphorus herrschenden Prozesse dabei helfen, die starken Strömungen in der Meerenge zur Energiegewinnung zu nutzen, ohne die Ökosysteme zu schädigen.

Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projekts kontinuierliche Messungen von Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt und Temperatur im Bosphorus mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt, um die Austauschströmungsdynamik in der Meerenge besser zu verstehen sowie um die Genauigkeit des Bosphorus-Zirkulationsmodells zu erhöhen. Über diesen Weg wurden die geschichtete Strömung im Bosphorus, ihr Energiepotenzial und mögliche Umweltauswirkungen von Strömungsturbinen, die in der Praxis die Energie der Strömungen im Kanal nutzen sollen, in Modellszenarien simuliert und bewertet.

Im folgenden Bericht werden Projektaktivitäten und -ergebnisse vorgestellt und Perspektiven für zukünftige Forschung diskutiert.

Einleitung

Die Erzeugung elektrischer Energie aus Meeresströmungen mit Turbinen gehört zu den zukunftsweisenden Lösungen, um der Verschärfung des Klimaproblems infolge Treibhausgasemissionen von Kohle-, Öl- und Gaskraftwerken entgegenzuwirken. Die zur Energiegewinnung bislang am häufigsten untersuchten Meeresströmungen werden durch Gezeitenkräfte angetrieben. Dem gegenüber wurde das Energiepotenzial dichtegetriebener Strömungen bisher unterschätzt. Diese treten in Verbindungsstraßen zwischen Meeren mit unterschiedlichem Salzgehalt und unterschiedlicher Temperatur auf, z.B. in den Strassen von Gibraltar, Sunda, Bab al-Mandab (Golf von Aden) oder am Bosphorus. Dabei werden Strömungsgeschwindigkeiten von saisonal bis zu 2,5 m/s erreicht.

Das vorgestellte Projekt zielte darauf ab, Strategien zur Erschließung des Energiepotenzials solcher Ströme zu entwickeln. Diese Strategien wurden zunächst am Beispiel des Bosphorus zwischen dem Schwarzen Meer und dem Marmarameer konkretisiert und später verallgemeinert, um dann als Modell für Abschätzungen des Energiepotenzials dichtegetriebener Strömungen auch in ähnlichen Meerengen zu dienen.

Vorarbeiten, die wir für das Projekt in Betracht gezogen haben, wurden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern unseres türkischen Kooperationspartners Prof. Dr. Yalcin Yuksel von der Yildiz Universität Istanbul durchgeführt. Sie beziehen sich auf Strömungs- und Sedimenttransportprozesse im Bosphorus, ermittelt durch In-situ-Messungen und auf ein hydraulisch-numerisches (HN)3D-Modell. Die Ergebnisse zeigen Veränderungen in Tiefe und Geschwindigkeit der Strömungsschichten im Bosphorus im Laufe der Zeit (Yuksel et al., 2008; Öztürk et al., 2012; Öztürk, 2013). Nach vorläufigen Schätzungen erreichen Strömungen in Spitzenzeiten Geschwindigkeiten von 2,5 m/s, was einer kinetischen Leistungsdichte von etwa 8 kW/m² entspricht (Yuksel et al., 2008; Öztürk et al., 2017). Der monatlich durchschnittliche Querschnittsenergiefluss in der Nähe des Südeingangs des Bosphorus weist über das Jahr Schwankungen von etwa 5 GW bis 20 GW auf (Öztürk et al., 2017) und kann entlang der Meerenge von Mai bis Juli kumulativ etwa 14.400 GWh erreichen.

Trotz ausreichender vertikaler Modellauflösung mit 50 gleichmäßig verteilten Sigma-Schichten erwies sich die horizontale Modellauflösung von 150 m im vorhergehenden HN-3D-Modell als zu grob, um eine ausreichende Planungsgrundlage für die Nutzung der Energieressourcen zu bieten. Auch die begrenzte Menge an Messdaten zur Definition des Modellantriebs an den offenen Meeresgrenzen des Modells konnte die Veränderungen der hydrodynamischen

Bedingungen entlang der Meerenge nicht hinreichend genau abbilden. Dieses Modell war damit nicht in der Lage, die untere Strömungsschicht im Bosphorus und kurzfristige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, etwa durch Stürme, mit akzeptabler Genauigkeit darzustellen.

Zusammenfassend ergaben sich folgende Defizite im älteren Modell der Yildiz-Universität:

- a. Die räumliche Auflösung war zu gering.
- b. Daten und Definitionen der Antriebsbedingungen an den offenen Seerändern des Modells waren in der Vertikalen zu ungenau.
- c. Die Genauigkeit und Gültigkeit des Modells entsprach nicht dem Stand der Technik und konnte nicht als effizientes Werkzeug für Energiebetrachtungen dienen.
- d. Der Einfluss der Turbinen auf das Strömungsgeschehen wurde im Modell nicht ausreichend berücksichtigt.

Im vorgestellten Projekt wurden in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Yildiz-Universität (Istanbul) Messungen und Softwareentwicklung zur Verbesserung relevanter Modelle durchgeführt. Im Zielgebiet wurde eine von FTZ neu entwickelte Langzeit-Messstation betrieben, um in der gesamten Wassertiefe Zeitreihen wasserphysikalischer Parameter zu erfassen, die zur Steuerung eines verbesserten HN-3D-Modells dienen. Modellsimulationen wurden durchgeführt, um Energie-Hotspots in Strömungsfeldern zu identifizieren und die Dichteschichtung sowie die Varianz in der Tiefe und Intensität der Strömungen zu bestimmen. Energiepotentiale wurden aus diesen Simulationen berechnet. In das verbesserte HN-3D-Modell wurden virtuelle Turbinen eingesetzt, die Effizienz ihrer Anordnung getestet sowie Umwelteinflüsse simuliert und analysiert.

Ziel des Projekts war es, durch die Entwicklung neuer Werkzeuge und Methoden a) zur Erschließung des Energiepotenzials dichtegetriebener Ströme sowie b) einer begleitenden Umweltanalyse eine emissionsfreie Alternative zur Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen aufzuzeigen und mit deren Umsetzung zur Entlastung von Klima und Umwelt beizutragen. Darüber hinaus konnten mögliche negative Auswirkungen der Aufstellung und des Betriebs von Strömungsturbinen auf die Meeresumwelt untersucht und bewertet werden.

Projektaktivitäten

Im Folgenden werden Projektaktivitäten Schritt für Schritt erläutert und besprochen.

Erkundung und Zusammenstellung von Daten und Modellen

Daten zur Bathymetrie (Topografie des Meeresgrunds) im Bosphorus und den angrenzenden Meeren, zur Meteorologie, zu Wasserständen, Strömungen, Salzgehalt und Temperatur wurden von unseren türkischen Projektpartnern bereitgestellt (Tabelle 1). Diese Daten wurden in der Vergangenheit von ihnen umfassend genutzt, um die treibenden Kräfte der Bosphorus-Austauschströmung zu analysieren (Yuksel et al., 2008), die Strömungsbedingungen in der Meerenge für weitere räumlich-zeitliche Analysen zu simulieren (Özturk et al., 2012; Özturk, 2013) und die aktuellen Geschwindigkeiten vorherzusagen (Aydogan et al., 2010). Im Rahmen unseres Projekts wurden die Daten verwendet, um das Potenzial an erneuerbaren Energien aus Strömungen im Bosphorus zu analysieren und Ad-hoc-Simulationen zu erstellen (Altas et al., 2023).

Tabelle 1. Von den türkischen Projektpartnern bereitgestellte Messungen (Yuksel et al., 2008).

Stations	Measurement period		Measured characteristics	Measuring interval	Locations	Remarks
	Start	End				
St. A	24.09.04	03.01.06	Current speed, directions (ADCP)	Hour	41°05'26.7"N, 28°59'20.9"E	There is no measurement between 13.11.04 and 04.12.04
St. B	24.09.04	03.01.06	Current speed, directions (ADCP)	Hour	41°00'52.4"N, 28°59'53.6"E	
St. C	24.09.04	03.01.06	Current speed, directions (ADCP)	Hour	41°01'35.1"N, 29°00'30.1"E	
St. D	25.09.04	05.01.06	Water level	Hour	41°01'31.4"N, 29°00'30.3"E	
St. E	22.09.04	05.01.06	Water level	Hour	41°12'13"N, 29°05'54"E	
St. F	18.11.04	04.01.06	Wind speed, directions, air pressure	10 min	41°00'32.2"N, 29°00'07.2"E	
St. G	19.11.04	05.01.06	Wind speed, directions, air pressure	10 min	41°24"N, 29°6"E	
St. K ₀	09.04	09.05	Salinity	Monthly	41°13.50'N, 29°08.00'E	
St. M ₈	09.04	09.05	Salinity	Monthly	40°56.40'N, 28°55.66'E	ISKI (2004, 2005)

Die türkischen Partner stellten auch das HN-3D-Modell des Bosphorus zur Verfügung, das sie entwickelt und in mehreren Forschungsprojekten verwendet haben. Das bereitgestellte Modell wurde als „Benchmark-Modell“ für die Entwicklung des detaillierteren HN-3D-Modells in unserem Projekt verwendet. Die aus der Modellierungsarbeit der türkischen Partner gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten es uns, die Defizite des (älteren) initialen Modells zu verbessern und den Prototyp eines Modells für die Energieforschung zu entwickeln, mit dem auch mithilfe von

HPC-Tools die erforderlichen Simulationen durchgeführt werden können. Sowohl die Daten als auch das Modell werden derzeit auf FTZ-Servern der Universität Kiel gespeichert.

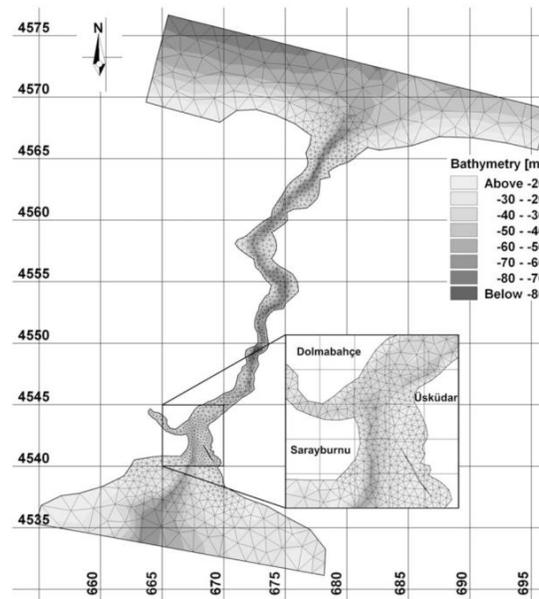


Abbildung 1. Von den türkischen Projektpartnern entwickeltes HN-3D-Modell (Öztürk et al., 2012).

Einrichten der Messstationen im Zielgebiet und Naturmessungen

Am südlichen Ende des Bosphorus wurde eine Messstation eingerichtet, um Luftdruck und -temperatur, Wasserspiegelhöhen, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalt und Wassertemperatur zu messen. Die türkischen Projektpartner haben uns bei der Beantragung der erforderlichen Genehmigungen bei den türkischen Behörden sowie beim Auf- und Abbau der Messinstrumente unterstützt.



Abbildung 2. Standort der Messstation.



Abbildung 3. Einsetzen der Messstation.

Der Standort der Messstation ist in Abbildung 2 zu sehen, die Installationsschritte sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Station wurde an einer Position mit 35 m Tiefe lokalisiert (Abbildung 4) und konnte einen umfassenden Datensatz zum besseren Verständnis der Eigenschaften der dichtegetriebenen Bosphorusströmungen liefern.

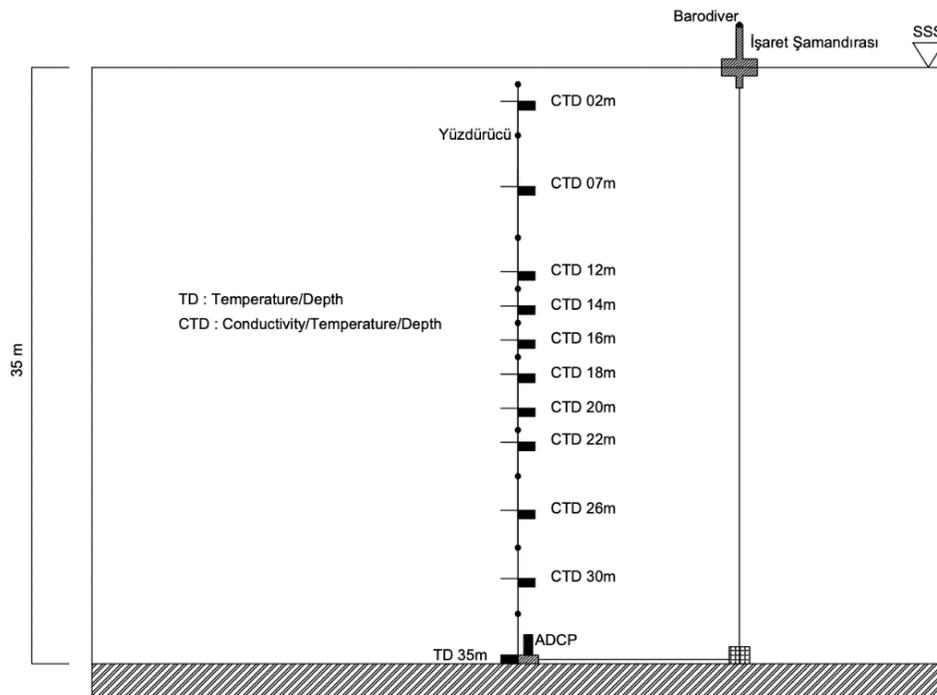


Abbildung 4. Konfiguration der Messstation.

Ein stationär am Meeresboden verankertes 600-kHz-ADCP wurde verwendet, um Strömungsgeschwindigkeiten in 3D über den gesamten Wasserkörper mit einer vertikalen Auflösung von 1 m (Abbildung 5) sowie Wasserstände (Abbildung 6) zu profilieren. Ergänzende Daten zum Wasserstand wurden von den in Istanbul installierten Online-Radargeräten herangezogen (UNESCO, 2022). Das ADCP zeichnete in 10-Minuten-Intervallen ausgewählte Parameter auf. Zehn entlang der Wassersäule verteilte CTD-Sensoren zeichneten im 5-Minuten-Intervall Leitfähigkeits-, Temperatur- und Tiefenwerte auf (Abbildung 7). Die Tiefen der CTD-Sensoren wurden so ausgewählt, dass die Dynamik der oberen Schicht, der unteren Schicht und der Grenzschicht zwischen ihnen effizient beobachtet werden konnte. Während die Messungen aus 6 m Tiefe unter der freien Oberfläche den Salzgehalt und die Temperatur der oberen Fließschicht anzeigen, zeigen Messungen zwischen 12 und 22 m die Vermischungen in der Grenzschicht; die an noch tieferen Punkten der Wassersäule aufgezeichneten Werte beschreiben die untere Fließschicht. Darüber hinaus wurden Luftdruck- und Temperaturdaten in 5-Minuten-Messintervallen mit einem barometrischen Sensor erfasst, der an der Festmacheboje angebracht war, die den Einsatzort der Instrumente markierte (Abbildung 8).

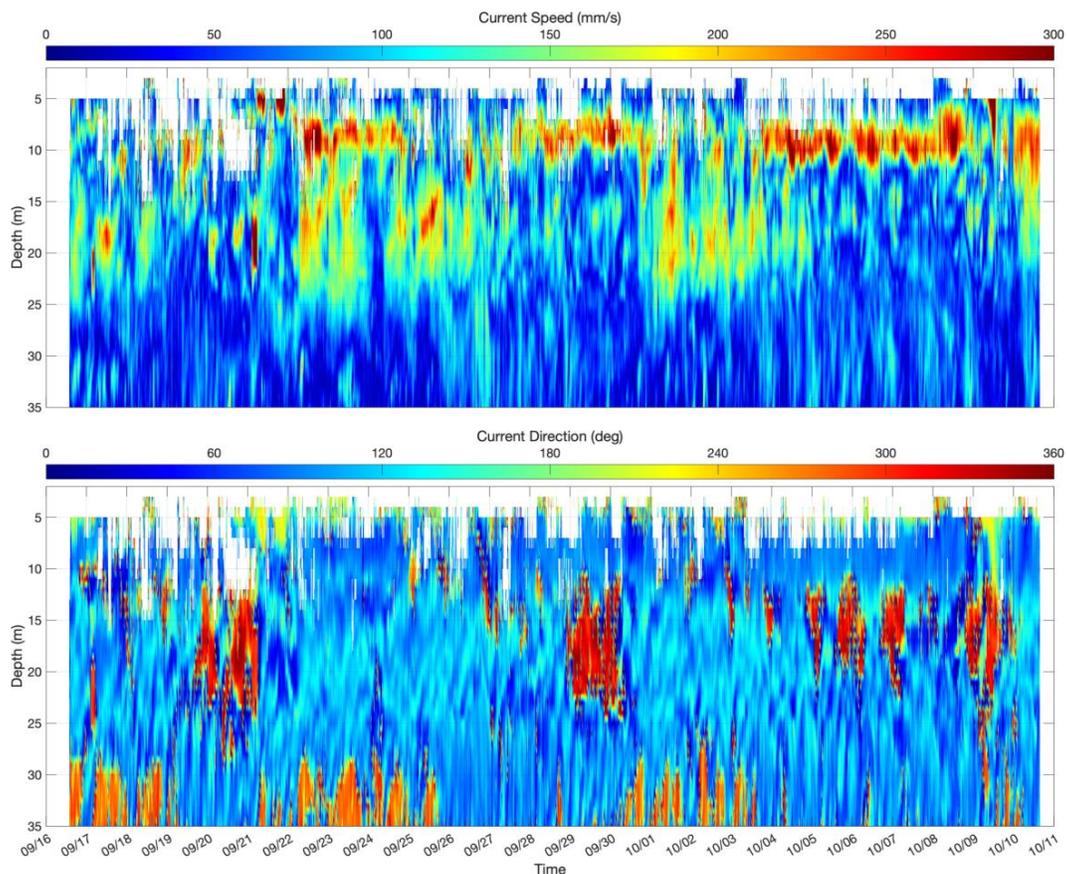


Abbildung 5. Von der Messstation erfasste aktuelle Strömungsgeschwindigkeit (oben) und Strömungsrichtung (unten).

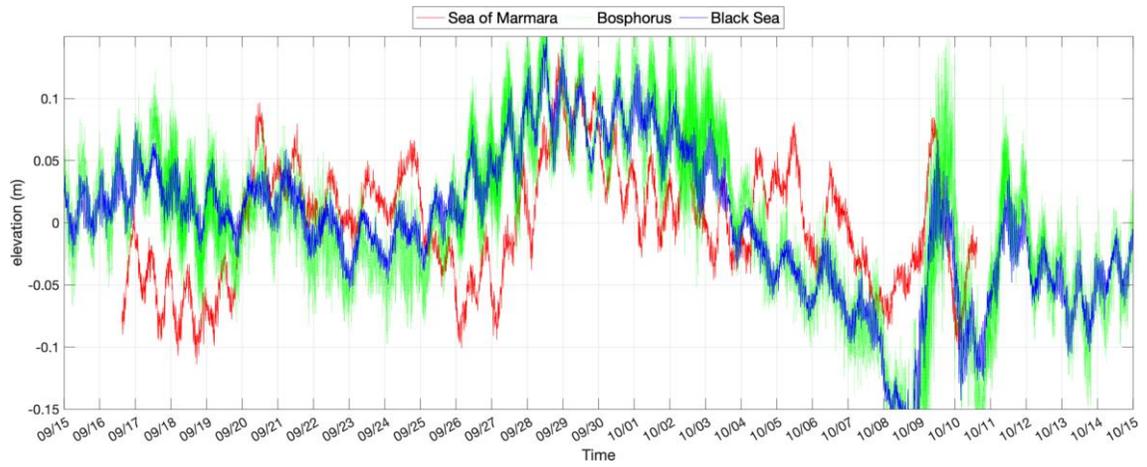


Abbildung 6. Wasserstandshöhen von der Messstation und den Online-Radargeräten in Istanbul.

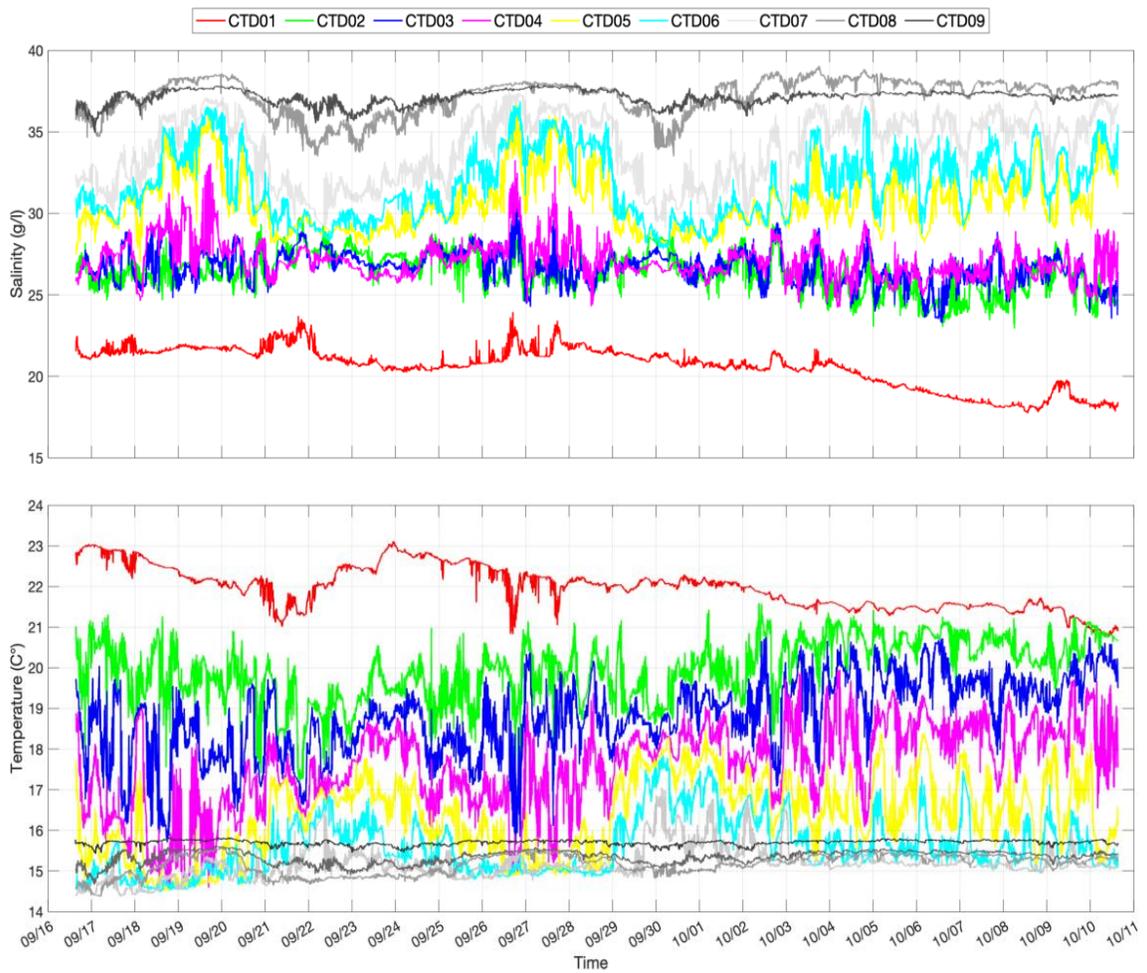


Abbildung 7. Von der Messstation erfasste Salzgehalt- und Temperaturdaten.

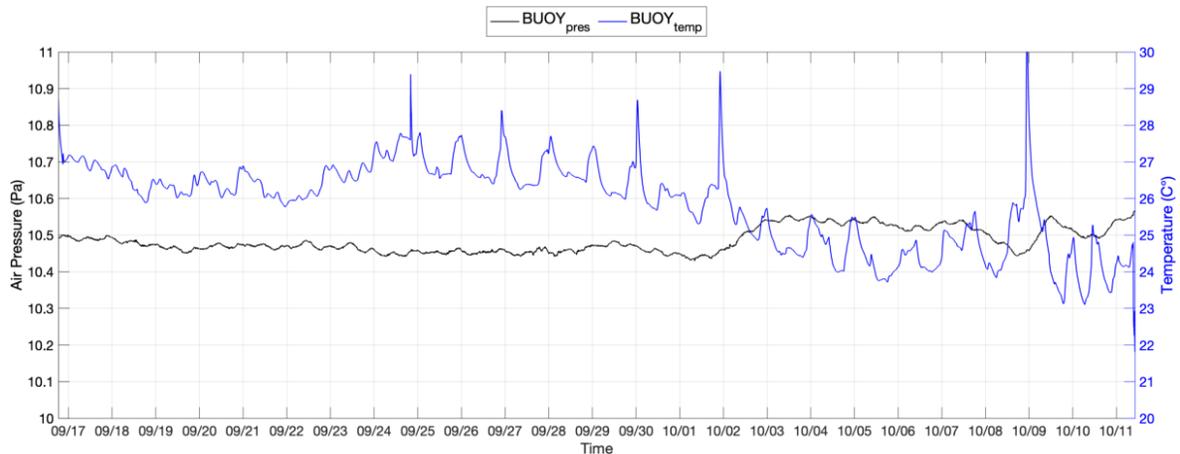


Abbildung 8. Von der Messstation erfasste Luftdruck- und Temperaturmessungen.

Die Messungen zeigen Charakteristika einer zweischichtigen Strömungsstruktur. Der Salzgehalt der oberen Strömungsschicht liegt zwischen 17 und 23 ppt, während der Salzgehalt der unteren Strömungsschicht weit höher etwa 37 bis 38 ppt beträgt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Temperaturwerte beginnen bei 23 °C in der Nähe der freien Oberfläche und nehmen allmählich bis auf 14 °C am Grund ab. Die Schwankungen der Salzgehalts- und Temperaturwerte deuten darauf hin, dass in der Grenzschicht ein erhebliches Maß an Durchmischung stattfindet. Darüber hinaus scheint die Strömung in der oberen Schicht dynamischer zu sein als in der unteren Schicht (siehe Abbildungen 5 und 7). Die Strömungsgeschwindigkeiten erreichen ihr Maximum nahe der freien Oberfläche. Die Strömungsgeschwindigkeitsverteilung entlang der Tiefe variiert in Abhängigkeit von meteorologischen und hydrologischen Effekten.

Die gesammelten Daten wurden auch verwendet, um die treibenden Kräfte des Bosphorus-Zirkulationsmodells besser zu verstehen und zu definieren sowie als Grundlage für die Modellkalibrierung (Altas et al., 2023). Unsere Ziele, die Eigenschaften der Bosphorusströmungen besser zu verstehen und die zuvor lediglich in monatlichen Intervallen definierten Transportrandbedingungen des HN-3D-Modells (Salzgehalt und Temperatur) durch unsere durchgehenden Messungen besser definieren zu können, wurden damit erreicht.

Optimierung des HN-3D-Strömungsmodells

Um die horizontale Auflösung des Modells der türkischen Projektpartner zu verbessern und ohne dabei die Rechenzeit zu erhöhen, wurde die entwickelte Modellanordnung auf das Delft3D Modellierungssystem (Deltares, Niederlande) übertragen, welches besser für Hochleistungsberechnungen geeignet ist. Durch die Nutzung der Delft3D MPI-Funktion konnten

Simulationen auf FTZ-Servern parallel und mit ausreichender Detailgenauigkeit durchgeführt werden, ohne dass es zu einer Verlängerung der Rechenzeiten kam.

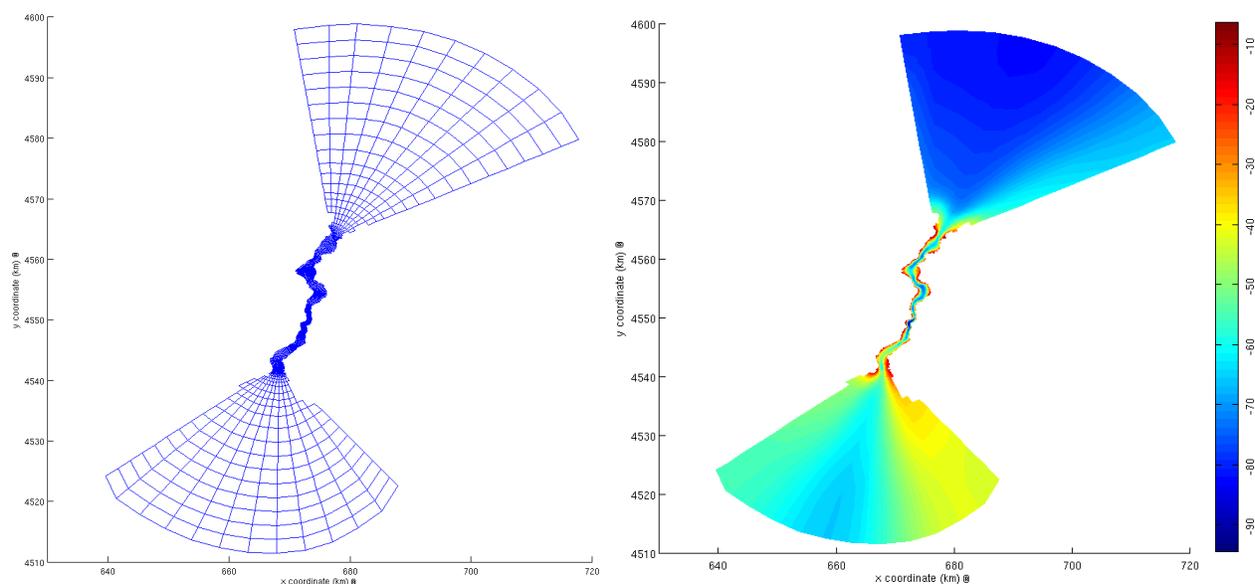


Abbildung 9. Gitter und Bathymetrie des überarbeiteten HN-3D-Modells.

Das Modellgitter wurde mit einer maximalen horizontalen Auflösung von 40 m erstellt, was einer Verdreifachung der Detailgenauigkeit des Vorgängermodells entspricht. Das Modell sagt die Strömungsbedingungen im Zielbereich für 45 vertikale Schichten vorher, was eine präzisere Einbindung der MCTs in das Modell ermöglicht (Chen et al., 2014). Aktuelle bathymetrische Informationen für den Bosphorus wurden vom Büro für Navigation, Hydrographie und Ozeanographie des türkischen Seestreitkräftekommandos eingeholt. Das HLES-Modul wurde angewendet, um 2D-Turbulenzen und horizontale Wirbelstrukturen einzubeziehen bzw. aufzulösen (Koşucu et al., 2019). Das k - ϵ -Turbulenzmodell wurde verwendet, um die Auswirkungen der 3D-Dissipation turbulenter kinetischer Energie einzubeziehen (Orhan & Mayerle, 2017; Orhan & Mayerle, 2020). Die Strömungsbedingungen an den offenen Grenzen wurden anhand von Wasserstandsmessungen und die Transportbedingungen anhand von Salzgehalts- und Temperaturmessungen definiert. Für die meteorologischen Bedingungen wurden Daten aus der Datenbank des ECMWF (Hersbach et al., 2020) verwendet.

Die Modellleistung wurde durch Strömungsgeschwindigkeitsvergleiche nachgewiesen und als ausreichend gut bewertet (siehe Abbildung 10).

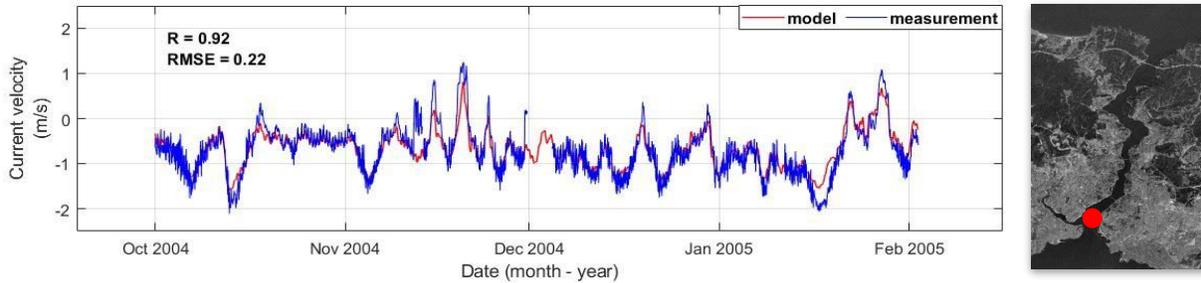


Abbildung 10. Vergleich der aktuellen Messungen und der vom überarbeiteten HN-3D-Modell simulierten Strömungen. Der rote Punkt zeigt den Ort der zum Vergleich verwendeten stationären ADCP-Messungen an.

Langzeit-Modellsimulationen der Strömungsbedingungen

Die Strömungsbedingungen im Bosphorus wurden für den Zeitraum eines Jahres und in Abwesenheit von Turbinen simuliert. In Abbildung 11 sind die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten für die Orte dargestellt, an denen die Strömungen in der oberen und unteren Schicht eine hohe hydrokinetische Dichte aufweisen. Es ist zu erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in beiden Strömungsschichten den Schwellenwert von 1 m/s überschreiten, bei dem die MCTs trotz starker saisonaler Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeiten über längere Zeiträume in Betrieb bleiben können. Abbildung 12 visualisiert die räumliche Verteilung der jährlichen Durchschnittsströmungsgeschwindigkeiten, die für 1 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m und 50 m unter der freien Meeresoberfläche simuliert wurden. Die Ergebnisse deuten auf hochenergetische Strömungen hin, insbesondere in den ersten 15 m unter der Oberfläche. Hier liegt nahe, die hydrokinetische Energie der Strömungen im Bosphorus besonders über schwimmende MCTs zu nutzen, die nahe der Wasseroberfläche verankert sind und auf die Schwingungen an der Oberfläche (Seegang) flexibel reagieren können (Sanchez et al., 2014).

Weitere Analysen zeigten, dass die MCTs, die in der energiereicheren oberen Strömungsschicht eingesetzt würden, das ganze Jahr über mehr als 60 % der Zeit aktiv bleiben und Strom in das lokale Stromnetz einspeisen könnten (Abbildung 13). Die für die MCTs berechnete Aktivitätsrate ist vergleichbar mit der von Gezeitenkanälen, in denen die Stromproduktion aufgrund von Phänomenen wie Windstille und Nipptiden, die zu deutlich geringeren Strömungsgeschwindigkeiten führen, intermittierend ist.

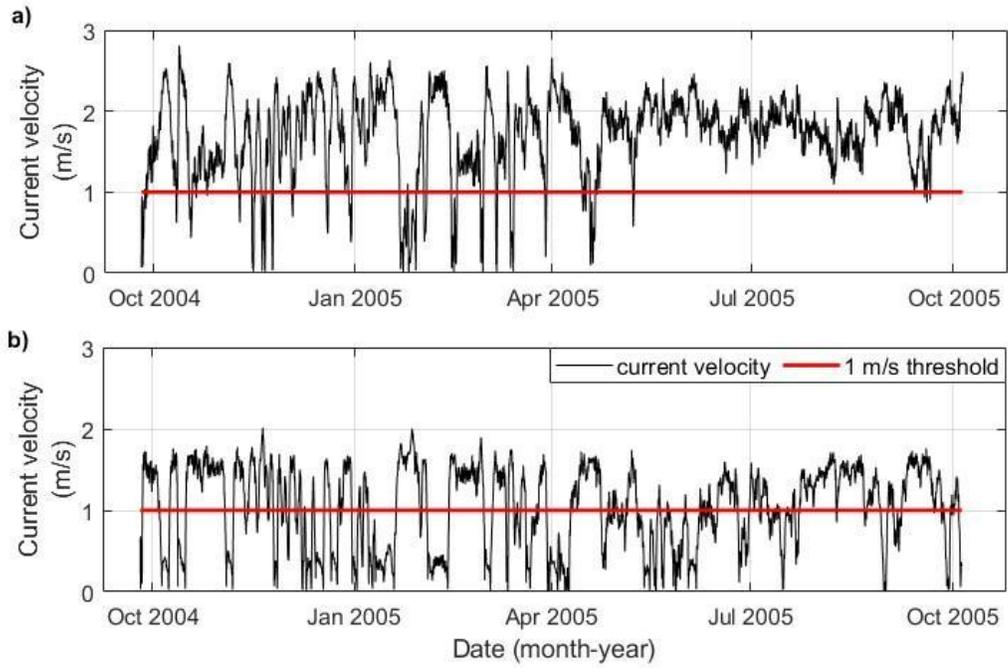


Abbildung 11. Simulierte Strömungen für a) die obere und b) die untere Strömungsschicht über ein Jahr.

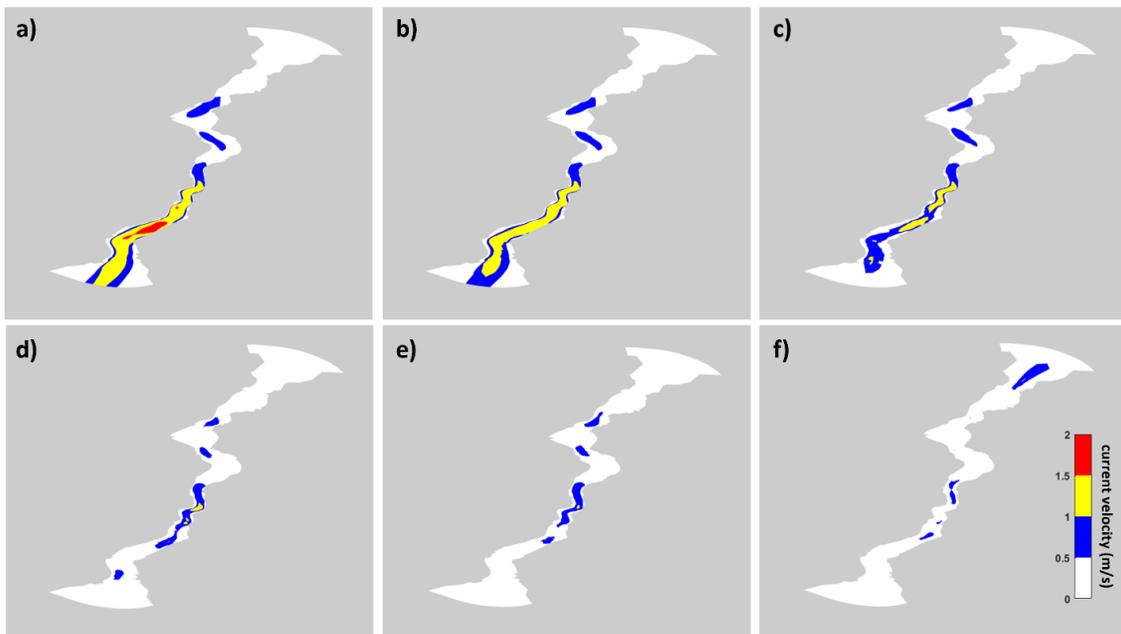


Abbildung 12. Jährliche durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeiten in Wassertiefen von a) 1 m b) 5 m c) 10 m d) 15 m e) 20 m f) 50 m.

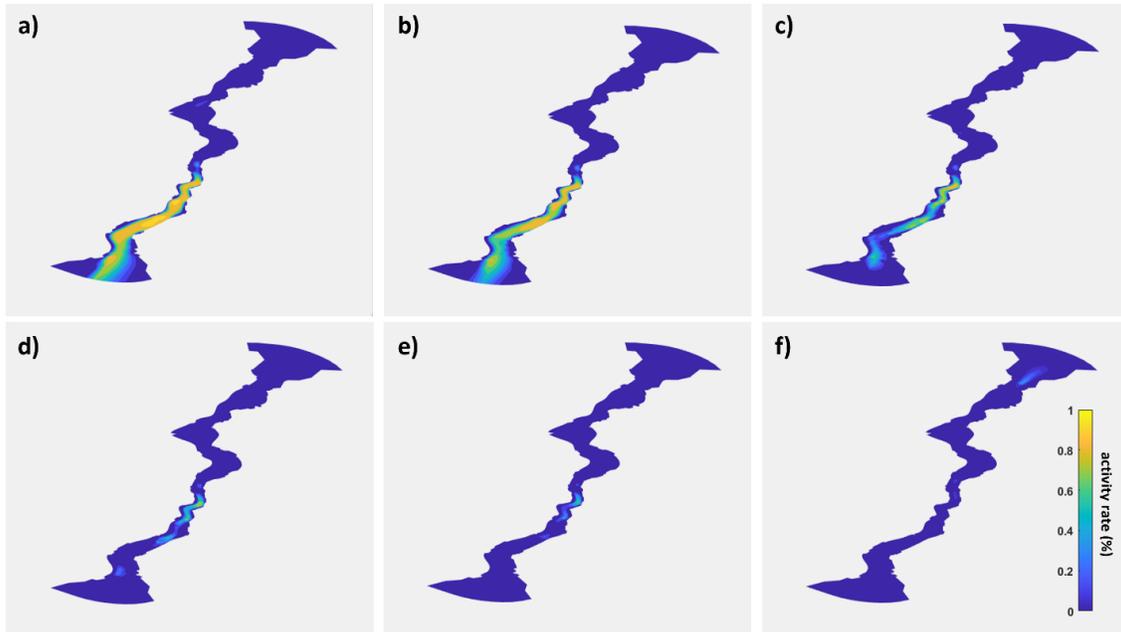


Abbildung 13. Aktivitätsraten der Turbinen in Wassertiefen von a) 1m b) 5m c) 10m d) 15m e) 20m f) 50 m.

Im Modell gelang es auch, die dreischichtige Struktur der Strömungen sowie die internen Wellen in der Meerenge zu erfassen, welche durch hydrologische und meteorologische Kräfte sowie Dichtegradienten angetrieben werden. Abbildung 14 zeigt als Beispiel die Veränderungen im Wasserkörper über einen 1-monatigen Zeitraum. Daraus abgeleitete Erkenntnisse zu Schichtung und internen Wellen deuten darauf hin, dass für Bereiche wie den Bosphorus die Bewertung der Standorteignung und die Optimierung von MCT-Arrays sowohl für die vertikale als auch für die horizontale Ebene erfolgen müssen. Dies steht im Gegensatz zu Gezeitenkanälen, in denen Strömungsschichtungen weitaus weniger bedeutsam sind.

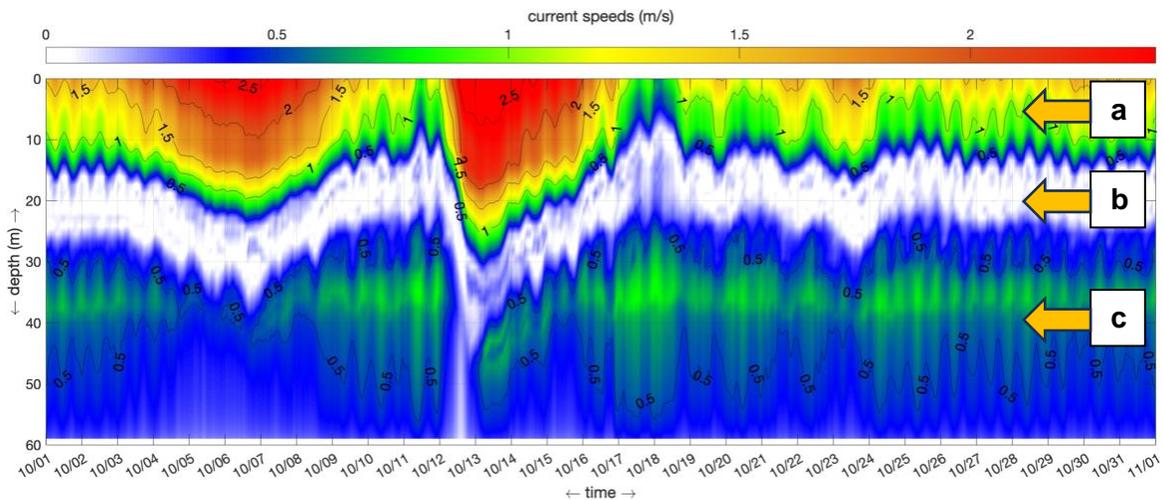


Abbildung 14. Simulierte (a) obere Schicht (b) Grenzschicht (c) untere Schicht des Wasserkörpers.

Einpflegen virtueller Turbinen ins HN-3D-Modell und Simulationen

Die Wechselwirkung zwischen den Turbinen und den Strömungen wurde mit dem Actuator-Disc-Ansatz simuliert, wobei sowohl schwimmende als auch am Meeresboden befestigte Turbinen mit unterschiedlichen Durchmessern und Array-Konfigurationen berücksichtigt wurden (Ramos et al., 2019). Die Turbinen wurden anhand der Eigenschaften kommerziell erhältlicher Geräte modelliert. Basierend auf der Auswertung der Standorteignung und den simulierten Schichtentiefen für die obere und untere Fließschicht wurden Turbinen mit 5 m und 10 m Durchmesser (D) für die Nutzung erneuerbaren Stroms aus der oberen Fließschicht und Turbinen mit 5 m Durchmesser für die untere Fließschicht in Betracht gezogen. Abbildung 15 zeigt den Standort der in den Simulationen berücksichtigten Turbinen. Unter Berücksichtigung von verschiedenen Wirkungsgraden von Turbinenkomponenten wurde der Leistungskoeffizient der Geräte (C_p) mit 0,41 angenommen und dementsprechend der Schubkoeffizient (C_t) mit 0,8 gewählt (Orhan & Mayerle, 2020). Die Verlustkoeffizienten für die Actuator-Discs (C_{loss-x} , C_{loss-y}) wurden aus dem Schubkoeffizienten abgeleitet.

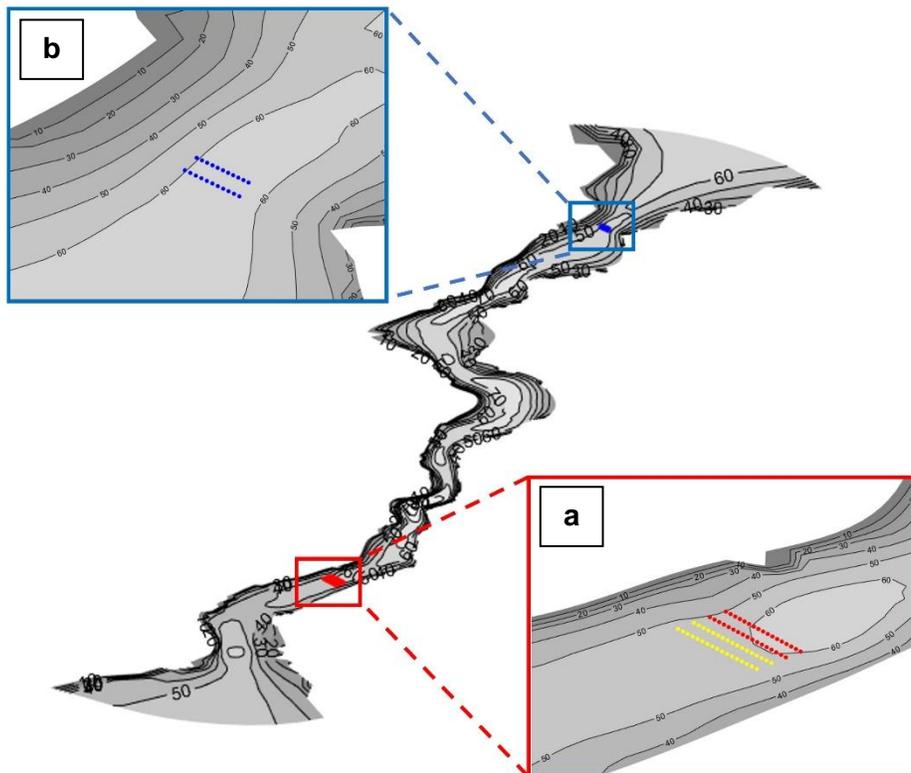


Abbildung 15. In den Simulationen berücksichtigte Turbinenstandorte a) für die obere Schicht (10 m) und b) für die untere Schicht (55 m). Der stromabwärtige Abstand zwischen den Turbinen beträgt $10 \times D$ und der seitliche Abstand beträgt $2,5 \times D$.

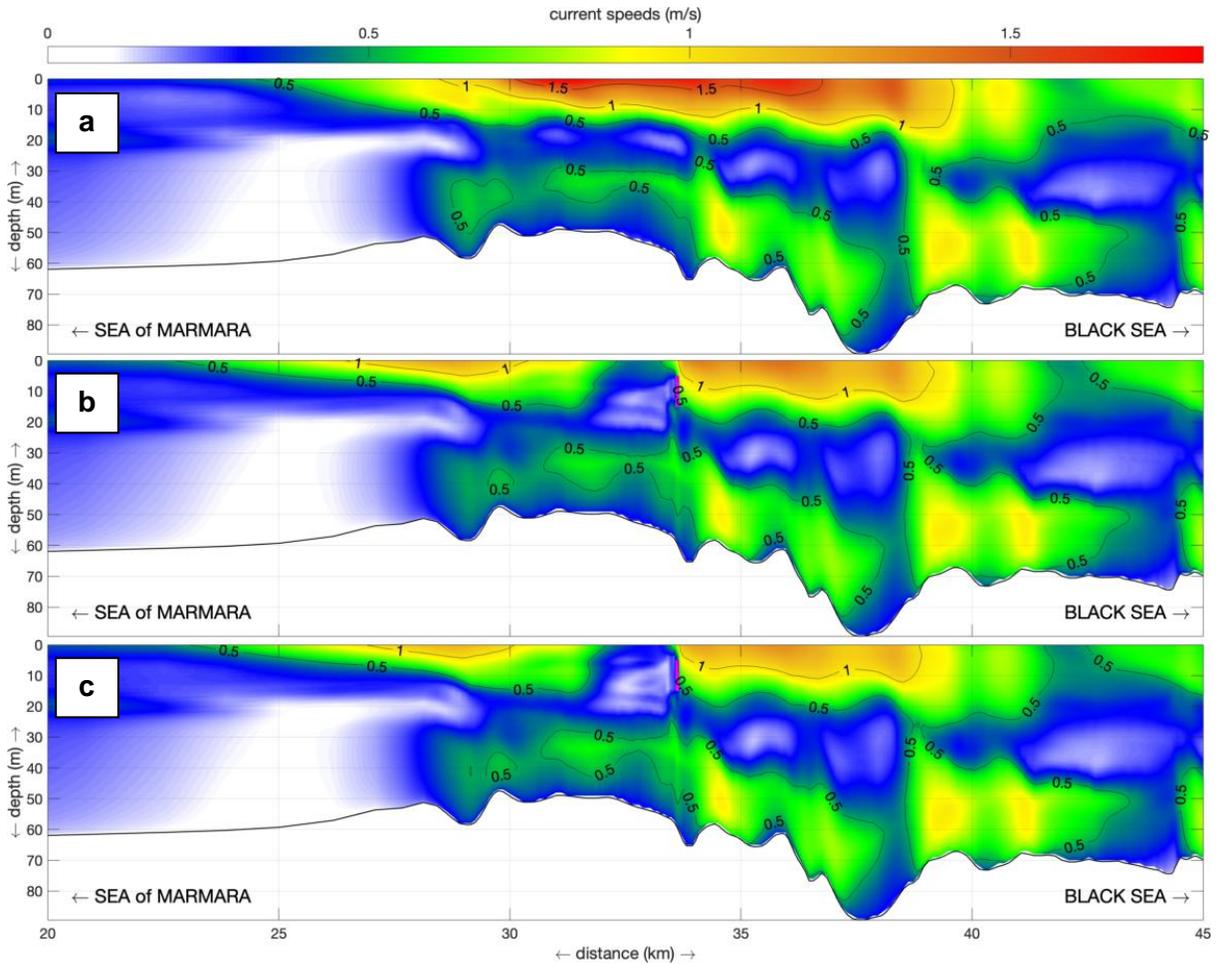


Abbildung 16. Strömungsbedingungen an der oberen Fließschicht a) ungestört b) mit MCTs mit 5 m Durchmesser c) mit MCTs mit 10 m Durchmesser. Magentafarbene Linien zeigen die Standorte der Turbinenfelder an.

Die hydrodynamischen Auswirkungen der MCT-Arrays mit unterschiedlichen Konfigurationen wurden für ein Jahr simuliert und die daraus resultierenden Änderungen im Strömungsfeld stellten sich wie folgt dar: Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Einflüsse beispielhafter Turbinenanordnungen auf die Strömungen in der oberen und unteren Schicht. Während Abbildung 16a die Strömungen rund um das südliche Ende des Bosphorus im ungestörten Zustand zeigt, zeigen Abbildung 16b und 16c den Einfluss von Turbinen mit 5 m bzw. 10 m Durchmesser, die den oberen Teil des Kanalquerschnitts einnehmen. Während Abbildung 17a die ungestörte Austauschströmung am nördlichen Ende des Kanals zeigt, zeigt Abbildung 17b den Einfluss von Turbinen mit 5 m Durchmesser, die den unteren Teil des Kanalquerschnitts einnehmen. Die Verlangsamung von Strömungsgeschwindigkeit durch eingebaute Turbinen ist klar erkennbar.

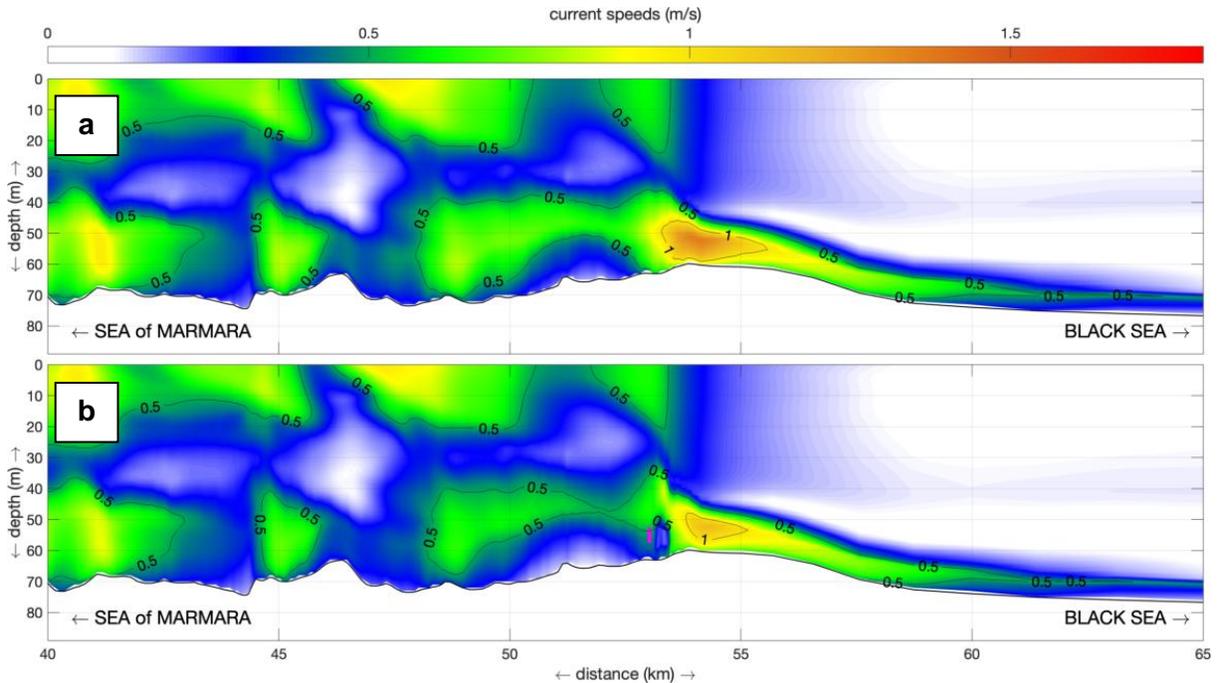


Abbildung 17. Strömungsbedingungen in der unteren Strömungsschicht (a) ungestört (b) mit MCTs mit 5 m Durchmesser. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.

Im Modell zeigt sich, dass die Turbinen Veränderungen von Wasserständen verursachen, wenn sie nahe der freien Oberfläche eingesetzt werden. Abbildung 18 veranschaulicht die Unterschiede in der Wasserspiegelhöhe durch den Einfluss schwimmender Turbinenanlagen. Es ist ersichtlich, dass eine Turbinen-Anordnung, die den Strömungsquerschnitt zu einem großen Teil einnimmt, zwar zu einer erheblichen Änderung des Wasserstands und der Strömungsstruktur führt. Eine Erweiterung der Anordnung ist im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Hydrodynamik jedoch weniger bedeutsam.

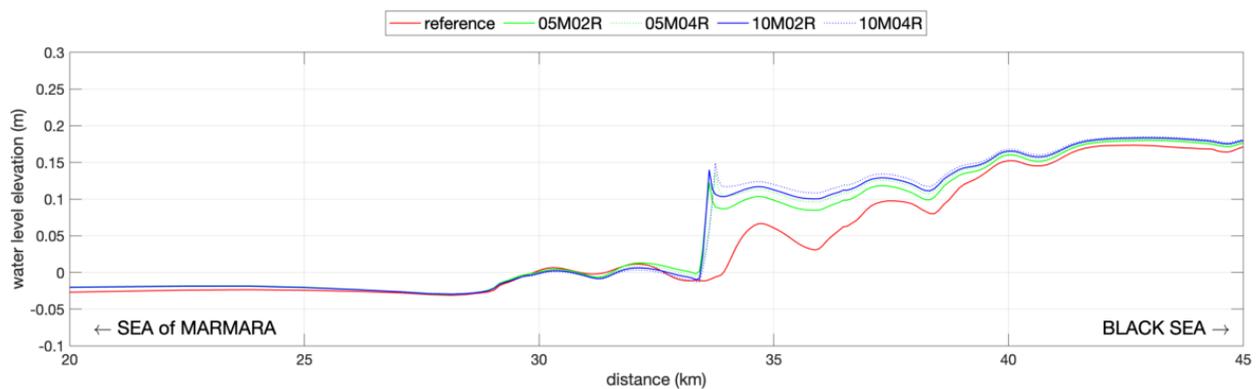


Abbildung 18. Einfluss der MCT-Arrays mit unterschiedlichen Konfigurationen auf den Wasserstand.

Erkenntnisse über den Einfluss der Turbinen auf die Strömungsbedingungen in Kombination mit der weiter oben bereitgestellten Bewertung der Standorteignung zeigen, dass der Bosphorus über hochenergetische Strömungen verfügt, die für den Einsatz von Turbinen mit Durchmessern von bis zu 10 m geeignet sind. Die Array-Standorte und das Ausmaß, in welchem die Turbinen den ohnehin schon schmalen Kanalquerschnitt einnehmen, könnten jedoch große Auswirkungen auf die Strömungsstruktur haben. Mögliche Auswirkungen auf die Umwelt werden weiter unten erörtert.

Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass hochmoderne MCTs über längere Zeiträume am Bosphorus kontinuierlich nahe ihrer Nennkapazität (ca. 1 MW) arbeiten könnten. Obwohl es – vor allem aufgrund der Einschränkungen im Zusammenhang mit der Tiefe der Strömungsschichten – schwierig ist, das volle Potenzial der von Öztürk et al. (2017) aufgezeigten kontinuierlichen, energiereichen Bosphorus-Strömungen auszuschöpfen, kann die Nutzung der hydrokinetischen Energie dieser Strömungen das Energieportfolio von Istanbul erheblich diversifizieren. Es zeigt sich, dass Teile des Kanals durchaus für den Einsatz großräumiger Arrays von Turbinen geeignet sind, welche große Mengen an Energie für das Hauptnetz generieren könnten. In der Nähe von Endnutzern (z.B. Häfen, Industriegebiete, öffentliche Verkehrsmittel usw.) sind zumindest kleinräumigere Anordnungen für den lokalen Strombedarf machbar. Derzeit konzipieren wir ein Forschungsprojekt zur Optimierung der Netzleistung aus erneuerbaren marinen Energieressourcen sowie einen Smart-Grid-Ansatz für die Zuteilung dieser Energie.

Zusammenstellung der Umweltdaten und Risikoeinschätzung

Während MCTs die umgebende Meeresumwelt auf verschiedene Weise beeinflussen können, beispielsweise durch Unterwasserlärm, Lichtemissionen und die Emission fremder Substanzen wie Öl und/oder Schmierstoffe (Orhan et al., 2015), erweisen sich diese Einflüsse in einem dicht besiedelten und stark genutzten Gebiet wie dem Bosphorus als weniger relevant als der durch die Turbinen verursachte Barriereeffekt und die daraus resultierende Änderung der Zirkulationsdynamik. Daher wurde dem Barriereeffekt hier große Aufmerksamkeit gewidmet, die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert. Geschwindigkeitsdefizite, die durch die Entnahme der hydrokinetischen Energie aus den oberen und unteren Strömungsschichten verursacht würden, sind in Abbildung 19 bzw. Abbildung 20 dargestellt. Der Einfluss der Leistungsentnahme auf der horizontalen Ebene in 10 m Tiefe ist in Abbildung 21 dargestellt.

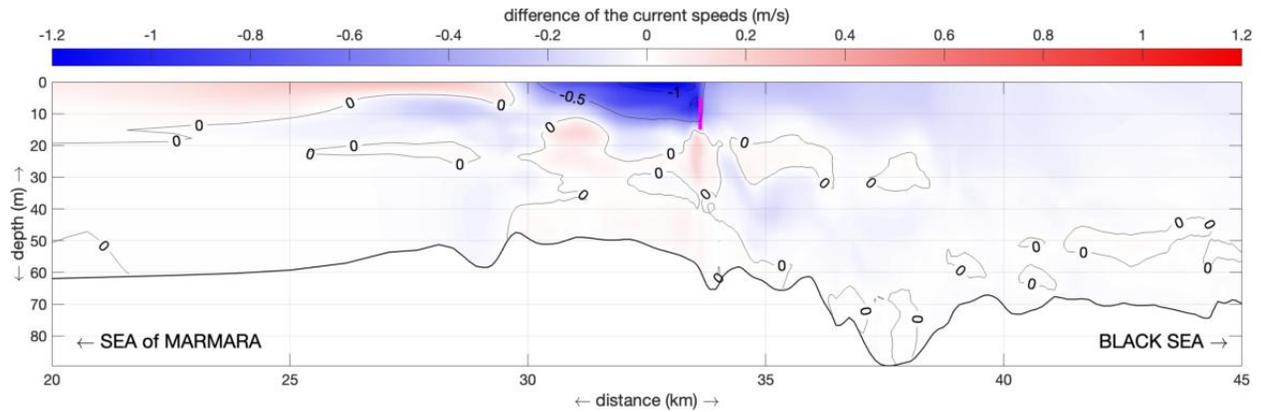


Abbildung 19. Der Unterschied in den Strömungsgeschwindigkeiten der oberen Schicht. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.

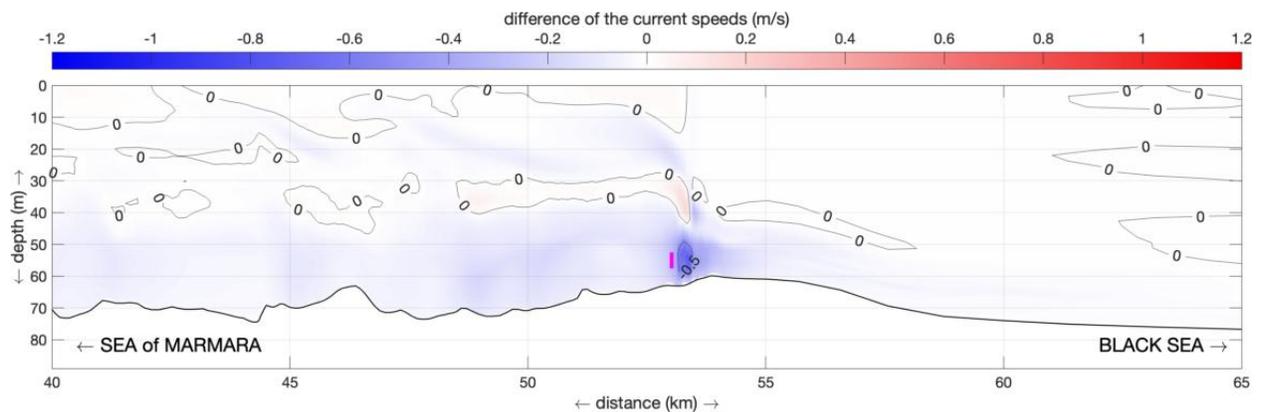


Abbildung 20. Der Unterschied in den Strömungsgeschwindigkeiten der unteren Schichten. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.

Das für die obere Schicht betrachtete Array besteht aus 34 MCTs in 10 m Tiefe. 22 MCTs in 55 m Tiefe sollen der unteren Schicht hydrokinetische Energie entziehen (siehe Abbildung 15). In beiden Szenarien werden Turbinen mit 5 m Durchmesser eingesetzt. Sie werden anhand der Abstandskriterien von Orhan und Mayerle (2020) platziert. Nahezu der gesamte Strömungsquerschnitt wird genutzt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass solche Arrays erhebliche Geschwindigkeitsdefizite in den entsprechenden Strömungsschichten verursachen würden. Während Turbinen in der oberen Strömungsschicht das Momentum der Einströmung, das den Süßwasserzufluss vom Schwarzen Meer zum Marmarameer vorantreibt, weitgehend ableiten würden, würden die Turbinen in der unteren Strömungsschicht die dichtebedingten Strömungen in entgegengesetzter Richtung verlangsamen. Die durch die Turbinenanordnungen verursachte turbulente kinetische Energiedissipation würde die Struktur der zweischichtigen Strömung sowie die Dynamik der Mischung zwischen den Schichten verändern.

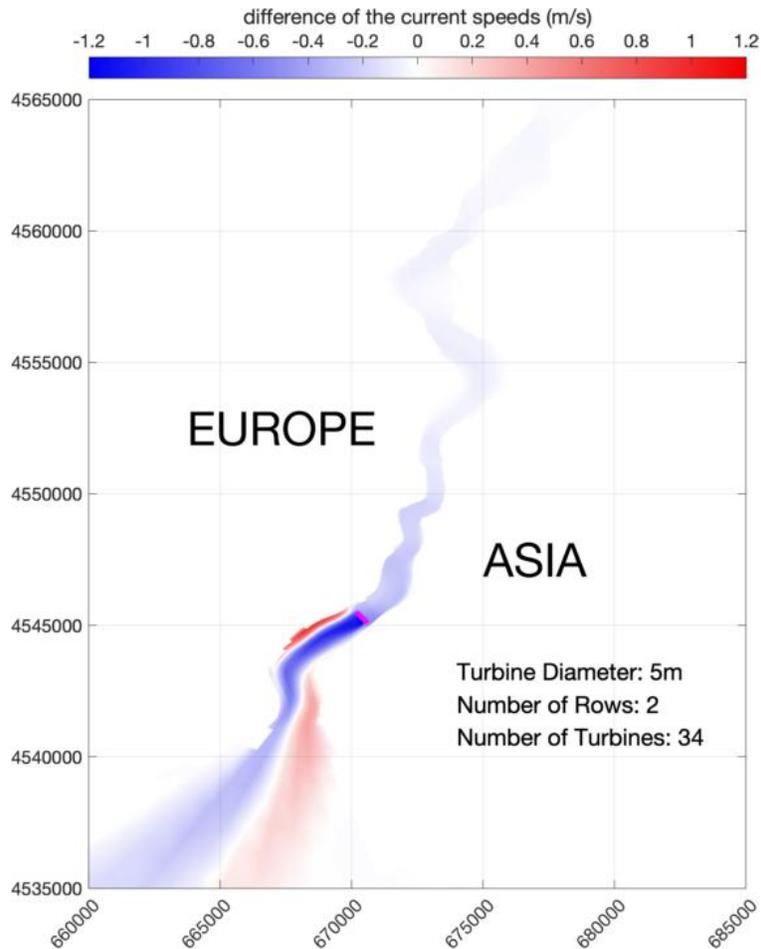


Abbildung 21. Einfluss der MCTs auf das Strömungsfeld in 10 m Tiefe. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.

Darüber hinaus hätten die am Boden befestigten Turbinen in der unteren Strömungsschicht zwar keinen großen Einfluss auf die Ufer des Bosphorus, die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die schwimmenden Turbinen in Oberflächennähe die Strömungsgeschwindigkeiten an der Küste verstärken könnten. Dieses Phänomen könnte zu Küstenerosion und Navigationsproblemen führen, vor allem für die Fähren und kleinen Boote, die einen Großteil des öffentlichen Verkehrsnetzes der Stadt ausmachen. Daher sollten bei der Planung eines MCT-Arrays am Bosphorus die Geometrie der Meerenge, der Standort des Arrays, die Größe des Arrays und konkurrierende Aktivitäten an der Küste wie Tourismus und Transport berücksichtigt werden.

Die Abbildungen 22 und 23 vermitteln ein detaillierteres Bild der durch die Turbinen veränderten Mischungsbedingungen. Abbildung 22a zeigt die Schichtung im Kanal ohne Turbinen. Abbildung 22b zeigt, wie die Schichtung durch das in der oberen Strömungsschicht eingesetzte Turbinenfeld beeinflusst würde. Es ist zu erkennen, dass die Schichtbildung durch die turbulente

Durchmischung, die durch das eingesetzte Turbinenfeld verursacht würde, verändert würde. Während die Strömung der oberen Schicht durch die Turbinen unterbrochen würde, nähme die Tiefe der unteren Strömungsschicht stromabwärts des Arrays zu.

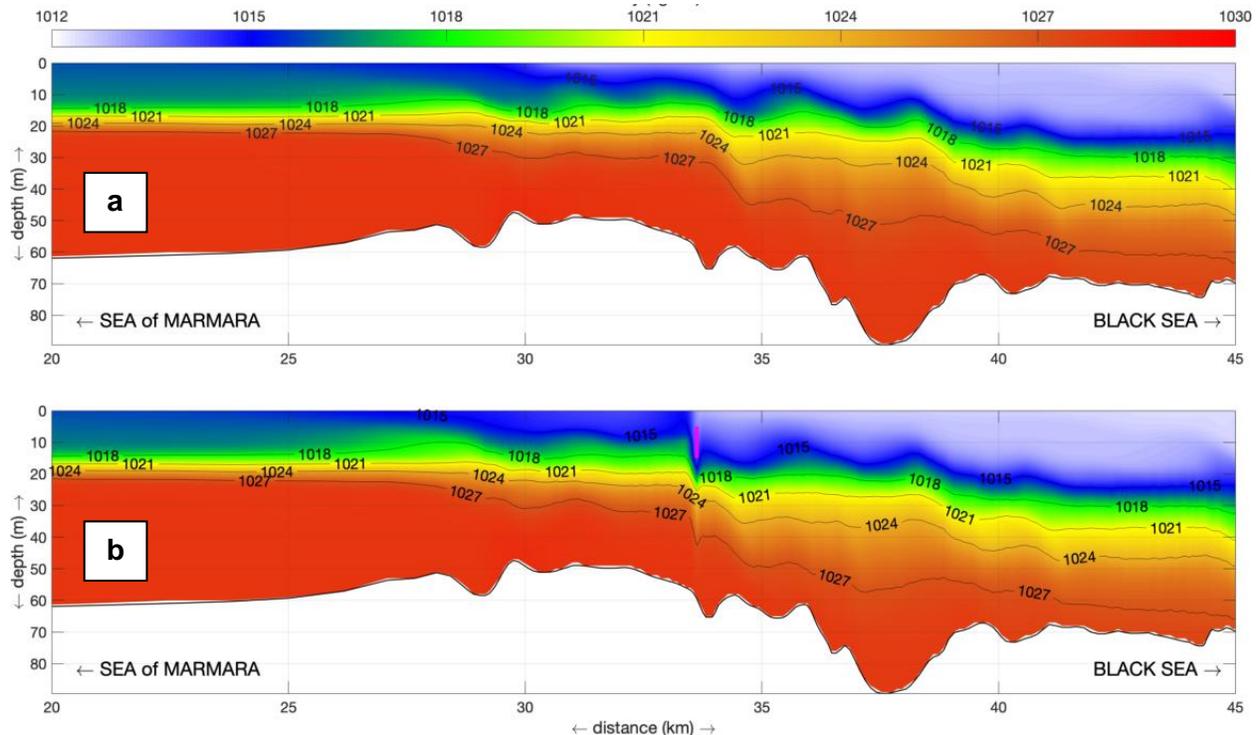


Abbildung 22. Räumliche Veränderungen der Dichtegradienten a) ungestört b) beeinflusst durch die MCTs. Die magentafarbene Linie zeigt den Standort der Turbinengruppe an.

Abbildung 23a und Abbildung 23b visualisieren die simulierten Veränderungen über die Zeit in der Wasser-Schichtstruktur vor dem Turbinenfeld und die daraus resultierenden Unterschiede in den internen Wellen. Wie man sehen kann, nähme die Tiefe der oberen Strömungsschicht zu, und sie würde zeitweise in Richtung des Meeresbodens gedrückt. Dadurch würde sich die Durchmischung zwischen den Schichten völlig verändern und größere Veränderungen von Schichttiefen über die Zeit entstehen. Daraus ergibt sich, dass die Bestimmung des optimalen Array-Standorts von entscheidender Bedeutung ist, um folgenreiche Änderungen der Strömungsbedingungen und der internen Wellen im Bosphorus so gering wie möglich zu halten. Da die Umweltverschmutzung in den Meeren rund um Istanbul bereits heute ein großes Problem darstellt (Erturk & Erten, 2023; Orhon et al., 2021), könnte sich eine mögliche Änderung der Übertragungsdynamik von Wärme, Salz und Nährstoffen zwischen den benachbarten Meeren als großes Umweltrisiko für die Region erweisen. Daher sollten die Ergebnisse dieses Projekts von Forschern, Ingenieuren und politischen Entscheidungsträgern bei der Entwicklung erneuerbarer Meeresenergie in der Region berücksichtigt werden.

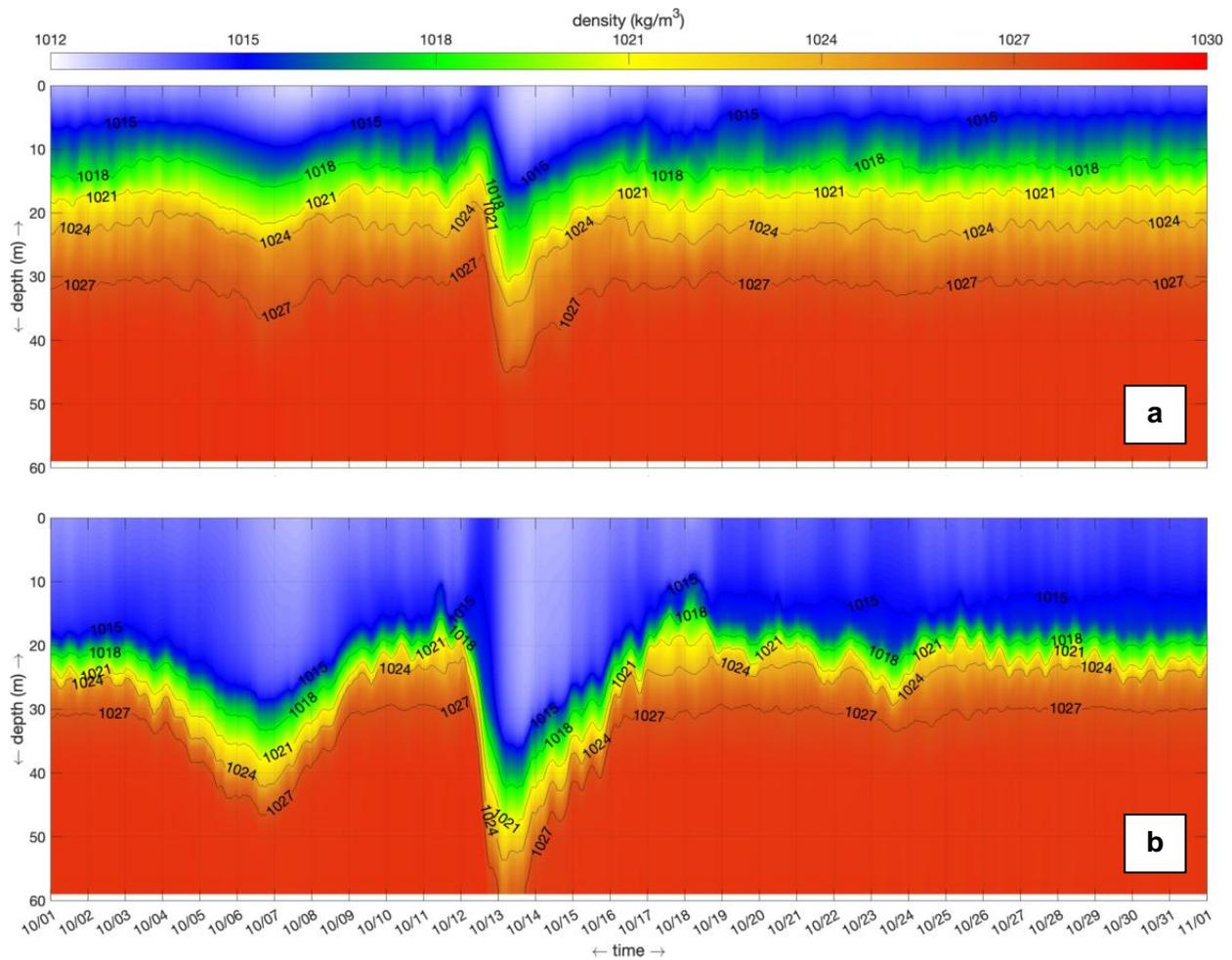


Abbildung 23. Änderungen der Dichtegradienten vor dem Turbinenfeld über die Zeit, a) ungestört und b) beeinflusst durch die MCTs.

Die anderen potenziellen Umweltauswirkungen der MCT-Arrays am Bosphorus, wie etwa Unterwasserlärm und Auswirkungen auf die Routen wandernder Arten, wurden während des gesamten Projekts berücksichtigt, erwiesen sich jedoch, wie bereits erwähnt, als nicht so bedeutend wie die oben diskutierten Auswirkungen. Aufgrund des bereits hohen Lärmpegels im Bosphorus, der durch den industriellen und maritimen Betrieb verursacht wird (Gaziöglu & Okutan, 2016), ist der potenzielle zusätzliche Lärm, der durch MCTs verursacht würde (Haxel et al., 2022), vernachlässigbar. Wenn man überdies bedenkt, dass der für den Turbineneinsatz genutzte Anteil des Kanalquerschnitts durch die Tiefe der Strömungsschichten recht begrenzt ist, auf etwa max. 10-15 % des Kanalquerschnitts, dann sind keine signifikanten Auswirkungen auf die wandernden Arten, die durch den Bosphorus schwimmen (Artüz, 1999; Birpınar et al., 2009), zu erwarten. Dennoch sollten solche Probleme noch einmal detaillierter betrachtet werden, bevor man eine Turbine im Kanal installiert.

Ausblick

Vorläufige Ergebnisse zu den möglichen Auswirkungen der MCTs auf die Strömungsbedingungen im Bosphorus wurden im Rahmen des/der „10th Short Course/Conference on Applied Coastal Research“ vorgestellt, der/die im Sommer 2023 in Istanbul stattfand (Altas et al., 2023). Derzeit wird eine umfassendere Veröffentlichung zu diesem Thema für ein hochkarätiges Q1-Journal vorbereitet. Ein Konferenzbeitrag über die Verbesserungen der Modelleistung, insbesondere zur Vorhersage der Strömungen in der unteren Strömungsschicht, wird im Sommer 2024 in Rom auf der „38th International Conference on Coastal Engineering“, der renommiertesten Konferenz auf diesem Gebiet, präsentiert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden und Werkzeuge werden in weiterer kollaborativer Forschungsarbeit nachgenutzt werden, die u.a. einen Leitfaden für die Analyse von Meerengen mit unterschiedlichen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen entwickeln wird, um deren hydrokinetisches Leistungspotenzial bewerten und die Konfiguration und Lage von MCT-Arrays optimieren zu können. Die Erkenntnisse des Projekts werden auch in einem Workshop diskutiert werden, der im September 2024 in Büsum unter dem Motto „Engineering meets Ecosystem“ stattfinden wird. Schließlich werden das Projekt und seine Ergebnisse eine Grundlage für zukünftige Forschungen bilden, insbesondere, wenn das Projekt in eine zweite Phase übergeht und/oder seine Fortsetzung in einem potenziellen Horizon-Europe-Projekt findet, welches derzeit konzipiert wird.

Fazit

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse des Projekts aufgeführt:

- ✓ Nachweis des erneuerbaren Energiepotenzials einer Meerenge ohne Gezeiten: Die Ergebnisse des Projekts können sich für Forschungs- und Ingenieur Anwendungen in ähnlichen Bereichen als nützlich erweisen. Die Ergebnisse können auch eine Wissensbasis für die Nutzung von Energie aus größeren dichtegetriebenen Strömungen mit ähnlichen Eigenschaften wie z.B. dem Golfstrom liefern.
- ✓ Verbesserung der Qualität der verfügbaren Messungen: Während für den Bosphorus langfristige meteorologische Messungen sowie Messungen des Wasserstands und der Strömungsgeschwindigkeit problemlos verfügbar waren, waren Messungen des Salzgehalts und der Temperatur rar. Durch das Projekt wird die Wissensbasis und die Datenqualität bezüglich dieser Schlüsselparameter verbessert.
- ✓ Verbesserung der Genauigkeit des „Bosphorus-Zirkulationsmodells“: Das verbesserte Modell sagt das Strömungsfeld im Bosphorus detaillierter und präziser vorher.
- ✓ Erfassung der Beziehung zwischen MCTs und geschichteten Strömungen: Durch die im Projekt durchgeführten Messungen und Modellierungsarbeiten wird die Bedeutung der internen Wellen und der Tiefe der Strömungsschichten für die Nutzung der hydrokinetischen Energie aus geschichteten Meeresströmungen deutlich.
- ✓ Ermittlung der möglichen Umweltauswirkungen der MCTs: Die Geschwindigkeitsdefizite sowie die Unterschiede in Dichtegradien und Zirkulationsdynamik wurden detailliert dargestellt. Angesichts des möglichen Einflusses solcher Veränderungen auf Verschmutzungsmuster und Nährstoffdynamik im Bosphorus und in den angrenzenden Meeren wird noch einmal die Bedeutung einer eingehenden Umweltverträglichkeitsprüfung vor dem Einsatz einer Turbine im Kanal betont.

Als nächster Schritt wird die Intensivierung der Forschungsanstrengungen zum besseren Verständnis der Turbulenzdynamik im Bosphorus durch Feldmessungen äußerst nützlich sein. Die Einführung verschiedener KI-Systeme zur Vorhersage der Energieerzeugung aus Bosphorus-Strömungen und zur Optimierung der Netzleistung in Istanbul aus Offshore-Wind-, Wellen- und Meeresströmungsenergieressourcen wäre ein äußerst interessantes Forschungsvorhaben und würde die Entwicklung erneuerbarer Meeresenergie in der Region einen großen Schritt

voranbringen. Eine solche Forschung könnte auch die Ausgestaltung der lokalen Vorschriften und Bebauungspläne zu einem nicht unerheblichen Grad beeinflussen, um die Entwicklung von Meeresenergieprojekten weiter voranzutreiben.

Literaturverzeichnis

- Altas, F., Orhan, K., Deschner, S., Ozturk, M., Sahin, C., Yuksel, Y., Mayerle, R. (2023). About the energy yield from the two-layered bosphorus exchange flow by marine current turbines. In SCACR-10th Short Course/Conference on Applied Coastal Research.
- Artüz, M. L. (1999). Inventory of existing species and their habitats in the Bosphorus area. *Oceanata*, 112(1), 552-564.
- Aydogan, B., Ayat, B., Öztürk, M., Çevik, E. Ö., Yüksel, Y. (2010). Current velocity forecasting in straits with artificial neural networks, a case study: Strait of Istanbul. *Ocean Engineering*, 37(5-6), 443-453.
- Birpınar, M. E., Talu, G. F., & Gönençgil, B. (2009). Environmental effects of maritime traffic on the Istanbul Strait. *Environmental monitoring and assessment*, 152, 13-23.
- Ertürk, A., Erten, E. "Unmixing of Pollution-Associated Sea Snot in the Near Surface After Its Outbreak in the Sea of Marmara Using Hyperspectral PRISMA Data," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 20, pp. 1-5, 2023, Art no. 5501705.
- Koşucu, M. M., Demirel, M. C., Kirca, V. O., Özger, M. (2019). Hydrodynamic and hydrographic modeling of Istanbul strait. *Processes*, 7(10), 710.
- Chen, Y.; Lin, B.; Lin, J. Modelling tidal current energy extraction in large area using a three-dimensional estuary model. *Comput. Geosci.* 2014, 72, 76–83.
- Gazioğlu, C., & Okutan, V. (2016). Underwater noise pollution at the strait of Istanbul (Bosphorus). *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 3(3), 26-39.
- Haxel, J., Zang, X., Martinez, J., Polagye, B., Staines, G., Deng, Z.D., Wosnik, M. and O'Byrne, P., 2022. Underwater Noise Measurements around a Tidal Turbine in a Busy Port Setting. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), p.632.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Orhan, K., Mayerle, R., & Pandoe, W. W., 2015. Assessment of energy production potential from tidal stream currents in Indonesia. *Energy Procedia*, 76, 7-16.
- Orhan, K. & Mayerle, R., 2017. Assessment of the tidal stream power potential and impacts of tidal current turbines in the Strait of Larantuka, Indonesia. *Energy Procedia*, 125, pp.230-239.
- Orhan, K., & Mayerle, R., 2020. Potential hydrodynamic impacts and performances of commercial-scale turbine arrays in the strait of Larantuka, Indonesia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 223.
- Orhon, D., Sözen, S., Kirca, V. S. O., Duba, S., Mermutlu, R., & Sumer, B. M. (2021). Pollutant dynamics between the Black Sea and the Marmara Sea: basis for wastewater management strategy. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112388.
- Ozturk, M., Ayat, B., Aydogan, B. and Yuksel, Y., 2012. 3D Numerical modeling of stratified flows: case study of the Bosphorus Strait. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 138(5), pp.406-419.
- Ozturk, M., 2013. Numerical modeling of the effect of duration of barotropic forcing on sea strait flow: case study of the Bosphorus Strait. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), pp.1199-1211.
- Ozturk, M., Sahin, C. and Yuksel, Y., 2017. Current power potential of a sea strait: The Bosphorus. *Renewable Energy*, 114, pp.191-203.
- Ramos, Carballo & Ringwood (2019): Application of the actuator disc theory of Delft3D-FLOW to model far-field hydrodynamic impacts of tidal turbines. *Renewable energy*, 139, 1320-1335.
- Sanchez, M., Carballo, R., Ramos, V., Iglesias, G., 2014. Floating vs. bottom-fixed turbines for tidal stream energy: a comparative impact assessment. *Energy* 72, 691-701
- UNESCO, IOC. (2022). Sea Level Station Monitoring Facility. Available at www.ioc-sealevelmonitoring.org (last accessed on 18.10.2023).
- Yuksel, Y., Ayat, B., Ozturk, M.N., Aydogan, B., Guler, I., Cevik, E.O. and Yalçiner, A.C., 2008. Responses of the stratified flows to their driving conditions—A field study. *Ocean Engineering*, 35(13), pp.1304-1321.